

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDAKİ  
DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE  
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**İnş. Müh. Yunus Emrahan AKBULUT**

**HAZİRAN 2018  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**

**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yunus Emrahan AKBULUT Tarafından Hazırlanan**

**BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDAKİ DİNAMİK  
KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 29 / 05 / 2018 gün ve 1755 sayılı  
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
olarak kabul edilmiştir.

**Jüri Üyeleri**

**Başkan : Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK**



**Üye : Doç. Dr. Serkan ÖZTÜRK**



**Üye : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA**



**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır. Ayrıca bu çalışma devam etmekte olan ve 3001 – Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenen 117M819 kodlu “Betonarme ve Çelik Taşıyıcı Sistem Elemanlarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Dinamik Karakteristik Değişimlerinin Analitik ve Deneysel Yöntemlerle İncelenmesi” isimli TÜBİTAK projesi kapsamında gerçekleştirilmiş olup, bu proje için veri tabanı niteliği taşımaktadır.

“Betonarme Kolonların Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Dinamik Karakteristik Değişimlerinin Sayısal Yöntemlerle İncelenmesi” isimli tez çalışmasını bana öneren ve her aşamasında gerek bilgi ve tecrübelerini gerekse maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Hocam Sayın Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamı başından beri takip eden, inceleyen ve değerli görüş ve bilgilerini benimle paylaşan, gerçekleştirilen çoklu analizlerde gece-gündüz demeden, değerli zamanını ve emeğini benim için harcamaktan kaçınmayan değerli Hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Basri BAŞAĞA'ya en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince danıştığım her konuda bana yardımcı olan, değerli bilgi ve önerilerini benimle paylaşan Sayın Doç. Dr. Serdar SELAMET, TSE Uzmanı Sayın Ahmet Fazıl KARA ve İnş. Yük. Müh. Hüseyin VAROL'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın her aşamasında yanımda olan ve yardımlarıyla çalışmamın başarıya ulaşmasında büyük katkıları olan Arş. Gör. Olguhan Şevket KARAHASAN, Arş. Gör. Fatih Yesevi OKUR, İnş. Müh. Fatma ÖNALAN, İnş. Müh. Orhan Ozan YAVUZ, Mak. Müh. Bertan NUHOĞLU ve Mak. Müh. Rüstem Kayra KARAAHMET'e teşekkür ederim.

Yüksek sıcaklık test fırınının üniversite bünyesine kazandırılmasında maddi ve manevi büyük desteği olan Fizik Müh. Sayın Murat ÇİFTÇİ'ye teşekkür ederim.

Yüksek lisans tezimi 3001 – Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Öğrenim hayatım boyunca bana her türlü desteği veren annem Zehra AKBULUT'a ve kardeşim Mim. Mustafa AKBULUT'a göstermiş oldukları sabırdan dolayı teşekkür eder, bu çalışmamın yeni çalışmalara ışık tutmasını ve ülkemize faydalı olmasını dilerim.

Yunus Emrahan AKBULUT  
Trabzon 2018

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDAKİ DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ” 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. 29/06/2018

Yunus Emrahan AKBULUT

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	IX
SUMMARY .....	X
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XVII
SEMBOLLER DİZİNİ .....	XIX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar .....	4
1.3. Tezin Amacı ve İçeriği .....	10
1.4. Yangın ile İlgili Temel Bilgiler ve Yangın Güvenliği.....	11
1.4.1. Yangın Üçgeni .....	11
1.4.2. Yangının Gelişim Aşamaları ve Genel Tutuşma .....	12
1.4.2.1. Genel Tutuşma Öncesi.....	12
1.4.2.2. Genel Tutuşma .....	14
1.4.2.3. Genel Tutuşma Sonrası.....	15
1.4.3. Yangın Güvenliği ve Amaçları .....	16
1.5. Yangına Tepki ve Yangına Dayanım.....	17
1.6. Beton ve Yangın .....	18
1.6.1. Fiziksel ve Kimyasal Tepki .....	18
1.6.2. Kavlanma .....	20
1.7. Yangın Başarımının Belirlenmesi.....	21
1.8. Betonarme Yapılarda Yangın Başarımının Belirlenmesi .....	22
1.9. Yangın Başarımlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler.....	23
1.9.1. Deneysel Yöntemler .....	23
1.9.2. Talimata Dayalı Yöntemler .....	23

1.9.3.	Performansa Dayalı Yöntemler .....	24
1.9.4.	Doğrulama Yöntemleri .....	24
1.9.4.1.	Yapının Tamamının Analizi .....	24
1.9.4.2.	Yapının Bir Bölümünün Analizi.....	25
1.9.4.3.	Eleman Analizi .....	25
1.10.	Betonarme Yapılarda Yangın Tasarımı .....	25
1.10.1.	Yangına Dayanım .....	25
1.10.2.	Tasarım Stratejileri .....	26
1.10.2.1.	Yangın Senaryosunun Seçilmesi .....	27
1.10.2.2.	Tasarım Yangınının Belirlenmesi.....	27
1.10.2.3.	Sıcaklık Profillerinin Belirlenmesi .....	28
1.10.2.4.	Mekanik Davranışın Hesaplanması .....	28
1.10.2.5.	Yangın Dayanımının Değerlendirilmesi.....	28
1.10.3.	Sıcaklık Analizi İçin Isıl Etkiler .....	29
1.10.3.1.	Net Isı Akısı .....	30
1.10.3.2.	Temsili Sıcaklık-Zaman Eğrileri .....	31
1.10.3.2.1.	Standart Sıcaklık-Zaman Eğrileri .....	31
1.10.3.2.2.	Harici Yangın Eğrisi .....	32
1.10.3.2.3.	Hidrokarbon Eğrisi .....	33
1.10.3.3.	Doğal Yangın Modelleri .....	33
1.10.3.3.1.	Basitleştirilmiş Yangın Modelleri.....	34
1.10.3.3.1.1.	Parametrik Sıcaklık-Zaman Eğrileri .....	35
1.10.3.3.1.2.	Lokal Yangın Modelleri.....	41
1.10.3.3.2.	Gelişmiş Yangın Modelleri.....	42
1.10.3.3.2.1.	Bölge Modelleri .....	42
1.10.3.3.2.2.	HAD Modelleri .....	43
1.10.4.	Yapısal Analiz İçin Mekanik Etkiler .....	44
1.10.5.	Yapısal Dayanımın Değerlendirilmesi.....	44
1.10.5.1.	Tablolaştırılmış Verilerin Kullanımı .....	45
1.10.5.2.	Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemleri .....	46
1.10.5.3.	Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri .....	48
1.10.5.3.1.	Isıl Tepki Modeli .....	48
1.10.5.3.2.	Mekanik Tepki Modeli .....	49

1.11.	Beton ve Donatı Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi .....	49
1.11.1.	Beton Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi .....	49
1.11.1.1.	Özgül Ağırlığın Değişimi .....	49
1.11.1.2.	Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi .....	51
1.11.1.3.	Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi .....	52
1.11.1.4.	Özgül Isı Katsayısının Değişimi .....	54
1.11.1.5.	Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Değişimi .....	55
1.11.1.6.	Basınç Dayanımının Değişimi .....	58
1.11.1.7.	Çekme Dayanımının Değişimi .....	62
1.11.1.8.	Elastisite Modülünün Değişimi .....	63
1.11.2.	Donatı Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi .....	66
1.11.2.1.	Özgül Ağırlığın Değişimi .....	66
1.11.2.2.	Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi .....	66
1.11.2.3.	Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi .....	68
1.11.2.4.	Özgül Isı Katsayısının Değişimi .....	69
1.11.2.5.	Yüksek Sıcaklıklarda Akma Dayanımının Belirlenmesi .....	70
1.11.2.6.	Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Değişimi .....	71
1.12.	Isıl Çözümleme .....	74
1.12.1.	Enerjinin Korunumu İlkesi ve Isı Transferi Rejimleri .....	74
1.12.2.	Isı Transferi .....	75
1.12.2.1.	Taşınım ve Işınım .....	76
1.12.2.2.	İletim .....	77
1.12.3.	Isıl Çözümleme Yöntemleri .....	77
1.12.3.1.	Tasarım Grafikleri Yöntemi .....	77
1.12.3.2.	Analitik Yöntemler .....	83
1.12.3.2.1.	Wickström Yöntemi .....	83
1.12.3.2.2.	Hertz Yöntemi .....	84
1.12.3.3.	Sayısal Yöntemler .....	86
1.13.	Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	88
1.13.1.	Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	88
1.13.2.	Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	90
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR .....	92
2.1.	Giriş .....	92



2.2.	Isıl Çözümlemelerin Doğrulanması .....	92
2.2.1.	Isıl Çözümlemelerde Dikkate Alınan Malzeme Özellikleri .....	93
2.2.2.	500°C'lik Eş Sıcaklık Eğrisi Derinliğinin Belirlenmesi .....	95
2.2.3.	Geçici Rejimde Bir Boyutlu Isı İletimi Probleminin Doğrulanması .....	96
2.2.3.1.	Yangına Yalnızca Bir Yüzeyinden Maruz Kalan Beton Döşemenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	97
2.2.3.2.	Döşeme Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Isıl Çözümlemeler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	101
2.2.4.	Geçici Rejimde İki Boyutlu Isı İletimi Probleminin Doğrulanması .....	110
2.2.4.1.	Tüm Yan Yüzeylerinden Yangına Maruz Kalan Beton Kolonun Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	111
2.2.4.2.	Kolon Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Isıl Çözümlemeler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	114
2.3.	Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi.....	122
2.3.1.	Donatı Çeliğinin Dinamik Karakteristiklere Etkisi .....	123
2.3.2.	Dikkate Alınan Değişken Parametreler .....	125
2.3.2.1.	Enkesit Boyutları .....	125
2.3.2.2.	Beton Sınıfı .....	126
2.3.2.3.	Sıcaklık Geçmişi .....	127
2.3.3.	Değişken Parametreler Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Modal Analizler ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi .....	128
2.3.3.1.	Tüm Yan Yüzeylerinden Yangına Maruz Kalan Beton Kolonun Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması.....	130
2.3.3.2.	Kolon Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Modal Analizler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi .....	132
2.3.4.	Değişken Parametrelerin Analiz Sonuçlarına Etkileri .....	135
2.3.5.	Geliştirilen Formülasyon ve Sunulan Grafik/Abaklar .....	140
2.3.5.1.	Grafik/Abakların Oluşturulması .....	141
2.3.5.2.	Grafik/Abakların Kullanım Alanları.....	173
3.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	174
4.	KAYNAKLAR .....	181

ÖZGEÇMİŞ

## Yüksek Lisans Tezi

### ÖZET

#### BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDAKİ DİNAMİK KARAKTERİSTİK DEĞİŞİMLERİNİN SAYISAL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Yunus Emrahan AKBULUT

Karadeniz Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK

2018, 185 Sayfa

Bu tez çalışmasında, betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkilerinden dolayı dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin hızlı bir şekilde belirlenmesi, hasar tahminlerinin yapılması ve rijitlik değişimlerine bağlı kullanım durumunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, betonarme kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler; farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler göz önünde bulundurularak sayısal yöntemlerle belirlenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışması üç bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm genel bilgiler bölümü olup; yangın ile ilgili temel bilgiler, yangın güvenliği, mühendislik yapılarının yangın başarımlarının belirlenmesi, betonarme yapılarda yangın tasarımı, yüksek sıcaklık etkisiyle yapı malzemelerinde meydana gelen değişimler, ısıl çözümlene ve dinamik karakteristiklerin belirlenmesi, bu bölümde sunulmaktadır. İkinci bölümde; yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgulara yer verilmektedir. İkinci bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinden elde edilen veriler, diğer ısı çözümlene yöntemleri kullanılarak elde edilen verilerle karşılaştırılmıştır. İkinci kısımda ise; kolon elemanlar için değişken parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen verilere dayalı olarak üretilen formülasyon ve grafik/abaklara yer verilmiştir. Üçüncü bölümde; tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

**Anahtar Kelimeler :** Yüksek Sıcaklık, Yangın, Betonarme Kolon, Dinamik Karakteristik, Isı Transferi, Modal Analiz

Master Thesis

SUMMARY

EVALUATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS CHANGING FOR  
REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER EFFECT OF ELEVATED  
TEMPERATURE BY USING NUMERICAL METHODS

Yunus Emrahan AKBULUT

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Civil Engineering Graduate Program  
Supervisor: Prof. Dr. Ahmet Can ALTUNIŞIK  
2018, 185 Page

In this thesis study, it is aimed to determine rapidly changes in dynamic characteristics of reinforced concrete columns under effect of elevated temperature, to make damage estimations and to determine the usage situation due to stiffness changes. For this purpose, the changes in the dynamic characteristics of reinforced concrete columns are determined by numerical methods, considering variable parameters like cross-sectional dimensions, material properties and temperature history.

The master thesis work consists of three parts. The first section is the general information section; basic information about fire, fire safety, determination of fire performances of engineering structures, fire design in reinforced concrete structures, changes that occur in building materials due to elevated temperature effect, thermal analysis and determination of dynamic characteristics are presented in this section. Studies and the findings obtained from these studies are mentioned in the second chapter. The work carried out in the second chapter is divided into two parts. In the first part; the data obtained from the heat transfer analysis performed with the help of the ABAQUS finite element program were compared with the data obtained using other thermal analysis methods. In the second part; the formulation and graphic/abaques generated based on the data obtained from the modal analysis carried out by considering the variable parameters for the column elements are given. In the third chapter; the results obtained from the thesis study and suggestions made are given. References and curriculum vitae follow this chapter.

**Key Words** : Elevated Temperature, Fire, Reinforced Concrete Column, Dynamic Characteristic, Heat Transfer, Modal Analysis

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1.	Yangın üçgeni ..... 11
Şekil 1.2.	Yangının gelişim aşamaları..... 12
Şekil 1.3.	Bir oda yangının ilk aşamaları ..... 13
Şekil 1.4.	Doğal bir yangın eğrisi ile standart bir yangın eğrisinin karşılaştırılması ve genel tutuşma..... 15
Şekil 1.5.	Temsili sıcaklık-zaman eğrileri ve bu eğrilerin karşılaştırılması..... 33
Şekil 1.6.	Alevin bölme tavanını etkilediği (a) ve etkilemediği (b) durumlar için lokal yangın modelleri..... 35
Şekil 1.7.	Bütün dış yüzeyleri yangın etkisi altında olan betonarme bir kolona ait 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi ..... 47
Şekil 1.8.	Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi ..... 50
Şekil 1.9.	Betonun ısıl genişmesinin yüksek sıcaklıkla değişimi..... 52
Şekil 1.10.	Betonun ısıl iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi ..... 53
Şekil 1.11.	Betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi..... 55
Şekil 1.12.	Yüksek sıcaklıklarda tek eksenli basınç uygulanan betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik model..... 55
Şekil 1.13.	Silisli ve kalkerli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı beton ve hafif ağırlıklı betonların yüksek sıcaklıklarda dayanım azaltma katsayısının değişimi ..... 57
Şekil 1.14.	EN 1992-1-2'de (2004) sunulan matematik model yardımıyla elde edilen, tek eksenli basınç uygulanan silisli ve kalkerli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonun farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları ..... 58
Şekil 1.15.	Silis kökenli agregalar kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model..... 59
Şekil 1.16.	Kalker kökenli agregalar kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model..... 59
Şekil 1.17.	Hafif ağırlıklı betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model ..... 60
Şekil 1.18.	Betonun karakteristik basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi..... 61

Şekil 1.19.	Betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model.....	62
Şekil 1.20.	Betonun karakteristik çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	63
Şekil 1.21.	Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model.....	64
Şekil 1.22.	Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi .....	65
Şekil 1.23.	Karbon çeliğinin ısı genleşme katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	67
Şekil 1.24.	Karbon çeliğinin ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	68
Şekil 1.25.	Karbon çeliğinin özgül ısı katsayılarının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	69
Şekil 1.26.	Yüksek sıcaklıklarda karbon çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik model.....	71
Şekil 1.27.	Karbon çeliğinin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için azaltma katsayıları.....	73
Şekil 1.28.	EN 1993-1-2'de (2005) sunulan matematik model yardımıyla elde edilen, S460 karbon çeliğinin farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları.....	74
Şekil 1.29.	Eleman enkesit alanlarında simetrik bir sıcaklık dağılımı beklenen durumlar için sıcaklık profillerinin temsil edilme şekli.....	79
Şekil 1.30.	Yangına tek yüzünden maruz kalan 200 mm kalınlığındaki döşeme için R30 – R240 yangın başarım sürelerine ait sıcaklık profilleri .....	80
Şekil 1.31.	Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 30 dakikalık yangın başarım süresine (R30) ait sıcaklık profilleri .....	81
Şekil 1.32.	Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 60 dakikalık yangın başarım süresine (R60) ait sıcaklık profilleri .....	81
Şekil 1.33.	Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 90 dakikalık yangın başarım süresine (R90) ait sıcaklık profilleri .....	82
Şekil 1.34.	Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 120 dakikalık yangın başarım süresine (R120) ait sıcaklık profilleri .....	82
Şekil 2.1.	Bir boyutlu ısı iletimi problemine ait örnek görsel.....	97
Şekil 2.2.	Beton döşeme modeli.....	98

Şekil 2.3.	Beton döşeme modeline ait sonlu eleman modeli.....	99
Şekil 2.4.	200 mm kalınlığındaki beton döşeme modelinin, ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda, model kesiti içinde oluşan sıcaklık dağılımları .....	102
Şekil 2.5.	200 mm kalınlığındaki beton döşeme modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda, model kesiti içindeki 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait derinlikler.....	105
Şekil 2.6.	Beton döşemenin sonlu eleman modeli üzerinden seçilen düğüm noktaları .....	109
Şekil 2.7.	Yangına maruz kalma süresi boyunca, Şekil 2.6'da verilen düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri.....	110
Şekil 2.8.	Beton kolon modeli.....	111
Şekil 2.9.	Beton kolon modeline ait sonlu eleman modeli.....	113
Şekil 2.10.	300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolon modelinin, ISO 834 standart yangın eğrisine tüm dış yüzeylerinden maruz kalması durumunda model enkesiti içinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	115
Şekil 2.11.	Tüm yan yüzeylerinden standart yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolonun, belirli süreler için eleman enkesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumlar .....	118
Şekil 2.12.	ISO 834 standart yangın eğrisine tüm yan yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolonun enkesiti içinde 30, 60, 90 ve 120 dakika sonunda oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumlar .....	119
Şekil 2.13.	Beton kolonun sonlu eleman modelinin enkesiti üzerinden seçilen düğüm noktaları .....	121
Şekil 2.14.	Yangına maruz kalma süresi boyunca, Şekil 2.13'te verilen düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri.....	121
Şekil 2.15.	Sıcaklık geçmişinin olmadığı durum için kolon modeline ait ilk üç mod şekli .....	134
Şekil 2.16.	ISO 834 standart yangınına 180 dakika maruz kalan kolon modeline ait ilk üç mod şekli.....	134
Şekil 2.17.	Bazı sistemlerin rijitlikleri .....	136
Şekil 2.18.	C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçmişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	143

Şekil 2.19.	C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	144
Şekil 2.20.	C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	145
Şekil 2.21.	C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	146
Şekil 2.22.	C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	147
Şekil 2.23.	C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	148
Şekil 2.24.	C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	149
Şekil 2.25.	C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	150
Şekil 2.26.	C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	151
Şekil 2.27.	C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	152
Şekil 2.28.	C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	153
Şekil 2.29.	C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	154

Şekil 2.30.	C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	155
Şekil 2.31.	C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	156
Şekil 2.32.	C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	157
Şekil 2.33.	C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	158
Şekil 2.34.	C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	159
Şekil 2.35.	C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	160
Şekil 2.36.	C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	161
Şekil 2.37.	C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	162
Şekil 2.38.	C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	163
Şekil 2.39.	C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	164
Şekil 2.40.	C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	165



Şekil 2.41.	C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	166
Şekil 2.42.	C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	167
Şekil 2.43.	C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	168
Şekil 2.44.	C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	169
Şekil 2.45.	C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	170
Şekil 2.46.	C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	171
Şekil 2.47.	C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları.....	172

## TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Çeşitli yüzey malzemelerinin özellikleri .....	36
Tablo 1.2. Kullanım amacına göre yangının gelişme hızı ve $t_{lim}$ (dakika) süresi .....	39
Tablo 1.3. Yangın dayanımı için alternatif doğrulama yöntemleri .....	48
Tablo 1.4. Bazı beton nem içeriklerine karşılık gelen özgül ısı pik değerleri.....	54
Tablo 1.5. Silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonun (NAB) yüksek sıcaklıkta gerilme-şekil değiştirme ilişkisine ait ana parametrelerin değerleri .....	56
Tablo 1.6. Farklı eleman türleri için birim deformasyon sınırları.....	70
Tablo 1.7. Karbon çeliğinin yüksek sıcaklıktaki gerilme ve tanjant modülünün belirlenmesinde kullanılan formüller.....	72
Tablo 1.8. Sıcak haddelenmiş ve soğuk işlenmiş donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait parametrelerin yüksek sıcaklıklardaki değerleri.....	73
Tablo 1.9. Çeşitli enkesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının farklı yangın başarımları için sıcaklık profilleri .....	78
Tablo 1.10. Standart yangın koşulları altında beton elemanlar için sıcaklık analizi parametreleri.....	86
Tablo 2.1. Döşemeye ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri .....	99
Tablo 2.2. Çeşitli tasarım yangın modellerinde kullanılan taşınımın gerçekleşen ısı transferi katsayılarına ait değerler .....	100
Tablo 2.3. Eurocode'a göre bazı malzeme yüzeylerinin ısı yayıcılığı .....	101
Tablo 2.4. Beton döşeme modelinin çeşitli ısı çözümü yöntemlerinden elde edilen yangına maruz kalan yüzeyindeki sıcaklık değerleri.....	104
Tablo 2.5. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçların diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.....	104
Tablo 2.6. Yangına maruz kalma süresine bağlı olarak çeşitli ısı çözümü yöntemleri kullanılarak elde edilen ve beton döşeme modeli kesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan yüzeye olan mesafesi (mm) .....	108
Tablo 2.7. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçların diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması.....	108
Tablo 2.8. Beton kolona ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri .....	112

Tablo 2.9.	Sonlu eleman yöntemiyle yapılan modellemelerde donatı çeliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi .....	124
Tablo 2.10.	Dikkate alınan kolonların enkesitlerine ait kısa ve uzun kenar ölçüleri .....	125
Tablo 2.11.	Dikkate alınan beton sınıflarının oda koşullarındaki dayanımları ve elastisite modülleri .....	126
Tablo 2.12.	Betonun elastisite modülü azaltma katsayıları.....	128
Tablo 2.13.	Beton sınıfı C25 olan kolon modeline ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri.....	131
Tablo 2.14.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip beton kolon modelinin sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen ilk üç moduna ait doğal frekanslar .....	133
Tablo 2.15.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip beton kolon modelinin sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekans azalma oranları .....	133
Tablo 2.16.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan, 400x400 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip kolon modelinin 6 farklı beton sınıfı için sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslar .....	137
Tablo 2.17.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan, 400x400 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip kolon modelinin farklı beton sınıfları için sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslarda meydana gelen yüzdesel azalma oranları.....	138
Tablo 2.18.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan enkesitine ait kısa kenar uzunluğu 40 cm olan, 3 m yüksekliğindeki 15 farklı kolon modelinin sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslar.....	139
Tablo 2.19.	Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan enkesitine ait kısa kenar uzunluğu 40 cm olan, 3 m yüksekliğindeki 15 farklı kolon modelinin sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslarda meydana gelen yüzdesel azalma oranları .....	140

## SEMBOLLER DİZİNİ

$A_f$	: Bölmenin taban alanı
$A_i$	: Açıklıklar dahil olmamak üzere $i$ . tabakanın alanı
$A_j$	: Açıklıklarda dahil olmak üzere yangına maruz kalan bölme sınırlarının toplam alanı
$A_v$	: Açıklık alanı
$A_{vi}$	: $i$ . açıklığın alanı
$b$	: Toplam ısı emme kapasitesi ile ilgili parametre
$b_i$	: $i$ . tabaka için toplam ısı emme kapasitesi
$C$	: Sönüm
$C$	: Hertz yönteminde kullanılan zamana bağlı parametre
$c$	: Özgül ısı katsayısı
$c_c$	: Betonun özgül ısı katsayısı
$c_{c,pik}$	: Betonun özgül ısı katsayısının pik değeri
$c_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun özgül ısı katsayısı
$c_s$	: Çeliğin özgül ısı katsayısı
$c_s(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin özgül ısı katsayısı
$D$	: Yangının çapı, Hertz yönteminde kullanılan zamana bağlı parametre
$E$	: Elastisite modülü, bütünlük kriteri
$E$	: Bütünlük kriteri, Hertz yönteminde kullanılan zamana bağlı parametre
$E_c$	: Betonun elastisite modülü
$E_{c,\theta}$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun tanjant modülü
$E_{d,fi}$	: Yangın durumunda uygulanan yük
$E_s$	: Çeliğin elastisite modülü
$E_{s,\theta}$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin tanjant modülü
$\dot{E}_g$	: Enerji üretimi
$\dot{E}_i$	: Kontrol hacmine birim zamanda giren enerji
$\dot{E}_o$	: Kontrol hacminden birim zamanda çıkan enerji

$\dot{E}_{st}$	: Kontrol hacminde birim zamanda depolanan enerji
$f_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun basınç dayanımı
$f_{ck}(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun karakteristik basınç dayanımı
$f_{ck}(20^\circ C)$	: Oda koşullarındaki betonun karakteristik basınç dayanımı
$f_{ck,t}(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun karakteristik çekme dayanımı
$f_{ck,t}(20^\circ C)$	: Oda koşullarındaki betonun karakteristik çekme dayanımı
$f_{p,\theta}$	: Orantılılık sınırı
$f_y$	: Oda koşullarındaki çeliğin akma dayanımı
$f_{y,\theta}$	: Etkili akma dayanımı
$f_1$	: 1. moda ait doğal frekans değeri
$H$	: Yangın kaynağı ile bölme tavanı arasındaki düşey mesafe
$h$	: Açıklık yüksekliği
$h_{eq}$	: Açıklık yüksekliklerinin ağırlıklı ortalaması
$h_f$	: Döşeme kalınlığı
$h_i$	: $i$ . açıklığın yüksekliği
$\dot{h}_{net}$	: Eleman yüzeyindeki net ısı akısı
$\dot{h}_{net,c}$	: Taşınım ile gerçekleşen net ısı akısı
$\dot{h}_{net,r}$	: Işınım ile gerçekleşen net ısı akısı
$I$	: Yalıtım kriteri, atalet momenti
$i$	: Tabaka numarası
$K$	: Rijitlik matrisi
$k$	: Rijitlik
$k_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun basınç dayanımı azaltma katsayısı
$k_{c,t}(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun çekme dayanımı azaltma katsayısı
$k_E(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun elastisite modülü azaltma katsayısı
$k_{E,\theta}$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin elastisite modülü azaltma katsayısı
$k_{p,\theta}$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin orantılılık sınırı azaltma katsayısı
$k_{y,\theta}$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin akma dayanımı azaltma katsayısı
$L$	: Hertz yönteminde soğuma aşaması için kullanılan zamana bağlı parametre

$L_f$	: Alevin düşey yüksekliği
$M$	: Kütle matrisi
$m$	: Kütle
$O$	: Düşey duvarlardaki açıklıklar ile ilgili parametre
$p(t)$	: Zamana bağlı yük
$Q$	: Isı salınım miktarı
$q_{f,d}$	: Bölmenin taban alanı ile ilgili yangın yükü yoğunluğunun tasarım değeri
$q_{t,d}$	: Tasarım yangın yükü yoğunluğu
$R$	: Yangın başarım süresi, yük taşıma kriteri
$R_{d,t,fi}$	: Yangın durumunda yük taşıma kapasitesi
$R(t)$	: Kuvvet vektörü
$s_i$	: $i$ . tabakanın kalınlığı
$s_{sınır}$	: Tabaka kalınlığı sınırı
$T$	: Sıcaklık geçmişi, yangına maruz kalma süresi
$t$	: Zaman
$t^*$	: Genişletilmiş zaman
$t_{lim}$	: Yangının gelişme hızına bağlı sınır değer
$t_{max}$	: Isıtma aşamasının süresi
$U(t)$	: Zamana bağlı yerdeğiştirme
$\dot{U}(t)$	: Zamana bağlı hız
$\ddot{U}(t)$	: Zamana bağlı ivme
$u$	: Betonun ağırlıkça nem içeriği (%)
$u_x$	: Betonun ısıl yayılım katsayısına ait düzeltme faktörü
$X$	: Kolon enkesitinin kısa kenar ölçüsü
$x$	: Yangına maruz kalan yüzeye olan mesafe
$x_{500}$	: 500°C'lik eş sıcaklık eğrisine ait derinlik
$Y$	: Kolon enkesitinin uzun kenar ölçüsü
$Z$	: Kullanılan beton sınıfına bağlı elastisite modülü
$\alpha$	: Isıl yayılım katsayısı
$\alpha$	: Faz açısı
$\alpha_c$	: Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı, betonun ısıl yayılım katsayısı
$\Gamma$	: Zaman parametresi

$\Delta E_{st}$	: Bir $\Delta t$ zaman aralığı için depolanan enerji
$\Delta l / l$	: Isıl genleşme katsayısı
$\Delta t$	: Zaman aralığı
$\Delta \theta_c$	: Beton sıcaklığındaki artış
$\varepsilon$	: Şekildeğiştirme
$\varepsilon_c$	: Betonun ısı genleşme katsayısı
$\varepsilon_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun ısı genleşme katsayısı, betonun şekildeğiştirmesi
$\varepsilon_{c1,\theta}$	: $f_c(\theta)$ 'ya karşılık gelen birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_f$	: Yangının ısı yayıcılığı
$\varepsilon_m$	: Beton yüzeyinin ısı yayıcılığı
$\varepsilon_{p,\theta}$	: Orantılılık sınırındaki birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_s$	: Çeliğin ısı genleşme katsayısı
$\varepsilon_s(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin ısı genleşme katsayısı
$\varepsilon_{t,\theta}$	: Akma dayanımı için birim şekildeğiştirme sınırı
$\varepsilon_{u,\theta}$	: Nihai birim şekildeğiştirme
$\varepsilon_{y,\theta}$	: Akma başlangıcındaki birim şekildeğiştirme
$\eta_w$	: Wickström yönteminde kullanılan zamana bağlı parametre
$\eta_x$	: Wickström yönteminde kullanılan mesafe parametresi
$\eta_y$	: Wickström yönteminde kullanılan mesafe parametresi
$\theta$	: Sıcaklık
$\theta_c$	: Beton sıcaklığı
$\theta_g$	: Gaz sıcaklığı
$\theta_m$	: Yüzey sıcaklığı
$\theta_{max}$	: Isıtma aşaması sonundaki gaz sıcaklığı
$\theta_r$	: Ortamdaki ışıma sıcaklığı
$\theta_s$	: Çelik sıcaklığı
$\theta_w$	: Yüzey sıcaklığı
$\lambda$	: Isıl iletkenlik katsayısı
$\lambda_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun ısı iletkenlik katsayısı

$\lambda_s(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki çeliğin ısı iletkenlik katsayısı
$\rho$	: Özgöl ağırlık
$\rho_c$	: Betonun özgöl ağırlığı
$\rho_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun özgöl ağırlığı
$\rho_c(20^\circ C)$	: Betonun oda koşullarındaki özgöl ağırlığı
$\rho_s$	: Çeliğin özgöl ağırlığı
$\sigma$	: Gerilme
$\sigma^{sb}$	: Stephan Boltzmann sabiti
$\sigma_c(\theta)$	: $\theta$ sıcaklığındaki betonun basınç gerilmesi
$\Phi$	: Düzenleme faktörü
$\phi$	: Hareketin genlik vektörü
$\omega_n$	: Doğal 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

Sıcaklık, dünyadaki pek çok fiziksel ve kimyasal değişimin esas nedenleri arasında yer almaktadır. Kayaçlara, buzullara, metallere vb. maddelere etki eden sıcaklık, inşa edilen mühendislik yapıları ile taşıyıcı sistem elemanlarına da tesir etmektedir. Örneğin; zemin katında fırın olan bir bina, demir-çelik sanayisi içerisinde yer alan bir yapı veya termik elektrik santralleri, yüksek sıcaklıktan önemli derecede etkilenmekte ve zaman içerisinde yapısal hasarlar da görebilmektedir.

Yangın; katı, sıvı veya gaz halindeki yanıcı maddelerin kontrol dışı yanma olayı olarak ifade edilmekte olup, yüksek sıcaklık meydana getiren ve mühendislik yapıları için yapısal davranışı etkileyecek en önemli olaylardan bir tanesidir. Ne zaman çıkacağı ve ne kadar süreceği belli olmayan yangın, her türlü yapıya etki edebilmekte ve meydana geldiğinde insanoğluna, çevreye ve ekonomiye çok büyük zararlar verebilmektedir.

Genova İstatistik Derneği'nin yaptığı araştırmaya göre, sadece İngiltere'de bina yangınlarının sayısı yıllık ortalama 100.000'i bulmaktadır. Ülke ekonomisine zararı ise yıllık ortalama 1.9 milyar € olarak tahmin edilmektedir. Yangınlardan dolayı hayatını kaybeden insan sayısı ise son 20 yıldır düşüş göstermekle beraber yıllık ortalama 600'ü bulmaktadır. Bina yangınlarının ekonomiye verdiği zarar diğer gelişmiş ülkelerde de oldukça yüksektir. ABD'de bu rakam 17 milyar \$'ı, Almanya'da ise 3 milyar €'yu bulmaktadır. Bu ekonomik yüke karşılık, ABD'de yakın zamanda yaşanan 1994 Northridge depremi için 20 milyar \$ zarar öngörülmüştür. Yıllık ortalamadan hesap edilirse, 1994'den bu yana bina yangınlarının ABD'ye maliyeti yaklaşık 350 milyar \$'dır. Bu karşılaştırma, yangının gelişmiş ülkelere depremden daha ciddi bir ekonomik zarara neden olduğunu veya olabileceğini açıkça göstermektedir (Selamet, 2017).

İstanbul İtfaiyesi'nden alınan verilere göre, 2016 yılında yaklaşık 15.000 binada yangın meydana gelmiş ve bu rakam son 4 yılda %25 artış göstermiştir. Bazı sigorta şirketlerinden alınan verilerine göre, 1999-2016 yılları arasında ülke kapsamında yangın kaynaklı hasarın sigorta şirketlerine maliyeti toplam 1.4 milyar TL'yi aşmıştır. Buna karşılık, 1999 depreminin toplam maliyeti 630 milyon TL olmuştur. Yangın kaynaklı

hasarın uzun vadede depremin verdiği hasarı en az ikiye katladığı açıkça görülmektedir (Selamet, 2017).

Günümüzde, gelişen inşaat teknolojisi ile birlikte yüksek yapı sayısı her geçen gün artmaktadır. Otel, iş merkezi ve konut olarak inşa edilen yüksek yapıların sayısındaki artış, bu yapılarda yangın ve güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmektedir. Yüksek yapılar, dar bir alanda çok yüksek şekilde inşa edildiği için üst katlarda bir yangın meydana gelmesi durumunda dışarıdan yangına müdahale çok zor, gecikmeli ve riskli olmaktadır. Özellikle insanların yoğun olarak kullandığı yapılar başta olmak üzere, yangın güvenlik önlemlerinin eksiksiz bir şekilde alınması, yangın riskini dolayısıyla da can ve mal kaybını engellemek için büyük önem taşımaktadır (Kılıç, 2003).

Yapılarda yangın güvenliği önlemleri aktif ve pasif koruma olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilmektedir. Ülkemizde yangın güvenliği uygulamalarında pasif koruma önlemlerinden ziyade aktif koruma önlemlerine ağırlık verilmektedir. Bu durum, beraberinde birtakım riskler taşımaktadır. Örneğin, şiddetli bir deprem sırasında jeneratörlerin de devreye girememesi sonucu oluşabilecek elektrik kesintisinde aktif koruma sistemleri (duman algılama, baskılama ve söndürme sistemleri) devre dışı kalabilir ve deprem sırasında/sonrasında çıkabilecek bir yangına karşı yapılar savunmasız hale gelebilir. Pasif koruma önlemleri, yangının hem oluşma riskinin azaltılması hem de oluşan bir yangının yayılmasını önleyerek yapıda oluşabilecek hasarın önüne geçilmesi açısından yangın güvenliği önlemlerinin temelini oluşturmaktadır. Aktif koruma önlemleri ise yapının tasarım sürecinde alınan pasif koruma önlemlerinin tamamlayıcısı olarak değerlendirilmelidir. Yapı yangın güvenliği; yangının öncesini, oluşumunu ve gelişimini kapsayan bir kavramdır. Malzeme ve yapı elemanlarının doğru seçimi ve proje yerinde doğru uygulanması; mimari, elektrik, mekanik tüm projelendirmenin mevzuat ve yapı kullanım gereksinimlerine uygun bir şekilde yapılması ve projenin inşaat sürecinde doğru uygulanması gerekmektedir. Bu süreçler, yapıda yangın güvenliğini sağlayacak en temel unsurlardır (Salman, 2017).

Ülkemizin tamamına yakın bölümü aktif deprem kuşağı üzerinde yer almaktadır. Bu durum, ülkemizde sosyo-ekonomik açıdan yıllardır büyük yaralar açan ve çok önemli bir tehdit unsuru olan şiddetli ve yıkıcı depremlere karşı önlem alınması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Depremler ile mücadelede en etkili yöntemlerden birisi yürürlükteki deprem yönetmeliklerine uygun olarak depreme karşı dayanıklı yapılar tasarlamak ve inşa etmektir. Beton ve çelik günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılan yapı malzemeleri

arasında yer almaktadır. Bu malzemeler kolaylıkla elde edilebilmeleri, belli standartlarda üretilibilmeleri ve deprem gibi doğal afetlere karşı dayanıklı olmalarından dolayı yaygın olarak tercih edilmektedirler. Her iki yapısal malzemede, yüksek sıcaklık etkisi altında dayanımlarını önemli ölçüde kaybedebilmektedir. Yangın gibi afetler sonucunda ortaya çıkan yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılarda, önemli derecede yapısal hasarlar görülebilmektedir. Bu nedenle, betonarme ve çelik yapılar için ısı etkilerinin iyi bilinmesi ve gerekli önlemlerin projelendirme aşamasından başlanmak üzere alınması gerekmektedir.

Gelişmiş ülkelerde yapıların yangına karşı dayanımı, depreme karşı dayanımına benzer şekilde güncel yönetmeliklere dayandırılarak belirlenmektedir (Hacıemiroğlu, 2014). Son olarak 2015 yılı içerisinde revize edilen “Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY)”, ülkemizin yangın yönetmeliğidir. Bu yönetmelikte yer alan yangın güvenliği yaklaşımları, gelişmiş ülkelerdeki yönetmeliklere kıyasla yetersiz kalmaktadır. Ülkemizde yapıların tasarım aşamasında sıcaklık etkileri genellikle ihmal edilmekte, yangın mühendisliği yöntemleri dikkate alınmamakta ve bu durum özellikle can güvenliği açısından ciddi bir tehlike arz etmektedir.

Betonarme ve/veya çelik malzeme özelliğine sahip mühendislik yapıları, kullanım ömürleri boyunca yangın vb. nedenlerden dolayı yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalabilmekte ve dayanımlarını önemli ölçülerde kaybedebilmektedir. Bu durum, oda sıcaklığında yüksek dayanım ve süneklığe sahip çelik yapılarda belli bir sıcaklık değerine erişilmesi halinde ani stabilite kayıpları ve göçme durumları olarak ortaya çıkmaktadır. Betonarme yapılarda ise yüksek sıcaklık etkisi altında betonun basınç dayanımının azalması ve donatıların da pas paylarına bağlı olarak dayanımını kaybetmesi ile birlikte taşıyıcı sistem elemanlarında ağır hasarlara, bozulmalara, patlamalara, sıyrılmalara neden olmaktadır. Bu durum betonarme ve çelik yapıların yüksek sıcaklık etkileri altındaki yapısal davranışlarının değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Göçme meydana gelmemiş ise, yapısal hasar durumu ve yapının kullanımına devam edilip edilmemesi kararı oldukça önemlidir. Çünkü taşıyıcı sistem elemanlarının dayanım ve rijitliklerinde belirli bir derecede azalmaların olduğu açıktır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme ya da çelik bir yapıda meydana gelen rijitlik ve dayanım kaybı düzeyinin belirlenmesi, bu kayıpların yapı sağlığı açısından önem derecesinin değerlendirilmesi ve bunlara bağlı olarak yıkım veya onarım-güçlendirmeye karar verilmesi için sonlu eleman analizleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun yanında, yerinde ve/veya laboratuvar ortamında tahribatlı ve tahribatsız deneylerin yapılması ve elde edilen sonuçların sayısal

değerlerle karşılaştırması konusu da yaygın çalışma alanı bulmaya başlamıştır. Uygun bir değerlendirme yapmak için, yapının dinamik karakteristiklerinde (frekans, mod şekli, sönüm oranı) meydana gelen değişimlerin incelenmesi yeterli ve en kısa çözüm olmaktadır. Çünkü dinamik karakteristikler yapının sadece kütle ve rijitliği ile alakalıdır ve meydana gelecek değişimlerin değerlendirilmesiyle rijitlikteki değişimler kolaylıkla hesap edilebilmektedir.

## 1.2. Konuyla İlgili Daha Önce Yapılmış Çalışmalar

Allen ve Lie (1974) yapmış oldukları çalışmada, betonarme kolonların yangın performansını hesaplamak için sayısal bir yöntem geliştirme sürecini özetlemiştir. Çalışmada, yüksek sıcaklık nedeniyle değişim gösteren malzeme özellikleri detaylı bir şekilde açıklanmış ve geliştirilen modeller hem standart hem de doğal yangın eğrilerinin kullanıldığı gerçek kolon fırın testleri ile karşılaştırılmıştır.

Askegaard ve Mossing (1988), çevresel sıcaklık değişimi nedeniyle mühendislik yapılarının dinamik karakteristiklerde meydana gelen değişimi incelemek amacıyla, üç açıklıklı betonarme bir yaya köprüsü üzerinde çalışmışlardır. Üç yıl boyunca yapılan incelemeler sonucunda köprüde %10'luk mevsimsel frekans değişimi gözlenmiştir.

Ataman (1991), yapmış olduğu deneysel çalışmada yüksek sıcaklıkların ve soğutmada kullanılan yöntemlerin betonun eğilme ve basınç dayanımları üzerindeki etkilerini incelemiştir.

Cornwell vd. (1999), çevresel etkilerin neden olduğu sıcaklık değişiminin Alamosa Kanyon Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerine etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda köprü'nün ilk üç doğal frekansının yaklaşık olarak günlük %5'lik bir değişim gösterdiği tespit edilmiştir.

Zha (2003), DYNA3D programını kullanarak çeşitli yükleme durumları için yangına maruz kolon, kiriş gibi betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının üç boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman analizlerini yapmıştır. Beton kesiti içindeki sıcaklık dağılımı, Hertz tarafından geliştirilen basitleştirilmiş hesap yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. Tek ve üç taraftan yangın etkisine maruz kalan modeller için gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, üç taraflı yangın etkisinin çok daha ağır hasarlara neden olabileceği görülmüştür.

Yao ve Tan (2003), farklı kesit boyutları, mesnet koşulları ve yük düzeyleri altında betonarme kolonlar üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları SAFIR sonlu eleman programı kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

Burnaz (2003) yapmış olduğu çalışmada, seçilen bir model için gerçek sıcaklık-zaman eğrisinin elde edilebilirliğini ve betonarme eleman kesitlerindeki sıcaklık dağılımlarının çeşitli yöntemlerle belirlenebildiğini göstermiş ve bazı betonarme yapı elemanlarının yangın koşullarındaki taşıma güçlerini incelemiştir. Ayrıca çalışmaya konu olan betonarme yapı modeli için geçerli olan bilgisayar programları geliştirilmiştir. Çalışmada özellikle uzun süreli yangına maruz kalma durumları için betonarme yapıların taşıma gücü sınır durumuna göre emniyetli olmadıkları ve bu tür yapıların tasarımında yangın koşullarının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Uysal (2004), çeşitli betonarme yapı elemanları için ısı iletimi durumlarını incelemiştir. Öncelikle çalışmada ele alınan yapı elemanları matematiksel olarak modellenmiştir. Daha sonra uygun sınır koşulları için özel çözümler elde edilmiştir. Hesaplar için perde, kolon, döşeme ve kiriş betonarme elemanlar kullanılmıştır. Perde elemanların iki yüzeyinden, kolon elemanların da dört yüzeyinden yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığı düşünülmüştür. Kiriş elemanlarda ise etkinin üç yüzeyden de tesir ettiği düşünülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda betonarme yapı elemanlarındaki boyut artışının ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinin yangın dayanımı üzerindeki olumlu etkileri açıklanmıştır. Kolon kiriş, döşeme ve perdelerde, eleman boyutu büyüdükçe belirli bir sıcaklık geçmişi için eleman enkesiti içinde herhangi bir x uzaklığındaki sıcaklığın daha düşük olduğu görülmüştür. Bu da eleman boyutu büyüdükçe yangından görülen hasarın azalacağını açıkça göstermektedir.

Haksever (2005), betonarme çerçevelerin yangın etkisi altındaki davranışlarını teorik ve deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, bir yapının yangın davranışının genellikle bu yapıyı oluşturan yapı elemanlarının bireysel yangın davranışlarına göre değerlendirilmesi gerektiği belirtilmiştir.

Macdonald ve Daniell (2005) rüzgar, sıcaklık ve trafik yükleri nedeniyle Severn Köprüsü'nün doğal frekanslarında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Sıcaklık değişiminin düşük olmasından nedeniyle köprü tabliyesinin ortalama sıcaklığı ile doğal frekanslar arasında belirgin bir ilişki kurulamamıştır.

Desjardines vd. (2006), öngörülmesi beton teknolojisi kullanılarak yapılan Konfederasyon Köprüsü'nde çevresel sıcaklık etkilerinin neden olduğu frekans

değişimlerini altı aylık bir zaman zarfında incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, köprü betonunun ortalama sıcaklığı  $-20^{\circ}\text{C}$  ile  $+25^{\circ}\text{C}$  arasında değişim gösterdiğinde, köprünün modal frekanslarında yaklaşık %4'lük bir azalma tespit edilmiştir.

Song ve Dyke (2006), çevresel etkilerin neden olduğu sıcaklık değişiminin Bill Emerson Köprüsü'nün dinamik karakteristiklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonucunda, köprünün ilk iki moduna ait frekansların sıcaklık artışı ile birlikte azaldığı, mod şekillerinin ise önemli bir değişim göstermediği görülmüştür.

Şentürk (2006), deprem ve yangınların betonarme binalar üzerine olan etkisini incelemek amacıyla, seçilen bir otel binası için SAP2000 sonlu eleman programını kullanarak sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Deprem ile yangının yapıya aynı anda etkiye ihtimalinin oldukça düşük olması nedeniyle, analizlerde bu iki durum ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Analizler sonrasında elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile birlikte yer değiştirmelerin de artış gösterdiği belirlenmiştir.

Xia vd. (2006), beton bir döşeme üzerinde yaklaşık iki yıl boyunca yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda; frekansların sıcaklık ve nem içeriği ile güçlü bir negatif korelasyona sahip olduğunu, sönüm oranlarının ise sıcaklık ile pozitif korelasyona sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, mod şekillerinin sıcaklık ile belirgin bir ilişkisi olmadığı görülmüştür.

Yalaman (2006), yüksek sıcaklık etkisi altındaki 2.5 cm pas payına sahip betonarme bir yapının donatı özelliklerindeki değişimi deneysel olarak incelemiştir. Farklı çaplara sahip donatılar ve farklı oranlarda uçucu kül kullanılarak hazırlanan deney numuneleri farklı sıcaklıklarda 180 dakika boyunca yüksek sıcaklık fırınında ısıtılma tabii tutulmuştur. Donatıların mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimi incelemek amacıyla, donatı çelik çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları, pas payının donatıyı yüksek sıcaklıklardan koruyarak donatının akma ve çekme dayanımındaki kayıpları azalttığını ve farklı oranlarda kullanılan uçucu külün yüksek sıcaklıkta donatı mekanik özelliklerinin korunmasında önemli bir fark yaratmadığını göstermiştir. Ayrıca  $950^{\circ}\text{C}$ 'lik sıcaklık mertebesinde zamanla harç bütünlüğünün bozulduğu gözlenmiştir.

Xavier (2009), farklı yangın senaryolarını dikkate alarak, betonarme bir çerçeve modelinin yapısal davranışını SAFIR sonlu eleman programında sayısal olarak incelemiştir.

Burnaz (2010), betonarme bir yapı modelinin yangın etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışını incelemiş ve betonarme yapıların yangın başarımlarının (performanslarının) belirlenmesinde yönetmeliklerde önerilen talimata dayalı ve basit yöntemlerin yanında daha gelişmiş yöntemlerin de kullanılması gerektiğini ortaya koymuştur. Çalışma kapsamında; parametrik yangın eğrisinin belirlenmesine yönelik pratik bir program (EPY), betonarme yapı elemanlarının basit yöntemlere dayalı yangın tasarımı için pratik bilgisayar programları ve bu elemanların iki boyutlu doğrusal olmayan ısı ve yapısal çözümlenmeleri için kapsamlı iki bilgisayar programı (ISILSEYBA2 ve YNGSEYBA2) geliştirilmiştir. Ayrıca, yapı elemanlarının yangın koşullarındaki tasarımları yapılırken standart sıcaklık-zaman eğrileri yerine, yangın bölmesindeki boşlukları ve yakıt miktarını dikkate alan parametrik yangın eğrilerinin kullanılmasının daha gerçekçi olacağı ifade edilmiştir.

Kızılkant (2010), yapmış olduğu deneysel çalışmada yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun fiziksel, termofiziksel ve mekanik özelliklerindeki değişimi incelemiştir. Çalışma kapsamında, silis ve kalker esaslı agregalar ve farklı mineral katkı maddeleri kullanılarak üretilen beton numuneler farklı sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığına ulaşınca kadar havada ve suda soğutulan numuneler üzerinde kontrol deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışma sonuçları yüksek sıcaklık nedeniyle beton yüzey renginde meydana gelen değişimin, betonun yüksek sıcaklık etkisi sonrası değişim gösteren malzeme özelliklerinin tespiti için tahribatsız bir muayene yöntemi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Dimia vd. (2011), yangının sönme aşamasında betonun davranışını incelemişlerdir. Çalışmada; gizli ısı olgusuna dikkat çekilmiş, yangının sönme aşamasında betonarme kolonlarda meydana gelen göçmenin nedenleri özetlenmiş, bu kolonların analizine yönelik yöntemler sunulmuş ve yangına maruz kalma süresinin bilinmesi halinde belirli bir yüke sahip betonarme bir kolonun göçme zamanını belirlemek için kullanılacak grafikler oluşturulmuştur. Gerçekleştirilen analizlerde SAFIR sonlu eleman programı kullanılmıştır.

Faravelli vd. (2011), çevresel sıcaklık değişimlerini dikkate alarak 600 m yüksekliğindeki Guangzhou Televizyon Kulesi'nin frekans değişimlerini 24 saatlik bir süre boyunca incelemişlerdir. Sıcaklık değişiminin yaklaşık 3°C mertebesinde olması nedeniyle frekans değişimleri %0.5 gibi düşük seviyelerde kalmıştır.

Park vd. (2011), yüksek sıcaklık etkisi altındaki yüksek dayanımlı kolonların davranışlarını araştırmışlardır. Bu amaçla, farklı tasarım parametreleri dikkate alınarak

üretilen 7 farklı yüksek dayanımlı beton kolon eleman yangın testleri için bir ısıtma odasına yerleştirilmiştir. Çalışmada dikkate alınan tasarım parametreleri; kesit alanları, pas payı kalınlıkları ve çelik donatı düzenleridir. Deneysel çalışma sonucunda, dikkate alınan tasarım parametrelerinin sıcaklık dağılımları ve beton kolonlarda meydana gelen kavlanma üzerinde etkili oldukları görülmüştür.

Emberley (2013), yangın koşullarındaki betonarme kolonların yapısal davranışlarını incelemek ve değerlendirmek amacıyla sayısal bir model oluşturmuştur. Çalışma kapsamında, oluşturulan sayısal model ve ANSYS sonlu eleman programı kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslanmış ve oluşturulan sayısal modelin kabul edilebilir sonuçlar verdiği görülmüştür.

Hacıemiroğlu (2014), yangına maruz kalmış betonarme bir yapının deprem etkisi altındaki doğrusal olmayan davranışını incelemiştir. Çalışmada parametre olarak pas payı, yangın etkisindeki kat sayısı ve üç farklı yangın süresi dikkate alınmış olup, oluşturulan otuz farklı yangın senaryosu için Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY, 2007) ve Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları'na (TS 500, 2000) uygun olarak tasarlanmış betonarme bir yapının yangın sonrası deprem performans sonuçları karşılaştırılmıştır. Analizler sonrasında, yapının yangına maruz kalma süresi arttıkça yapı elemanlarının taşıma gücünün ve yapının rijitliğinin azaldığı, pas payı arttıkça yangın etkisinin donatı üzerinde meydana getirdiği dayanım kayıplarının azaldığı, bu nedenle paspayının yapısal davranışta büyük bir öneme sahip olduğu belirtilmiştir.

Etli (2015), yangına maruz kalmış bir endüstri binasının malzeme özelliklerinin değişimini deneysel olarak incelemiştir. Mekanik ve petrografik inceleme sonuçları literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmıştır. Yapının farklı noktalarından alınan beton numunelerin mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini farklı oranlarda kaybettiği belirtilmiştir.

Balaji vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada yangına maruz betonarme çerçeve türü yapıların dinamik tepkilerinin tahmin edilmesi üzerine incelemelerde bulunmuşlardır. Sonlu eleman metodunun yangına maruz kalan betonarme yapılar üzerindeki etkisinin incelendiği bu çalışmada betonarme kolon-kiriş-döşemeden oluşan bir model ve bir adet döşemesiz çerçeve model üzerinde incelemede bulunmuşlardır. Her iki model içinde ISO 834 standart yangın eğrisine maruz kalan çerçevelerde oluşan sıcaklık dağılımlarını dikkate alarak meydana gelen iç gerilmeler ve deformasyonları incelenmişlerdir. Bu çalışmada



yangın etkisindeki kolonların kırılma mekanizmasının genel yapı kırılma mekanizması üzerindeki etkisi ve önemi irdelenmiştir. Yapıda meydana gelen bir yangında sınırlayıcı durumlar nedeniyle yapısal elemanlarda önemli ölçüde ek iç kuvvetlerin meydana geldiği ve bu kuvvetlerin döşemeli ve döşemesiz çerçevelerde yerdeğiştirme, eksenel ve kayma gerilmelerinde önemli ölçüde farklılıklara sebep olduğu tespit edilmiştir. Analizler sonucunda kolon kırılma mekanizmasının yapı göçme mekanizması üzerinde etkili olduğu görülmüştür.

Açıkel (2017), beton dayanımı, pas payı ve yangına maruz kalma süresinin kolonların normal kuvvet taşıma gücüne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Deneysel çalışmalar kapsamında, test edilmek üzere 3 farklı beton sınıfı, 4 farklı pas payı kalınlığı dikkate alınmıştır. Hazırlanan 25x30x30 cm boyutlarında 12 farklı tipte 60 adet kısa kolon numunesinden 12 tanesi referans numune olarak kullanılmış, geriye kalan 48 adet numune ise doğal olarak oluşturulmuş bir yangına 30, 60, 90 ve 120 dakikalık süreler boyunca maruz bırakılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, yangına maruz kalma süresindeki artışın kolonların normal kuvvet taşıma kapasitesinde önemli azalmalara sebep olabileceği görülmüştür. Özellikle yüksek beton dayanımına sahip numunelerde pas payının artması durumunda yangın süresinin uzamasıyla beraber kapasite kaybının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.

Forni vd. (2017), yapmış oldukları çalışmada farklı mesnetlenme koşullarındaki betonarme kolonların ISO 834 standart yangın eğrisi dikkate alınarak çeşitli yangın senaryoları için yüksek sıcaklık ve sabit eksenel kuvvet etkileri altında yangına karşı dayanımları sayısal olarak incelemiş ve nihai eksenel yük kapasitesini hesaplamışlardır. Çalışma sonucunda, ankastre mesnetli kolonların yük taşıma kapasitesinin, tam bağlı olmayan mesnet şartlarına sahip kolonların yük taşıma kapasitesine kıyasla yüksek sıcaklık etkisi altında daha uzun süre dayanım gösterdiği tespit edilmiştir.

Zeybek (2008), yapmış olduğu çalışmada önceden yapılmış teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda geliştirilen iki ayrı yöntemi incelemiştir. Her iki yöntemde kullanılan formüller Rankine formülasyonuna dayanmaktadır. Birinci yöntemde tasarım formülü üç basamakta elde edilmiştir. Birinci basamak, kolonun arttırılmış ısıdaki plastik ezilme yükünün belirlenmesidir. İkinci basamak, merkezi yüklü kolonların burkulma katsayısının belirlenmesidir. Üçüncü basamak ise eksantrik yükler için lineer olmayan bir büyütme teriminin geliştirilmesidir. Formül, pas payının etkilerini ve narinlik etkisini dikkate alacak şekilde düzenlenmiştir. İkinci yöntem, Rankine yönteminin sıcaklığın donatı ve beton

özelliklerine etkisini dikkate alacak şekilde yangına maruz kalan betonarme kolonlara uyarlanmasıdır. Çalışmada bu yöntemler kullanılarak geliştirilen bir bilgisayar yazılımı yardımıyla kesit tayini ve kesit tahkiki problemlerine ait çok sayıda uygulama yapılmıştır.

### 1.3. Tezin Amacı ve İçeriği

Literatür çalışmaları detaylı olarak incelendiğinde, mühendislik yapılarının yangın tipi yüksek sıcaklık etkisi altındaki dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin belirlenmesine yönelik oldukça az sayıda çalışmanın olduğu, mevcut çalışmalarda genellikle düşük sıcaklık etkilerinin dikkate alındığı ve dinamik karakteristik değişimlerinin tek bir yapı veya yapı elemanı üzerinde değerlendirildiği görülmüştür. Bu yönüyle, tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların, geliştirilen formülasyonların ve sunulan grafik/abakların benzer çalışma veya değerlendirme yapmak isteyen kişiler için kullanım kolaylığı sağlayacağı ve özgün bir değere sahip olduğu düşünülmektedir.

Literatüre katkı sağlayacağı düşünülen bu tez çalışmasında; yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler göz önünde bulundurularak sayısal olarak belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla, betonarme yapılarda taşıyıcı sistemin en önemli elemanlarından biri olan kolonlar dikkate alınmıştır. Bu elemanlarda, yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkilerinden dolayı oluşacak dinamik karakteristik değişimlerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi, hasar tahminlerinin yapılması ve rijitlik değişimlerine bağlı kullanım durumunun tespit edilmesi için ABAQUS (ABAQUS, 2016) sonlu eleman programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına dayalı olarak hem yaklaşık formülasyonlar geliştirilmiş hem de grafik/abaklar sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi altında “Yapı Sağlığı İzleme” konusunda yapılan çalışmaların genişletilmesi, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak üretilen formülasyon ve abakların ilgili yangın yönetmelikleri için veri oluşturması ve yeni çalışmalara ışık tutması çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır. Bu kapsamda hazırlanan tez üç bölümden oluşmaktadır.

Birinci bölümde, genel bilgiler üzerinde durulmakta ve konuyla ilgili daha önce yapılmış çalışmalara yer verilerek konunun önemi vurgulanmaktadır. Bu bölümde; yangın ile ilgili temel bilgiler, yangın güvenliği, mühendislik yapılarının yangın başarımlarının belirlenmesi, yapısal yangın tasarımı, yüksek sıcaklık etkisiyle yapı malzemelerinde

meydana gelen değişimler, ısı çözümlene ve analitik dinamik karakteristiklerin belirlenmesi üzerinde durulmaktadır.

İkinci bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen bulgular sunulmaktadır. Bu bölümde yapılan çalışmalar iki kısma ayrılmıştır. İlk kısımda; yapısal analizin bir parçası olarak ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuçların doğruluğu, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan sıcaklık profilleri ve analitik yöntemlerle gösterilmiştir. İkinci kısımda ise; sonuçlarının doğruluğu gösterilen sonlu eleman modelleri kullanılarak gerçekleştirilen çoklu analizlerden elde edilen sonuçlara dayalı üretilen formülasyon ve abaklara yer verilmektedir.

Üçüncü bölümde, tez çalışmasından elde edilen sonuçlara ve yapılan önerilere yer verilmektedir. Bu bölümü kaynaklar ve özgeçmiş izlemektedir.

## 1.4. Yangın ile İlgili Temel Bilgiler ve Yangın Güvenliği

### 1.4.1. Yangın Üçgeni

Yanma olayının gerçekleşebilmesi için yanıcı malzeme, ısı kaynağı ve oksijenin aynı anda ortamda bulunması gerekmektedir. Bu üç unsur bir araya gelerek Şekil 1.1'de verilen yangın üçgenini oluşturmaktadır. Oksijen ve yanıcı malzeme tutuşma sıcaklığına ulaştığında yanma işlemi başlamaktadır. Karbonun yanması sonucu karbondioksit ( $CO_2$ ) oluşurken, oksijen yetersizliği durumunda ise insan sağlığı için tehlikeli bir gaz olarak bilinen karbonmonoksit ( $CO$ ) oluşmaktadır.

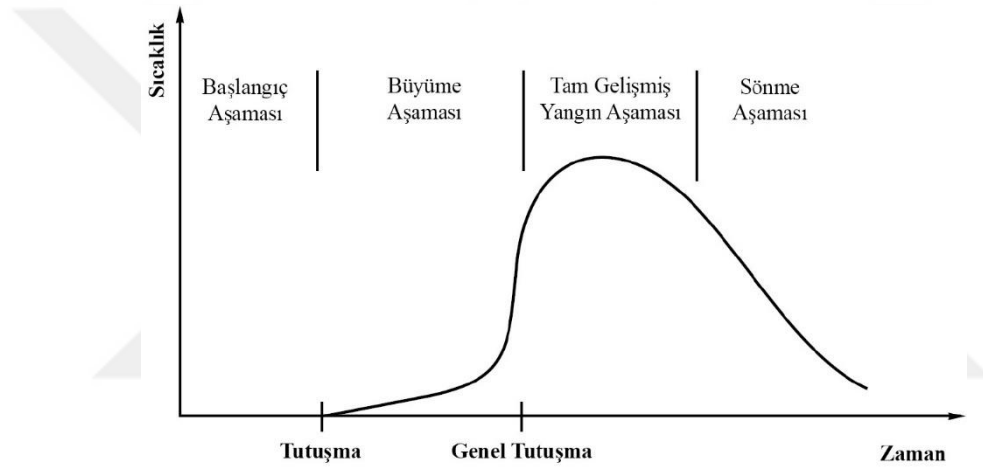


Şekil 1.1. Yangın üçgeni

### 1.4.2. Yangının Gelişim Aşamaları ve Genel Tutuşma

Yangın davranışı ve gelişim aşamaları incelendiğinde (Şekil 1.2); yangının başlıca tutuşma, büyüme, genel tutuşma, tam gelişmiş yangın ve sönme aşamalarından meydana geldiği görülmektedir. Her bir aşamaya ait davranış farklı olmasına rağmen, ayırım genel tutuşma öncesi ve genel tutuşma sonrası olarak yapılmaktadır.

Bir yapının yapısal yangın tasarımı yapılırken dikkate alınan temel kabul, genel tutuşma sonrasının esas alınmasıdır. Can güvenliğine yönelik tasarım yapılırken, yangının genel tutuşma öncesi davranışının bilinmesi son derece önemlidir.



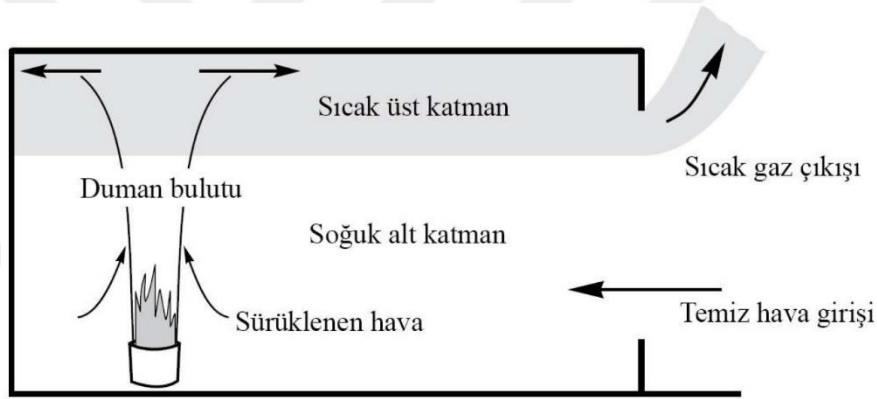
Şekil 1.2. Yangının gelişim aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017).

#### 1.4.2.1. Genel Tutuşma Öncesi

Yangın üçgeninin her üç unsuru aynı anda mevcut bulunduğu anda yangın ortaya çıkmaktadır. Malzemenin küçük bir miktarı yanmaya başladığında ilk olarak gaz ve duman ortaya çıkar. Büyüyen duman bulutu yanma ürünlerini oda tavanına taşır. Yanma işleminin başlangıcında oda içindeki havada bulunan oksijen tüketilir. Ardından kapı, pencere ve havalandırma boşluğu gibi açıklıklardan içeriye hava akışı olur. Yangın bir pompa gibi davranarak temiz havayı içeriye çeker ve yanma ürünlerinin incelendiği daha soğuk olan alt tabaka ile buluşturur. Daha sonra yanma ürünleri oda tavanına itilir. İncelen yanma ürünleri birleşerek odadaki sıcak üst tabakada durgun hale gelir. Bu tabakanın kalınlığı ve sıcaklığı yangının büyümesi ile artış gösterir. Temiz havadan oluşan soğuk alt katman, üst

katmandaki karışım ve radyasyondan dolayı yavaşça ısınır. Bu iki katman Şekil 1.3'te gösterilmektedir. Soğuk alt katman güvenli tahliyeye olanak sağladığından dolayı can güvenliği için gereklidir. Duman bulutu oda tavanına ulaştığında, duman ve sıcak gazlar yüzey boyunca radyal olarak dışarıya doğru yayılır. Bu akışın formu ve yönü tavan biçimine bağlıdır. Örneğin, yatay ve pürüzsüz yüzeylerde akış her doğrultuda aynı olacaktır.

Yangın devam ettikçe sıcak üst tabaka büyür ve tabakalar arasındaki yüzeyin yüksekliği azalır. Ara yüzey yüksekliğindeki azalma sonucunda, sıcak gazlar mevcut açıklıklardan dışarıya doğru yayılabilmektedir. Üst tabaka kalınlığı, yangının şiddeti ve süresi ile birlikte açıklıkların boyutu ve konumuna bağlıdır. Açıklığın çok küçük olduğu durumlarda, yangın yeterli temiz havayla beslenemez ve oksijen yetersizliğinden söner.



Şekil 1.3. Bir oda yangının ilk aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017).

Bahsi geçen yangında, oda içerisinde yalnızca bir maddenin yandığı varsayılmaktadır. Ancak; oda zemininde, duvarlarda ve tavanda bulunan yanıcı maddeler alevlerin hızla yayılmasına sebep olacağından yangının gelişimini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Oda sınırlarını oluşturan elemanların ısıyı daha az absorbe ettiği izolasyonlu bir odada yangın olması durumunda sıcaklıklar daha yüksek olacak ve yangın önemli ölçüde daha hızlı büyüyecektir.

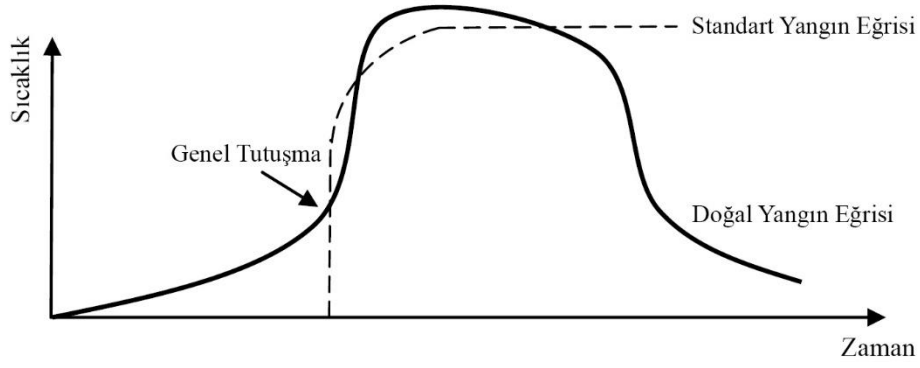
Genel tutuşma sonrası yangın, genellikle iki homojen tabaka ve bağlayıcı duman bulutundan oluşan iki bölgeyi bir model olarak tarif edilmektedir. Model; kütle, momentum ve enerji koruma yasalarını her bölgeye dinamik bir süreçte uygulayarak her bölgenin boyutunu, sıcaklığını ve türlerin konsantrasyonunu yangın sürecinin bir fonksiyonu olarak hesaplar; duman ve zehirli ürünlerin açıklıklardan çıkışını da hesaba katmaktadır. Bu

şekilde, duvar ve taban sıcaklıkları hesaplanabileceği gibi her iki katmanda bulunan gazların yüksekliği, sıcaklığı ve konsantrasyonu ile birlikte, taban seviyesindeki ısı akısı da hesaplanabilmektedir. Model, yangının gelişimini belirleyen bir tasarım yangını seçilmesini gerektirmektedir. Ancak, iki bölgeli modeldeki iki ayrı tabaka varsayımı, sıcaklık yoğunluğu ve duman geçişinin üç boyutta gerçekleşmemesi ve ara birimlerin kademeli şekillenmemesi nedeniyle gerçekle bağdaşmamaktadır. Gerçekçi bir yaklaşım, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve üç boyutlu sonlu elemanların kullanıldığı daha gelişmiş alan modelleri ile mümkündür. Bu modellerin aşırı derecedeki karmaşıklıkları onları tasarım araçlarından ziyade araştırma araçları için daha uygun hale getirmektedir. Alternatif olarak; genel tutuşma sonrası yangın, lokal bir yangın modeli kullanılarak da modellenebilmektedir. Daha sonra, yalnızca duman bulutundaki veya alevdeki ısı akısı değerlendirilir. Bu modeller, özellikle yangının kapalı olmayan bir alanda meydana geldiği durumlar için kullanışlıdır.

#### **1.4.2.2. Genel Tutuşma**

Odada yeterli yanıcı malzeme ve uygun bir oksijen kaynağı olduğu sürece, genel tutuşma öncesi yangın büyümeye devam edecektir. Sıcak tabakadaki sıcaklık artışı odada bulunan tüm nesnelere radyant ısı akısının da artmasına neden olacaktır. Belirli bir noktada (genellikle 500-600°C arasında) bu radyant ısı akısının kritik bir değere ulaşması sonucu, odadaki tüm yanıcı malzemeler yanmaya başlayacaktır. Bu durum hem ısı salınım hızında hem de sıcaklıklarda hızlı bir artışa neden olacaktır. Bu evre genel tutuşma olarak adlandırılmaktadır.

Genel tutuşma, lokal bir yangından odadaki tüm yanıcı yüzeylerin yanmasına geçiş olarak tanımlanmaktadır, bu yüzden açık bir alanda genel tutuşmanın gerçekleşmesi mümkün değildir. Ayrıca, uygulamada kolaylık sağlaması için, genel tutuşma başlangıcı ile maksimum ısı salınımı arasındaki büyüme periyodu çoğunlukla göz ardı edilir ve genel tutuşma anında ısı salınım hızının ani olarak artarak mevcut hava tarafından belirlenen maksimum değere ulaştığı varsayılır. Bu durum, Şekil 1.4'te verilmektedir.



Şekil 1.4. Doğal bir yangın eğrisi ile standart bir yangın eğrisinin karşılaştırılması ve genel tutuşma (De Wit, 2011).

### 1.4.2.3. Genel Tutuşma Sonrası

Genel tutuşma öncesi ve sonrasında yangının davranışı tamamıyla farklıdır. Genel tutuşma sonrasında, iki ayrı katman ortadan kalkarak hava akısının ve yanıcı gazların yüksek türbülansla olduğu büyük bir bölge oluşmaktadır. Tam gelişmiş yangın olarak da adlandırılan genel tutuşma sonrası yangın aşamasında, sıcaklık genellikle  $1000^{\circ}\text{C}$ 'den fazladır. Radyant ısı akılarıyla birlikte bu yüksek sıcaklıklar oda içerisindeki yanıcı yüzeylerde ısıl bozunmaya (ayrışmaya) ve yeterli oksijenin bulunduğu durumlarda yüksek miktarda yanıcı gaz üretimine sebep olmaktadır. Mevcut oksijen miktarı, yangının havalandırma kontrollü ya da yakıt kontrollü olup olmaması durumunu belirler. Tipik bir odada yangın havalandırma kontrollü olduğundan, yanma hızı açıklıkların sayısına, boyutuna ve şekline bağlıdır. Genellikle, genel tutuşma esnasında sıcaklığın ani bir şekilde artması nedeniyle odanın tüm camlarının kırılıp döküldüğü varsayılmaktadır. Havalandırma kontrollü yangınlarda, oda içindeki yanıcı gazların tamamının yanabilmesi için yeterli havanın bulunmaması nedeniyle, alevler pencerelerden dışarı uzanmakta ve yanmayan gazların dışarıdaki havayla karışarak yanması gerçekleşmektedir. Öte yandan, yakıt kontrollü yangınlar ise özellikle yanabilecek yüzey alanı sınırlı olan yakıtlar içeren, çok iyi havalandırılmış büyük odalarda gerçekleşmektedir. Bu durumda yangın açık havadaki bir yangına çok benzer ancak açık havadaki yangından farklı olarak, sıcak üst katmandaki gazların veya sıcak duvar ve tavan yüzeylerinin ışımsal geri dönüşlerini de içermektedir. Çoğu yangın, sönme evresinde yakıt kontrollü hale gelmektedir.

Genel tutuşma sonrası yangın, bir yapının yapısal yangın güvenliğine dayalı tasarımı için son derece önemlidir. Genel tutuşma sonrası sıcaklığın hesaplanması önem teşkil

etmesine rağmen ne yazık ki bu eksiksiz bir biçimde yapılamamaktadır. Literatürde, çok sayıda ölçülmüş ve tahmini sıcaklık değerleri bulunabilmektedir. Ayrıca literatürde bir takım hesaplama modelleri de mevcuttur. Bunlar genellikle tek bölgeli model olarak adlandırılmakta ve odanın iyi karıştırılmış bir reaktör olması kabulüne dayanmaktadır. Genel tutuşma sonrası yangının en yaygın gösterimi; bölmedeki gaz sıcaklığının gelişimini zamanın bir fonksiyonu olarak, sıcaklık dağılımının da üniform olduğu varsayımı ile basit bir şekilde veren temsili yangın eğrileridir. En çok kullanılan temsili yangın eğrileri, standart sıcaklık-zaman eğrileridir.

### 1.4.3. Yangın Güvenliği ve Amaçları

İstenmeyen bir durum olarak ortaya çıkan yangın, her yıl binlerce kişinin ölümüne ve milyarlarca lira mal kaybına neden olan yıkıcı bir kuvvettir. Düşük olasılıklı olmasına rağmen, yangın yapı ömrünün herhangi bir aşamasında, herhangi bir yerde, herhangi bir mevsimde ve en beklenmedik anda meydana gelebilmektedir. Maalesef tüm yangınları önlemek mümkün değildir. Dolayısıyla yangından korunma; yangının oluşma ihtimalini azaltmak ve yangının neden olabileceği ölüm, yaralanma ve maddi kayıpları sınırlandırmaktan oluşmaktadır. Yangın risklerinin sınırlandırılması için gerekli şartlar EN 1992-1-2 (2004) ve EN 1993-1-2 (2005) isimli Avrupa standartlarında yer almaktadır. Bu sınırlandırmalar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Yapının yük taşıma kapasitesinin belirli bir süre boyunca korunması
- Yangın ve duman gelişiminin azaltılması
- Yangının yayılmasının önlenmesi
- Bina sakinlerinin hızlı ve güvenli bir şekilde tahliyesinin sağlanması
- İtfaiye müdahalesinin kolaylaştırılması

Can güvenliği ve maddi kaynak koruma arasındaki denge, yapının kullanım amacı veya türüne bağlı olarak farklı ülkelerde çeşitlilik göstermektedir. Günümüzde ulusal ve uluslararası yasa ve yönetmelikler, mülkiyetin korunmasından ziyade can güvenliğine daha fazla önem vermeye yönelik bir eğilim göstermektedir. Diğer bir ek hedef ise yangın durumunda çevresel zararın sınırlandırılmasıdır. Örneğin, Eurocode (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1993-1-2, 2005), emniyet gereksinimleri başlığı altında yangından korunmanın temel hedeflerini belirtmektedir. Bu hedefler; yangın durumunda bireye ve topluma,



yangına direk olarak maruz kalan mülkiyete, komşu mülkiyete ve gerektiğinde çevreye ilişkin risklerin sınırlandırılmasıdır.

Yangının etkilerini azaltmak için birçok strateji bulunmaktadır. Yangınları kontrol etme veya söndürme ihtimalinin çok yüksek olduğunun gösterilmesi nedeniyle, kanıtlanan en iyi yangın güvenlik teknolojisi otomatik yangın fiskiyesi sistemleridir (Buchanan ve Abu, 2017). Yangınların tespiti ve bildirilmesi için olanakların sağlanması, bina sakinleri ve itfaiye personellerinin güvenli bir şekilde tahliyesi için kaçış yollarının oluşturulması, yangın sırasında yükselen alev ve dumanın katlar arası yayılımını engelleyen yangın bariyerlerinin kullanılması ve yapıların yangına maruz kaldığında aniden göçmeyecek şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi, alınması gereken diğer önlemlere örnek olarak gösterilebilir. Ayrıca, yapı malzemelerinin doğru seçimi, tasarımı ve kullanımı büyük önem taşımaktadır.

Genel yangın tasarımının bir bölümü de yangına dayanımdır. Yangına dayanım, kontrolsüz bir yangın esnasında alev ve duman yayılımını önlemek veya yapısal göçmenin önüne geçmek amacıyla seçilen yapısal ve yangın bariyerleri gibi yapısal olmayan elemanlar ile sağlanmaktadır. Yangın dayanımı genellikle, yangın algılandıktan sonra etkinleşmesi gereken otomatik fiskiyeler gibi aktif yangın koruma sistemlerinin aksine, yangını daima hazır bir şekilde bekleyen pasif yangın koruması olarak tanımlanmaktadır. Tasarım stratejileri genellikle aktif ve pasif yangın koruma önlemlerinin bir kombinasyonunu içermektedir. Bir yangının ilk aşamaları yangına dayanım açısından büyük bir önem taşımazken, yangının kontrolden çıkması ve büyüyerek genel tutuşma sonrası tüm odayı sarması ile giderek önem kazanmaktadır. Yangına dayanımın önemi, yapının büyüklüğüne ve yangın güvenliği hedeflerine bağlıdır. Bir yangının, sakinlerinin tahliyesi için yeterli zaman bulmadan büyüyebileceği binalarda, can güvenliğini sağlamak için yangına dayanım hayati önem taşımaktadır.

### **1.5. Yangına Tepki ve Yangına Dayanım**

Sıklıkla kullanılan yangına tepki ve yangına dayanım kavramları arasındaki farka dikkat edilmelidir (Denoel, 2007). Yangına tepki; yapı malzemelerinin tutuşmaya yatkınlığı, açığa çıkaracağı ısı, alevi yayma özellikleri ile duman ve zehirli gaz üretme potansiyelleri gibi özellikler ile karakterize edilmektedir. Yangına dayanım ise, yapısal elemanların yangın süresince işlevlerini koruma kabiliyetlerinin bir ölçüsüdür.

Birbirinden tamamen farklı olan bu iki kavramdan yangına tepki, yangının başlangıcı ve gelişimi üzerinde etkiliyken, yangına dayanım ise tam yoğunluklu bir yangın için önem taşımaktadır. Örneğin, ahşap yanıcı bir malzeme olduğu için yangına tepkisi zayıftır. Buna karşılık ahşap kolonlar ve kirişler yangına karşı iyi bir direnç göstermektedir. Çelik için bu durumun tam tersi söz konusuysen, iki özelliği birleştirmesi betonu yangın güvenliği için mükemmel bir malzeme yapmaktadır.

Eurocode, yangın tasarımında yapısal davranış üzerine odaklanmaktadır. Bu nedenle yalnızca yangına dayanımın karşılanması hedeflenmektedir. Yukarıda belirtildiği gibi, yangına dayanım yapısal elemanlar için geçerlidir. Ancak, malzeme özelliklerinin elemanın performansını etkileyeceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, yapı malzemelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışları detaylı olarak Bölüm 1.11’de anlatılmaktadır.

## **1.6. Beton ve Yangın**

### **1.6.1. Fiziksel ve Kimyasal Tepki**

İnşaat sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan beton, diğer yapı malzemelerine göre ekonomik ve kolay üretilebilir olması nedeniyle günümüzde en çok tercih edilen yapı malzemesidir. Bir yapıda kullanılacak malzemeler yanıcılık özelliklerine göre farklı sınıflara ayrılmaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında mükemmel bir içsel davranış gösteren beton, yanmaz bir yapı malzemesi olup A1 sınıfına girmektedir. Yanmaması nedeniyle yangın sırasında betondan zehirli gaz ve duman çıkışı olmamaktadır. Ayrıca yüksek ısı yoğunluğuna sahip olması nedeniyle uzun süre boyunca yüksek sıcaklığa direnç gösterebilmektedir. Ancak, kompleks bir yapı malzemesi olan betonun malzeme özellikleri, yüksek sıcaklık etkisi altında önemli ölçüde değişim gösterebilmektedir. Betonun farklı sıcaklık mertebelerindeki davranışını anlamak, yangın gibi yüksek sıcaklık etkileri altında betonun daha iyi bir performans sergilemesi için beton bileşiminin nasıl optimize edilmesi gerektiği konusunda yol gösterici olacaktır. Betonu oluşturan ana bileşenler; çimento, su ve agregadır. Gerektiğinde kimyasal ve/veya mineral katkıları kullanılarak betonun performansı istenilen yönde iyileştirilebilmektedir. Beton bileşenlerinin her biri ısı etkilenmeye karşı farklı bir reaksiyon göstermektedir. Dolayısıyla beton bileşenleri arasında termal bir uyumsuzluk söz konusudur. Betondaki sıcaklık değişimleri, farklı ısı özelliklerine sahip beton bileşenlerinde farklı hacim

değişimlerine, çatlak oluşumuna ve beton dayanımının azalmasına neden olmakta ve çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansı azaltmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, betonun yangın durumundaki davranışının modellenmesi oldukça zordur. Günümüzde betonun termo-mekanik davranışının modellenmesi konusunda önemli derecede ilerlemeler kaydedilmiş olsa da kavlanma gibi kompleks davranışların hesaba katılması sorun olmaya devam etmektedir.

Düşük sıcaklık aralıklarında betondaki fiziksel ve kimyasal değişim sertleşmiş çimento hamurunda meydana gelmektedir. Oda sıcaklığındaki beton ısınmaya başladığında sertleşmiş çimento hamuru genişlemeye başlar. Beton içerisinde serbest olarak bulunan suyun kaynama noktası, boşluk basıncı ve gözenek büyüklüğüne bağlı olarak değişim göstermektedir (Jansson, 2008). Beton içerisinde serbest halde bulunan su, 100-200°C civarındaki düşük sıcaklıklarda buharlaşmakta ve bu buharlaşma beton içinde buhar basıncı oluşturmaktadır. Beton içerisinde kimyasal bağlı olarak bulunan su ise 100°C ile 800°C arasındaki sıcaklıklarda buharlaşmaktadır. 300°C mertebesinde agregalar genişip dağılmaya, çimento hamuru ise büzüşmeye başlamaktadır. Bu sıcaklıktaki uzun süreli ısıtma, çekme dayanımında önemli kayıplara neden olmaktadır. 400°C ile 600°C arasındaki bir sıcaklıkta kalsiyum hidroksit, kalsiyum oksit ve suya dönüşmektedir. Daha fazla su buharının oluşması iç gerilmelerin artmasına ve önemli fiziksel güç kayıplarına neden olmaktadır.

Yüksek sıcaklık, beton hacminin önemli bir miktarını oluşturan agregaları da etkilemektedir. Yüksek sıcaklık etkisindeki agregaların davranışları agrega türüne bağlı olarak büyük ölçüde farklılık gösterebilmektedir. Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250°C ile 575°C'ler arasındadır (Perkins, 1986). Kalker ve dolomitten oluşan agregalar ise 700°C'ye kadar kararlılıklarını korumaktadırlar (Alonso vd., 2003). Kuvars bazlı agregalar yaklaşık 575°C'de gerçekleşen bir faz dönüşümü (alfa kuvarsdan beta kuvars geçişi) nedeniyle hacim artışı yaşamaktadır. Genel anlamda, tüm agregaların sıcaklığa karşı gösterdiği reaksiyon kolaylıkla tespit edilebilmektedir. Beton bir bütün olarak düşünüldüğünde, betonun agregalarda meydana gelen değişimlere vereceği tepkinin belirlenmesi ise oldukça zordur. Örneğin, çimento hamuru ve agregalardaki farklı ısıl genişlemeler, betonda çatlak oluşumu ve kavlanmaya neden olabilmektedir.

Yangından sonra betonun soğuması esnasında da fiziksel ve kimyasal değişimler devam etmektedir. Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin emilmesi, gerekse yangının söndürülmesi sırasında sıkılan suyun etkisiyle kalsiyum hidroksit tekrar oluşmaktadır. Bu

büzülme ve genleşmeler, ısıtılmış betonda bulunan çatlakların soğuma süresince büyümesine ve beton dayanımında ciddi azalmalara neden olmaktadır.

Soğuma aşaması da dahil olmak üzere yangın süresince betonda gerçekleşen tüm bu fiziksel ve kimyasal değişimler; çimento hamuru bileşenlerine, agrega türüne ve çimento hamuru ile agregalar arasındaki etkileşime bağlıdır.

Betonda farklı tür bileşenlerin farklı karışım oranlarında kullanılması sonucu birçok beton tipi oluşmakta ve farklı beton tiplerinin yangın etkisi altında sergileyeceği davranışlarda önemli farklılıklar olabilmektedir. Khoury (2008), yangının beton üzerindeki etkilerini incelerken “Beton” terimi yerine daha özel bir terim olan “Beton Tipi” teriminin kullanımını önermektedir. Farklı davranış aralığı nedeniyle, betonu oluşturan bileşenler için doğru bir seçim yapmak son derece önemlidir. Böylece betonun yangın koşullarında göstereceği performans iyileştirilebilir. Bu amaçla, düşük ısı genleşmeye sahip yüksek sıcaklığa karşı kararlı bazalt ve granit gibi agregalar veya bazı katkı maddeleri içeren bir çimento hamuru tercih edilebilir.

Yangına maruz kalan betonun davranışına ilişkin gerçekleştirilen yangın testleri; yük seviyesi, ısınma/soğuma hızı, nem durumu ve testin numune sıcakken mi yoksa soğuduktan sonra mı gerçekleştirildiği gibi birçok parametreye bağlıdır. Bu nedenle, farklı test sonuçları karşılaştırılırken dikkatli olunmalıdır.

Geçmişte yapılan yangın testleri genellikle gerçek bir yangını temsil etmeyen düşük sıcaklık hızları (dakikada 1-2°C) için gerçekleştirilmiştir. Oysaki, Khoury ve Anderberg’e (2000) göre; gerçek bir yangın durumunda ısıtma hızı dakikada 20-30°C arasındadır.

### **1.6.2. Kavlanma**

Kavlanma, yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarının yüzeylerinden beton tabaka ya da parçalarının koparak ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Betonun kavlanma davranışı çok karmaşık olması nedeniyle günümüzde hala tam olarak anlaşılamamıştır. Yüksek dayanımlı betonlar, normal dayanımlı betonlara göre kavlanmaya daha eğilimlidir.

Agrega kavlanması, yüzey kavlanması, köşe kavlanması ve patlayıcı kavlanma olmak üzere dört farklı kavlanma türü bulunmaktadır. En tehlikeli kavlanma türü patlayıcı kavlanmadır. Khoury ve Anderberg’e (2000) göre; agrega, yüzey ve patlayıcı madde kavlanması yangına maruz kaldıktan 7-30 dakika gibi kısa bir zaman sonra gerçekleşirken, köşe kavlanması 30-90 dakikalık bir ısınma sonrasında gerçekleşmektedir.

Kavlanmanın ölçüsü çok büyük oranda değişiklik gösterebilir. Hasar çok yüzeysel olabileceği gibi, ciddi sonuçlara ve nihayetinde yapısal göçmeye de neden olabilir. Kavlanma, eleman kesitini azaltarak geriye kalan alanda daha yüksek gerilmelere neden olmaktadır. Ayrıca kavlanma, beton örtü kalınlığını önemli ölçüde azaltabilir hatta ortadan kaldırabilir. Bu durumda, betonarme eleman kesitleri içerisindeki çelik donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalarak dayanımlarını kaybetmekte ve yapının yük taşıma kapasitesi azalmaktadır. Kavlanma, yapının taşıma gücünü azaltması dışında, ayırıcı elemanlarda oluşturduğu delikler aracılığıyla yangının yayılmasına da neden olabilmektedir.

### **1.7. Yangın Başarımının Belirlenmesi**

Mühendislik yapılarının yangın yükleri için tasarımı, yapısal bir elemanın yangına karşı dayanım ve dayanıklılığın bir ölçüsü olan yangın başarımı (performansı) kavramına göre yapılmalıdır. Yangın başarımı hesaplanırken genellikle yük taşıma kapasitesi dikkate alınmakta ve bu kapasite, yangın süresince uygulanan yüklerle karşılaştırılmaktadır. Dolayısıyla yangın başarımı genel olarak, yangın etkisi altındaki yapı veya yapı elemanının taşıma gücü sınır durumuna erişinceye kadar geçen süre olarak tanımlanabilir. Yangın başarımı; deneysel çalışmalara, talimata ve performansa dayalı yöntemlere göre belirlenebilmektedir.

Yangın başarımı belirlenirken, eleman kesitleri içerisindeki sıcaklık dağılımlarının deneysel, analitik veya sayısal yöntemler kullanılarak belirlenmesi gerekmektedir. Deneysel yöntemlerde, temsili veya doğal bir yangın etkisine maruz bırakılmak üzere test fırınına yerleştirilen deney numunelerinden belirli noktalara yerleştirilen ısı çiftleri yardımıyla ölçülen sıcaklık değerleri işlenmektedir.

Yangın etkisi altındaki davranışı belirleyebilmek için yapıyı oluşturan malzemelerin yüksek sıcaklıktaki özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Normal sıcaklıkta yapılan tasarımda malzeme özelliklerinin oda sıcaklığındaki değerleri hesaba katılmaktadır. Yangın esnasında artan ortam sıcaklığının malzeme özellikleri üzerinde meydana getirdiği değişim hem eleman kesiti içindeki sıcaklık dağılımının değişimini hem de yapısal davranışı büyük ölçüde etkilemektedir.

### 1.8. Betonarme Yapılarda Yangın Başarımının Belirlenmesi

Betonarme yapı tasarımında yangın koşulları genellikle dikkate alınmamaktadır. Bu ihmal, yapıların yangın etkisiyle önemli derecede hasar görmesine ya da tamamen kullanım dışı kalmasına neden olabilmektedir.

Betonarme yapıların yangın etkisiyle kullanım dışı kalma nedenlerinden biri yüksek sıcaklıklarda donatı dayanımında meydana gelen azalmadır. Bu nedenle donatıyı yüksek sıcaklıklardan önemli oranda koruyan pas payının yeterli olması yapının yangın başarımını artırmaktadır. Yüksek ısı yayılım katsayısına sahip olan donatılarda sıcaklık hızlı bir şekilde artmaktadır. Donatıyı örten betonun boşluklu yapısı ve bu boşluklarda hareket eden su buharı ısı yalıtımı sağlayarak donatıdaki sıcaklık artışını önemli ölçüde azaltmaktadır. Ancak, 600°C civarı sıcaklıklarda meydana gelen kavlanma nedeniyle beton örtü kalınlığı ısı yalıtım özelliğini kaybetmektedir.

Betonarme yapıların yangın etkisiyle kullanım dışı kalmasının diğer bir nedeni de yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımının azalmasıdır. Beton basınç dayanımındaki azalma, betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının taşıma güçlerinin azalmasına ve elemanların genellikle gevrek bir kırılma ile göçmesine neden olmaktadır.

Tüm bu değerlendirmeler göz önüne alındığında, betonarme yapı ya da yapı elemanlarının yangın koşullarındaki yapısal davranışlarının incelenerek yangın başarımlarının belirlenmesi konusunun kritik bir öneme sahip olduğu ortaya çıkmaktadır.

Yangına maruz yapılarda daha büyük şekilde değişimlerin meydana gelmesi ve yüksek sıcaklık etkisiyle yapı malzemesinin gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarının doğrusallıktan çıkması beklenmektedir. Bu nedenle, yapısal çözümler sırasında doğrusal olmayan davranışın dikkate alınmasının daha uygun ve gerçekçi olacağı açıktır. Ayrıca elemanlardaki sıcaklık geçmişlerinin belirlenebilmesi için de yine doğrusal olmayan ısı çözümlerinin kullanılması gerekmektedir. Yapısal çözümleme sırasında malzeme özelliklerinin ısı analiz sonuçlarına bağlı olarak her bir sıcaklık değerinde farklı değerler alması, rijitlik matrisinin de her bir adımda değişmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla çözümler sırasında el ile yapılacak hesaplamaların yerine, özel sonlu eleman analiz programlarının kullanılması daha uygun olacaktır.

## **1.9. Yangın Başarımlarının Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler**

### **1.9.1. Deneysel Yöntemler**

Yangın başarımının belirlenmesi için kullanılabilen en gerçekçi yöntem deneysel yöntemdir. Deneyler 1/1 ölçekli yapı örneği ya da ölçekli yapı elemanları üzerinde temsili ya da doğal yangın etkileri altında gerçekleştirilmektedir. Buna rağmen yangın koşullarındaki bir yapı ya da yapı elemanının yangın başarımının deneyle belirlenmesi, özellikle büyük ve karmaşık yapılar düşünüldüğünde diğer yöntemlere kıyasla bazı dezavantajlara sahiptir. Deneysel çalışmanın yürütülmesi için yapılan hazırlıkların uzun zaman alması ve deneysel çalışma için yapılacak kurulum ve uygulama masraflarının çok yüksek olması bu dezavantajlara örnek olarak gösterilebilir.

Ayrıca, deney fırınında bitişik elemanların mesnetleme koşulları ile sürekliliklerinin doğru bir şekilde sağlanması oldukça zordur. Bu nedenle deneyler genellikle tekil yapı elemanları üzerinde gerçekleştirilmektedir. Deney numunesinin aynı boyutlara, gerilme seviyesine ve mesnetlenme koşullarına sahip olması şartıyla, betonarme bir elemanın yangın başarımı gerçekçi bir şekilde deneysel olarak belirlenebilmektedir.

Geçmişte betonarme yapıların yangın başarımları yalnızca deneysel çalışmalarla belirlenebilmekteydi. Günümüzde ise yüksek sıcaklıklarda betonarmeyi oluşturan yapı malzemelerinin ısı ve mekanik özelliklerinin bilinmesi, gelişen teknolojiye uygun olarak hazırlanan bilgisayar programları, yangın başarımının belirlenmesi için alternatif yöntemleri ortaya çıkarmıştır.

### **1.9.2. Talimata Dayalı Yöntemler**

Yangın mühendisliği uygulamaları genellikle talimata dayalı yöntemlerle yapılmaktadır. Talimata dayalı yöntemler kullanılarak standart yangın etkisindeki yapı elemanları 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 dakika içinde göçmeyecek şekilde tasarlanmaktadır. Bu yöntemler kullanılarak, yapı elemanlarının yangın başarımları belirlenirken standartlarda ve yönetmeliklerde yer alan tablolaştırılmış verilerden yararlanılmaktadır. Mühendislik önsezisini dikkate almayan bu yöntem birçok bakımdan katı ve sınırlayıcıdır.

Talimata dayalı yöntemlerle elde edilen sonuçların güvenilirlik seviyesi önemli miktarda değişim göstermektedir. Birçok durumda çok güvenli tarafta kalan bu yöntem

bazı durumlarda da güvensiz olabilmesi nedeniyle yangın başarımının belirlenmesinde kullanılan diğer yöntemlere kıyasla en az doğru olandır. Tüm bu nedenler yangın başarımının belirlenmesinde kullanılan performans dayalı yöntemlerin geliştirilmesine ve tasarımcıyı performansa dayalı yöntemleri kullanmaya yöneltmektedir.

### **1.9.3. Performansa Dayalı Yöntemler**

Yangın başarımının belirlenmesinde performansa dayalı yöntemlerin kullanımı talimata dayalı yöntemlere kıyasla daha etkili ve esnek bir değerlendirme sağlamaktadır. Ayrıca, yangın deneylerinde oluşturulması çok zor olabilecek bazı yapı koşulları gelişmiş bilgisayar programları kullanılarak modellenmektedir. Performansa dayalı yöntemler, yapısal çözümlemenin bir parçası olarak ısı çözümü gerektirmektedir. Ele alınan problem farklı yangın senaryoları, geometriler, malzeme özellikleri, yükleme ve mesnet koşullarına göre incelenebilmektedir. Ayrıca bu yöntemler kullanılarak, sönme aşaması da dahil olmak üzere yangının tüm aşamaları dikkate alınabilmekte ve yangın koşullarındaki yapısal davranış kısa bir sürede belirlenebilmektedir.

### **1.9.4. Doğrulama Yöntemleri**

Eurocode, yangın koşullarındaki bir yapıdan istenen performansı doğrulamak için üç farklı analiz yöntemi sunmaktadır (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1993-1-2, 2005).

#### **1.9.4.1. Yapının Tamamının Analizi**

Bu analizde, yapı bir bütün olarak ele alınmaktadır. Farklı yapı elemanları arasındaki tüm etkileşimler, ısı genleşmeler ve deformasyonların etkileri hesaba katılarak modellenmektedir. Analizlerde ayrıca; yangın koşullarındaki yapının göçme mekanizması, sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren malzeme özellikleri ve eleman rijitlikleri de dikkate alınmaktadır. Bu analizler oldukça karmaşık fakat en gerçekçi yaklaşımları ortaya koymaktadır. Çözümler için gelişmiş bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır.



#### **1.9.4.2. Yapının Bir Bölümünün Analizi**

Bu analizde, yapı birkaç bölüme ayrılmakta ve bu bölümler ayrı ayrı tasarlanmaktadır. Seçilen yapı bölümünün, yapının geri kalan kısmı ile olan etkileşiminin yangın süresince değişmediği varsayılmaktadır. Seçilen yapı bölümüne ait mesnetlerdeki sınır şartları ve bu bölümün uç noktalarındaki kuvvet ve moment değerleri,  $t = 0$  zamanındaki değerlerine eşit olarak alınır. Yapının tamamının analizine benzer şekilde, bu analizde de seçilen yapı bölümünün yangın koşullarındaki göçme mekanizması, sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren malzeme özellikleri, eleman rijitlikleri, ısı genleşmeler ve deformasyon etkileri hesaba katılmalıdır. Bu tür çözümler, yapının bir bütün olarak ele alındığı bir modele kıyasla çok daha az eleman ve parametre içermesi nedeniyle daha az karmaşık olduğu söylenebilir. Ancak, seçilen yapı bölümünü oluşturan elemanlar arasındaki etkileşim bu analizde de hesaba katılmaktadır.

#### **1.9.4.3. Eleman Analizi**

Bu analizde, birçok basitleştirme yapılmakta ve farklı yapısal elemanlar arasındaki etkileşim ihmal edilmektedir. Analizler sırasında, eleman kesitindeki ısı değişiminden kaynaklanan deformasyonlara bağlı etkilerin dikkate alınması yeterlidir. Eksenel veya kesit düzlemindeki ısı genleşme etkileri ihmal edilebilir.

### **1.10. Betonarme Yapılarda Yangın Tasarımı**

#### **1.10.1. Yangına Dayanım**

Yangına dayanım, yangın koşullarındaki bir elemanın işlevini belirli bir süre için yerine getirme yeteneği olarak tanımlanabilir. Bu işlev; yük taşıma, ayırma veya bunların her ikisi de olabilir. Kolon, kiriş gibi yük taşıma işlevi olan elemanlar, yangın koşullarında da mekanik dayanım gerektirmektedir. Yük taşımayan duvarlar gibi ayırma elemanları ise bir yangın bölmesinin diğer bölmelerle olan bağlantısını keserek, yangın süresince yangının yayılımını önleme görevini üstlenmektedir. Döşeme elemanları ise hem taşıma

hem de ayırma işlevine sahiptir. EN 1991-1-2'de (2002) üç performans kriteri tanımlanmaktadır.

- Yük taşıma kapasitesi (R): Tanımlanan kriterlere göre bir yapının veya bir elemanın ilgili yangın süresince belirli eylemleri sürdürme kabiliyetidir.
- Bütünlük (E): Bir ayırma elemanının, yangın koşullarında alevlerin ve sıcak gazların geçişini engelleme ve yangına maruz kalmayan tarafta alev oluşumunu önleme kabiliyetidir.
- Yalıtım (I): Bir ayırma elemanının, yangına maruz kalmayan tarafındaki sıcaklık artışını belirli bir seviyede tutma kabiliyetidir.

Yük taşıma işlevinin gerektiği durumlarda R kriteri, ayırma işlevinin gerektiği durumlarda ise E ve/veya I kriterleri yerine getirilmelidir. İhtiyaç duyulan kriter ve/veya kriterler tasarım için kullanılan yangınla ilişkili olup, yangın süresince de karşılanmalıdır. Kriterlerin karşılanması, elemanın tasarım için kullanılan yangına dayanabileceği anlamına gelmektedir. Ancak, buradan elemanın hasar görmediği anlamını çıkarmak yanlıştır.

Taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan yapı elemanlarının veya yangın kapısı gibi ürünlerin yangına dayanımları, standart yangın etkisi altında ilgili kriterleri karşıladıkları süre ölçülerek veya hesaplanarak belirlenmektedir. Elemana yangına dayanabileceği belirli bir süreye ( $t$ ) eşit veya bu süreden daha kısa bir süre için; R, E, I veya başka bir kriteri temsil eden farklı bir harften, bir veya daha fazlası verilerek yangına dayanım derecesi tanımlanır. Bu süre genellikle 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 dakika değerleri arasından geçilir. Bu durumda ortak kodlar; yük taşıyıcı elemanlar için  $REI t$ ,  $RE t$  ve  $R t$  iken, taşıyıcı olmayan elemanlar için  $EI t$  ve  $E t$  'dir. Örneğin; yangın koşullarında bir saat boyunca stabilitesini koruyan kolon R60, yarım saat boyunca alev almayan yangın kapısı E30 ve bir saat boyunca alev almayan taşıyıcı olmayan duvar ise EI60 olarak sınıflandırılmaktadır.

Daha detaylı olarak, aktif ve pasif yangın önlemlerinin değerlendirilmesi için yangına maruz kalan betonarme bir yapıdan istenen işlevler ve performans seviyeleri, performansa dayalı bir tasarım ile belirlenebilir.

### 1.10.2. Tasarım Stratejileri

Bir yapı elemanının gerekli yangın dayanımına sahip olup olmadığını kontrol etmek için aşağıdaki adımlar izlenmelidir.

- Yangın senaryosunun seçilmesi
- Tasarım yangınının belirlenmesi
- Sıcaklık profilinin belirlenmesi
- Mekanik davranışın hesaplanması
- Yangın dayanımının değerlendirilmesi

Genel hatlarıyla; EN 1991-1-2 (2002) yukarıdaki ilk iki adımı kapsamaktadır. Kullanılan yapı malzemesi türüne göre değişim gösteren yönetmeliklerin yangın bölümleri ise geriye kalan üç adımı kapsamaktadır.

#### **1.10.2.1. Yangın Senaryosunun Seçilmesi**

EN 1991-1-2'de (2002) tasarım yangını senaryosu, üzerinde analizin yapılacağı özel bir yangın durumu olarak tanımlanmaktadır. Örneğin; yangının olduğu yapı türüne (bina, tünel, petrokimya tesisi vb.) bağlı olarak yangının ne tür (selülozik, hidrokarbon vb.) bir yangın olduğu, lokal veya tam gelişmiş bir yangın oluşu gibi durumlar yangın senaryosunu özelleştiren durumlardır. Yangın senaryosu, olası tutuşturma kaynakları ve mevcut yangın algılama-bastırma sistemleri dikkate alınarak yapılacak bir risk değerlendirmesine bağlı olarak seçilmelidir. Bölmenin uygun boyutu, doluluk oranı ve havalandırma koşulları makul kötü durum senaryosuna göre belirlenir. Bu aşamadan sonra analizde kullanılacak tasarım yangınının seçimi yapılacaktır.

#### **1.10.2.2. Tasarım Yangınının Belirlenmesi**

EN 1991-1-2'de (2002) tasarım yangını; tasarım amaçları için öngörülen yangının gelişimi, yani bir yangının davranışını temsil eden bir model olarak tanımlanmaktadır. Temsili ve doğal yangın modeli olmak üzere iki tür yangın modeli bulunmaktadır. Temsili bir yangın modeli, bölme içindeki gazların sıcaklığını zamanın fonksiyonu olarak veren basit bir ilişkiden oluşmaktadır. Bu modellerin kullanımı kolay olup, sınıflandırma ve karşılaştırma için de kullanışlıdır. Örneğin; farklı yapı elemanlarının veya yapı ürünlerinin yangına dayanımı genellikle, temsili bir yangın modeli olan standart sıcaklık-zaman eğrilerine göre değerlendirilmektedir. Ancak bu tip tasarım yangınlarının düşünülen yapının yangın yükü, bölme kaplamalarının ısı özellikleri ve havalandırma durumu gibi

özel karakteristikleri ile ilişkisi bulunmamaktadır. Öte yandan, doğal yangın modelleri ise belirli bir yapıya özgü bu fiziksel parametreler göz önüne alınarak hesaplanmaktadır. Farklı tasarım yangınları hakkında daha detaylı bilgilere Bölüm 1.10.3'te yer verilmiştir. Yangın tasarım senaryosunda aksi belirtilmedikçe, seçilen tasarım yangını yapının tamamına değil, sadece bir bölümüne uygulanmalıdır.

#### **1.10.2.3. Sıcaklık Profillerinin Belirlenmesi**

Uygun bir tasarım yangını seçtikten sonra net ısı akısı belirlenebilir. Bu net ısı akısı sıcaklık analizinde, yapı elemanların ve koruyucu yüzeylerin ısı malzeme özellikleri ile birlikte, betonarme eleman kesitleri içindeki sıcaklık profillerini belirlemek için kullanılır. Sıcaklık analizi ışıma ve taşıma ile gerçekleşen ısı transferlerinin birleştirilmesi ile yapılmaktadır.

Sıcaklık analizinin yapılacağı süre tasarım yangınının türüne bağlıdır. Temsili bir sıcaklık-zaman eğrisi kullanıldığında herhangi bir soğuma aşaması olmaksızın, analiz sınırlı bir süre boyunca gerçekleştirilir. Doğal bir yangın modeli kullanıldığında ise soğuma aşaması da dahil olmak üzere, analiz yangın süresinin tamamı boyunca gerçekleştirilebilir.

#### **1.10.2.4. Mekanik Davranışın Hesaplanması**

Bu aşamada, yangın koşullarında tüm mekanik eylemler ve bu eylemlerin kombinasyonu ile oluşan etkiler belirlenmektedir. Hangi etkilerin hesaba katılması gerektiği EN 1991-1-2'de (2002), bu etkilerin nasıl kombine edildiği ise EN 1990'da (2002) detaylı olarak açıklanmıştır. Mekanik analiz, sıcaklık analizinde kullanılan yangına maruz kalma süresi için gerçekleştirilmelidir.

#### **1.10.2.5. Yangın Dayanımının Değerlendirilmesi**

Yangına dayanım; yük taşıma kapasitesi, bütünlük, yalıtım vb. kriterlerin karşılanması ile sağlanmaktadır.

Bir yapının, yapının bir bölümünün veya bir yapı elemanının yük taşıma kapasitesi, dayanım bazında doğrulanmaktadır ve bu da ilgili yangına maruz kalma süresi ( $t$ ) için uygulanan yüklerin, yük taşıma kapasitesinden daha az olduğu anlamına gelmektedir. Yangına maruz kalma süresi  $t$ , sıcaklık analizindeki süre ile aynıdır.

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

Bütünlük ve yalıtım kriterleri yalnızca sıcaklık analizi kullanılarak doğrulanmaktadır. Pratik olarak, yangına maruz kalmayan yüzeyin tamamındaki ortalama sıcaklık artışı  $140^{\circ}\text{C}$ 'den fazla değilse ve bu yüzeyin herhangi bir noktasındaki en büyük sıcaklık artışı  $180^{\circ}\text{C}$ 'den fazla değilse I kriterinin sağlandığı kabul edilebilir.

Bazı durumlarda tasarım, yangına dayanımın yanı sıra deformasyon kriterleri gibi ek kriterler de gerektirebilmektedir.

### 1.10.3. Sıcaklık Analizi İçin Isıl Etkiler

Isıl etki, yangının yapı üzerindeki etkisini ifade etmektedir. Bu etki, sıcaklık-zaman ilişkileriyle veya direkt olarak yapıya etki eden bir ısı akısı şeklinde verilebilmektedir.

Sıcaklık-zaman ilişkileri; yapıyı çevreleyen gazların sıcaklığını temsil eden bir sıcaklık gelişimini zamanın bir fonksiyonu olarak vermektedir. Bu sıcaklık, uygun sınır koşulları ile birlikte ortamdan yapıya iletilen ısı akısını belirlemek için kullanılabilir. EN 1991-1-2'de (2002) farklı temsili sıcaklık-zaman eğrilerine ve doğal yangın modellerine detaylı olarak yer verilmektedir.

Kullanılacak ısıl etki; genellikle yapının boyutu, kullanım ve doluluk durumuna bağlı olarak, yapının bulunduğu ülke veya bölge tarafından tanımlanan yasal bir gerekliliktir. Bazı ülkeler, hem sıcaklık-zaman eğrisini hem de yangın dayanımı olarak adlandırılan ve yapının bu eğriye maruz kaldığında geçmeden ayakta kalabileceği zamanı tanımlayan kuralcı gereklilikler sunmaktadır. Bu gibi durumlarda tasarımcı, belirtilen sıcaklık-zaman eğrisini kullanarak yapının bu gereksinimlere uygunluğunu göstermelidir. Bazı ülkelerde ise kurallar daha esnek olabilmekte ve tasarımcının performansına dayalı bir tasarım yapmasına izin verilmektedir. Böyle bir durumda ise yangının uygun bir temsilinin kullanımı tasarımcının sorumluluğundadır. Tasarımcı Eurocode'da önerilen doğal yangın

modellerini kullanırken, bu modellerin uygulama şartlarına da dikkat etmelidir. Doğal yangın modellerinin kullanımı, genellikle tahliye ve müdahale için gereken süre gibi performansa dayalı gereksinimler dikkate alındığında tercih edilmektedir.

Performansa dayalı tasarıma başlamadan önce, uygun bir yangın senaryosu ve tasarım yangını seçimi son derece önemlidir. Ayrıca, sıcaklık analizi yapabilmek için seçilen tasarım yangınına bağlı olarak net ısı akısının hesaplanması gerekmektedir.

### 1.10.3.1. Net Isı Akısı

Isıl etkiler taşınım ve ışıyım ile gerçekleşen ısı transferlerinin toplamından oluşur ve ilgili eleman yüzeyindeki net ısı akısı  $\dot{h}_{net}$  (W/m<sup>2</sup>) olarak tanımlanır.

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

Taşınım ile gerçekleşen net ısı akısı  $\dot{h}_{net,c}$  (W/m<sup>2</sup>) ve ışıyım ile gerçekleşen net ısı akısı  $\dot{h}_{net,r}$  (W/m<sup>2</sup>) aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad (1.3)$$

$$\dot{h}_{net,r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma^{sb} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (1.4)$$

Ortam sıcaklığı, temsili sıcaklık-zaman eğrilerinde olduğu gibi bir gaz sıcaklığı ile temsil edildiğinde, yangına maruz kalan yapısal elemanın yüzeyindeki ısı akısını belirlemek için, (1.3) ve (1.4) denklemlerinin (1.2) denkleminde yerine yazılması ile elde edilen (1.5) denklemi kullanılmalıdır.

$$\dot{h}_{net} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) + \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma^{sb} \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad (1.5)$$

Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı  $\alpha_c$ , seçilen tasarım yangınına bağlı olarak EN 1991-1-2'de (2002) verilmektedir. Bu değer standart ve harici yangın eğrileri için 25 W/m<sup>2</sup>K, hidrokarbon eğrisi için 50 W/m<sup>2</sup>K olarak alınır. Yangına maruz kalan

elemanın çevresindeki gaz sıcaklığı  $\theta_g$ , dikkate alınan yangın eğrisine ait denklem yardımıyla hesaplanır. Yüzey sıcaklığı  $\theta_m$ , tasarım yangını seçimine bağlı olarak hesaplanan gaz sıcaklığı  $\theta_g$  dikkate alınarak yapılan sıcaklık analizi ile belirlenmektedir. Beton için düzenleme faktörü en az  $\Phi = 1$  olarak alınmalıdır. Ancak, olası konum ve gölge etkilerinin hesaba katılması durumunda 1'den daha düşük bir değer de kullanılabilir. Bununla ilgili detaylı bilgi EN 1991-1-2 (2002) Ek G'de bulunabilir. Beton yüzeyin ısı yayıcılığı  $\varepsilon_m = 0.7$ 'dir (EN 1992-1-2, 2004). Yangının ısı yayıcılığı ise genellikle  $\varepsilon_f = 1$  olarak alınmaktadır. Stephan Boltzmann sabiti  $\sigma^{sb}$ ,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$  değerine eşittir. Bir elemanın yangın tarafından tamamen sarılması durumunda ortamdaki ışınlam sıcaklığı  $\theta_r$ , yangına maruz kalan elemanın çevresindeki gaz sıcaklığı  $\theta_g$  ile temsil edilebilir.

### 1.10.3.2. Temsili Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Temsili sıcaklık-zaman eğrileri, gaz sıcaklığını sadece bir parametrenin (zaman) fonksiyonu olarak veren, net bir ifade ile yangını temsil eden analitik fonksiyonlardır. Temsili sıcaklık-zaman eğrilerinin, dikkate alınan yapının kendine özel karakteristikleri (yangın yükü, bölme kaplamalarının ısı özellikleri, havalandırma koşulları vb.) ile hiçbir ilişkisi bulunmamaktadır. Sıcaklığın bölmeye üniform olarak dağıldığı varsayılmaktadır. Temsili sıcaklık-zaman eğrilerinin hiçbirinde yangının sönme aşaması dikkate alınmamaktadır. Dolayısıyla, bu eğrilerin gerçek bir yangını tam olarak temsil ettiği söylenemez. Ancak dikkate alınan sıcaklık değerleri, yangınlarda gözlenen sıcaklıklar ile aynı büyüklük düzeyindedir.

Literatürde birçok sıcaklık-zaman eğrisi bulunmasına rağmen, bu tez çalışmasında yalnızca EN 1991-1-2'de (2002) verilen üç adet temsili yangın eğrisi ve ASTM E119 (2007) standart yangın eğrisi dikkate alınmıştır (Şekil 1.5).

#### 1.10.3.2.1. Standart Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Tipik bir bina yangını temsil edecek şekilde tasarlanan standart sıcaklık-zaman eğrileri; yakıt kaynağı olarak ahşap, kağıt, kumaş vb. malzemelerin dikkate alındığı

selülozik yangınlardır. Standart sıcaklık-zaman eğrisi, bir bölmede tam gelişmiş bir yangını temsil etmek ve yangın testlerinde yapısal ve ayırıcı (taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan) elemanların yangın başarımlarını belirlemek için kullanılmaktadır. En çok kullanılan standart sıcaklık-zaman eğrileri ISO 834 (1975) ve ASTM E119'dur. ISO 834 standart yangın eğrisine ait denklem:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (1.6)$$

şeklinde ifade edilirken, ASTM E119 standart yangın eğrisine ait denklem:

$$\theta_g = 20 + 750 \left(1 - e^{-3.79553 \sqrt{t/60}}\right) + 170.41 \sqrt{t/60} \quad (1.7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\theta_g$  gaz sıcaklığını ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $t$  ise zamanı (dakika) göstermektedir.

ISO 834 ve ASTM E119 eğrilerine ait davranışlar Şekil 1.5'te verilmiştir. Şekil 1.5'ten; bu eğrilerin benzer bir davranış sergilediği, sıcaklığın 15 dakika içinde hızlı bir şekilde yaklaşık  $745^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaştığı ve ilerleyen zamanla sıcaklık artışının azalarak devam ettiği görülmektedir. Eğriler incelendiğinde, yaklaşık  $800^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar olan ani sıcaklık artışının gerçekleştiği genel tutuşma aşaması, sonrasında ise tam gelişmiş yangın aşaması olmak üzere yangının iki aşaması görülebilmektedir. Doğal bir yangın eğrisi ile standart bir yangın eğrisinin karşılaştırılması Şekil 1.4'ten görülebilmektedir.

#### 1.10.3.2.2. Harici Yangın Eğrisi

Harici yangın eğrisi, yapının dış cephesindeki farklı bölümlerde yangına maruz kalan yapısal elemanların dış yüzeyleri için kullanılmaktadır. Harici yangın eğrisinin denklemi,

$$\theta_g = 660 \left(1 - 0.687 e^{-0.32t} - 0.313 e^{-3.8t}\right) + 20 \quad (1.8)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Şekil 1.5'ten de görülebileceği üzere, harici yangın eğrisi 15 dakika içinde  $680^{\circ}\text{C}$ 'lik sabit bir sıcaklığa ulaşmaktadır.



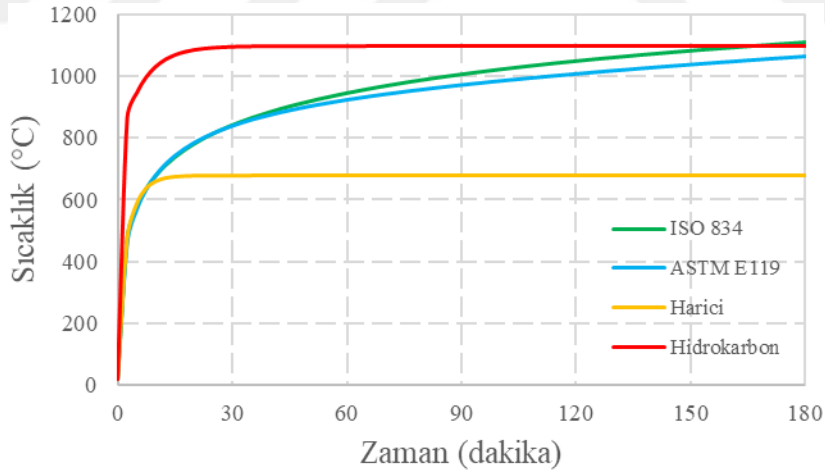
### 1.10.3.2.3. Hidrokarbon Eğrisi

Hidrokarbon eğrisi; yakıt kaynağı olarak petrokimyasal maddeleri dikkate alan, petrol kuyuları gibi yapılarda meydana gelen bir yangının etkisini temsil etmek için kullanılan hidrokarbon tipi bir yangındır. Hidrokarbon eğrisi, petrol şirketi Mobil tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmiştir. Araştırma, petrol kuyularında ve petrol komplekslerinde kullanılan yangından korunma malzemeleri için bir test prosedürü başlatmak amacı ile yürütülmüştür. Hidrokarbon eğrisinin denklemi:

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \quad (1.9)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hidrokarbon eğrisinde, sıcaklığın ilk 5 dakikada yaklaşık 900°C'ye kadar çok hızlı bir şekilde arttığı, 30 dakika sonra 1100°C'lik sabit bir sıcaklığa ulaştığı görülmektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Temsili sıcaklık-zaman eğrileri ve bu eğrilerin karşılaştırılması (EN 1991-1-2, 2002).

### 1.10.3.3. Doğal Yangın Modelleri

Doğal yangın modelleri, belirli bir yapıya özgü fiziksel parametrelerin değerlendirilmesine dayalı hesaplama teknikleri ile bir yangını temsil etmektedir. Yangının

soğuma aşamasını da dikkate alan bu modeller, çok daha gerçekçi bir yangın davranışına olanak sağlamaktadır. Ancak, bu modellerin kullanımı standart sıcaklık-zaman eğrilerinin kullanımına kıyasla daha karmaşıktır. Tasarım yangın yükü yoğunluğu ve ısı salınım miktarının belirlenmesine dair detaylı bilgi EN 1991-1-2 (2002) Ek E’de verilmektedir.

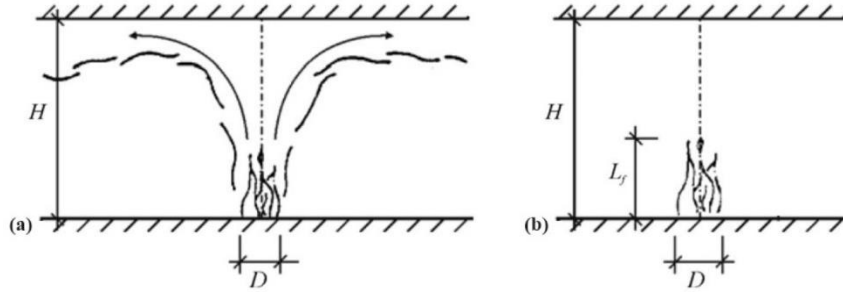
#### **1.10.3.3.1. Basitleştirilmiş Yangın Modelleri**

Basitleştirilmiş yangın modelleri, sınırlı bir uygulama alanındaki; yakıt yükü, havalandırma boşlukları ve kaplama malzemelerinin ısıl özellikleri gibi spesifik fiziksel parametrelerin herhangi bir kombinasyonu için sıcaklık-zaman ilişkisi üretmektedir.

Bir bölme yangınında, sıcaklığın zamanın bir fonksiyonu olarak üniform bir şekilde dağıldığı varsayılmaktadır. Burada, herhangi bir uygun yangın modeli kullanılabilir, ancak bu model en az yangın yükü yoğunluğu ve havalandırma koşullarına dayalı olmalıdır. EN 1991-1-2 (2002) Ek A’da bahsi geçen parametreleri dikkate alan bir yöntem verilmiştir. Bu yöntem yardımıyla oluşturulan parametrik sıcaklık-zaman eğrileri kullanılarak ilgili bölmeğe ait gaz sıcaklığının gelişimi elde edilebilir. Microsoft Excel gibi tablolama programlarında kullanımı çok uygun olan parametrik sıcaklık-zaman eğrileri, yangının yalnızca genel tutuşma sonrası evresini dikkate alarak, bölmedeki gaz sıcaklığının belirlenmesi için hızlı ve kolay bir yaklaşım sağlamaktadır.

Yapının dış cephelerinde bulunan yapısal elemanların dış yüzeyleri, doğrudan yangın bölmesinin içinden ya da bu bölmenin dış duvarına bitişik veya bölme dış duvarının altında bulunan diğer yangın bölmelerindeki boşluklardan çıkan alevler nedeniyle yangına maruz kalabilir. Bu harici elemanlar için ısıl etkilerin belirlenmesi, EN 1991-1-2 (2002) Ek B’de detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

Birçok durumda, yangın anında genel tutuşmanın gerçekleşmesi olası değildir. Genel tutuşmanın gerçekleşmediği durumlarda, lokal bir yangının (Şekil 1.6) ısıl etkileri hesaba katılmalıdır. Bu gibi durumlarda sıcaklık bölmeye üniform olarak dağılmamaktadır. Bu tür bir yangın, genelleştirilmiş bir yangından daha zararsız görünebilir. Ancak, bu yangınlar yapıda veya yapının bir bölümünde ciddi hasara neden olabilir. EN 1991-1-2 (2002) Ek C’de, lokal bir yangın durumunda sıcaklıkların hesaplanması için gereken yöntemle ait bir örnek sunulmaktadır.



Şekil 1.6. Alevin bölme tavanını etkilediği (a) ve etkilemediği (b) durumları için lokal yangın modelleri

#### 1.10.3.3.1.1. Parametrik Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Parametrik sıcaklık-zaman eğrileri, bir bölmedeki yangının gelişimini etkileyen en önemli fiziksel olguları temsil eden parametrelere dayanarak, gaz sıcaklığının gelişimini zamanın bir fonksiyonu olarak ifade eden analitik fonksiyonlardır. EN 1991-1-2 (2002) Ek A'da tanımlanan parametrik sıcaklık-zaman eğrileri; tavanında açıklığı bulunmayan, en büyük bölme yüksekliği 4 m ve taban alanı 500 m<sup>2</sup>'ye kadar olan yangın bölmeleri için geçerlidir. Bölmedeki yangın yükünün tamamen yandığı kabul edilmekte olup, eğriyi tanımlayan üç parametre bulunmaktadır.

Bunların ilki, yangın sonucu ortaya çıkan enerjinin bir kısmını absorbe eden bölme sınırlarının (duvarlar, taban ve tavan) toplam ısı emme kapasitesi ile ilgili olan  $b$  parametresidir. Bu parametre, bölme sınırlarının tek bir malzemeden yapıldığı durumlar için denklem (1.10) kullanılarak hesaplanır.

$$b = \sqrt{\rho c \lambda} \quad (1.10)$$

Bu denklemde;  $\rho$  bölme sınırlarını oluşturan malzemenin özgül ağırlığını (kg/m<sup>3</sup>),  $c$  malzemenin özgül ısısını (J/kgK) ve  $\lambda$  ise malzemenin ısı iletkenlik katsayısını (W/mK) ifade etmektedir. Bir basitleştirme olarak, hesaplamalarda bu üç özelliğin oda sıcaklığındaki değerleri kullanılabilir. Tablo 1.1'de çeşitli yüzey malzemeleri için bu özelliklerin oda sıcaklığındaki değerleri verilmiştir.

Bölme duvarları, tabanı ve tavanının farklı malzemelerden yapıldığı durumlarda, açıklıklar dahil olmamak üzere her bir bölümü ayrı ayrı değerlendirilerek ilgili bölme için global bir  $b$  değeri hesaplanır.

$$b = \frac{\sum b_i A_i}{\sum A_i} \quad (1.11)$$

Bu denklemde;  $b_i$   $i$ . tabaka için hesaplanan katsayının değerini,  $A_i$  ise açıklıklar dahil olmamak üzere  $i$ . tabakanın alanını ifade etmektedir.

Tablo 1.1. Çeşitli yüzey malzemelerinin özellikleri

Malzeme	Özgül Ağırlık $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik $\lambda$ (W/mK)	Özgül Isı $c$ (J/kgK)
<b>Tuğla</b>			
<i>Gazbeton</i>	550	0.14	840
<i>Ağır tuğla</i>	2000	1.2	1000
<i>Hafif delikli tuğla</i>	700	0.15	840
<i>Normal tuğla</i>	1600	0.7	840
<b>Beton</b>			
<i>Hafif beton</i>	1600	0.8	840
<i>Orta ağırlıklı beton</i>	1800	1.15	1000
<i>Normal beton</i>	2300	1.6	1000
<b>Alçı</b>			
<i>Alçıpan</i>	900	0.25	1000
<i>Alçı sıvası</i>	1150	0.485	1000
<b>Çelik</b>			
<i>Karbon çeliği</i>	7850	45	600
<b>Taş</b>			
<i>Granit taş</i>	2600	2.8	1000
<b>Yün</b>			
<i>Camyünü</i>	60	0.037	1030
<i>Taşıyünü</i>	60	0.037	1030
<b>Ahşap</b>			
<i>Ağır ahşap</i>	720	0.2	1880
<i>Normal ahşap</i>	450	0.1	1113

Farklı malzeme özelliklerine sahip iki tabakanın bulunduğu bir yüzeyde,  $b_1$  yangına doğrudan maruz kalan dış tabakanın,  $b_2$  ise iç tabakanın  $b$  faktörünü temsil etmek üzere,  $b_1 < b_2$  olması durumunda bu yüzeyin  $b$  faktörü  $b = b_1$  olarak kabul edilir.  $b_1 > b_2$  olması durumunda ise,  $s_1$  dış tabakanın kalınlığını ve  $s_{smr}$  EN 1991-1-2 (2002) Ek A'da verilen denklem yardımıyla belirlenen kalınlık sınırını temsil etmek üzere,  $s_1 > s_{smr}$  olması durumunda bu yüzeyin  $b$  faktörü  $b = b_1$  olarak kabul edilirken,  $s_1 < s_{smr}$  olması

durumunda ise EN 1991-1-2 (2002) Ek A'da verilen ve iç tabakanın etkilerini de hesaba katan bir denklem ile belirlenmektedir. Tabaka sayısının ikiden fazla olduğu durumlarda indis numarası artırılarak aynı yöntem takip edilir.

$b$  parametresi, 100 ila 2200 J/m<sup>2</sup>s<sup>1/2</sup>K arasında bir değere sahip olmalıdır.  $b$  parametresi, yarı-sonsuz bir ortamda ısının iletim yoluyla soğurulması teorisine dayanmaktadır. Isının hava boşluğunda ışıyım ile yayılması nedeniyle, hava boşluğu ile ayrılan iki alçı levha tabakasından yapılmış bir duvar göz önüne alındığında, havanın  $\rho$ ,  $c$  ve  $\lambda$  değerleri ile Eurocode denklemlerinin uygulanması doğru olmayacaktır.

Bir diğer parametre, düşey duvarlardaki açıklıkları hesaba katan  $O$  parametresidir. Bu parametredeki artış, bölme için daha fazla havalandırma anlamına gelmektedir. Eurocode denklemlerinin uygulanabilirliği açısından, bu parametrenin 0.02 ila 0.20 değerleri aralığında olması gerekmektedir. Bölme içerisinde tek bir açıklığın mevcut olduğu durumlarda, açıklık faktörü denklem (1.12) kullanılarak hesaplanır. Bu denklem, açıklığın düşey pozisyonunun bir fonksiyonu olarak, bölmenin iç ve dış kısmı arasında doğrusal olarak değişen basınç farkı için Bernoulli denkleminin entegrasyonundan elde edilmiştir.

$$O = A_v \sqrt{h} / A_t \quad (1.12)$$

Bu denklemde;  $A_v$  açıklık alanını,  $h$  açıklık yüksekliğini ve  $A_t$  ise açıklık alanları da dahil olmak üzere yangına maruz kalan bölme sınırlarının (duvarlar, taban ve tavan) toplam alanını ifade etmektedir.

Denklem (1.12)'den de görülebileceği üzere, belirli bir açıklık alanı için bölmenin havalandırılmasında düşey olarak konumlandırılmış bir açıklık, yatay olarak konumlandırılmış bir açıklığa kıyasla daha etkili olacaktır. Bölme içinde birçok açıklığın mevcut olduğu durumlarda, açıklık faktörü denklem (1.13) kullanılarak hesaplanır.

$$O = A_v \sqrt{h_{eq}} / A_t \quad (1.13)$$

Bu denklemde;  $A_v$  düşey açıklıkların toplam alanını göstermek üzere, açıklık yüksekliklerinin ağırlıklı ortalaması  $h_{eq}$ , denklem (1.14) kullanılarak hesaplanır.

$$h_{eq} = \frac{\sum_i A_{vi} h_i}{A_v} \quad (1.14)$$

Son parametre, açıklık alanları da dahil olmak üzere yangına maruz kalan bölme sınırlarının toplam alanı ile ilgili yangın yükü yoğunluğudur. Bölmenin tasarım yangın yükü yoğunluğu denklem (1.5) kullanılarak belirlenir. Bu denklemde yer alan bölme tabanının yüzey alanı ile ilgili tasarım yangın yükü yoğunluğu, bölmenin kullanım amacına ve farklı aktif yangından korunma yöntemlerinin varlığına dayalı olarak EN 1991-1-2 (2002) Ek E'de verilmektedir.

$$q_{t,d} = \frac{q_{f,d} A_f}{A_t} \quad (1.15)$$

Bu denklemde;  $q_{t,d}$  yangına maruz kalan bölme sınırlarının toplam alanını ile ilgili yangın yükü yoğunluğunun tasarım değerini,  $q_{f,d}$  bölmenin taban alanı ile ilgili yangın yükü yoğunluğunun tasarım değerini,  $A_f$  bölmenin taban alanını ve  $A_t$  bölme sınırlarının toplam alanını ifade etmektedir.

Parametrik yangın modeli, 50 ila 1000 MJ/m<sup>2</sup> arasındaki  $q_{t,d}$  değerleri için geçerlidir. Modelin uygulanmasına, denklem (1.16)'da verilen  $\Gamma$  katsayısının hesaplanması ile başlanır.

$$\Gamma = \left( \frac{O/0.04}{b/1160} \right)^2 \quad (1.16)$$

Isıtma aşaması süresince sıcaklığın değişimi denklem (1.17)'de verilmektedir. Bu denklemdeki zaman (saat) ise denklem (1.18) ile belirlenmektedir.

$$\theta_g = 20 + 1325 \left( 1 - 0.324e^{-0.2t^*} - 0.204e^{-1.7t^*} - 0.472e^{-19t^*} \right) \quad (1.17)$$

$$t^* = \Gamma t \quad (1.18)$$

Denklem (1.17) kullanılarak  $t^*$  'nin bir fonksiyonu olarak çizilebilen eğri, standart sıcaklık-zaman eğrisine çok yakındır. Denklem (1.18)'den de görülebileceği üzere sıcaklık artışı,  $\Gamma$  katsayısının 1'den büyük olması durumunda bu katsayının daha düşük olduğu durumlara kıyasla daha hızlı olacaktır.

Isıtma aşamasının süresi  $t_{\max}$  (saat), denklem (1.19) ile verilmektedir.

$$t_{\max} = 0.0002q_{t,d} / O \quad (1.19)$$

Bu değer, bölmenin kullanım amacı ile ilişkili olarak yangının gelişme hızına bağlı bir sınır değer ( $t_{\lim}$ ) ile karşılaştırılmalıdır. Bu sınır değerler Tablo 1.2'de verilmiştir.

Tablo 1.2. Kullanım amacına göre yangının gelişme hızı ve  $t_{\lim}$  (dakika) süresi

Kullanım Amacı	Yangının Gelişme Hızı	$t_{\lim}$ (Dakika)
Toplu taşıma	Yavaş	25
Konut	Orta	20
Hastane odası	Orta	20
Otel odası	Orta	20
Ofis	Orta	20
Okul sınıfı	Orta	20
Laboratuvar	Hızlı	15
Alışveriş merkezi	Hızlı	15
Sinema, tiyatro	Hızlı	15

$t_{\max}$  için hesaplanan değer ile  $t_{\lim}$  değeri arasındaki kıyaslama, iki farklı duruma neden olabilir.  $t_{\max} \geq t_{\lim}$  ise yangın havalandırma denetimlidir. Bu duruma ilişkin yöntem aşağıda açıklanmaktadır. Isıtma aşamasının sonundaki gaz sıcaklığı  $\theta_{\max}$ , denklem (1.18)'deki  $t$  'nin yerine  $t_{\max}$  değeri yazılarak elde edilen  $t_{\max}^*$  değerinin, denklem (1.17)'de yerine yazılması ile elde edilir.

$$t_{\max}^* = \Gamma t_{\max} \quad (1.20)$$

Soğutma aşamasındaki sıcaklık-zaman ilişkisi aşağıdaki şekilde verilir.

$$\theta_g = \theta_{\max} - 625(t^* - t_{\max}^*) \quad t_{\max}^* \leq 0.5 \quad (1.21a)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - t_{\max}^*) \quad 0.5 < t_{\max}^* < 2.0 \quad (1.21b)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(t^* - t_{\max}^*) \quad 2.0 \leq t_{\max}^* \quad (1.21c)$$

$t_{\max} \leq t_{\lim}$  ise yangın yakıt denetimlidir. Bu duruma ilişkin yöntem aşağıda açıklanmaktadır. Isıtma aşaması süresince sıcaklığın değişimini hesaplamak için denklem (1.18) yerine denklem (1.22) kullanılır.

$$t^* = \Gamma_{\lim} t \quad (1.22)$$

$$\Gamma_{\lim} = \left( \frac{O_{\lim} / 0.04}{b / 1160} \right)^2 \quad (1.23)$$

$$O_{\lim} = 0.0001 q_{t,d} / t_{\lim} \quad (1.24)$$

$O > 0.04$ ,  $q_{t,d} < 75$  ve  $b < 1160$  ise  $\Gamma_{\lim}$  değeri denklem (1.25)'te verilen  $k$  katsayısı ile çarpılmalıdır.

$$k = 1 + \left( \frac{O - 0.04}{0.04} \right) \left( \frac{q_{t,d} - 75}{75} \right) \left( \frac{1160 - b}{1160} \right) \quad (1.25)$$

Isıtma aşamasının sonundaki gaz sıcaklığı değeri  $\theta_{\max}$ , denklem (1.17)'deki  $t^*$ 'nin yerine  $t_{\max}^*$  değeri yazılarak hesaplanır.

$$t_{\max}^* = \Gamma_{\lim} t_{\lim} \quad (1.26)$$

Soğutma aşamasındaki sıcaklık-zaman ilişkisi aşağıdaki şekilde verilir.



$$\theta_g = \theta_{\max} - 625(t^* - \Gamma t_{\lim}^*) \quad t_{\max}^* \leq 0.5 \quad (1.27a)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(3 - t_{\max}^*)(t^* - \Gamma t_{\lim}^*) \quad 0.5 < t_{\max}^* < 2.0 \quad (1.27b)$$

$$\theta_g = \theta_{\max} - 250(t^* - \Gamma t_{\lim}^*) \quad 2.0 \leq t_{\max}^* \quad (1.27c)$$

Denklem (1.27) uygulanırken  $t^*$  ve  $t_{\max}^*$  değerleri denklem (1.18) ve (1.20) kullanılarak hesaplanır.

Denklem (1.19) ve (1.24)'te bulunan farklı faktörler nedeniyle, yakıt denetimli bir yangından havalandırma denetimli bir yangına geçişte modelde bir süreksizlik olduğuna dikkat edilmelidir. Bir parametredeki çok küçük bir değişim, birbirine yakın olmayan iki sıcaklık-zaman eğrisi üretebilir. Başka bir deyişle;  $t_{\max} = t_{\lim}$  olduğunda, havalandırma denetimli bir yangın için verilen denklemler, yakıt kontrollü bir yangın için verilen denklemler ile elde edilenlerden farklı bir yangın eğrisine neden olur.

Parametrik bir yangın modeli kullanıldığında, bir yapı elemanının yüzeyindeki ısı akısı denklem (1.5) ile hesaplanır ve bu denklemdeki taşınım ile ısı transferi katsayısı ( $\alpha_c$ ) 35 W/m<sup>2</sup>K olarak alınır.

### 1.10.3.3.1.2. Lokal Yangın Modelleri

Çok istisnai durumlar haricinde, yapılarda oluşan her yangın lokal olarak başlar. Genel tutuşma meydana geldiğinde ise yangın lokal olmaktan çıkar. Lokal bir yangın, yapının türüne ve yangının yapısal elemanlara göre konumuna bağlı olarak yapı üzerinde önemli bir etkiye sahip olabilir.

Örneğin, havaalanı salonu gibi büyük bir bölmede genel tutuşmanın gerçekleşme ihtimali düşük olmasına rağmen, salondaki ana kolonların birinin yakınındaki lokal bir yangın bu kolonun ve belki de tüm yapının göçmesine neden olabilir. Dolayısıyla lokal yangın etkileri ihmal edilmemelidir. Temsili sıcaklık-zaman eğrileri ve tek bölge bölge modelleri gibi genel tutuşma sonrası yangınları temsil eden bir model kullanıldığında lokal yangın etkileri ihmal edilmiş olurken, iki bölge bölge bir model kullanıldığında genel tutuşma gerçekleşmediği sürece bu etkiler dikkate alınmalıdır. Hesaplama akışkanlar dinamiği (HAD) modelinde ise yangının ilk aşamasında lokal yangın etkileri otomatik olarak hesaba katılmaktadır.

EN 1991-1-2 (2002) Ek C’de lokal bir yangının etkileri için iki model sunulmuştur. Kullanılacak model, bölme tavanı dikkate alınmaksızın oluşacak alevin düşey yüksekliğine bağlı olarak alevin bölme tavanını etkileyip etkilememesi durumuna göre seçilir. Bu yükseklik  $L_f$  denklem (1.28) ile hesaplanır.

$$L_f = 0.0148Q^{0.4} - 1.02D \quad (1.28)$$

Bu denklemde;  $D$  yangının çapını,  $Q$  ise EN 1991-1-2 (2002) Ek E’de verilen denkleme göre belirlenen ısı salınım miktarını ifade etmektedir. EN 1991-1-2 (2002) Ek C’ye göre;  $L_f < H$  için alev bölme tavanını etkilememektedir ve alevin bölme tavanını etkilediği durumda ( $L_f \geq H$ ) kullanılacak modelin uygulama alanı, yangının çapının 10 m’yi geçmediği ve ısı salınım miktarının 50 MW’dan yüksek olmadığı durumlarla sınırlıdır. Yangın kaynağı bölmenin taban seviyesinden daha yüksek bir konumda bulunabilir. Bu nedenle  $H$ , yangın kaynağı ile bölme tavanı arasındaki düşey mesafeyi ifade etmektedir.

### 1.10.3.3.2. Gelişmiş Yangın Modelleri

Gelişmiş yangın modelleri kütle ve enerjinin korunumu yasasına dayalı tasarım yangınlarıdır. EN 1991-1-2’de (2002), bölge modelleri ve HAD modelleri olmak üzere iki gelişmiş yangın modeline yer verilmektedir. Ayrıca, EN 1991-1-2 (2002) Ek D’de tek bölge ve iki bölge modeller için ısı etkilerinin hesabına yer verilirken, HAD modelleri için yalnızca bu model kullanılarak yapılacak çözümlerinin temelini oluşturan genel prensiplere yer verilmektedir.

#### 1.10.3.3.2.1. Bölge Modelleri

Kütle ve enerji dengesini ifade eden diferansiyel denklemlere dayanan bölge modelleri, yangın bölmesindeki sıcaklığın gelişimini zamana bağlı olarak hesaplamak için kullanılabilir. Bu modeller kullanılarak yangın bölmesi bir veya birçok bölüme ayrılabilir. En çok kullanılan bölge modelleri, bölmenin tamamının tek bir bölgeden oluştuğu tek

bölgeli modeller ve alt bölgesinde soğuk ve temiz havanın, üst bölgesinde ise sıcak yanma ürünlerinin bulunduğu iki bölgeli modellerdir.

Tek bölgeli modeller genel tutuşma sonrası bir durumu temsil ederken, iki bölgeli modeller genel tutuşma öncesi bir durumu temsil etmektedir. Lokal bir yangın durumunda, bu yangına maruz kalan eleman kesitindeki sıcaklık dağılımını daha doğru bir şekilde elde edebilmek için, iki bölgeli bir model ve lokal bir yangın modeli kullanılarak elde edilen sonuçların kombinasyonu dikkate alınabilir. Bazı modellerde önceden tanımlanmış kriterler karşılandığında, başlangıçta iki bölgeli olan bir model otomatik olarak tek bölge durumuna geçebilir.

Tek bölgeli modellerde ve iki bölgeli modellerin alt ve üst bölgelerinin her birinde gaz sıcaklığının üniform olduğu varsayılmaktadır. Sıcaklık gelişimini etkileyen temel parametreler, parametrik yangın modelleri ile aynıdır. Ancak; parametrik yangın modellerinde duvarlar ve açıklıklar ile ilgili fiziksel büyüklükler global bir parametre ile temsil edilirken, bölge modellerinde her bir açıklık kendi boyutu ve konumu, her bir duvar da kendi ısı özellikleri dikkate alınarak temsil edilebilir.

Sıcaklık-zaman eğrisi oluşturmak için diferansiyel denklemlerin zaman ile entegre edilmesi gerekmektedir. Bunun için bilgisayar programlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

#### **1.10.3.3.2.2. HAD Modelleri**

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği, çeşitli termodinamik ve akış denklemlerinin sayısal yöntemler kullanılarak çözüldüğü bir bilim dalıdır. Sıvılar ve gazlar gibi akışkanların hareketleri Navier-Stokes denklemleri ile tanımlanmaktadır. Navier-Stokes denklemleri; kütle, enerji ve momentumun korunumu yasalarından türetilmiş bağlaşıklık kısmı diferansiyel denklemler dizisidir. Analitik olarak çözümü neredeyse imkansız olan denklemler, sayısal ayrıklaştırma yöntemiyle çözülebilmektedir.

HAD modelleri, yangın bölmesinin Navier-Stokes denklemlerinin yazıldığı ve çözüldüğü çok sayıda hücreye bölünmesine dayanmaktadır. Bu modeller ile; her hücredeki sıcaklık, akış hızı, basınç ve yoğunluk gibi çok sayıda sonuç elde edilebilmektedir.

HAD modelleri, yangın güvenliği mühendisliğinde son yıllarda giderek popüler hale gelmiştir. HAD analizleri kullanılarak farklı yangın senaryolarına ait simülasyonlar elde edilebilmektedir. Bu modellerin uygulanması; özel yazılımlar, güçlü bilgisayarlar ile birlikte iyi eğitilmiş ve deneyimli kullanıcılar gerektirir.

#### 1.10.4. Yapısal Analiz İçin Mekanik Etkiler

Normal sıcaklık için yapılan tasarımda dikkate alınan etkiler, yangın durumu için de benzer şekilde değerlendirilmelidir. Bir kaza durumu olarak kabul edilen yangın için değişken etkilerin temsili değerleri, EN 1990'a (2002) göre tanımlanmalıdır. Ayrıca, yapı içinde kısıtlanan genleşmelerin ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan deformasyonların neden olduğu kuvvet ve moment gibi dolaylı etkiler de dikkate alınmalıdır.

Yangın koşullarındaki bir yapının mekanik davranışı, mekanik eylemlerin doğrudan etkisinin yanında, ısı etki nedeniyle elemanlarda oluşan ısı genleşmeler ve iç gerilemeler gibi dolaylı mekanik etkilere ve malzeme özelliklerindeki değişimlere de bağlıdır. Dolaylı etkilerin değerlendirilmesi için, EN 1991-1-2'ye (2002) göre aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

- Rijit duvarlı çok katlı karkas yapılarıdaki kolon gibi elemanların kısıtlı ısı genleşmeleri,
- Sürekli döşeme gibi hiperstatik yapı elemanlarındaki farklı ısı genleşmeler,
- Kesitlerde sıcaklık farklılıklarının oluşturduğu iç gerilmeler,
- Bitişik elemanların ısı genleşmesi. Örneğin, döşemelerin veya askı halatlarının genleşmesi sonucu kolon uç kısmının yer değiştirmesi,
- Yangın bölmesinin dışındaki diğer elemanları etkileyen elemanların ısı genleşmesi.

Bu dolaylı etkilerin tasarım değerleri, artan sıcaklık ile birlikte değişim gösteren ısı ve mekanik malzeme özellikleri dikkate alınarak belirlenmelidir. Bu etkilerin hangi durumlarda dikkate alındığı EN 1991-1-2'de (2002), bu etkilerin nasıl kombine edildiği ise EN 1990'da (2002) detaylı olarak açıklanmıştır.

#### 1.10.5. Yapısal Dayanımın Değerlendirilmesi

Daha önce belirtildiği gibi, EN 1992-1-2 (2004) denklem (1.1)'i sağlamak için üç tasarım yönteminin kullanımına izin vermektedir.

- Belirli yapısal eleman türleri için, geçerliliği kabul gören tasarım çözümlerine dayanarak tablolastırılan veya deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen verilerin kullanımı,

- Yapısal elemanların davranışını simüle etmek için kullanılan basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri,
- Yapı, yapının bir bölümü ya da yapısal elemanların davranışını simüle etmek için kullanılan gelişmiş hesaplama yöntemleri.

Bu yöntemler daha önce Bölüm 1.9'da kısaca açıklanmıştı. Bu bölümde ise betonarme yapıların yangın koşullarındaki tasarımı ile ilgili yöntemler daha detaylı olarak irdelenmektedir.

#### **1.10.5.1. Tablolaştırılmış Verilerin Kullanımı**

Geçerliliği kabul gören tasarım çözümleri ya da tablolaştırılmış veriler, test sonuçlarının teorik olarak değerlendirildiği deneysel verilere dayanmaktadır. Bu yöntemde; tasarım yangınlarının seçimi, uygulanan yüklerin ve yapının yük kapasitesinin belirlenmesi aşamaları atlanmaktadır. Bu veriler yalnızca temsili bir yangın eğrisi olan standart yangına maruz kalan elemanların analizinde kullanılabilir. EN 1992-1-2 (2004) farklı yük düzeylerini dikkate alarak; kolonlar, kirişler, döşemeler ve duvarlar için minimum kesit boyutlarını ve çelik donatı ekseninin en yakın beton yüzeye olan mesafesini veren çeşitli tablolar içermektedir. Tablolaştırılmış verilerin kullanımı tasarımı kolaylaştırmasına rağmen, oldukça kısıtlayıcı olan bu yöntem yalnızca basit ve yaygın durumlar için kullanışlıdır.

Tablolar oluşturulurken kritik çelik sıcaklıkları göz önüne alınmıştır. Bu sıcaklık; donatı çeliği için 500°C, öngörme çeliği için 400°C ve öngermeli teller ve halatlar için 350°'dir. Tablolarda yer alan veriler, aksi belirtilmedikçe, referans yük düzeyini 0.7 olarak esas almaktadır. Bu durum, diğer faktörler sabitken, normal sıcaklıkta çelik için izin verilen maksimum gerilmenin yalnızca %70'i ile yüklendiği anlamına gelmektedir.

Bu yöntemin uygulama alanı sınırlıdır. Tablolarda yer alan veriler standart bir yangına maruz kalma durumu için ve maksimum 240 dakika maruz kalma süresine kadar verilmektedir. Yalnızca eleman analizleri için kullanılabilen bu veriler, silisli agrega ile üretilen normal ağırlıklı betonlar (NAB) için elde edilmiştir. Tüm bunlara karşın bu yöntemin avantajı, çok fazla ekstra denetim gerektirmemesi ve kavlanma etkilerini hesaba katmasıdır.

### 1.10.5.2. Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemleri

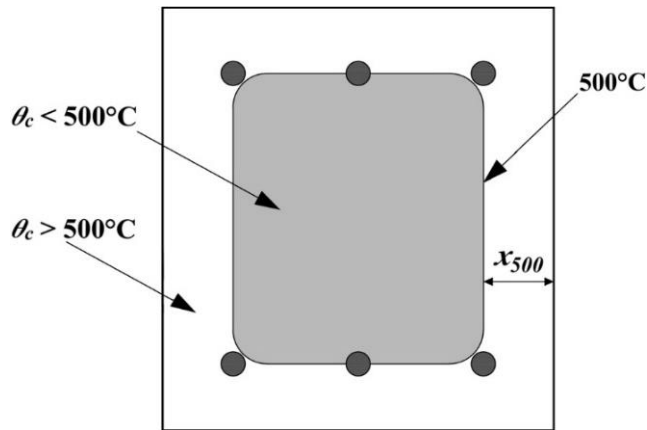
Basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi, yüksek sıcaklıklardan dolayı beton ve donatı çeliğinde meydana gelen dayanım kayıplarını hesaba katarak, normal sıcaklık tasarımı ile aynı prosedürü kullanmaktadır. Bu yöntemler, yalnızca yapı elemanları ve bazı durumlarda yapının bir bölümü için kullanılabilir. Yangına maruz kalan elemanın nihai yük taşıma kapasitesi belirlenir ve daha sonra eylemlerin ilgili kombinasyonu ile karşılaştırılır. Basitleştirilmiş hesaplama yöntemleriyle tasarım hem temsili hem de parametrik yangınlara dayalı olarak yapılabilir. Ancak, tasarımda genellikle standart yangın eğrisi kullanılmaktadır. Bu yöntem, tablolaştırılmış verilerin kullanımı ile yapılan tasarıma göre daha fazla çalışma gerektirmesine rağmen, çoğu hesaplamanın elle yapılabileceği kolaylıktadır.

Basitleştirilmiş bir hesap yöntemindeki en önemli aşama, yangına maruz kalma süresi boyunca eleman enkesitindeki sıcaklık dağılımının belirlenmesi ve herhangi bir zaman aralığında ve herhangi bir derinlikteki beton ve donatı sıcaklıklarının belirlenmesidir. Eurocode, bu sıcaklık dağılımının belirlenmesi için hem test hem de hesaplama yöntemlerine izin vermektedir. Geçmişte büyük miktarda testler yapılmış ve bu testlerin sonucunda literatürde bulunabilecek birçok tasarım grafiği ortaya çıkmıştır. Bunlar, standart yangına maruz kalan belirli eleman (kolon, kiriş, döşeme ve duvar) ve beton türleri için ısı değişimleri sunmaktadır. Birtakım sıcaklık profilleri EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilmektedir. Ancak, bir sıcaklık profilinin daima çeşitli varsayımlara (agrega türü, nem içeriği, vb.) dayanarak yapıldığı ve uygulama alanının sınırlı olduğu unutulmamalıdır. Örneğin, uygun tasarım grafiğinin bulunamadığı veya daha gerçekçi bir tasarım yangınının tercih edildiği diğer durumlarda ısı hesaplamalara başvurulmalıdır. Hesaplamalar için ortak varsayımlar, ısı transferinin yalnızca betonun bir fonksiyonu olması ve donatı sıcaklığının donatıyı çevreleyen beton sıcaklığına eşit olmasıdır. Bu varsayımlar, çeliğin ısı iletkenliğinin betonunkinden çok daha yüksek olması ve çelik donatıların yangına maruz kalan yüzeylere paralel olması nedeniyle bu yüzeylere dik doğrultudaki ısı geçişini hemen hemen hiç etkilememesine dayanmaktadır.

Basitleştirilmiş bir hesaplama yönteminde, azaltılmış bir kesit alanı kullanılabilir. EN 1992-1-2 (2004) Ek B, bu şekilde yapılacak basitleştirilmiş hesaplar için iki yöntem sunmaktadır. Birinci yöntem; kesit içi sıcaklık dağılımının 500°C'yi aştığı bölgelerde betonun dayanımını tamamen kaybettiği ve elemanın yük

taşıma kapasitesine katkıda bulunmadığı, sıcaklığın 500°C'nin altında kaldığı bölgelerde ise betonun normal sıcaklıktaki dayanımını koruduğu varsayımına dayanan 500°C Eş Sıcaklık Yöntemi'dir. İkinci yöntem ise; yangına maruz kalan yüzeye paralel olarak, beton kesiti eşit kalınlıktaki parçalara ( $n \geq 3$ ) ayıran Bölge Yöntemi'dir. Daha sonra, her bölgenin ortalama sıcaklığına karşılık gelen bir dayanım ve rijitlik azaltma faktörü (mevcutsa) dikkate alınır. Bu yöntem, küçük kesitlerin ve narin kolonların tasarımı için önerilmektedir. Ancak, yalnızca standart yangına maruz kalma durumu için geçerlidir. Her iki yöntem de eksenel yük, eğilme momenti ve bunların kombinasyonları (eksantirik yük gibi) ile ilişkili olarak betonarme ve öngerilmeli beton kesitlerine uygulanabilmektedir. İkinci merteye etkileri her iki yönteme de dahil edilebilmektedir. Dikkat edilmesi gereken bir husus, kullanılan beton türüne bağlı olarak hesaba katılacak eş sıcaklık eğrisinin 500°C'den farklı olabileceğidir. Bazı betonlar için eş sıcaklık eğrisi 500°C'nin oldukça altında, hatta 400°C'nin bile altında bir değere sahip olabilir. Ayrıca bu değer, yüksek dayanımlı betonun mukavemetini normal dayanımlı betona göre çok daha çabuk kaybetmesi nedeniyle, yüksek dayanımlı beton için de değişim göstermektedir.

Malzemelerin dayanımlarındaki azalma Bölüm 1.11'de verilmiştir. Bu bölümdeki veriler, azaltılan kesit alanına dayalı basitleştirilmiş hesap yöntemleri ile birlikte kullanılabilir. Bu dayanım azaltma faktörü değerlerinin, maksimum gaz sıcaklığına yalnızca standart yangın eğrisindeki ısıtma hızına benzer şekilde ulaşıldığı durumlar için kullanılabilmesi unutulmamalıdır. Bununla birlikte, Eurocode'da verilen bu malzeme modelleri yalnızca bilgilendirme amaçlıdır. Deneysel bulgular ile doğrulanması halinde alternatif modeller kullanılabilir.



Şekil 1.7. Bütün dış yüzeyleri yangın etkisi altında olan betonarme bir kolona ait 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi

### 1.10.5.3. Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri

Gelişmiş hesaplama yöntemleri yapının sıcaklık ve mekanik analizinin eksiksiz bir şekilde yapılmasına olanak sağlamaktadır. Gelişmiş hesaplama yöntemlerinde, sıcaklık artışına bağlı olarak sürekli değişim gösteren ısı ve mekanik malzeme özellikleri ve bu değişimin yapı üzerindeki etkileri dikkate alınabilmektedir. Bu yöntem kullanılarak, sınır koşulları ve eleman enkesitleri içindeki homojen olmayan sıcaklık dağılımları hesaba katılabilmektedir. Tüm tasarım yangınları için kullanılabilen gelişmiş hesaplama yöntemleri; yapısal eleman, yapının bir bölümü veya yapının tamamının analizinde kullanılabilir.

Eurocode'da sadece temel kuralları verilen bu yöntem; çok gerçekçi bir analiz sağlamanın yanı sıra ayrıntı bir bilgi birikimi ile birlikte gelişmiş bilgisayar programlarının kullanımını gerektirmektedir. Böylece, temel fiziksel davranış modellenerek, yangın koşullarındaki yapının beklenen davranışına güvenilir bir yaklaşım getirilmektedir. Gelişmiş bir hesaplama yöntemi, ısı ve mekanik tepki modeli olmak üzere birbirleriyle devamlı etkileşim halinde olan iki kısımdan oluşmaktadır.

Tablo 1.3. Yangın dayanımı için alternatif doğrulama yöntemleri (EN 1992-1-2, 2004).

	Tablolaştırılmış Veriler	Basitleştirilmiş Hesaplama Yöntemleri	Gelişmiş Hesaplama Yöntemleri
Yapı Elemanı	✓	✓	✓
Yapının Bir Bölümü	✗	✓	✓
Yapının Tamamı	✗	✗	✓

#### 1.10.5.3.1. Isıl Tepki Modeli

Isıl tepki modeli ile elemanlar içindeki sıcaklığın gelişimi ve dağılımı belirlenirken, ısı transferi teorisinin kabul edilen prensipleri ve varsayımları kullanılmaktadır. Bu model, hem ısı etkilerine hem de sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerine ihtiyaç duymaktadır. Betonarme yapılarıdaki donatıların sıcaklık dağılımına etkisinin oldukça az olması nedeniyle, bir sıcaklık profili belirlenirken donatı çeliği genellikle ihmal edilmektedir (EN 1992-1-2, 2004). İhmal edilebilir bir diğer unsur ise nem ve nem göçü etkisidir. Bu



geleneksel bir yaklaşımdır. Bu model ile, üniform olmayan ısıya maruz kalma ve bitişik yapı bileşenlerindeki ısı transferi etkilerinin hesaba katılması mümkündür.

### 1.10.5.3.2. Mekanik Tepki Modeli

Mekanik tepki modeli ile yapı mekaniği teorisinin kabul edilen prensipleri ve varsayımları uygulanırken, yapının veya yapının herhangi bir parçasının mekanik davranışı belirlenmektedir. Mekanik tepki modeli, diğer etkilerin yanı sıra aşağıda verilen etkileri de hesaba katmalıdır.

- Sıcaklığın malzeme özellikleri üzerindeki etkisi,
- Sıcaklık artışı ve sıcaklık farklılıkları nedeniyle, ısı olarak uyarılan şekildeğişmeler ve gerilmelerin etkileri,
- İhtiyaç duyulması halinde geometrik açıdan doğrusal olmayan etkiler.

Nihai sınır durumundaki deformasyonlar, yapının tüm parçalarının uyumlu kalmasını sağlamak için sınırlandırılmalıdır. Doğrusal olmayan analiz yöntemleri; yapının tamamının, yapının bir bölümünün veya yapısal bir elemanın yangın koşullarındaki yük taşıma kapasitesinin belirlenmesinde kullanılabilir.

## 1.11. Beton ve Donatı Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi

### 1.11.1. Beton Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi

Bu bölümde betonun; özgül ağırlığı, ısı genleşme katsayısı, ısı iletkenlik katsayısı, özgül ısı katsayısı, gerilme-şekildeğiştirme diyagramı, basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi ısı ve mekanik özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişimi üzerinde durulmaktadır.

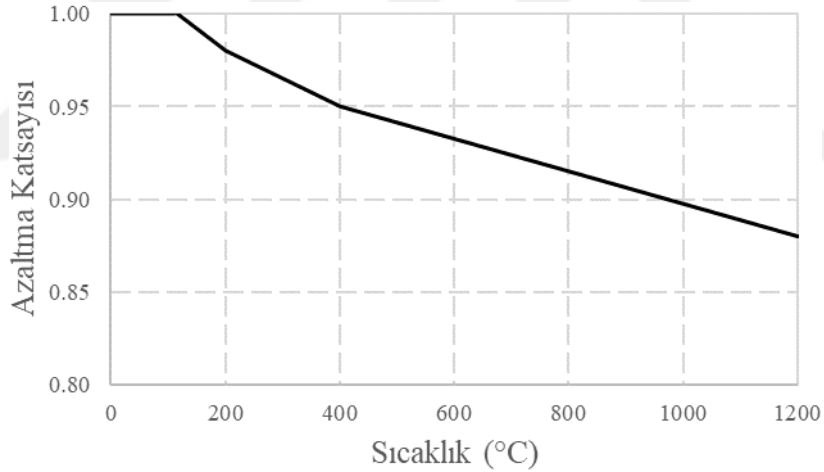
#### 1.11.1.1. Özgül Ağırlığın Değişimi

Betonun özgül ağırlığı  $\rho_c$ , artan sıcaklık ile birlikte oluşan serbest ve kimyasal olarak bağlı olan su kaybindan etkilenmektedir. Beton içindeki suyun buharlaşması

sonucu, betonda ağırlık kaybı olacağı açıktır. Beton özgül ağırlığının sıcaklığa bağlı olarak değişimi, EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

$$\rho_c(\theta) = \begin{cases} \rho_c(20^\circ\text{C}) & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 115^\circ\text{C} \\ \rho_c(20^\circ\text{C}) [1 - 0.02(\theta - 115)/85] & 115^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200^\circ\text{C} \\ \rho_c(20^\circ\text{C}) [0.98 - 0.03(\theta - 200)/200] & 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400^\circ\text{C} \\ \rho_c(20^\circ\text{C}) [0.95 - 0.07(\theta - 400)/800] & 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.29)$$

Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi, yukarıda verilen denklemler yardımıyla oluşturulan bir grafik ile gösterilmiştir (Şekil 1.8). Betonun oda koşullarındaki özgül ağırlığı  $\rho_c(20^\circ\text{C})$ , ilgili beton sıcaklığına ait azaltma katsayısı ile çarpılarak, bu sıcaklığa karşılık gelen özgül ağırlık değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 1.8. Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

Şekil 1.8'den de görülebileceği gibi buharlaşan su, betonun özgül ağırlığında büyük bir değişime neden olmamaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilecek hesaplama ve analizlerde betonun oda koşullarındaki özgül ağırlığının dikkate alınması, sonuçlar üzerinde önemli değişikliklere neden olmamaktadır. EN 1992-1-2'de (2004) geleneksel betonların özgül ağırlığının  $2300 \text{ kg/m}^3$  olarak alınabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, beton özgül ağırlığının oda koşullarındaki değeri  $2300 \text{ kg/m}^3$  olarak dikkate alınmış ve bu değer EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemler esas alınarak, artan sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterdiği kabul edilmiştir.

### 1.11.1.2. Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi

Isıl genleşme, sadece sıcaklık etkisiyle beton elemanda oluşan şekildeğiştirir. Betonun ısıl genleşmesi genel olarak beton hacminin büyük bir bölümünü oluşturan agreganın özelliğine bağlıdır. Agreganın özellikleri yerel koşullara bağlı olarak değişebilir, ancak normal ağırlıklı betonda kullanılan agregalar genellikle silis veya kalker kökenli olmaktadır.

Isıl genleşme, yükselen sıcaklık ile birlikte doğrusal olmayan bir artış göstermektedir (Schneider, 1986). Doğrusal olmayan bu davranışta, sıcaklık değişimine bağlı olarak agregada meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimlerin yanında, beton bileşenleri arasındaki termal uyumsuzluk da etkili olmaktadır. EN 1992-1-2 (2004) betonun ısıl genleşmesi için aşağıdaki bağıntıları önermektedir.

Silis kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için;

$$\varepsilon_c(\theta) = \begin{cases} -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2.3 \times 10^{-11} \theta^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C} \\ 14 \times 10^{-3} & 700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.30)$$

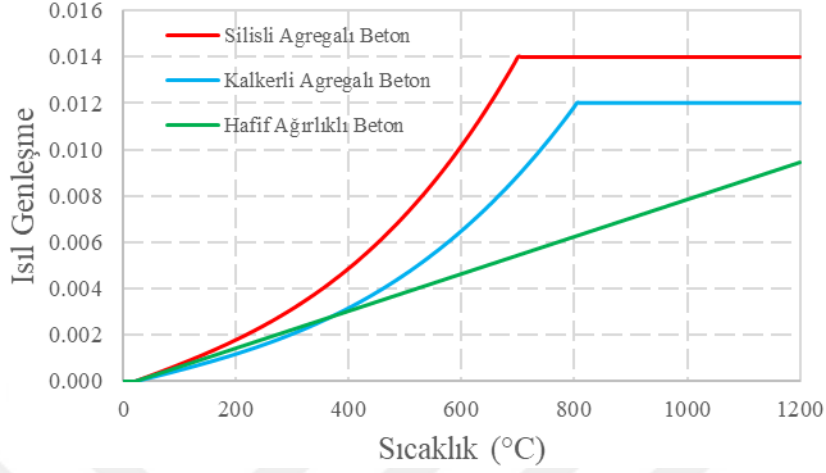
Kalker kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için;

$$\varepsilon_c(\theta) = \begin{cases} -1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1.4 \times 10^{-11} \theta^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C} \\ 12 \times 10^{-3} & 805^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.31)$$

EN 1992-1-2'de (2004) hafif ağırlıklı betonun (HAB) ısıl genleşmesine dair herhangi bir bilgiye yer verilmezken, EN 1994-1-2'de (2005) hafif ağırlıklı betonun ısıl genleşmesi basit doğrusal bir ilişki ile verilmiştir.

$$\Delta l / l = 8 \times 10^{-6} (\theta_c - 20) \quad (1.32)$$

Betonun ısı genleşmesinin yüksek sıcaklıkla değişimi, bu bağıntılar dikkate alınarak çizilmiş ve Şekil 1.9’da verilmiştir.



Şekil 1.9. Betonun ısı genleşmesinin yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

### 1.11.1.3. Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi

Agrega türüne bağlı olarak geniş bir aralıkta değişim gösteren betonun ısı iletkenliği  $\lambda_c$ ,  $20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 1200^\circ\text{C}$  sıcaklıkları için EN 1992-1-2’de (2004) verilen denklemler yardımıyla, alt ve üst sınır değerler arasında belirlenebilmektedir. Bu sınır değerler, deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiştir.

Silis kökenli agregaların kullanıldığı betonlar (üst sınır) için;

$$\lambda_c(\theta) = 2 - 0.2451(\theta_c / 100) + 0.0107(\theta_c / 100)^2 \quad (1.33)$$

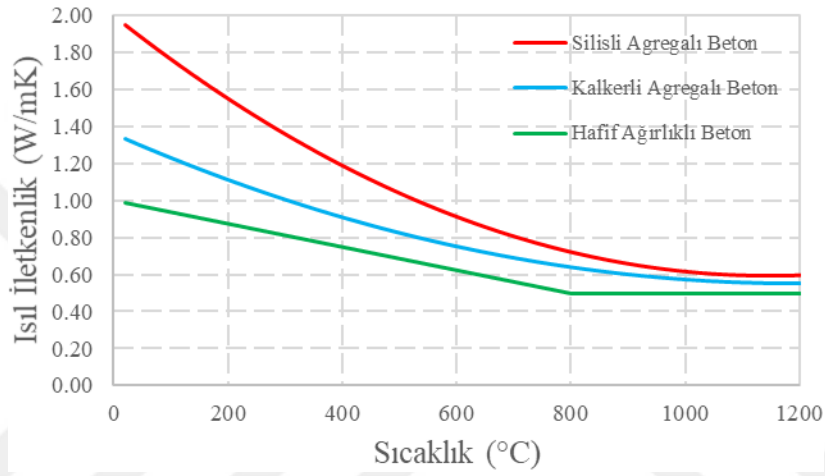
Kalker kökenli agregaların kullanıldığı betonlar (alt sınır) için;

$$\lambda_c(\theta) = 1.36 - 0.136(\theta_c / 100) + 0.0057(\theta_c / 100)^2 \quad (1.34)$$

Hafif ağırlıklı betonun ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi EN 1994-1-2’de (2005) verilen denklemler yardımıyla belirlenmektedir.

$$\lambda_c(\theta) = \begin{cases} 1 - \theta_c / 1600 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 800 \\ 0.5 & 800^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200 \end{cases} \quad (1.35)$$

Normal ağırlıklı beton için ısı iletkenliğin alt ve üst sınırı ve hafif ağırlıklı beton için ısı iletkenliğin sıcaklıkla değişimi Şekil 1.10'da verilmektedir. Şekil 1.10'dan da grlebileceği gibi; hafif ağırlıklı betonların ısı iletkenliği, normal ağırlıklı betonların ısı iletkenliğine kıyasla daha küçük değerler almaktadır.



Şekil 1.10. Betonun ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

Hesaplamalarda betonun ısı iletkenlik katsayısı için sabit tek bir değer kullanılmak istendiğinde; silis kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için 1.6 W/mK, kalker kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için 1.3 W/mK ve hafif ağırlıklı betonlar için 0.8 W/mK değerlerinin kullanımı önerilmektedir (EN 1992-1-2, 2004).

EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri, betonun ısı iletkenlik katsayısının alt sınırı ile uyumludur. Dolayısıyla, gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinden elde edilen kesit içi sıcaklık dağılımları ile EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profillerinin karşılaştırılması açısından, bu çalışmada betonun ısı iletkenlik katsayısının alt sınırının doğrusal olmayan davranışı esas alınmıştır.

#### 1.11.1.4. Özgül Isı Katsayısının Değişimi

Betonun özgül ısı katsayısının sıcaklıkla değişiminde, agrega türü ve nem içeriği önemli rol oynamaktadır. EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemler yardımıyla, ağırlıkça nem içeriği %0 olan kuru betonun özgül ısı aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

Silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı kuru betonlar ( $u = \%0$ ) için;

$$c_c(\theta) = \begin{cases} 900 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100 \\ 900 + (\theta - 100) & 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 200 \\ 1000 + (\theta - 200) / 2 & 200^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400 \\ 1100 & 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200 \end{cases} \quad (1.36)$$

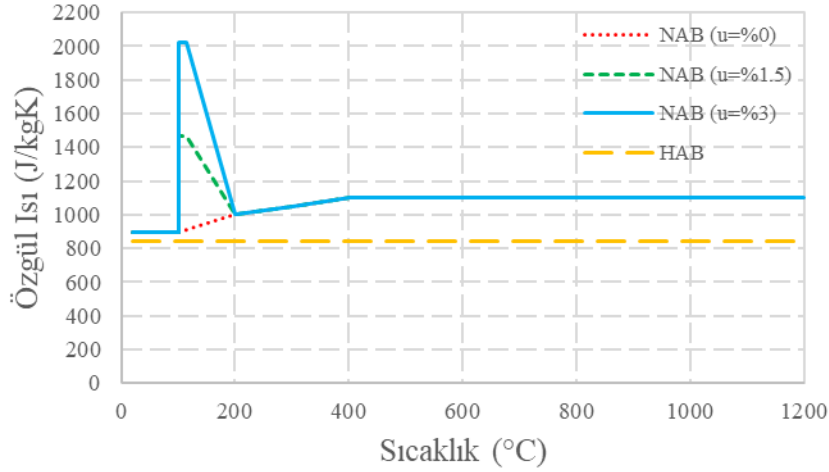
Silis veya kalker kökenli agregaların kullanıldığı, belirli bir nem içeriğine sahip betonda sıcaklık nedeniyle oluşan su kaybının etkisi hesaba katılmak istendiğinde, betonun özgül ısı için verilen fonksiyon;  $100^\circ\text{C}$  ile  $115^\circ\text{C}$  arasında sabit bir pik değer,  $115^\circ\text{C}$  ile  $200^\circ\text{C}$  arasında ise doğrusal bir azalma şeklinde modellenebilmektedir. Belirli nem içeriklerine karşılık gelen özgül ısı pik değerleri Tablo 1.4'te verilmektedir.

Tablo 1.4. Bazı beton nem içeriklerine karşılık gelen özgül ısı pik değerleri (EN 1992-1-2, 2004).

NAB Nem İçeriği, $u$ (%)	$c_{c,pik}$ (J/kgK)
0	900
1.5	1470
3.0	2020
10.0	5600

$115^\circ\text{C}$ 'deki pik değer ile  $200^\circ\text{C}$ 'deki 1000 J/kgK değeri arasındaki doğrusal ilişki, diğer nem içerikleri için doğrusal enterpolasyon kullanılarak elde edilebilmektedir. Betonun özgül ısısının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.11'de verilmiştir.

Hesaplamalarda betonun özgül ısı katsayısı için sabit tek bir değer kullanmak istendiğinde; silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için 1000 J/kgK, hafif ağırlıklı betonlar için 840 J/kgK değerlerinin kullanımı önerilmektedir (EN 1994-1-2, 2005).

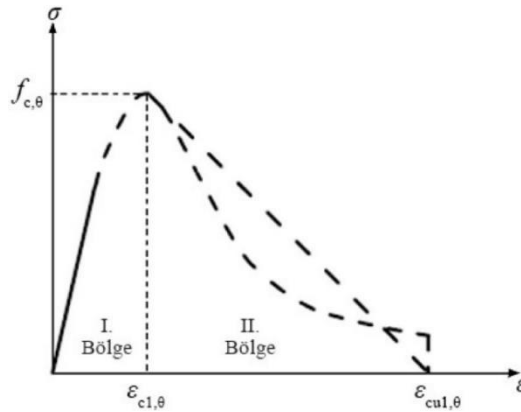


Şekil 1.11. Betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

#### 1.11.1.5. Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Değişimi

Yangın koşullarındaki bir yapının taşıma gücü ve yapısal davranışlarının belirlenmesi için, yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramının bilinmesi gerekmektedir.

EN 1992-1-2 (2004), yüksek sıcaklıklarda tek eksenli basınç uygulanan betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik bir model sunmaktadır (Şekil 1.12). Bu model yardımıyla, yüksek sıcaklık etkisindeki silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonların gerilme-şekil değiştirme diyagramları elde edilebilmektedir.



Şekil 1.12. Yüksek sıcaklıklarda tek eksenli basınç uygulanan betonun gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik model (EN 1992-1-2, 2004).

Belirli bir sıcaklık için betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramı belirlenirken, Şekil 1.12’de verilen model üzerinde yer alan I. bölgedeki davranış;  $f_c(\theta)$  betonun basınç dayanımını,  $\varepsilon_{c1}(\theta)$  bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmeyi,  $\sigma_c(\theta)$  ilgili sıcaklığa ait basınç gerilmesini ve  $\varepsilon_c(\theta)$  aynı sıcaklıktaki şekildeğiştirmeyi göstermek üzere;

$$\sigma_c(\theta) = \frac{3\varepsilon_c(\theta)f_c(\theta)}{\varepsilon_{c1}(\theta) \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon_c(\theta)}{\varepsilon_{c1}(\theta)} \right)^3 \right)} \quad (1.37)$$

denklemleri ile verilirken, model üzerinde yer alan II. bölgedeki davranış ise doğrusal veya doğrusal olmayan modellerle oluşturulabilmektedir.

Matematik modelde yer alan tüm parametreler beton sıcaklığının bir fonksiyonu olarak Tablo 1.5’te verilmiştir. Sıcaklığın ara değerleri için doğrusal enterpolasyon kullanılabilir. Buradaki  $\varepsilon_{c1,\theta}$  ve  $\varepsilon_{cu1,\theta}$  değerleri, yalnızca normal ağırlıklı betonlar için kullanılmaktadır (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1994-1-2, 2005).

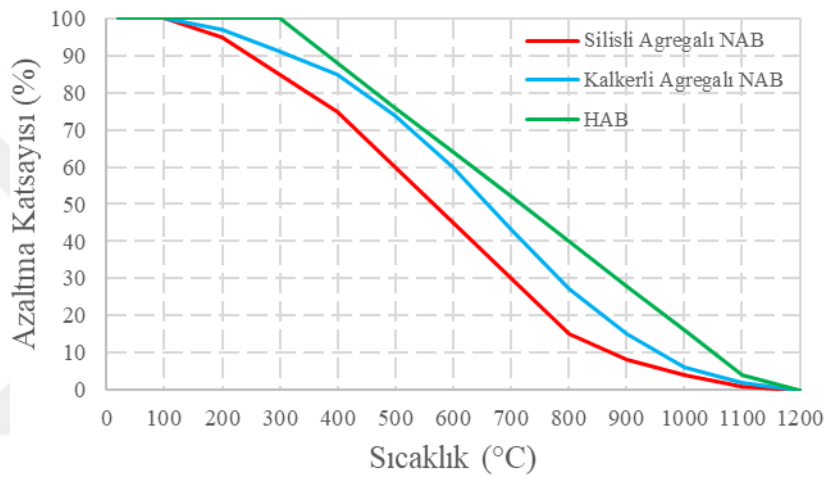
Tablo 1.5. Silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonun (NAB) yüksek sıcaklıkta gerilme-şekil değiştirme ilişkisine ait ana parametrelerin değerleri (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1994-1-2, 2005).

Beton Sıcaklığı, $\theta$ (°C)	Dayanım Azaltma Katsayısı, $k_c(\theta)$			$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
	NAB (Silisli)	NAB (Kalkerli)	HAB		
20	1.00	1.00	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	1.00	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.97	1.00	0.0055	0.0250
300	0.85	0.91	1.00	0.0070	0.0275
400	0.75	0.85	0.88	0.0100	0.0300
500	0.60	0.74	0.76	0.0150	0.0325
600	0.45	0.60	0.64	0.0250	0.0350
700	0.30	0.43	0.52	0.0250	0.0375
800	0.15	0.27	0.40	0.0250	0.0400
900	0.08	0.15	0.28	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.06	0.16	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.02	0.04	0.0250	0.0475
1200	0.00	0.00	0.00	-	-



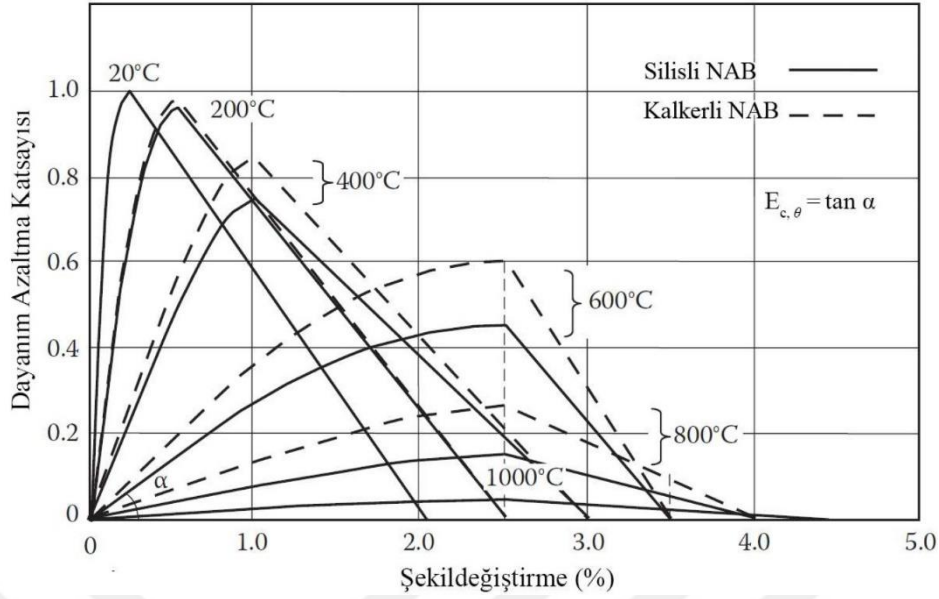
Tablo 1.5'teki değerler incelendiğinde; sıcaklık artışı ile birlikte beton dayanımının azaldığı, bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmelerin ise artarak 600°C'de sabit bir değere ulaştığı görülmektedir. Bu tabloda yer alan beton türlerine ait dayanım azaltma katsayısının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 1.13'te verilmektedir.

Bu matematiksel model, betonun soğuma aşamasındaki muhtemel dayanım kazanımını hesaba katmamaktadır. Dolayısıyla bu modelin, sönme aşaması da dahil olmak üzere yangının tüm aşamalarını dikkate alan doğal yangın modelleri ile birlikte kullanımı uygun değildir (EN 1992-1-2, 2004).



Şekil 1.13. Silisli ve kalkerli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı beton ve hafif ağırlıklı betonların yüksek sıcaklıklarda dayanım azaltma katsayısının değişimi (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1994-1-2, 2005).

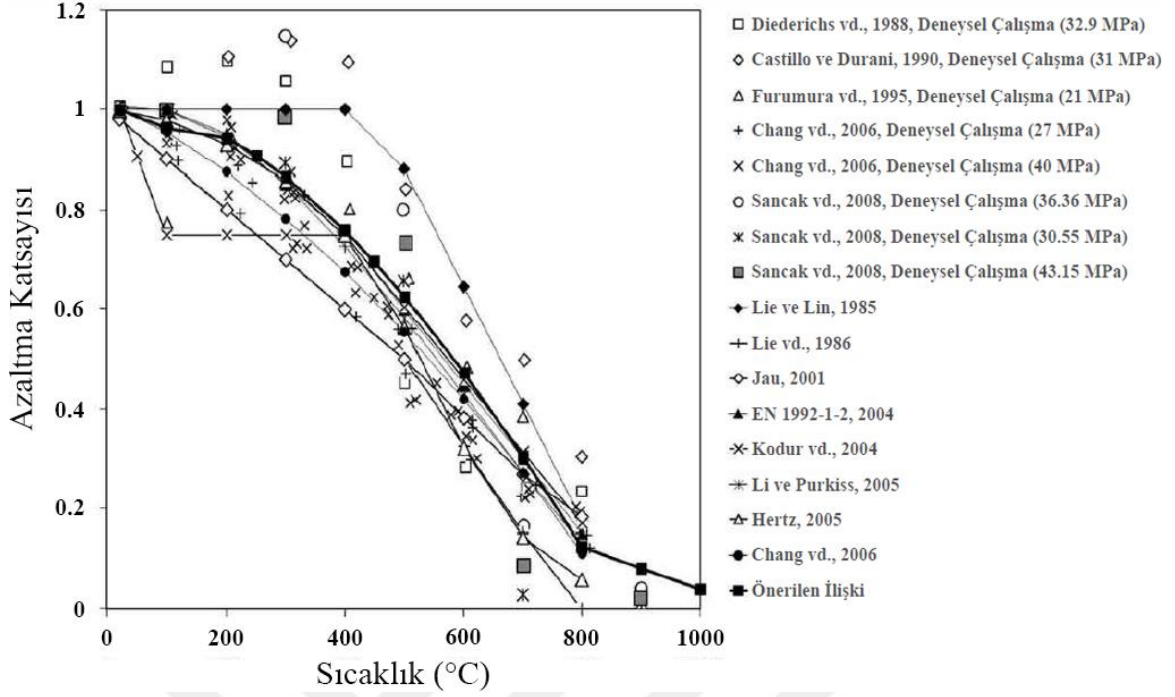
EN 1992-1-2'de (2004) verilen matematiksel model kullanılarak, farklı sıcaklıklar için, tek eksenli basınç etkisi altındaki silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramları elde edilmiş ve Şekil 1.14'te gösterilmiştir.



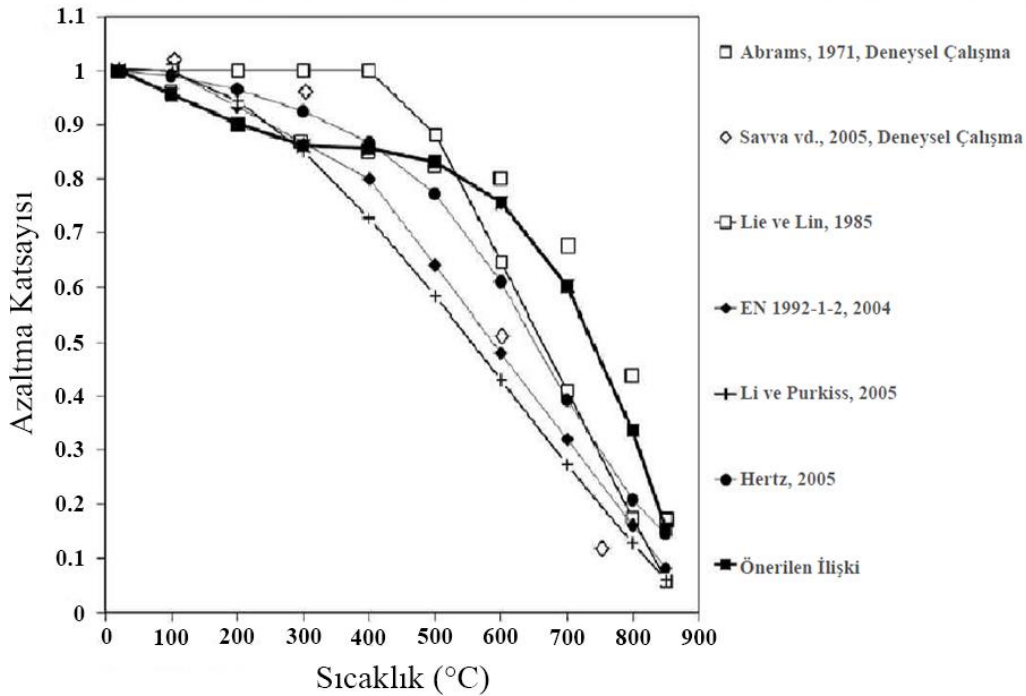
Şekil 1.14. EN 1992-1-2'de (2004) sunulan matematik model yardımıyla elde edilen, tek eksenli basınç uygulanan silisli ve kalkerli agregaların kullanıldığı normal ağırlıklı betonun farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

#### 1.11.1.6. Basınç Dayanımının Değişimi

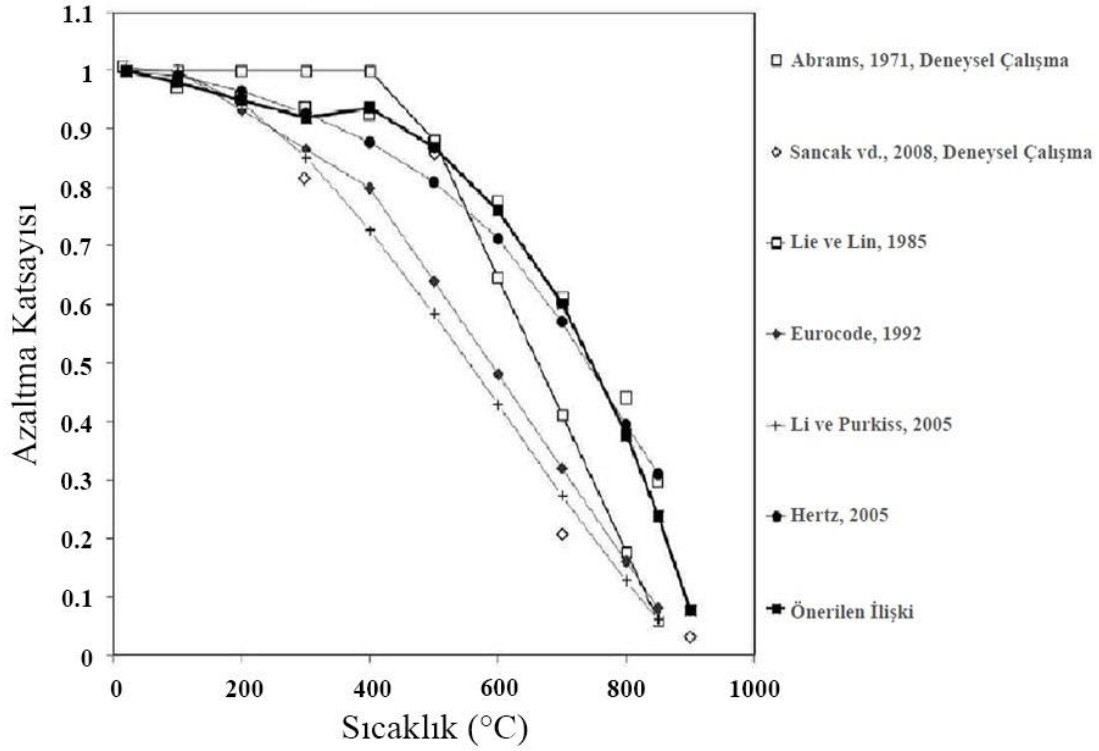
Betonarme yapılarda oluşan basınç gerilmelerinin genellikle beton tarafından karşılanması beklenmektedir. Bu nedenle, yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımına etkisinin bilinmesi son derece önemlidir. Literatürde betonun yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışı hakkında birçok çalışma mevcuttur. Bastami vd. (2010), betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi hakkında yapılan önemli deneysel çalışmaları ve mevcut davranış modellerini derleyerek, bu çalışmalar üzerinde regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda, betonda kullanılan agrega türüne bağlı olarak betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimini temsil eden modeller önerilmiştir. Çalışmalar, artan sıcaklık nedeniyle betonun basınç dayanımının azaldığını göstermektedir.



Şekil 1.15. Silis kökenli agrega kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model (Bastami vd., 2010).



Şekil 1.16. Kalker kökenli agrega kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model (Bastami vd., 2010).



Şekil 1.17. Hafif ağırlıklı betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model (Bastami vd., 2010).

Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen verilere dayalı regresyon analizlerine bağlı olarak önerilen davranış modelleri incelendiğinde, kalker kökenli agrega içeren betonun basınç dayanımı ile hafif ağırlıklı betonun basınç dayanımı benzer bir davranış sergilediği ve bu betonların yaklaşık 650°C'ye kadar basınç dayanımlarında büyük bir azalmanın olmadığı görülmüştür.

EN 1992-1-2'de (2004) betonun basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi, oda koşullarındaki betonun karakteristik basınç dayanımının bir azaltma katsayısıyla çarpılmasına dayalı olarak ifade edilmektedir.

$$f_{ck}(\theta) = k_c(\theta) f_{ck}(20^\circ\text{C}) \quad (1.38)$$

Burada;  $f_{ck}(\theta)$  belirli bir sıcaklıktaki betonun karakteristik basınç dayanımını,  $k_c(\theta)$  bu sıcaklığa ait basınç dayanımı azaltma katsayısını ve  $f_{ck}(20^\circ\text{C})$  ise betonun oda koşullarındaki karakteristik basınç dayanımını göstermektedir. EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemlerden yararlanılarak, geleneksel ve hafif ağırlıklı betonlar için

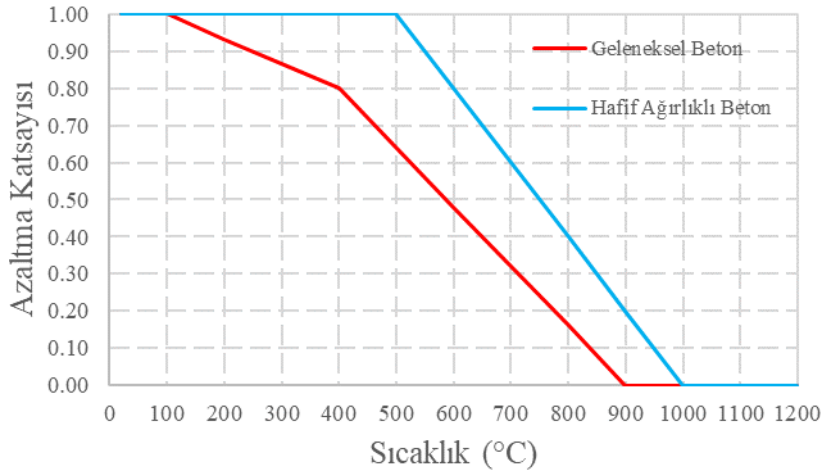
karakteristik basınç dayanımı azaltma katsayısı, sıcaklığa bağlı olarak belirlenebilir. Geleneksel betonlar için;

$$k_c(\theta) = \begin{cases} 1 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100 \\ (1600 - \theta)/1500 & 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 400 \\ (900 - \theta)/625 & 400^\circ\text{C} < \theta_c \leq 900 \\ 0 & 900^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200 \end{cases} \quad (1.39)$$

denklemleri ile ifade edilirken hafif ağırlıklı betonlar için ise;

$$k_c(\theta) = \begin{cases} 1 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 500 \\ (1000 - \theta)/500 & 500^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1000 \\ 0 & 1000^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200 \end{cases} \quad (1.40)$$

şeklinde ifade edilmektedir. EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemlere göre, betonun karakteristik basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.18'de verilmektedir.

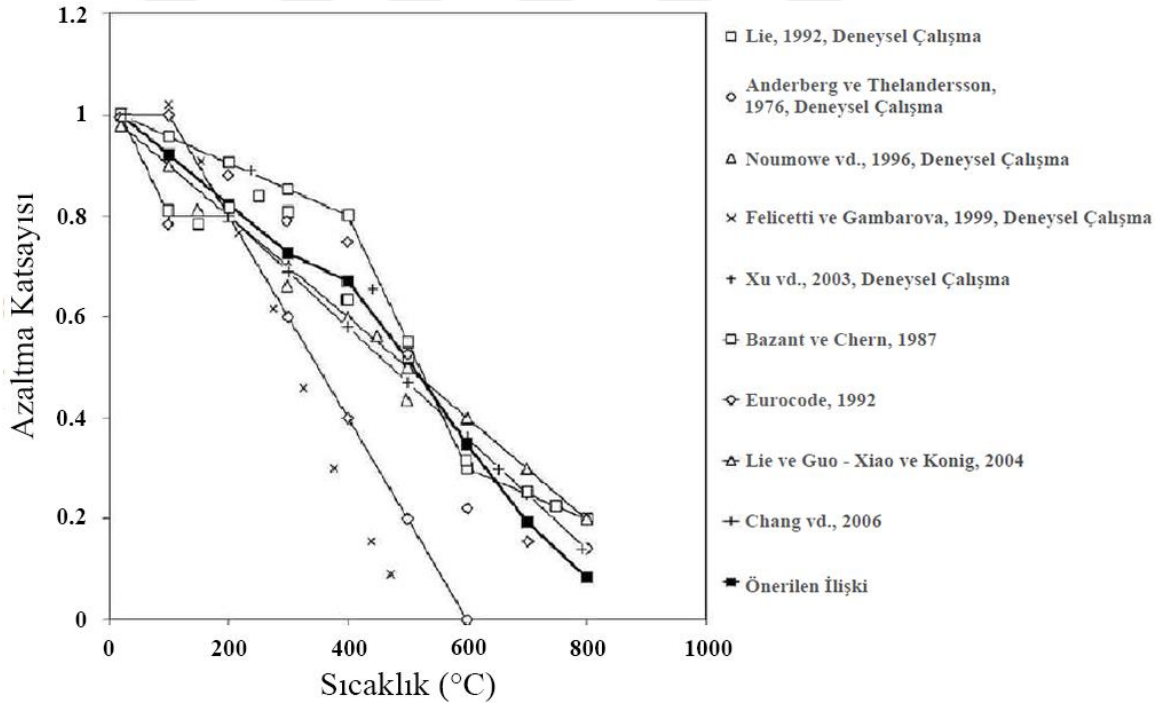


Şekil 1.18. Betonun karakteristik basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

Şekil 1.18'den, sıcaklık artışıyla birlikte hafif ağırlıklı betonlarda, geleneksel betonlara kıyasla daha az basınç kaybı olduğu ve 1000°C mertebesinde her iki betonun basınç dayanımlarının tükendiği görülmektedir.

### 1.11.1.7. Çekme Dayanımının Değişimi

Hem oda koşullarında yapılan tasarımlarda hem de yapısal yangın tasarımlarında betonun çekme dayanımı genellikle ihmal edilmektedir. Dolayısıyla, literatürde betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimini temsil eden model sayısı sınırlıdır. Bastami vd. (2010), betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi hakkında yapılan önemli deneysel çalışmaları ve mevcut davranış modellerini derleyerek, bu çalışmalar üzerinde regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda, betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimini temsil eden bir model önerilmiştir. Çalışmalar, betonun çekme dayanımının sıcaklık artışı ile birlikte neredeyse doğrusal bir şekilde azaldığını göstermektedir (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model (Bastami vd., 2010).

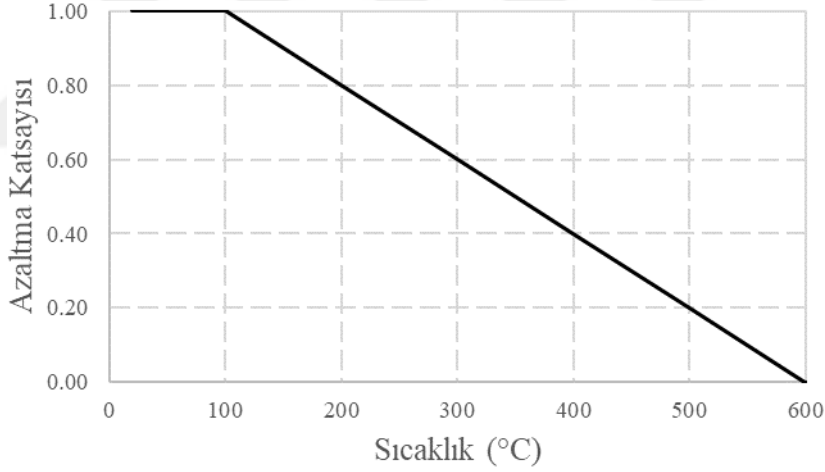
Hesaplarda betonun çekme dayanımının dikkate alınması gerektiği durumlar için EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemlerden yararlanılabilir. Sıcaklık artışı nedeniyle betonun karakteristik çekme dayanımında meydana gelen kayıp, EN 1992-1-2'de (2004) verilen dayanım azaltma katsayısı yardımı ile ifade edilmektedir.

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) f_{ck,t}(20^{\circ}C) \quad (1.41)$$

Burada;  $f_{ck,t}(\theta)$  belirli bir sıcaklıktaki betonun karakteristik çekme dayanımını,  $k_{c,t}(\theta)$  bu sıcaklığa ait çekme dayanımı azaltma katsayısını ve  $f_{ck,t}(20^{\circ}C)$  ise betonun oda koşullarındaki karakteristik çekme dayanımını göstermektedir. Betonun sıcaklığa bağlı çekme dayanımı azaltma katsayısı;

$$k_{c,t}(\theta) = \begin{cases} 1 & 20^{\circ}C \leq \theta_c \leq 100 \\ 1 - (\theta - 100)/500 & 100^{\circ}C < \theta_c \leq 600 \end{cases} \quad (1.42)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. EN 1992-1-2'de (2004) verilen bu denklemlere göre, betonun karakteristik çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.20'de verilmektedir.



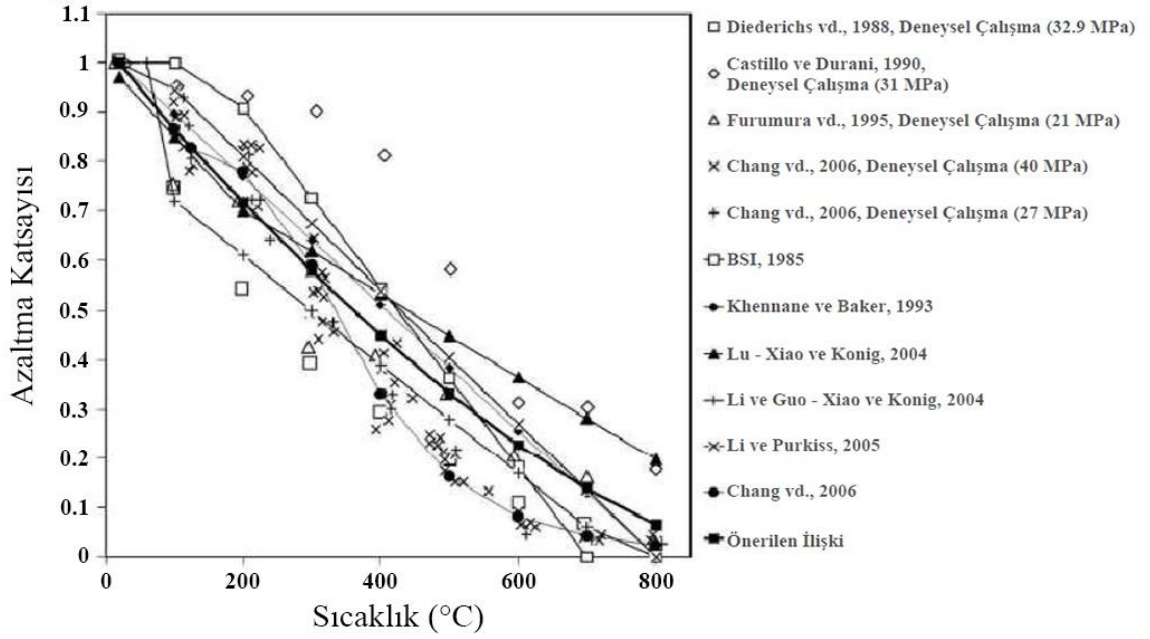
Şekil 1.20. Betonun karakteristik çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).

#### 1.11.1.8. Elastisite Modülünün Değişimi

Elastisite modülü, rijitliğin veya deformasyona karşı dayanıklılığın bir ölçüsüdür. Yapısal davranışta önemli bir role sahip olan elastisite modülü, yüksek sıcaklıklardan önemli derecede etkilenmektedir. Genel olarak, sıcaklığın betonun elastisite modülü üzerindeki etkisi, sıcaklığın beton dayanımı üzerindeki etkisine benzer bir davranış göstermektedir. Ayrıca, artan sıcaklık nedeniyle hafif ağırlıklı ve yüksek dayanımlı

betonun elastisite modülünde meydana gelen değişim de geleneksel betonun elastisite modülünde meydana gelen değişimle benzerlik göstermektedir.

Bastami vd. (2010), betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi hakkında yapılan önemli deneysel çalışmaları ve mevcut davranış modellerini derleyerek, bu çalışmalar üzerinde regresyon analizi gerçekleştirmiştir. Gerçekleştirilen regresyon analizleri sonucunda, betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimini temsil eden bir model önerilmiştir. Çalışma sonuçları, sıcaklık artışı ile birlikte betonun elastisite modülünün azaldığını göstermektedir (Şekil 1.21).



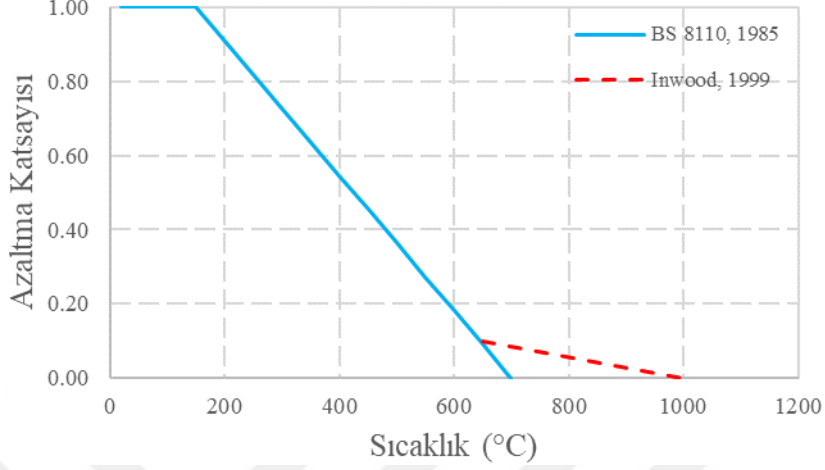
Şekil 1.21. Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli çalışmalar ve bu davranış için önerilen bir model (Bastami vd., 2010).

Sıcaklık artışı nedeniyle betonun elastisite modülünde meydana gelen kayıp, BS 8110'da (1985) verilen elastisite modülü azaltma katsayısına ait denklem yardımıyla belirlenebilir. Bu katsayı, ilgili sıcaklığa ait elastisite modülü değerinin oda koşullarındaki elastisite modülü değerine oranını ifade etmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren azaltma katsayısına ait denklem;

$$k_E(\theta) = \begin{cases} 1 & \theta_c \leq 150 \\ (700 - \theta)/550 & \theta_c > 150 \end{cases} \quad (1.43)$$



şeklinde ifade edilmektedir. BS 8110'da (1985) verilen bu denklemlere göre, betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi Şekil 1.22'de verilmektedir.



Şekil 1.22. Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi (BS 8110, 1985 ve Inwood, 1999).

Şekil 1.22'den, 150°C'de betonun elastisite modülünde herhangi bir kayıp meydana gelmediği, 700°C'lik sıcaklıkta ise betonun elastisite modülünün tamamen tükendiği açıkça görülmektedir. Ancak, betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi incelendiğinde, 700°C mertebesinde betonun basınç dayanımının belirli ölçüde korunduğu görülmektedir. Betonun basınç dayanımının ve elastisite modülünün farklı sıcaklık değerlerinde sıfıra erişmesi fiziksel olarak mümkün değildir. Inwood (1999), elastisite modülünün sıfıra ulaştığı sıcaklığı artırmak için, Şekil 1.22'deki kesikli çizgi ile gösterilen küçük bir değişiklik önermiştir.

Bu çalışmada betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi dikkate alınırken, Bastami vd. (2010) tarafından literatürde yer alan veriler üzerinde gerçekleştirilen regresyon analizi sonucunda elde edilen modelin kullanımı tercih edilmiştir. Bu model için betonun elastisite modülü azaltma katsayısına ait denklem;

$$k_E(\theta) = \begin{cases} 1 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 100 \\ 1.015 - 0.00154\theta + 2 \times 10^{-7}\theta^2 + 3 \times 10^{-10}\theta^3 & 100^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1000 \\ 0 & 1000^\circ\text{C} < \theta_c \end{cases} \quad (1.44)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Betonun oda koşullarındaki elastisite modülü, ilgili beton sıcaklığına ait azaltma katsayısı ile çarpılarak, bu sıcaklığa karşılık gelen elastisite modülü değeri elde edilebilmektedir.

### 1.11.2. Donatı Özelliklerinin Yüksek Sıcaklıkla Değişimi

#### 1.11.2.1. Özgül Ağırlığın Değişimi

Çeliğin oda koşullarındaki özgül ağırlığı  $\rho_s$ ,  $7850 \text{ kg/m}^3$ 'tür. Deneysel çalışmalar, değişen sıcaklıkla çeliğin özgül ağırlığının önemli ölçüde değişmediğini göstermektedir. Bu nedenle çeliğin özgül ağırlığının, çelik sıcaklığından bağımsız olduğu ve yüksek sıcaklıkla değişmediği kabul edilerek, oda koşullarındaki değeri dikkate alınabilir (EN 1993-1-2, 2005).

#### 1.11.2.2. Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi

EN 1992-1-2'de (2004) verilen denklemler yardımıyla, bazı çelik türlerine ait ısı genleşme katsayısının  $\varepsilon_s(\theta)$ , sıcaklığa bağlı olarak değişimi elde edilebilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisindeki donatı çeliği ve yapısal çeliğe ait ısı genleşme davranışı,

$$\varepsilon_s(\theta) = \begin{cases} -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5} \theta + 0.4 \times 10^{-8} \theta^2 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 750^\circ\text{C} \\ 11 \times 10^{-3} & 750^\circ\text{C} < \theta_s \leq 860^\circ\text{C} \\ -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta & 860^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.45)$$

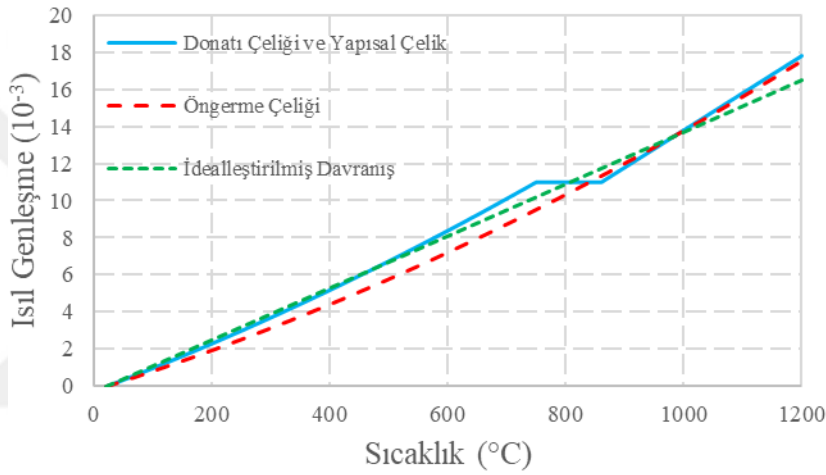
denklemleri yardımıyla belirlenmektedir. EN 1992-1-2'de (2004), öngerme çeliğine ait ısı genleşme davranışı ise,

$$\varepsilon_s = -2.016 \times 10^{-4} + 10^{-5} \theta_s + 0.4 \times 10^{-8} \theta_s^2 \quad (1.46)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Basit hesaplamalarda ısı genleşme ve çelik sıcaklığı arasındaki ilişki doğrusal olarak kabul edilebilir. Doğrusal bir şekilde idealleştirilen bu davranış EN 1994-1-2'de (2005),

$$\varepsilon_s = 14 \times 10^{-6} (\theta_s - 20) \quad (1.47)$$

denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada;  $\theta_s$  çelik sıcaklığını ( $^{\circ}\text{C}$ ) ifade etmektedir. Isıl genleşme katsayısının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.23'te verilmektedir.



Şekil 1.23. Karbon çeliğinin ısıl genleşme katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1994-1-2, 2005).

Şekil 1.23'ten görüldüğü gibi, donatı çeliğinin ısıl iletkenliği  $750^{\circ}\text{C}$ 'ye kadar kademeli olarak artmaktadır. Bu artış, çelikte meydana gelen faz değişimi nedeniyle  $750^{\circ}\text{C}$  ile  $860^{\circ}\text{C}$  arasında durmaktadır.  $860^{\circ}\text{C}$ 'den sonra ısıl genleşme tekrar artmaya devam etmektedir. Bu davranış yapısal çelik için de geçerlidir. Hesaplamalarda sıcaklık değişiminden bağımsız, sabit tek bir değer kullanılmak istendiğinde, donatı ve yapısal çeliğin ısıl iletkenlik katsayısı  $45 \text{ W/mK}$  olarak alınabilir (EN 1994-1-2, 2005).

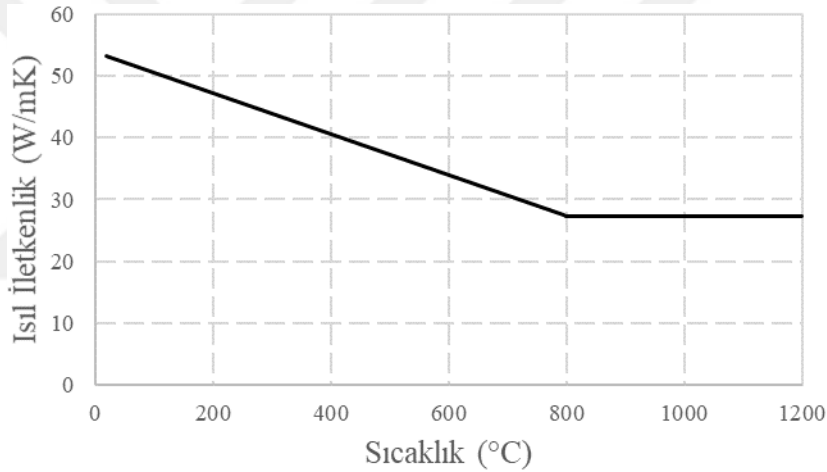
Yüksek sıcaklık etkisi altındaki farklı çelik türlerinin, ısıl genleşme davranışları benzerlik göstermektedir. Dolayısıyla çelikler için ısıl genleşmenin çelik türünden bağımsız olduğu düşünülebilir (Anderberg, 1983).

### 1.11.2.3. Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi

Donatı çeliğinin ısı iletkenlik katsayısının  $\lambda_s(\theta)$  sıcaklığa bağılı olarak değişimi, EN 1993-1-2'de (2005) verilen denklemler yardımıyla belirlenmektedir.

$$\lambda_s(\theta) = \begin{cases} 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_s & 20^\circ\text{C} \leq \theta_s < 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & 800^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.48)$$

$\theta_s$  donatı sıcaklığını ifade etmektedir. Donatı çeliğinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.24'te verilmektedir.



Şekil 1.24. Karbon çeliğinin ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1993-1-2, 2005).

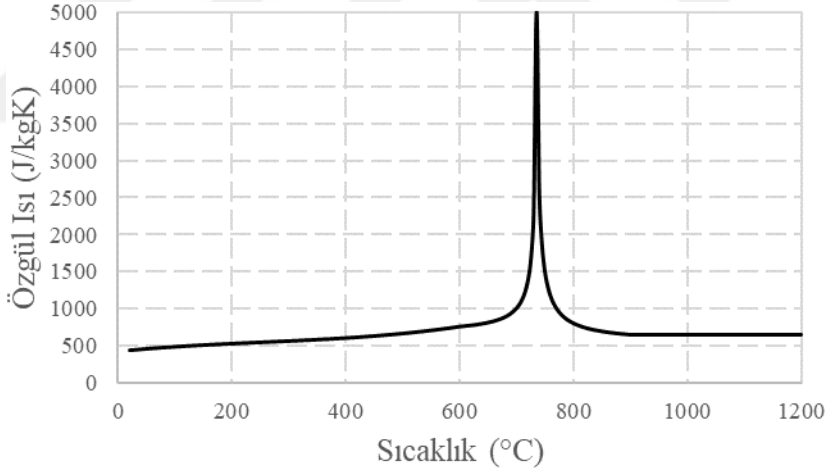
Şekil 1.24'ten görüldüğü gibi, donatı çeliğinin ısı iletkenlik katsayısı 800°C'ye kadar azalmakta ve 800°C'den büyük sıcaklıklar için sabit bir değer almaktadır. Bu davranış yapısal çelik için de geçerlidir. Hesaplamalarda sıcaklığa bağılı olarak değişim göstermeyen sabit tek bir değer kullanılmak istendiğinde, donatı ve yapısal çeliğin ısı iletkenlik katsayısı 45 W/mK olarak alınabilir (EN 1994-1-2, 2005).

#### 1.11.2.4. Özgül Isı Katsayısının Değişimi

EN 1993-1-2'de (2005) verilen denklemler yardımıyla, tüm karbon çeliklerine ait özgül ısı katsayısının  $c_s$ , sıcaklığa bağlı olarak değişimi elde edilebilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisindeki donatı çeliği ve yapısal çeliğe ait özgül ısı katsayısındaki değişim,

$$c_s(\theta) = \begin{cases} 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta - 1.69 \times 10^{-3} \theta^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 600 \\ 666 + 13002 / (738 - \theta) & 600^\circ\text{C} < \theta_s \leq 735 \\ 545 + 17820 / (\theta - 731) & 735^\circ\text{C} < \theta_s \leq 900 \\ 650 & 900^\circ\text{C} < \theta_s \leq 1200 \end{cases} \quad (1.49)$$

denklemleri yardımıyla belirlenmektedir. Burada;  $\theta_s$  çelik sıcaklığını ( $^\circ\text{C}$ ) ifade etmektedir. Özgül ısı katsayısının sıcaklıkla değişimi Şekil 1.25'te verilmektedir.



Şekil 1.25. Karbon çeliğinin özgül ısı katsayılarının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1993-1-2, 2005).

Şekil 1.25'ten görüldüğü gibi,  $735^\circ\text{C}$ 'de karbon çeliğinin özgül ısısı pik değere ulaşmaktadır. Bu durum sıcaklık etkisiyle çelikte meydana gelen metalürjik faz değişiminden kaynaklanmaktadır. Hesaplamalarda sıcaklık değişiminden bağımsız, sabit tek bir değer kullanılmak istendiğinde, donatı ve yapısal çeliğin özgül ısı katsayısı  $600 \text{ J/kgK}$  olarak alınabilir (EN 1994-1-2, 2005).

### 1.11.2.5. Yüksek Sıcaklıklarda Akma Dayanımının Belirlenmesi

Normal koşullarda akma sınırının belirgin olmadığı durumlar için akma dayanımı, 0.002 (%2) kalıcı şekil değiştirmeye karşı gelen gerilme değeri olarak alınmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda akma sınırının belirlenmesinde ise genellikle %1 veya %2 birim deformasyon seviyesi kullanılmaktadır.

Avrupa Yapısal Çelik Birliği (ECCS, 1988), sıcaklığın 400°C'den yüksek olduğu durumlarda akma dayanımının belirlenmesi için %5 birim deformasyon seviyesini, sıcaklığın 400°C'den düşük olduğu durumlarda ise %2 ile %5 birim deformasyon seviyeleri arasında lineer enterpolasyon kullanımını önermektedir. Ancak, yapılan yangın deneyleri sonucunda elde edilen bulgular %5 birim deformasyon seviyesinin aşırı emniyetli olduğunu göstermiştir.

Kay vd. (1996), yüksek sıcaklıklarda akma dayanımının belirlenmesinde %1 birim deformasyon seviyesinin kullanımını önermektedir.

BS 5950-8'de (1998) farklı eleman türleri için %5, %1.5 ve %2 olmak üzere üç adet birim deformasyon sınırı verilmektedir. Büyük ölçekli kolon ve kiriş yangın deneyleri ile doğrulanan bu sınır değerler Tablo 1.6.'da verilmektedir.

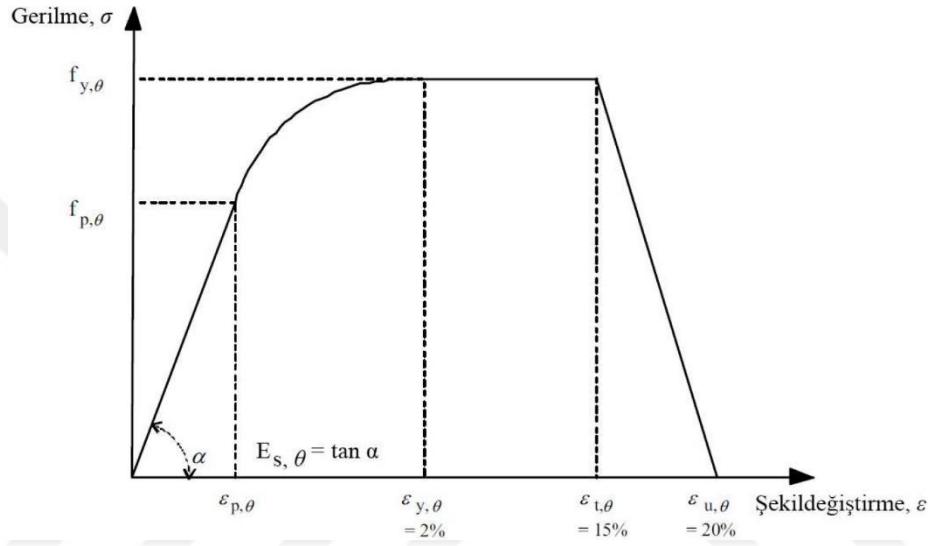
Tablo 1.6. Farklı eleman türleri için birim deformasyon sınırları (BS 5950-8, 1998).

Eleman Türü	Kalıcı Şekildeğiştirme Sınırı (%)
Yangın korumalı veya korumasız kompozit eğilme elemanları	2
Yangın korumalı veya korumasız çelik eğilme elemanları	1.5
Diğer elemanlar	0.5

Eurocode, çıplak çelik kirişler üzerinde yapılan yüklemeli yangın deneylerinden elde edilen %3'ün üzerindeki yüksek birim deformasyonlara dayanarak, yüksek sıcaklıklarda akma dayanımının belirlenmesinde %2 birim deformasyon seviyesinin kullanımını önermektedir (EN 1993-1-2, 2005 ve EN 1994-1-2, 2005).

### 1.11.2.6. Gerilme-Şekildeğiştirme Diyagramının Değişimi

EN 1993-1-2 (2005), yüksek sıcaklıklarda karbon çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik bir model sunmaktadır (Şekil 1.26). Bu model yardımıyla, yüksek sıcaklık etkisi altındaki donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme diyagramları elde edilebilmektedir.



Şekil 1.26. Yüksek sıcaklıklarda karbon çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden matematik model (EN 1993-1-2, 2005).

Şekil 1.26'dan görüldüğü gibi modelde pekleşme davranışı dikkate alınmamıştır. EN 1993-1-2 (2005) Ek A'da, yüksek sıcaklıklarda karbon çeliğinin pekleşme davranışını dikkate alan bir model sunulmaktadır.

Şekil 1.26'da verilen model; doğrusal elastik bölge, doğrusal olmayan eliptik geçiş bölgesi, ideal plastik bölge ve doğrusal azalma gösteren bölge olmak üzere toplam dört bölgeden oluşmaktadır. Modele ait dayanım ve rijitlik özellikleri gibi çeşitli parametreler arasındaki ilişkiler Tablo 1.7'de verilmektedir. Yüksek sıcaklıktaki çeliğin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için verilen dayanım ve deformasyon özellikleri, 2-50°C/dk arasındaki ısıtma hızları için geçerlidir (EN 1993-1-2, 2005). Bu model öngerme çelikleri için kullanılırken, öngerme çeliklerine ait parametrelerin kullanılmasına dikkate edilmelidir (EN 1992-1-2, 2004).

Betonarme yapılarda donatı olarak kullanılan çelikler imalat biçimlerine göre; sıcak haddelenmiş donatı çeliği (SHDÇ) ve soğuk işlenmiş donatı çeliği (SİDÇ) olmak üzere iki

sınıfa ayrılmaktadır. Yüksek sıcaklıklardaki her iki donatı sınıfı için, Şekil 1.26'da belirtilen gerilme-şekil değiştirme ilişkisine ait parametrelerin azaltma katsayıları Tablo 1.8'de verilmektedir. Tabloda yer almayan ara sıcaklık değerleri için doğrusal enterpolasyon kullanılabilir (EN 1992-1-2, 2004).

Tablo 1.7. Karbon çeliğinin yüksek sıcaklıktaki gerilme ve tanjant modülünün belirlenmesinde kullanılan formüller (EN 1993-1-2, 2005).

Şekildeğiştirme Aralığı	Gerilme $\sigma(\theta)$	Tanjant Modülü
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) \left[ a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a \left[ a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0.5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} \left( 1 - (\varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta}) \right)$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0.00	-
Parametreler	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0.02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0.15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0.20$	
Fonksiyonlar	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

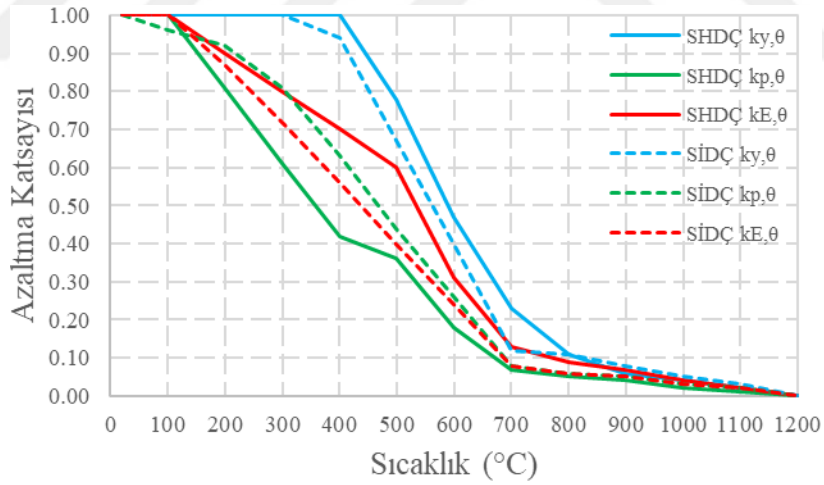
Tablo 1.8'deki değerler incelendiğinde; sıcaklık artışı ile birlikte karbon çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait doğrusal elastik bölgenin eğimindeki azalmanın, soğuk işlenmiş çelikte, sıcak haddelenmiş çeliğe kıyasla daha az olduğu görülmektedir. Bu tabloda yer alan çelik türlerine ait azaltma katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 1.27'de verilmektedir.

EN 1993-1-2'de (2005) verilen matematiksel model kullanılarak, farklı sıcaklıklar için, S460 karbon çeliğine ait gerilme-şekildeğiştirme diyagramları elde edilmiş ve Şekil 1.28'de gösterilmiştir.

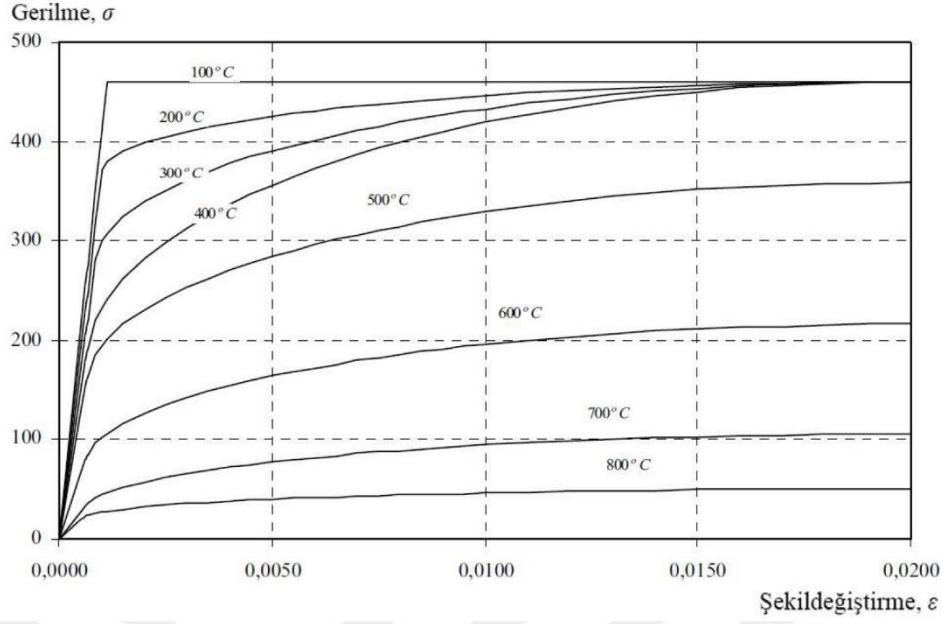


Tablo 1.8. Sıcak haddelenmiş ve soğuk işlenmiş donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait parametrelerin yüksek sıcaklıklardaki değerleri (EN 1992-1-2, 2004).

Donatı Sıcaklığı, $\theta$ (°C)	Azaltma Katsayıları					
	Soğuk İşlenmiş Donatılar			Sıcak Haddelenmiş Donatılar		
	$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$	$k_{E,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}$	$k_{y,\theta} = \frac{f_{y,\theta}}{f_y}$	$k_{p,\theta} = \frac{f_{p,\theta}}{f_y}$	$k_{E,\theta} = \frac{E_{s,\theta}}{E_s}$
20	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
100	1.00	0.96	1.00	1.00	1.00	1.00
200	1.00	0.92	0.87	1.00	0.81	0.90
300	1.00	0.81	0.72	1.00	0.61	0.80
400	0.94	0.63	0.56	1.00	0.42	0.70
500	0.67	0.44	0.40	0.78	0.36	0.60
600	0.40	0.26	0.24	0.47	0.18	0.31
700	0.12	0.08	0.08	0.23	0.07	0.13
800	0.11	0.06	0.06	0.11	0.05	0.09
900	0.08	0.05	0.05	0.06	0.04	0.07
1000	0.05	0.03	0.03	0.04	0.02	0.04
1100	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.02
1200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00



Şekil 1.27. Karbon çeliğinin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi için azaltma katsayıları (EN 1992-1-2, 2004 ve EN 1993-1-2, 2005).



Şekil 1.28. EN 1993-1-2’de (2005) sunulan matematik model yardımıyla elde edilen, S460 karbon çeliğinin farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları

## 1.12. Isıl Çözümleme

Yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle eleman kesitleri içerisinde oluşan sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi bir ısı transferi problemidir. Bu sıcaklık dağılımları, yangına maruz kalan yapı ya da yapı elemanlarının yapısal davranışının belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bölümde enerjinin korunumu ilkesi, ısı transferi rejimleri, ısı transferi, ısı transferi mekanizmaları ve ısı çözümü yöntemleri üzerinde durulmaktadır.

### 1.12.1. Enerjinin Korunumu İlkesi ve Isı Transferi Rejimleri

Birçok ısı transferi probleminde enerjinin korunumu ilkesi (termodinamiğin birinci yasası) çoğu zaman geçerli bir araçtır. Bu durumda; bir kontrol hacmine giren ısı ve mekanik enerji, artı kontrol hacmi içinde üretilen enerji, eksi kontrol hacminden çıkan ısı ve mekanik enerji, kontrol hacmi içinde depolanan (biriken) enerjiye eşittir. Enerjinin korunumu ilkesi birim zaman ölçeğinde,

$$\dot{E}_i + \dot{E}_g - \dot{E}_o = \frac{\partial E_{st}}{\partial t} \equiv \dot{E}_{st} \quad (1.50)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (1.50) herhangi bir an için uygulanabilirken, bir  $\Delta t$  zaman aralığı için enerjinin korunumu ilkesi (1.51) denklemi ile ifade edilmektedir.

$$E_i + E_g - E_o = \Delta E_{st} \quad (1.51)$$

Tanımlanan kontrol hacmine giren ve üretilen enerjilerin toplamının, çıkan enerjiye eşit olması sonucu, kontrol hacmi içinde depolanan enerji miktarı zamanla değişim göstermemekte ve sürekli rejime neden olmaktadır.

$$E_i + E_g - E_o = 0 \quad (1.52)$$

Kontrol hacmi içinde depolanan enerjinin zamanla değişim göstermesi ise geçici rejime neden olmaktadır.

### 1.12.2. Isı Transferi

Isı transferi (ısı geçişi), sıcaklık farkından kaynaklanan enerji aktarımı olarak tanımlanmaktadır. Bir ortam içinde veya ortamlar arasında, sıcaklık farkının mevcut olduğu her durumda ısı transferi gerçekleşmektedir (Incropera ve DeWitt, 1996). Bu ısı geçişi, yüksek sıcaklıktaki ortamdan düşük sıcaklıktaki ortama doğru gerçekleşmektedir. Isı geçişi ortamlar arasındaki sıcaklık farkına bağlı olmasının yanında, ortam ve yüzey özelliklerine de bağlıdır.

Isı transferi üç farklı biçimde gerçekleşmektedir: İletim (kondüksiyon), taşınım (konveksiyon) ve ışınım (radyasyon). Isı geçişi, bu geçiş türlerinden biri yoluyla gerçekleşebileceği gibi, ikisi veya üçü yoluyla da gerçekleşebilir. İletim ve taşınım ile ısı geçişi hesabı için sıcaklık farkı hesaplanırken, sıcaklık °C veya kelvin (K) biriminde ifade edilebilir. Işınım ile ısı geçişi hesaplarında ise sıcaklık K olarak ifade edilmelidir. Yangın gibi yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan mühendislik yapılarının davranışlarının değerlendirilmesi için bu üç ısı geçişi türünün fiziksel mekanizmalarının iyi bilinmesi gerekmektedir.

Isı transferi çözümlenmeleri için önemli bir özellik olan ısı yayılım katsayısı; malzemenin ısı enerjisi ile iletme yeteneğinin, ısı enerjisi depolama yeteneğine oranıdır. Isı yayılım katsayısı büyük olan malzemeler, ısı yayılım katsayısı küçük olan malzemelere kıyasla, buldukları ısı çevredeki değişimlere daha hızlı cevap vermektedir.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ (m}^2\text{/s)} \quad (1.53)$$

Kolon dış sınırlarını oluşturan yüzey tabakasının taşınım ve ışınım yoluyla ısınmasından sonra, bu ısı enerji yüksek sıcaklıklardaki kolon yüzeylerinden, kolon enkesiti içinde bulunan ve daha düşük sıcaklıklara sahip bölgelere doğru iletim yoluyla aktarılmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinde; taşınım, ışınım ve iletimle ısı transferi mekanizmalarının tümü hesaba katılmıştır.

#### 1.12.2.1. Taşınım ve Işınım

Taşınım, katı bir yüzeyle bu yüzeyin temas ettiği akışkan (sıvı veya gaz) bir ortam arasında gerçekleşen ısı geçişidir. İletim ve akışkan hareketinin ortak sonucu olarak gerçekleşmektedir. Akışkanın hareket hızındaki artış taşınım ile ısı geçişini artırmaktadır. Akışkanın hareketsiz olması halinde ise katı yüzeyle akışkan arasındaki ısı geçişini yalnızca iletim yoluyla gerçekleşmektedir.

Işınım, maddenin atom veya moleküllerinin elektron düzeninde olan değişimler sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalar (veya fotonlar) aracılığıyla gerçekleşen enerji aktarımıdır. Mutlak sıfır sıcaklığının (-273.15°C) üzerinde sıcaklığa sahip tüm cisimler ışınım yaymaktadır (Çengel ve Boles, 1996). İletim ve taşınımından farklı olarak ışınım ile ısı geçişini, cisimler arasında boşluk olması halinde de gerçekleşmektedir. Hatta ışınım boşlukta daha etkin olarak gerçekleşmektedir (Incropera ve DeWitt, 1996). Işınım ile ısı geçişini ışık hızında gerçekleşmektedir. Güneş enerjisinin yeryüzüne erişimi ışınımın güzel bir örnektir.

Yangın koşullarındaki bir kolona ısı hem taşınım hem de ışınım yoluyla etki etmektedir. Taşınım odadaki sıcak gazlardan kaynaklanırken, ışınım ise hem odadaki sıcak gazlardan hem de alevler ve odada bulunan nesnelere kaynaklanmaktadır. Işınım yoluyla ısı transferi, ısı kaynağı ile hedef nesne arasındaki mesafeye ve ısı kaynağından gerçekleşen ısı akısına bağlıdır. Ortamda genellikle birçok ışınım kaynağının mevcut

olması ve hedef nesnenin de ışınlam yayması gibi nedenlerden dolayı ışınlam yoluyla ısı transferi karmaşık bir hal almaktadır. Ancak, ısı transferi çözümlerinde genellikle bir basitleştirme olarak yalnızca sıcak gazlardan gelen ışınlam hesaba katılmaktadır (Emberley, 2013).

#### **1.12.2.2. İletim**

İletim, bir maddenin enerjisi daha fazla olan moleküllerinden yakınındaki diğer moleküllere, moleküller arasındaki etkileşim sonucunda enerji geçişidir. Enerji geçişi katı, sıvı veya gaz ortamlarında gerçekleşebilir. İletim, sıvılarda ve gazlarda moleküllerin rastgele hareketleri sırasında birbirleriyle çarpışmaları sonucunda gerçekleşirken, katılarda ise moleküllerin sabit düzen içindeki titreşimleri ve serbest elektronların hareketleri sonucunda gerçekleşir.

Yangın koşullarındaki bir kolon enkesiti boyunca ısı transferi iletim yoluyla gerçekleşmektedir. İletim ve enkesit içindeki ısı iletimini tanımlayan diferansiyel denklem, tanımlanan bir kontrol hacmi için enerjinin korunumu ilkesine dayanmaktadır.

#### **1.12.3. Isıl Çözümleme Yöntemleri**

Eleman kesitleri içerisindeki sıcaklık dağılımları; deneysel verilere dayanarak oluşturulan tasarım grafikleri kullanılarak belirlenebileceği gibi, analitik ve sayısal yöntemlerle teorik olarak da hesaplanabilmektedir.

##### **1.12.3.1. Tasarım Grafikleri Yöntemi**

Eleman enkesitleri boyunca sıcaklık profillerinin belirlenmesinde kullanılan en basit yöntem tasarım grafiklerinin kullanılmasıdır. Genellikle standart yangın koşulları için yapılan deneysel çalışma sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak oluşturulan bu grafikler, standartlarda ve tasarım kılavuzlarında yer almaktadır.

Çeşitli enkesit boyutları (mm) ve standart yangın başarımları (R) için; betonarme döşeme, duvar, giriş ve kolonlara ait sıcaklık profilleri EN 1992-1-2 (2004) Ek

A'da verilmektedir. EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan sıcaklık profilleri Tablo 1.9'da gösterilmektedir.

Tablo 1.9. Çeşitli enkesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının farklı yangın başarımları için sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).

Yapı Elemanı	Enkesit Boyutları (mm)	Standart yangın başarımları süresi (R)
Tek yüzünden yangına maruz kalan döşeme veya duvar	Kalınlık = 200	R30 – R240
Kare Kolon	Yükseklik x Genişlik 300 x 300	R30 – R120 500°C eş sıcaklık eğrileri
Dairesel Kolon	Çap = 300	R30 – R120
Kirişler	Yükseklik x Genişlik 300 x 160	R30 – R90 500°C eş sıcaklık eğrileri
	Yükseklik x Genişlik 600 x 300	R60 – R120
	Yükseklik x Genişlik 800 x 500	R60 – R240

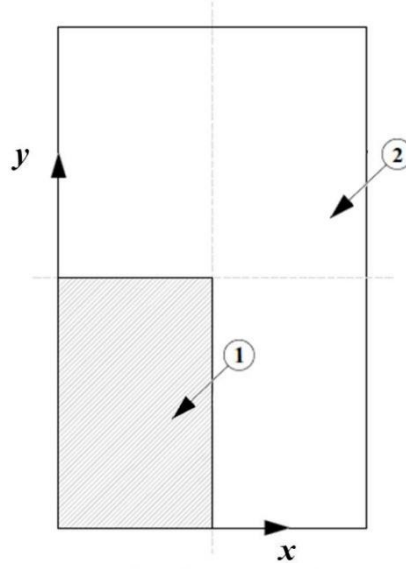
Tablo 1.9'dan da görülebileceği gibi, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan sıcaklık profillerinden yalnızca betonarme döşeme ve duvar elemanı için verilen profiller yangına tek yüzeyinden maruz kalma durumu için geçerliken, diğer elemanlar için verilen sıcaklık profilleri ise yangına tüm yüzeylerden maruz kalma durumu için geçerlidir.

Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan betonarme kolon ve kiriş enkesitlerinde oluşan sıcaklık dağılımlarının simetrik olacağı varsayımıyla, bu elemanlar için EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profillerinin, eleman kesitlerinin yalnızca ¼'ünü temsil etmesi yeterli olacaktır.

Şekil 1.29'da gösterilen 1 nolu bölge sıcaklık profilinin alanını, 2 nolu bölge ise tüm enkesit alanını ifade etmektedir.

Bu sıcaklık profilleri bazı kabullere dayanmaktadır:

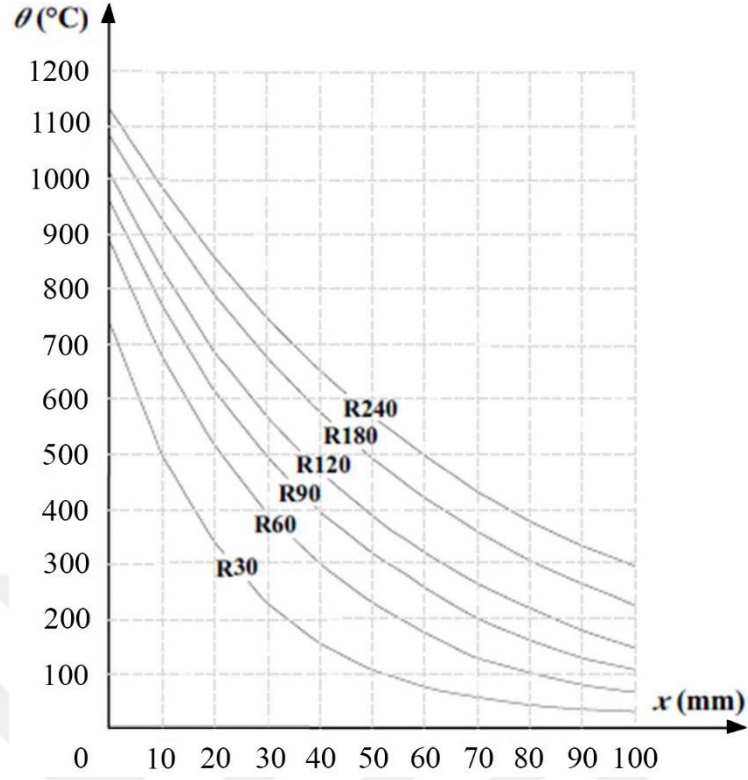
- Profiller, %1.5'lük nem içeriğine sahip betonun özgül ısı ile uyumludur.
- Profiller, betonun ısı iletkenliğinin alt sınırı ile uyumludur.
- Beton yüzeyin ışıyım yayıcılığı 0.7'dir.
- Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı  $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'dir.



Şekil 1.29. Eleman enkesit alanlarında simetrik bir sıcaklık dağılımı beklenen durumlar için sıcaklık profillerinin temsil edilme şekli (EN 1992-1-2, 2004).

%1.5'dan daha yüksek nem içeriğine sahip beton için sıcaklık profilleri emniyetli tarafta kalmaktadır. Isıl iletkenliğin alt sınırı, farklı beton yapı tiplerinin yangın testlerinde ölçülen sıcaklıklarla karşılaştırılmasından elde edilmiştir. Beton yapılar için alt sınır, kompozit yapıların yangın testlerinden elde edilen üst sınıra kıyasla daha gerçekçi sıcaklık sonuçları vermektedir (EN 1992-1-2, 2004).

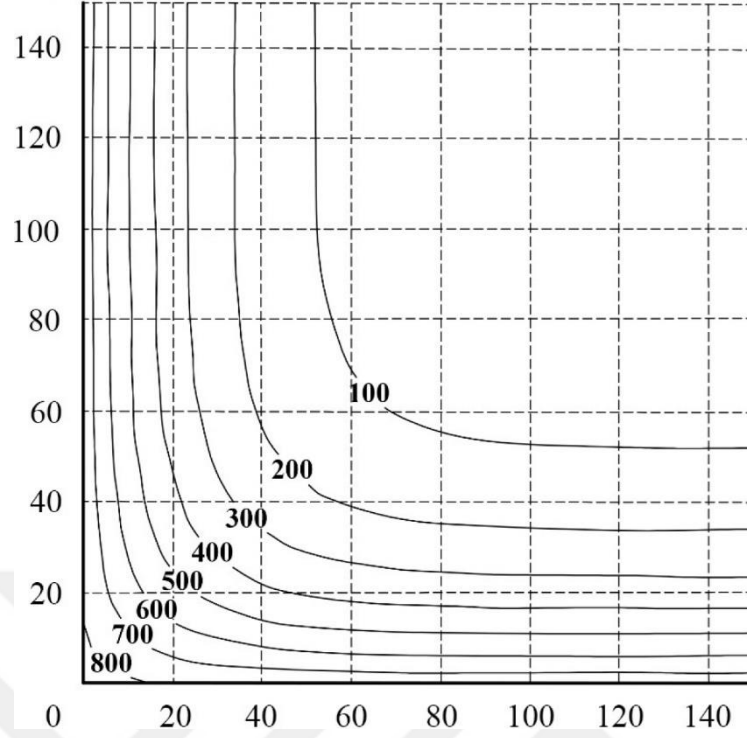
EN 1992-1-2'de (2004) verilen sıcaklık profillerine örnek olması açısından, yangına tek yüzünden maruz kalan 200 mm kalınlığındaki döşeme için 30, 60, 90, 120, 180 ve 240 dakikalık yangın başarımlarına ait sıcaklık profilleri Şekil 1.30'da verilmektedir. Burada  $x$ , yangına maruz kalan yüzeye olan mesafeyi (mm) temsil etmektedir.



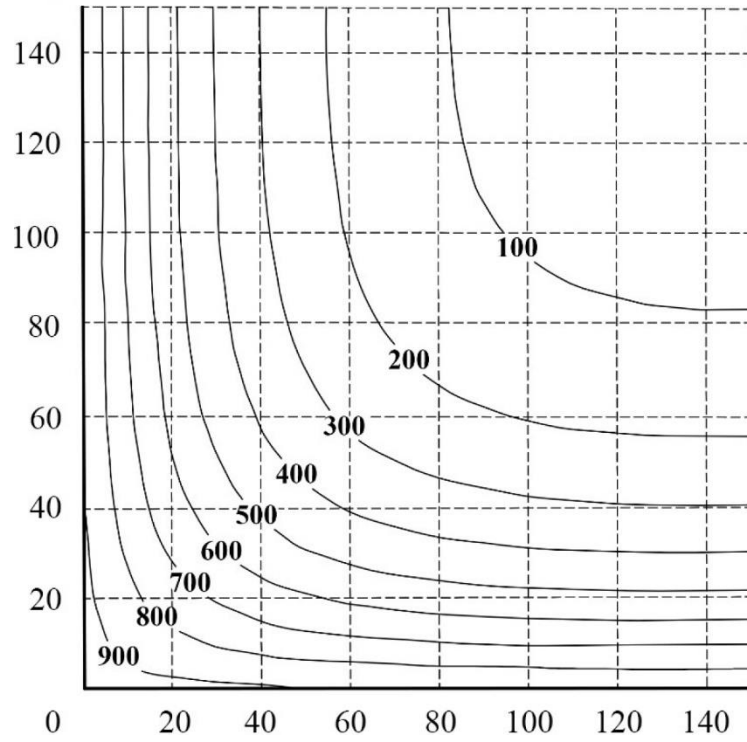
Şekil 1.30. Yangına tek yüzünden maruz kalan 200 mm kalınlığındaki döşeme için R30 – R240 yangın başarımlarına ait sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).

Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 30, 60, 90 ve 120 dakikalık yangın başarımlarına ait sıcaklık dağılımlarını temsil eden profiller ise Şekil 1.31 – 1.34’te verilmektedir. Örnek olarak verilen bu sıcaklık profilleri, çalışmada gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinin doğrulanması aşamasında kullanılmıştır.

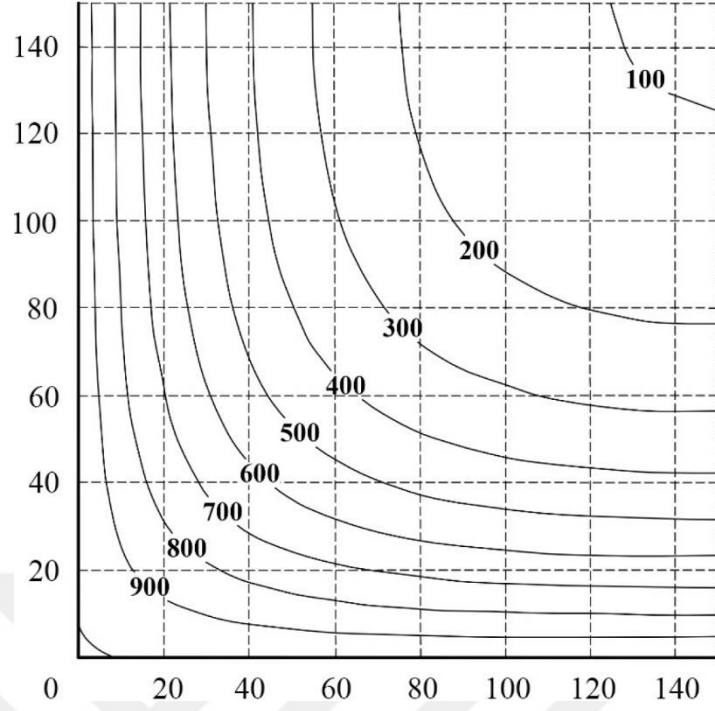




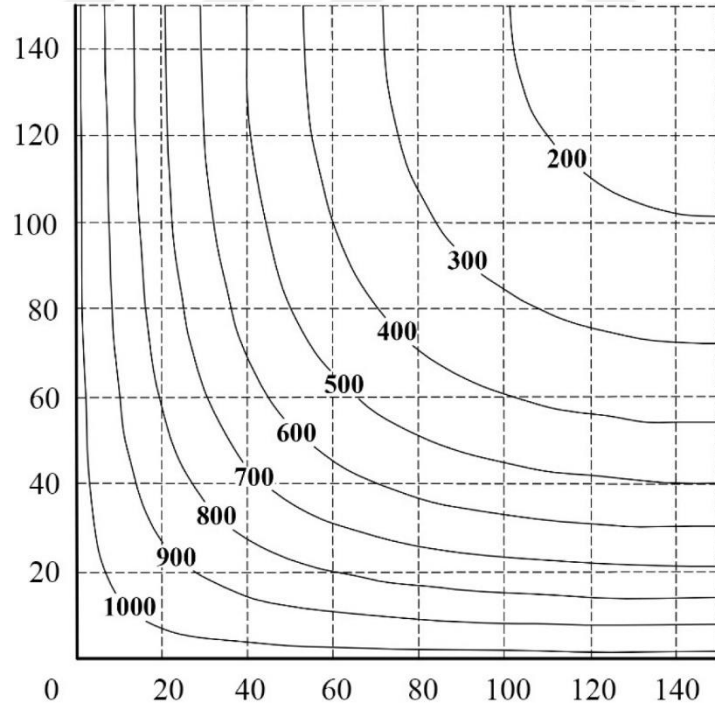
Şekil 1.31. Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 30 dakikalık yangın başarım süresine (R30) ait sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).



Şekil 1.32. Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 60 dakikalık yangın başarım süresine (R60) ait sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).



Şekil 1.33. Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 90 dakikalık yangın başarımlarına (R90) ait sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).



Şekil 1.34. Yangına tüm yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip kare kolon için 120 dakikalık yangın başarımlarına (R120) ait sıcaklık profilleri (EN 1992-1-2, 2004).

### 1.12.3.2. Analitik Yöntemler

Analitik yöntemler genel olarak yangın testlerinden veya bilgisayar tabanlı ısı transferi analizlerinden elde edilen verilerden eğri uydurma tekniklerine dayanmaktadır. Bu bölümde normal ağırlıklı betondan oluşan basit elemanların enkesitlerindeki belirli bir  $x$  (m) mesafesindeki sıcaklığın elle hesaplanmasında kullanılan Wickström Yöntemi ve Hertz Yöntemi'ne yer verilmiştir. Her iki yöntem de standart yangın eğrisine maruz kalma durumu için uygulanabilmektedir. Ayrıca ısı yayılım katsayısının veri olarak girilmesi nedeniyle, her iki yöntem de farklı tür betonlara uygulanabilmektedir.

#### 1.12.3.2.1. Wickström Yöntemi

Wickström yöntemi kullanılarak yangın koşullarındaki betonarme bir yapı elemanının yüzeyindeki sıcaklık  $\theta_w$ , (1.54) denkleminin (1.55) denkleminde yerine yazılması ile elde edilmektedir. Burada;  $t$  zamanı (saat),  $\theta_g$  ise ortamda bulunan gaz sıcaklığını göstermektedir.

$$\eta_w = 1 - 0.0616t^{-0.88} \quad (1.54)$$

$$\theta_w = \eta_w \theta_g \quad (1.55)$$

Bir doğrultuda gerçekleşen ısı iletimi için beton dış yüzeyinden herhangi bir  $x$  (m) mesafesindeki beton sıcaklığındaki artış  $\Delta\theta_c$  ise (1.56) denklemi yardımıyla elde edilmektedir.

$$\Delta\theta_c = \eta_x \eta_w \Delta\theta_g \quad (1.56)$$

Buradaki  $\eta_x$  faktörü, (1.57) denkleminin (1.58) denkleminde yerine yazılması ile elde edilmektedir. Wickström (1986) denklem (1.57)'de yer alan  $\alpha_c$  referans ısı yayılım katsayısının, normal ağırlıklı beton için  $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olduğunu belirtmiştir.

$$u_x = \frac{\alpha}{\alpha_c} \frac{t}{x^2} \quad (1.57)$$

$$\eta_x = 0.18 \ln u_x - 0.81 \quad (1.58)$$

Ayrıca bu yöntem, aynı şekilde hesaplanan bir  $\eta_y$  faktörünün katılımı ile iki doğrultuda gerçekleşen ısı transferi için de kullanılabilir. Kiriş köşeleri bu duruma örnek olarak gösterilebilir. Bu durumda X-Y düzleminde bulunan beton enkesitinin herhangi bir noktasındaki beton sıcaklığı denklem (1.59) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$\Delta\theta_c = \left[ \eta_w (\eta_x + \eta_y - 2\eta_x\eta_y) + \eta_x\eta_y \right] \Delta\theta_g \quad (1.59)$$

Wickström (1986), bu denklemlerin diğer beton türlerine uygun olarak nasıl düzenlenebileceğini göstermekte ve sönüm aşamasının da dikkate alındığı doğal yangın modellerinin hesaba katılması durumunda beton sıcaklıklarını belirlemek için yaklaşık yöntemler sunmaktadır. EN 1991-1-2 (2002) Ek A'da verilen parametrik sıcaklık-zaman eğrileri, Wickström tarafından yapılan çalışmalara dayanmaktadır. Ancak, maksimum beton sıcaklıklarının yangının maksimum sıcaklığa erişmesinden önemli bir süre sonra meydana gelmesi nedeniyle, sönüm aşamasındaki hesaplamaların doğruluğu daha azdır. Bu nedenle, gerçek yangın durumunda bir sonlu eleman modelinin kullanımı önerilmektedir.

#### 1.12.3.2.2. Hertz Yöntemi

Hertz yöntemi kullanılarak bir doğrultuda gerçekleşen ısı iletimi için zamana bağlı sıcaklık değişimi (1.60) denklemi ile elde edilmektedir.

$$\Delta\theta(x,t) = f_1(x,t) + f_2(x,t) + f_3(x,t) \quad (1.60)$$

Burada;  $f_1(x,t)$ ,  $f_2(x,t)$  ve  $f_3(x,t)$  belirli sınır koşulları için ısı geçişi denkleminin çözümlenmesinde kullanılan fonksiyonlardır. Bu fonksiyonlar,

$$f_1(x,t) = E \left( 1 - \frac{x}{3.363\sqrt{\alpha t}} \right)^2 \quad (1.61)$$

$$f_2(x,t) = D e^{-x\sqrt{\frac{\pi}{2C\alpha}}} \sin \left( \frac{\pi t}{C} - x\sqrt{\frac{\pi}{2C\alpha}} \right) \quad (1.62)$$

$$f_3(x,t) = \frac{D+E}{2(e^{LC}-1)} \left( 1 - e^{\left( L(t-C) - x\sqrt{\frac{L}{\alpha}} \right)} \right) \quad (1.63)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu fonksiyonlarda yer alan ve ilgili fonksiyonlar için sırasıyla verilen ifadeler için,

$$1 - \frac{x}{3.363\sqrt{\alpha t}} \leq 0 \quad (1.64)$$

$$\frac{\pi t}{C} - x\sqrt{\frac{\pi}{2C\alpha}} \leq 0 \quad (1.65)$$

$$L(t-C) - x\sqrt{\frac{L}{\alpha}} \leq 0 \quad (1.66)$$

olması durumunda, ilgili fonksiyon sıfır değerine eşit olarak alınır. Buradaki  $E$ ,  $D$  ve  $C$  parametreleri, ısıtma rejimine bağlıdır. Bu parametreler Tablo 1.9'da verilmektedir.  $L$  parametresi ise soğuma aşamasındaki sıcaklık eğrisine bağlıdır.  $L$  parametresi,

$$L = \frac{2}{C} \ln \left( \frac{3D}{E-2D} \right) \quad (1.67)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bu denklemdeki  $E-2D$  ifadesinin negatif olması durumunda  $E-2D$  ifadesi 0.02 olarak alınır. Standart bir sıcaklık-zaman eğrisinin soğuma aşaması içermemesi nedeniyle,  $L=0$  olarak alınır ve dolayısıyla  $f_3(x,t)=0$  olur. Ayrıca bu

yöntem, sıcaklığın  $\Delta\theta(x, y, t)$  şeklinde ifade edildiği bir değişiklikte birlikte iki doğrultuda gerçekleşen ısı geçişi çözümlemesine olanak sağlamaktadır.

Tablo 1.10. Standart yangın koşulları altında beton elemanlar için sıcaklık analizi parametreleri (Hertz, 1981).

Zaman (saat)	C (saat)	D (°C)	E (°C)
0.5	1.0	150	600
1.0	2.0	220	600
1.5	3.0	310	600
2.0	4.0	360	600
3.0	6.0	410	600
4.0	8.0	460	600

### 1.12.3.3. Sayısal Yöntemler

Sıcaklığa maruz kalan eleman enkesitlerindeki sıcaklık dağılımları sonlu farklar ve/veya sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilebilmektedir. Bu çalışmada gerçekleştirilen sıcaklık analizleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Dolayısıyla bu bölümde sonlu elemanlar yöntemiyle sıcaklık dağılımının belirlenmesi üzerinde durulmaktadır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ısı transferi analizleri için ABAQUS sonlu eleman programından yararlanılmıştır.

Isı transferi analizi, iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) bir model kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir. Kartezyen eksenlerde ısı iletimi çözümlemesi için sonsuz küçük bir modelin diferansiyel kontrol hacmi  $\partial x \cdot \partial y \cdot \partial z$  olarak tanımlanmakta ve enerjinin korunumu yasası esas alınarak Fourier denkleminden yararlanılmaktadır. Sıcaklık analizinde beton eleman enkesiti içindeki sıcaklık dağılımı belirlenirken, enkesit içindeki ısı iletimini tanımlamak için kullanılan kısmi diferansiyel denkleminin en genel hali,

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Q = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1.68)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $\lambda$  ısı iletkenliği,  $Q$  sistemde üretilen ısı miktarını,  $\rho$  birim hacim ağırlığını,  $c$  özgül ısıyı ve  $t$  zamanı temsil etmektedir.

Bu kısmi diferansiyel denklemi çözmek oldukça zordur. Dolayısıyla çözümlemenin yaklaşık olarak tahmin edilmesi için sayısal bir yöntem kullanılmalıdır. Bu denklem, sonlu elemanlar yöntemini kullanan gelişmiş bilgisayar programları yardımıyla sayısal olarak çözümlenebilmektedir. Bu tür gelişmiş programların avantajı, çok sayıda farklı değişkenin hesaba katılabilmesi ve bu değişkenlerin kolaylıkla değiştirilebilmesidir. Bu yöntemle, model sonlu elemanlara ayrılarak diferansiyel denklem her bir eleman için çözümlenmekte ve böylece tüm modelin davranışı belirlenebilmektedir. Tüm sonlu eleman katkıları dikkate alınarak, herhangi bir anda yapıdaki ısı akılarının dengesini tanımlayan matris formülasyonu,

$$[K]\{\theta\} + [C]\{\dot{\theta}\} = \{Q\} \quad (1.69)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $[K]$  ısı iletkenlik matrisini,  $\{\theta\}$  sıcaklık vektörünü,  $[C]$  kapasite matrisini,  $\{\dot{\theta}\}$  sıcaklığın zamana göre birinci türev vektörünü ve  $\{Q\}$  dış ısı akış vektörünü temsil etmektedir.

Bir ısı iletimi probleminin çözümü, eleman sınırlarını oluşturan yüzeylerdeki ısı koşullara bağlıdır. Bu problemin matematiksel olarak eksiksiz bir şekilde tanımlanması için, ısı iletiminin önemli olduğu her boyut için iki sınır koşuluna, bu problemin zamana bağlı olması durumunda (geçici rejim) ise ek bir başlangıç koşuluna ihtiyaç duyulmaktadır. Uygulamalarda en çok karşılaşılan sınır koşulları; yüzeyde sabit sıcaklık, yüzeyde sabit ısı akısı, taşınım ve ışınım sınır koşullarıdır.

Eleman enkesitlerindeki sıcaklık dağılımlarını elde etmek için çözümlenecek ısı transferi probleminde geçici rejim esas alınmaktadır. Geçici rejim durumunda model hacmindeki sıcaklık zamanla artmakta veya azalmaktadır. Gelişmiş bilgisayar programları kullanılarak, zamana bağlı olarak değişim gösteren sınır koşulları ve sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren malzeme özellikleri hesaba katılabilmekte ve sıcaklık dağılımları tüm yangın süresi boyunca belirlenebilmektedir.

Bu çalışmada gerçekleştirilen ısı transferi analizlerindeki sıcaklık değişimlerinin, kolon enkesitine paralel olan iki eksen doğrultusunda önemli olduğu gerekçesiyle, gerçekleştirilen ısı çözümlerinde geçici rejimde iki boyutlu ısı iletimi esas alınmıştır.

### 1.13. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Mühendislik yapıları kullanım ömürleri boyunca deprem, yangın, patlama, rüzgâr, trafik yükü gibi çeşitli dinamik etkilere maruz kalabilmektedir. Bu dinamik etkiler yapıların göçmesine veya ciddi hasarlar almasına neden olabilmektedir. Dinamik etkiler sonucunda oluşan yapısal hasarlar, yapının rijitliğinde meydana gelen azalma veya yapının dinamik davranışında meydana gelen değişim incelenerek belirlenebilir. Mühendislik yapılarının dinamik etkiler altındaki yapısal davranışları, doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı olarak tanımlanan dinamik karakteristiklere bağlı olarak belirlenmektedir (Altunışık, 2010). Dinamik karakteristikler analitik, sayısal ve deneysel yöntemlerle belirlenebilmektedir.

#### 1.13.1. Analitik Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yapı sistemlerinin yer hareketi etkisindeki sönümlü hale ait ortak hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R \quad (1.70)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada;  $M$ ,  $C$  ve  $K$  sistemin sırasıyla kütle, sönüm ve rijitlik matrislerini,  $U$ ,  $\dot{U}$ ,  $\ddot{U}$  ise aynı sistemin rölatif yerdeğiştirme, hız ve ivme vektörlerini göstermektedir.  $R$  ise sisteme etkiyen ve zamanla değişen dış yük vektörüdür.

Herhangi bir yapı sistemine ait dinamik karakteristikler, o sisteme ait sönümsüz serbest titreşim hareket denkleminin çözümüyle bulunmaktadır. Bu durumda denklem (1.70)'de sönümün ve dış kuvvetin olmadığı kabulüyle, sistemin zamana bağlı sönümsüz serbest titreşim hareket denklemi,

$$M\ddot{U} + KU = 0 \quad (1.71)$$

şeklinde ifade edilebilmektedir (Chopra, 2006).

Serbest titreşim hareketi harmonik bir harekettir ve yerdeğiştirmeler denklem (1.72) yardımıyla elde edilebilir.



$$U = A \cos(\omega_n t) + B \sin(\omega_n t) \quad (1.72)$$

Bu denklemde A ve B başlangıç şartlarından bulunur. Bunun yanı sıra,  $\alpha$  faz açısı;  $\omega_n$  doğal açısal frekans ve  $\phi$  hareketin genlik vektörü olmak üzere, sönümsüz bir sistemin serbest titreşimi için çözüm,

$$U = \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.73)$$

şeklinde yazılabilir. (1.73) denkleminde,

$$\ddot{U} = -\omega_n^2 \phi \cos(\omega_n t - \alpha) \quad (1.74)$$

elde edilir. (1.73) ve (1.74) denklemleri (1.71) denkleminde ilgili yerlere konulursa,

$$-\omega_n^2 M \phi \cos(\omega_n t - \alpha) + K \phi \cos(\omega_n t - \alpha) = 0 \quad (1.75)$$

denklemini elde edilir. Bu denklem düzenlenirse,

$$(K - \omega_n^2 M) \phi = 0 \quad (1.76)$$

bir özdeğer denklemi elde edilir. Bu denklemin sonucundan herhangi bir titreşim elde edilebilmesi için  $\phi$  hareketin genlik vektörünün sıfırdan farklı olması gerekmektedir. Sıfırdan farklı bir matris ile bir vektörün çarpımlarının sıfır olmasının tek yolu, matrisin tersinin bulunmaması diğer bir deyişle tekil bir matris olmasıdır. Bir matrisin tekil olabilmesinin yolu ise determinantın sıfır olmasıdır. Buna göre;

$$|K - \omega_n^2 M| = 0 \quad (1.77)$$

olmalıdır. Burada  $\omega_n^2 = \lambda$  alınırsa (1.77) denklemini,

$$|K - \lambda M| = 0 \quad (1.78)$$

şeklinde bulunur. Burada (1.78) denklemi “Özdeğer Denklemi” veya “Frekans Denklemi” olarak isimlendirilmektedir. (1.78)’deki determinant bulunursa  $\lambda$ 'ya bağlı n. dereceden bir polinom elde edilir.

$$A_n \lambda^n + A_{n-1} \lambda^{n-1} + \dots + A_1 \lambda^1 + A_0 = 0 \quad (1.79)$$

(1.79) denkleminde n yapısal sistemin serbestlik derecesini ifade etmektedir. Bu denklemin çözümünden n tane  $\lambda$  elde edilir. Her bir  $\lambda$ , bir  $\omega^2$ 'ye karşılık gelir. Yani,

$$\left. \begin{array}{l} \lambda_1 = \omega_1^2 \\ \lambda_2 = \omega_2^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \lambda_n = \omega_n^2 \end{array} \right\} \quad (1.80)$$

şeklinindedir. Bu değerlere “Özdeğer”, “Karakteristik Değer” veya “Normal Değer” adı verilir. Buradan, n serbestlik dereceli bir sistemin n tane doğal titreşim frekansına ( $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_n$ ) karşılık gelen n tane bağımsız  $\phi$  vektörünün olduğu söylenebilmektedir. Vektörler, “Doğal Titreşim Modları” veya “Doğal Titreşim Mod Şekilleri” olarak isimlendirilmektedir. Bu vektörler, ayrıca “Öz Vektörler”, “Karakteristik Vektörler” veya “Normal Modlar” olarak bilinmektedir.

(1.79)'da verilen denklemin kökleri gerçek pozitifdir. Sistemin doğal frekanslarının en küçüğü “Temel Frekans” ve bu frekansa karşılık gelen mod şekli “Temel Mod Şekli” olarak ifade edilmektedir.

### 1.13.2. Sayısal Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Günümüzde analitik çözümü zor olan mühendislik yapılarının (karmaşık geometriler, malzeme özellikleri ve sınır koşulları nedeniyle) dinamik etkiler altındaki yapısal davranışları belirlenirken genellikle sayısal hesap yöntemleri tercih edilmektedir. Bu sayısal yöntemlerin başında gelen sonlu eleman yöntemi, yapısal davranışın belirlenmesi

problemine yaklaşık bir çözüm üretebilmektedir. Dinamik karakteristikler, gelişmiş bilgisayar programları kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modellerinin modal (serbest titreşim) analizleri sonucunda elde edilebilmektedir.

Problemin basite indirgenmesi amacıyla, sonlu eleman yöntemi kullanan gelişmiş bilgisayar programları yardımıyla oluşturulan yapı modelleri, sayısal ayrıklaştırma (mesh) yöntemiyle çok küçük parçalara bölünmektedir. Daha sonra her bir parçanın kendi içerisinde çözümü yapılarak tüm yapının davranışı yaklaşık olarak elde edilebilmektedir.

Günümüzde özel ve genel mühendislik uygulamalarına ait problemlerin sonlu eleman yöntemi kullanılarak çözümlenmesine olanak sağlayan birçok program (ABAQUS, ANSYS, SAP2000 vs.) mevcuttur. Bu programlar aracılığıyla mühendislik yapılarının modal, statik, dinamik, doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları belirlenebilmektedir. Bu tez çalışmasında gerçekleştirilen sonlu eleman analizleri için ABAQUS programı kullanılmıştır.

## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR**

### **2.1. Giriş**

Bu tez çalışmasında; yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimlerin farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler göz önünde bulundurularak sayısal olarak incelenmesi amaçlanmaktadır. Betonarme kolonlarda, yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkilerinden dolayı oluşacak dinamik karakteristik değişimlerinin hızlı bir şekilde belirlenmesi, hasar tahminlerinin yapılması ve rijitlik değişimlerine bağlı kullanım durumlarının tespit edilmesi için ABAQUS programı kullanılmıştır. Gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına dayalı olarak hem yaklaşık formülasyon geliştirilmiş hem de grafik/abaklar sunulmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi altında “Yapı Sağlığı İzleme” konusunda yapılan çalışmaların genişletilmesi, bu çalışmalardan elde edilen sonuçlar kullanılarak üretilen formülasyon ve grafik/abakların ilgili yangın yönetmelikleri için veri oluşturması ve yeni çalışmalara ışık tutması çalışmanın hedefleri arasında yer almaktadır. Analizler; yapısal çözümlmeden bağımsız olarak gerçekleştirilen ısı çözümler ve bu ısı çözümlerinin sonuçlarına dayalı olarak gerçekleştirilen serbest titreşim (modal) analizlerinden oluşmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalar, başlıca iki kısımda incelenmiştir.

### **2.2. Isıl Çözümlerinin Doğrulanması**

Tez çalışmasının bu bölümünde, sayısal yöntem kullanılarak gerçekleştirilen ısı çözümlerinden elde edilen sonuçların doğrulanması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da sıcaklık profilleri verilen ve Tablo 1.9’da yer alan yapı elemanlarından, kalınlığı 200 mm olan bir döşeme ve 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip bir kolon eleman sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve bu modeller üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Model seçimlerinden de anlaşılacağı gibi hem bir boyutlu hem de iki boyutlu ısı iletimi problemlerinden elde edilen sonuçların doğrulanması hedeflenmiştir.

Döşeme elemanı üzerinde gerçekleştirilen analizlerde, modelin yalnızca bir yüzeyinden yangına maruz kaldığı dikkate alınmıştır. Dolayısıyla döşeme enkesiti içerisindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için geçici rejim esas alınarak bir boyutlu ısı iletimi problemi çözülmüştür. Yangına maruz kalan döşeme yüzeyindeki sıcaklığın ve döşeme enkesiti içindeki sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi, ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda elde edilmiştir. Sayısal yöntemlerle elde edilen bu sonuçlar, ilgili model için EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Modellenen kolon eleman üzerinde gerçekleştirilen analizlerde ise modelin tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kaldığı dikkate alınmıştır. Bu durumda sıcaklık değişimlerinin, kolon enkesitine paralel olan iki eksen doğrultusunda önemli olduğu göz önünde bulundurularak, kolon enkesitine dik doğrultudaki ısı iletimi ihmal edilmiştir. Dolayısıyla kolon enkesiti içerisindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi için geçici rejim esas alınarak iki boyutlu ısı iletimi problemi çözülmüştür. Bu durumda yapılacak iki veya üç boyutlu bir modelleme, enkesit içindeki sıcaklık dağılımlarını değiştirmeyecektir. Yangına maruz kalan kolon enkesiti içindeki sıcaklık dağılımının zamana bağlı değişimi, ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda elde edilmiştir. Sayısal yöntemlerle elde edilen bu sonuçlar, ilgili kolon modeli için EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri ile karşılaştırılmıştır.

EN 1992-1-2'de (2004), betonarme bir elemanın sıcaklık profili belirlenirken donatı çeliğinin ihmal edilebileceği belirtilmektedir. Bu durum, çeliğin ısı iletkenliğinin betondan çok daha yüksek olmasına ve çelik donatıların yangına maruz kalan yüzeylere paralel olması nedeniyle bu yüzeylere dik doğrultudaki ısı geçişine, dolayısıyla da enkesit içindeki sıcaklık dağılımına etkisinin oldukça az olmasına bağlanmaktadır. Bu durumda, donatı çeliği ile donatıyı çevreleyen betonun eşit sıcaklıkta olduğu varsayımı yapılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, ısı çözümlenmeler için oluşturulan sonlu eleman modellerinde donatı çeliği ihmal edilmiş ve modeller beton kütle olarak dikkate alınmıştır.

### **2.2.1. Isıl Çözümlenmelerde Dikkate Alınan Malzeme Özellikleri**

Seçilen doğrulama modellerinin yüzey sıcaklıkları ve enkesit içindeki sıcaklık dağılımlarının zamana bağlı gösterdiği değişimin sayısal olarak belirlenmesi için, sonlu

eleman yöntemi kullanılmıştır. Sayısal yöntem kullanılarak gerçekleştirilen ısıl çözümlerden elde edilen sonuçlar, analitik yöntemler ve EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen ilgili sıcaklık profilleri ile karşılaştırılmıştır.

ABAQUS programı kullanılarak oluşturulan beton modeller üzerinde, ısı transferi analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için üç adet malzeme özelliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunlar; birim hacim ağırlığı, ısıl iletkenlik katsayısı ve özgül ısı katsayısıdır.

EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan sıcaklık profillerinin, betonun ısıl iletkenliğinin alt sınırı ve ağırlıkça %1.5 nem içeren betonun özgül ısı değeri ile uyumlu olduğu daha önce Bölüm 1.12.3.1'de ifade edilmişti.

Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğruluğunun teyit edilmesi amacıyla, Wickström ve Hertz yöntemleri olmak üzere iki adet analitik çözümlene yöntemine yer verilmiştir. Her iki analitik ısıl çözümlene yöntemi de ısıl yayılım katsayısı değerine ihtiyaç duymaktadır. EN 1992-1-2'de (2004) bu katsayıya dair herhangi bir bilgilendirme bulunmazken, EN 1993-1-2'de (2005) ise basitleştirilmiş hesaplama yöntemlerinde kullanılmak üzere betonun ısıl iletkenlik ve özgül ısı katsayısı için sıcaklığa bağlı değişim göstermeyen sabit değerlerin dikkate alınabileceği ifade edilmiştir. Bu değerler; ısıl iletkenlik katsayısı için 1.6 W/mK, özgül ısı katsayısı için 1000 J/kg°C'dir. Betonun özgül ağırlığının 2400 kg/m<sup>3</sup> olarak dikkate alınması durumunda, ilgili değerler denklem (1.53)'te yerine yazılır ve ısıl yayılım katsayısı,

$$\alpha_c = \frac{\lambda_c}{\rho_c c_c} = \frac{1.6}{1000 \times 2400} = 0.67 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

olarak elde edilir. Hertz (1981) tarafından yapılan çalışmada, kuvars esaslı agregaya içeren beton için ısıl yayılım katsayısının  $0.52 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olduğu belirtilmiştir. Wickström (1986) tarafından yapılan çalışmada ise normal ağırlıklı beton için ısıl yayılım katsayısı  $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak önerilmektedir. Dolayısıyla, silis kökenli agregaya içeren betonlar için ısıl yayılım katsayısının  $0.417 \times 10^{-6}$  ile  $0.67 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  değerleri arasında değişim gösterdiği söylenebilir.

Sayısal yöntem kullanılarak yapılan ısıl çözümler, bu malzeme özelliklerinin sabit bir değer almayıp, sıcaklığa bağlı olarak değişim gösterdiği durum için gerçekleştirilmiştir. Sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların, sıcaklık profilleri ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması açısından

ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, diğer yöntemler ile uyumlu malzeme özelliklerinin kullanımına özen gösterilmiştir. Oda koşullarındaki birim hacim ağırlığı  $2400 \text{ kg/m}^3$  olan beton için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, betonun ısı iletkenlik katsayısının alt sınırına ait doğrusal olmayan davranış dikkate alınmıştır. Ayrıca, ağırlıkça %1.5 nem içeren betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimine ait davranış modelleri kullanılmıştır. Beton malzeme özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişimi, Bölüm 1.11.1’de detaylı olarak verilmiştir.

### 2.2.2. 500°C’lik Eş Sıcaklık Eğrisi Derinliğinin Belirlenmesi

Bölüm 1.10.5.2’de ifade edildiği gibi, EN 1992-1-2 (2004) Ek B’de yangın dayanımının belirlenmesinde azaltılmış kesit alanını esas alan iki yöntem sunulmaktadır. Bu yöntemlerden biri 500°C eş sıcaklık yöntemidir. Basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi olarak kabul edilen bu yöntemde, eleman enkesiti içindeki sıcaklığın 500°C’yi aştığı bölgelerde betonun dayanımını tamamen kaybettiği ve elemanın yük taşıma kapasitesine katkıda bulunmadığı varsayılmaktadır. Sıcaklığın 500°C’nin altında kaldığı bölgelerde ise betonun normal sıcaklıktaki dayanımını koruduğu kabul edilmektedir. Dolayısıyla, bu yöntem kullanılarak yapılacak hesaplamalarda 500°C’lik eş sıcaklık eğrisinin, yangına maruz kalan elemanın dış yüzeyine olan mesafesi bilinmesi gerekmektedir.

Bazı yapı elemanları için EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da sunulan sıcaklık profillerinden, belirli yangına maruz kalma sürelerine ait 500°C’lik eş sıcaklık eğrisi derinlikleri (mm) okunabilir. Bu derinlik değerleri, analitik yöntemler kullanılarak ta belirlenebilmektedir.

Wickström yöntemi kullanılarak, bir doğrultuda gerçekleşen ısı iletimi için beton dış yüzeyinden herhangi bir  $x$ (m) mesafesindeki beton sıcaklık artışı  $\Delta\theta_c$  elde edilebilmektedir. Bu denklem,

$$\Delta\theta_c = \left[ 0.18 \ln \left( \frac{\alpha_c t}{x^2} \right) - 0.81 \right] (1 - 0.0616t^{-0.88}) \Delta\theta_g \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Denklem (2.1)’de yer alan  $\alpha_c$  referans ısı yayılım katsayısı normal ağırlıklı beton için  $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  olarak önerilmektedir (Wickström, 1986).

Burada;  $\alpha$  betonun ısı yayılım katsayısını,  $t$  zamanı (saat),  $\Delta\theta_g$  ortamdaki mevcut gaz sıcaklığına ek olarak ortamda bulunan gaz sıcaklığının değişimini,  $x$  (m) ise yangına maruz kalan beton dış yüzeyine olan mesafeyi göstermektedir.

Denklem (2.1)'de yer alan  $x$  bilinmeyeni yalnız bırakılıp normal koşullardaki beton sıcaklığının  $20^\circ\text{C}$  olduğu düşünülürse;  $\Delta\theta_x = 480^\circ\text{C}$  olarak dikkate alınarak yapılacak hesaplama sonucunda, bir boyutlu ısı iletimi için  $500^\circ\text{C}$ 'lik eş sıcaklık eğrisine ait mesafe belirlenebilir. Bu mesafe,  $x_{500}$  sembolü ile ifade edilmektedir.

$$x_{500} = \left[ \frac{\frac{\alpha}{0.417 \times 10^{-6} t}}{4.5 + \frac{\Delta\theta_x}{0.18 \eta_w \Delta\theta_g}} \right]^{0.5} \quad (2.2)$$

Model seçimlerinden de anlaşılacağı gibi hem bir boyutlu hem de iki boyutlu ısı iletimi problemlerinden elde edilen sonuçların doğrulanmasına özen gösterilmiştir. ABAQUS programı yardımıyla seçilen doğrulama modelleri üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda, model enkesitleri içindeki sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. İlgili modeller için yangına maruz kalma sürelerine ait  $500^\circ\text{C}$ 'lik eş sıcaklık eğrisi derinlikleri belirlenmiştir.

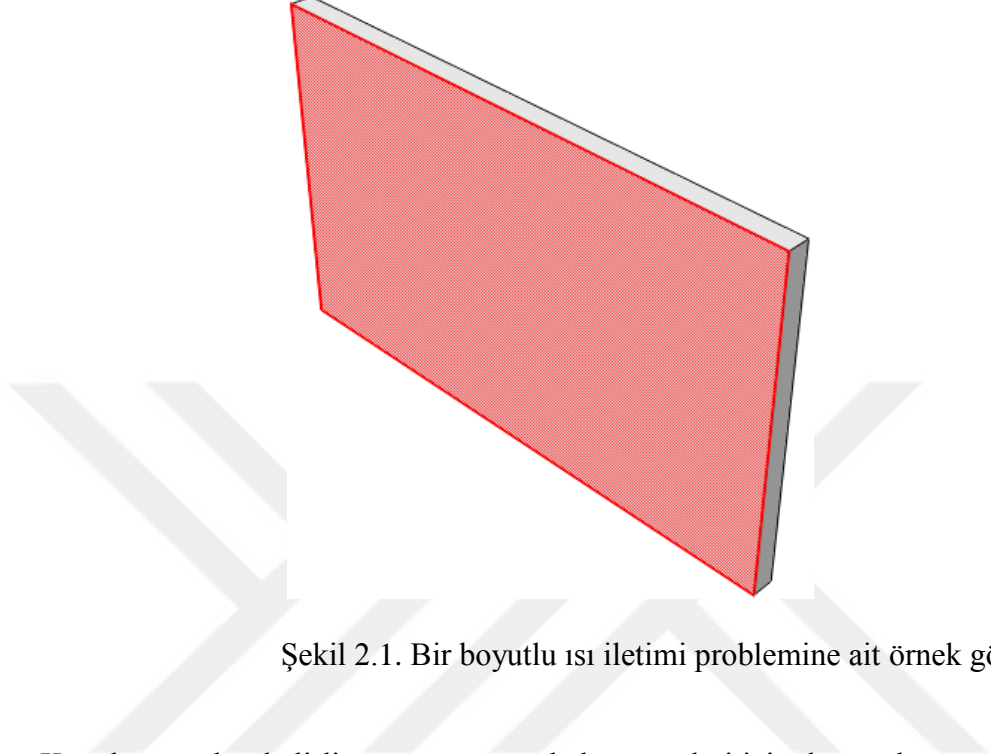
### 2.2.3. Geçici Rejimde Bir Boyutlu Isı İletimi Probleminin Doğrulanması

Geçici rejimde bir boyutlu ısı iletimi probleminin çözümlenmesi için, yangına yalnızca bir yüzeyinden maruz kalan 200 mm kalınlığındaki beton döşeme modeli seçilmiştir. Yangına yalnızca bir yüzeyinden maruz kalan beton duvarlar da bir boyutlu ısı iletimi problemine örnek gösterilebilir (Şekil 2.1).

Beton döşeme, ABAQUS sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve bu model üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuçlar, ilgili model için EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Tüm ısı çözümlenme yöntemleri ile uyumlu olması nedeniyle,



gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde kullanılmak üzere seçilen yangın modeli, temsili bir yangın modeli olan ISO 834 standart sıcaklık-zaman eğrisidir.



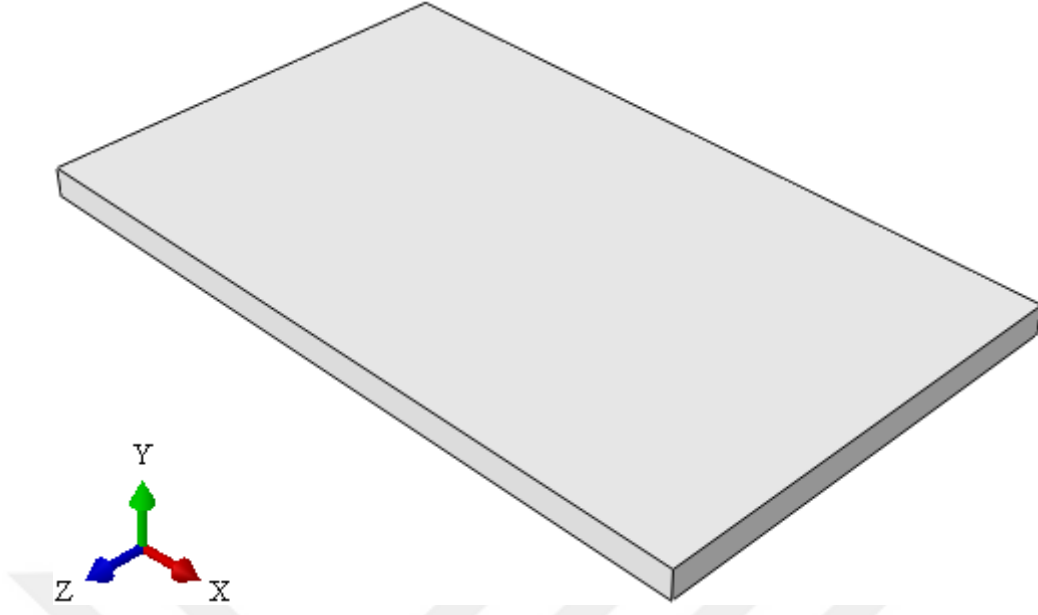
Şekil 2.1. Bir boyutlu ısı iletimi problemine ait örnek görsel

Karşılaştırmalar, belirli yangına maruz kalma süreleri için, beton döşemenin yangına maruz kalan yüzeyindeki sıcaklığın ve 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi derinliğinin (mm) zamana bağlı değişimi dikkate alınarak yapılmıştır.

### **2.2.3.1. Yangına Yalnızca Bir Yüzeyinden Maruz Kalan Beton Döşemenin Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması**

Beton döşeme modelinin sonlu eleman modeli ABAQUS programında oluşturulmuştur. Donatısız betonu modellemek için, program kütüphanesinde bulunan DC3D8 hacimsel eleman kullanılmıştır. Bu eleman ısı transferi analizlerinde kullanılan üç boyutlu katı bir elemandır. Sekiz düğüm noktasına ve her düğüm noktasında bir adet serbestlik derecesine sahiptir.

Oluşturulan beton döşeme modeline ait geometrik ölçüler 500x300x20 cm'dir. Verilen bu ölçülerden ilk ikisi, döşeme modelinin uzun ve kısa kenar uzunluğunu, üçüncüsü ise döşeme kalınlığını göstermektedir. Beton döşeme için oluşturulan katı model Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Beton döşeme modeli ( $h_f = 20$  cm )

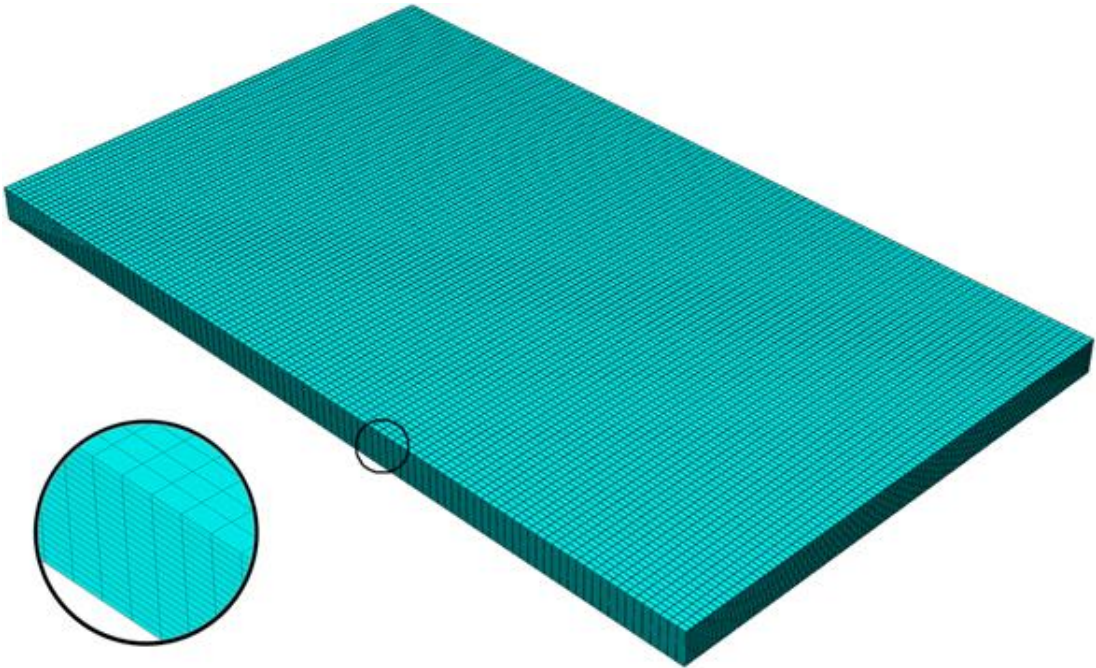
Isıl çözümlene için beton döşeme modelinin sonlu eleman modeline ait malzeme özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Önceden de belirtildiği gibi ısı transferi analizlerinin gerçekleştirilebilmesi için; birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik katsayısı ve özgül ısı katsayısı olmak üzere üç adet malzeme özelliğine ihtiyaç duyulmaktadır. Oda koşullarındaki birim hacim ağırlığı  $2400 \text{ kg/m}^3$  olan beton için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, beton malzeme özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişim hesaba katılmıştır. Analizlerde, betonun ısı iletkenlik katsayısının alt sınırının doğrusal olmayan davranışı ve ağırlıkça %1.5 nem içeren betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimine ait davranış modelleri kullanılmıştır. Bu üç malzeme özelliğinin, belirli sıcaklık değerlerine karşılık gelen değerlerinin programa tanıtılmasında, beton için Bölüm 1.11.1’de verilen ilgili malzeme özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişimine ait denklemlerden yararlanılmıştır. Beton döşeme modeline ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin, belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri Tablo 2.1’de verilmiştir.

Problemin basite indirgenmesi amacıyla, oluşturulan beton döşeme modeli sayısal ayrıklaştırma (mesh) yöntemiyle  $50 \times 10 \times 30$  mm boyutlarında sonlu elemanlara ayrılmıştır. Daha sonra yapılan ısı çözümlene ile sonlu elemanlara ait bütün düğüm noktalarındaki sıcaklıkların zamana bağlı değişimleri, dolayısıyla da yangına maruz kalma süreleri için

modeldeki sıcaklık dağılımları yaklaşık olarak elde edilmiştir. Beton döşeme modeline ait sonlu eleman modeli Şekil 2.3'te verilmektedir.

Tablo 2.1. Döşemeye ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri

Sıcaklık (°C)	Malzeme Özellikleri		
	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Özgül Isı Katsayısı (J/kgK)
0	2400	1.360	900
20	2400	1.333	900
100	2400	1.230	900
115	2400	1.211	1470
200	2352	1.111	1470
300	2316	1.003	1000
400	2280	0.907	1050
500	2259	0.823	1100
600	2238	0.749	1100
700	2217	0.687	1100
800	2196	0.637	1100
900	2175	0.598	1100
1000	2154	0.570	1100
1100	2133	0.554	1100
1200	2112	0.549	1100



Şekil 2.3. Beton döşeme modeline ait sonlu eleman modeli

Model kesiti içindeki sıcaklık dağılımları, geçici rejimde bir boyutlu ısı iletimi probleminin çözümü sonucunda elde edilmiştir. Problemin çözümü, model sınırlarını oluşturan yüzeylere ait ısı koşullarına bağlıdır. Oluşturulan beton döşeme modelinin başlangıç sıcaklığı oda sıcaklığına (20°C) eşit olarak tanımlanmıştır. Model yangına yalnızca bir yüzeyinden maruz kalmaktadır. Isıl çözümlemede kullanılan yangın modeli, temsili bir sıcaklık-zaman ilişkisi olan ISO 834 standart yangın eğrisidir. Bu sıcaklık-zaman ilişkisi, denklem (1.6)'dan yararlanılarak programa tanımlanmıştır. Isı transferi analizleri, standart yangın eğrisinin üç saatlik dilimi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yangına maruz kalan yüzey tabakası taşınım ve ışınım yoluyla ısınmaktadır. Bu ısı enerjisi, yüksek sıcaklıklardaki dış yüzey tabakasından model kesiti içinde bulunan ve daha düşük sıcaklıklara sahip bölgelere iletim yoluyla aktarılmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinde; taşınım, ışınım ve iletimle ısı transferi mekanizmalarının tümü hesaba katılmıştır. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısına ait değer, seçilen tasarım yangınına bağlıdır (EN 1991-1-2, 2002). Bu katsayının çeşitli tasarım yangınlarına ait değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir. Bu çalışmada gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin tamamında ISO 834 standart yangın eğrisinin dikkate alınması nedeniyle, ısı transferi katsayısı 25 W/m<sup>2</sup>K olarak alınmıştır. Standart sıcaklık-zaman eğrilerinin dikkate alındığı durumlarda sıcaklığa maruz kalmayan yüzeylere ait ısı transferi katsayısı değeri 4 W/m<sup>2</sup>K olarak alınabilir. Taşınım ile gerçekleşen ısı transferinin, ışınım ile oluşan etkileri kapsadığının kabul edildiği durumlarda ise bu değer 9 W/m<sup>2</sup>K olarak alınabilir (EN 1991-1-2, 2002).

Tablo 2.2. Çeşitli tasarım yangın modellerinde kullanılan taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayılarına ait değerler (EN 1991-1-2, 2002).

Yangın Modeli	Taşınım ile Gerçekleşen Isı Transferi Katsayısı $\alpha_c$ (W/m <sup>2</sup> K)
Standart Yangınlar	25
Harici Yangınlar	25
Hidrokarbon Yangınları	50
Parametrik Yangınlar	35

Analizlerde, model yüzeyine ışınlama gerçekleşen net ısı akısının tanımlanması için yüzey yayıcılığı katsayısına ihtiyaç duyulmaktadır. Bazı yüzey malzemelerinin ısı yayıcılığı değerleri Tablo 2.3'te verilmiştir. Bu çalışmada, üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirmek için oluşturulan tüm modeller beton malzeme özelliklerine sahiptir. Dolayısıyla beton döşeme modeli yüzeyinin ısı yayıcılığı  $\varepsilon_m = 0.7$  olarak dikkate alınmıştır.

İletim ve taşınım ile ısı geçişi hesabında yer alan sıcaklıklar, °C veya K biriminde ifade edilebilirken, ışınlama ısı geçişi hesaplarında sıcaklık K olarak ifade edilmelidir. Bu durum ışınlama gerçekleşen net ısı akısının belirlenmesinde kullanılan formülasyondan kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla analizlerde ışınlama etkilerinin dikkate alınması durumunda, programa mutlak sıfır sıcaklığı (-273.15°C) ve Stephan Boltzmann sabiti tanımlanmalıdır. Bu sabit  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 'dir.

Tablo 2.3. Eurocode'a göre bazı malzeme yüzeylerinin ısı yayıcılığı

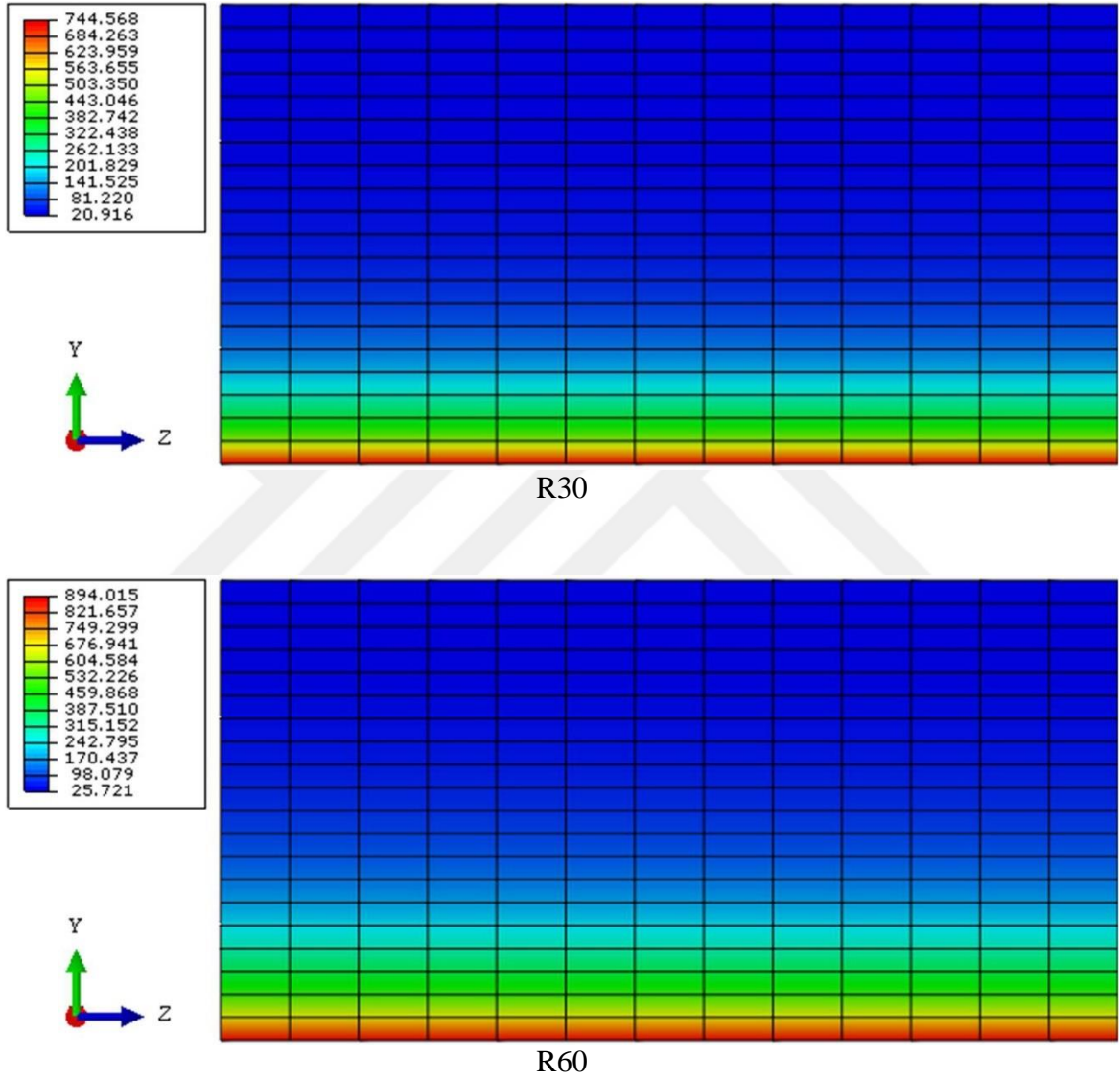
Malzeme	Yüzey Isı Yayıcılığı $\varepsilon_m$	Kaynak
Beton	0.7	EN 1992-1-2
Karbon Çeliği	0.7	EN 1993-1-2
Paslanmaz Çelik	0.4	EN 1993-1-2
Diğer	0.8	EN 1991-1-2

### 2.2.3.2. Döşeme Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Isıl Çözümlemeler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Sonlu eleman analizi kullanılarak, yangına yalnızca bir yüzeyinden maruz kalan beton döşeme modeli üzerinde gerçekleştirilen geçici rejimdeki ısı transferi analizleri 3 saatlik yangın süresi boyunca 15'er dakikalık zaman aralıkları ile toplam 12 adımda çözümlenmiştir. Her bir adım için gerçekleştirilen çözümler sonucunda, sonlu eleman modeli üzerinde bulunan düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri ve model içinde oluşan sıcaklık dağılımları yaklaşık olarak elde edilmiştir.

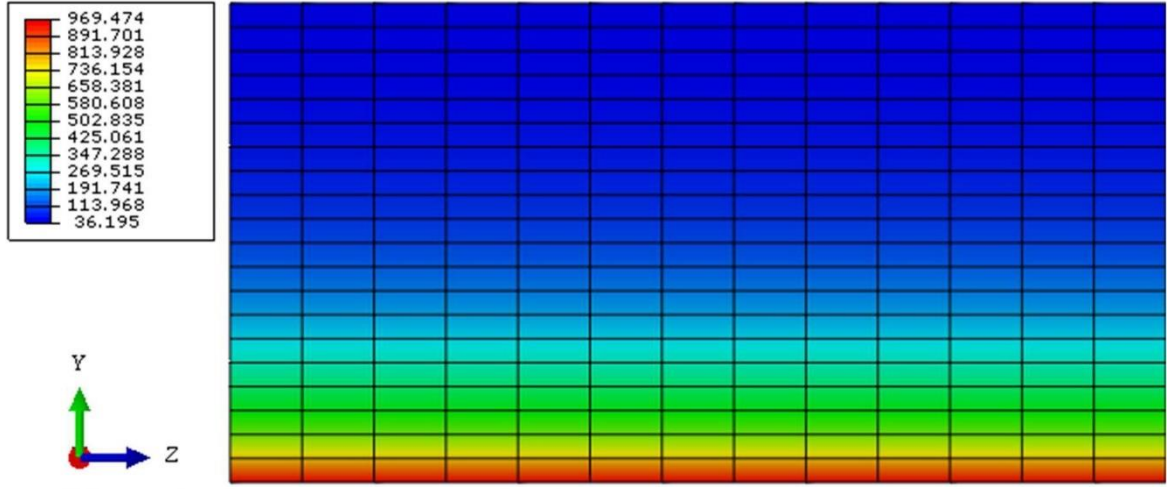
Beton döşeme modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda; model kesiti içinde 30, 60, 90, 120 ve 180 dakika sonunda oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 2.4'te verilmiştir. Yangına maruz kalan yüzeyin

bulunduğu X-Z düzlemi boyunca, aynı derinlikte bulunan düğüm noktalarının eşit sıcaklık değerleri alması ve sıcaklık dağılımlarının daha net bir şekilde görülebilmesi için, sayısal yöntemle elde edilen sonuçların, modelin bir parçası üzerinden gösterilmesi uygun görülmüştür.

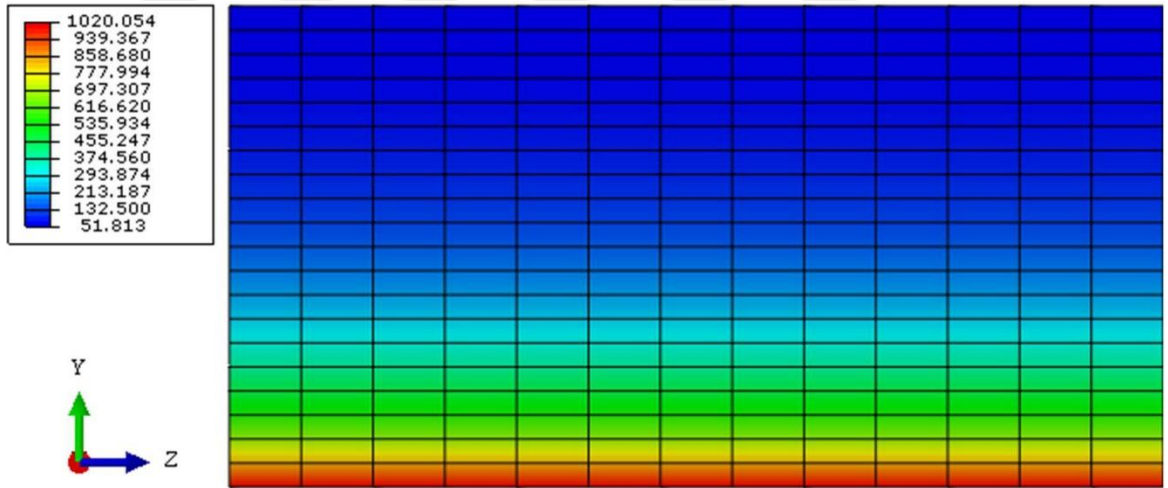


Şekil 2.4. 200 mm kalınlığındaki beton döşeme modelinin, ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda, model kesiti içinde oluşan sıcaklık dağılımları

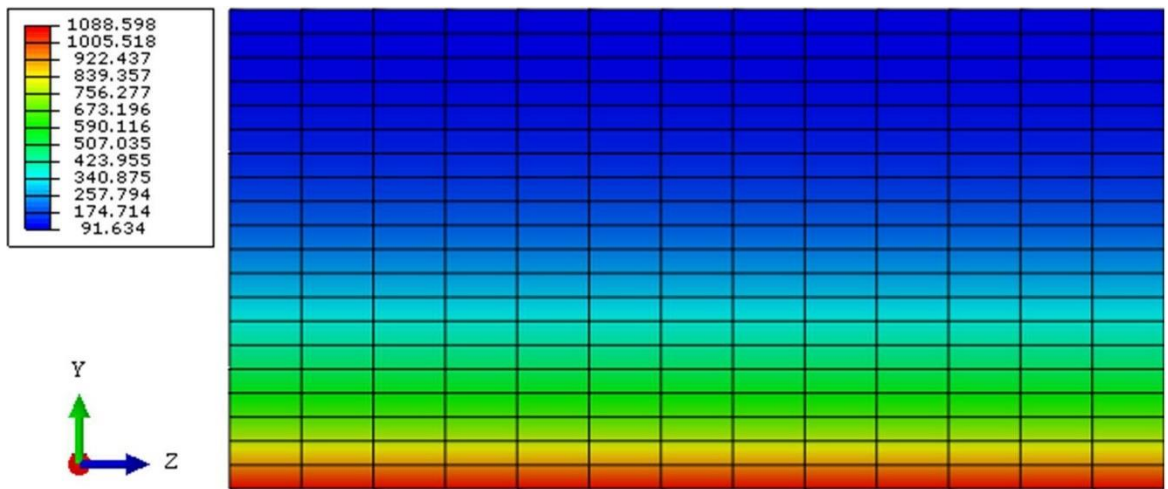
Şekil 2.4'ün devamı



R90



R120



R180

Sayısal yöntem kullanılarak elde edilen beton döşeme modeline ait sonuçlar, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da bulunan ilgili sıcaklık profilleri ve analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. 30, 60, 90, 120 ve 180 dakikalık sıcaklığa maruz kalma süreleri için, ilgili modelin yangın etkisindeki yüzey sıcaklıklarının belirlenmesinde; sayısal yöntem, sıcaklık profilleri ve Wickström ve Hertz analitik yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler yardımıyla elde edilen sonuçlar Tablo 2.4'te verilmiştir. ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirilen ısı çözümlerinden elde edilen sonuçlarla diğer yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki yüzdesel fark Tablo 2.5'te sunulmaktadır.

Tablo 2.4. Beton döşeme modelinin çeşitli ısı çözümlerinden elde edilen yangına maruz kalan yüzeyindeki sıcaklık değerleri

Yangına Maruz Kalma Süresi (dakika)	ISO 834 (°C)	Yangına Maruz Kalan Yüzey Sıcaklıkları (°C)			
		Wickström	Hertz	EN 1992-1-2	ABAQUS
30	842	746	770	740	745
60	945	887	840	880	894
90	1006	963	930	950	969
120	1049	1014	980	1010	1020
180	1110	1084	1030	1080	1089

Tablo 2.5. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçların diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

Yangına Maruz Kalma Süresi (dakika)	Fark (%)		
	Wickström	Hertz	EN 1992-1-2
30	-0.13	-3.25	+0.68
60	+0.79	+6.43	+1.59
90	+0.62	+4.19	+2.00
120	+0.59	+4.08	+0.99
180	+0.46	+5.73	+0.83

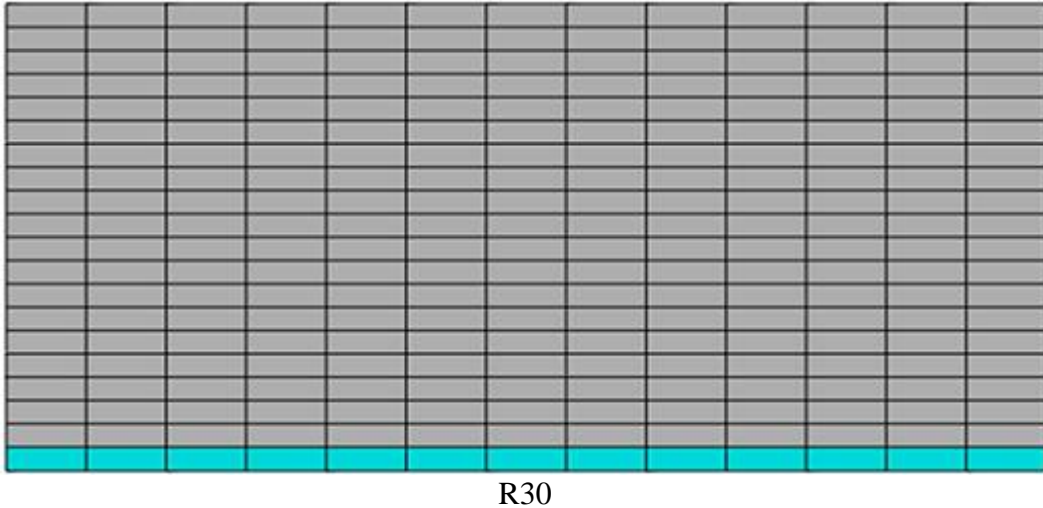
Tablo 2.4'ten görüldüğü gibi, zamanla artan ortam sıcaklığı ile birlikte bu sıcaklığa maruz kalan döşeme yüzeyindeki sıcaklık değerleri, tüm ısı çözümlerinde artış göstermektedir. Tablo 2.4 ve 2.5 incelendiğinde, ABAQUS programı yardımıyla



gerçekleştirilen ısı çözümlenmelerden elde edilen sonuçların, diğer yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla benzerlik gösterdiği görülmektedir. Sonuçlar arasındaki yüzdesel farklılıklar değerlendirildiğinde, en düşük fark Wickström yöntemi ile gerçekleştirilen ısı çözümlenmelerde, en yüksek fark ise Hertz yöntemi ile gerçekleştirilen ısı çözümlenmelerde ortaya çıkmıştır. EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan ve deneysel çalışmalara dayalı olarak belirlenen sonuçların da sayısal çözümlenmelerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu olması, ABAQUS modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğruluğunun teyit edilmesi noktasında belirleyici olmuştur. Analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar kendi içinde değerlendirildiğinde, Wickström yönteminin Hertz yöntemine kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

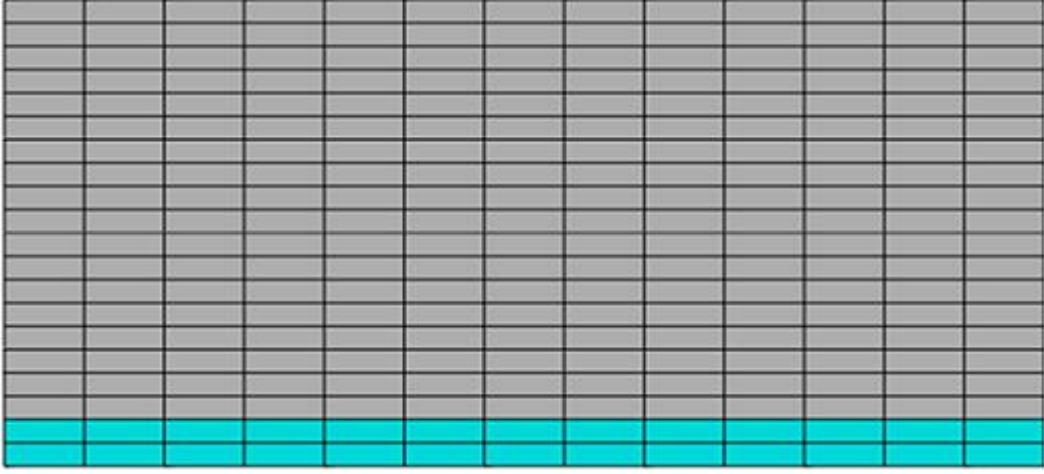
Diğer karşılaştırma ise döşeme modelinin yangına maruz kalma sürelerine ait 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi derinlikleri için yapılmıştır.

Beton döşeme modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda; 30, 60, 90, 120 ve 180 dakika sonunda model kesiti içindeki 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait derinlikler Şekil 2.5'te verilmiştir. Elde edilen sonuçların gösteriminde, farklı renkler ile temsil edilen iki ayrı bölge oluşturulmuştur. Bu iki bölgeyi ayıran sınır 500°C'lik eş sıcaklık eğrisini ifade etmektedir. Bu sınırın altında kalan bölgede 500°C'den daha büyük sıcaklık değerleri, üstünde kalan bölgede ise 500°C'den daha küçük sıcaklık değerleri yer almaktadır.

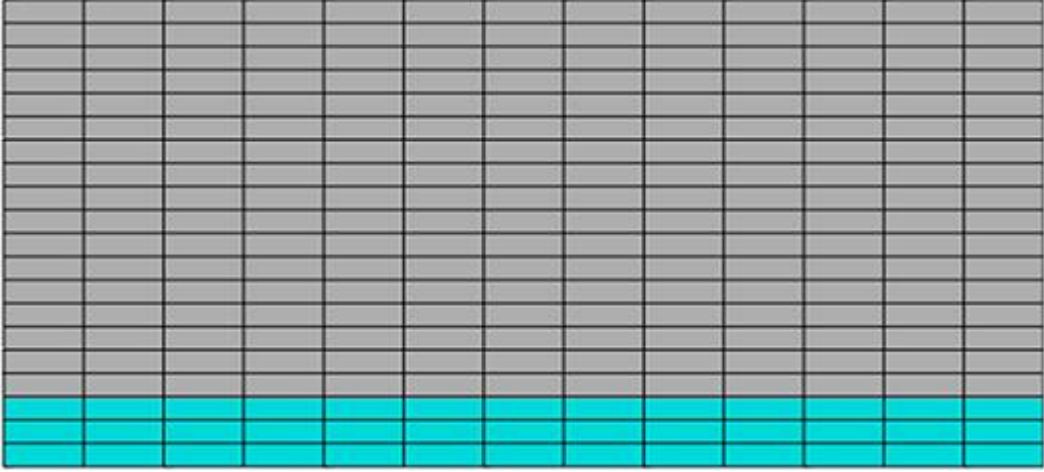


Şekil 2.5. 200 mm kalınlığındaki beton döşeme modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine yalnızca bir yüzeyinden maruz kalması durumunda, model kesiti içindeki 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait derinlikler

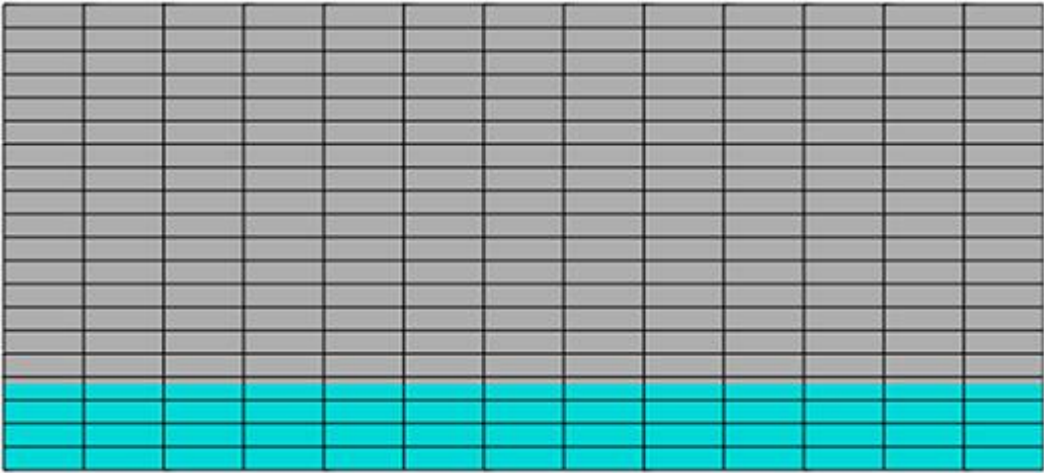
Şekil 2.5'in devamı



R60

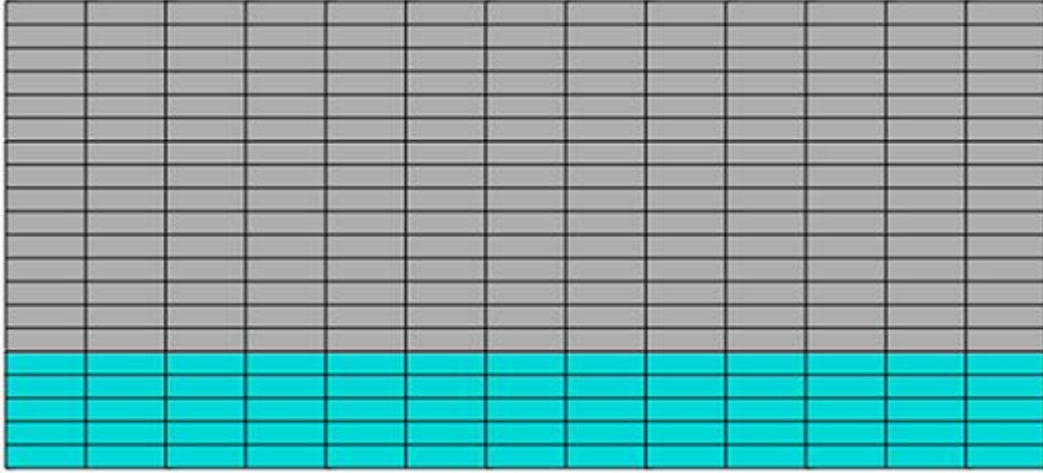


R90



R120

Şekil 2.5'in devamı



R180

Döşeme modeli üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait derinlikler, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen ilgili sıcaklık profilleri ve Wickström yöntemi ile analitik olarak elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Wickström yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen analitik çözümler ısı yayılım katsayısına ihtiyaç duymaktadır. Bölüm 2.2.1'de ifade edildiği gibi, silis kökenli agrega içeren betonlar için ısı yayılım katsayısı  $0.417 \times 10^{-6}$  ile  $0.67 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s değerleri arasında değişim göstermektedir. Wickström yöntemi ile döşeme modeline ait 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi derinlikleri analitik olarak belirlenirken, hesaplamalarda  $0.417 \times 10^{-6}$ ,  $0.52 \times 10^{-6}$  ve  $0.67 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s olmak üzere üç farklı ısı yayılım katsayısı dikkate alınmış ve üç farklı çözümler gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem ile yapılan hesaplamalarda başlangıç beton sıcaklığı 20°C olarak dikkate alınmıştır. Yangına maruz kalma süreleri için betonda 480°C'lik sıcaklık artışının olduğu mesafe belirlenmiştir.

Döşeme modeli üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen 500°C'lik eş sıcaklık eğrisi derinliklerine ait mesafeler, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da bulunan ilgili sıcaklık profilleri üzerinden okunan değerler ve üç farklı ısı yayılım katsayısı değeri için Wickström yöntemi kullanılarak yapılan çözümlerden elde edilen sonuçlar 30, 60, 90, 120 ve 180 dakikalık süreler için Tablo 2.6'da verilmiştir. Isıl çözümler yöntemleri ile birlikte 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin derinliklerine ait mesafelerin belirlenmesinde, dikkate alınan malzeme özellikleri önemli bir rol oynadığı açıktır. Çözümlerlerde betonun ısı yayılım katsayısını belirleyen malzeme özelliklerinden; birim hacim ağırlık,

ısı iletkenlik ve özgül ısı kapasitesi dikkate alınmıştır. Wickström yöntemi kullanılarak yapılan ısı çözümleme sonuçlarının belirlenmesinde, sabit ısı yayınım katsayısı değerleri kullanılmıştır. Diğer yöntemler kullanılarak yapılan ısı çözümleme sonuçları ise artan sıcaklık ile birlikte değişen ısı yayınım katsayısı dikkate alınarak elde edilmiştir. Gerçekleştirilen ısı çözümlemelerden elde edilen sonuçlarla, diğer yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlar arasındaki yüzdesel farklar Tablo 2.7’de verilmiştir.

Tablo 2.6. Yangına maruz kalma süresine bağlı olarak çeşitli ısı çözümleme yöntemleri kullanılarak elde edilen ve beton döşeme modeli kesiti içinde oluşan 500°C’lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan yüzeye olan mesafesi (mm)

Yangına Maruz Kalma Süresi (dakika)	Wickström			EN 1992-1-2	ABAQUS
	Isıl Yayınım Katsayısı ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )				
	0.417	0.52	0.67		
30	12	13	15	10	10
60	23	25	29	21	21
90	31	35	40	30	29
120	39	44	49	37	36.5
180	52	58	66	48	48.5

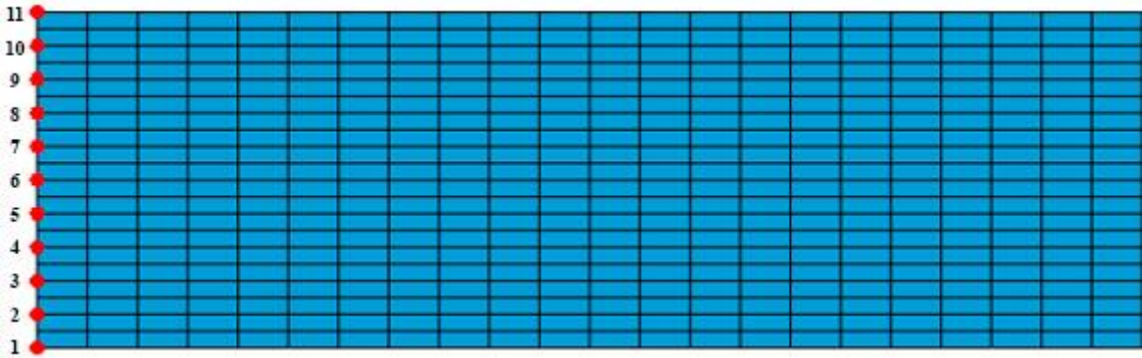
Tablo 2.7. Sayısal yöntemle elde edilen sonuçların diğer yöntemler ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması

Yangına Maruz Kalma Süresi (dakika)	Fark (%)			
	Wickström			EN 1992-1-2
	Isıl Yayınım Katsayısı ( $\times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ )			
0.417	0.52	0.67		
30	-16.67	-23.08	-33.33	0.00
60	-8.70	-16.00	-27.59	0.00
90	-6.45	-17.14	-27.50	-3.33
120	-6.41	-17.05	-25.51	-1.35
180	-6.73	-16.38	-26.52	+1.04

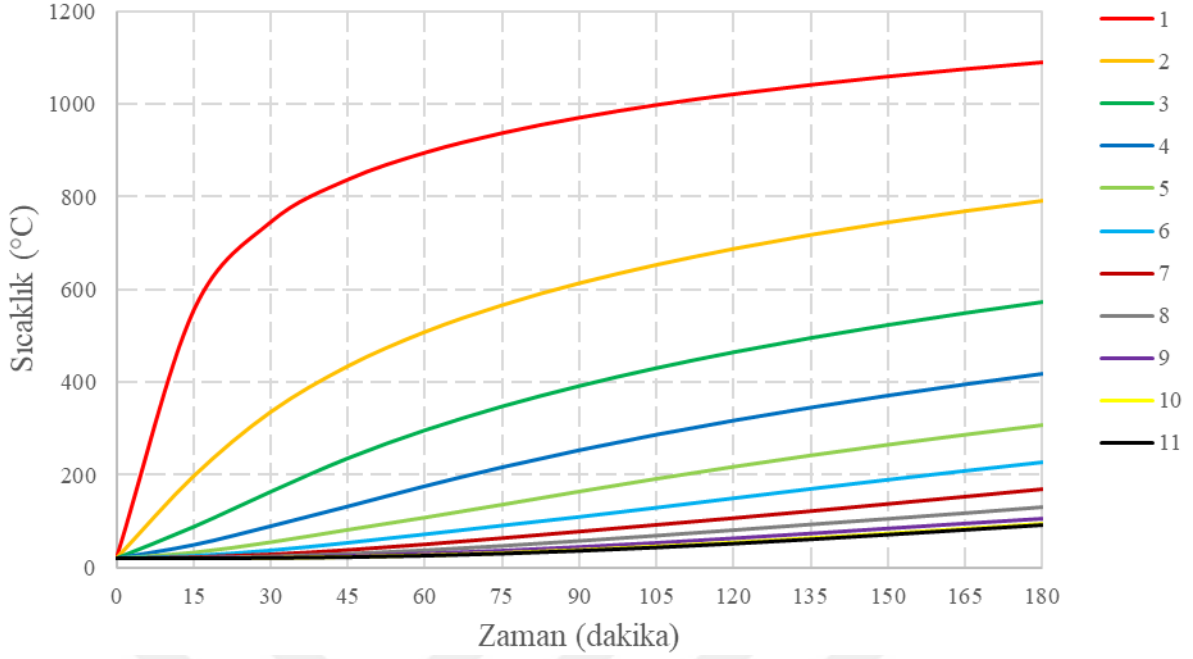
Tablo 2.6’den görüldüğü gibi yangına maruz kalma süresindeki artış ile birlikte 500°C’lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan döşeme yüzeyine olan mesafeleri tüm ısı çözümleme yöntemlerinde artış göstermektedir. Tablo 2.6 incelendiğinde, program yardımıyla gerçekleştirilen ısı çözümlemelerden elde edilen sonuçların, EN 1992-1-2

(2004) Ek A'da yer alan ilgili sıcaklık profillerinden okunan değerler ile neredeyse aynı olduğu ve Wickström (1986) tarafından normal ağırlıklı betonlar için sunulan  $0.417 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s referans ısı yayılım katsayısı değeri kullanılarak elde edilen analitik çözümleme sonuçları ile oldukça benzerlik gösterdiği görülmektedir. EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan ve deneysel çalışmalara dayalı olarak oluşturulan ilgili modele ait sıcaklık profillerinden elde edilen sonuçların değişken malzeme özellikleri ve dolayısıyla da değişken ısı yayılım katsayısı değerlerinin dikkate alındığı sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu olması sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğruluğunun teyit edilmesi noktasında belirleyici olmuştur. Ayrıca Wickström analitik yöntemi kullanılarak elde edilen sonuçlar kendi içinde değerlendirildiğinde, aynı maruz kalma süreleri için, ısı yayılım katsayısının artması ile birlikte kesit içindeki 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait mesafelerin de arttığı görülmektedir. Bu değerdeki artış ısı geçiş hızını da artırmaktadır. Kesit içinde bulunan belirli bir noktadaki sıcaklık değeri, aynı maruz kalma süresinin dikkate alındığı ve ısı yayılım katsayısının yüksek olduğu durumlarda, bu değer düşük olduğu durumlara kıyasla daha büyük değerler aldığı söylenebilir.

Bir boyutlu ısı iletimi probleminden elde edilen sonuçların diğer yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması sonrasında, sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analiz sonuçlarının doğruluğu teyit edilmiştir. Şekil 2.6'da beton döşemenin sonlu eleman modeli üzerinden seçilen ve farklı derinliklerde bulunan bazı düğüm noktaları gösterilmiştir. Yangına maruz kalma süresi boyunca, bu düğüm noktalarına ait sıcaklık gelişimleri Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.6. Beton döşemenin sonlu eleman modeli üzerinden seçilen düğüm noktaları



Şekil 2.7. Yangına maruz kalma süresi boyunca, Şekil 2.6’da verilen düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri

#### 2.2.4. Geçici Rejimde İki Boyutlu Isı İletimi Probleminin Doğrulanması

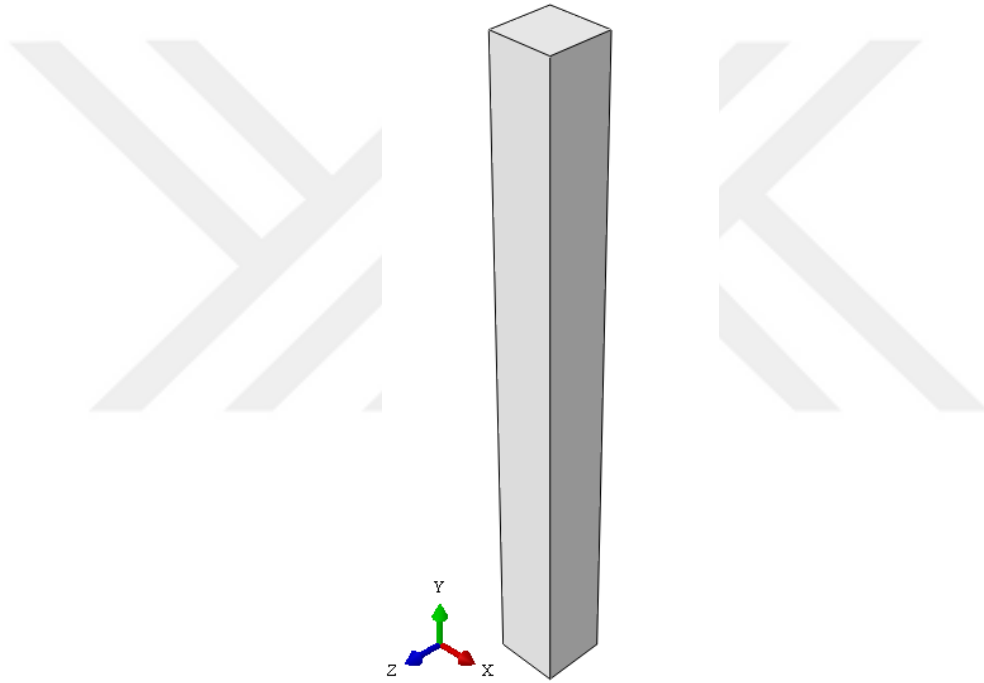
Geçici rejimde iki boyutlu ısı iletimi probleminin çözümlenmesi için, tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit ölçülerine sahip beton kolon modeli seçilmiştir.

Beton kolon, aynı sonlu eleman programı yardımıyla modellenmiş ve bu model üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuçlar, ilgili model için EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da verilen sıcaklık profilleri ile karşılaştırılmıştır. EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da verilen sıcaklık profilleri, ISO 834 standart yangın eğrisine maruz kalan ve silis kökenli agrega içeren beton eleman enkesitlerinde oluşan sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinde kullanılabilir. Bu nedenle gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde ISO 834 standart sıcaklık-zaman eğrisine maruz kalma durumu dikkate alınmıştır.

Karşılaştırmalar, yangına maruz kalma süreleri için beton kolon enkesiti içindeki sıcaklık dağılımları belirlendikten sonra belirlenen 500°C’lik eş sıcaklık eğrilerinin konumu üzerinden yapılmıştır.

### 2.2.4.1. Tüm Yan Yüzeylerinden Yangına Maruz Kalan Beton Kolonun Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Beton kolon modelinin sonlu eleman modeli aynı sonlu eleman programında oluşturulmuştur. Oluşturulan beton kolon modeli 300x300 mm en kesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahiptir. Donatısız betonu modellemek için beton döşeme modeli örneğinde olduğu gibi program kütüphanesinde bulunan ve ısı transferi analizlerinde kullanılan DC3D8 hacimsel eleman kullanılmıştır. Beton kolon için oluşturulan katı model Şekil 2.8’de gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Beton kolon modeli (300x300 mm)

Isıl çözümleme için beton kolonun sonlu eleman modeline ait malzeme özelliklerinin programa tanıtılması gerekmektedir. Program yardımıyla beton kolon modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde; birim hacim ağırlık, ısı iletkenlik katsayısı ve özgül ısı katsayısı olmak üzere üç adet malzeme özelliği dikkate alınmıştır. Bölüm 1.11.1’de verilen beton malzeme özelliklerinin yüksek sıcaklıkla değişimine ait denklemler kullanılarak, ısı transferi analizleri için tüm malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişimler hesaba katılmıştır. Beton kolon modeli için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde, beton döşemeye ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme

özelliklerinden (Tablo 2.1) farklı olarak, betonun oda koşullarındaki birim hacim ağırlığı  $2300 \text{ kg/m}^3$  olarak dikkate alınmıştır. Beton kolona ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri Tablo 2.8’de verilmiştir.

Tablo 2.8. Beton kolona ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri

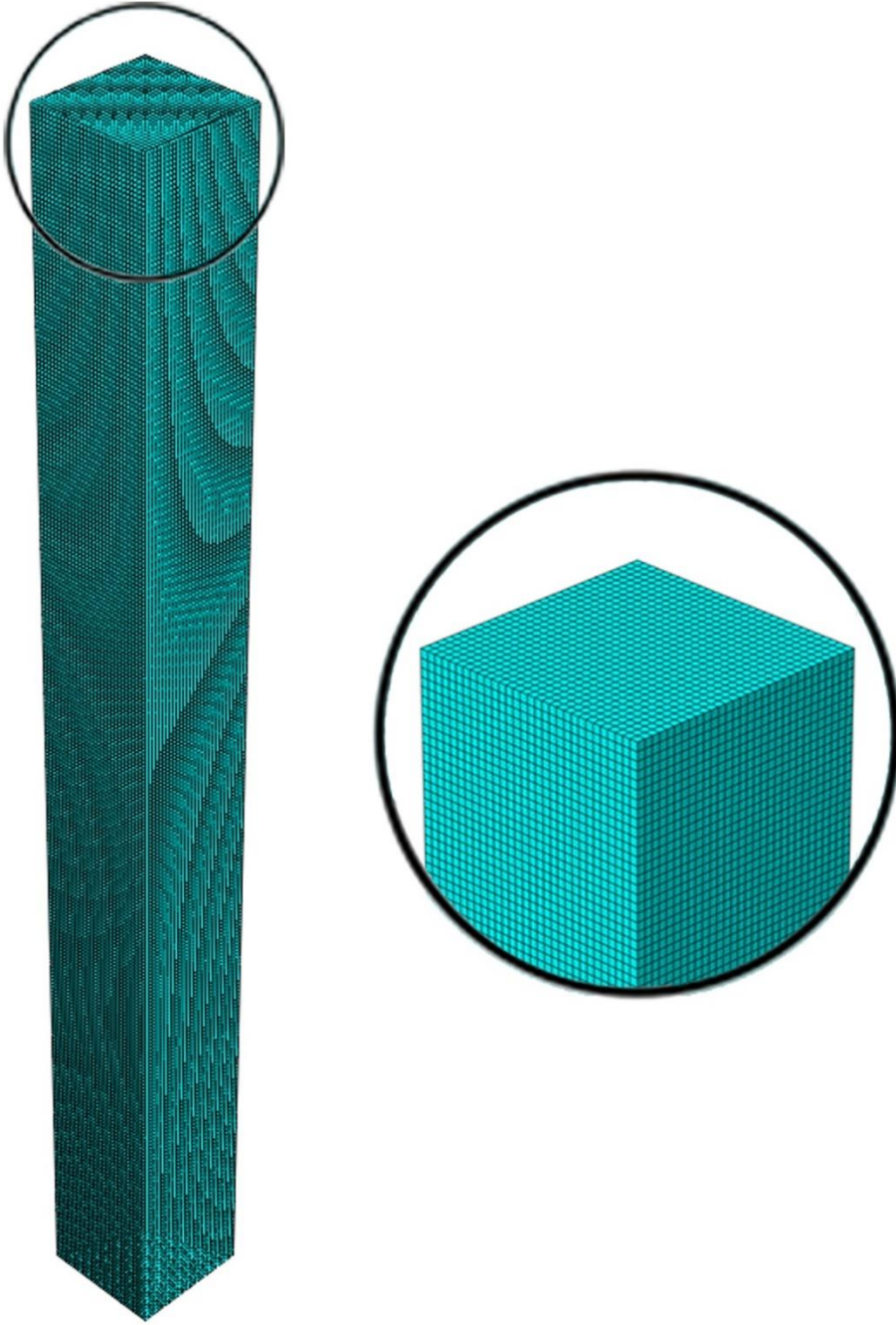
Sıcaklık (°C)	Malzeme Özellikleri		
	Birim Hacim Ağırlık ( $\text{kg/m}^3$ )	Isıl İletkenlik Katsayısı ( $\text{W/mK}$ )	Özgül Isı Katsayısı ( $\text{J/kgK}$ )
0	2300	1.360	900
20	2300	1.333	900
100	2300	1.230	900
115	2300	1.211	1470
200	2254	1.111	1470
300	2220	1.003	1000
400	2185	0.907	1050
500	2165	0.823	1100
600	2145	0.749	1100
700	2125	0.687	1100
800	2105	0.637	1100
900	2084	0.598	1100
1000	2064	0.570	1100
1100	2044	0.554	1100
1200	2024	0.549	1100

Problemin basite indirgenmesi amacıyla, oluşturulan beton kolon modeli sayısal ayrıklaştırma (mesh) yöntemiyle  $10 \times 10 \times 10$  mm boyutlarında sonlu elemanlara ayrılmıştır. Daha sonra yapılan ısıl çözümleme ile sonlu elemanlara ait bütün düğüm noktalarındaki sıcaklıkların zamana bağlı değişimi yaklaşık olarak elde edilmiştir. Beton kolon modeline ait sonlu eleman modeli Şekil 2.9’da verilmektedir.

Şekil 2.8 ve 2.9’den görüldüğü gibi modelleme üç boyutlu olarak yapılmıştır. Analiz süresi boyunca sıcaklığın tüm kolon yüzeylerine üniform olarak etkimesi nedeniyle eleman enkesitine dik doğrultudaki komşu düğüm noktaları arasında herhangi bir sıcaklık farkı oluşmamaktadır. Dolayısıyla bu doğrultuda herhangi bir ısı geçişi meydana gelmez. Sıcaklık değişiminin yalnızca kolon enkesitine paralel olan iki doğrultuda önemli olduğu bu durum iki boyutlu ısı iletimi problemidir. Bu durumda gerçekleştirilen analizler için, üç boyutlu modelleme yapılarak çözümleme süresini artırmak yerine iki boyutlu bir



modelleme yapılarak yalnızca kolon enkesiti dikkate alınabilir. Her iki durum için de gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda elde edilen sıcaklık dağılımları aynı olacağı söylenebilir. Bu çalışmada, üç boyutlu modelleme kullanılmasının nedeni; üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirilen modellerden elde edilen sıcaklık dağılımlarına bağlı olarak aynı modeller üzerinde modal (serbest titreşim) analizlerin gerçekleştirilmesidir. Modal analizlere ait detaylara ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir.



Şekil 2.9. Beton kolon modeline ait sonlu eleman modeli

Model kesiti içindeki sıcaklık dağılımları, geçici rejimde iki boyutlu ısı iletimi probleminin çözümü sonucunda elde edilmiştir. Problemin çözümü, model sınırlarını oluşturan yüzeylere ait ısı koşullarına bağlıdır. Bu çalışmada oluşturulan tüm kolon modellerinin başlangıç sıcaklıkları oda sıcaklığına (20°C) eşit olarak tanımlanmış ve gerçekleştirilen ısı transferi analizleri bu modellerin yangına tüm yüzeylerinden maruz kaldıkları durumlar için yapılmıştır. Gerçekleştirilen tüm ısı çözümlerinde, yangın etkisini temsil etmek için, ISO 834 standart sıcaklık-zaman eğrisi kullanılmıştır. Isı transferi analizleri, bu sıcaklık-zaman ilişkisinin üç saatlik dilimi dikkate alınarak gerçekleştirilmiştir.

Yangına maruz kalan kolon yüzeyleri taşınım ve ışıınım yoluyla ısınmaktadır. Daha sonra bu ısı enerji yüksek sıcaklıklardaki kolon dış yüzeylerinden, kolon enkesiti içinde bulunan ve daha düşük sıcaklıklara sahip bölgelere doğru iletim yoluyla aktarılmaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinde; taşınım, ışıınım ve iletimle ısı transferi mekanizmalarının tümü hesaba katılmıştır. Kolon modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde ISO 834 standart yangın eğrisinin dikkate alınması nedeniyle, yangına maruz kalan tüm yüzeyler için taşınım ile gerçekleşen ısı transferi katsayısı 25 W/m<sup>2</sup>K olarak alınmıştır. Diğer tasarım yangınları için bu katsayıya ait değerlere Tablo 2.2’de yer verilmiştir.

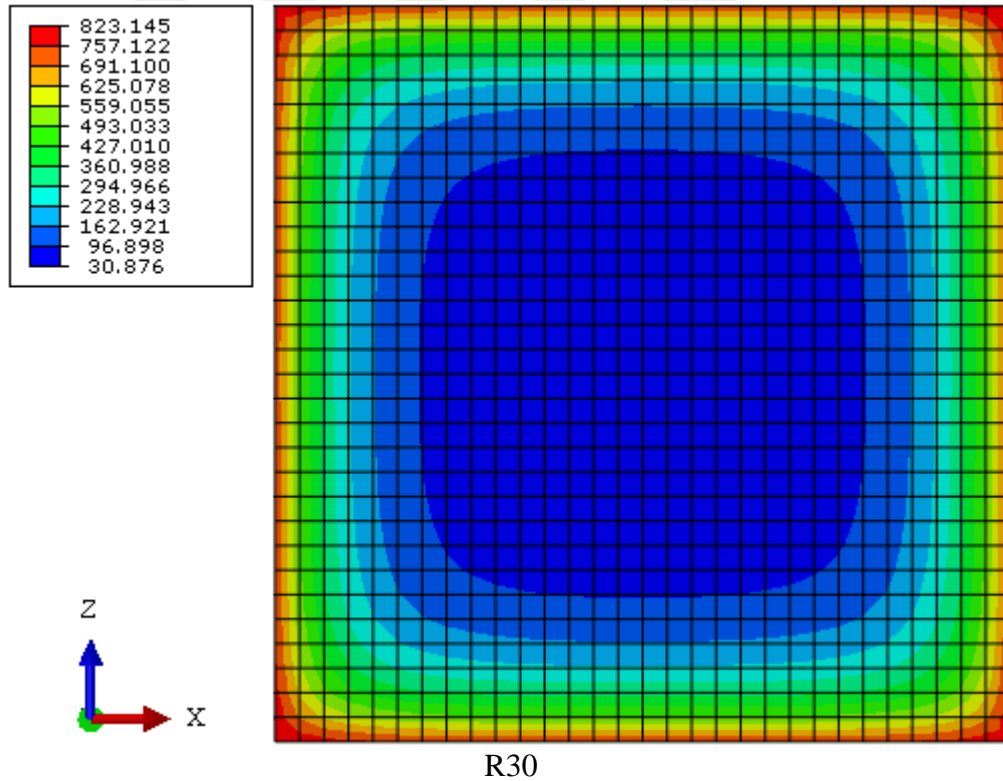
Kolonun dış yüzeylerine ışıınım ile gerçekleşen net ısı akısının tanımlanması aşamasında, beton kolon yüzeylerinin ısı yayıcılığı  $\varepsilon_m = 0.7$  olarak dikkate alınmıştır. Kullanılan malzeme türüne göre değişim gösteren bu değer Tablo 2.3’te verilmiştir. Ayrıca, ışıınım ile gerçekleşen net ısı akısına ait formülasyonun K sıcaklık birimi ile uyumlu olması nedeniyle gerçekleştirilen analizler için programa mutlak sıfır sıcaklığı ve Stephan Boltzmann sabiti ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ) tanımlanmıştır.

#### **2.2.4.2. Kolon Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Isıl Çözümler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi**

Yangına tüm yan yüzeylerinden maruz kalan beton kolon modeli üzerinde gerçekleştirilen geçici rejimdeki ısı transferi analizleri, 3 saatlik yangın süresi boyunca 15’er dakikalık zaman aralıkları ile toplam 12 adımda gerçekleştirilmiştir. Her bir adım için gerçekleştirilen çözümler sonucunda, sonlu eleman modeli üzerinde bulunan

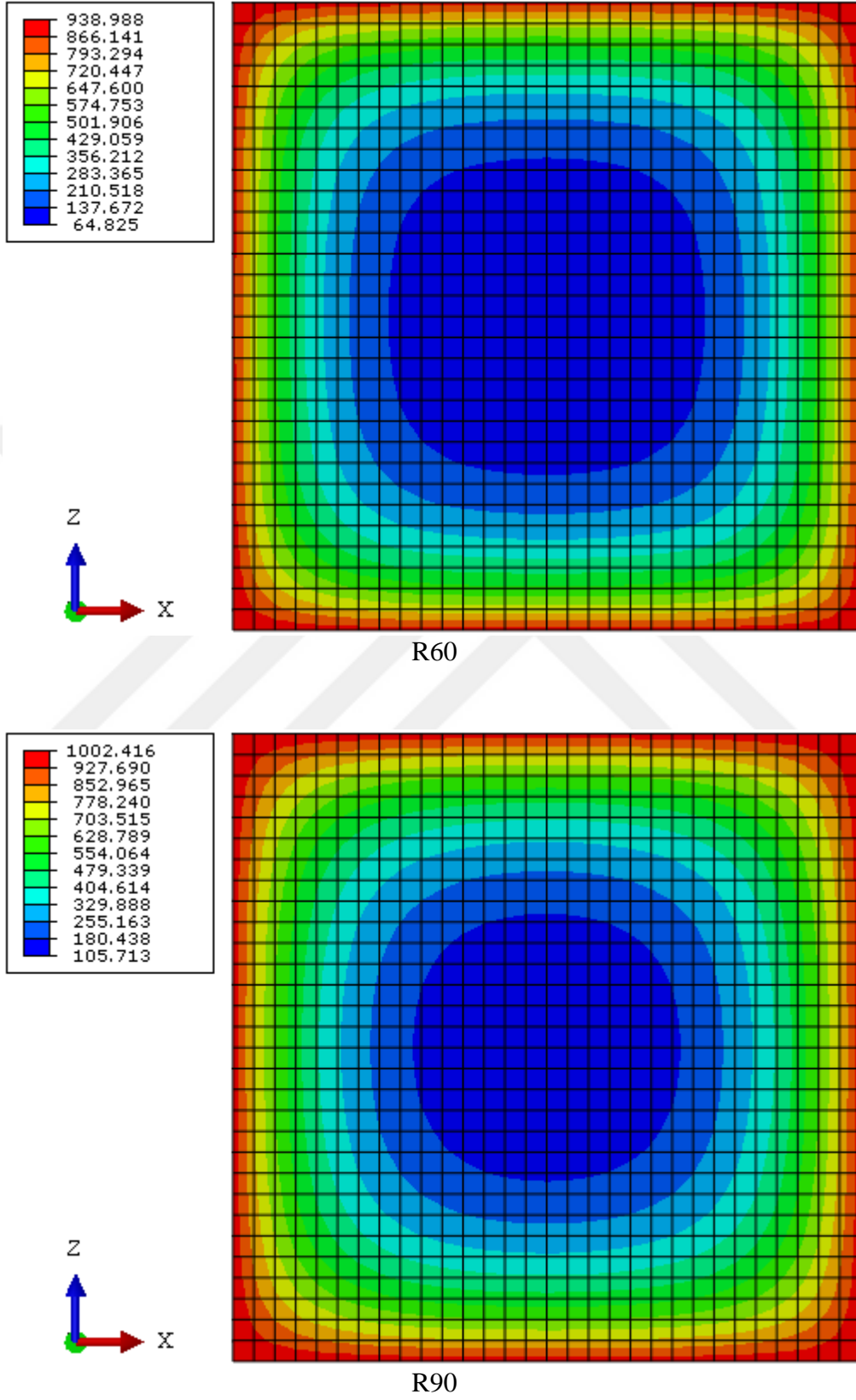
düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri ve model içinde oluşan sıcaklık dağılımları yaklaşık olarak elde edilmiştir.

Beton kolon modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine tüm yan yüzeylerinden maruz kalması durumunda; model kesiti içinde 30, 60, 90 ve 120 dakika sonunda oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 2.10'da verilmiştir. Sıcaklığın kolon dış yüzeylerine üniform olarak etkimesi nedeniyle eleman yüksekliği doğrultusundaki komşu düğüm noktaları arasında sıcaklık farkı oluşmamakta ve böylece herhangi bir ısı iletimi gerçekleşmemektedir. Dolayısıyla eleman enkesiti içindeki sıcaklık dağılımları belirlenirken herhangi bir kolon yüksekliği dikkate alınabilir. Ayrıca, Şekil 2.10'dan da görüldüğü gibi sıcaklığın üniform olarak tüm kolon dış yüzeylerine etkimesi, yangın süresi boyunca eleman enkesiti içinde simetrik bir sıcaklık dağılımının oluşmasına neden olmuştur.

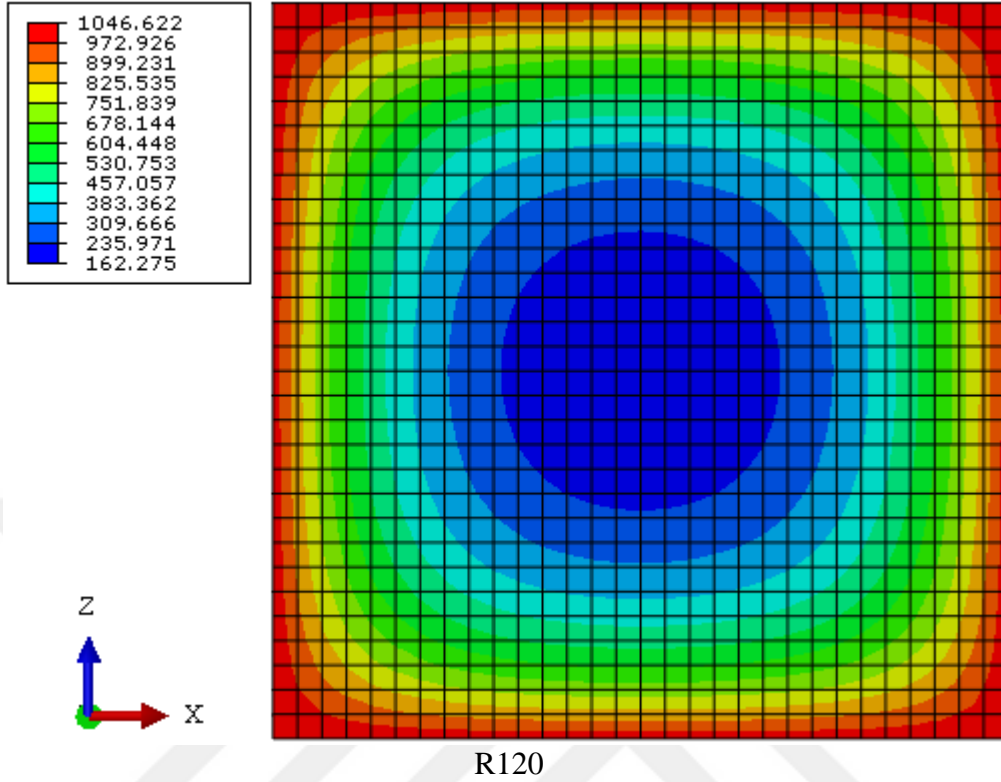


Şekil 2.10. 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolon modelinin, ISO 834 standart yangın eğrisine tüm dış yüzeylerinden maruz kalması durumunda model enkesiti içinde oluşan sıcaklık dağılımları

Şekil 2.10'un devamı

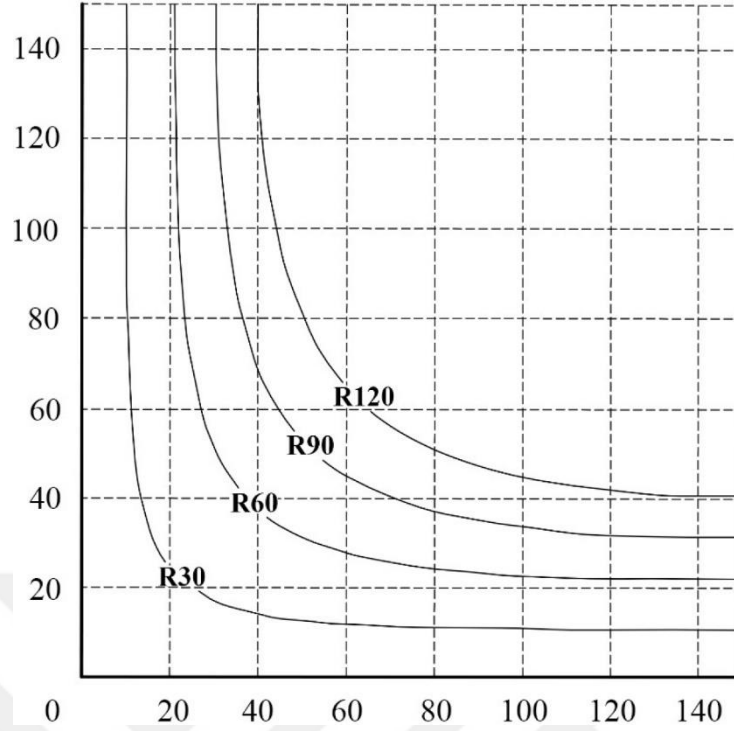


Şekil 2.10'un devamı



Sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarının doğruluğunun teyit edilmesinde EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da sunulan sıcaklık profillerinden yararlanılmıştır. İlgili modele ait bu sıcaklık profilleri Bölüm 1.12.3.1'de verilmişti. Şekil 2.10'da verilen sıcaklık dağılımlarının, bu sıcaklık profilleri ile benzerlik gösterdiği görülmektedir. Elde edilen ısıl çözümlene sonuçlarında, dikkate alınan malzeme özellikleri önemli bir rol oynadığı açıktır. Dolayısıyla, sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri ile karşılaştırılabilmesi amacıyla, ısı transferi analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri, deneysel verilere dayalı olarak oluşturulan sıcaklık profilleri için yapılan kabuller dikkate alınarak programa tanıtılmıştır.

Buradaki karşılaştırmalar, belirli bir yangına maruz kalma süresi için kolon enkesiti içinde bulunan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin konumları dikkate alınarak yapılmıştır. EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da ilgili modele ait yangına maruz kalma süreleri için verilen sıcaklık profillerinden ayrı olarak, bu süreler için yalnızca 500°C'lik eş sıcaklık eğrisinin konumunu belirten ek bir sıcaklık profili de verilmiştir. Bu profil Şekil 2.11'de gösterilmiştir.

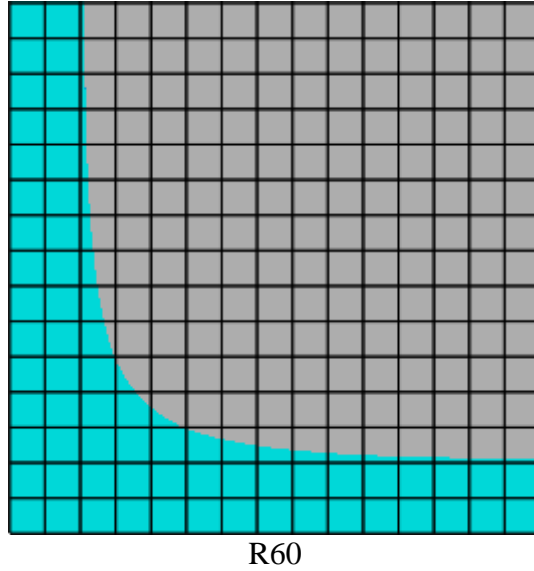
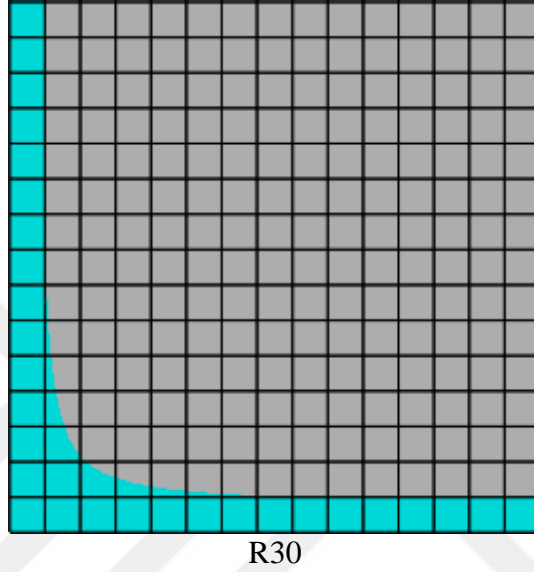


Şekil 2.11. Tüm yan yüzeylerinden standart yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolonun, belirli süreler için eleman enkesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumlar (EN 1992-1-2, 2004).

Beton kolon modelinin ISO 834 standart yangın eğrisine tüm yan yüzeylerinden maruz kalması durumunda; 30, 60, 90 ve 120 dakika sonunda model enkesiti içindeki 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin konumları Şekil 2.12'de verilmiştir. ABAQUS programı kullanılarak elde edilen sonuçların gösteriminde, farklı renkler ile temsil edilen iki ayrı bölge oluşturulmuştur. Bu iki bölgeyi ayıran sınır 500°C'lik eş sıcaklık eğrisini ifade etmektedir. Bu sınırın altında kalan bölgede 500°C'den daha büyük sıcaklık değerleri, üstünde kalan bölgede ise 500°C'den daha küçük sıcaklık değerleri oluşmaktadır. Enkesit içinde oluşan sıcaklık dağılımlarındaki simetri nedeniyle, 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin ilgili maruz kalma sürelerine ait konumları enkesitin  $\frac{1}{4}$ 'lük bölümü üzerinde gösterilmiştir.

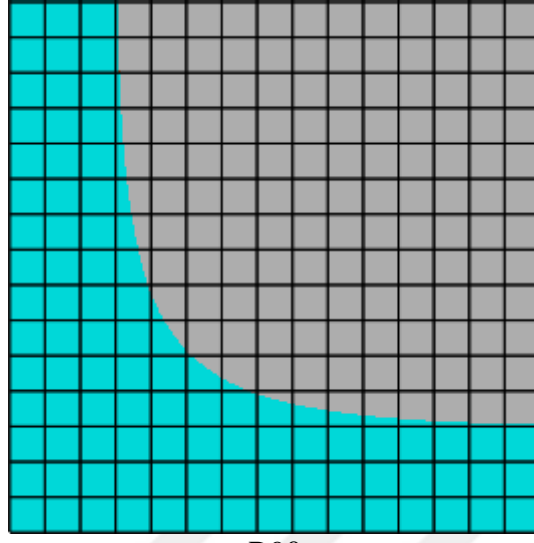
Şekil 2.12'de gösterilen yangına maruz kalma süreleri için verilen 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumların, Şekil 2.11'de gösterilen sıcaklık profili üzerinden okunan konumlar ile neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Şekil 2.11 ve 2.12'den görüldüğü gibi, yangına maruz kalma süresindeki artış ile birlikte 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan kolon dış yüzeylerine olan mesafeleri artmakta, başka bir deyişle bu eş sıcaklık eğrileri zamanla enkesit merkezine doğru ilerlemektedir. EN 1992-1-2 (2004)

Ek A'da yer alan ve deneysel çalışmalara dayalı olarak oluşturulan ilgili modele ait sıcaklık profillerinden yararlanılarak elde edilen sonuçların sayısal çözümlerden elde edilen sonuçlar ile uyumlu olması, yüksek sıcaklığa bağlı olarak değişim gösteren malzeme özelliklerinin dikkate alındığı ABAQUS modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğruluğunun teyit edilmesi noktasında belirleyici olmuştur.

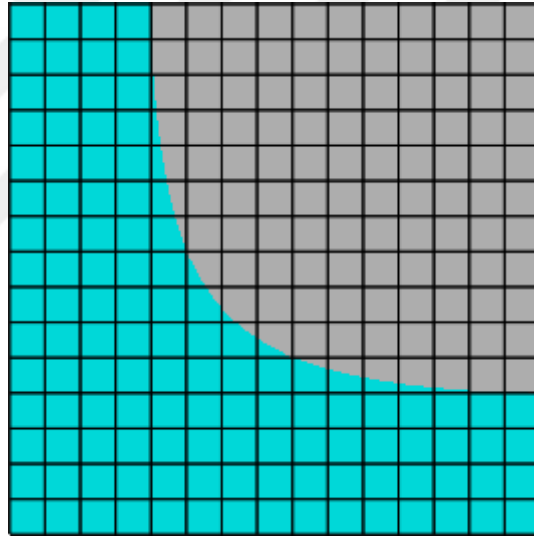


Şekil 2.12. ISO 834 standart yangın eğrisine tüm yan yüzeylerinden maruz kalan 300x300 mm enkesit boyutlarına sahip beton kolonun enkesiti içinde 30, 60, 90 ve 120 dakika sonunda oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumlar

Şekil 2.12'nin devamı



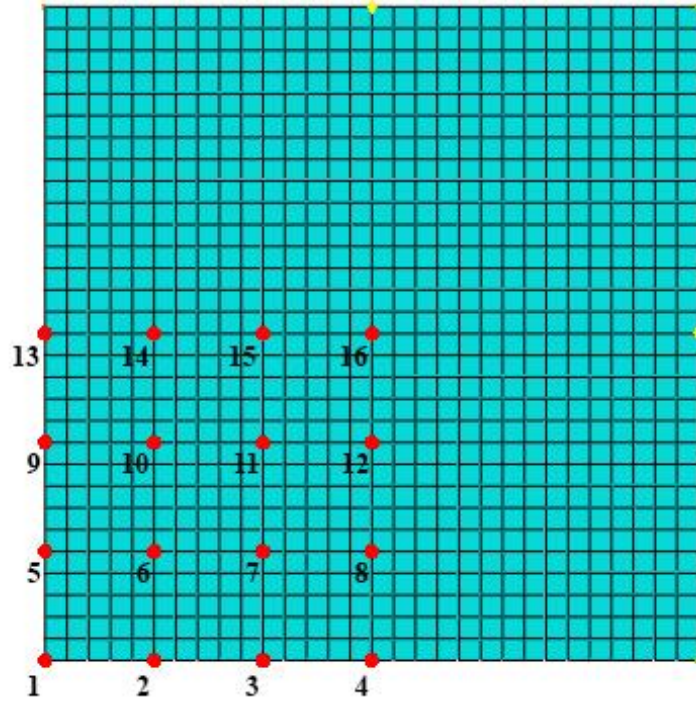
R90



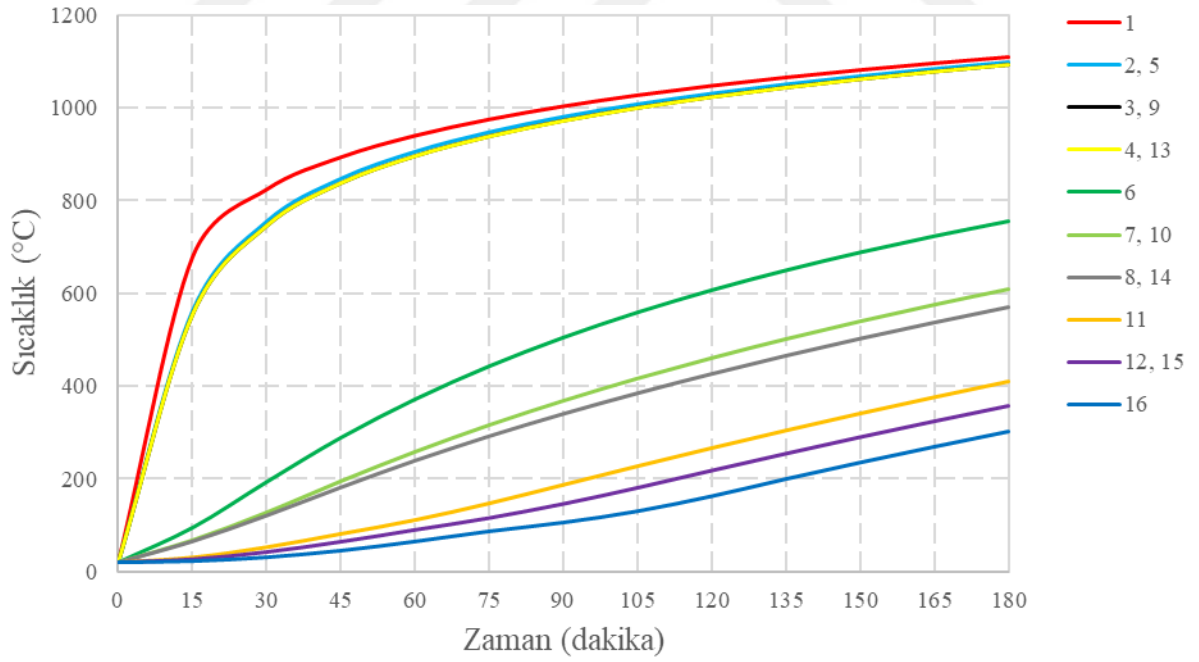
R120

İki boyutlu ısı iletimi probleminden elde edilen sonuçların, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profilleri ile karşılaştırılarak yapılan değerlendirmeler sonrasında, sonlu eleman modeli üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğruluğu teyit edilmiştir. Şekil 2.13'te, beton kolonun sonlu eleman modeli üzerinden seçilen ve farklı derinliklerde bulunan bazı düğüm noktaları gösterilmiştir. Düğüm noktalarının seçimi, oluşan simetrik sıcaklık dağılımı nedeniyle eleman enkesitinin  $\frac{1}{4}$ 'lük bölümü üzerinden yapılmıştır. Yangına maruz kalma süresi boyunca, bu düğüm noktalarına ait sıcaklık gelişimleri Şekil 2.14'te verilmiştir.





Şekil 2.13. Beton kolonun sonlu eleman modelinin enkesiti üzerinden seçilen düğüm noktaları



Şekil 2.14. Yangına maruz kalma süresi boyunca, Şekil 2.13'te verilen düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri

Şekil 2.14'ten görüldüğü gibi, sıcaklık artışının en fazla olduğu düğüm noktaları kolon dış yüzeylerinde bulunan ve yangına direk olarak maruz kalan 1, 2, 3, 4, 5, 9 ve 13 nolu düğüm noktalarıdır. Tüm düğüm noktaları incelendiğinde, en yüksek sıcaklık artışının 1 nolu düğüm noktasında, en düşük sıcaklık artışının ise 16 nolu düğüm noktasında olduğu gözlenmiştir. Bu durum, yangının kolonun köşesinde bulunan 1 nolu düğüm noktasına iki yüzeyden direkt olarak etkimesiyle, 16 nolu düğüm noktasının ise seçilen tüm düğüm noktaları içinde yangının direkt olarak etkilediği dış yüzeylere en uzak nokta konumunda bulunması ile açıklanabilir. Kolon dış yüzeylerinde bulunan diğer düğüm noktalarındaki zamanla artan sıcaklıkların ise birbirlerine oldukça yakın değerler aldığı görülmektedir. İç bölgede bulunan düğüm noktalarındaki sıcaklık artışının, yangına maruz kalan dış yüzeylerde bulunan düğüm noktalarındaki sıcaklık artışına kıyasla daha yavaş olduğu görülmektedir. Ayrıca eleman enkesitinin  $\frac{1}{4}$ 'lük bölümü üzerinden seçilen düğüm noktalarındaki sıcaklık gelişimi incelendiğinde, kesitteki sıcaklık dağılımının simetrik olduğu açıkça görülmektedir.

### **2.3. Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi**

Yangın etkisi nedeniyle oluşan yapısal hasarlar, yapının rijitliğinde veya dinamik davranışında meydana gelen değişim incelenerek belirlenebilir. Bu bölümde, yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların yapısal davranışlarının, bu kolonların dinamik karakteristiklerinde (doğal frekans, mod şekli ve sönüm oranı) meydana gelen değişimlerin farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler göz önünde bulundurularak sayısal yöntemlerle belirlenmesi amaçlanmıştır. Yangın etkisi nedeniyle meydana gelen rijitlik değişimlerinin sayısal olarak belirlenmesi için gerçekleştirilen ısı transferi ve modal (serbest titreşim) analizler için sonlu eleman yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada dikkate alınan parametrelerdeki değişim ile birlikte birçok çözümlenmeye ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla bu çözümlenmelerden elde edilen sonuçlar büyük bir veri havuzu oluşturmuştur. Çalışmada, yangın etkisi nedeniyle meydana gelen rijitlik değişimlerinin pratik olarak belirlenmesi amacıyla, bu veri havuzundan yararlanılarak oluşturulan formülasyon ve grafik/abaklar sunulmuştur.

Gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin tümünde yangın etkisi için ISO 834 standart yangın eğrisi dikkate alınmış ve yangının kolonların tüm yan yüzeylerine etkilediği

kabul edilmiştir. Seçilen maruz kalma süreleri için gerçekleştirilen modal analiz sonuçları değerlendirilerek, kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

Gerçekleştirilen çoklu analizlere örnek olması açısından, Bölüm 2.2.4'te iki boyutlu ısı iletimi probleminin doğrulanmasında kullanılan, tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart yangına maruz 300x300 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip beton kolon modelinin ilgili yangına maruz kalma süreleri için gerçekleştirilen modal analizler ile birlikte dinamik karakteristiklerindeki değişimleri incelenmiştir.

Bunun için öncelikle, oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerinde geçici rejim dikkate alınarak gerçekleştirilen ısı transferi analizleri yapılmış ve elemanlarda oluşan sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Bir sonraki aşamada gerçekleştirilen modal analizler, ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuçlara bağlı olarak koşturulmuştur. Böylece, ABAQUS programı yardımıyla gerçekleştirilen modal analizlerde dikkate alınan malzeme özelliklerinin, elemanın her bir düğüm noktasındaki sıcaklığa bağlı olarak seçilmesi sağlanmıştır. Her iki analizin de aynı model için yapılması gerekmektedir. EN 1992-1-2 (2004), betonarme bir elemandaki sıcaklık dağılımı belirlenirken donatı çeliğinin ihmal edilmesine izin vermektedir. Bu nedenle, gerçekleştirilen ısı transferi analizleri için beton, donatısız kütle olarak dikkate alınmıştır.

Donatı çeliğinin modal analiz sonuçlarına etkisini incelemek için, yangın etkisi olmaksızın, programda oluşturulan kolon modeli üzerinde gerçekleştirilen modal analiz sonuçları ile aynı model için donatı çeliğini otomatik olarak dikkate alabilen SAP2000 (2016) modal analiz sonuçları karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmada; farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi parametreler dikkate alınarak gerçekleştirilen çoklu analizler sonucunda oluşan veri havuzundan yararlanılarak geliştirilen formülasyon ve sunulan grafik/abaklar, tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan kolonların doğal frekanslarında meydana gelen değişimler esas alınarak oluşturulmuştur.

### **2.3.1. Donatı Çeliğinin Dinamik Karakteristiklere Etkisi**

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristik değişimlerinin sayısal olarak belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilen ısı

transferi ve modal analizler için, ABAQUS programında oluşturulan sonlu eleman modelleri beton kütle olarak modellenmiş ve donatı etkileri ihmal edilmiştir.

Betonarme elemanların yangına maruz kalmaları durumunda, elemanlarda kullanılan donatı çeliklerinin oluşan sıcaklık dağılımına etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu belirtilmişti. Dolayısıyla betonarme kolonlara ait sıcaklık dağılımlarını belirlemek amacıyla ısı transferi analizleri için oluşturulan sonlu eleman modelleri, beton kütle olarak modellenmişti. Bölüm 2.2’de, beton kütle olarak yapılan modellemeler için sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların, analitik yöntemler ve deneysel çalışmalara dayalı olarak oluşturulan sıcaklık profilleri ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması sonucunda ortaya çıkan farklılıklar değerlendirilmiş ve sayısal yöntem kullanılarak yapılacak ısıl çözümlenelerde donatı etkilerinin ihmal edilebileceği görülmüştür.

Yangın etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristik değişimlerini belirlemek için gerçekleştirilen modal analizler, ısı transferi analizleri için oluşturulan modellere ait düğüm noktalarından alınan sonuçların veri olarak kullanılması nedeniyle bu modeller üzerinden gerçekleştirilmelidir. Dolayısıyla modal analizler, ısı transferi analizleri için beton kütle olarak modellenen elemanlar için yapılmıştır.

Bu bölümde, donatı çeliğinin dinamik karakteristikler üzerindeki etkisini incelemek amacıyla oluşturulan, 300x300 mm enkesit boyutlarına ve 3 m yüksekliğe sahip bir kolon ABAQUS programında beton kütle olarak, donatı çeliğini otomatik olarak elemana tanımlayan SAP2000 programında ise betonarme eleman olarak modellenmiştir. Değerlendirme, yangın etkisi olmaksızın normal koşullardaki kolon modelleri için gerçekleştirilen modal analiz sonuçlarından elde edilen ilk üç moda ait doğal frekans değerleri karşılaştırılarak yapılmıştır. Sayısal çözümlenme sonuçları ve bu sonuçlar arasındaki yüzdesel farklar Tablo 2.9’da verilmiştir. Tablo 2.9’dan, donatı çeliğinin doğal frekans değerleri üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.

Tablo 2.9. Sonlu eleman yöntemiyle yapılan modellemelerde donatı çeliğinin doğal frekanslar üzerindeki etkisi

Mod	Frekans (Hz)		Fark (%)
	ABAQUS	SAP2000	
1	19.330	19.343	-0.07
2	19.330	19.343	-0.07
3	116.210	116.284	-0.06

### 2.3.2. Dikkate Alınan Değişken Parametreler

Bu çalışmada, ISO 834 standart yangınına tüm yan yüzeylerinden maruz kalan, 3 m yüksekliğe sahip beton kolonlar için ABAQUS programı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal çözümlerinde değişken olarak seçilen parametreler sırasıyla farklı enkesit boyutları, beton sınıfı ve sıcaklık geçmiştir.

#### 2.3.2.1. Enkesit Boyutları

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde (TBDY, 2018) dikdörtgen kesitli kolonlar için en küçük enkesit boyutu 30 cm olarak verilmiştir. Perdeler ise planda uzun kenarının kalınlığına oranı en az altı olan düşey taşıyıcı sistem elemanları olarak tanımlanmıştır. Bu nedenle, çalışmada dikkate alınan kolonlar için en küçük enkesit boyutu 30 cm olarak seçilmiştir. En büyük enkesit boyutu ise 180 cm olarak dikkate alınmıştır. Çalışmada dikkate alınan tüm kolon enkesit boyutları Tablo 2.10'da verilmiştir.

Tablo 2.10. Dikkate alınan kolonların enkesitlerine ait kısa ve uzun kenar ölçüleri

Kolon Enkesit Boyutları					
Uzun Kenar (cm)	Kısa Kenar (cm)				
30	30	-	-	-	-
40	30	40	-	-	-
50	30	40	50	-	-
60	30	40	50	60	-
70	30	40	50	60	70
80	30	40	50	60	70
90	30	40	50	60	70
100	30	40	50	60	70
110	30	40	50	60	70
120	30	40	50	60	70
130	30	40	50	60	70
140	30	40	50	60	70
150	30	40	50	60	70
160	30	40	50	60	70
170	30	40	50	60	70
180	30	40	50	60	70

Tablo 2.10'dan görüldüğü gibi dikkate alınan kolonların enkesit boyutlarına ait kısa kenar ölçüleri 30 cm'den başlamakta ve 10'ar cm'lik artışlarla 70 cm'ye kadar, uzun kenar ölçüleri ise 30 cm'den başlamakta ve yine 10'ar cm'lik artışlarla 180 cm'ye kadar artış göstermektedir. Seçilen kolon enkesitlerinin en küçüğünün 30x30 cm, en büyüğünün ise 70x180 cm olduğu görülmektedir. Tablo 2.10'da yer alan 70 adet elemandan yalnızca 30x180 cm enkesit boyutlarına sahip model perde olma şartını sağlamaktadır. Bu durumda yapılan çözümlerlerin, 69 adet kolon ve 1 adet perde için gerçekleştirildiği söylenebilir.

### 2.3.2.2. Beton Sınıfı

Seçilen parametrelerden bir diğeri beton sınıfıdır. Beton sınıfı, gerçekleştirilen modal analizlerde ihtiyaç duyulan malzeme özelliklerinden biri olan elastisite modülüne, dolayısıyla da elemanın rijitliğine direkt olarak etki etmektedir.

Çalışmada; C25, C30, C35, C40, C45 ve C50 olmak üzere toplam 6 adet beton sınıfı dikkate alınmıştır. Bu beton sınıfları için, modal analizlerde dikkate alınan elastisite modüllerinin, oda koşullardaki (20°C) değerleri TS 500'den (2000) alınmış ve Tablo 2.11'de verilmiştir.

Tablo 2.11. Dikkate alınan beton sınıflarının oda koşullarındaki dayanımları ve elastisite modülleri (TS 500, 2000).

Beton Sınıfı	Karakteristik Silindirik Basınç Dayanımı, $f_{ck}(20^{\circ}C)$ (MPa)	Eşdeğer Küp Basınç Dayanımı, $f_{ck}(20^{\circ}C)$ (MPa)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı, $f_{ck,t}(20^{\circ}C)$ (MPa)	28 Günlük Elastisite Modülü, $E_c(20^{\circ}C)$ (MPa)
C25	25	30	1.8	30000
C30	30	37	1.9	32000
C35	35	45	2.1	33000
C40	40	50	2.2	34000
C45	45	55	2.3	36000
C50	50	60	2.5	37000

Tablo 2.11'den görüldüğü üzere, dikkate alınan beton sınıfına bağlı olarak betonun elastisite modülünün başlangıç değerleri değişim göstermektedir. Bölüm 1.11.1.8'de yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun elastisite modülünde meydana gelen değişime yer verilmiş ve bu değişimin azalma eğiliminde olduğu belirtilmişti. ABAQUS programında gerçekleştirilen modal analizler için, betonun elastisite modülünün sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişim dikkate alınmıştır. Yüksek sıcaklıklara karşılık gelen elastisite modülü değerleri programa tanıtılırken, betonun normal koşullardaki elastisite modülü değerleri belirli azaltma katsayıları ile çarpılmıştır.

Bu çalışmada, betonun elastisite modülü azaltma katsayısının yüksek sıcaklıkla değişiminin belirlenmesinde, Bastami vd. (2010) tarafından önerilen (1.44) denkleminde yararlanılmıştır. Bu davranış modeli, Şekil 1.21'de gösterilmişti. Şekil 1.21'de verilen davranış modelinde, dikkate alınan maksimum sıcaklığın 800°C olduğu görülmektedir. Şekil 2.10'dan da görülebileceği gibi, bu çalışmada gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda, eleman enkesitlerinin bazı bölümlerindeki beton sıcaklıkları 800°C'nin çok daha üstünde değerler alabilmektedir. 800°C'den daha yüksek sıcaklıklara ait azaltma katsayıları ise Inwood (1999) tarafından yapılan çalışmaya benzer şekilde 800°C ile 1200°C'lik değerler arasında doğrusal enterpolasyon yapılarak belirlenmiştir. Modal analizler için betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişiminin programa tanıtılmasında kullanılan, belirli beton sıcaklıklarına karşılık gelen elastisite modülü azaltma katsayıları Tablo 2.12'de verilmiştir.

Tablo 2.12'de, 1200°C'lik sıcaklığa karşılık gelen betonun elastisite modülü azaltma katsayısının sıfır değerini aldığına dikkat edilmelidir. Bu durum, yüksek sıcaklığa maruz kalan beton elemanların 1200°C'lik sıcaklığa erişen bölgelerinde elastisite modülünün sıfır değerini alacağı anlamına gelmektedir. Ancak ABAQUS programı, bu değerini sıfır olarak tanıtılmasına izin vermemektedir. Bu durumda programa, 1200°C'ye karşılık gelen elastisite modülü için, sonuçları etkilemeyeceği düşünülen son derece küçük bir değer tanıtılmalıdır.

### 2.3.2.3. Sıcaklık Geçmişi

Seçilen son parametre sıcaklık geçmişi'dir. Sıcaklık geçmişi, yangına maruz kalma süresini ifade etmektedir.

Tablo 2.12. Betonun elastisite modülü azaltma katsayıları

Beton Sıcaklığı, $\theta$ (°C)	Elastisite Modülü Azaltma Katsayısı, $k_{E,\theta}$
20	1.000
100	1.000
200	0.717
300	0.579
400	0.450
500	0.333
600	0.228
700	0.138
800	0.065
900	0.049
1000	0.033
1100	0.016
1200	<b>0.000</b>

Isı transferi analizlerinde, kolonların tüm yan yüzeylerine etkiyen yangını temsil etmek amacıyla kullanılan ISO 834 standart sıcaklık-zaman ilişkisinin 3 saatlik (180 dakika) dilimi dikkate alınmıştır. Isı transferi analizleri sonucunda elemanlardaki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesinden sonra, maruz kalma süreleri için modal analizler gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analizler, 3 saatlik toplam sürenin 15'er dakikalık zaman aralıkları için gerçekleştirilmiş ve bu sürelerle ait dinamik karakteristikler belirlenmiştir.

Çalışmada; her bir kolon modeli için herhangi bir sıcaklık geçmişinin olmadığı duruma ek olarak; 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.

### 2.3.3. Değişken Parametreler Dikkate Alınarak Gerçekleştirilen Modal Analizler ve Dinamik Karakteristiklerin Belirlenmesi

Yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristik değişimlerinin belirlenmesi için, öncelikle sıcaklık dağılımlarının elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir.



Isı transferi analizlerinde sonlu eleman modelleri üzerinde bulunan bütün düğüm noktalarına ait sıcaklıklar, dikkate alınan yangın süresince değişim göstermektedir. Gerçekleştirilen ısı çözümü sonucunda oluşan veri dosyası, bütün düğüm noktalarındaki sıcaklıkların zamana bağlı gelişimini içermektedir.

Dinamik karakteristiklerin belirlenmesi için gerçekleştirilen modal analizlerde ihtiyaç duyulan malzeme özellikleri, elastisite modülü ve birim hacim ağırlığıdır. Bu iki malzeme özelliğinin sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişim programa tanıtılmıştır.

Modal analizler sırasında, ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuç dosyaları kullanılmıştır. Böylece malzeme özelliklerinin, ilgili süreler için bütün düğüm noktalarına karşılık gelen beton sıcaklıklarına bağlı olarak dikkate alınması sağlanmıştır. Bu durum ancak, ısı transferi ve modal analizler için oluşturulan sonlu eleman modelleri üzerindeki düğüm noktalarının çakışması ile mümkündür. Dolayısıyla her iki analiz için oluşturulan modellerin geometrik özellikleri ve bu elemanların sonlu elemanlara ayrılmasında kullanılan mesh aralığının aynı olması gerekmektedir. Bu iki analizde kullanılan eleman tipleri ise farklıdır.

Bölüm 2.3.2’de belirtildiği gibi, çalışmada dikkate alınan değişken parametreler farklı enkesit boyutları, beton sınıfı ve sıcaklık geçmişiştir. Her biri 3 m yüksekliğinde olan 70 farklı enkesit boyutuna sahip kolon modelleri üzerinde gerçekleştirilen analizler, 6 farklı beton sınıfı ve 13 farklı sıcaklık geçmişi dikkate alınarak tekrarlanmıştır.

Isı transferi analizlerinden elde edilen sonuçları, değişken parametreler arasından yalnızca enkesit boyutları etkilemektedir. Çünkü; bu analizlerde kullanılan malzeme özellikleri, dikkate alınan beton sınıflarına bağlı olarak değişim göstermemekte ve analizler yangına maruz kalma süresinin tamamı için tek bir çözümlenme ile gerçekleştirilmektedir. Ancak, bu üç parametredeki herhangi bir değişim, modal analiz sonuçlarını etkilemektedir. Bu tez kapsamında; 70’i ısı transferi, 5460’ı modal analiz olmak üzere toplam 5530 adet analiz gerçekleştirilmiştir.

Bu bölümde, ısı transferi analizi sonrasında gerçekleştirilen modal analizlere örnek olması açısından, Bölüm 2.2.4’te ısı çözümü gerçekleştirilen 300x300 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip beton kolon modelinin dinamik karakteristiklerindeki değişimler incelenmiştir.

### 2.3.3.1. Tüm Yan Yüzeylerinden Yangına Maruz Kalan Beton Kolonun Sonlu Eleman Modelinin Oluşturulması

Bu bölümde, Bölüm 2.2.4'te ısı çözümü gerçekleştirilen 300x300 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip beton kolon modelinin, dinamik karakteristik değişimlerinin belirlenmesi için gerçekleştirilecek modal analizler için oluşturulan sonlu eleman modeline yer verilmiştir.

Donatısız kütle betonu modellemek için, program kütüphanesinde bulunan ve ısı transferi analizlerinde kullanılan C3D8R hacimsel eleman kullanılmıştır. C3D8R elemanı sekiz düğüm noktasına sahip üç boyutlu katı bir elemandır. Tek integrasyon noktasına sahiptir ve bu nokta elemanın ortasında bulunmaktadır. Bu tür indirgenmiş integrasyon elemanları için, ABAQUS programı otomatik olarak hourglass kontrolü yapmaktadır.

Modal analizler için malzeme özelliklerinin programa girilmesi gerekmektedir. Bu malzeme özellikleri; birim hacim ağırlığı, elastisite modülü ve poisson oranıdır. Modal analizler sırasında; betonun birim hacim ağırlığının ve elastisite modülünün sıcaklığa bağlı olarak gösterdikleri değişim hesaba katılmıştır. Betonun birim hacim ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi programa tanıtılırken, bu model için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde dikkate alınan değerler kullanılmıştır. Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi programa tanıtılırken, Tablo 2.12'de verilen belirli sıcaklıklara karşılık gelen elastisite modülü azaltma katsayılarından yararlanılmıştır. Bu sıcaklık değerlerine erişen betona ait elastisite modülleri programa tanıtılırken, betonun oda sıcaklığındaki elastisite modülünün ilgili katsayılar ile çarpılması sonucu elde edilen değerleri kullanılmıştır. Betonun oda sıcaklığındaki elastisite modülünün beton sınıfına bağlı olarak değişim gösterdiği daha önce belirtilmişti. Bu bölümde oluşturulan örnek modele ait sonlu eleman modelinde beton sınıfı C25 olarak dikkate alınmıştır. Analizlerde, betonun poisson oranının sıcaklığa bağlı olarak gösterdiği değişim ihmal edilmiş ve bu oran tüm sıcaklık değerleri için 0.2 olarak dikkate alınmıştır. Yangına maruz kalan beton kolonun dinamik karakteristik değişimlerinin belirlenmesi için oluşturulan sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri Tablo 2.13'te verilmiştir.

Bu çalışmada, betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimine ait davranış modeli, beton sıcaklığının 1200°C'ye erişmesi durumunda elastisite modülünün sıfır değerini alacağını ifade etmektedir. Programın bu sıcaklığa karşılık gelen elastisite modülünün sıfır olarak tanıtılmasına izin vermemesi nedeniyle, bu değer için sonuçları

etkilemeyeceği düşünölen son derece küçük bir değer tanımlanmıştır. Tablo 2.13'ten görölebileceği gibi, gerçekleştirilen modal analizlerde 1200°C'ye karşılık gelen elastisite modölü değerinin 1 Pa olarak dikkate alınmıştır.

Tablo 2.13. Beton sınıfı C25 olan kolon modeline ait sonlu eleman modelinde kullanılan malzeme özelliklerinin belirli sıcaklıklara karşılık gelen değerleri

Sıcaklık (°C)	Malzeme Özellikleri		
	Birim Hacim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	Poisson Oranı (-)	Elastisite Modölü (Pa)
0	2300	0.2	3.00E10
20	2300	0.2	3.00E10
100	2300	0.2	2.59E10
200	2254	0.2	2.15E10
300	2220	0.2	1.74E10
400	2185	0.2	1.35E10
500	2165	0.2	9.98E9
600	2145	0.2	6.83E9
700	2125	0.2	4.14E9
800	2105	0.2	1.94E9
900	2084	0.2	1.47E9
1000	2064	0.2	9.90E8
1100	2044	0.2	4.80E8
1200	2024	0.2	1*

Problemin basite indirgenmesi amacıyla, oluşturulan beton kolon modelinde sayısal ayrıklaştırma yöntemi kullanılarak katı model sonlu elemanlara ayrılmıştır. Burada seçilen sonlu eleman boyutlarının, bu model için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde dikkate alınan sonlu eleman boyutlarına eşit olması gerektiğine dikkate edilmelidir. Dolayısıyla bu model için yapılan ayrıklaştırmada da sonlu eleman boyutları 10x10x10 mm olarak dikkate alınmıştır. Böylece ısı transferi analizleri için oluşturulan sonlu eleman modelinin tüm düğüm noktalarındaki sıcaklıklar değerlendirilerek, gerçekleştirilen modal analizlerde bu düğüm noktalarına karşılık gelen beton sıcaklıklarına ait malzeme özelliklerini kullanması sağlanmıştır.

Modal analizler sırasında kolonların yere ankastre olarak bağlandığı kabul edilmiştir. Diğer tüm düğüm noktalarının ise bütün hareketleri serbest bırakılmıştır.

Isı transferi problemleri, program tarafından izin verilen sabit bir zaman aralığı için çözümlenebilmektedir. Toplam yangın süresinin, ısı çözümlenmede dikkate alınan zaman aralığına bölünmesi sonucunda elde edilen değer, çözümlenmede kullanılan adım sayısını

ifade etmektedir. Her bir adım için gerçekleştirilen modal analizler sonucunda, modelin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişim sıcaklık geçmişine bağlı olarak belirlenebilir.

### **2.3.3.2. Kolon Modeli Üzerinde Gerçekleştirilen Modal Analizler ve Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi**

ABAQUS programı kullanılarak, yangına tüm yan yüzeylerinden maruz kalan beton kolon modeli üzerinde gerçekleştirilen geçici rejimdeki ısı transferi analizleri, 3 saatlik yangın süresi boyunca, 15'er dakikalık zaman aralıkları ile 12 adımda çözümlenmişti. Her bir adım için gerçekleştirilen ısı çözümlenmeleri sonucunda, sonlu eleman modeli üzerinde bulunan düğüm noktalarına ait sıcaklık değişimleri ve model içinde oluşan sıcaklık dağılımları yaklaşık olarak elde edilmişti.

Isı transferi analizi sonucunda oluşan sonuç dosyasından yararlanılarak, her bir adım için gerçekleştirilen modal analizler sonucunda, modelin dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişim sıcaklık geçmişine bağlı olarak belirlenmiştir.

Kolon modeline ait dinamik karakteristikler; herhangi bir sıcaklık geçmişinin olmadığı duruma ek olarak, ISO 834 standart yangınına 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 ve 180 dakikalık maruz kalma durumları için gerçekleştirilen modal analizler sonucunda elde edilmiştir. 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip kolon modelinin ilk üç moduna ait doğal frekanslar, sıcaklık geçmişi parametresine ait 13 farklı durum dikkate alınarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 2.14'te verilmiştir.

Tablo 2.14'ün ilk satırında bulunan frekanslar, kolonun yangına maruz kalmadan önceki (oda koşullarındaki) doğal frekans değerleridir. Tablo 2.14'ten görüldüğü gibi; sıcaklık geçmişindeki artış, frekans değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Ayrıca, örnek kolon modelinin 1. ve 2. moduna ait frekans değerlerinin tüm sıcaklık geçmişleri için eşit olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu modlara ait frekans değerlerinin, yüksek sıcaklık etkisi altında gösterdikleri değişimlerin de eşit olduğu açıktır. Bu durum, kolonun enkesitine ait ölçülerin (300x300) eşit olmasından kaynaklanmaktadır. Kolon enkesitine ait ölçülerin eşit olmadığı modeller üzerinde gerçekleştirilen analizlerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu iki moda ait frekans değerlerinin ve frekanslarda meydana gelen değişimlerin farklı olduğu görülmüştür.

Tablo 2.14. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip beton kolon modelinin sıcaklık geçmişine bağlı olarak elde edilen ilk üç moduna ait doğal frekanslar

Sıcaklık Geçmişİ (dakika)	Frekans (Hz)		
	1.	2.	3.
-	19.330	19.330	116.210
15	16.200	16.200	97.866
30	14.242	14.242	86.291
45	12.815	12.815	77.799
60	11.682	11.682	71.018
75	10.788	10.788	65.660
90	10.009	10.009	60.971
105	9.318	9.318	56.804
120	8.698	8.698	53.050
135	8.146	8.146	49.706
150	7.647	7.647	46.682
165	7.182	7.182	43.860
180	6.751	6.751	41.236

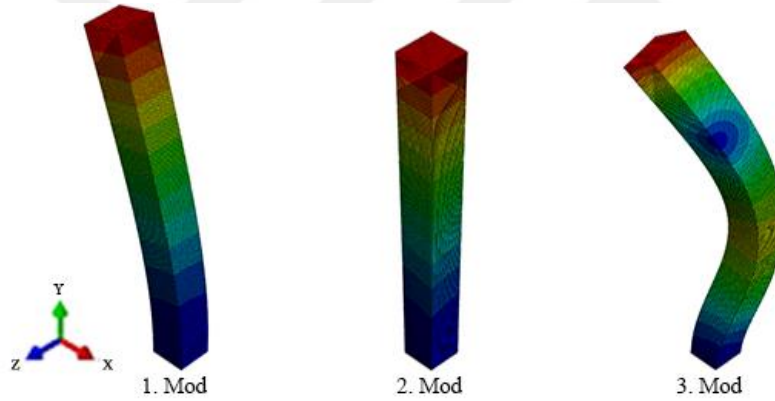
Tablo 2.15. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip beton kolon modelinin sıcaklık geçmişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekans azalma oranları

Sıcaklık Geçmişİ (dakika)	Frekans (Hz)	Frekans Azalma Oranı (%)
-	19.330	-
15	16.200	16.19
30	14.242	26.32
45	12.815	33.70
60	11.682	39.57
75	10.788	44.19
90	10.009	48.22
105	9.318	51.80
120	8.698	55.00
135	8.146	57.86
150	7.647	60.44
165	7.182	62.85
180	6.751	65.08

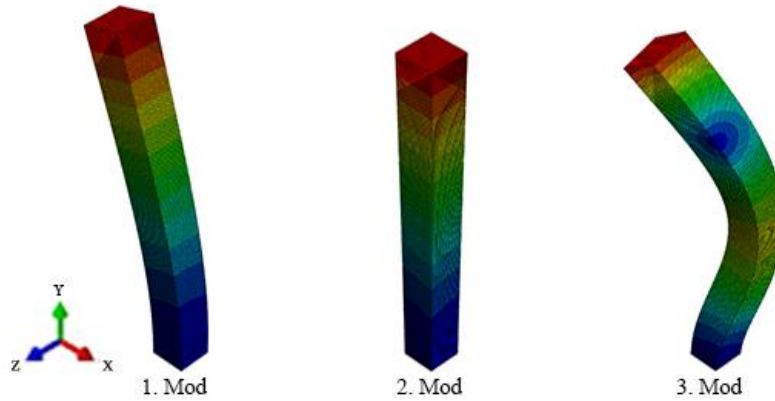
Bu tez çalışması kapsamında geliştirilen formülasyon ve sunulan grafik/abaklarda kolon modellerinin 1. moduna ait frekans değerlerindeki azalma yüzdeleri dikkate alınmıştır. 300x300 mm enkesit ölçülerine, 3 m yüksekliğe ve C25 beton sınıfına sahip kolon modelinin, tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart yangınına 3 saat boyunca maruz kalması durumunda, 1. moda ait doğal frekansta meydana gelen yüzdesel azalma, 15'er dakikalık zaman aralıkları için Tablo 2.15'te verilmiştir.

Tablo 2.15'ten, kolonun 1. moduna ait frekans değerinin 3 saat sonunda %65 oranında azaldığı görülmektedir.

Örnek kolon modeli için gerçekleştirilen modal analizlerden elde edilen mod şekilleri, sıcaklık geçmişinin olmadığı durum ve ISO 834 standart yangınına 3 saat (180 dakika) maruz kalma durumu için karşılaştırmalı olarak. Elde edilen mod şekilleri sırasıyla Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'da verilmiştir.



Şekil 2.15. Sıcaklık geçmişinin olmadığı durum için kolon modeline ait ilk üç mod şekli



Şekil 2.16. ISO 834 standart yangınına 180 dakika maruz kalan kolon modeline ait ilk üç mod şekli

Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'dan görüldüğü gibi, her iki durum içinde mod şekilleri aynı olmaktadır. Dolayısıyla, kolon modelinin yangına maruz kalması sonucunda mod şekillerinin değişmediği kanaatine varılmıştır.

Bu durumun, yangının kolonların tüm yan yüzeylerine üniform bir şekilde etkimesine nedeniyle oluşan simetrik etkiden kaynaklandığı düşünülebilir. Ancak, yangının kolon yüzeylerine simetrik bir şekilde etkilediği durumlar için gerçekleştirilen analiz sonuçları incelendiğinde yine aynı mod şekilleri elde edilmiştir. Böylece mod şekillerinin yüksek sıcaklıklardan belirgin bir şekilde etkilenmediği görülmüştür.

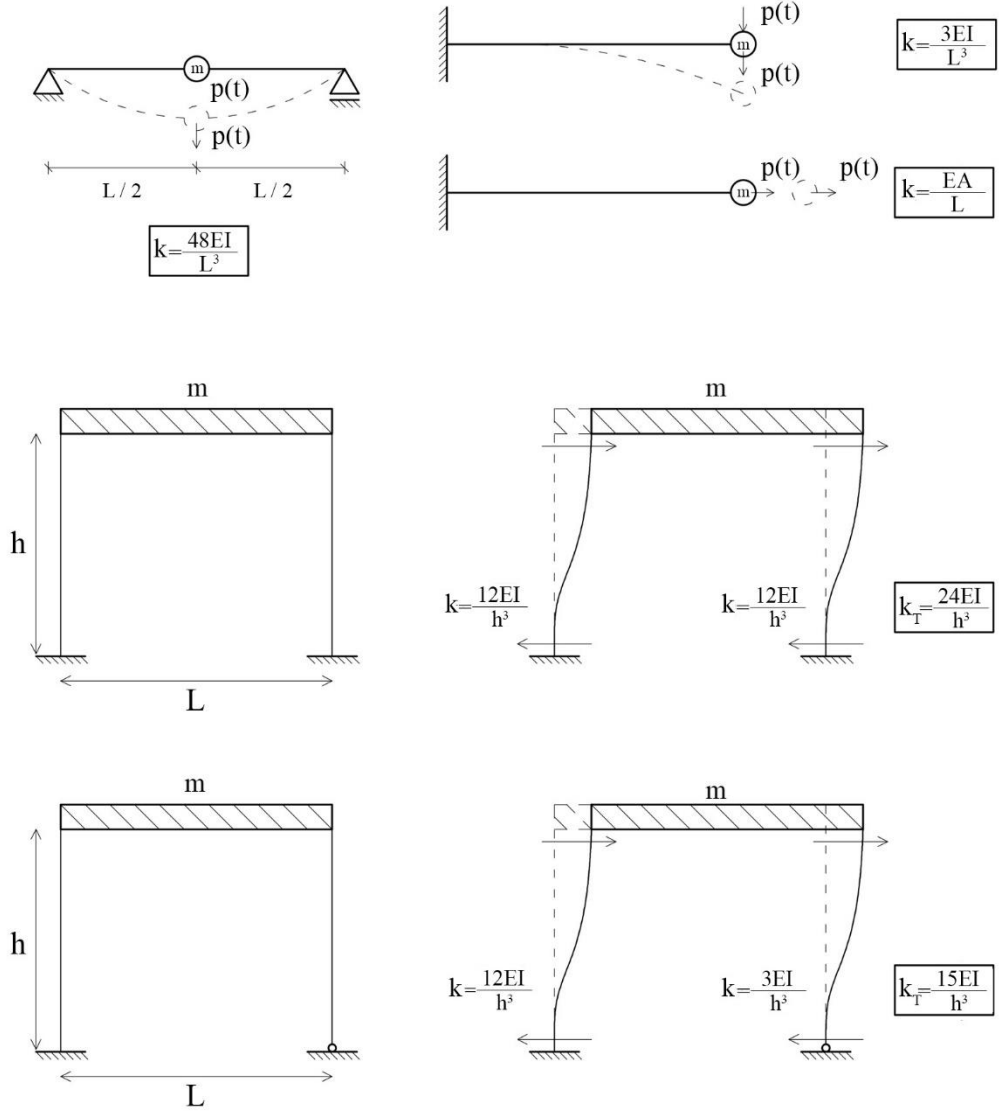
#### **2.3.4. Değişken Parametrelerin Analiz Sonuçlarına Etkileri**

Taşıyıcı sistem elemanlarının doğal frekanslarının kütle ve rijitliğe, rijitliğin ise eleman boyutları ve elemanda kullanılan malzemenin elastisite modülüne bağlı olduğu bilinen bir gerçektir. Dolayısıyla, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan taşıyıcı sistem elemanlarının doğal frekanslarında meydana gelen değişimler, yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle kütle ve rijitliklerinde meydana gelen azalmalara bağlı olarak gerçekleşmektedir. Bu durum, çalışmada dikkate alınan parametrelerin seçiminde belirleyici olmuştur. Bazı sistemlerin rijitlikleri Şekil 2.17'de verilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme elemanlarda meydana gelen kütle kaybı, zamanla artan beton sıcaklığı ile birlikte; betonun özgül ağırlığının azalması, elemanda kavlanmanın gerçekleşmesi gibi nedenlerle gerçekleşmektedir. Özgül ağırlıktaki azalma, yüksek sıcaklık etkisiyle beton içindeki suyun buharlaşması nedeniyle meydana gelmektedir. Yapı elemanlarının kesitlerinde azalmaya neden olan kavlanma ise hem kütle hem de rijitlik kaybına neden olmaktadır. Ancak, bu çalışmada kavlanma etkileri ihmal edilmiştir. Dolayısıyla, betonarme elemanlarda sıcaklık geçişine bağlı olarak oluşan kütle kaybı yalnızca özgül ağırlıktaki azalma ile temsil edilmiştir. Rijitlik kaybı ise kullanılan beton sınıfına bağlı olarak farklı başlangıç değerleri alan elastisite modülünün, yüksek sıcaklık etkisi ile azalması ile temsil edilmektedir. Kütle kaybı frekanslarda artışa neden olurken, rijitlik kaybı ise frekanslarda azalmaya neden olmaktadır.

Bu çalışmada; farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçişi parametreleri dikkate alınarak 5530 adet analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sonuçlarına bağlı olarak oluşturulan formülasyon ve grafik/abaklara ilerleyen bölümlerde yer verilmiştir. Bu formülasyon ve grafik/abaklar, tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart

yangınına maruz kalan kolonların 1. Modlarına ait doğal frekans değerlerinde meydana gelen azalma dikkate alınarak üretilmiştir.



Şekil 2.17. Bazı sistemlerin rijitlikleri

Değişken parametrelerin, kolonların doğal frekansları üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde, enkesitinin kısa kenar ölçüsü 400 mm olan kolonlar üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen verilerden yararlanılmıştır.

Tablo 2.16 ve 2.17’de verilen değerlerin incelenmesiyle, kolonlarda kullanılan beton sınıfının doğal frekanslardaki değişime etkisi, Tablo 2.18 ve 2.19’da verilen değerlerin incelenmesiyle de kolon enkesit boyutlarının doğal frekanslardaki değişime etkisinin



değerlendirilmek istenmiştir. Bu amaçla, 400x400 mm enkesit boyutlarına sahip bir kolonda farklı beton sınıflarının kullanılması durumunda, sıcaklık geçmişi dikkate alınarak elde edilen frekans değerleri Tablo 2.16’da verilirken, Tablo 2.17’de ise bu değerlerdeki yüzdesel azalmaya yer verilmiştir. Tablo 2.18’de ise C25 beton sınıfının kullanıldığı, kısa kenar ölçüsü 400 mm olan 15 farklı kolon enkesiti için gerçekleştirilen analizler sonucunda sıcaklık geçmişi dikkate alınarak elde edilen frekans değerleri verilirken, bu değerlerdeki yüzdesel azalmaya Tablo 2.19’da yer verilmiştir. Çalışmada kullanılan tüm kolonların yüksekliğinin 3 m olduğu ve bu kolonların tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart yangınına 3 saat boyunca maruz kaldığı göz önünde bulundurulmalıdır.

Tablo 2.16. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan, 400x400 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip kolon modelinin 6 farklı beton sınıfı için sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslar

Sıcaklık Geçmişi (dakika)	Frekans (Hz)					
	Beton Sınıfı					
	C25	C30	C35	C40	C45	C50
-	25.609	26.449	26.859	27.263	28.053	28.440
15	22.244	22.974	23.329	23.680	24.368	24.704
30	19.909	20.560	20.880	21.194	21.809	22.110
45	18.330	18.931	19.224	19.513	20.080	20.357
60	17.083	17.643	17.916	18.186	18.714	18.972
75	16.024	16.549	16.806	17.059	17.554	17.796
90	15.115	15.610	15.852	16.091	16.557	16.786
105	14.329	14.798	15.028	15.254	15.696	15.913
120	13.685	14.133	14.352	14.568	14.991	15.198
135	13.075	13.504	13.713	13.920	14.323	14.521
150	12.512	12.922	13.123	13.320	13.706	13.896
165	11.988	12.381	12.573	12.762	13.132	13.313
180	11.486	11.862	12.046	12.228	12.582	12.755

Tablo 2.16’den, sıcaklık geçişinin olmadığı durum için elde edilen 1. moda ait başlangıç frekans değerlerinin daha büyük olduğu görülmüştür. Sıcaklık geçişindeki artış ile birlikte farklı beton sınıflarının dikkate alındığı analizlerden elde edilen tüm frekans değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Oluşturulan formülasyon ve grafik/abaklarda sıcaklık geçmişindeki artışa bağlı olarak bu değerlerdeki yüzdesel azalmalar dikkate alınmıştır. Tablo 2.16’da aynı enkesit ölçülerine sahip bir kolon için farklı beton sınıflarının kullanılması durumu için verilen frekans değerlerinin, artan sıcaklık geçmişine bağlı olarak gösterdiği yüzdesel azalma incelendiğinde; bu değerlerdeki azalma yüzdelerinin neredeyse eşit olduğu görülmüştür. Bu durum, dikkate alınan beton sınıflarından sırasıyla en düşük ve en yüksek elastisite modülü değerine sahip olan C25 ve C50 beton sınıfının kullanıldığı kolon için elde edilen sonuçlar üzerinde yapılan karşılaştırmaya bağlı olarak Tablo 2.17’de verilmiştir.

Tablo 2.17. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan, 400x400 mm enkesit ölçülerine ve 3 m yüksekliğe sahip kolon modelinin farklı beton sınıfları için sıcaklık geçmişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslarda meydana gelen yüzdesel azalma oranları

Sıcaklık Geçmişi (dakika)	Frekans (Hz)		Frekans Azalma Oranı (%)	
	Beton Sınıfı		Beton Sınıfı	
	C25	C50	C25	C50
-	25.609	28.440	-	-
15	22.244	24.704	13.140	13.136
30	19.909	22.110	22.258	22.257
45	18.330	20.357	28.424	28.421
60	17.083	18.972	33.293	33.291
75	16.024	17.796	37.428	37.426
90	15.115	16.786	40.978	40.977
105	14.329	15.913	44.047	44.047
120	13.685	15.198	46.562	46.561
135	13.075	14.521	48.944	48.942
150	12.512	13.896	51.142	51.139
165	11.988	13.313	53.188	53.189
180	11.486	12.755	55.149	55.151

Kolon enkesit boyutlarının, kolonların rijitliklerinde önemli rol oynadığı ve artan enkesit boyutlarının, kolon rijitliklerine artışa neden olduğu bilinen bir gerçektir. Bu çalışmada dikkate alınan parametrelerden biri olan kolon enkesit boyutlarının doğal frekanslara etkisini incelemek amacıyla, beton sınıfı ve kolon enkesitine ait kısa kenar uzunluğu sabit tutularak 15 farklı kolon enkesiti için gerçekleştirilen analiz sonuçları incelenmiştir. Beton sınıfının C25, kolon kısa kenarının ise 400 mm olduğu 15 farklı kolon

enkesiti için sıcaklık geçmişi dikkate alınarak gerçekleştirilen analizlerden elde edilen 1. moda ait frekans değerleri Tablo 2.18’de verilmiştir.

Tablo 2.18’den görüldüğü gibi; aynı beton sınıfının kullanıldığı, eşit yüksekliğe ve farklı enkesit alanlarına sahip kolon modellerinin, enkesit alanlarındaki artış ile birlikte rijitlikleri de artmaktadır. Ayrıca, farklı enkesit alanlarına sahip bu kolon modelleri üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen veriler, sıcaklık geçmişindeki artış ile birlikte, tüm frekans değerlerinin azaldığını göstermektedir. Sıcaklık geçişine bağlı olarak bu frekans değerlerindeki azalma yüzdeleri Tablo 2.19’da verilmiştir.

Tablo 2.18. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan enkesitine ait kısa kenar uzunluğu 40 cm olan, 3 m yüksekliğindeki 15 farklı kolon modelinin sıcaklık geçişine bağlı olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslar

Kolon Enkesit Boyutları (cm)	Frekans (Hz)						
	Sıcaklık Geçmişi (dakika)						
	-	30	60	90	120	150	180
40 x 40	25.609	19.909	17.083	15.115	13.685	12.512	11.486
40 x 50	25.622	20.192	17.500	15.627	14.258	13.158	12.192
40 x 60	25.636	20.382	17.776	15.961	14.630	13.573	12.643
40 x 70	25.651	20.522	17.974	16.199	14.893	13.864	12.957
40 x 80	25.666	20.629	18.124	16.378	15.089	14.081	13.190
40 x 90	25.681	20.715	18.243	16.519	15.243	14.249	13.370
40 x 100	25.697	20.787	18.340	16.632	15.367	14.385	13.514
40 x 110	25.712	20.848	18.421	16.727	15.469	14.496	13.633
40 x 120	25.727	20.900	18.490	16.807	15.556	14.590	13.732
40 x 130	25.742	20.946	18.550	16.876	15.630	14.670	13.817
40 x 140	25.756	20.987	18.603	16.935	15.694	14.739	13.890
40 x 150	25.769	21.023	18.649	16.988	15.750	14.800	13.954
40 x 160	25.782	21.055	18.690	17.035	15.800	14.853	14.011
40 x 170	25.794	21.085	18.727	17.076	15.844	14.901	14.061
40 x 180	25.805	21.111	18.760	17.114	15.884	14.944	14.105

Tablo 2.19’da verilen frekans azalma oranları eşit sıcaklık geçmişi süreleri için incelendiğinde; kolon enkesitine ait uzun kenar ölçülerindeki artış ile birlikte frekanslardaki azama oranlarının azaldığı görülmektedir. Bu durum, farklı enkesit boyutlarına sahip iki kolonun, yüksek sıcaklığa eşit süre maruz kalmaları durumunda, enkesiti diğerine göre daha küçük olan kolonun enkesiti içindeki sıcaklık artışının daha hızlı olması ile açıklanabilir. Bu durumda, kolon enkesiti içinde seçilen belirli bir noktadaki beton sıcaklığı, enkesiti küçük olan kolonda daha fazla olmaktadır. Dolayısıyla

bu iki kolondan, enkesiti daha küçük olan kolon yüksek sıcaklıklardan daha fazla etkilenmektedir.

Tablo 2.19. Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan enkesitine ait kısa kenar uzunluğu 40 cm olan, 3 m yüksekliğindeki 15 farklı kolon modelinin sıcaklık geçmişiyle ilgili olarak elde edilen 1. moduna ait doğal frekanslarda meydana gelen yüzdesel azalma oranları

Kolon Enkesit Boyutları (cm)	Frekans Azalma Oranı (%)					
	Sıcaklık Geçmişi (dakika)					
	30	60	90	120	150	180
40 x 40	22.26	33.29	40.98	46.56	51.14	55.15
40 x 50	21.19	31.70	39.01	44.35	48.65	52.42
40 x 60	20.49	30.66	37.74	42.93	47.05	50.68
40 x 70	20.00	29.93	36.85	41.94	45.95	49.49
40 x 80	19.63	29.39	36.19	41.21	45.14	48.61
40 x 90	19.34	28.96	35.68	40.64	44.52	47.94
40 x 100	19.11	28.63	35.28	40.20	44.02	47.41
40 x 110	18.92	28.36	34.94	39.84	43.62	46.98
40 x 120	18.76	28.13	34.67	39.53	43.29	46.62
40 x 130	18.63	27.94	34.44	39.28	43.01	46.33
40 x 140	18.52	27.77	34.25	39.07	42.77	46.07
40 x 150	18.42	27.63	34.08	38.88	42.57	45.85
40 x 160	18.33	27.51	33.93	38.72	42.39	45.66
40 x 170	18.26	27.40	33.80	38.57	42.23	45.49
40 x 180	18.19	27.30	33.68	38.45	42.09	45.34

### 2.3.5. Geliştirilen Formülasyon ve Sunulan Grafik/Abaklar

Bu bölümde, çalışmada gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına dayalı olarak üretilen formülasyon ve grafik/abaklara yer verilmiştir. Bu bölümde sunulan formülasyon ve grafik/abaklar yardımıyla, yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkilerinden dolayı yapıda oluşacak dinamik karakteristik değişimlerinin pratik bir şekilde belirlenmesi, hasar tahminlerinin yapılması ve rijitlik değişimlerine bağlı kullanım durumlarının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Çalışmada gerçekleştirilen analizler için tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart yangınına maruz kalan, 3 m yüksekliğindeki kolon modelleri kullanılmıştır. Bu analizlerde; farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi değişken parametre olarak seçilmiş ve bunun sonucunda 5530 adet çözümlenmeye ihtiyaç duyulmuştur. Formülasyon

ve grafik/abakların oluşturulmasında, bu analizler sonucunda elde edilen veri havuzundan yararlanılmıştır. Formülasyon ve grafik/abaklar, dikkate alınan parametrelerdeki değişime bağlı olarak farklılık gösteren kolon modellerinin dinamik karakteristiklerindeki değişimler dikkate alınarak oluşturulmuştur. Oluşturulan formülasyon ve grafik/abaklarda, sıcaklık geçmişindeki artışa bağlı olarak, kolon modellerinin 1. modlarına ait doğal frekanslarında meydana gelen yüzdesel azalma oranları esas alınmıştır.

Çoklu analiz sonuçlarından elde edilen verilere dayalı olarak geliştirilen formülasyon yardımıyla, grafik/abaklarda yer almayan enkesit boyutlarına sahip kolonlar için sıcaklık geçmişi ve malzeme özelliği parametrelerine ait değerler kullanılarak bu kolonların 1. modlarına ait doğal frekansları belirlenebilir.

$$f_1 = -10.870475 + 57.4768886X + 0.76536335Y + 3.5029e^{-10}Z - 0.0011479T \quad (2.3)$$

Burada; X ve Y sırasıyla enkesite ait kısa ve uzun kenar ölçülerini (m), Z kullanılan beton sınıfına bağlı elastisite modülünü (Pa), T ise sıcaklık geçmişi (saniye) temsil etmektedir.

Böylece, kolonun ilgili sıcaklık geçmişi için elde edilen doğal frekans değeri ile başlangıç doğal frekans değeri ( $T=0$ ) arasında kurulan oran yardımıyla, kolonun 1. moduna ait doğal frekansında meydana gelen yüzdesel azalma oranı belirlenebilir.

### 2.3.5.1. Grafik/Abakların Oluşturulması

Bu bölümde, gerçekleştirilen çoklu analiz sonuçlarına dayalı olarak üretilen grafik/abaklara yer verilmiştir.

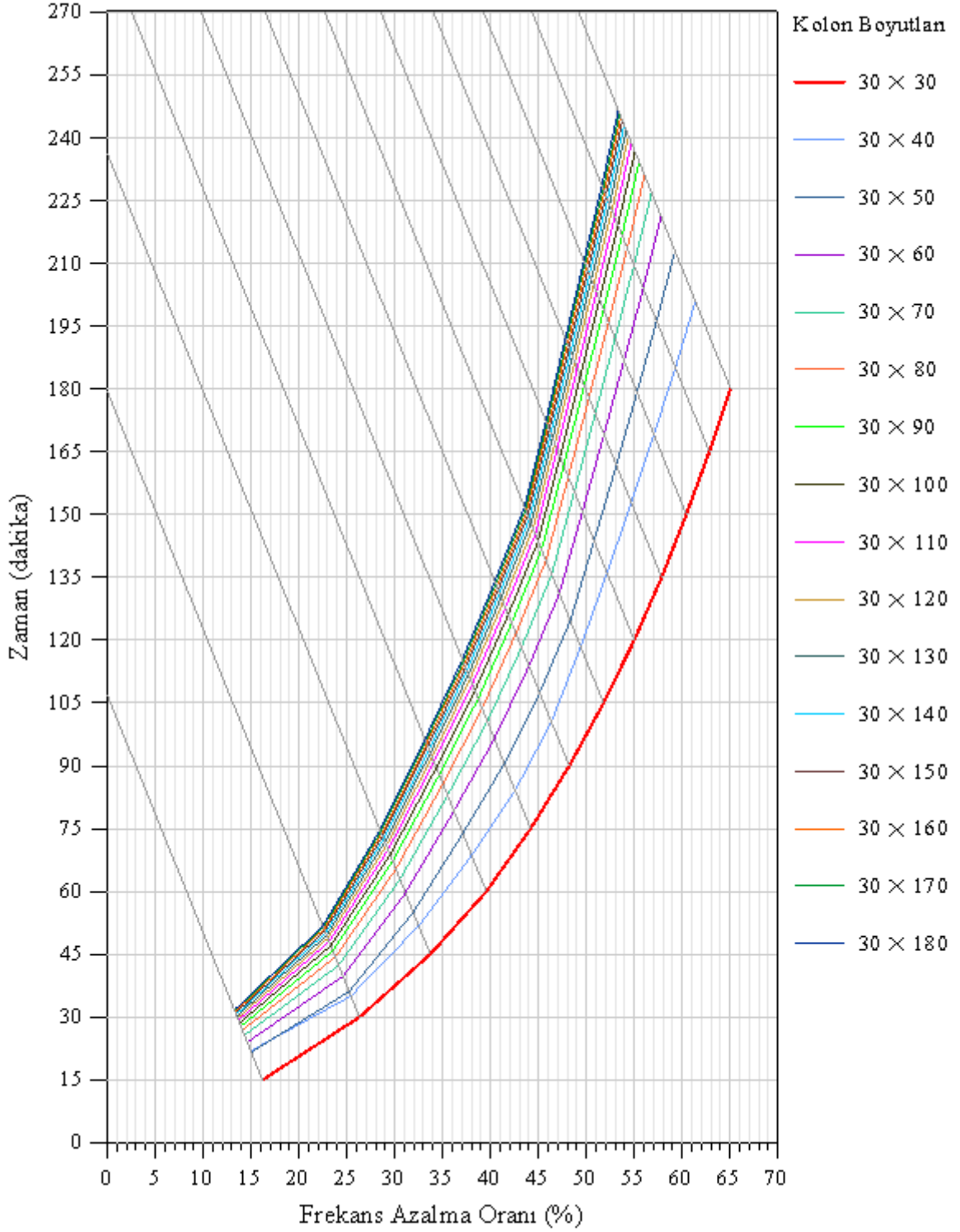
Daha önce belirtildiği gibi, bu çalışmada; farklı enkesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi değişken parametreler olarak seçilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde ise 70 farklı kolon enkesit boyutu, 6 farklı beton sınıfı ve 13 farklı sıcaklık geçmişi dikkate alınmıştır. Bu durumda gerçekleştirilen 5530 adet çözümlene sonucunda büyük bir veri havuzu oluşmuştur. Tüm bu verilerin tek bir grafik/abak ile ifade edilmesi durumunda, verilerin okunamaması probleminin önüne geçmek için grafik/abaklar gruplara ayrılarak oluşturulmuştur.

Grafik/abakların gruplandırılması, kolon enkesit boyutları ve malzeme özellikleri dikkate alınarak yapılmıştır. Enkesit boyutları dikkate alınarak yapılan gruplandırmada, kolon enkesitlerine ait kısa kenar uzunlukları esas alınmıştır. Kolon enkesit boyutlarına ait kısa kenar ölçülerinin 30 cm'den başladığı ve 10'ar cm'lik artışlarla 70 cm'ye kadar, uzun kenar ölçülerinin ise 30 cm'den başladığı ve yine 10'ar cm'lik artışlarla 180 cm'ye kadar artış gösterdiği belirtilmiştir. Dolayısıyla kolon enkesitlerine ait kısa kenar uzunlukları (30, 40, 50, 60, 70 cm) esas alınarak yapılan gruplandırma sonucunda 5 grafik/abak ortaya çıkacaktır. Diğer bir gruplandırmanın da 6 farklı beton sınıfı için dikkate alınması nedeniyle bu iki gruplandırma sonucunda 30 adet grafik/abak oluşturulmuştur. Oluşturulan grafik/abaklar Şekil 2.18 – 2.47'de sunulmaktadır.

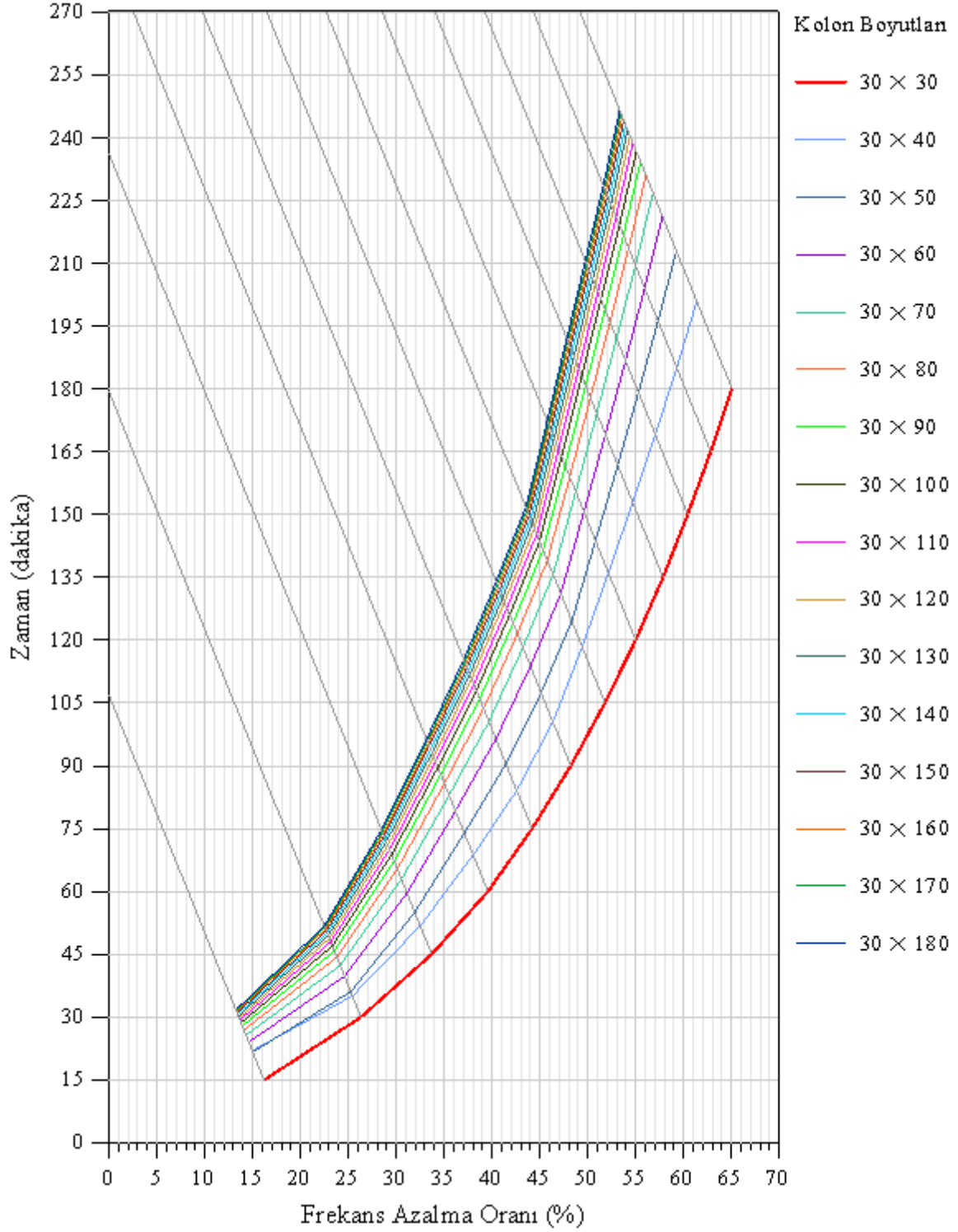
Grafik/abaklar oluşturulurken; seçilen bir kısa kenar ölçüsü için bu kısa kenar ölçüsüne sahip kolon modelleri içinden en küçük enkesit alanına sahip (kare enkesitli) kolon modelinin, artan sıcaklık geçmişi ile birlikte 1. moduna ait doğal frekansındaki yüzdesel azalma oranını ifade eden eğri referans olarak alınmıştır. Yani, verilen grafik/abaklar üzerinde yer alan eğriler içinde ilk olarak çizilen eğriler bu modellere ait referans eğrileridir.

Referans eğriler üzerinde dikkate alınan 12 sıcaklık geçmişi için elde edilen frekans azalma oranlarına karşılık gelen noktalardan, sabit bir eğime sahip rastgele doğrular (yardımcı çizgiler) çizilmiştir. Bu doğrular çizilirken, sonuçların grafik/abak eksenleri içinde yer alan bölgede kalmasına özen gösterilmiştir. Bu yardımcı çizgiler, referans model enkesitine ait kenar ölçüsü ile aynı kısa kenar ölçülerine sahip diğer kolon modelleri için, sıcaklık geçişini ifade etmektedir. Grafik/abakların her birinde 12 adet yardımcı çizgi bulunmaktadır. Bu çizgiler soldan sağa doğru sırasıyla; 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165 ve 180 dakikalık sıcaklık geçişini temsil etmektedir.

Referans kolonlara ait eğriler dışında kalan, kısa kenar ölçülerinin referans kolona ait kısa kenar ölçülerine eşit olduğu diğer kolonlara ait eğriler oluşturulurken, her bir sıcaklık geçmişi için, bu kolonlar üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen azalma yüzdeleri, ilgili sıcaklık geçişlerine ait yardımcı çizgiler üzerinde konumlandırılmıştır.

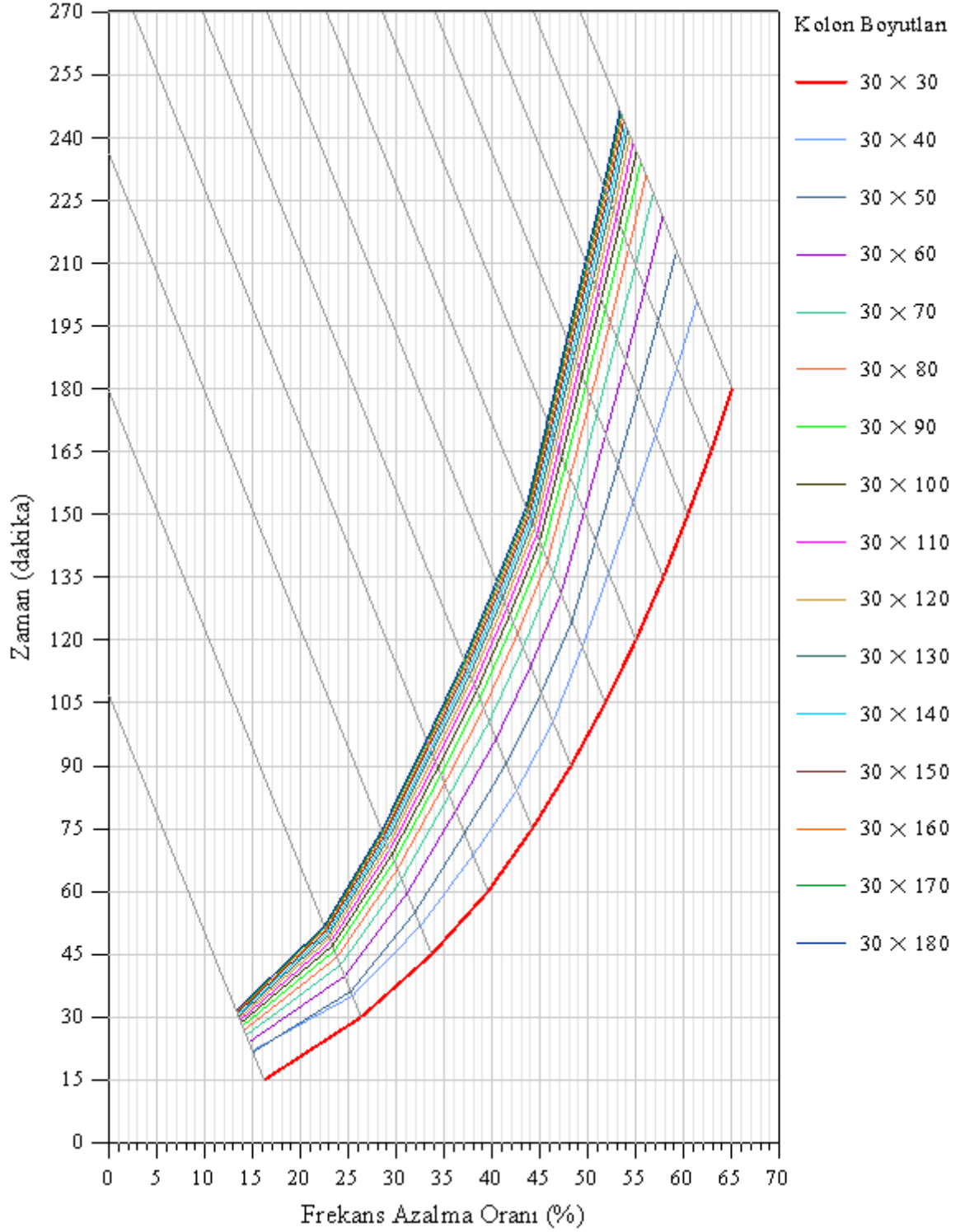


Şekil 2.18. C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

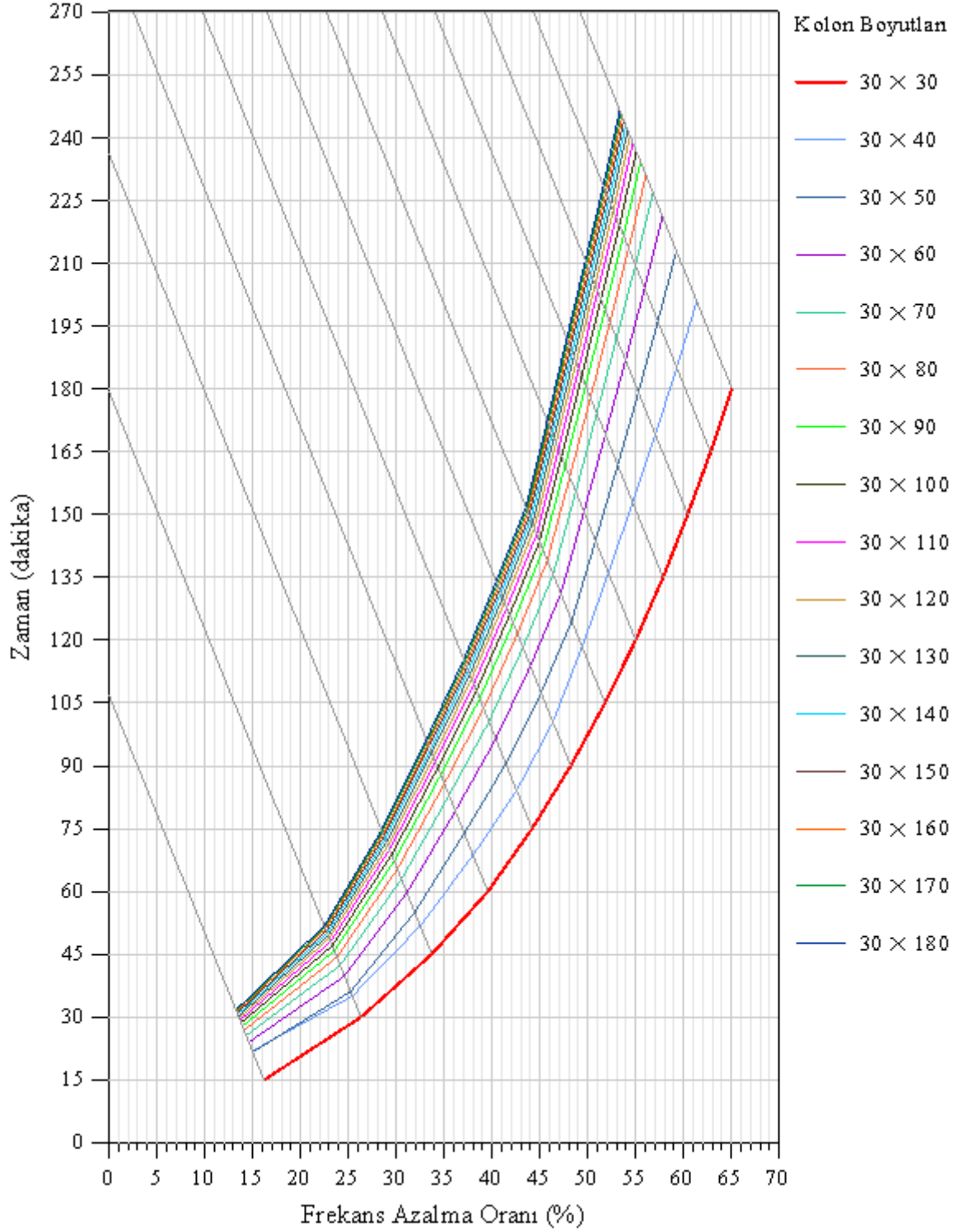


Şekil 2.19. C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

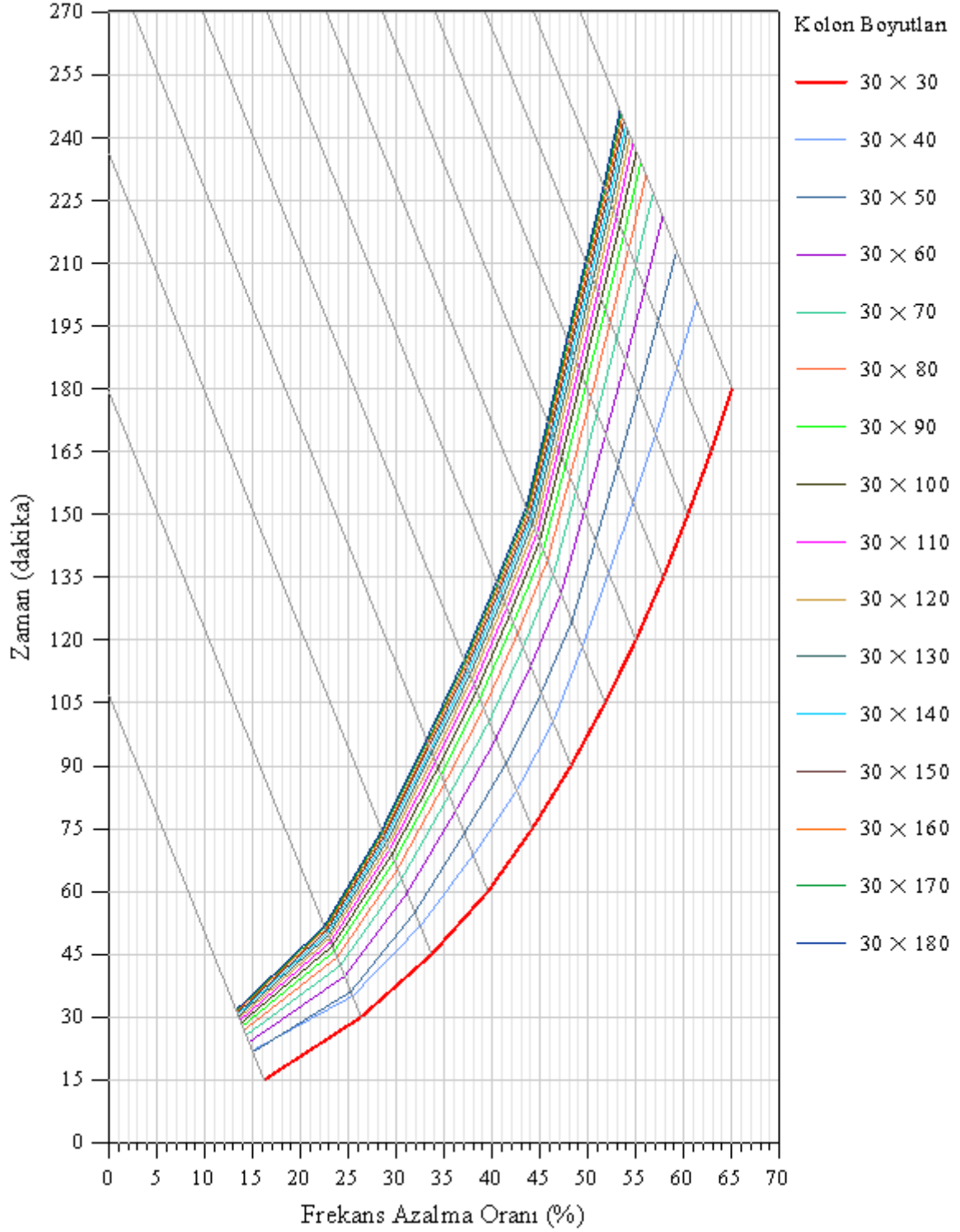




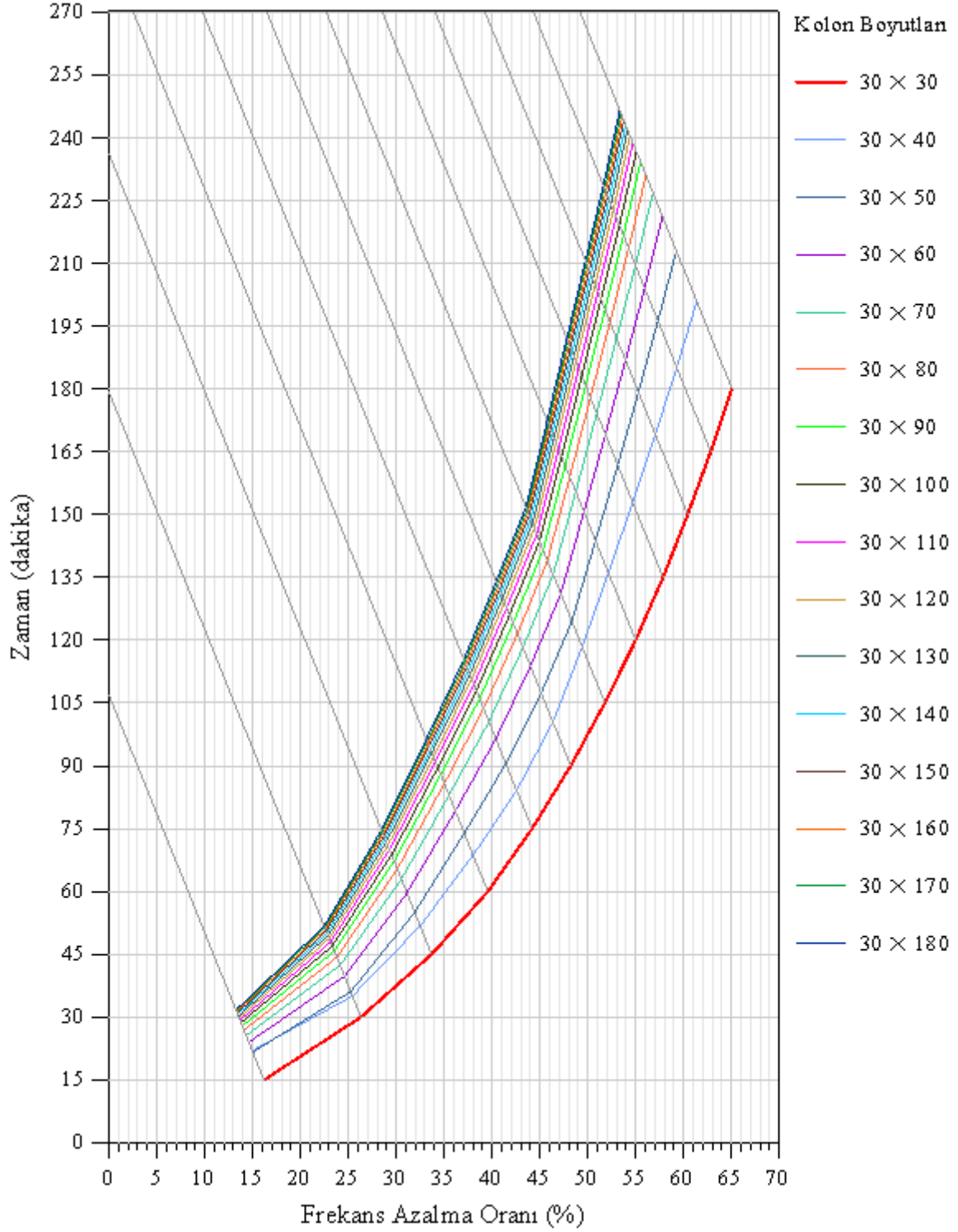
Şekil 2.20. C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



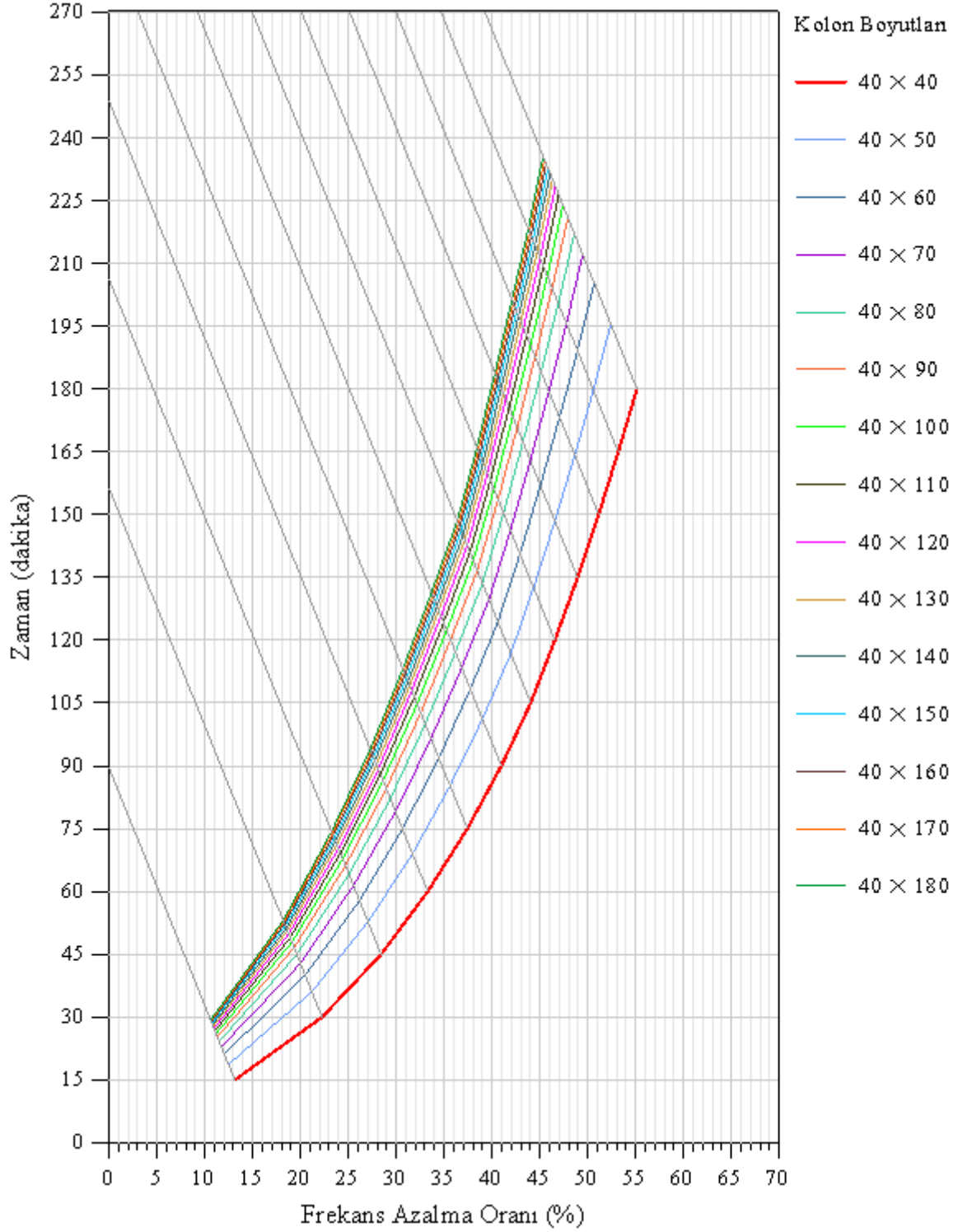
Şekil 2.21. C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



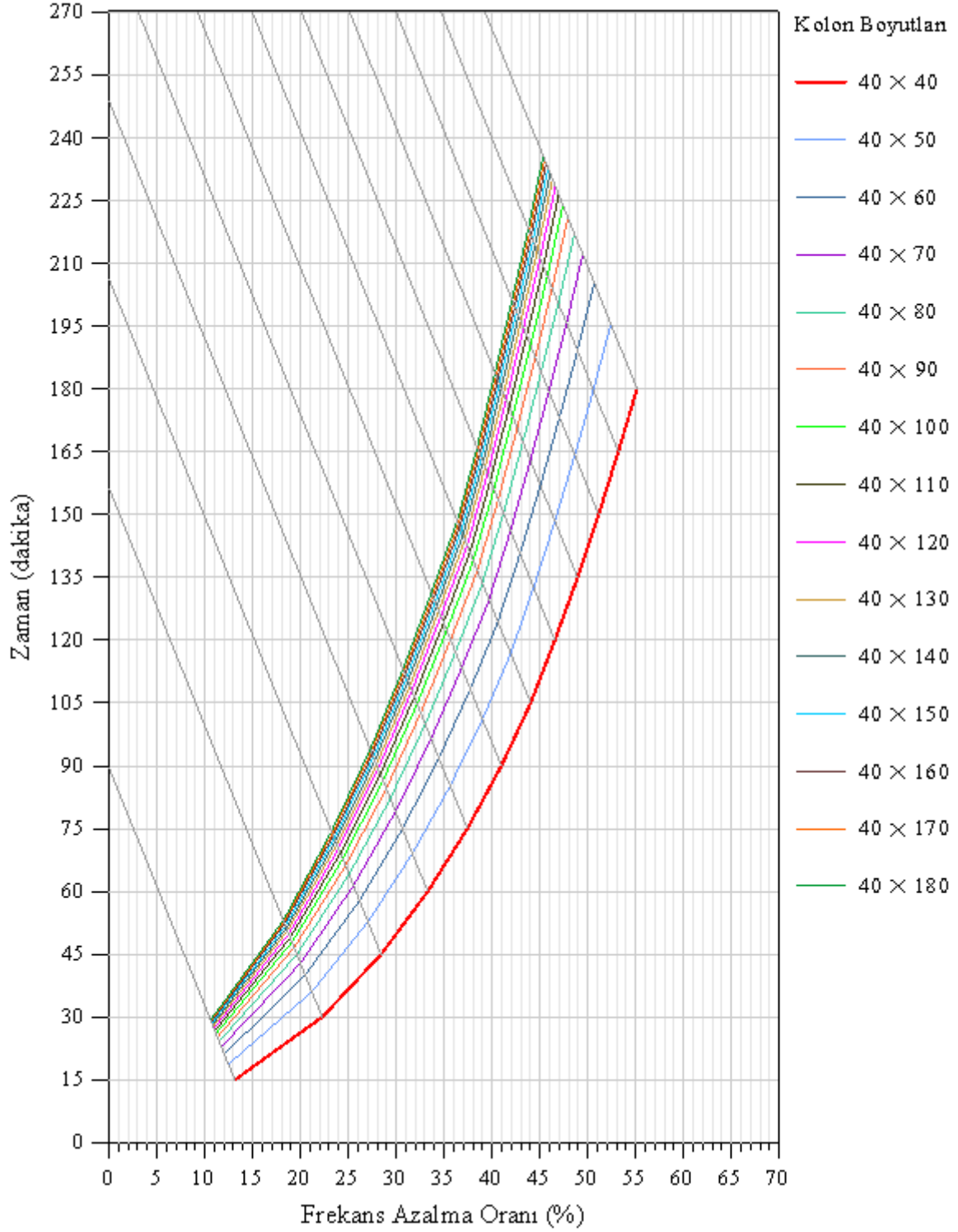
Şekil 2.22. C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



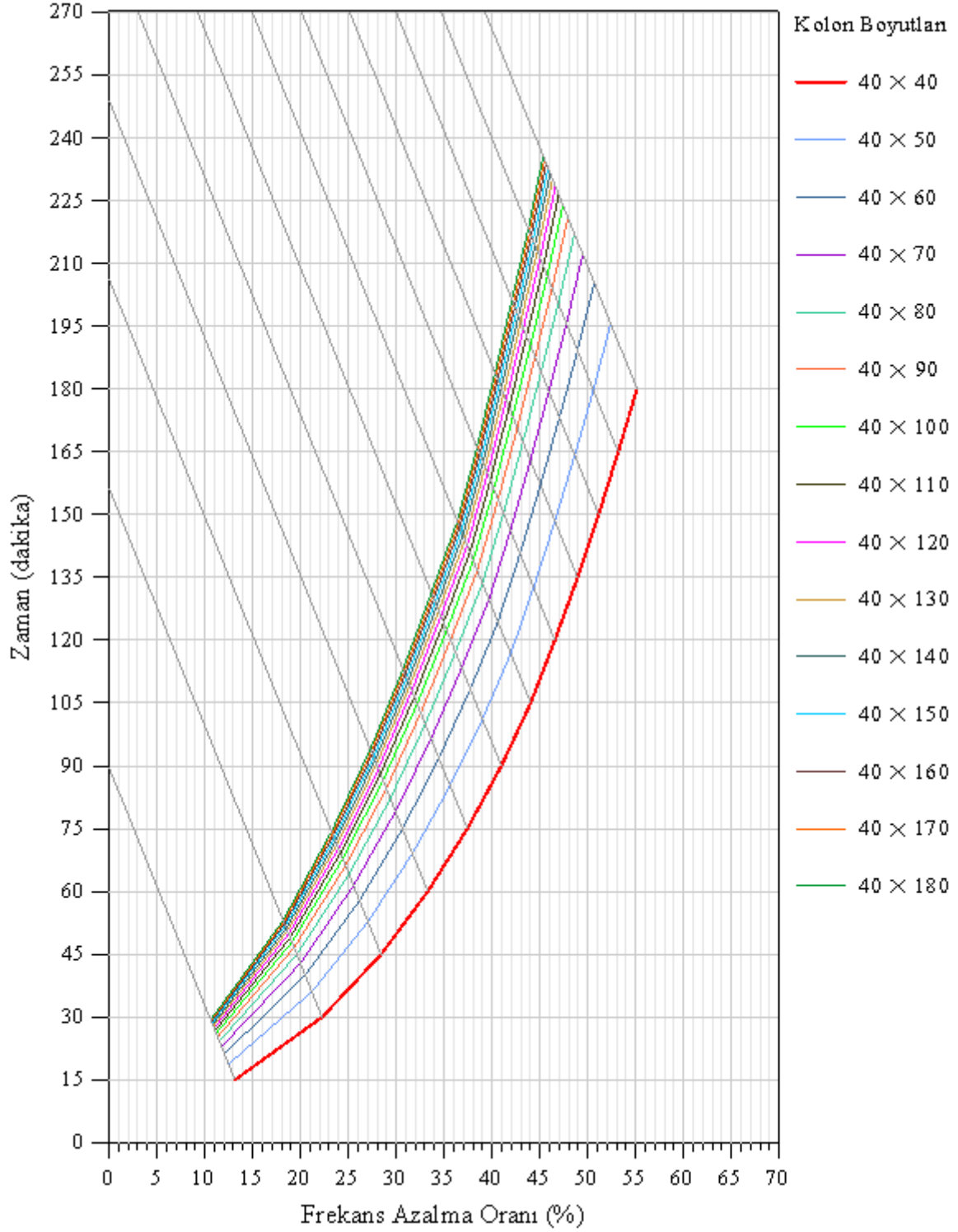
Şekil 2.23. C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 30 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 16 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



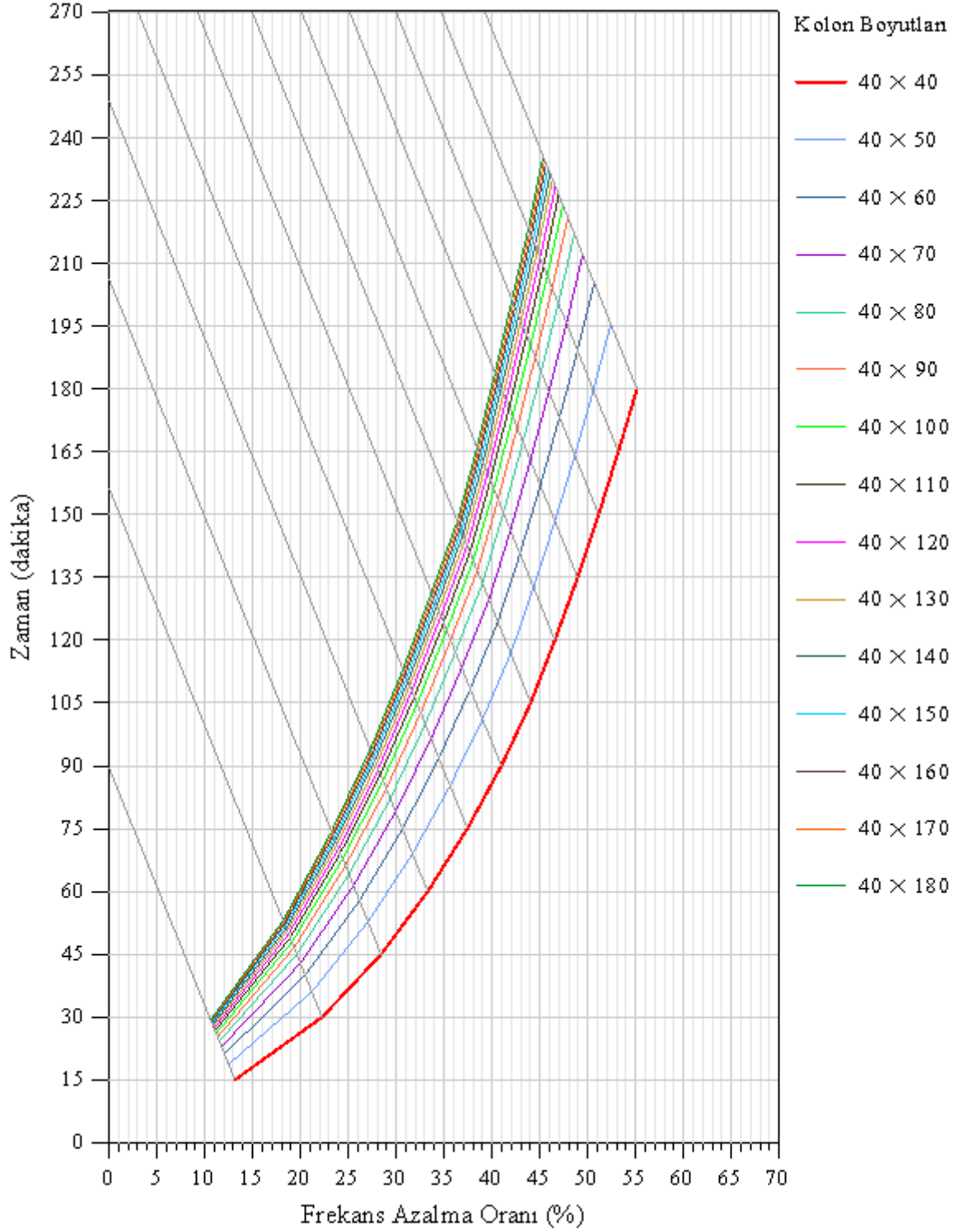
Şekil 2.24. C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.25. C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

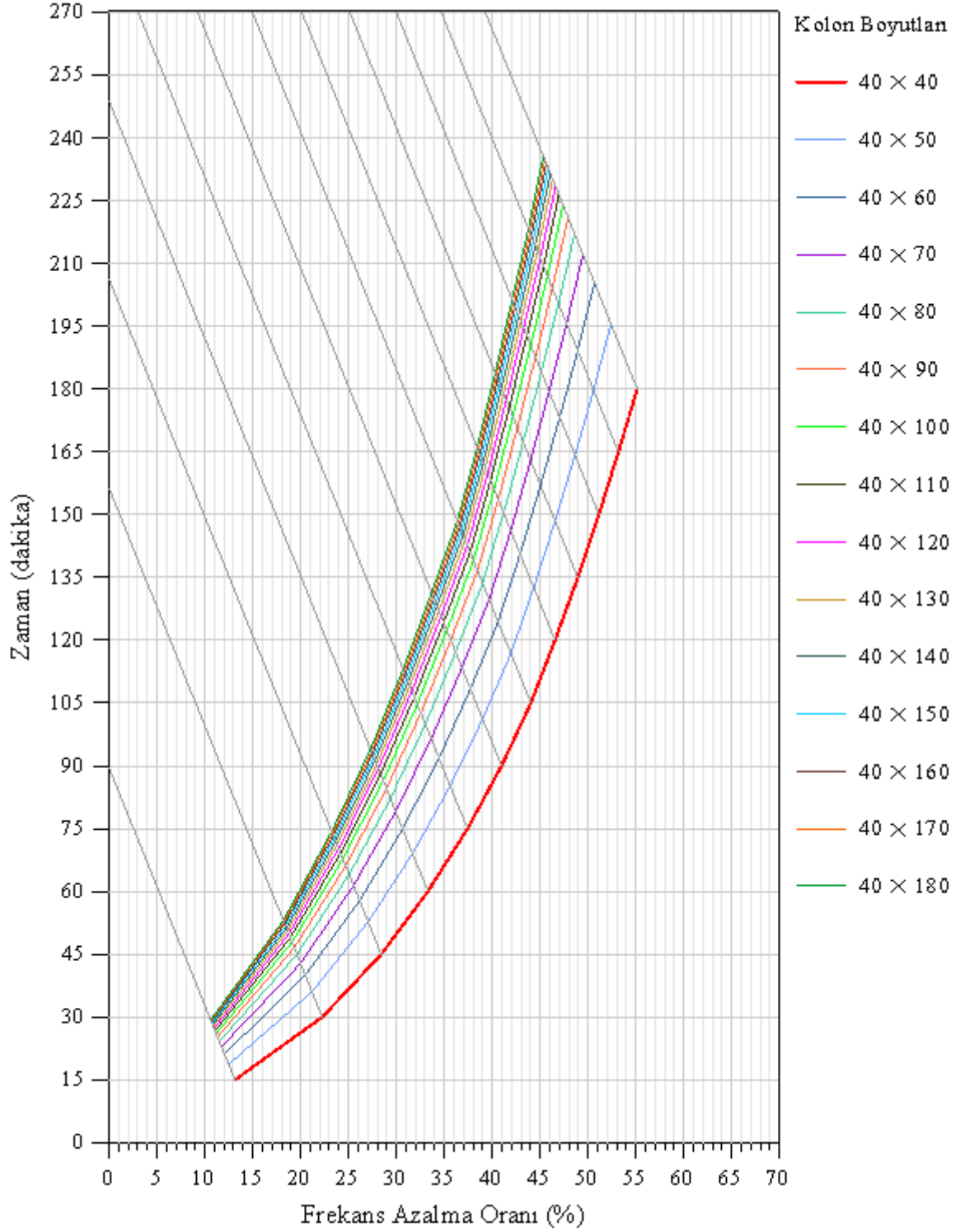


Şekil 2.26. C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

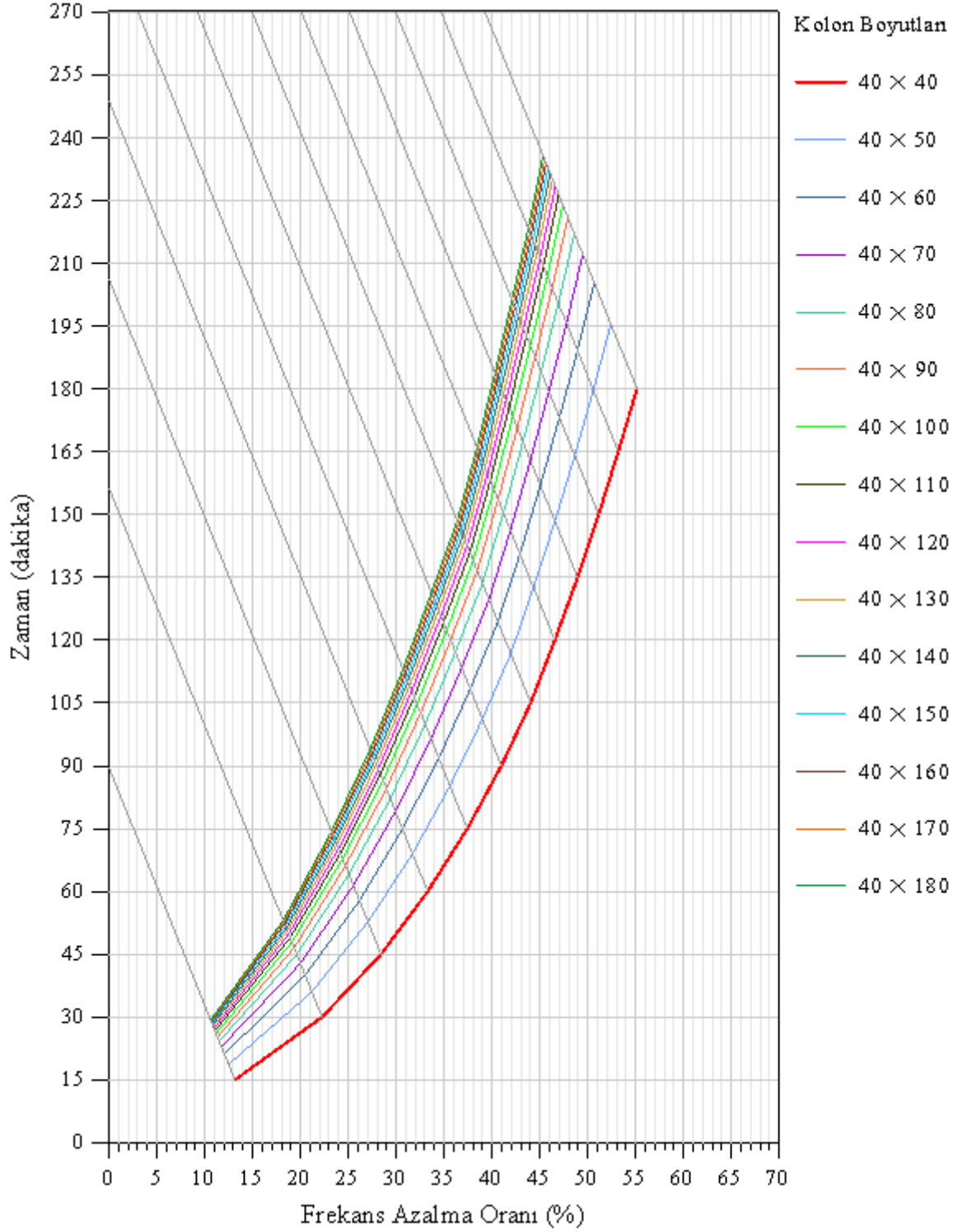


Şekil 2.27. C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

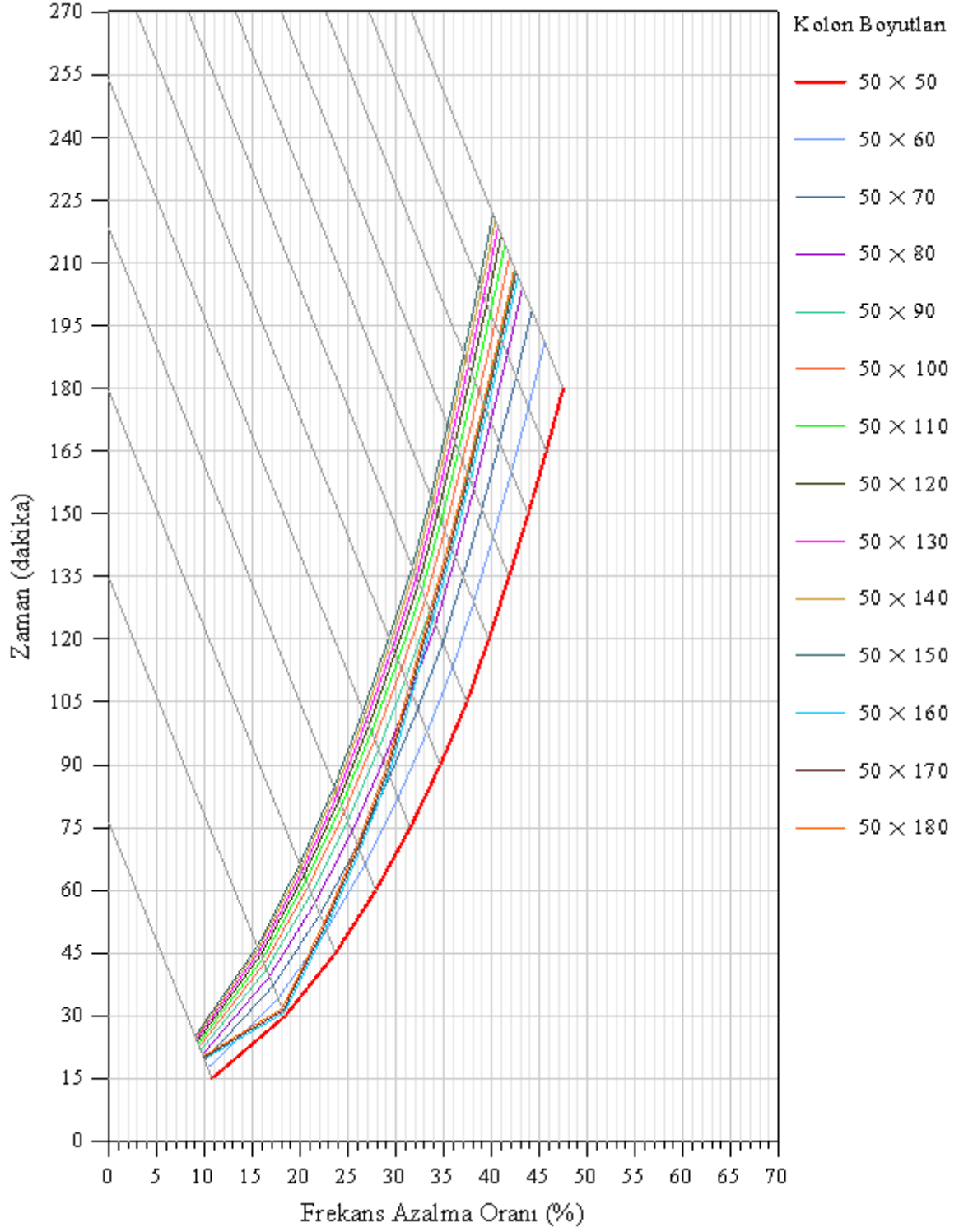




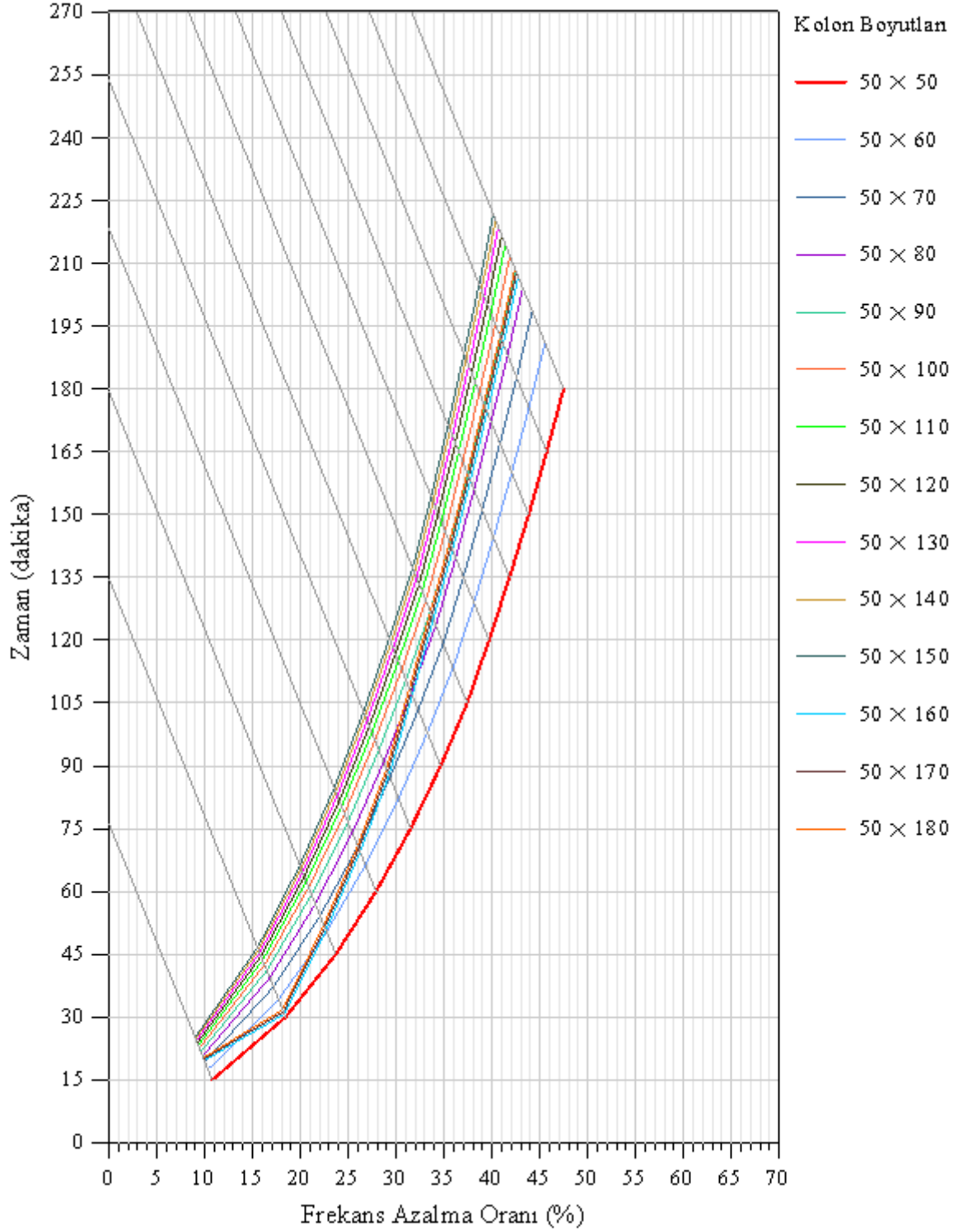
Şekil 2.28. C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



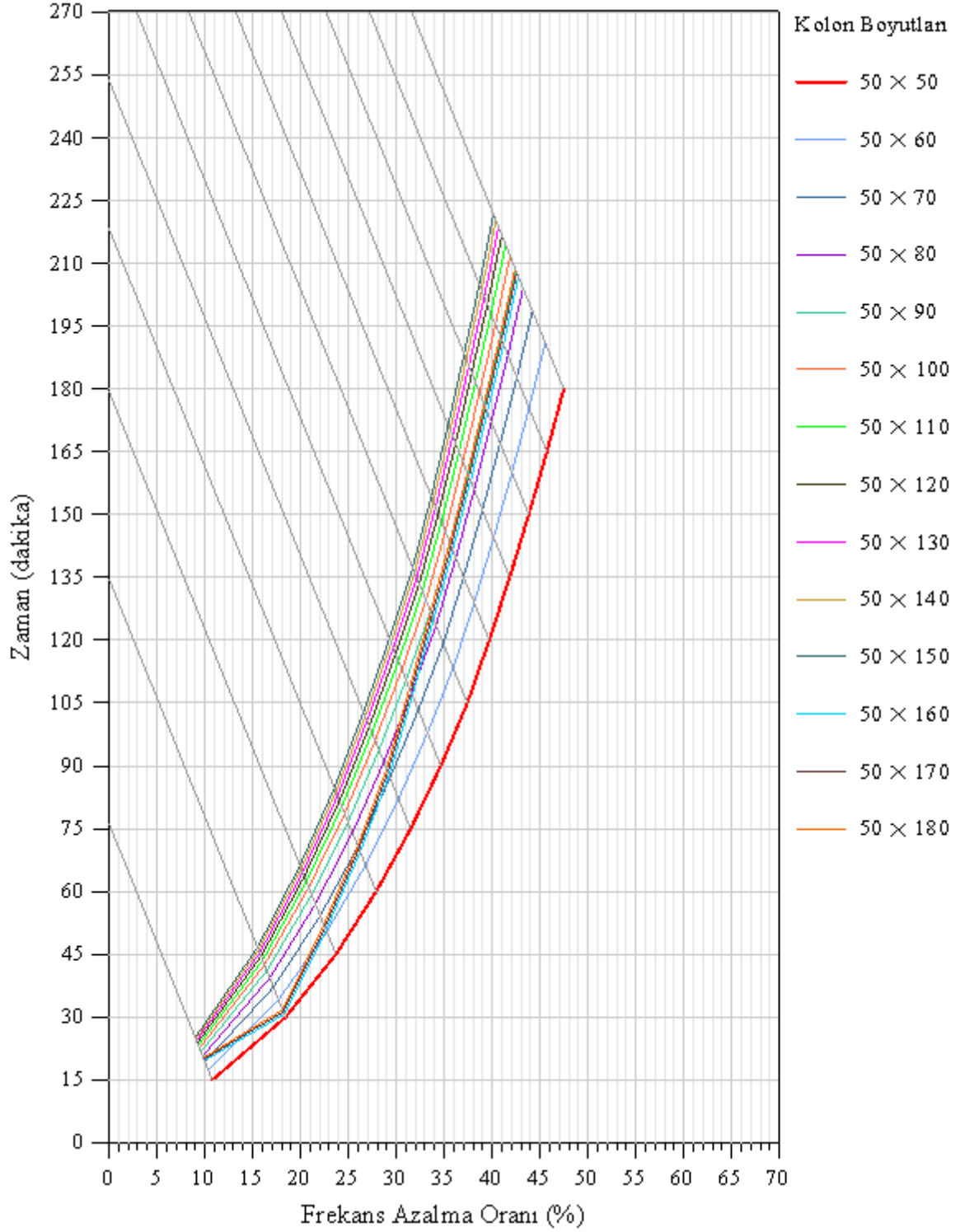
Şekil 2.29. C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 40 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 15 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



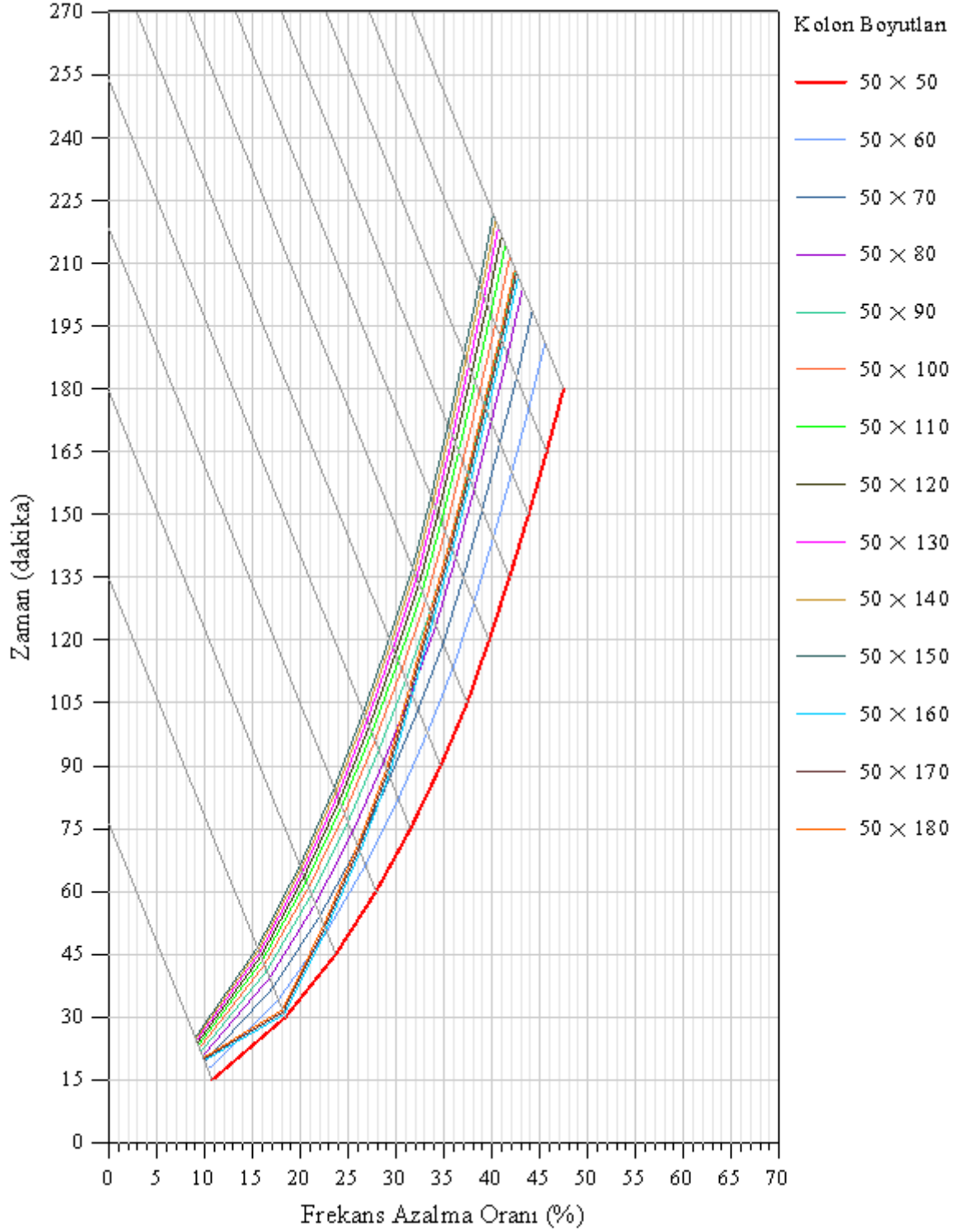
Şekil 2.30. C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



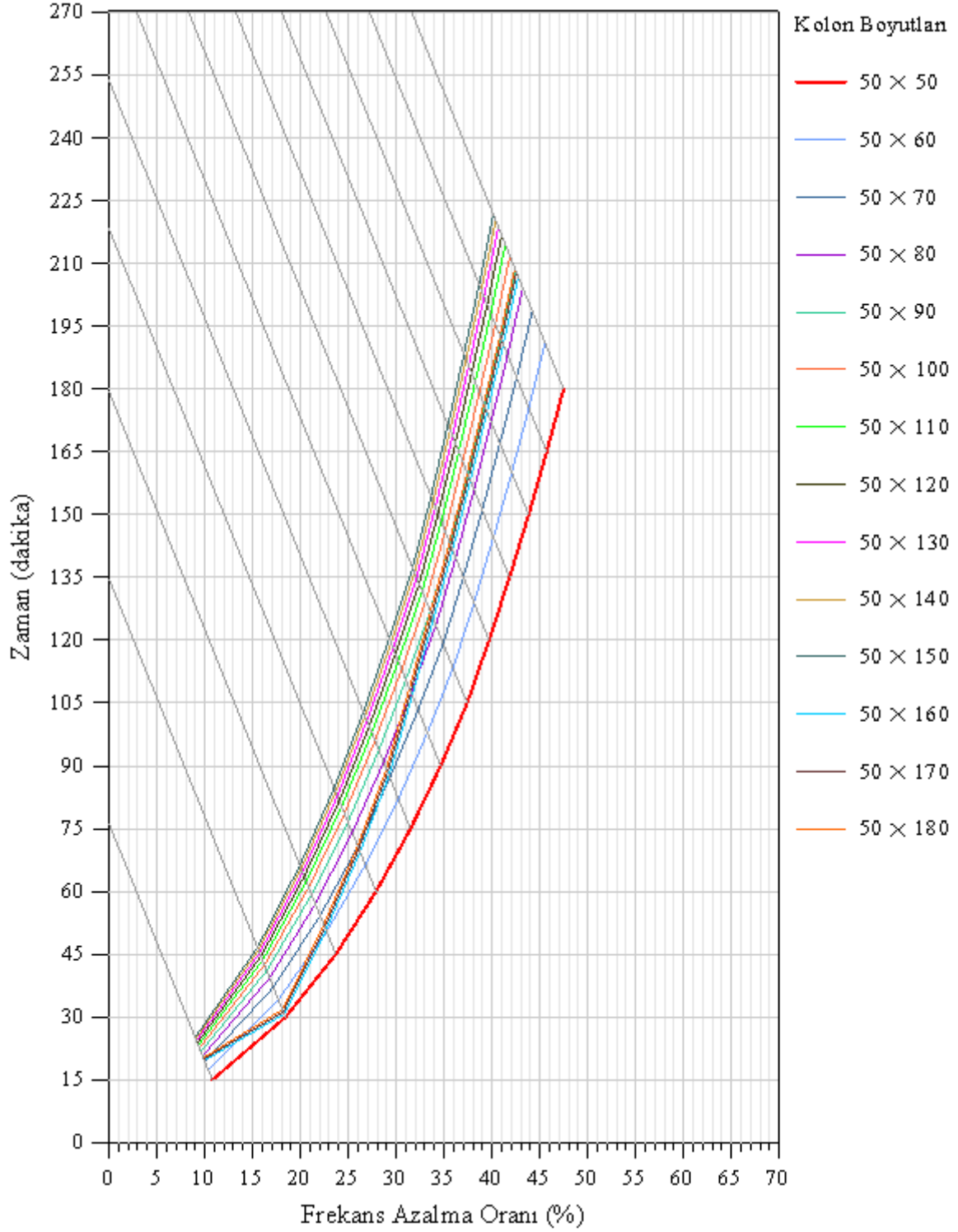
Şekil 2.31. C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



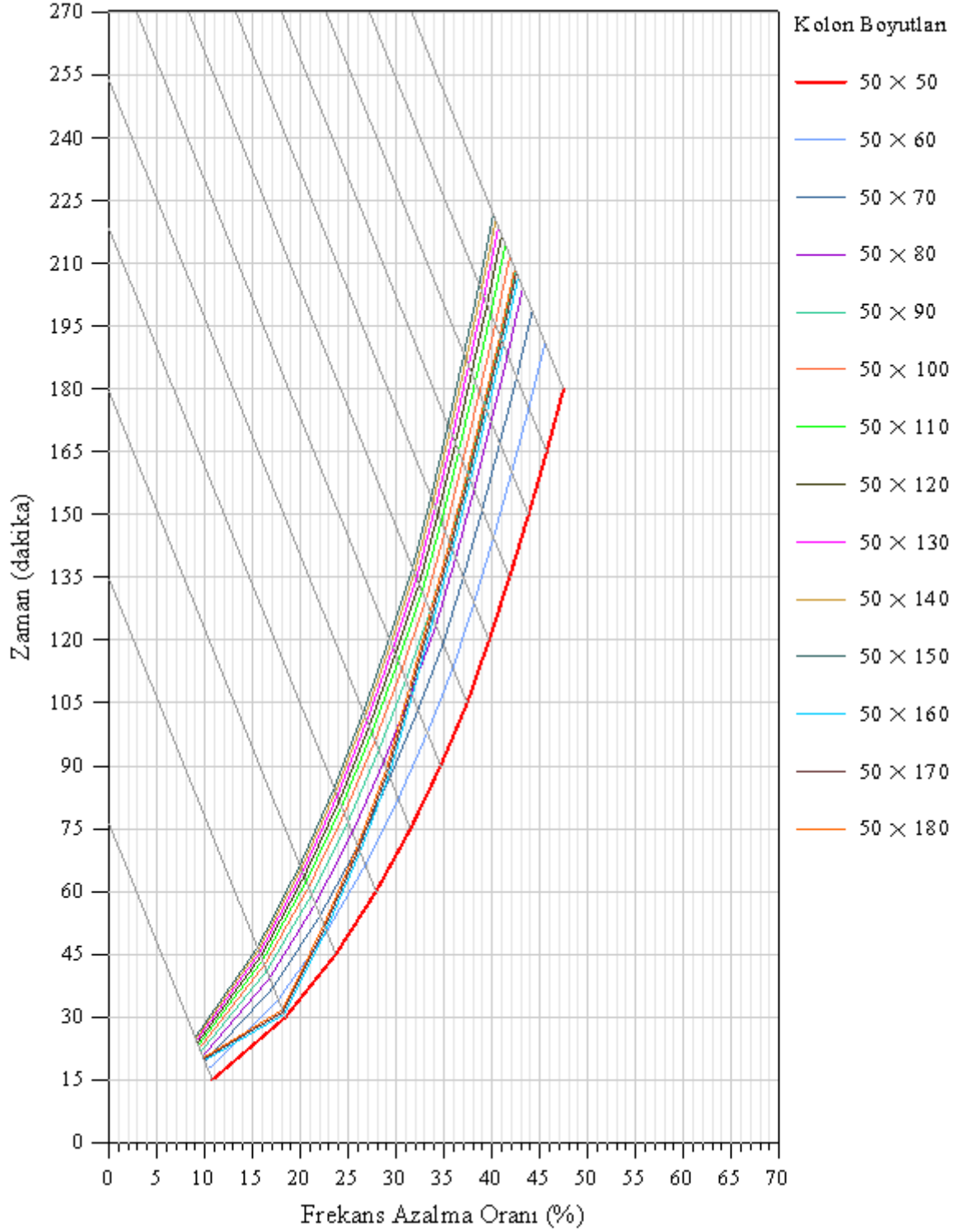
Şekil 2.32. C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.33. C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

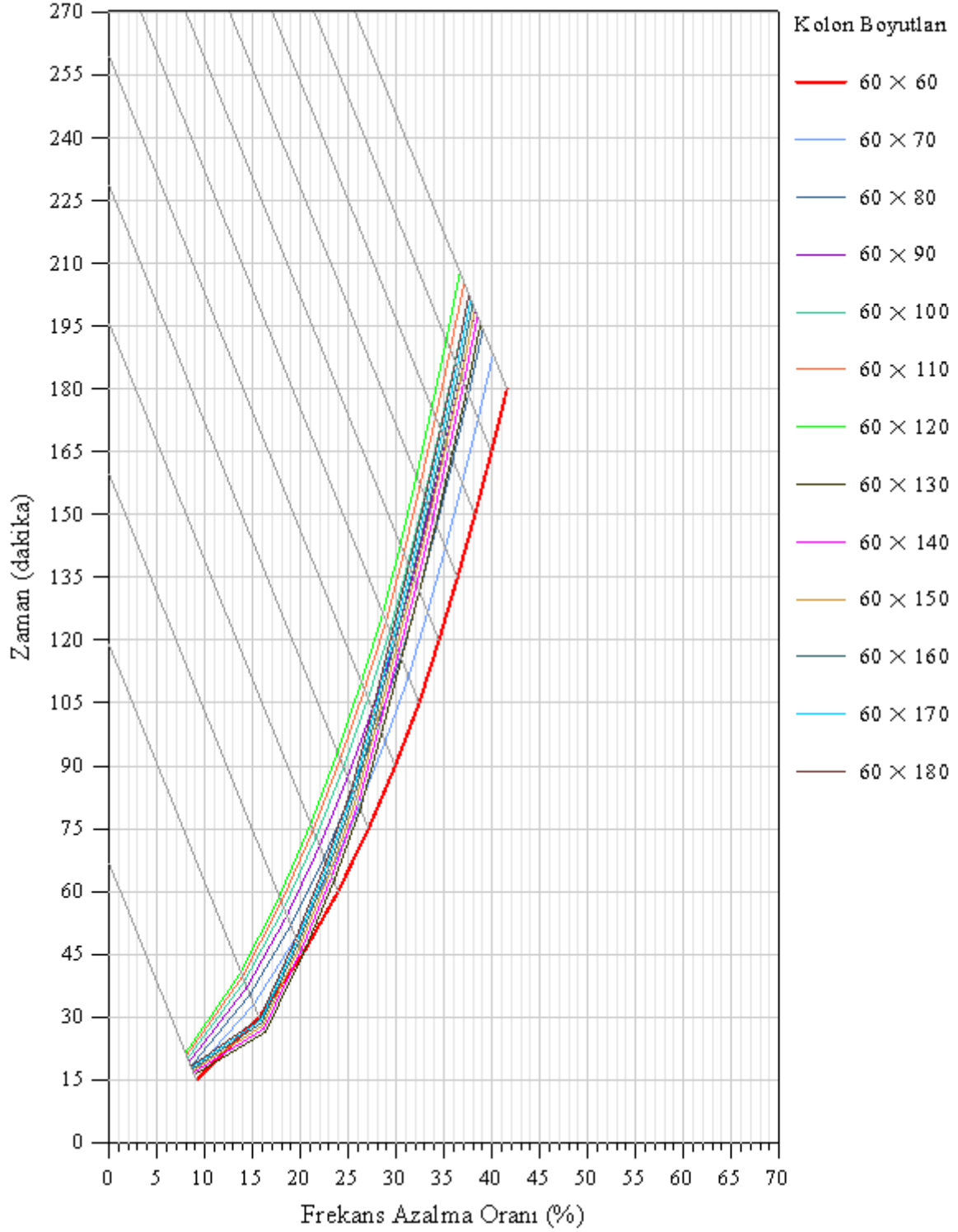


Şekil 2.34. C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

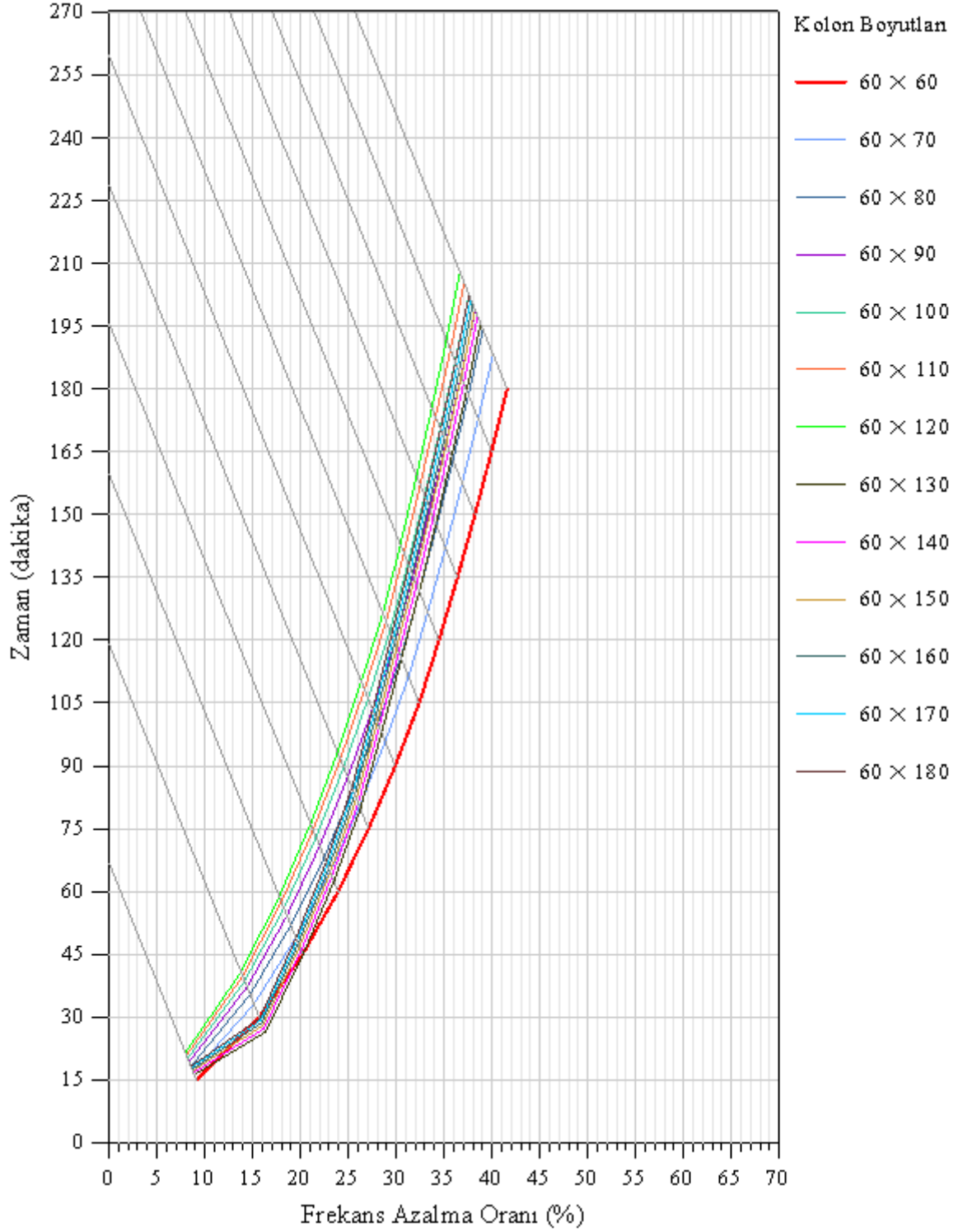


Şekil 2.35. C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 50 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 14 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

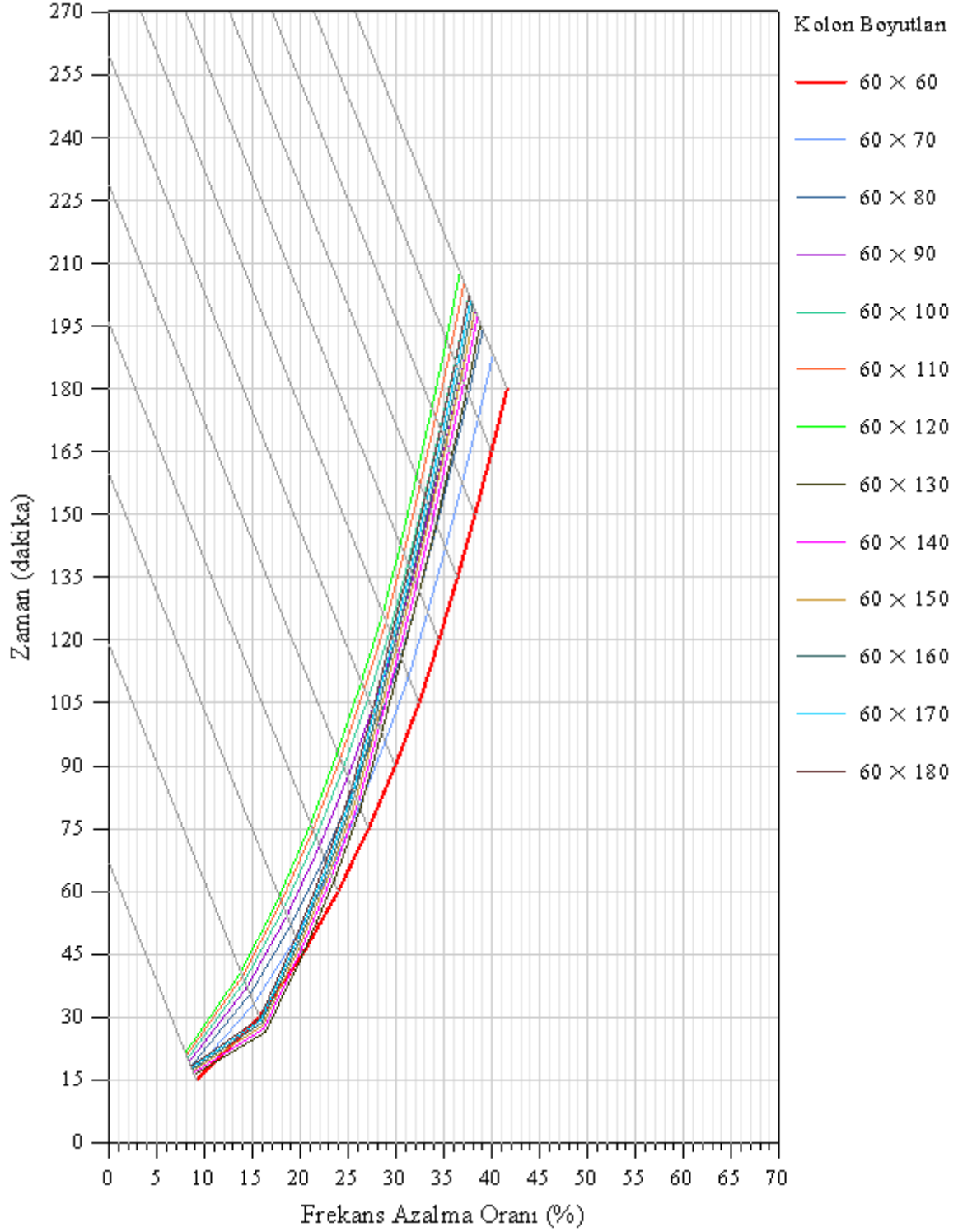




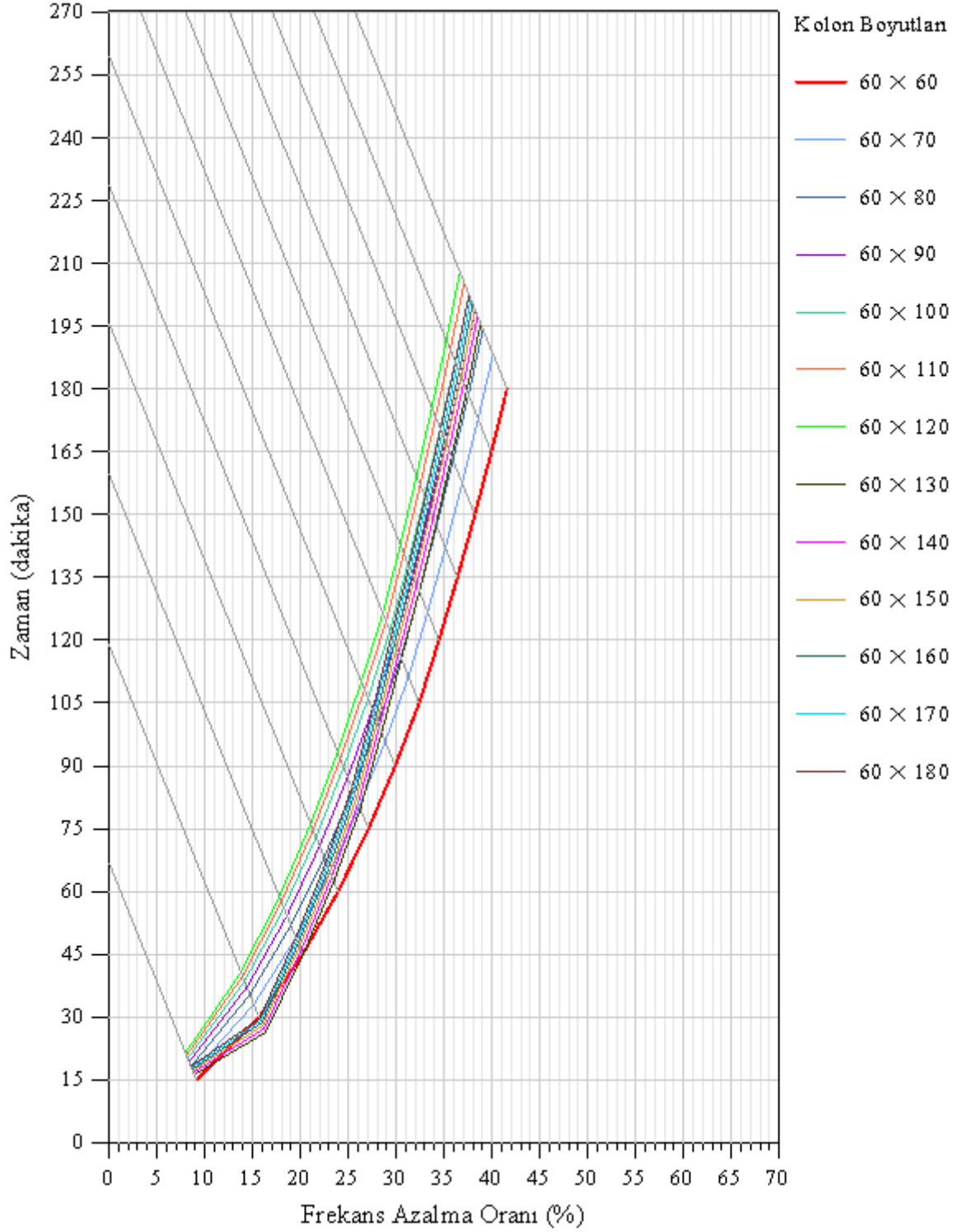
Şekil 2.36. C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



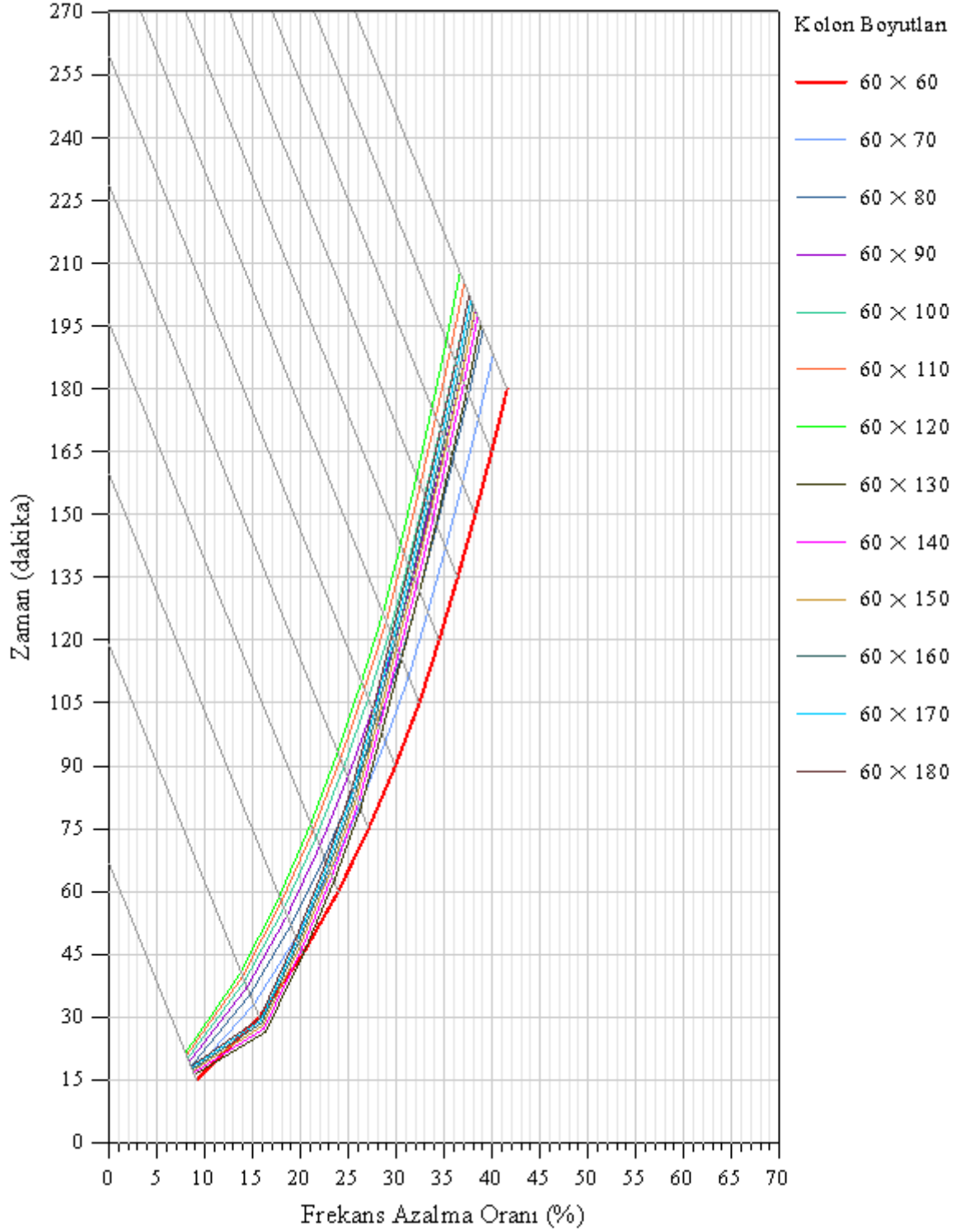
Şekil 2.37. C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



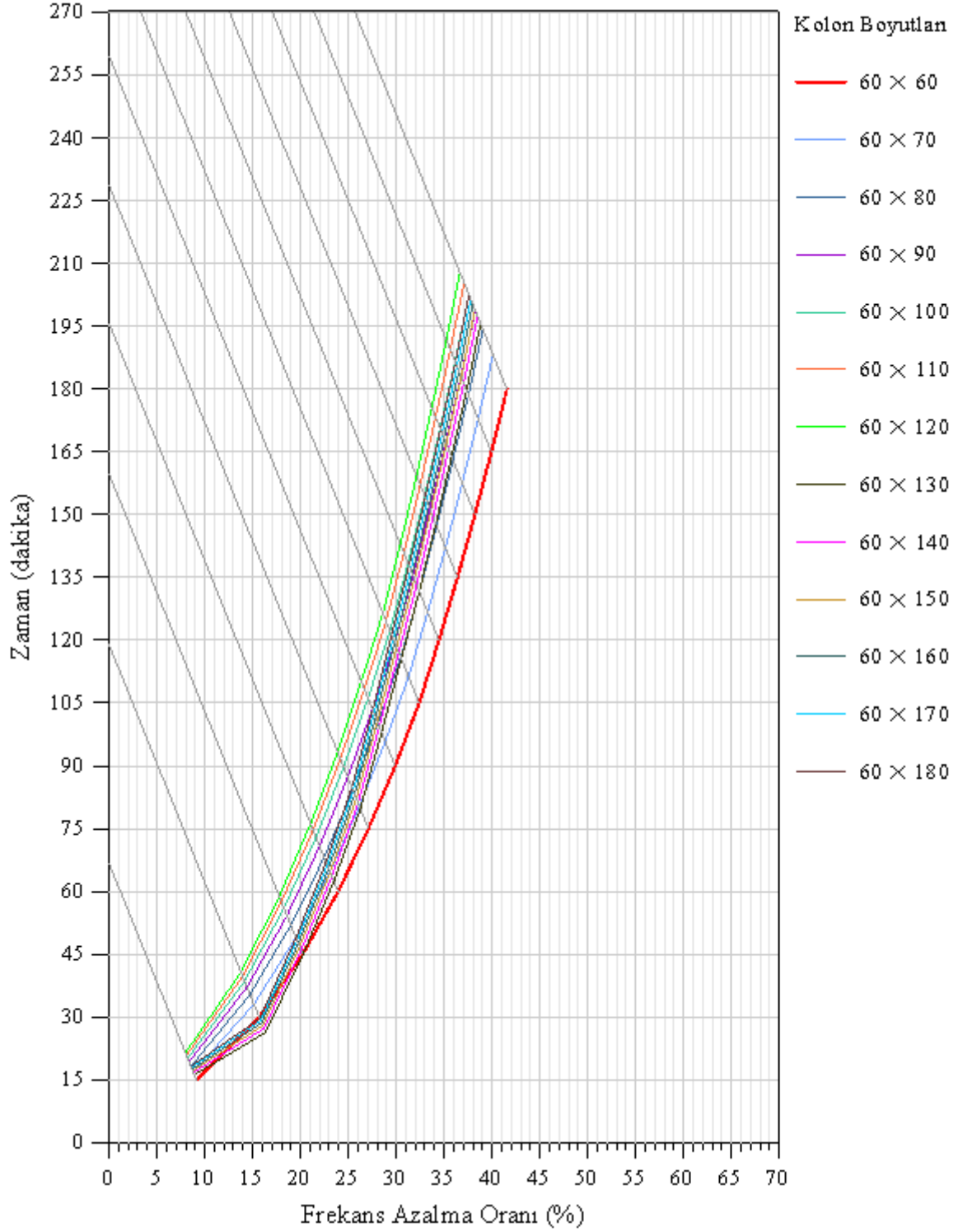
Şekil 2.38. C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



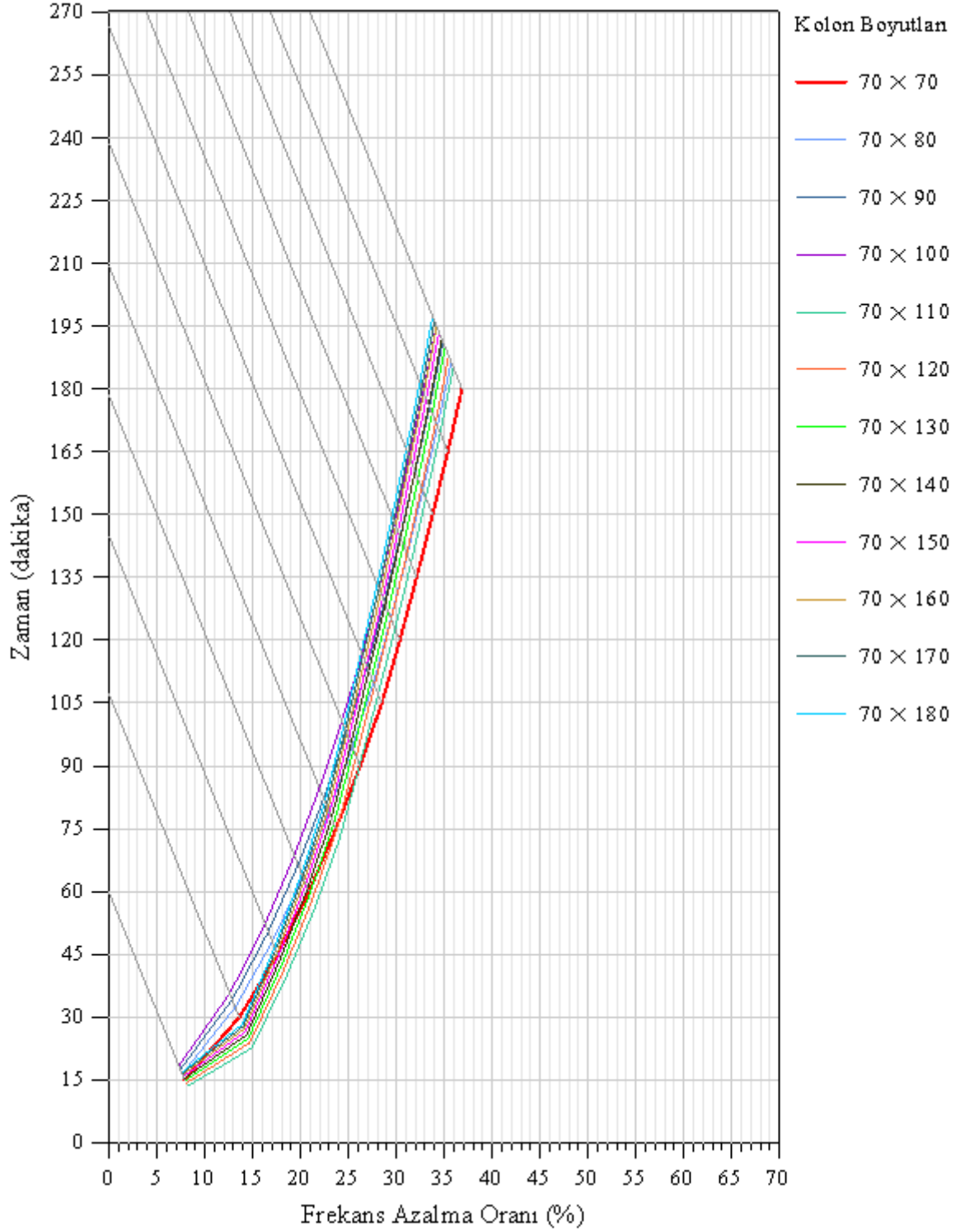
Şekil 2.39. C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



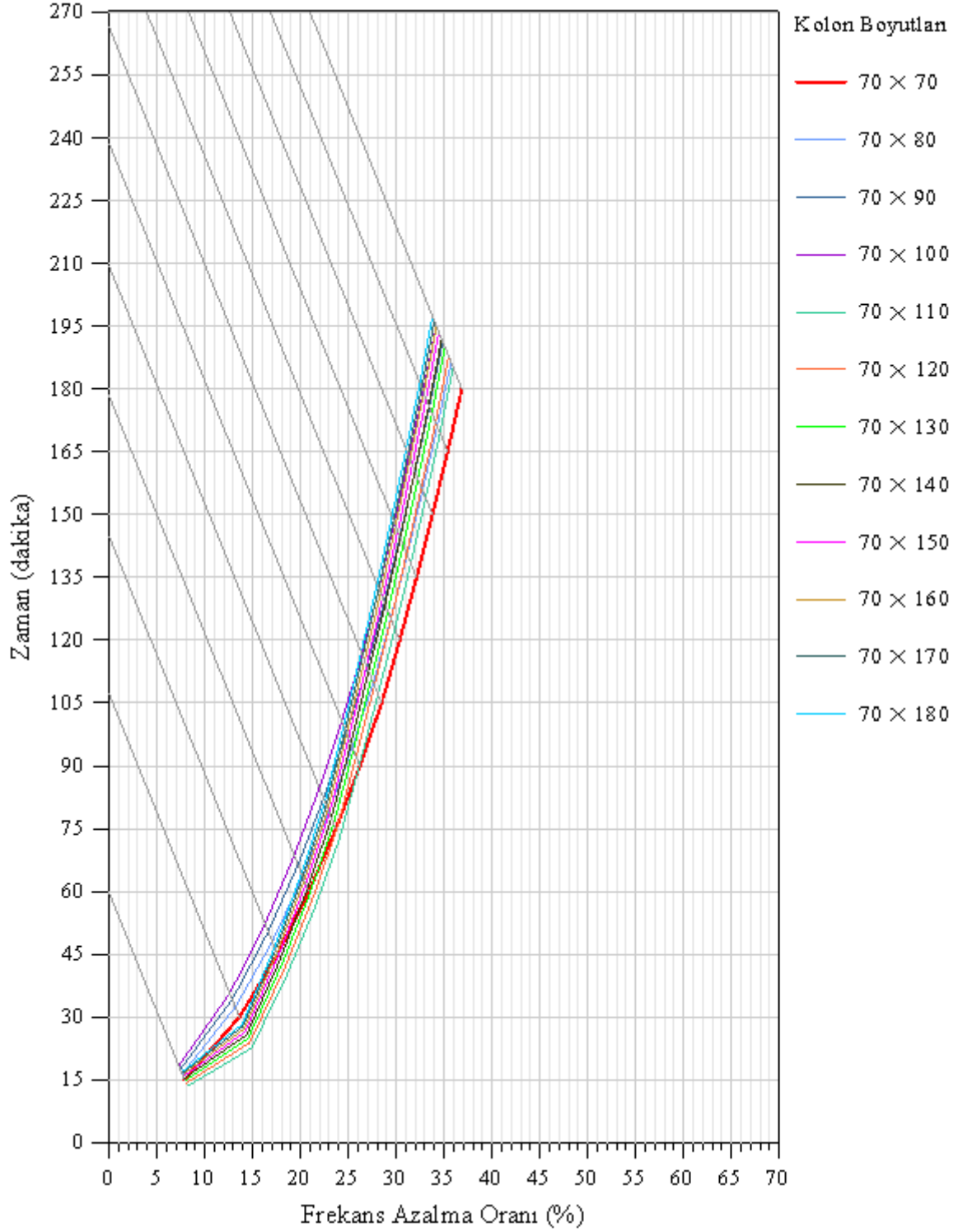
Şekil 2.40. C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.41. C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 60 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 13 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

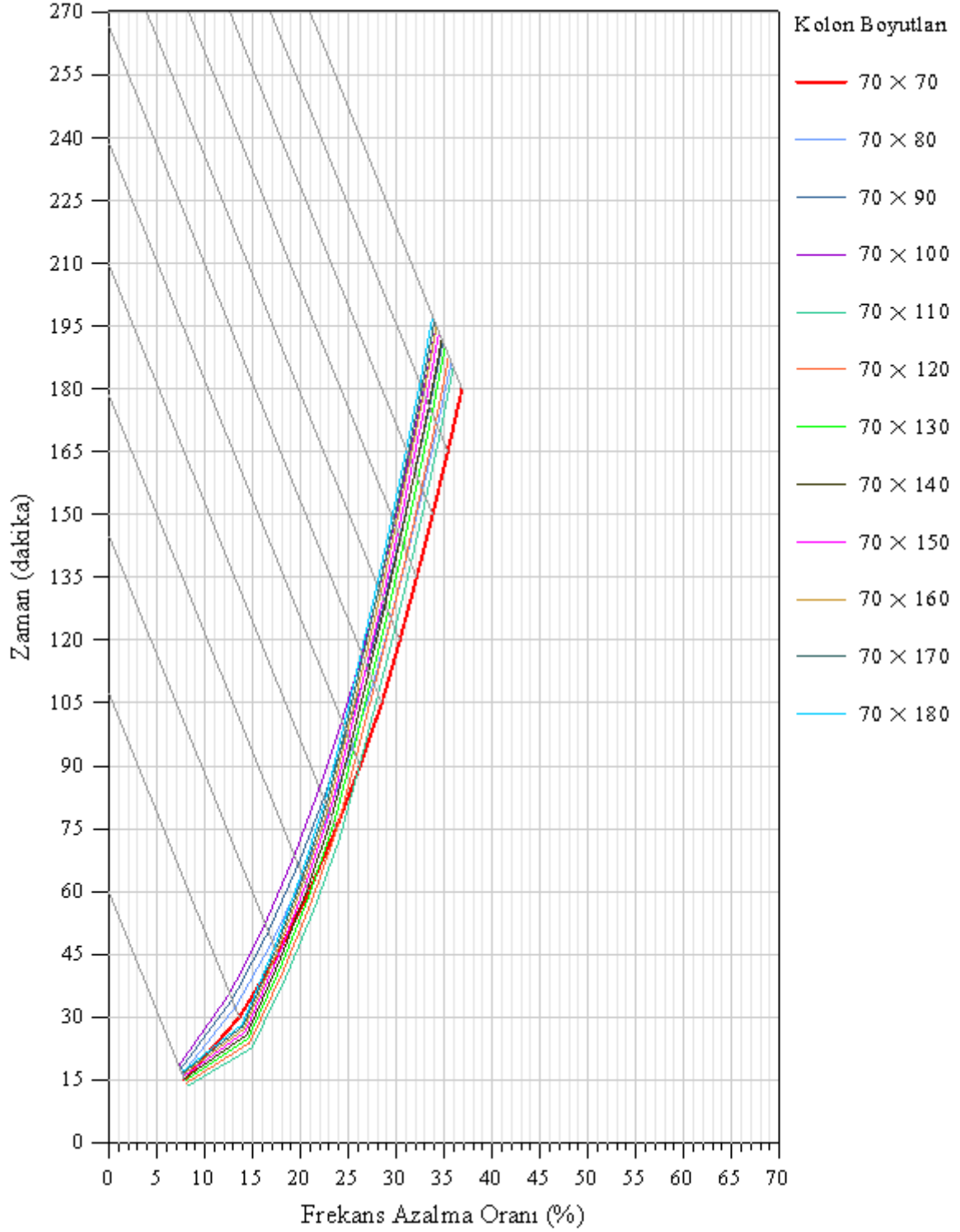


Şekil 2.42. C25 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

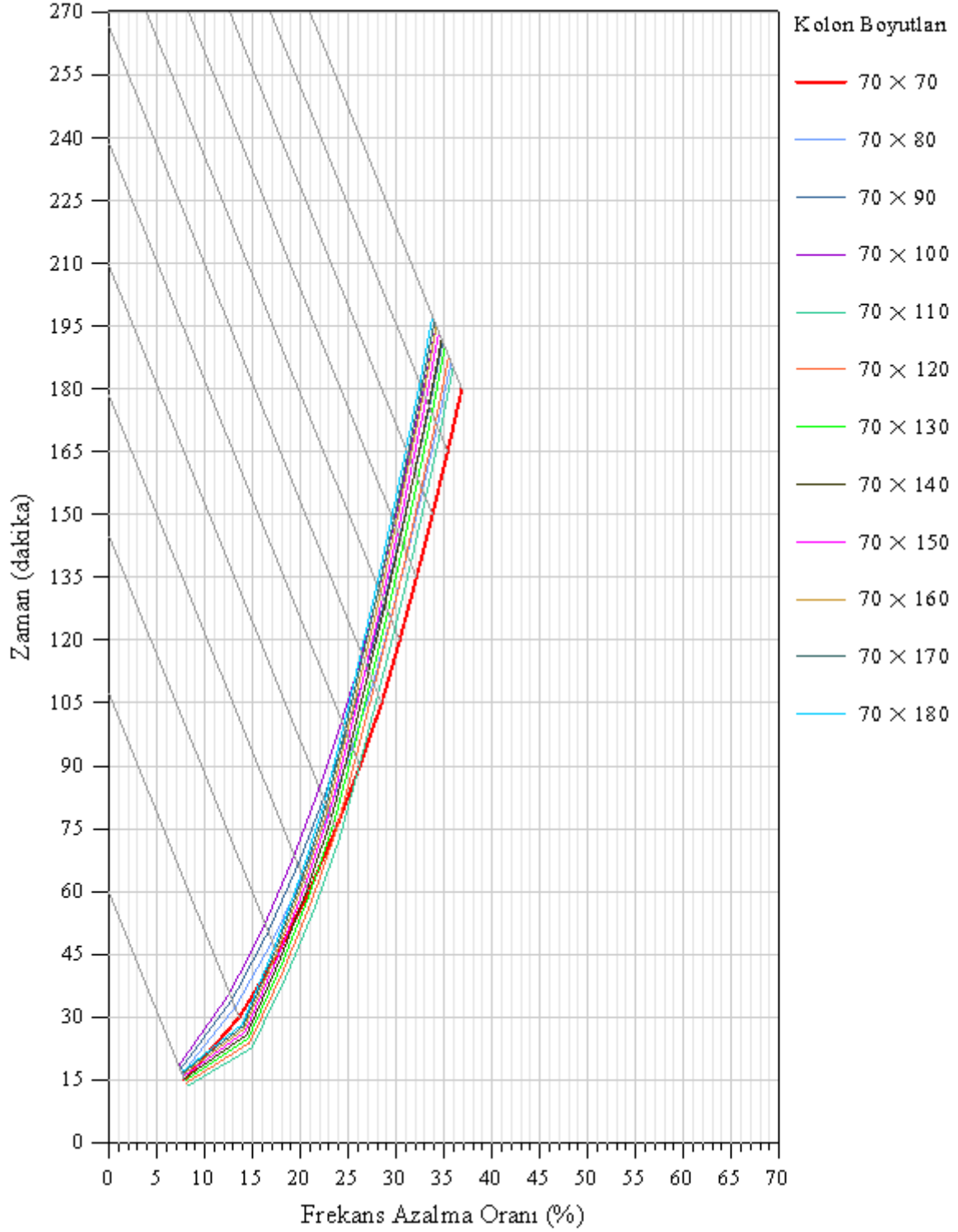


Şekil 2.43. C30 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

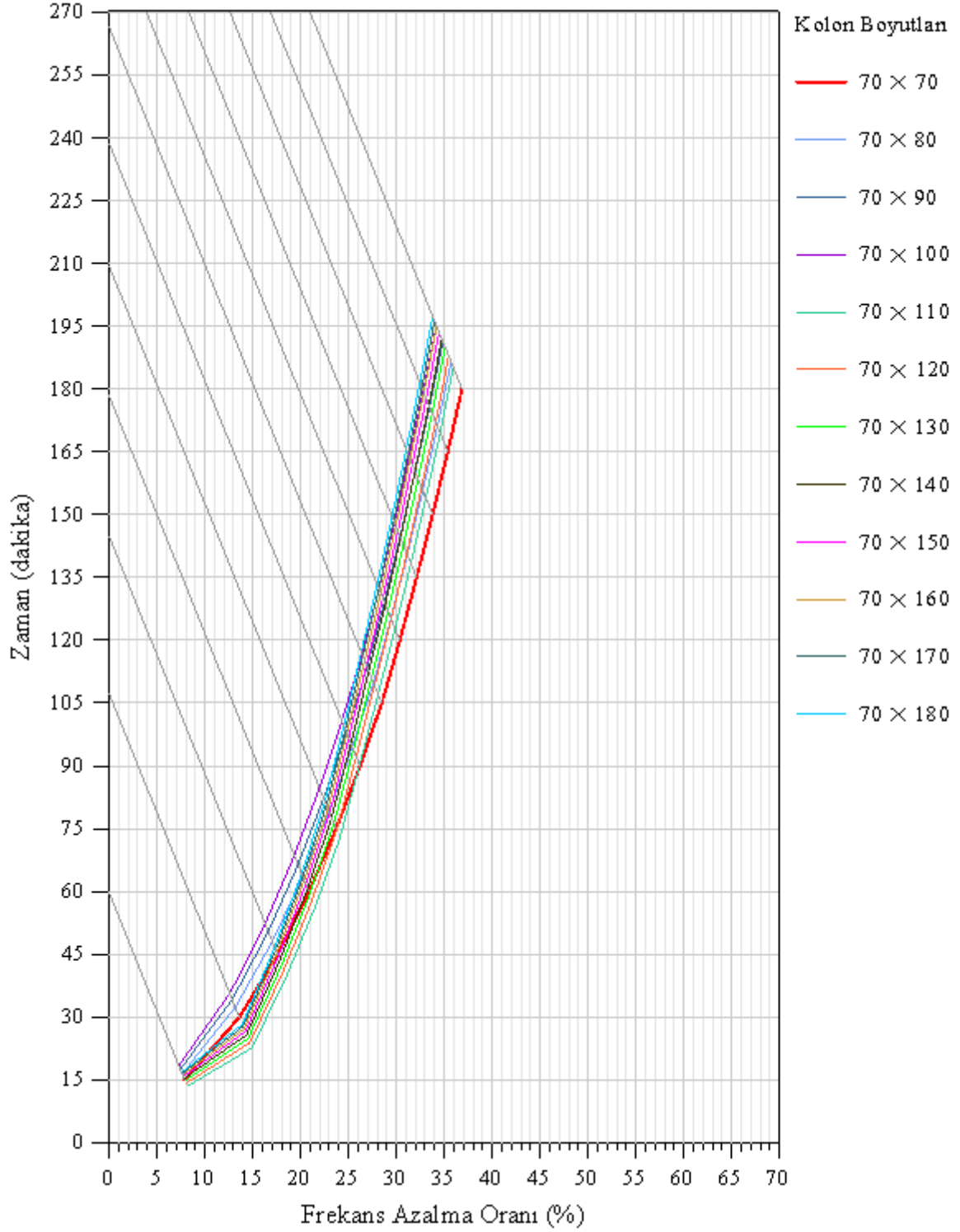




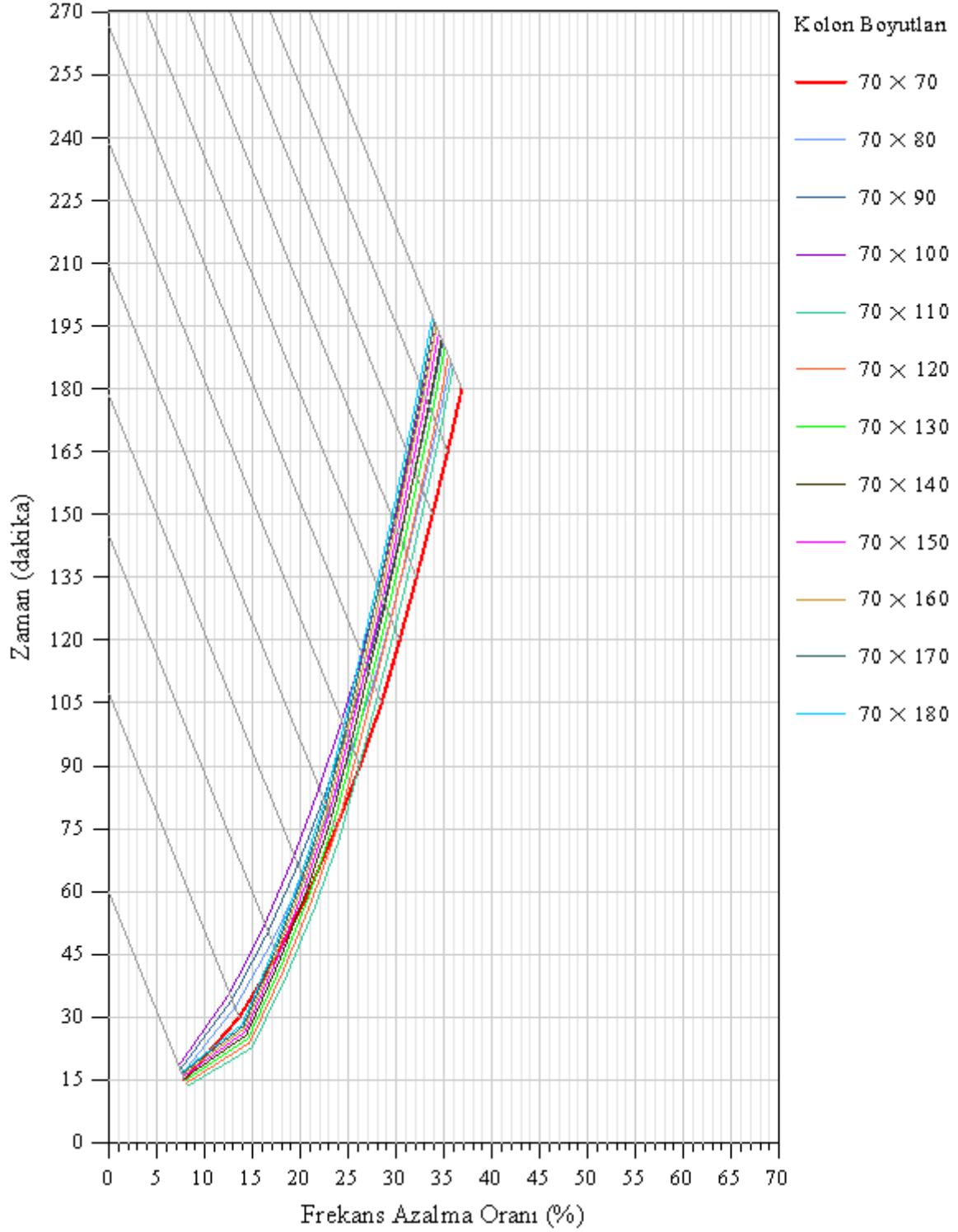
Şekil 2.44. C35 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.45. C40 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.46. C45 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları



Şekil 2.47. C50 beton sınıfının kullanıldığı, enkesitlerine ait kısa kenar ölçüleri 70 cm olan, yüksek sıcaklık etkisi altında kalan 12 kolon modelinin, sıcaklık geçişine bağlı olarak doğal frekanslarında meydana gelen azalma oranları

### 2.3.5.2. Grafik/Abakların Kullanım Alanları

Bu çalışmada sunulan formülasyon ve/veya grafik/abaklardan yararlanılarak kullanılacak veriler;

- Standart yangın eğrileri ve/veya benzer sıcaklık-zaman ilişkileri,
- Silis ve kalker kökenli agrega içeren normal ağırlıklı betonlar,
- Ağırlıkça %1.5 nem içeren betonlar (%1.5'ten daha yüksek nem içeriği için emniyetli tarafta kalmaktadır),
- Betonun ısı iletkenliğinin alt sınırı,
- Normal dayanımlı betonlar (C50'ye kadar),
- Tüm yan yüzeylerinden yangına maruz kalan 3 m yüksekliğindeki betonarme kolonların dikkate alındığı durumlar ile uyumludur.

### 3. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler farklı kesit boyutları, malzeme özellikleri ve sıcaklık geçmişi gibi değişken parametreler göz önünde bulundurularak sayısal yöntemlerle incelenmiştir. Sayısal çözümler için sonlu eleman yöntemi dikkate alınmıştır. Yüksek sıcaklığın dinamik karakteristiklere etkisini belirlemek için ilk olarak ABAQUS programında oluşturulan kolon modelleri üzerinde ısı transferi analizleri gerçekleştirilmiştir. Isı transferi analizleri sonucunda yangın süresince kolonlarda oluşan sıcaklık gelişimi belirlenmiştir. Bu sonuçları doğrulamak amacıyla analitik yöntemlerden ve EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da verilen sıcaklık profillerinden yararlanılarak ısı çözümler gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, ısı transferi analizlerinden elde edilen sonuç dosyalarından alınan verilere bağlı olarak, modal analizler gerçekleştirilmiş ve değişken parametreler dikkate alınarak yüksek sıcaklık etkisi altındaki kolonların dinamik karakteristikleri belirlenmiştir. Oluşan veri havuzu yardımıyla, sıcaklık geçmişine bağlı olarak kolonların dinamik karakteristiklerinde meydana gelen değişimler belirlenmiş ve çalışmada dikkate alınan parametrelerin sonuçlar üzerindeki etkisi irdelenmiştir. Gerçekleştirilen analiz sonuçlarına dayalı olarak, tüm yan yüzeylerinden ISO 834 standart yangınına maruz kalan 3 m yüksekliğindeki kolonların 1. modlarına ait doğal frekansların değişim oranları esas alınarak grafik/abaklar oluşturulmuştur. Çalışmada sunulan grafik/abaklarda yer almayan kolon enkesit boyutlarına ait ara değerler için dinamik karakteristik değişimini belirlemek için bir formülasyon geliştirilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır.

- Zamanla artan ortam sıcaklığı ile birlikte, örnek döşeme modelinin bu sıcaklığa maruz kalan yüzeyindeki ve döşeme kesiti içindeki sıcaklıkların, çeşitli ısı çözümler yöntemleri kullanılarak yapılan çözümler sonucunda artış gösterdiği görülmüştür.

- Döşeme kesiti içinde ısının iletimi, zamanla ısınan ve yüksek sıcaklığa sahip olan döşeme yüzeyinden daha düşük sıcaklıklardaki iç bölgelere doğru gerçekleşmiştir.

- Örnek döşeme modeli için gerçekleştirilen, geçici rejimin dikkate alındığı ısı transferi analizi sonucunda, üniform sıcaklık etkisi nedeniyle komşu düşüm noktaları arasında sıcaklık farkı yalnızca döşeme kalınlığı doğrultusunda gözlenmiştir. Diğer bir

deyişle; yangına maruz kalan yüzey boyunca, aynı derinlikte bulunan düğüm noktalarının eşit sıcaklık değerlerine sahip olduğu görülmüştür.

- Bir boyutlu ısı iletimi problemine ait bu çözümleme sonucunda, eleman kesitleri içindeki ısı iletiminin yalnızca sıcaklık farkının olduğu doğrultularda gerçekleşeceği sonucuna varılmıştır.

- Sayısal yöntem kullanılarak, belirli süreler için tespit edilen, döşeme modelinin yangına maruz kalan yüzeyindeki sıcaklık değerlerinin, diğer ısı çözümü yöntemleri ile elde edilen değerlerle benzerlik gösterdiği ortaya konulmuştur.

- Sonuçlar arasındaki en düşük yüzdesel fark Wickström yöntemi en yüksek fark ise Hertz yöntemi ile elde edilen çözümlerle ortaya çıkmıştır.

- Sayısal yöntemle elde edilen sonuçların, deneysel çalışmalara dayalı olarak oluşturulan sıcaklık profilleri ile de oldukça uyumlu olduğu görülmüştür.

- Analitik yöntemler kullanılarak elde edilen sonuçların kendi içinde değerlendirilmesi sonucunda; Wickström yönteminin, Hertz yöntemine kıyasla daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür.

- Yangına maruz kalma süresindeki artış ile birlikte, 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan döşeme yüzeyine olan mesafeleri, tüm ısı çözümü yöntemlerinde artış göstermektedir.

- Yangına maruz kalma süresine bağlı olarak döşeme kesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin, yangına maruz kalan yüzeye olan mesafeleri sayısal yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Belirlenen bu değerler EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan ilgili sıcaklık profillerinden okunan değerler ile karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bu iki yöntemle elde edilen sonuçların neredeyse aynı olduğu görülmüştür.

- Döşeme kesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin, yangına maruz kalan yüzeye olan mesafesinin Wickström yöntemiyle belirlenmesinde kullanılan üç farklı ısı yayılım katsayısı için yapılan çözümlerle elde edilen sonuçların sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılması sonucunda; sayısal sonuçların, Wickström (1986) tarafından normal ağırlıklı betonlar için sunulan  $0.417 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  referans ısı yayılım katsayısı değeri kullanılarak elde edilen analitik çözümleme sonuçları ile oldukça benzerlik gösterdiği görülmüştür.

- Döşeme kesiti içinde oluşan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin, yangına maruz kalan yüzeye olan mesafesinin Wickström yöntemiyle belirlenmesinde kullanılan üç farklı ısı yayılım katsayısının dikkate alındığı çözümlerle elde edilen sonuçlar

incelendiğinde, aynı sıcaklık geçmişi için ısıl yayılım katsayısındaki artışın bu mesafelerin artmasına neden olduğu görülmüştür.

- Değerlerdeki artış ısı geçiş hızını da artırmıştır. Bu durumda kesit içinde bulunan belirli bir noktadaki sıcaklık değeri, aynı maruz kalma süresinin dikkate alındığı ve ısıl yayılım katsayısının yüksek olduğu durumlarda, bu değer düşük olduğu durumlara kıyasla daha büyük değerler aldığı söylenebilir.

- ABAQUS programı yardımıyla çözümlenen bir boyutlu ısı iletimi probleminden elde edilen verilerin, diğer yöntemler kullanılarak elde edilen verilerle karşılaştırılması sonucunda, ABAQUS programında oluşturulan model üzerinde gerçekleştirilen ısı transferi analiz sonuçlarının doğruluğu teyit edilmiştir.

- EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da yer alan ve deneysel çalışmalara dayalı olarak oluşturulan ilgili modellere ait sıcaklık profillerinden yararlanılarak elde edilen sonuçların, sayısal çözümler kullanılarak elde edilen sonuçlar ile benzerlik göstermesi sonucunda; yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonarme elemanlarda, donatı çeliklerinin eleman enkesitlerindeki sıcaklık dağılımına etkilerinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

- Yangının örnek kolon modelinin tüm yan yüzeylerine üniform olarak etkimesi nedeniyle, eleman enkesitine dik doğrultudaki komşu düğüm noktaları arasında herhangi bir sıcaklık farkı oluşmadığı görülmüştür.

- Isı geçişinin iki boyutta gerçekleşmesi nedeniyle kolon yüksekliği doğrultusundaki tüm enkesitler için eşit sıcaklık dağılımları oluşmuştur.

- Yangının üniform olarak kolonun tüm yan yüzeylerine etki etmesi, yangın süresi boyunca kolon enkesitlerinde simetrik bir sıcaklık dağılımının oluşmasına neden olmuştur.

- Sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımlarının doğruluğunun teyit edilmesinde EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da sunulan sıcaklık profillerinden yararlanılmıştır. Elde edilen dağılımlar sıcaklık profilleri ile benzerlik göstermiştir.

- Belirli maruz kalma süreleri için sayısal yöntem kullanılarak elde edilen sıcaklık dağılımı içinde yer alan 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerine ait konumların, EN 1992-1-2 (2004) Ek A'da sunulan ve belirli maruz kalma süreleri için 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin konumunu ifade eden ek bir sıcaklık profilinden okunan değerlerle neredeyse aynı olduğu görülmüştür.



- Yangına maruz kalma süresindeki artış ile birlikte, 500°C'lik eş sıcaklık eğrilerinin yangına maruz kalan kolon dış yüzeylerine olan mesafeleri artmakta, başka bir deyişle bu eş sıcaklık eğrileri zamanla enkesit merkezine doğru ilerlemektedir.

- Zamanla artan ortam sıcaklığı ile birlikte, örnek kolon modelinin bu sıcaklığa maruz kalan tüm yan yüzeylerindeki ve kolon enkesiti içindeki sıcaklıklarının yapılan çözümler sonucunda artış gösterdiği görülmüştür.

- Örnek kolon modelinde en yüksek sıcaklık artışı, yangının iki yüzeyden direkt olarak etkilediği kolon köşelerinde bulunan düğüm noktalarında gözlenmiştir.

- Seçilen bir kolon enkesiti için, yangına maruz kalan dış kenarlardan, enkesit merkezine doğru yaklaşıldıkça sıcaklık artışının yavaşladığı görülmüştür.

- Geliştirilmiş bilgisayar programlarında ısı transferi çözümleri geçici ve sürekli rejim dikkate alınarak yapılabilmektedir. Sürekli rejimin dikkate alındığı durumlarda belirli bir sıcaklık geçmişi için eleman enkesitleri içindeki tüm düğüm noktaları eşit sıcaklık değerleri almaktadır. Ancak, analizlerde geçici rejimin dikkate alınmayla bu enkesitlerde bulunan düğüm noktalarının, yangına maruz kalan yüzeye olan mesafelerine bağlı olarak farklı sıcaklık değerleri aldığı görülmüştür. Diğer bir deyişle, geçici rejim dikkate alınarak gerçekleştirilen ısı transferi analizleri sonucunda, eleman enkesitleri içinde üniform olmayan sıcaklık dağılımları oluşmuştur.

- Isı transferi problemleri için gelişmiş bilgisayar programları kullanılarak oluşturulan modeller üzerinde yapılan analizler sonucunda, model kesitlerinde düzgün bir sıcaklık dağılımının elde edilmesinde sayısal ayrıklaştırmanın (mesh) önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

- Gerçekleştirilen modal analizlerde, modellerin beton kütle veya betonarme eleman olarak modellenmesi durumunda elde edilen dinamik karakteristiklerin benzerlik gösterdiği görülmüştür.

- İki ayrı şekilde yapılan modelleme sonucunda; kolon modellerinin ilk üç modu elde edilmiş ve bu modlara ait doğal frekans değerleri arasında önemli bir fark oluşmadığı görülmüştür. Dolayısıyla yapılan çalışmada, donatıların dinamik karakteristiklere etkisinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu kabul edilmiştir.

- Yangına tüm yan yüzeylerinden maruz kalan kolonların sıcaklık geçmişindeki artışla beraber doğal frekanslarında azalma görülmekte, mod şekilleri ise değişmemektedir.

- Yangın etkisinin simetrik olmadığı durumlar için de mod şekilleri değişmediği görülmüştür.

- Betonarme bir kolonun enkesit ölçülerinin eşit olması durumunda, yüksek sıcaklık etkisi ile birlikte elemana ait 1. ve 2. modal frekanslarda meydana gelen azalma yüzdelerinin eşit olduğu tespit edilmiştir. Enkesit ölçülerinin eşit olmaması durumunda ise bu iki moda ait frekanslardaki azalma yüzdelerinin farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

- Çalışmada gerçekleştirilen 5530 adet analiz sonucunda elde edilen veri havuzu yardımıyla, sıcaklık geçmişindeki artışa bağlı olarak, kolon modellerinin 1. modlarına ait doğal frekanslarda meydana gelen yüzdesel azalma oranı esas alınarak bir formülasyon geliştirilmiş ve grafik/abaklar sunulmuştur.

- Çalışmada kavlanma etkisi ihmal edilmiş, kütle kaybı yalnızca beton içinde bulunan suyun yüksek sıcaklıkla birlikte buharlaşması ile temsil edilmiştir. Suyun buharlaşmasıyla birlikte betonun özgül ağırlığında meydana gelen azalmanın sonuçlar üzerinde çok etkili olmaması nedeniyle, kolonların doğal frekans değerlerindeki azalma rijitlik kaybı olarak değerlendirilmiştir.

- Belirli bir kolon için farklı beton sınıfının dikkate alınması durumunda, sıcaklık geçmişinin olmadığı durum için elde edilen 1. moda ait başlangıç frekanslarının, oda koşullarında daha yüksek elastisite modülü değerine sahip beton sınıfları için yapılan çözümlenelerde daha büyük olduğu görülmüştür.

- Seçilen bir kolon enkesiti için farklı beton sınıflarının kullanılmasının, frekanslar üzerindeki değişim üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Aynı beton sınıfı için farklı enkesit boyutları seçildiğinde ise frekanslar üzerindeki değişim önemli olmaktadır.

- Seçilen beton sınıfının ve kolon enkesitine ait kısa kenar uzunluğu sabit olarak seçildiğinde, kolon enkesitine ait uzun kenar ölçüsündeki artış ile birlikte kolon rijitliklerinin arttığı görülmektedir. Kolon uzun kenarı büyüdükçe, aynı sıcaklık geçmişi için, daha küçük enkesit alanlarına sahip kolonların frekansında meydana gelen azalmaya kıyasla daha küçük azalmalar meydana gelmektedir. Bu durum, küçük enkesit alanına sahip kolonların sıcaklıktan daha fazla etkilenmesinden kaynaklanmaktadır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar ışığında yapılan bazı öneriler maddeler halinde aşağıda sunulmaktadır:

- Benzer çalışmalar çelik ve kompozit malzeme özelliklerine sahip yapı elemanları için gerçekleştirilebilir.

- İlgili yönetmeliklerde yer alan sıcaklık profilleri sınırlı sayıda enkesit boyutu için verilmiştir. Bu profiller farklı kesit boyutları için çoğaltılabilir ve ilgili yönetmeliklere kaynak sağlanabilir.

➤ Çalışmada gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinin doğrulanması tek başına yeterli olmayıp modal analizler sonucunda elde edilen verilerin de deneysel yöntemlerle doğrulanması gerekmektedir. Gerek görülmesi halinde sonlu eleman güncellemesi yapılarak veriler yeniden düzenlenmelidir.

➤ Yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkisi altındaki yapı elemanlarının, yapısal analizden bağımsız olarak sadece kesitlerindeki sıcaklık dağılımlarının belirlenmesi istendiğinde, sayısal yöntemler kullanılarak yapılan çözümler için üç boyutlu modelleme yerine iki boyutlu modelleme yapılabilir. Böylece, problem daha basite indirgenerek çözümlene süresi azaltılabilir.

➤ Yangın ve/veya benzeri yüksek sıcaklık etkisi altındaki yapı elemanları için gerçekleştirilen ısı transferi analizlerinde geçici rejim dikkate alınarak, eleman enkesitlerinde yer alan düğüm noktalarında oluşan farklı sıcaklıklara karşılık gelen malzeme özelliklerinin program tarafından seçilmesi sağlanmıştır. Böylece, bu analizlerden elde edilen sonuçlara bağlı olarak gerçekleştirilecek yapısal analizlerin daha gerçekçi sonuçlar vereceği düşünülerek ısı transferi analizlerinin geçici rejimde gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

➤ Sunulan formülasyon ve grafik/abaklar; farklı yangın modelleri, sıcaklık geçmişi ve malzeme özelliklerinin dikkate alındığı durumlar için geliştirilebilir.

➤ Çalışmada dikkate alınan değişken kesit boyutu, beton sınıfı ve sıcaklık geçmişi parametrelerine ek olarak, yangının kolonların tüm yan yüzeylerine etkilediği durumlar için, yangına maruz kalma şekline ait bir parametrenin de eklenmesiyle, sunulan formülasyon ve grafik/abaklar geliştirilebilir.

➤ Sunulan formülasyon ve grafik/abaklar oluşturulurken, yalnızca 3 m yüksekliğindeki betonarme kolonlar dikkate alınmıştır. Benzer şekilde farklı yüksekliklere sahip kolonlar veya farklı yapı elemanları için formülasyon ve grafik/abaklar geliştirilebilir.

➤ Çalışmada gerçekleştirilen analizler sonucunda elde edilen değerler incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle kolonların rijitliklerinde önemli azalmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu rijitlik kaybı yapılarda göçmeye kadar varan sonuçlara neden olabilir. Dolayısıyla, olası bir yangın durumuna karşı alınacak önlemler, yapının tasarım aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır.

➤ Yangın geçmişi olan yapıların kullanım durumunu belirlemek için gerçekleştirilen performans analizlerinde; mevcut kolon boyutları, beton sınıfı ve yangın süresi

parametrelerine bağlı olarak yangına maruz kalan kolonlar için bu çalışmada sunulan formülasyon ve grafik/abaklarda yer alan frekans azalma yüzdeleri belirlenmelidir. Bu değerler ilgili programa rijitlik azalması şeklinde tanımlanabilir. Gerçekleştirilen performans analizlerinden elde edilen raporlar doğrultusunda yapıda oluşan hasarlar tespit edilerek, yapının kullanım durumuna karar verilebilir ve gerekli görölmesi halinde yapı üzerinde güçlendirmeler yapılabilir.



#### 4. KAYNAKLAR

- ABAQUS, 2016. Dassault Systèmes Simulia Corporation, Providence, Rhode Island.
- Açıkel, H., 2017. Betonarme Kısa Kolonların Yangın Dayanımlarının Çeşitli Parametreler Açısından İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Allen, D. E. ve Lie, T. T., 1974. Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns, International Association For Bridge and Structural Engineering Symposium on Design and Safety of Reinforced Concrete Compression Members, Ottawa, Canada, 245-254.
- Alonso, C., Andrade, C., Castellote, M., ve Khoury, G. A., 2003. Microstructure – Solid Phases, Course on Effect of Heat on Concrete, International Centre for Mechanical Sciences (CISM), Udinese, Italy.
- Altunışık, A.C., 2010. Karayolu Köprülerinin Yapısal Davranışlarının Analitik ve Deneysel Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Anderberg, Y., 1983. Properties of Materials at High Temperatures – Steel, RILEM Report, University of Lund, Sweden.
- Askegaard, V. ve Mossing, P., 1988. Long Term Observation of RC-Bridge using Changes in Natural Frequency, Nordic Concrete Research, 7, 20-27.
- ASTM E119, 2007. Standart Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, Pennsylvania.
- Ataman, R., 1991. Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Balaji, A., Luquman, K.M., Nagarajan, P. ve Pillai T.M.M., 2015. Prediction of Response of Reinforced Concrete Frames Exposed To Fire, Advanced in Computational Design, 1, 1, 105-117.
- Bastami, M., Aslani, F. ve Omran, M. Esmailnia, 2010. High-Temperature Mechanical Properties of Concrete, International Journal of Civil Engineering, 8, 4, 337-351.
- BS 5950-8, 1990. Structural Use of Steelwork in Building – Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design, British Standards Institution (BSI), London.
- BS 8110, 1985. Structural Use of Concrete, British Standards Institution (BSI), London.

- Buchanan, A.H. ve Abu, A.K., 2017. Structural Design for Fire Safety, Second Edition, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, United Kingdom.
- Burnaz, O., 2003. Betonarme Yapılarda Yangın ve Yangın Tasarımlarının Bir Model Üzerinde İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Burnaz, O., 2010. Betonarme Yapılarda Yangın ve Bu Yapıların Yangın Etkisi Altında Doğrusal Olmayan Davranışlarının İncelenmesi, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye.
- Chopra, A.K., 2006. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Third Edition, Prentice Hall, USA.
- Cornwell, P., Farrar, C.R., Doebling, S.W. ve Sohn, H., 1999. Environmental Variability of Modal Properties, Experimental Techniques, 23, 45-48.
- Çengel, Y.A. ve Boles, M.A., 1996. Mühendislik Yaklaşımıyla Termodinamik, McGraw-Hill – Literatür, İstanbul.
- DBYBHY. 2007. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, Türkiye.
- De Wit, A., 2011. Behaviour and Structural Design of Concrete Structures Exposed to Fire, MSc Thesis, Stockholm, Sweden.
- Denoël J.-F., 2007. Fire Safety and Concrete Structures, FEBELCEM – Federation of Belgian Cement Industry.
- 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.
- Dimia, M.S., Guenfoud, M., Gernay, T. ve Franssen, J.-M, 2011. Collapse of Concrete Columns During and After the Cooling Phase of a Fire, Journal of Fire Protection Engineering, 21, 4, 245-263.
- ECCS – Technical Note No. 55, 1988. Calculation of the Fire Resistance of Centrally Loaded Composite Steel-Concrete Columns Exposed to the Standard Fire, European Convention for Construction Steelwork (ECCS) Technical Committee 3, Brussels.
- Emberley, R. L., 2013. A Study into the Behavior of Reinforced-Concrete Columns under Fire Exposures using a Spreadsheet-Based Numerical Model, PhD Thesis, Worcester Polytechnic Institute.
- EN 1363-1, 2012. Fire Resistance Tests – Part 1: General Requirements, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.

- EN 1990, 2002. Eurocode – Basis of Structural Design, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- EN 1991-1-2, 2002. Eurocode 1: Actions on Structures – Part 1-2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- EN 1992-1-2, 2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- EN 1993-1-2, 2005. Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- EN 1994-1-2, 2005. Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1.2: General Rules – Structural Fire design, European Committee for Standardisation (CEN), Brussels.
- Etili, S., 2015. Residual Material Characteristics of an Industrial Building after Fire, MSc Thesis, University Of Gaziantep, Graduate School Of Natural & Applied Sciences, Gaziantep, Turkey.
- Faravelli, L., Ubertini, F. ve Fuggini, C., 2011. System Identification of A Super High-Rise Building via A Stochastic Subspace Approach, Smart Structures and Systems, 7, 133-152.
- Forni D., Chiaia B. ve Cadoni E., 2017. Blast Effect on Steel Columns under Fire Conditions, Journal of Constructional Steel Research, 136, 1-10.
- Hacıemiroğlu, M., 2014. Yangın Geçirmiş Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Haksever, A., 2005. Fire Tests on Concrete Frameworks – Analysis of the Results, Trakya Univ J Sci, 6, 2, 75-82.
- Hertz, K., 1981. Simple Temperature Calculations of Fire Exposed Concrete Constructions, Report No. 159, Institute of Building Design, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby.
- Incropera, F.P. ve DeWitt, D.P., 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Fourth Edition, John Wiley & Sons Ltd.
- Inwood, M., 1999. Review of NZS 3101 for High Strength and Lightweight Concrete Exposed to Fire, Fire Engineering Research Report 99/10, University of Canterbury, New Zealand.
- ISO 834, 1975. Fire Resistance Tests – Elements of Building Construction, International Organization for Standardization (ISO), Geneva, Switzerland.

- Jansson, R., 2008. Material Properties Related to Fire Spalling of Concrete, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Sweden.
- Kay, T.R., Kirby, B.R. ve Preston, R.R., 1996. Calculation of the Heating Rate of an Unprotected Steel Member in a Standard Fire Resistance Test, Fire Safety Journal, 26, 4, 327-350.
- Khoury, A. ve Anderberg, Y., 2000. Fire Safety Design – Concrete Spalling Review, Swedish National Road Administration.
- Khoury, G. A., 2008. Passive Fire Protection of Concrete Structures. Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings, 161, 3, 135-145.
- Kılıç, M., 2003. Yapılarda Yangın Güvenliği ve Söndürme Sistemleri, Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 8, 1, 59-70.
- Kızılkant, A.B., 2010. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Kalan Betonun Basınç Dayanımı Renk Değişimi İlişkisinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Macdonald, J.H.G. ve Daniell, W.E., 2005. Variation of Modal Parameters of A Cable-Stayed Bridge Identified from Ambient Vibration Measurements and FE Modelling, Engineering Structures, 27, 1916-1930.
- Park, J.E., Shin, Y.S. ve Kim, H.S., 2011. Various Factors Influencing on Thermal Behaviors of High Strength Concrete (HSC) Columns under Fire, Procedia Engineering, 14, 427-433.
- Perkins, P. H., 1986. Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England Google Scholar.
- Salman, B., 2017. Yangın Güvenliği Yangın Çıkmasıyla Başlamaz, Elektrik Mühendisliği Dergisi, 462, 35-37.
- SAP2000, 2016. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA.
- Schneider, U. ve Lebeda, C., 2000. Baulicher Brandschutz, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, Germany.
- Schneider, U., 1986. Properties of Materials at High Temperatures – Concrete, Second Edition, RILEM Report, Gesamthochschule Kassel, Germany.
- Selamet, S., 2017. Türkiye’de Yangın Mühendisliği, TÜYAK Yangın Mühendisliği Dergisi, 2, 62-63.



- Song, W. ve Dyke, S.J., 2006. Ambient Vibration Based Modal Identification of The Emerson Bridge Considering Temperature Effects, The 4th World Conference on Structural Control and Monitoring, San Diego, USA.
- Şentürk, H.O., 2006. Betonarme Binalarda Depremlerin ve Yangınların Binaya Etkisinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Örneği, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- T.C. Resmi Gazete, 2007. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (BYKHY), Başbakanlık Basımevi, 26735.
- T.C. Resmi Gazete, 2015. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 7401.
- T.C. Resmi Gazete, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY), Başbakanlık Basımevi, 30364.
- Tan, K. H. ve Yao, Y. 2003. Fire Resistance of Four-Face Heated Reinforced Concrete Columns, Journal of Structural Engineering, 129, 9, 1220-1229.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü (TSE), Ankara, Türkiye.
- Uysal, A., 2004, Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Wickström, U., 1986. A Very Simple Method for Estimating Temperatures in Fire Exposed Concrete Structures, Elsevier Applied Science, London, UK, 186-194.
- Xavier, H. F. B., 2009. Analysis of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire: Based on Advanced Calculation Methods, University of Porto, Porto, Portugal.
- Xia, Y., Hao, H., Zanardo, G. ve Deeks, A.J., 2006. Long Term Vibration Monitoring of A RC Slab: Temperature and Humidity Effect, Engineering Structures, 28, 441-452.
- Yalaman, B., 2006. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kalan Yapılarda Çelik Donatı Özelik Değişimine Betonarme Pas Payının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye.
- Zeybek, A., 2008. Betonarme Kolonların Yangın Koşullarında Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Zha, X. X., 2003. Three-Dimensional Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Members in Fire, Building and Environment, 38, 2, 297-307.

## ÖZGEÇMİŞ

Yunus Emrahan AKBULUT, 1991 yılında Trabzon'da doğdu. 2010 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 eğitimi de alarak 2015 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu ve lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda "Yüksek Lisans" eğitimine başladı. Birleşik Arap Emirlikleri'nin Abu Dhabi kentinde inşa edilmekte olan havalimanında staj deneyimi bulunan AKBULUT iyi derecede İngilizce bilmektedir. TÜBİTAK 3001 – Başlangıç Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından desteklenen iki bilimsel projede sırasıyla bursiyer ve araştırmacı olarak görevine devam etmekte olan AKBULUT'un bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

- Bayraktar, A., Genç, A.F., Akbulut, Y.E. ve Altunışık, A.C., 2016. Safety Assessment of Stone Arch Bridges Using Micro and Macro Modeling Techniques Including Soil Interaction Effect, Istanbul Bridge Conference, İstanbul, Türkiye, Bildiriler Kitabı: 36-46.