

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK
ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

DOKTORA TEZİ

İnş. Yük. Müh. Arman HOSSEIN ESKANDANI

ŞUBAT 2020
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK
ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

İnş. Yük. Müh. Arman HOSSEIN ESKANDANI

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce
"DOKTOR (İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih 08/01/2020
Tezin Savunma Tarihi 03/02/2020**

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Selim PUL

Trabzon 2020

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında
Arman HOSSEIN ESKANDANI Tarafından hazırlanan**

**EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK
ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ**

**başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 14/01/2020 gün ve 1837 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
DOKTORA TEZİ
olarak kabul edilmiştir.**

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Selim PUL

Üye : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Üye : Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK

Üye : Prof. Dr. Şükrü YETGİN

Üye : Doç. Dr. İlker USTABAŞ

**Prof. Dr. Asim KADIOĞLU
Enstitü Müdürü**

ÖNSÖZ

Bu çalışma, “Ekenel Yüklü Betonarme Kolonların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranışlarının Deneysel ve Sayısal Olarak İncelenmesi” başlığıyla Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır.

Doktora eğitimim süresince, birlikte çalışma fırsatı bulduğum, bilgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, bilimsel düşünceleriyle beni yönlendiren, her türlü desteği sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Selim PUL’a şükranlarımı sunarım.

Çalışma sürecinde, değerli vakitlerini ayırıp ve katkılarını esirgemeyen tez izleme komitesi hocalarım sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM ve sayın Prof. Dr. Genççağa PÜRÇEK ile jüri üyeliği görevini üstlenen sayın Prof. Dr. Şükrü YETGİN ve sayın Doç. Dr. İlker USTABAŞ’a ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bana destek olan Arş. Gör. Mehmet ŞENTÜRK’e müteşekkir olduğumu belirtmek isterim.

Hayatımın her aşamasında beni maddi ve manevi destekleyen sevgili annem Adele DABBAG’a, babam Mohammed HOSSEIN ESKANDANI’ye ve ağabeyim Omid HOSSEIN ESKANDANI’ye sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Arman HOSSEIN ESKANDANI

Trabzon, 2020

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSEL ve SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Selim Pul’un 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. 03/02/2020

Arman HOSSEIN ESKANDANI

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
TABLolar DİZİNİ.....	XIX
SEMBOLLER DİZİNİ	XX
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yangın Olayı	3
1.2.1. Yangının Gelişim Aşamaları	3
1.2.1.1. Alevlenme Öncesi	4
1.2.1.2. Alevlenme.....	5
1.2.1.3. Alevlenme Sonrası.....	6
1.2.2. Yangın Sınıfları	6
1.2.3. Standart Yangın Davranış Modelleri.....	7
1.3. Malzemelerin Yanıcılık Sınıfları ve Yangın Yüğü	10
1.4. Yapılarda Yangın Güvenliği.....	13
1.4.1. Yangın Şiddeti ve Yangın Dayanımının Karşılaştırılması	14
1.4.1.1. Zamanı Esas Alan Karşılaştırma	15
1.4.1.2. Sıcaklığı Esas Alan Karşılaştırma	15
1.4.1.3. Dayanımı Esas Alan Karşılaştırma.....	16
1.5. Yapıların Yangın Dayanımının Değerlendirmesinde Kullanılan Yöntemler	16
1.5.1. Yangın Deneyi Yöntemi.....	17
1.5.2. Yönergeye Dayalı Yöntem	17
1.5.3. Performansa Dayalı Yöntemler	18
1.5.3.1. Basitleştirilmiş Hesaplamalar Yöntemi.....	19
1.5.3.2. Termomekanik Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi	20
1.5.3.3. Kapsamlı Termohidromekanik Sonlu Elemanlar Yöntemi	21
1.6. Isının Tanımı ve Önemi.....	21

1.6.1.	Isı Transferi ve Mekanizmaları	22
1.6.1.1.	Isı İletimi	22
1.6.1.2.	Isı Taşınımı	23
1.6.1.3.	Isı Işınımı	24
1.6.2.	Isıl Çözümleme Yöntemleri	25
1.6.2.1.	Tasarım Grafikleri Yöntemi	25
1.7.	Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkileri.....	27
1.7.1.	Kabuk Atma Olayı.....	32
1.7.1.1.	Kabuk Atma Olayını Etkileyen Faktörler.....	34
1.7.1.2.	Kabuk Atma Mekanizmaları	36
1.7.2.	Özkütlenin Değişimi.....	37
1.7.3.	Özgül Isı Katsayısının Değişimi.....	39
1.7.4.	Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi	41
1.7.5.	Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi	42
1.7.6.	Elastisite Modülünün Değişimi	43
1.7.7.	Basınç Dayanımının Değişimi.....	44
1.7.8.	Çekme Dayanımının Değişimi	51
1.7.9.	Ön Yüklemenin Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Beton Dayanımına Etkisi	52
1.8.	Yüksek Sıcaklığın Betonarme Donatısının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkileri	53
1.8.1.	Özgül Isı Katsayısının Değişimi.....	53
1.8.2.	Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi	54
1.8.3.	Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi	54
1.8.4.	Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisinin Değişimi	55
1.9.	Konuyla İlgili Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar	58
1.10.	Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	66
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	67
2.1.	Deneysel Çalışmalar	67
2.1.1.	Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	67
2.1.2.	Numune Kalıplarının Özellikleri	70
2.1.3.	Betonların Yerleştirilmesi ve Numunelerin Kürü	70
2.2.	Betonarme Kolon Numuneler Üzerinde Yüksek Sıcaklık Deneyleri.....	73
2.3.	Yüksek Sıcaklık Deney Düzeneği	75
2.3.1.	Elektrikli Fırın	76

2.3.2.	Kontrol Düzeneği	78
2.3.2.1.	Fırın Sıcaklığının Ölçümü	80
2.3.2.2.	Su İle Soğutma Sistemi	81
2.4.	Yükleme ve Yerdeğiştirme Ölçüm Düzeneği.....	83
2.5.	Yüksek Sıcaklık Deneylerinin Gerçekleştirilmesi.....	84
2.6.	Sayısal Çalışmalar	87
2.6.1.	Malzeme Modellerinin Özellikleri	87
2.6.1.1.	Beton Modeli	87
2.6.1.2.	Donatı Modeli.....	91
2.6.2.	Sınır Şartları ve Yapılan Kabuller	93
2.6.3.	Modellemede Kullanılan Eleman Tipleri	95
3.	BULGULAR VE İRDELEMELER.....	97
3.1.	Giriş	97
3.2.	Eksenel Yüklü Deney Elemanlarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Davranışları	97
3.2.1.	CL-R ve CN-R Kolonları	97
3.2.2.	CL-30-W Kolonu.....	100
3.2.3.	CL-30-A Kolonu	102
3.2.4.	CL-60-W Kolonu.....	105
3.2.5.	CL-60-A Kolonu	108
3.2.6.	CL-Cont. Kolonu	110
3.2.7.	CN-60-W Kolonu	112
3.2.8.	CN-60-A Kolonu	115
3.2.9.	CN-120-W Kolonu	117
3.2.10.	CN-120-A Kolonu	120
3.2.11.	CN-Cont. Kolonu	122
3.3.	DeneySEL Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması.....	124
3.3.1.	Yük Taşıma Kapasiteleri	124
3.3.2.	Rijitlik Değişimleri.....	127
3.3.3.	Yüzey Erozyonu ve Kabuk Atma Olayı.....	128
3.4.	Kolonların Sonlu Eleman Analizi Sonuçları	130
3.4.1.	CL-R Kolonu	130
3.4.2.	CL-30-W Kolonu.....	131
3.4.3.	CL-30-A Kolonu	133

3.4.4.	CL-60-W Kolonu.....	135
3.4.5.	CL-60-A Kolonu	137
3.4.6.	CL-120-W Kolonu.....	139
3.4.7.	CL-120-A Kolonu	141
3.4.8.	CL-Cont. Kolonu.....	143
3.4.9.	CN-R Kolonu.....	144
3.4.10.	CN-30-W Kolonu	145
3.4.11.	CN-30-A Kolonu	147
3.4.12.	CN-60-W Kolonu	149
3.4.13.	CN-60-A Kolonu	151
3.4.14.	CN-120-W Kolonu	153
3.4.15.	CN-120-A Kolonu	155
3.4.16.	CN-Cont. Kolonu	157
3.5.	Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması	158
3.5.1.	Yük Taşıma Kapasiteleri	158
3.5.2.	Sıcaklık Dağılımının Kesit İçinde Değişiminin İncelenmesi	160
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	163
5.	KAYNAKLAR	166
ÖZGEÇMİŞ		

Doktora Tezi

ÖZET

EKSENEL YÜKLÜ BETONARME KOLONLARIN YÜKSEK SICAKLIK
ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞLARININ DENEYSSEL VE SAYISAL OLARAK
İNCELENMESİ

Arman HOSSEIN ESKANDANI

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Selim PUL
2020, 170 Sayfa

Betonarme yapılar asıl olarak kullanım yüklerini ve sismik hareketlerin neden olduğu yanıl kuvvetleri taşımak için tasarlanmakla birlikte, yangın gibi olaylar nedeniyle ortaya çıkan yüksek sıcaklığın bu yapıların güvenliğini önemli ölçüde etkileyebilecek tehlike olarak dikkate alınması gerektiği açıktır. Betonarme elemanların yüksek sıcaklık etkisi altında yapısal performansı ve yük taşıma kapasiteleri önemli ölçüde azalabilmekte ve kısmi veya toptan göçme durumu oluşabilmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında bir taşıyıcı eleman olarak eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları incelenmektedir. ISO 834 standart yangın eğrisini bilgisayar kontrol sistemi sayesinde otomatik olarak uygulayabilen özel bir elektrikli fırın ve soğutma sisteminin kullanıldığı çalışmada betonarme kolon elemanlara sabit eksenel yük altındayken yüksek sıcaklık etkisi de verilmiştir. Belirlenen sıcaklık değerine ve ısıtma süresine ulaşıldığında, deney senaryosu gereği suyla soğuma ya da kendiliğinden soğuma uygulaması sonunda sabit olarak bekletilmekte olan yük artırılarak kolonun eksenel yük taşıma kapasitesi belirlenmiştir. Çalışmanın ana parametreleri beton dayanımı, ısıtma süresi ve soğutma tipidir. Böylece, yüksek sıcaklık sonrası kolon numunelerin rijitlik ve taşıma kapasitelerinin değişimi incelenmiştir. Betonarme kolon numuneler ayrıca Abaqus programı kullanılarak deneysel sonuçların ışığında sayısal olarak da modellenmiş ve analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalardan, ısıtma süresi arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesindeki azalmanın da arttığı, 120 dakikalık yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin kendiliğinden soğuyanında %9.5 kapasite azalması meydana gelirken, suyla soğutulan kolonda bu oran %35 olarak belirlenmiştir. Bu durum, yangına maruz binaya suyla müdahale sırasında ısıl şoktan dolayı özellikle düşey taşıyıcılarda oluşacak kapasite düşüşünün göz önünde bulundurulması gerektiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kolon, Eksenel Yük, ISO 834, Deneysel Model, Sayısal Analiz, Abaqus

PhD Thesis

SUMMARY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION BEHAVIOR OF AXIAL
LOADED REINFORCED CONCRETE COLUMNS UNDER HIGH TEMPERATURE

Arman HOSSEIN ESKANDANI

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Selim PUL
2020, 170 Pages

Although reinforced concrete structures are traditionally designed to carry service loads and lateral forces caused by seismic events, it is clear that the high-temperature caused by events such as fire should be also taken into account as hazardous phenomena that can significantly affect the safety of these structures. High-temperature exposure can considerably reduced the structural performance and load carrying capacity of reinforced concrete members, and therefore lead to a partial or total collapse. To address this issue, this study aims to investigate the axial load bearing capacity of reinforced concrete columns exposed to high temperature. In the study, a special electric furnace and cooling system which can apply ISO 834 standard fire curve automatically by computer control system is used to give reinforced concrete column elements with high-temperature effect under constant axial load. When the expected temperature value and heating time were reached, the axial load carrying capacity of the column was determined by increasing the load which was kept constant after the water-cooling or self-cooling application according to the experimental scenario. The main parameters of the study were concrete strength, heating time and cooling type. Thus, the change in stiffness and bearing capacity of the column specimens after high temperature was investigated. Reinforced concrete column specimens were also numerically modeled and analyzed using the Abaqus program to verify the experimental results. According to the experimental studies, the decrease in axial load carrying capacity increased as the heating time increased, the self-cooling capacity of the specimens applied to 120 minutes of high temperature decreased by 9.5%, while this ratio was determined as 35% in the water-cooled column. This has shown that the capacity decrease due to thermal shock, especially in vertical bearing elements, should be taken into account during the water intervention of the building exposed to fire.

Key Words: Concrete Column, Axial Load, ISO 834, Experimental Model, Numerical Analysis, Abaqus

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. (a) Yangın öncesi ve (b) yangın sonrası Windsor Tower (De Wit, 2011)	1
Şekil 1.2. Bir banka binasının 12. katındaki yangın (Buchanan ve Abu, 2017).....	2
Şekil 1.3. Yangının gelişim aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017).....	4
Şekil 1.4. Bir oda yangının ilk aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017)	5
Şekil 1.5. Standart bir yangın eğrisi ile doğal bir yangın eğrisinin karşılaştırılması (De Wit, 2011).....	6
Şekil 1.6. Bazı yönetmeliklerde önerilen standart yangın eğrileri (Buchanan ve Abu, 2017).....	9
Şekil 1.7. Yapı elemanlarında iletim yoluyla ısı geçişi	23
Şekil 1.8. Taşınım yoluyla ısı geçişi.....	24
Şekil 1.9. Bir yüzeyden diğer yüzeye ışıınım yoluyla ısı geçişi (Buchanan ve Abu, 2017 2001).....	24
Şekil 1.10. Sıcaklık profillerinin sunulduğu enkesit alanı (EN1992- 1-2, 2004)	26
Şekil 1.11. 300 mm×300 mm boyutlu kare kolon enkesitinde 30, 60, 90 ve 120 dakikalık standart yangın için sıcaklık dağılım profilleri (EN 1992-1-2, 2004).....	28
Şekil 1.12. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)	29
Şekil 1.13. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan kabuk atma olayı (R. Jansson, 2013).....	29
Şekil 1.14. Portland çimentolu betonunda ısıtma sırasında fizikokimyasal değişim aşamalar (Khoury, 2003)	31
Şekil 1.15. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan agrega kabuk atması (R. Jansson, 2013).....	32
Şekil 1.16. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan yüzeysel kabuk atma (R. Jansson, 2013).....	33
Şekil 1.17. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan patlamalı kabuk atma (R. Jansson, 2013).....	33
Şekil 1.18. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan köşe dökülme kabuk atması (H. Buchanan ve K. Abu, 2017)	34
Şekil 1.19. Normal dayanımlı beton için deneysel paspayı kabuk atmanın nem içeriği ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak göstermesi	35
Şekil 1.20. Tek bir açık yüzeyden ısıtma sırasında (a) geleneksel ve (b) yüksek performanslı beton elemanlarda sıcaklık (T), boşluk basıncı (P) ve nem gradyanları (W)	35

Şekil 1.21. Boşluk basınçları ve ısı gerilmelerden etkilenen betonda kabuk atma olayı (Kkoury, 2008)	38
Şekil 1.22. Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)...	39
Şekil 1.23. Betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).....	40
Şekil 1.24. Betonun ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).....	42
Şekil 1.25. Betonun ısı genleşmesinin yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004) .	42
Şekil 1.26. Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli deneysel çalışmaların karşılaştırılması (Bastami vd., 2010)	44
Şekil 1.27. Betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	45
Şekil 1.28. Tek eksenli basınca maruz uygulanan betonun yüksek sıcaklardaki gerilme-şekildeğiştirme modeli.....	45
Şekil 1.29. Silisli agregaların kullanıldığı betonun yüksek sıcaklığa bağlı gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (EN 1992-1-2, 2004)	47
Şekil 1.30. Silisli agregalı betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010).....	48
Şekil 1.31. Kalker agregalı betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010)	49
Şekil 1.32. Hafif betonda basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010).....	50
Şekil 1.33. Beton numunelerin 200, 400, 600 ve 800°C'ye kadar ısıtılıp soğutulduktan sonra gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (Lee ve ark. 2008)	50
Şekil 1.34. Betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)	51
Şekil 1.35. Silis ve kalker agregalı betonda basınç ve çekme dayanımlarının farklı sıcaklıklarda karşılaştırmaları.....	52
Şekil 1.36. Ön yüklemenin yüksek sıcaklık altındaki beton dayanımına etkileri (Khoury, 2002).....	52
Şekil 1.37. Çeliğin özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1993-1-2, 2005).....	53
Şekil 1.38. Çeliğin ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi.....	54
Şekil 1.39. Donatı ve öngerilme çeliğinin ısı genleşme katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004).....	55
Şekil 1.40. Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden model (EN 1992-1-2, 2004)	56
Şekil 1.41. Çeliklerin farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları (EN 1993-1-2, 2005)	57

Şekil 1.42. Geleneksel ve yüksek dayanımlı betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları (Kodur, 1999).....	58
Şekil 1.43. (a) Geleneksel ve (b) yüksek dayanımlı betonarme kolon numunelerin yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları (Kodur, 1999).....	58
Şekil 1.44. Betonarme kolon numunelerin (a) boyut ve (b) kesitleri (Kodur vd., 2003)	59
Şekil 1.45. (a) 90° kancalı ve (b) 135° kancalı etriyelerle yapılmış yüksek dayanımlı betonarme kolon numunelerde yangın sonrası kabuk atma olayın karşılaştırılması (Kodur ve Phan, 2007).....	60
Şekil 1.46. Betonarme kolonun farklı derinliklerindeki sıcaklık dağılımının karşılaştırması (Wu, Hong vd., 2007)	61
Şekil 1.47. Betonarme kolon numunelerin (a) boyutları ve (b) enkesiti (Yih-Houng Chen vd., 2009).....	62
Şekil 1.48. Deney şeması (Yih-Houng Chen vd., 2009)	62
Şekil 1.49. Yih-Houng Chen vd., (2009) tarafından kullanılan fırın.....	63
Şekil 1.50. Yüksek sıcaklık-yük uygulamasını yapan sistem (Jacintho vd., 2012).....	64
Şekil 1.51. Deney sisteminin görünümü (Tan ve Nguyen, 2013)	64
Şekil 1.52. Deney düzeneği (Asif H. Shah ve U.K. Sharma, 2017).....	65
Şekil 2.1. Üniversal deney aleti	68
Şekil 2.2. Betonarme kolon numunelerin boyutları ve enkesit detayları	69
Şekil 2.3. Hazırlanan donatıların görünümü.....	69
Şekil 2.4. Plywood levhalarından yapılan kolon kalıpları.....	70
Şekil 2.5. Donatıların kalıp içine yerleştirilmiş hali	70
Şekil 2.6. Beton döküm sonrasında bir görünüm	71
Şekil 2.7. Küp ve kolon numunelerin kürlenmesi	72
Şekil 2.8. Betonarme kolon deney numuneleri.....	73
Şekil 2.9. Deney düzeneğinin görünümü	75
Şekil 2.10. Elektrikli fırının numuneden uzaktaki hali ve boyutları	76
Şekil 2.11. Elektrikli fırının ısıtma işlemi sırasındaki hali	77
Şekil 2.12. Fırının izleme penceresi	77
Şekil 2.13. Fırının kontrol düzeneği	78
Şekil 2.14. Fırın kontrol yazılımının arayüzünün bir deney sırasındaki ekran görüntüsü... ..	79
Şekil 2.15. Fırın Kontrol düzeneğinin akış diyagramı	79
Şekil 2.16. K tipi termokupl	80
Şekil 2.17. Termokuplun yerleştirilmiş görüntüleri	80
Şekil 2.18. Su ile soğutma sistemi.....	81

Şekil 2.19. Su ile soğutma işlemine ait bazı görüntüler	82
Şekil 2.20. Numunelerin yükleme ve ölçüm sistemi	83
Şekil 2.21. Yerdeğiştirme ölçer (LPDT)	84
Şekil 2.22. Veri toplama ünitesi (Data-logger).....	84
Şekil 2.23. Deney elemanlarına uygulanan ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi.....	85
Şekil 2.24. Fırın iç sıcaklığının ISO 834 eğrisini izlemesi.....	85
Şekil 2.25. Deneylere ait bazı görüntüler	86
Şekil 2.26. Betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramının yüksek sıcaklıkla değişimi için önerilen sayısal model (EN 1992-1-2, 2004)	89
Şekil 2.27. CL betonun farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri	90
Şekil 2.28. CN betonun farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.....	91
Şekil 2.29. S420 donatı çeliği için kullanılan elasto plastik malzeme modeli	92
Şekil 2.30. Betonarme kolonun sonlu eleman analizlerindeki sınır koşulları	93
Şekil 2.31. (a) Rijit plakanın yerleştirilmesi (b) kolonla plaka arasındaki yüzeyin tanımlanması (c) betonla donatılar arasındaki aderansın tanımlanması.....	94
Şekil 2.32. (a) C3D8RT beton eleman tipi (b) T3D2T donatı çeliği eleman tipi (c) betonarme kolonun sonlu eleman ağı	95
Şekil 3.1. CL soğuk referans deney numunesine ait görüntüler.....	98
Şekil 3.2. CN soğuk referans deney numunesine ait görüntüler	98
Şekil 3.3. CL soğuk referans numunelerinin ortalamasından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	99
Şekil 3.4. CN soğuk referans numunelerinin ortalamasından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi.....	99
Şekil 3.5. CL-30-W deney numunesine ait görüntüler	100
Şekil 3.6. CL-30-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	101
Şekil 3.7. CL-30-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi.....	101
Şekil 3.8. CL-30-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi	102
Şekil 3.9. Soğutma aşamasına ait termokuplun yerleştirilmiş görüntüsü.....	103
Şekil 3.10. CL-30-A deney numunesine ait görüntüler.....	103
Şekil 3.11. CL-30-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	104
Şekil 3.12. CL-30-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi.....	104
Şekil 3.13. CL-30-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi	105
Şekil 3.14. CL-60-W deney numunesine ait görüntüler.....	106

Şekil 3.15. CL-60-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	106
Şekil 3.16. CL-60-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi.....	107
Şekil 3.17. CL-60-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi	107
Şekil 3.18. CL-60-A deney numunesine ait görüntüler.....	108
Şekil 3.19. CL-60-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	109
Şekil 3.20. CL-60-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi.....	109
Şekil 3.21. CL-60-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi	110
Şekil 3.22. CL-Cont. deney numunesine ait görüntüler	111
Şekil 3.23. CL-Cont. deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	111
Şekil 3.24. CL- Cont. deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi.....	112
Şekil 3.25. CN-60-W deney numunesine ait görüntüler	113
Şekil 3.26. CN-60-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	113
Şekil 3.27. CN-60-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi	114
Şekil 3.28. CN-60-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi	114
Şekil 3.29. CN-60-A deney numunesine ait görüntüler	115
Şekil 3.30. CN-60-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	116
Şekil 3.31. CN-60-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi.....	116
Şekil 3.32. CN-60-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi.....	117
Şekil 3.33. CN-120-W deney numunesine ait görüntüler	118
Şekil 3.34. CN-120-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	118
Şekil 3.35. CN-120-W deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi	119
Şekil 3.36. CN-120-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi.....	119
Şekil 3.37. CN-120-A deney numunesine ait görüntüler	120
Şekil 3.38. CN-120-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	121
Şekil 3.39. CN-120-A deney numunesinden elde edilen aksenal yük-zaman eğrisi.....	121
Şekil 3.40. CN-120-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi.....	122
Şekil 3.41. CN-Cont. deney numunesine ait görüntüler.....	123

Şekil 3.42. CN-Cont. deney numunesineden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	123
Şekil 3.43. CN- Cont. deney numunesineden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi	124
Şekil 3.44. CL deney numunelerinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	125
Şekil 3.45. CN deney numunelerinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	125
Şekil 3.46. Isıtma-soğutma öncesi ve sonrası rijitlik değişimleri.....	127
Şekil 3.47. Numunelerdeki genel kabuk atma görüntüleri	129
Şekil 3.48. Betonda ısıl şok etkisinde oluşan yüzeysel soyulma (erozyon)	129
Şekil 3.49. CL-R numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi	130
Şekil 3.50. CL-R numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	130
Şekil 3.51. CL-30-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	131
Şekil 3.52. CL-30-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	132
Şekil 3.53. CL-30-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi.....	132
Şekil 3.54. CL-30-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	133
Şekil 3.55. CL-30-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	134
Şekil 3.56. CL-30-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	134
Şekil 3.57. CL-60-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	135
Şekil 3.58. CL-60-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe şekildeğiştirme eğrisi.....	136
Şekil 3.59. CL-60-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi.....	136
Şekil 3.60. CL-60-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	137
Şekil 3.61. CL-60-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	138
Şekil 3.62. CL-60-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	138

Şekil 3.63. CL-120-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	139
Şekil 3.64. CL-120-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	140
Şekil 3.65. CL-120-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi.....	140
Şekil 3.66. CL-120-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	141
Şekil 3.67. CL-120-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	142
Şekil 3.68. CL-120-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	142
Şekil 3.69. CL-Cont. numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi	143
Şekil 3.70. CL-Cont. numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	143
Şekil 3.71. CN-R numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi	144
Şekil 3.72. CN-R numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	144
Şekil 3.73. CN-30-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	145
Şekil 3.74. CN-30-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	146
Şekil 3.75. CN-30-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	146
Şekil 3.76. CN-30-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	147
Şekil 3.77. CN-30-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	148
Şekil 3.78. CN-30-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	148
Şekil 3.79. CN-60-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	149
Şekil 3.80. CN-60-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	150
Şekil 3.81. CN-60-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	150

Şekil 3.82. CN-60-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	151
Şekil 3.83. CN-60-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	152
Şekil 3.84. CN-60-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	152
Şekil 3.85. CN-120-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	153
Şekil 3.86. CN-120-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	154
Şekil 3.87. CN-120-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	154
Şekil 3.88. CN-120-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı	155
Şekil 3.89. CN-120-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	156
Şekil 3.90. CN-120-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi	156
Şekil 3.91. CN-Cont. numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi	157
Şekil 3.92. CN-Cont. numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	157
Şekil 3.93. CL numuneler için sayısal analizlerden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	158
Şekil 3.94. CN numuneler için sayısal analizlerden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi	159
Şekil 3.95. CL-60-W numunesinin ısıtma-soğutma aşamalarındaki sıcaklık değişimi.....	161
Şekil 3.96. CN-60-W numunesinin ısıtma-soğutma aşamalarındaki sıcaklık değişimi	162

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Yapı malzemelerin yanıcılık sınıfları (TS1263, 1983)	11
Tablo 1.2. Yapı elemanlarının yangına dayanma sürelerine göre sınıflandırılması	12
Tablo 1.3. TS1263'e uygun olarak denenen yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin yanıcılı sınırları (TS1263, 1983)	12
Tablo 1.4. Çeşitli ölçüt ve birimlere göre yangın dayanımı ve şiddetlerinin karşılaştırılması (Buchanan ve Abu, 2017)	14
Tablo 1.5. Farklı enkesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının yangın performans süreleri	26
Tablo 1.6. Farklı kabuk atma türleri	34
Tablo 1.7. Silis ve kalker agregalı betonun yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait parametreler (EN 1992-1-2, 2004)	46
Tablo 1.8. Çeliğin yüksek sıcaklıktaki kullanılan esas formülleri (EN 1993-1-2, 2005)....	56
Tablo 2.1. Beton bileşimleri	67
Tablo 2.2. Betonların aksenal basınç dayanım değerleri	68
Tablo 2.3. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri	68
Tablo 2.4. Sabit aksenal yük etkisi altında belli süreler boyunca yüksek sıcaklığa maruz betonarme kolon numunelerin deney senaryoları	74
Tablo 2.5. Sabit aksenal yük etkisi altında dayanım kaybı yaşanıncaya kadar yüksek sıcaklığa maruz betonarme kolon deneyleri	74
Tablo 2.6. CL ve CN betonlarının Drucker-Prager modeli için sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan çekme dayanımları	88
Tablo 2.7. Kalker agregalı betonun yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait dayanım azaltma katsayıları ve şekildeğiştirme parametreler (EN 1992-1-2, 2004)	90
Tablo 2.8. Donatı çeliğinin farklı sıcaklıklar için kabul edilen bazı özellikleri	92
Tablo 2.9. Sayısal numuneler için oluşturulan analiz modelleri	96
Tablo 3.1. Betonarme kolon numunelerin aksenal yük taşıma kapasitelerinin değişimi ..	126
Tablo 3.2. Betonarme kolon numunelerin rijitlik değişimleri	127
Tablo 3.3. Betonarme kolon numuneleri için analiz sonuçlarından elde edilen aksenal yük taşıma kapasitelerinin değişimi	159

SEMBOLLER DİZİNİ

A	Isı iletiminde sistemin yüzey alanı
C_p	Özgül ısı
$C_p(\theta)$	θ sıcaklığındaki özgül ısı
e	Isı iletiminde sistemin kalınlığı
E	Elastisite modülü
$E_{a,\theta}$	Doğrusal elastik bölgenin eğimi
E_c	Betonun elastisite modülü
E_s	Çeliğin elastisite modülü
f_{cm}	Betonun basınç dayanımı
f_{ctm}	Betonun çekme dayanımı
$f_{c,\theta}$	θ sıcaklığındaki betonun basınç dayanımı
$f_{ct,t}(\theta)$	θ sıcaklığındaki betonun çekme dayanımı
$f_{y,\theta}$	Etkili akma dayanımı
$f_{p,\theta}$	Orantılı sınırı
h	Isı taşınım katsayısı
$k_{c,t}(\theta)$	θ sıcaklığındaki betonun karakteristik çekme dayanımı azalma katsayısı
P	Boşluk basıncı
Q	Sistemden geçen ısı miktarı
R_f	Yangın sırasında ulaşılan minimum yük kapasitesi
$t_{göç}$	Yapının standart yangına maruz kaldığında göçme süresi
t_{maks}	Yangın sırasında elemanda ulaşılan maksimum sıcaklık
t_s	Standart yangının tasarım dayanımı süresi
T	Yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığı
T_e	Işınım veren yüzeyin sıcaklığı
T_m	Yüzey ile temasta bulunan akışkanın ortalama sıcaklığı
T_r	Işınım alan yüzeyin sıcaklığı
T_w	Yüzey sıcaklığı
T_0	Oda sıcaklığı
T_1	Sıcak yüzeyin sıcaklığı

T_2	Soğuk yüzeyin sıcaklığı
U_f	Yangın anında uygulanan yük
W	Nem gradyanı
α	Isıl genleşme katsayısı
β	Sürtünme açısı
$\epsilon_{c,\theta}$	θ sıcaklığındaki betonun şekildeğiştirme
$\epsilon_c(\theta)$	θ sıcaklığındaki betonun ısıl genleşmesi
ϵ_e	Işınım verici yüzeyin yayıcılığı
$\epsilon_{p,\theta}$	Orantılı sınırın şekildeğiştirme
ϵ_r	Işınım alıcı yüzeyin yayıcılığı
ϵ_s	Donatı çeliğinin ısıl genleşmesi
$\epsilon_{t,\theta}$	Akma dayanımının sınır şekildeğiştirme
$\epsilon_{u,\theta}$	Nihai şekildeğiştirme
$\epsilon_{y,\theta}$	Akma şekildeğiştirme
θ	Sıcaklık
θ_c	Beton sıcaklığı
θ_s	Çelik sıcaklığı
λ	Isıl iletkenlik katsayısı
$\lambda_c(\theta)$	θ sıcaklığındaki betonun ısıl iletkenlik katsayısı
$\lambda_s(\theta)$	θ sıcaklığındaki çeliğin ısıl iletkenlik katsayısı
ρ	Özgül ağırlığı
ρ_c	Betonun özgül ağırlığı
$\rho_c(\theta)$	θ sıcaklığındaki betonun özgül ağırlığı
ρ_s	Çeliğin özgül ağırlığı
σ	Gerilme
φ	Işınım veren yüzeylerin şekline bağlı bir katsayı
ψ	Dilatasyon açısı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Beton, yangına dayanımlı ve performansı yüksek, ısının bir noktadan diğer noktaya oldukça yavaş iletiildiği, yanmaz bir malzemedir. Genel olarak bir yangında, beton elemanın sadece yaklaşık 3-5 cm kalınlığındaki dış tabakası zarar görür (Denoël, 2007). Bu nedenle, yangın geçiren birçok betonarme bina, oldukça basit bir şekilde onarılıp yeniden kullanılabilir. Betonarme yapıların yangın davranışına iyi bir örnek, 2005 yılında Madrid (İspanya)'deki Windsor Tower yangınıdır (Denoël, 2007). Yangın tüm binaya yayılmış ve 26 saat sürmüş olmasına rağmen, bina ayakta kalmış ve sadece 20. kattaki çelik dış kolonlar çökmüştür (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. (a) Yangın öncesi ve (b) yangın sonrası Windsor Tower (De Wit, 2011)

Burada uygun bir yapısal yangın tasarımına ihtiyaç vardır, ancak beton ısıtıldığında farklı davranış gösteren ve çeşitli bileşenlerden oluşan karmaşık malzeme olarak bilinir. Yüksek sıcaklıktan dolayı betonda çeşitli fiziko-kimyasal dönüşümler meydana gelmektedir. Bu da dayanım ve sertliğin azalmasına neden olur. Ayrıca, şiddetli kabuk atma olayı beton

yüzeyinden malzemenin kopmasına, en kesitin azalmasına ve donatıyı yüksek sıcaklığa maruz bırakmaya neden olur. Sonuç olarak, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun davranışı karmaşıklığı nedeniyle tam olarak anlaşılmamaktadır. Bugüne kadar varolan yöntemler ve tasarım yönetmelikleri büyük ölçüde deneysel esaslı olup ve gerçek davranışı tam olarak yansıtan hiçbir model geliştirilmemiştir ve beton alanındaki yeni gelişmeler nedeniyle daha da zorlaşmaktadır. Modern yapısal işler, çalışma şartlarını sınırlamıştır. Örneğin yüksek binalarda daha fazla yapısal karmaşıklık, yüksek mukavemetli beton kullanımı, daha ekonomik tasarımlar veya aşırı yapılanmış ortamlar gibi yeni sıkıntıları ortaya çıkarmaktadır. Böylece yangın güvenliği konusunda yeni sıkıntılar ortaya çıkmaktadır. Yangın güvenliği kavramı genellikle aktif ve pasif yangın koruma sistemlerinin bir kombinasyonu ile ifade edilmektedir. Aktif yangın koruma sisteminde, bir kişi veya otomatik bir cihaz tarafından gerçekleştirilen bazı işlemlerle yangın veya yangın etkilerini kontrol edilir. Pasif yangın koruma sisteminde ise, yangına müdahale, yapıya yerleştirilmiş sistemler tarafından kontrol edilir. Yangına dayanıklı olan bu sistemler yangının yayılmasını önleyecek şekilde tasarlanmaktadır.

Yangına dayanıklılık örneği olarak, 1988 yılında Los Angeles'daki 62 katlı banka binasının 12. katında başlayan yangın gösterilmektedir (Şekil 1.2). Aktif ve pasif koruma sistemleri sayesinde, yangından 50 kat yukarıda herhangi bir can ve mal kaybı yaşanmamıştır.



Şekil 1.2. Bir banka binasının 12. katındaki yangın (Buchanan ve Abu, 2017)

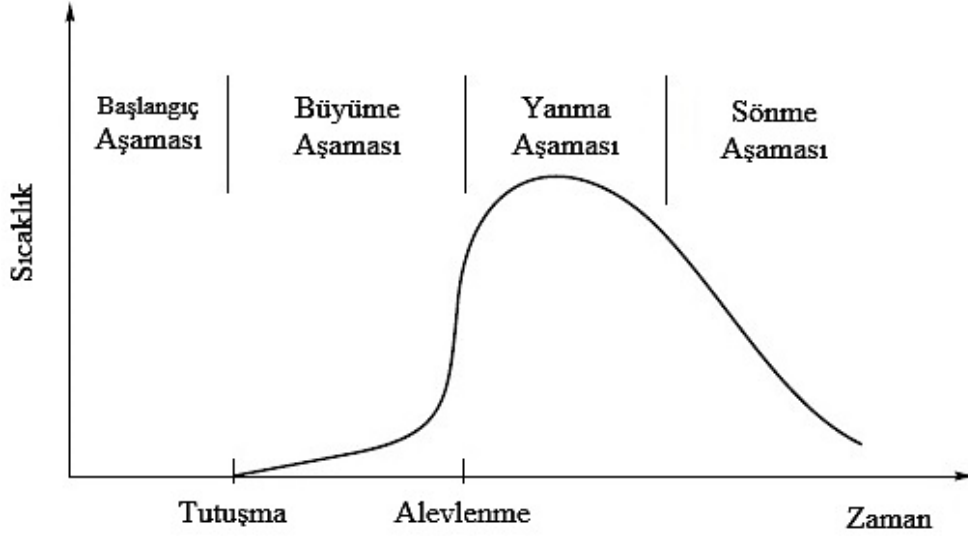
1.2. Yangın Olayı

Yanma olayı, yanıcı maddelerin ateşle tutuşturulmasından sonra havadaki oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girmesi sonucu meydana gelmektedir. Yanma sırasında oluşan ısı enerjisi, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerji türleri şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma olayı, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyona girme hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Ashre, 1997). Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise; katı, sıvı veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır.

Yanma olayının gerçekleşmesi için ısı kaynağı, yanıcı malzeme ve oksijenin aynı anda bir arada olması gerektiği açıktır. Yanma işlemi, yanıcı malzeme ve oksijen, tutuşma sıcaklığına ulaştığında başlamakta, yanıcı malzemedeki karbonun yanması neticesinde karbondioksit (CO₂) oluşmakta ve eğer oksijen yetersizliği görülürse zehirleyici karbon monoksit gazı da (CO) oluşmaktadır.

1.2.1. Yangının Gelişim Aşamaları

Genel olarak bir yangının gelişim aşamaları incelendiğinde (Şekil 1.3); yangının tutuşma, büyüme, alevlenme, tam gelişmiş yangın ve sönme aşamalarından meydana geldiği görülmektedir. Her bir aşamaya ait davranış farklı olmasına rağmen, ayırım alevlenme öncesi ve alevlenme sonrası olarak yapılmaktadır. Bir yapının yangın tasarımı yapılırken alevlenme sonrası durumu dikkate alınmaktadır. Can güvenliğine yönelik tasarımda ise, yangının alevlenme öncesi davranışının bilinmesi son derece önemlidir.



Şekil 1.3. Yangının gelişim aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017)

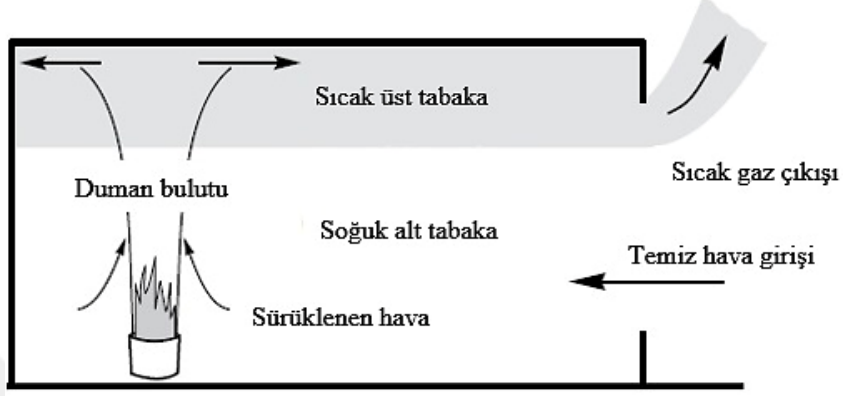
1.2.1.1. Alevlenme Öncesi

Binaların yangına göre tasarımı (yangın tasarımı) sürecinde, alevlenme öncesi etkilerinin hesaplanması, yangının bu aşamada can güvenliği üzerinde en büyük etkiye sahip olması nedeniyle çok önemlidir. Yangın sırasında insanların binadan güvenle tahliyesini sağlamak için, beklenen yangın büyüme hızının, yangın odasındaki sıcak üst katmanın ve yangın ilerledikçe bitişik koridorlardan ortaya çıkacak sıcaklık değerinin bilinmesi gereklidir. Ayrıca, otomatik yangın algılama ve söndürme sistemlerinin nasıl çalıştığının bilinmesi de önemlidir.

Bir odanın içinde yanan malzemeler yandıklarında farklı davranabilirler. Yanıcı cismin üzerindeki sıcak gazın taşınması tavana doğru hareket edip ve sıcak bir üst tabaka oluşturmak için yatay olarak yayılır. Yangının başlangıç aşamalarında, geri besleme ile yayılan bu sıcak üst tabakanın oluşumu, yanma oranını önemli ölçüde artırır. Daha sonra, havalandırma, yanıcı maddelerin kısıtlaması ve alt tabakadaki oksijen konsantrasyonunu azaltabilen sınırlı havalandırma nedeniyle yanma oranı ciddi şekilde azaltılabilir.

Şekil 1.4'te, bir odadaki başlangıç aşamasında olan herhangi bir alevin diğer eşyalara da yayılmasından önceki durumu verilmiştir. Odanın havalandırması için tek bir açıklık vardır. Yanma reaksiyonu, başlangıçta odadaki havadan, daha sonra da dışarıdan gelen havanın oksijeninden beslenir. Yangın enerjisi bir pompa gibi davranarak, soğuk havayı odanın içine çekerken, yanan ürünleri açıklığın üstünden odanın dışına doğru iter. Oluşan

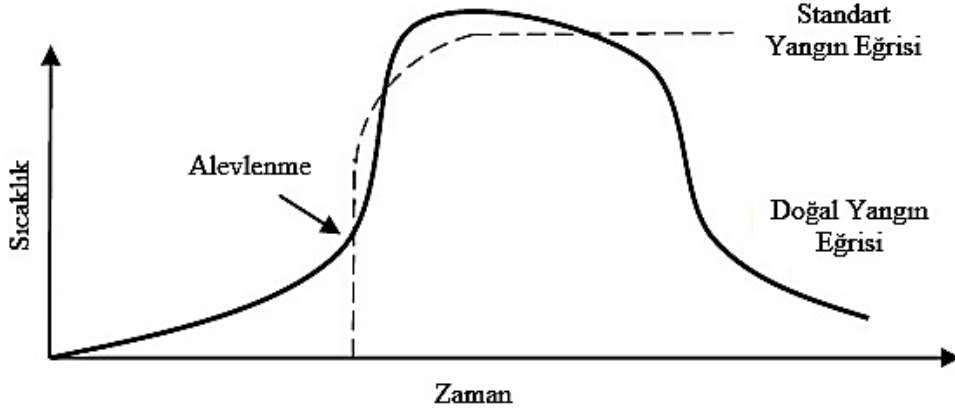
duman, yanma ürünlerinin tavana kadar taşınmasını sağlar. Bu tabakanın kalınlığı ve sıcaklığı yangının büyümesi ile artış gösterir. Yangın yanmaya devam ettikçe, sıcak üst katmandaki duman ve sıcak gazların hacmi artar, bu da iki katman arasındaki ara yüzün mesafesini azaltır. Şekil 1.4'te bu iki katman gösterilmektedir (Buchanan ve Abu, 2017).



Şekil 1.4. Bir oda yangının ilk aşamaları (Buchanan ve Abu, 2017)

1.2.1.2. Alevlenme

Odada yeterli yanıcı madde ve uygun bir oksijen kaynağı olduğu sürece, yangın alevlenme öncesi büyümeye devam eder. Sıcak katmandaki sıcaklık artışı, odadaki tüm nesnelere yayılan ısı akısının da artmasına neden olur. Genellikle bu radyant ısı akısı 500°C-600°C civarlarında kritik bir değere ulaşır ve odadaki tüm yanıcı malzemeler yanmaya başlar. Alevlenme olarak adlandırılan bu geçiş bölgesi hem ısı artış hızında hem de sıcaklıklarda hızlı bir artışa yol açar. Alevlenmenin açık bir alanda gerçekleşmesi mümkün değildir çünkü bu olay sadece kapalı bir döngüde gerçekleşebilir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5. Standart bir yangın eğrisi ile doğal bir yangın eğrisinin karşılaştırılması (De Wit, 2011)

1.2.1.3. Alevlenme Sonrası

Yangının davranışı, alevlenme sonrasında ciddi biçimde değişmektedir. Hava ve yanma gazlarının akışı çok karmaşıktır. Yanma odasında oluşan çok yüksek sıcaklık ve radyan ısı akışları, maruz kalan tüm yüzeylerin yanmasına neden olmaktadır. Yapısal yangın tasarımında, alevlenme sonrası yangın anındaki oda sıcaklığının ve bazen yanma oranlarının da bilinmesi çok önemlidir.

Alevlenme sonrası yangın aşamasında, sıcaklık genellikle 1000°C 'nin üstüne çıkmaktadır. Tam gelişmiş yangın olarak da adlandırılan bu aşama, yapısal olarak yangın güvenliği için bir bina tasarlarken en çok ilgi çeken yangındır. Bir yangında alevlenme sonrası sıcaklığının tahmini esas olmakla birlikte, maalesef bu tahmin tam olarak yapılamamaktadır. Alevlenme sonrası yangının bir temsili, zamanın bir fonksiyonu olarak homojen olduğu varsayılan gaz sıcaklığının gelişimini veren sembolik üniform yangın eğrileridir (bkz. Şekil 1.5).

1.2.2. Yangın Sınıfları

Çeşitli ülke standartlarında farklı olmakla birlikte, TS EN 2 ve TS EN 2/A1 TS EN 2 ve TS EN 2/A1'de yanabilecek maddelerin türüne göre yangınlar A, B, C, D ve F türü yangınlar olarak beş sınıfta toplanmıştır. Bunlar aşağıda verilmektedir;

A Türü Yangınlar: Ahşap malzeme, kağıt, ot, dokumalar, lastik, plastik, odun kömür, çöp vb. gibi katı maddelerin yangınlarıdır. A sınıfı yangınlar, soğutucu etki yaratan maddeler ile müdahale edilmek sureti ile soğutularak söndürülür.

B Türü Yangınlar: Akaryakıt, makine yağları, laklar, asfalt, eter, alkol, stearin, parafin vb. gibi sıvı yanıcı maddelerin yangınlarıdır. B sınıfı yangınlar, yanan madde ile oksijen teması kesilerek (Boğmak) sureti ile söndürülür.

C Türü Yangınlar: Metan, propan, hidrojen, asetilen, havagazı vb. gibi gaz halindeki yanıcı maddelerin yangınlarıdır. C sınıfı yangınlar, genel kural olarak yangın kaynağı kesilerek ve soğutma işlemi yapılarak söndürülür.

D Türü Yangınlar: Alüminyum, magnezyum, titanyum, sodyum, potasyum vb. gibi hafif metallerin yangınlarıdır. D sınıf yangınlar, özel amaçla üretilmiş kuru toz madde ile söndürülür.

F Türü Yangınlar: Bitkisel ve hayvansal pişirme yağlarının yangınlarını kapsar. Sulu kimyasal söndürücüler ya da toz söndürücüler ile söndürülür.

1.2.3. Standart Yangın Davranış Modelleri

Bir yapı elemanın herhangi bir yangına karşı dayanım ve dayanıklılığının ölçüsü olarak tanımlanan yangın performansının hesaplanmasında yangın davranışı önemli bir yer tutmaktadır. Bu yangın davranışı, sıcaklık-zaman ilişkisi ile aşağıdaki modellerle tanımlanmaktadır;

- Standart yangın eğirileri (ISO 834, ASTM E119, Hidrokarbon yangını, Harici yangın)
- Oda yangını modeli (Parametrik, Pencere yangınları)
- Bölge Modelleri (Tek bölge ve ileri bölge modelleri)
- Alan Modelleri (İleri yangın ve duman modellemesi)

Standart yangınlar ve oda yangınları basit modeller, bölge ve alan modelleri ise ileri modeller olarak kabul edilmektedir. Dünyanın birçok ülkesinde yapıların yangın performansının belirlenmesi için tam ya da küçük ölçekli numuneler üzerinde yangın-yüksek

sıcaklık deneyleri yapılmaktadır. Bu deneylerde sıcaklık-zaman ilişkisi olarak standart yangın eğrileri kullanılmaktadır.

Deneysel ve teorik çalışmalarda en çok kullanılan standart yangın eğrileri ISO 834 ve ASTM E119'da belirtilen eğrilerdir. Bu yangın modellerinde odanın gaz sıcaklığı uniform olarak alınmaktadır. Duman hareketi ve alev sıçraması dikkate alınmaz. Eğriler, alevlenme sonrası yangınlar için daha uygundur. Oda yangınlarında ise ortamdaki yangın yükü ve havalandırma koşullarına bağlı olarak değişen gerçek sıcaklık-zaman eğrisi de kullanılabilir. Bu eğride standart yangından farklı olarak sönme aşaması da görülebilmektedir. Ancak yangının sönme aşamasına kadar standart ve gerçek sıcaklık-zaman eğrilerine göre belirlenen sıcaklık dağılımlarının pratik olarak birbirine eşit olduğu söylenebilir.

ISO 834 standart sıcaklık-zaman eğrisine ait denklem;

$$T = 345 \log (8t + 1) + T_0 \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir (ISO, 1999a). Denklemden, t yangın süresini (dakika), T_0 başlangıç sıcaklığını (20°C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını ($^\circ\text{C}$) göstermektedir (Haksever, 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır (TS 1263, 1983).

ASTM E119 sıcaklık-zaman eğrisi;

$$T = 750(1 - e^{-3.79553\sqrt{t/60}}) + 170.41 \sqrt{t/60} + T_0 \quad (1.2)$$

bağıntısıyla ifade edilmektedir (ASTM E119, 2012).

Eurocode 1 (EN 1991-1-2, 2002), bir seçenek olarak hidrokarbon ve harici yangın eğrisi adıyla anılan sıcaklık-zaman eğrilerini de standart yangın olarak önermektedir.

Eurocode hidrokarbon yangın eğrisi;

$$T = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + T_0 \quad (1.3)$$

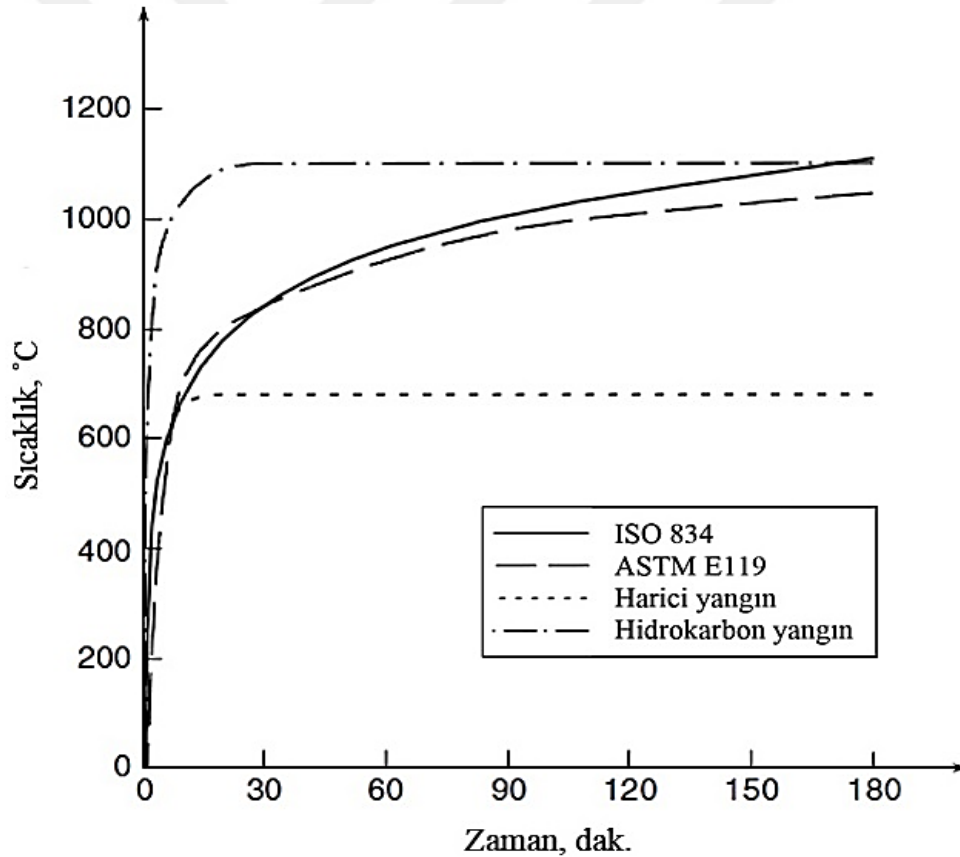
şeklinde tanımlanmıştır (EN 1991-1-2, 2002). Bu eğri, yakıt kaynağı olarak petrokimyasal maddeleri dikkate alan, petrol kuyuları gibi yapılarda meydana gelen bir yangını temsil

etmek için kullanılan hidrokarbon tipi bir yangındır. Hidrokarbon eğrisi, petrol şirketi Mobil tarafından 1970'li yıllarda geliştirilmiştir.

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

$$T = 660(1 - 0.687e^{-0.32t} - 0.313e^{-3.8t}) + T_0 \quad (1.4)$$

şeklinde ifade edilmektedir (EN 1991-1-2, 2002). Şekil 1.6'dan da görülebileceği üzere, harici yangın eğrisi 15 dakika içinde 680°C'lik sabit bir sıcaklığa ulaşmaktadır. Yukarıda adı geçen standart yangınlara ait sıcaklık-zaman eğrileri Şekil 1.6'da topluca gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Bazı yönetmeliklerde önerilen standart yangın eğrileri (Buchanan ve Abu, 2017)

Şekil 1.6'dan görüldüğü gibi, ISO 834 ve ASTM E119 eğrileri birbirlerine oldukça yakın seyretmektedir.

1.3. Malzemelerin Yanıcılık Sınıfları ve Yangın Yüğü

Bir yapı malzemesinin binaların çeşitli bölümlerinde yanma açısından tehlikesizce kullanılıp kullanılmayacağını belirlemek için yanmazlık deneyi uygulanmakta ve malzemeler, "yanar" veya "yanmaz" şeklinde tanımlanmaktadır. Yanmazlık bir yapı malzemesinin, yanmanın gelişimine doğrudan katkıda bulunmaması durumu olarak adlandırılabilir.

Yanmaya dayanıklılık deneyi uygulanan malzemeler TS 1263'de A ve B sınıfı olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. A sınıfına ait malzemeler; kum, çakıl, taşlar, harç, beton, betonarme gibi yanmaz malzemeler, B sınıfına ait olanlar ise ahşap, alçılı karton levhalar, PVC döşeme kaplamaları gibi yanıcı malzemelerdir.

A tipi yapı malzemeleri, A1 ve A2 tipi olarak iki gruba ayrılmaktadır. A1 tipi, yanmaz yapı malzemeleri olarak, A2 tipi ise yanıcı kısımlar içeren malzemeler olarak tanımlanmaktadır. B tipi yapı malzemeleri, yanıcı yapı malzemeleri olarak tanımlanıp, B1, B2 ve B3 tipi olarak üç gruba ayrılmaktadır. B1 ve B2 sınıflarına girmeyen malzemeler B3 tipi olarak tanımlanıp, yapılarda hiçbir şekilde kullanılamaz. Bu malzemeler aşağıdaki Tablo 1.1'de detaylı olarak topluca verilmektedir.

Yapı malzemeleri, kullanıldıkları yapı elemanlarının tüm özelliklerini doğrudan etkilemekte ve ayrıca yapı malzeme sınıfları da yapı elemanlarının sınıflandırılmasını etkilemektedir. Bu sınıflandırma kullanılan malzemeye göre yapı elemanını ve yanmaya karşı gösterdiği dayanıklılığı göz önünde bulundurur. TS 1263'e göre, yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin yanmaya dayanıklılık sınıfları ve süreleri Tablo 1.2'de verilmektedir (Sunar Ş., 1981). Yanmaya dayanıklılık sınıfı, bir yapı elemanının standartta belirtilen uygun ısı ve basınç koşulları altında belirlenerek, yanmaya karşı gösterdikleri dayanım süresine bağlı olarak sınıflandırılırlar. TS 1263'e uygun olarak denenen yapı elemanlarının üretimlerinde kullanılan yapı malzemelerin yanıcılık sınıfları ise Tablo 1.3'te gösterilmiştir.

Yangının süre ve şiddetinin değerlendirmesi işlemi, duvar kaplamaları, bölmeler, döşemeler ve tavanları da kapsamak üzere bir alanda bulunan yanıcı malzemelerin toplamına göre yapılmaktadır. Aşağıdaki Tablo 1.2'de yanıcı sınıfa giren yapı elemanları, örneğin; yanma davranışı değişmeyen kaplama, süpürgelikler, doğramalar ve boyalar ile yanma davranışı değişebilen mobilya, giysiler, ev aletleri gibi yanıcı malzemeler yangın yükünü oluşturmaktadırlar.

Tablo 1.1. Yapı malzemelerinin yanıcılık açısından sınıflandırılması (TS 1263)

Yapı malzeme tipleri		Kullanım amaçları ve açıklamalar	
A	A1	Kum, çakıl, mil, kil ve doğada bulunan yapı tekniğinde kullanılabilen taşlar	
		Mineraller, toprak, volkanik cürufur ve doğal bims	
		Çimento, kireç, alçı, anhidrit, yüksek fırın cürufu, genişletilmiş kil, genişletilmiş perlit ve vermükulit ile köpüklü cam gibi yakma ve/veya genişletme işlemiyle taş ve minerallerden elde edilen yapı malzemeleri	
		Harç, beton, betonarme, ön gerilmeli beton, gaz beton veya gözenekli beton, hafif beton, mineralli maddelerden üretilmiş yapı taşları ve yapı plakları, mutad harç veya beton katkı malzemeler	
		Organik katkı maddesi içermeyen mineral lifli malzemeler	
		Tuğla, kiremit, seramikler	
		Camlar	
		Alkali ve toprak alkali metaller ve alaşımları dışında ince toz halinde öğütülmemiş metal ve alaşımlar	
		A2	Bu tip yapı malzemeleri, yanıcı kısımlar içerir, ancak kendileri yanmaz ateşi iletmez ve yangın yüküne katkısı olmaz. Her durumda özel tahkiki gereken malzemelerdir. Örneğin alçı karton plakları gibi yanmaz dolgu maddeli kompozitler gibi
		B	B1
Çok katmanlı mineral elyafli hafif yapı plakları (tek ve/veya iki yüzeyi mineral elyaf ile kaplı odun yününden yapılmış hafif yapı plağı)			
Yüzeyi delikli veya deliksiz alçı karton levhalar			
Masif mineral zemin üzerine mineral katkı yapay reçineli sıvılar			
Isı harçlar			
Yumuşatıcı içermeyen kalınlığı ≥ 3.2 mm sert polivinilklorid (PVC), klorlu polivinilklorid (PVCC) ve polipropilen (PP)'den üretilmiş borular			
Ahşap parke, PVC, vinilasbest zemin kaplamaları			
Asbestli mukavva ve kâğıtlar			
B2	Yoğunluğu > 400 kg /m ³ ve kalınlığı > 2 mm veya yoğunluğu > 230 kg /m ³ ve kalınlığı > 5 mm olan ahşap malzemeler		
	Kalınlığı > 2 mm olan ahşap kontraplak veya preslenmiş tabakalardan oluşan plaklar, termoplastik olmayan bir şekilde tüm yüzeyince ahşap kaplanmış veya yüzeyi preslenmiş malzemeler		
	Kalınlığı ≥ 3 mm olan plastik kaplı odun lifi plaklar		
	Alçı karton bağlantı plakları		
	Çok katmanlı sert köpük hafif yapı plakları		
	Sert PVC levha		
	Kalınlığı > 3 mm sert PVC, polipropilen, yüksek dansitepolietilen, kopolimer, stroil (ABS/ASA/PVC)'den üretilmiş borular		
	Kalınlığı ≥ 2 mm palimetakrilat dökme levhalar		
	Kalınlığı ≥ 1.6 mm polistard plakalar		
	Yoğunluğu < 940 kg/m ³ ve kalınlığı ≥ 1.4 mm ve yoğunluğu > 940 kg/m ³ kalınlığı ≥ 1.0 mm köpüklendirilmemiş polietilenler		
	Kalınlığı ≥ 1.0 mm poliamid		
	PVC, kauçuk, sentetik kauçuk gibi esnek kaplamalar gibi zemin kaplama malzemeleri		
	Köpüklendirilmemiş, katran veya bitüm katkı poliüretan veya polisülfid, silikon ve akrilat esaslı, en az B2 sınıfı içyapı malzemesi arasına yerleştirilmiş		
	Asfalt		
	Elektrik kabloları		
	B3		Ahşap < 2 mm
			Kâğıt, saz, saman, talaş, pamuk, seliloz lifi
			Gevşek veya toz halinde her türlü yanıcı maddeler

Tablo 1.2. Yapı elemanlarının yangına dayanma sürelerine göre sınıflandırılması

Yanmaya dayanıklılık sınıfı	Yanmaya dayanıklılık süresi (Dakika)
F30	30
F60	60
F90	90
F120	120
F180	180

Tablo 1.3. TS 1263'e uygun olarak denenmiş yapı elemanlarında kullanılan malzemelerin yangınlık sınıfları

Yangına dayanımı		Malzemelerin yangınlık sınıfı		Yapı elemanlarının tanımı	Sembol
Sınıfı	Süre (Dak)	(1) Malzeme tipi*	(1) sütunu kapsamına girmeyen diğer bileşenler		
F30	≥ 30	B	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F30	F30 - B
		A	B	Önemli elemanları yanmaz ve yangına dayanıklılık sınıfı F30 olan yapı malzemeleri	F30 - AB
		A	A	Yangın önleyici yanmaz ve yangına dayanıklılık sınıfı F30 olan yapı malzemeleri	F30 - A
F60	≥ 60	B	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F60	F60 - B
		A	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F60 ve başlıca kısımları yanmayan yapı malzemeleri	F60 - AB
		A	A	Yangına dayanıklılık sınıfı F60 olan yanmayan yapı malzemeleri	F60 - A
F90	≥ 90	B	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F90	F90 - B
		A	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F90 olan başlıca kısımları yanmayan yapı malzemeleri	F90 - AB
		A	A	Yangına dayanıklılık sınıfı F90 olan, yanmayan yapı malzemeleri	F90 - A
F120	≥ 120	B	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F120	F120 - B
		A	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F120, başlıca kısımları yanmayan yapı malzemeleri	F120 - AB
		A	A	Yangına dayanıklılık sınıfı F120 olan yanmayan yapı malzemeleri	F120 - A
F180	≥ 180	B	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F180	F180 - B
		A	B	Yangına dayanıklılık sınıfı F 180, başlıca kısımları yanmayan yapı malzemeleri	F180 - AB
		A	A	Yangına dayanıklılık sınıfı F120 yanmayan yapı malzemeleri	F180 - A

*: Tablo 1.1'deki sınıflandırmaya göre

Yangın yükü, teorik olarak yapının içeriğini oluşturan öğelerin tam yanması sonucu oluşan maksimum ısı ile ifade edilmektedir. Yangın yükü basit bir şekilde malzemenin mekanda bulunan miktarının kilogram cinsinden ağırlığının ısı değeri (MJ/kg) ile çarpılması sonucu hesaplanır. Bu çarpma işlemi sonucunda malzemenin ısı potansiyeli belirlenir. Tüm malzemelerin ısı potansiyelleri toplandığında ise mekanın yangın yükü elde edilir. Yangın yükünün döşeme alanına bölünmesi de yangın yükü yoğunluğunu verir. Yangın yükü yoğunluğu zemin boyutuna bağlı olarak MJ/m² ya da Mcal/m² birimleriyle ifade edilir.

1.4. Yapılarda Yangın Güvenliği

Yangınlar, dünyada her yıl çok sayıda can ve mal kaybına neden olan yıkıcı bir güçtür (Buchanan, 2002). Yangın olayı, herhangi bir yerde, herhangi bir mevsimde, bir binanın kullanım ömrünün herhangi bir aşamasında ve çoğu zaman beklenmedik bir anda meydana gelmektedir. İnsanların güvenliği, binaların tasarım ve yapımında, belirli bir binanın veya yangına maruz kalan bir binanın bir bölümünün, yangının yayılmayacağı veya yayılmasına izin vermeyeceği beklentisi dahil, birçok faktöre dayanır. Ne yazık ki tüm yangınları önlemek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle yangından korunma, oluşma olasılığını azaltmak ve sonuçları sınırlamak, diğer bir deyişle ölüm, yaralanma ve mal kaybını azaltma önlemlerinden oluşmaktadır. Yangın risklerinin sınırlandırılması için gerekli temel koşullar;

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

işlemleri olarak ifade edilmektedir (EN 1992-1-2, 2004).

Yangın güvenliğinin temel amacı, istenmeyen bir yangında ölüm, yaralanma, mal kaybı ve çevresel zarar olasılığının kabul edilebilir seviyelerde sınırlandırılması olarak kabul edilmektedir. Can güvenliği ile mülkün korunması arasındaki denge, binanın türüne ve kullanım alanına bağlı olarak farklı ülkelerde farklılık göstermektedir. Son güncel eğilim, ulusal yasaların mülk korumasından daha çok can güvenliğine önem verilmesi yönündedir. Bazı yönetmelikler, bir yangının binaya verdiği zararın, bina sahibinin veya sigortacının problemi olduğunu, yangının sadece diğer kişilerin can güvenliği ve mülkiyetini korumayı amaçlamaktadır (Buchanan ve Abu, 2017).

1.4.1. Yangın Şiddeti ve Yangın Dayanımının Karşılaştırılması

Yangın güvenliği için yapı tasarımındaki temel adım, yapının veya her bir yapı elemanının yangına dayanıklılığının, maruz kalınan yangının şiddetinden daha büyük olduğunun doğrulanmasıdır. Bu doğrulama için;

$$\text{Yangın Dayanımı} \geq \text{Yangın Şiddeti} \quad (1.5)$$

şeklinde verilen tasarım denkleminin sağlanması gerekmektedir.

Yangına dayanıklılık, yapının şiddetli bir yangına maruz kaldığında, yangının yayılmasını önleme ve hatta çökmeye karşı direnme yeteneğinin bir ölçüsüdür. Yangın şiddeti ise, yangının yıkıcı etkisinin bir ölçüsü veya yangının sonucu olarak çökmeye veya diğer arızalara neden olabilecek kuvvet veya sıcaklıkların ölçüsüdür. Yangın şiddeti ve dayanımı ile ilgili farklı tanımlamalar mevcuttur. Bu nedenle, farklı birimler kullanarak yapılacak karşılaştırmalar farklı sonuçlara yol açabileceğinden kafa karıştırıcı olabilir. Dolayısıyla, tasarımcının alternatifleri net bir şekilde anlaması önemlidir (Buchanan ve Abu, 2017). Yangın şiddetinin yangın direnci ile karşılaştırılmasında için zaman, sıcaklık ve dayanımı esas alan üç alternatif yöntem mevcuttur. Bu yöntemler Tablo 1.4'te kısaca verilmektedir.

Tablo 1.4. Çeşitli ölçüt ve birimlere göre yangın dayanımı ve şiddetlerinin karşılaştırılması (Buchanan ve Abu, 2017)

Ölçüt	Birimler	Yangın dayanımı	Yangın şiddeti
Zaman	Dakika ya da saat	Göçme süresi	Hesaplanan ya da standartlarda verilen yangın süresi
Sıcaklık	°C	Göçmeye karşılık gelen sıcaklık	Yangın esnasında ulaşılan maksimum sıcaklık
Dayanım	kN veya kNm	Yüksek sıcaklıktaki yük taşıma kapasitesi	Yangın süresince uygulanan yükler

1.4.1.1. Zamanı Esas Alan Karşılaştırma

Yangın dayanımı ve şiddetinin karşılaştırmasında kullanılmakta olan en yaygın ölçüt, zaman ölçütüdür. Bu ölçüte göre;

$$t_{göç} \geq t_s \quad (1.6)$$

olmalıdır. Burada $t_{göç}$ yapının veya yapı elemanının standart yangına maruz kaldığında göçme süresidir. t_s ise yönetmelikte belirtilen veya hesaplanan, yangına maruz bina için standart yangının tasarım dayanımı süresidir. Burada süre birimi olarak dakika ya da saat kullanılmaktadır.

Bir yapı elemanının yangında hasar görme süresi, daha ileride açıklanacağı gibi, belli bir derecelendirme listesinden veya hesapla elde edilebilecek bir yangın dayanıklılık derecesi olarak verilir. Yangın süresi veya yangın şiddeti, genellikle bir bina yönetmeliği tarafından belirtilen standart yangına maruz kalma süresi veya binadaki gerçek yangın için hesaplanan standart yangına maruz kalma süresidir.

1.4.1.2. Sıcaklığı Esas Alan Karşılaştırma

Yapının bir bölümündeki maksimum sıcaklığın hasara neden olacak sıcaklıktan küçük olmasını sağlayarak, sıcaklık alanındaki tasarımın doğrulanması bazen gerekli olabilir. Sıcaklığı esas alan bir doğrulamada;

$$t_{göç} \geq t_{maks} \quad (1.7)$$

olarak verilen denklemin sağlanması gerekir. Burada $t_{göç}$ elemanın hasar almasına neden olacak sıcaklık ve t_{maks} ise yangın sırasında elemanda ulaşılan maksimum sıcaklık veya belirli bir standart yangına maruz kalma süresinin ardından bina yönetmeliğinde belirtilen sıcaklıktır.

Sıcaklık ölçütü, tam olarak göçmeyi tahmin etmemektedir. Bu ölçüt gradyanları veya yapısal davranışı yeterince dikkate almadığından yapı elemanları için pek uygun değildir. Buna rağmen, örneğin çelik yapılardaki bazı basit elemanların yangın tasarımı, sıcaklık ölçütü kullanılarak yapılabilmektedir (CEN, 2005b).

1.4.1.3. Dayanımı Esas Alan Karşılaştırma

Dayanım ölçütüne göre yangın sırasında uygulanan yükün, yangın boyunca yapısal elemanların yük kapasitesiyle karşılaştırılmasıdır. Bu ölçüte göre;

$$R_f \geq U_f \quad (1.8)$$

olmalıdır. Burada R_f yangın sırasında ulaşılan minimum yük kapasitesi veya yönetmek tarafından belirtilen bir zamandaki yükleme kapasitesi, U_f ise yangın anında uygulanan yüküdür. Bu değerler tüm bina için kuvvet ve dayanım birimleri olarak veya yapının özel elemanlarında aksel kuvvet veya eğilme momenti gibi iç zorlanmalar olarak ifade edilebilir. Yangın sırasındaki yük kapasitesi, ısı analizden ve yüksek sıcaklıklarda yapısal bir analizden hesaplanabilir. Yangın anındaki yükler, yük yönetmeliklerindeki yük birleşimleri kullanılarak hesaplanabilir.

1.5. Yapıların Yangın Dayanımının Değerlendirmesinde Kullanılan Yöntemler

Yapıların yangın dayanımının değerlendirilmesinde;

- Yangın deneyi yöntemi,
- Yönergeye dayalı yöntem,
- Performansa dayalı yöntemler

olarak adlandırılan yöntemler kullanılmaktadır. İlk ikisi, birkaç on yıldır çok yaygın bir şekilde kullanılmış olmakla birlikte son zamanlarda birçok ülkede sadece performansa dayalı yangın mühendisliği hesaplamasına dayanan yöntemler kabul görmektedir. Bu yöntemlerden herhangi biri için yapının detaylandırılması, yangın yükü dağılımının ve malzemelerin karakteristik dayanımlarının değişimi için tasarım varsayımlarının uygulanmasıdır. Özellikle bir yapıda güçlendirme projesi hazırlanırken, hem elemanların hemde tüm yapının, gerekli yangın dayanımına yönelik yeterli destek, bağ, aderans ve ankraj içermesi sağlamalıdır (Khoury GA, 2000).

1.5.1. Yangın Deneyi Yöntemi

Bir elemanın standart sıcaklık-zaman rejimine maruz bırakıldığı yangın deneyleri, özellikle büyük ve karmaşık yapılar için, yukarıda verilen üç yöntem arasında en yüksek maliyetli olanıdır. Yangın dayanımına yönelik standart deneyler genellikle, deney fırınında, tekil bina elemanları üzerinde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, bazı durumlarda, binadaki yapısal elemanların yangın performansının, fırında deney yapıldığında basit elemanınkinden çok daha büyük olması beklenebilir. Diğer durumlarda, ısıl hareket, elemanın yangın dayanımını azaltabilir. Yangın deneyi yönteminin diğer yöntemlere göre bir başka üstünlüğü, ısıtma sırasında elemanın sıcaklık dağılımlarının ve sapmalarının ortaya koyulabilmesi ve deney yapmaksızın belirlenemeyen zayıflıkların aydınlatılabilmesidir. Ancak, yangın deneylerinin kullanılan aparat ve cihazlara duyarlı olduğu da bir gerçektir. Dolayısıyla, farklı ülkeler arasında laboratuvar deney sonuçlarının uyuşmasında uluslararası komiteler seviyesinde önemli tartışmalar söz konusudur. Deneyin hazırlığı ve yapılması için uzun zaman ve yüksek bütçe gereklidir. Ayrıca, tam ölçekli bir yapı numunesinin yangın deneyine tabi tutulması, İngiltere Cardington'daki 'Building Research Establishment' tarafından bir binada üstlenilen kapsamlı yangın testlerinin kanıtladığı gibi, oldukça zor bir işlemdir (Khoury GA, 2000).

1.5.2. Yönergeye Dayalı Yöntem

Yangın mühendisliği, büyük ölçüde mühendisin binalarda yönergedeki yangın riski sınıflarına dayanarak önceden belirlenmiş şartlara uygun tasarım yapması olarak tanımlanabilir. Yönerge maddeleri rijit ve kısıtlayıcıdır. Yönergeye dayalı yöntem, yukarıda belirtilen yöntemler arasında en ucuzu olmasına rağmen, doğruluğu en tartışmalı olanıdır. Bu yöntemle elde edilen güvenlik seviyesi önemli ölçüde değişebilir. Birçok durumda, aşırı maliyetli ve bazen güvensiz de olabilmektedir (Anderberg Y, 1998).

Yönergeye dayalı yöntemde yangın dayanımı gereksinimi, BS-476 veya ISO-834 yangınına maruz kalan elemanlar için hedef yangına dayanıklılık dereceleri ile ifade edilmektedir. Bu, yapı elemanlarının 30, 60, 90 ya da 120 dakika içinde çökmeyecek şekilde tasarlanması gerektiği anlamına gelir. Dolayısıyla, eğer bir deney numunesi 59 dakika sonra çökerse, yükleme seviyesine bakılmaksızın, R30 yangın sınıfına sokulur. Bu eksiklikler, performansa dayalı yöntemlerin geliştirilmesi ve daha geniş kabulü için itici gücü

sağlamıştır. Yönergeye dayalı yöntem, yapı elemanlarının yangın dayanımına yönelik yönetmelikler ve standartlarda sunulan tablolandırılmış veriler kullanarak, uygulanmaktadır. BS 8110: Bölüm 2’de, beton kirişler, kolonlar ve zeminler için 30 dakikadan 4 saate kadar değişen yangın dayanımları için paspayı dahil olmak üzere mm cinsinden minimum boyutları veren tablolar mevcuttur (BS 8110: Bölüm 1 ve 2, 1985). Bu standart, hatalı olarak yalnızca betonun "yoğun" ve "hafif" (<2000 kg/m³) betonlar arasındaki sıcaklıklarda ve bunların sıcaklıkla dayanım değişimlerindeki farkları ifade eder. Malzemelerin özellikleri ile ilgili yukarıdaki tartışma, ısıtılmış ‘yoğun‘ betonun davranışının kullanılan agrega tipine çok bağlı olduğunu göstermektedir. Bazı agregalar 350°C’de parçalanırken diğerleri (örneğin granit ve gablo) 600°C’de bile hasara uğramamaktadır. Ayrıca, hafif agregaların davranışları yoğunluklarına bağlıdır. Yönetmelik kuralları, betonarme ve öngerilmeli beton, eğilme elemanlarında basit veya sürekli mesnetlenmiş yapılar için ayrı ayrı verilmektedir. Yönetmeliğe göre, elemanların tüm tasarım yükünü taşıdığı varsayılmaktadır. Basit mesnetli elemanlar için tablolaştırılmış kurallar, çelik donatının yüksek sıcaklıklarda dayanımının bir kısmını koruduğunu varsayar. Donatılar ve öngerilmeli kirişler taşıma kapasitelerinin yaklaşık %50’sini, 450°C-550°C arasında koruduğu düşünülmektedir. Belirli bir yapı elemanın herhangi bir boyutu, tablolarda belirtilen en küçük değerden azsa ve arttırılması mümkün değilse, yangına dayanıklılığı, koruyucu bir kaplama, sistem veya membranın uygulanmasıyla sağlanabilir (Morris WA, 1988).

Yapı elemanlarının yukarıda belirtilen üç ayrı performans kriterine göre yangın dayanımı deneyine ilişkin özel hükümler, Bina Yönetmeliklerinde verilmiştir (Building Regulations, 1992). Yönetmelik aynı zamanda, çeşitli yapı tiplerinin bodrum, zemin ve üst katlarındaki yapı elemanları için minimum yangın dayanımı sürelerini de ortaya koymaktadır. Yönetmeliklere göre bir yapı elemanının bir diğerini desteklediği veya taşıdığı veya bir diğerine stabilite verdiği durumlarda, destek elemanının yangına dayanıklılığı, diğer eleman için minimum yangın dayanımı süresinden az olmamalıdır (Building Regulations, 1992).

1.5.3. Performansa Dayalı Yöntemler

Performansa dayalı yöntemler, yangın mühendislik hesaplamalarını esas alır ve yönergeye dayalı yöntemlere göre daha ekonomik ve çok amaçlı değerlendirme yöntemleridir. Farklı yangın senaryoları, geometriler, malzeme özellikleri, yükleme veya mesnet şartları

için belirli bir problem üzerinde çalışılabilir. Böylece, yangına tabi tutulan yapının davranışının çökmeye kadar daha iyi gözlemlenebilmesi mümkün olur. Ayrıca, bilgisayar programları, verilerin doğru girilmesi koşuluyla, bir yangın deneyinde çalışması çok zor olan yapısal koşulları dahi simüle edebilir. Performansa dayalı tasarımında, yapının soğuma fazı dahil olmak üzere yangın sırasında çökme olmaması istenir (Anderberg Y., 1998).

Performansa dayalı yöntemler, artan karmaşıklık kategorileri için;

- Basitleştirilmiş hesaplamalar yöntemi,
- Termomekanik sonlu elemanlar analizi yöntemi,
- Kapsamlı termohidromekanik sonlu elemanlar yöntemi

olarak üç sınıfa ayrılabilir. Her üç kategoride, yapısal analizin bir parçası olarak ısı analiz de yapılmalıdır. Basitleştirilmiş hesaplamalar yönteminde, örneğin 500°C civarında, konturun yerini belirlemek için sadece sonlu eleman hesaplaması yapılmaktadır. Nemin buharlaşması göz önüne alınmadan, ısı analiz yaklaşık sonuç vermektedir, özellikle 100°C–200°C sıcaklık aralığında nem kaybı ve buharlaşma davranışta önemli rol oynamaktadır.

Isıl analiz yazılımları genel olarak iki gruba ayrılmaktadır;

- Profesyonel yazılım firmaları tarafından geliştirilen; ABAQUS, ADINA, ANSYS, PAFEC ve LUSAS adlı genel programlar,
- Yangın alanında çalışan araştırmacılar tarafından geliştirilen programlardır. Bunların en tanınmış olanları; 1977 yılında Bresler, Iding ve Nizamuddin tarafından geliştirilen FIRES-T3 programı, (Iding R., 1977) 1979 yılında Wickstrom tarafından geliştirilen TASEF-2 programı (Wickstrom U., 1979) ve 1986 yılında Anderberg tarafından geliştirilen TEMPCALC programlarıdır (Anderberg Y., 1986). TEMPCALC programı, malzemelerin yüzeysel kabuk atmalarının simülasyonu ve yüksek sıcaklık etkisinde şişen kaplamaların ısı davranışı dahil olmak üzere, pratikte olan bir yangın uygulamasında kullanılmaktadır.

1.5.3.1. Basitleştirilmiş Hesaplamalar Yöntemi

Bu yöntem, yapı elemanının ısı analizden oluşan sıcaklık dağılımını belirledikten sonra, Anderberg tarafından önerilen ve basitleştirilmiş bir hesaplama tekniği kullanılarak gerçekleştirilen yöntemdir (Anderberg Y., 1978). Anderberg; hasar görmüş silisli betonun

basınç bölgesinde 500°C izoterminin (eşsıcaklık eğrisinin) ortalama derinliğe eşit olduğu varsayımına dayanan çok basit bir analiz yöntemi önermektedir. 500°C'den fazla sıcaklıklara sahip (hasarlı kabul edilen) betonun, yapı elemanın yük taşıma kapasitesine katkıda bulunması beklenmezken, enkesitin henüz aşırı ısınmamış çekirdek bölgesinde kalan betonun başlangıçtaki mukavemet değerlerini ve elastisite modülünü koruduğu varsayılmaktadır. Anderberg, "500°C izotermi" veya "Etkin kesit alanı" yöntemlerinin, aksenal yük, eğilme momenti ve bunların kombinasyonları bakımından bir betonarme kesite uygulanabileceğini ileri sürmektedir. Bu yöntemde yapı elemanının minimum boyutları, yangına dayanıklılık süresine veya yangın yükü yoğunluğuna göre seçilmelidir (Anderberg Y., 2000). Bir diğer önemli nokta ise, seçilen izoterm sıcaklığı, kullanılan betonun türüne ve karakteristik dayanımının sıcaklıkla azalmasına bağlı olmaktadır. Bazı betonlar için, izoterm sıcaklığı 500°C'nin, hatta 400°C'nin altında olabilmektedir.

1.5.3.2. Termomekanik Sonlu Elemanlar Analizi Yöntemi

Performansa dayalı yangın analizi yazılımlarının birçoğu 1970'li yıllarda bu kategorideydi. Isıl ve mekanik analiz genel olarak arayüz şeklinde olup, maalesef birbiri ile ilişkili değildir. Yangın süresince önce ısıl hesaplama yapılır, daha sonra yapı elemanının gerilme ve şekildeğiştirme değerlerini elde etmek için mekanik analiz programı çalıştırılır. Ancak, bu iki analiz arasında nem dahil olmak üzere herhangi bir etkileşim yoktur. Bu tür programlar, basit elemanlardan elde edilen şekildeğiştirme sonuçlarının tutarlı olabileceğini göstermiştir. Bu yöntemlerde, özellikle betonarme kolonlar için geçici sünme süresinin tahmini modele dahil edilmiştir. Yangına özel hazırlanmış programlar içerisinde, eğer analiz dakikalar veya saatler içerisinde gerçekleşiyorsa, LITS modellemesi daha kullanışlıdır. Bunun sebebi LITS'in büyük ölçüde zamandan daha çok, sıcaklığın bir fonksiyonu olmasıdır. Bu nedenle, zamana bağlı sünme hesapları sonucu etkilemeden de yapılabilmektedir. Nem kaybının analize dahil olmaması, buhar basıncı etkisi ve bunun sonucunda ortaya çıkan kabuk atma olayının tahmin edilemeyeceği anlamına gelmektedir.

Yangına dayanıklılıkla ilgili ilk bilgisayar programı 1974 yılında Becker ve Bresler tarafından FIRES-RC adı ile geliştirilmiştir (Becker J & Bresler B., 1974). Bu program daha sonra Anderberg tarafından geliştirilerek gerçekçi bir somut yangın davranış modeli olarak tanıtılmıştır (Anderberg Y., 1976). Bu programı, 1982'de Forsen tarafından geliştirilen CONFIRE adlı program takip etmiştir (Forsen NE., 1982). STABA-F programı, 1985

yılında geliştirilmiştir (Rudolph K, vd., 1985). CEFICOSS programı, 1987 yılında Franssen tarafından geliştirildi (Franssen JM., 1987). FIREXPO programı ise, 1999 yılında Avrupa Komisyonun desteklediği HITECO araştırma programının bir parçası olarak geliştirilmiştir (Khoury GA vd., 1998).

1.5.3.3. Kapsamlı Termohidromekanik Sonlu Elemanlar Yöntemi

Kapsamlı termohidromekanik sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan bir analiz, tamamen bütünleşmiş ve etkileşimli bir modelde ısıl, hidral ve mekanik analizleri içermeli, patlamalı kabuk atmayı veya nükleer reaktörlerde betonun, radyasyon kalkanı olarak önemli bir işlev gören, nem içeriğini tahmin edebilecek kapasitede olmalıdır. Bu tür model ilk olarak 1970'lerde, Bazant ve Thonguthai tarafından modellemede sınırlamalar olmasına rağmen geliştirilmiştir. Daha gelişmiş bir model, 1999 yılında Padua Üniversitesi'nde Avrupa komisyonu tarafından desteklenen araştırma programının bir parçası olarak geliştirilmiştir (Khoury GA vd., 1998).

HITECOSP (yüksek sıcaklık etkisinde betonda kabuk atma) olarak adlandırılan model, yangın ve nükleer reaktör uygulamalar etkisinde ısınmış betonarme yapıların kabuk atma davranışını ve potansiyelini tahmin etmek için tasarlanmıştır. Bu modele hasar etkisi gibi sıcaklığa bağlı olan geçirimsizlik ve doğrusal olmayan davranışlar eklenip ve hidrasyon-dehidrasyon, buharlaşma-yoğuşma ve emme-kusma gibi kimyasal-fiziksel faz değişiklikleri dahil edilmiştir. Önceki modeller sadece elastik kırılmaya dayanırken, bu modelde betonun elastik, elastik olmayan ve kırılmalara kadar olan plastik aralıkları tamamen anlatılmaktadır. Fiziksel model, Avrupa çevresinde birkaç büyük laboratuvarında yapılan deneyler ve HITECO araştırma programının bir parçası olarak, ısıtma sırasında betonda gerçekleşen gerçek işlemlere vurgu yaparak, bu yöntemle anlatılmıştır.

1.6. Isının Tanımı ve Önemi

Isı, sıcaklık farkı sonucu bir sistemden diğerine transfer edilebilen bir enerji türüdür. Yapı elemanlarının tasarımında en önemli problemlerinden birisi ısıl çözümleme aşamasıdır. Diğer bir deyişle yapı ya da yapı elemanlarının sıcaklık dağılımlarının belirlenmesidir. Bu

sıcaklık dağılımları, yangına maruz kalan yapı ya da yapı elemanlarının yapısal davranışının belirlenmesinde kritik bir performans göstermektedir.

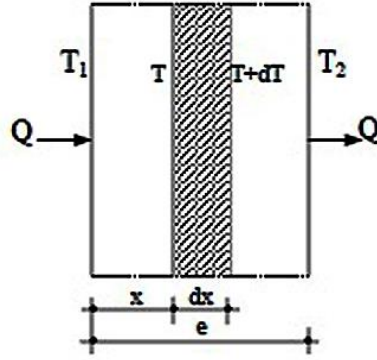
1.6.1. Isı Transferi ve Mekanizmaları

Bir termodinamik çözümlenme, bir sistemde denge durumundan diğereine geçiş yaparken transfer edilen ısı miktarıyla ilgilidir. Böylece ısı transferi, bir enerji transferinin hızını bulmakla ilgilenen bilim dalıdır. Enerjinin ısı olarak transferi, her zaman yüksek sıcaklıktaki bir ortamdaki düşük sıcaklıktaki ortama doğru olup, iki ortam aynı sıcaklığa eriştiğinde ısı transferi durmaktadır. Bazı ısı transferi bilgileri, yangın davranışını anlamak için çok önemlidir. Isı transferi, koşullara bağlı olarak ayrı ayrı veya birlikte meydana gelebilecek üç farklı yolla aktarılabilir: Isı iletimi (kondüksiyon), ısı taşınımı (konveksiyon) ve ısı ışınımı (radyasyon) olarak bilinen ısı transfer yolları, altta anlatılmıştır (Isı ve kütle transferi, Yunus A. ÇENGEL).

1.6.1.1. Isı İletimi

Isı iletimi katılarda, sıvılarda veya gazlarda olabilir. Gazlarda ve sıvılardaki ısı iletimi, moleküllerin hareketleri sırasında çarpışmaları ve yayılmaları yoluyla olmaktadır. Katılarda ise ısınan moleküller yer değiştirmedikinden, birim hücre kafeslerindeki moleküllerin titreşimleri ve serbest elektronlarla enerji aktarımı sonucu oluşmaktadır.

Isı iletimi, cismin ısı iletkenlik katsayısı (λ) ile belirlenir. Isınan moleküllerin enerjisi cisim içinde bir noktadan başka bir noktaya elektron hareketiyle iletilir. Yapı elemanlarında genel olarak ısı iletimi, kolon, kiriş, döşeme ve duvar gibi katı yüzeylerde meydana gelir. Bir yapı elemanında iletim yoluyla ısı geçişi Şekil 1.7'de gösterilmektedir.



Şekil 1.7. Yapı elemanlarında iletim yoluyla ısı geçişi

Bir sistemin kalınlığı e , yüzey alanı A , sıcak ve soğuk yüzeylerin sıcaklığı sırasıyla T_1 ve T_2 , iletkenlik katsayısı λ ise, Fourier yasasına göre bu sistemden geçen ısı miktarı (Q),

$$Q = \frac{\lambda A (T_1 - T_2)}{e}, \quad T_1 > T_2 \quad (1.9)$$

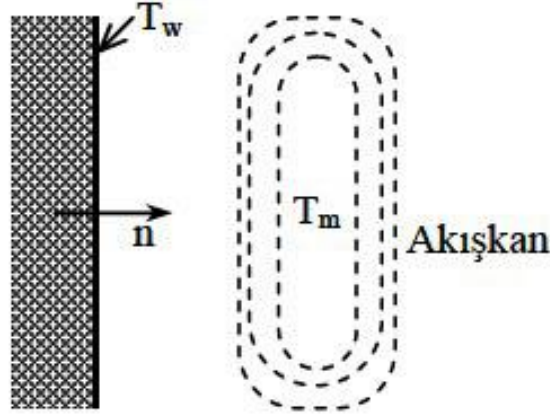
şeklinde bulunur (Heat and mass transfer, L. Bergman vd., 2007).

1.6.1.2. Isı Taşınımı

Burada ısı enerjisi bir noktadan başka bir noktaya cismin ısınan molekülleri vasıtasıyla taşınır. Doğal olarak böyle bir taşınım moleküllerin serbestçe hareket edebildiği yalnızca gaz veya sıvı gibi akışkan ortamlarda meydana gelebilir. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa, ısı aktarımı da o kadar fazla olur. Şekil 1.8'de gösterilen sistemde, yüzey sıcaklığı T_w , yüzey ile temasta bulunan akışkanın ortalama sıcaklığı T_m , ısı taşınım katsayısı h ve ısı geçişinin dik yüzey alanı A ile gösterilirse, bu sistemdeki ısı geçiş miktarı, aşağıda yazılan (1.10) nolu Newton soğutma yasası ile bulunur;

$$Q = h A (T_w - T_m) \quad (1.10)$$

Bu bağıntıdaki ısı taşınım katsayısının değeri, yüzeyin geometrisine ve akışkanın özelliklerine göre değişmektedir (Ataman, 1991; Kakaç, 1998).

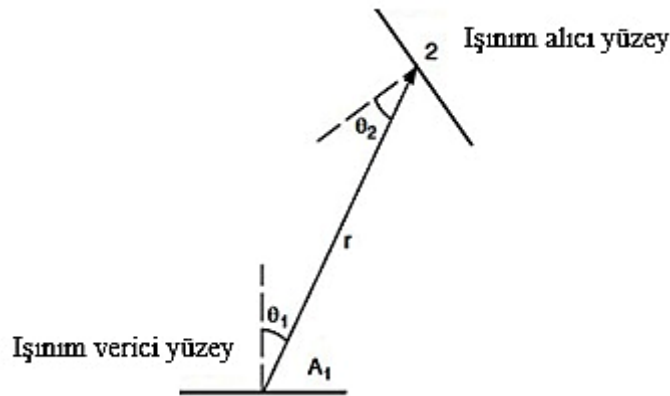


Şekil 1.8. Taşınım yoluyla ısı geçişi

1.6.1.3. Isı Işınımı

Isı enerjisi bir noktadan başka bir noktaya elektromanyetik dalgalar (veya fotonlar) halinde yayılır. Taşınım için herhangi bir ortama gereksinim duyulmaz. Gerçekte, ışınlama ısı transferi en hızlı (ışık hızında) olanıdır ve boşlukta yavaşlamaz. Güneş enerjisinin yeryüzüne ulaşma şekli böyledir. Işınım yoluyla ısı geçiş miktarı, aşağıda yazılan (1.11) nolu denklemden bulunur:

$$Q = \varphi \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_r^4) \quad , \quad \sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \quad (1.11)$$



Şekil 1.9. Bir yüzeyden diğer yüzeye ışınlama yoluyla ısı geçişi (Buchanan ve Abu, 2017)

Bu bağlantıda, T_e ışınlama veren yüzeyin sıcaklığını, T_r ışınlama alan yüzeyin sıcaklığını, φ yüzeylerin şekline bağlı bir katsayıyı, ε ışınlama yapan yüzeyin yayıcılığını ve σ Stefan-

Boltzmann sabitini göstermektedir. Ayrıca bu bağlantıdaki ε değeri, ışınım verici (ε_e) ve ışınım alıcı (ε_r) yüzeyin yayıcılığını göstermek üzere aşağıdaki (1.12) nolu denklem vasıtasıyla belirlenmektedir:

$$\varepsilon = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_e} + \frac{1}{\varepsilon_r} - 1}, \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (1.12)$$

Yüzeyi siyah olan cisimde, ışınım yapan yüzeyin yayıcılığı sıfır olur ($\varepsilon=0$). Yangın durumunda, çoğu sıcak yüzeylerde, örneğin duman veya parlak alevde, 0.7 ile 1.0 arasında bir yayıcılık gözükmemektedir (Buchanan ve Abu, 2017).

Şekil katsayısı (φ), bazen şekil faktörü olarak da tanımlanır ve verici yüzeyin ne kadarının alıcı yüzey tarafından “görüldüğünü” ölçmektedir. Genel durumda Şekil 1.9’da gösterildiği gibi, 2 nolu noktadaki şekil katsayısı, iki yüzey arasında olan r mesafesi ve ışınım verici yüzeyin alanı (A_1) olduğu durumda aşağıda verilen (1.13) nolu bağlantı vasıtasıyla bulunmaktadır:

$$\varphi = \int_{A_1} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi r^2} dA_1 \quad (1.13)$$

1.6.2. Isıl Çözümleme Yöntemleri

Yüksek sıcaklık etkisindeki yapı elemanlarının kesitlerindeki sıcaklık dağılımları, deneysel verilerden elde edilen tasarım grafikleri kullanarak belirlenmektedir. Yapı elemanlarının ısı çözümüleri ayrıca bazı teorik ve basit yöntemler vasıtasıyla da yapılmaktadır. Burada sadece EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da sunulan tasarım grafikleri yöntemi anlatılmaktadır.

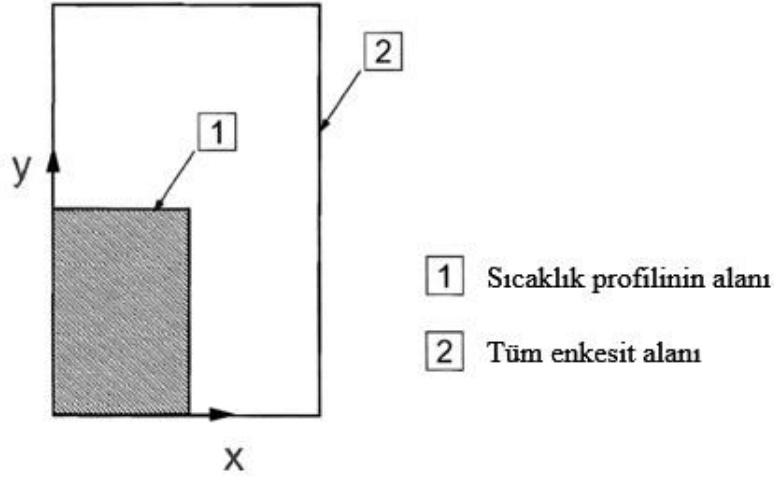
1.6.2.1. Tasarım Grafikleri Yöntemi

EN 1992-1-2 (2004) Ek A’da standart yangın koşulları altında yapılan deneysel çalışma sonuçlarına istinaden, tasarım grafikleri elde edilmiştir. Tablo 1.5’te çeşitli enkesit boyutlarına sahip betonarme döşeme, duvar, giriş ve kolon elemanlarının farklı yangın performans süreleri (dakika cinsinden) gösterilmektedir. Bu tabloda yer alan sıcaklık

profilleri, duvar ve betonarme döşeme elemanları için yangına tek yüzeyinden, kolon ve kiriş elemanları ise yangına tüm yüzeylerden maruz kalma durumu için geçerlidir. Ayrıca betonarme kolon ve kiriş elemanlarda sıcaklık dağılımlarının simetrik kabulüyle, yalnızca kesitlerin 1/4'ünü temsil eden modeller EN 1992-1-2 (2004) yönetmeliğinde gösterilmiştir (Şekil 1.10).

Tablo 1.5. Farklı enkesit boyutlarına sahip yapı elemanlarının yangın performans süreleri

Yapı elemanı	Enkesit boyutları (mm)	Standart yangın performans süresi (R)
Tek yüzünden yangın etkisindeki döşeme veya duvar (Kalınlık)	200	R30 - R240
Kirişler (Yükseklik × Genişlik)	300 × 160	R30 - R90 ve 500°C eşsıcaklık eğrileri
	600 × 300	R60 - R120
	800 × 500	R60 - R240
Kare Kolonlar	300 × 300	R30 - R120 ve 500°C eşsıcaklık eğrileri
Dairesel Kolonlar (Çap)	300	R30 - R120 ve 500°C eşsıcaklık eğrileri



Şekil 1.10. Sıcaklık profillerinin sunulduğu enkesit alanı (EN1992- 1-2, 2004)

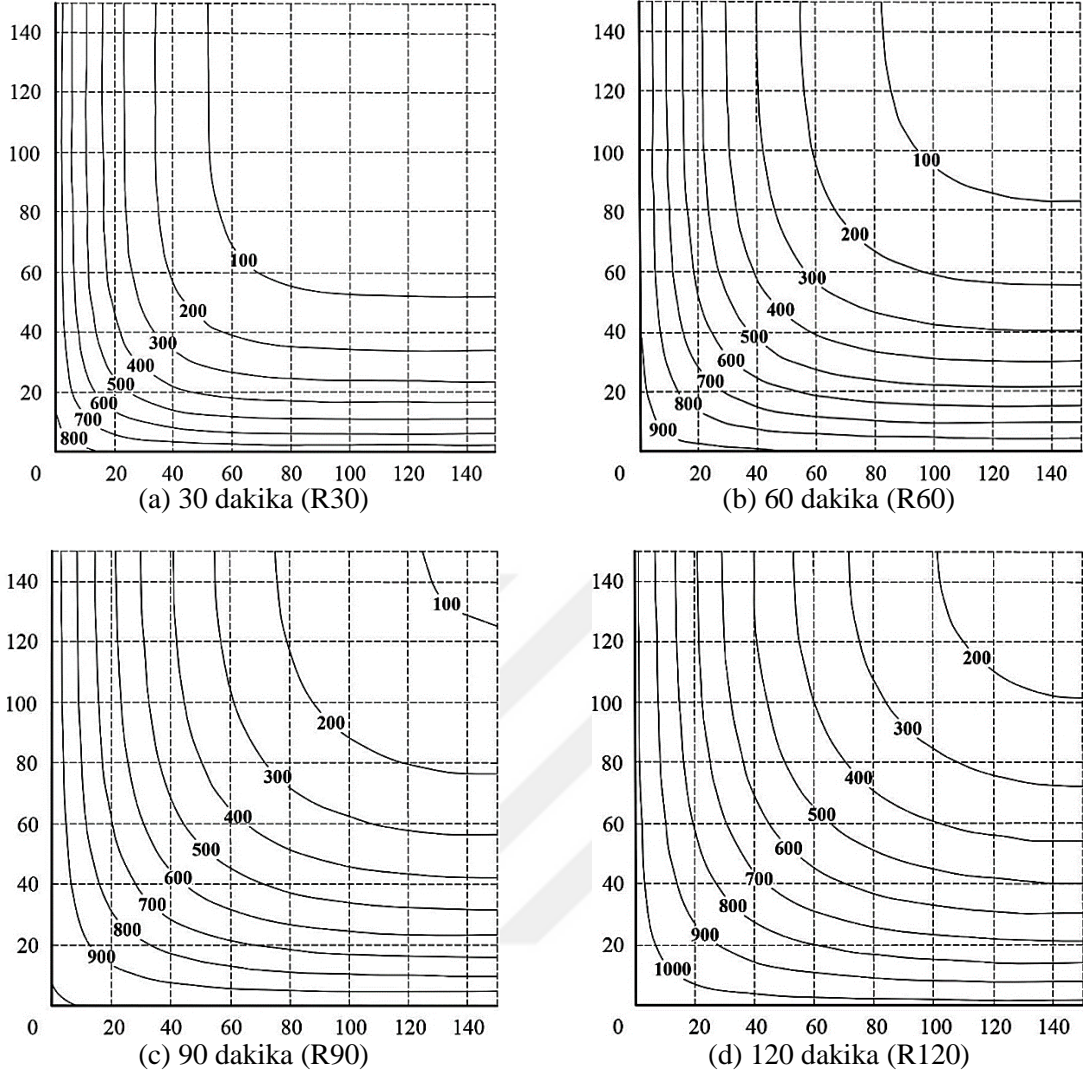
Tablo 1.7'de verilen ve Şekil 1.10'da gösterilen sıcaklık profilleri aşağıda sıralanan kabullerle kullanılmaktadır:

- Elemanlardaki ısı taşınım katsayısı, 25 W/m²K'dır,
- Beton yüzeyin ışıyım yayıcılığı (ϵ), 0.7'dir,
- Betonun özgül ısısı %1.5'luk nem içeriğine uyumludur,
- Elemanlardaki betonun ısı iletkenliğinin en düşük sınırı kullanılır,
- Yüksek sıcaklık etkisi altında beton malzemesi için kabuk atma olayının olmadığı varsayılmaktadır.

Şekil 1.11'de, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan kare kesitli kolonlar için 300 mm × 300 mm boyutlarına sahip kare kesitli kolon için 30, 60, 90 ve 120 dakikalık yangın performans sürelerine ait sıcaklık dağılım profilleri gösterilmiştir. Bu profiller, tüm yüzeyleri yüksek sıcaklığa maruz kalan kolon eleman kesitlerinin ¼'ü üzerinde şematik olarak gösterilmiştir (EN 1992-1-2, 2004).

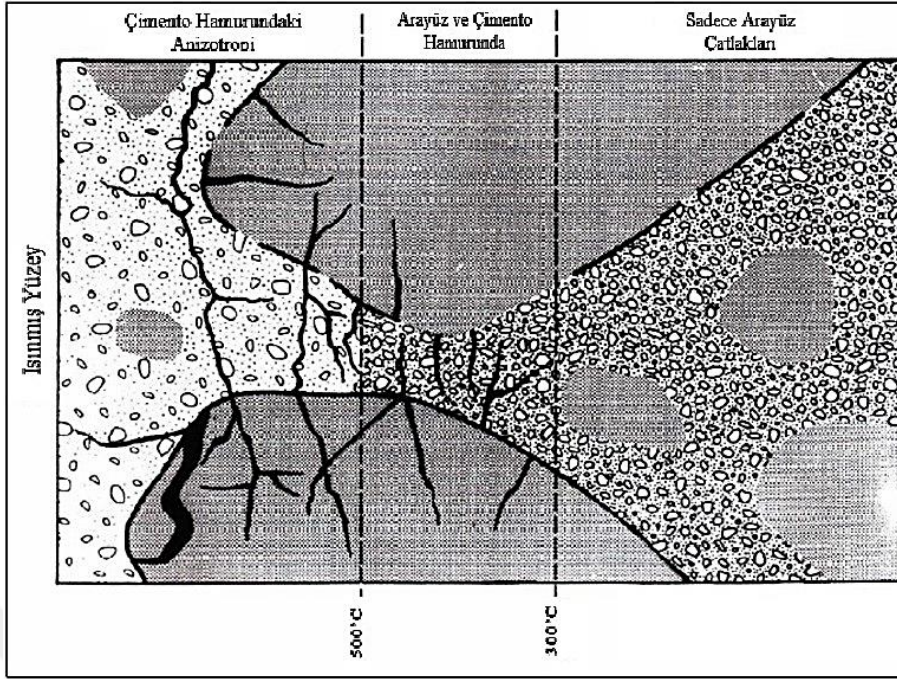
1.7. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkileri

Betonun diğer yapı malzemelerine göre önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir (Erdoğan, 2003). Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000). Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002). Yüksek sıcaklık etkisi altında betonun kimyasal kompozisyonu, fiziksel yapısı ve su muhtevası değişir. Bu değişiklikler öncelikle çimento hamurunda olmak üzere agregada da gözlenir (Bazant ve Kaplan, 1996). Beton yüksek sıcaklık etkisinde kaldığında, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayılımını azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur. Riley bir deneysel çalışmada, çapı 30 mm, yüksekliği 60 mm olan silindir harç numunelerini yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıklarını termokuplar ile ölçerek eşsıcaklık eğrilerini (izotermi) çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermilere benzer olduğunu görmüştür (Şekil 1.12).



Şekil 1.11. 300 mm×300 mm boyutlu kare kolon enkesitinde 30, 60, 90 ve 120 dakikalık standart yangın için sıcaklık dağılım profilleri (EN 1992-1-2, 2004)

Bu Şekilden görüldüğü gibi çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyinden itibaren 25mm-30 mm içeriye girmiştir. 300°C'den daha düşük sıcaklığa maruz bölgelerde arayüz çatlakları, 300°C-500°C arasında arayüz ve çimento hamurunda, 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento hamuru ve agrega tanelerinde büyük çatlaklar meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan bir betonda bu şekilde anizotropik özellikler gözleniyorsa, sıcaklık 500°C'yi aşmış demektir (Riley, 1991).



Şekil 1.12. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (Riley, 1991)

Betonun mekanik özelliklerinin performansını arttırmak, porozite ve permeabilitesinin düşük olması ile mümkündür. Ancak bu durum yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığında betonun performansının azalmasına neden olmaktadır. Yangınlarda betonda patlamaya eşlik eden kabuk atmalar görülmektedir (Şekil 1.13).



Şekil 1.13. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan kabuk atma olayı (R. Jansson, 2013)

Yüksek sıcaklığa maruz betonda meydana gelen ve mekanizması ileride daha detaylı anlatılacak olan bu hasara, ısı farkının yükselmesi ile oluşan yüksek termomekanik gerilme ve düşük permeabiliteden dolayı dışarı çıkamayan suyun meydana getirdiği su buharı basıncı neden olmaktadır (Kanema vd. 2007). Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan kabuk atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olmaktadır. Kabuk atma sonucu açığa çıkan donatılar yüksek sıcaklığa doğrudan maruz kalmaktadırlar. Kabuk atmaları azaltmak için ısı bariyer, polipropilen lif, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük ısı genleşme kapasitesine sahip agregalar kullanmak çözüm olabilir (Khoury, 2003).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agregalar türüne bağlı olarak da değişmektedir. Bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Riley, 1991; Akman, 2000). Beton, farklı ısı karakteristiklerine sahip bileşenleri, farklı nem muhtevası ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd. 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenleri için aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

Yangına dayanıklılık, malzemenin daha çok, yapı elemanlarına uygulanabilir bir kavram olmakla birlikte malzeme özelliklerinin, elemanın performansını etkilediği de açıktır. Yangına ya da yüksek sıcaklığa maruz betonun yanmaz olması ve düşük bir ısı yayılımı özelliğe sahip olması gibi iki önemli üstünlüğü mevcuttur. Ancak, betonun yangında iki sorunu da vardır. Bunlar; ısınma sırasında malzemedeki fiziko kimyasal değişikliklerden kaynaklanan sıcaklık arttıkça mekanik özelliklerde bozulması (Şekil 1.14) ve kabuk atmasıdır. Kabuk atma, malzeme kaybına, kesit boyutunun küçülmesine ve donatının aşırı sıcaklıklara doğrudan maruz kalmasına neden olur. Sonuç olarak, parçalanarak hasara uğramış beton ya da betonarme elemanın hem yalıtım hem de taşıyıcılık özellikleri tehlikeye girebilir. Şekil 1.14, portland çimentolu betonunda ısınma sırasında ortaya çıkan fizikokimyasal değişim aşamalarını göstermektedir (Khoury, 2003). Burada beton yüzeyinin sıcaklık aralığı, ısınma hızına ve beton tipine bağlı olan kabuk atma hariç, sadece beton malzemesi için gösterilmiştir (Khoury, 2003).

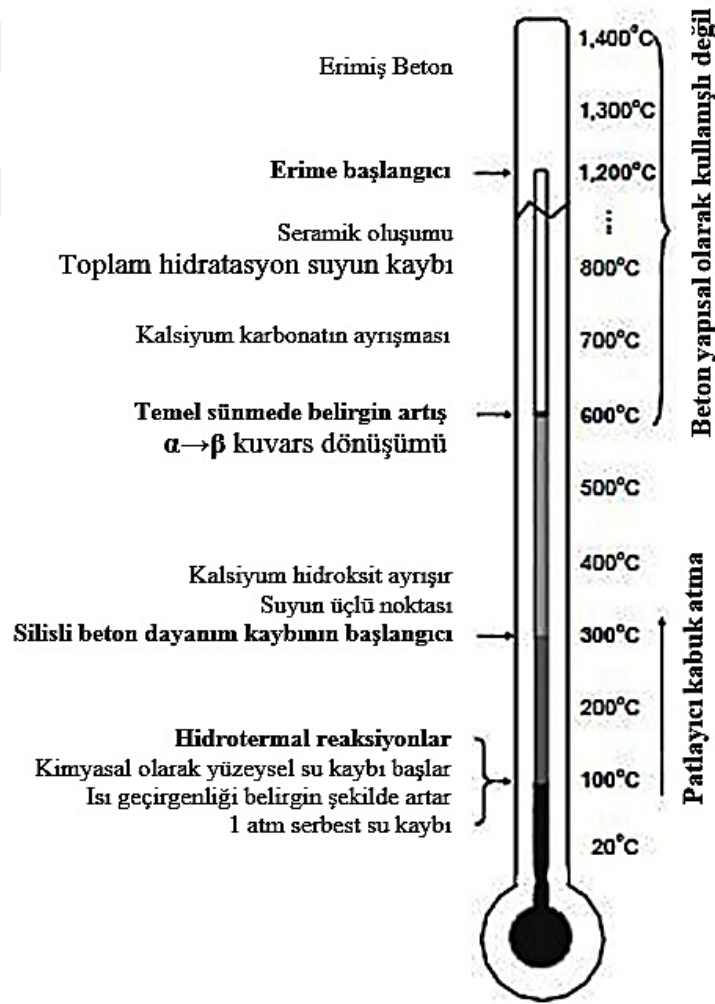
Yüksek sıcaklığa maruz betonun mekanik özelliklerinin bozulması, “malzeme” ile ilgili olarak;

- Çimento hamurundaki fiziko kimyasal değişiklikler,
- Agregadaki fiziko kimyasal değişiklikler,
- Agregada ve çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluklar,

ve “çevresel” faktörlerle ilgili olarak ise;

- Sıcaklık seviyesi;
- Isıtma hızı;
- Uygulanan yük
- Yüzey nem kaybını etkileyen harici kaplama.

gibi özelliklere bağlı olmaktadır.



Şekil 1.14. Portland çimentolu betonunda ısıtma sırasında fizikokimyasal değişim aşamaları (Khoury, 2003)

1.7.1. Kabuk Atma Olayı

Kabuk atma olayı, bir beton ya da betonarme elemanın 20-30°C/dak. ve daha yüksek hızla artan sıcaklıklara maruz kaldığında, yüzeyinden şiddetli (patlamalı) veya şiddetsiz bir şekilde kırılarak parçalanmasıdır. Bu olay, oluşum mekanizması açısından;

- Agregat kabuk atması
- Patlamalı kabuk atma
- Yüzeysel kabuk atma
- Köşe dökülme kabuk atması

olarak sınıflandırılmaktadır. Bunlardan ilk üçü, 20-30 dakika boyunca yangına maruz kaldığında, ısıtma hızından, dördüncü ise 30-60 dakikalık yangında maksimum sıcaklıktan etkilenmektedir. Agregat, yüzeysel ve patlamalı kabuk atmalar çok şiddetli (Şekil 1.15–1.17), köşe dökülme kabuk atması ise şiddetsizdir (Şekil 1.18).

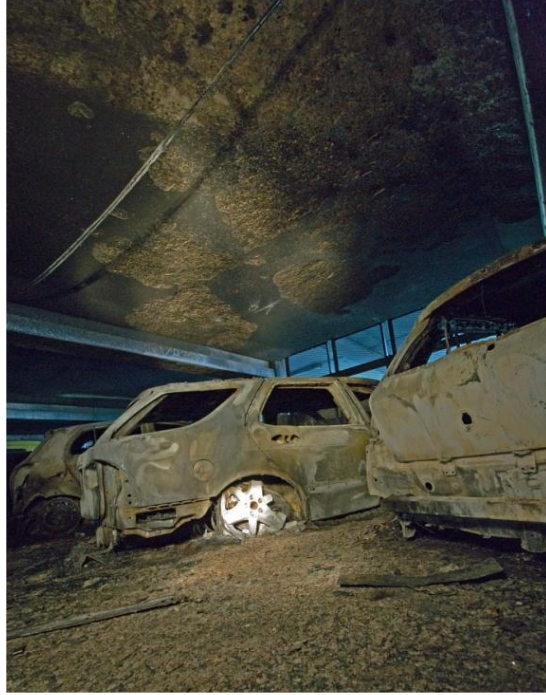
Betonarme yapılarda kabuk atmalarından oluşan hasarlar, yangın güvenliği tasarım hesaplarının hatalı olmasına ve yangında güvenlik seviyelerinin önemli ölçüde azalmasına neden olabilmektedir.



Şekil 1.15. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan agregat kabuk atması (R. Jansson, 2013)



Şekil 1.16. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan yüzeysel kabuk atma (R. Jansson, 2013)



Şekil 1.17. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan patlamalı kabuk atma (R. Jansson, 2013)



Şekil 1.18. Betonda yüksek sıcaklıktan dolayı oluşan köşe dökülme kabuk atması (H. Buchanan ve K. Abu, 2017)

1.7.1.1. Kabuk Atma Olayını Etkileyen Faktörler

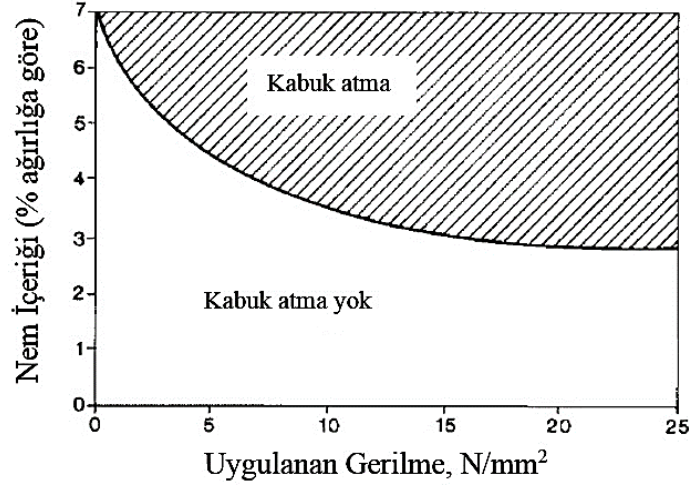
Geçirimsizlik, suya doygunluk seviyesi, agrega cinsi ve granülometrisi, çimento tipi, mevcut çatlak durumu ve donatı oranı gibi malzeme özelliklerinin ve ısıtma hızı, ısıtma profili ve yük seviyesi gibi çevresel etkenlerin yanında betonun kabuk atma mekanizmasını etkilediği daha önce yapılmış çok sayıda deneysel çalışma ile belirlenmiştir. Farklı kabuk atma türleri Tablo 1.6'da özetlenmiştir. Deney sonuçları, kabuk atan veya atmayan bölgeleri tanımlayan nomogramlar üretmek için de kullanılmıştır (Şekil 1.19).

Kabuk atma olayının en önemli etkenleri, ısıtma hızı (özellikle 30°C/dak'nın üzerinde), malzemenin geçirimsizliği, suya doygunluk seviyesi (özellikle %2-3'ün üzerinde nem içeriği), donatı oranı ve uygulanan dış yük seviyesidir.

Tablo 1.6. Farklı kabuk atma türleri

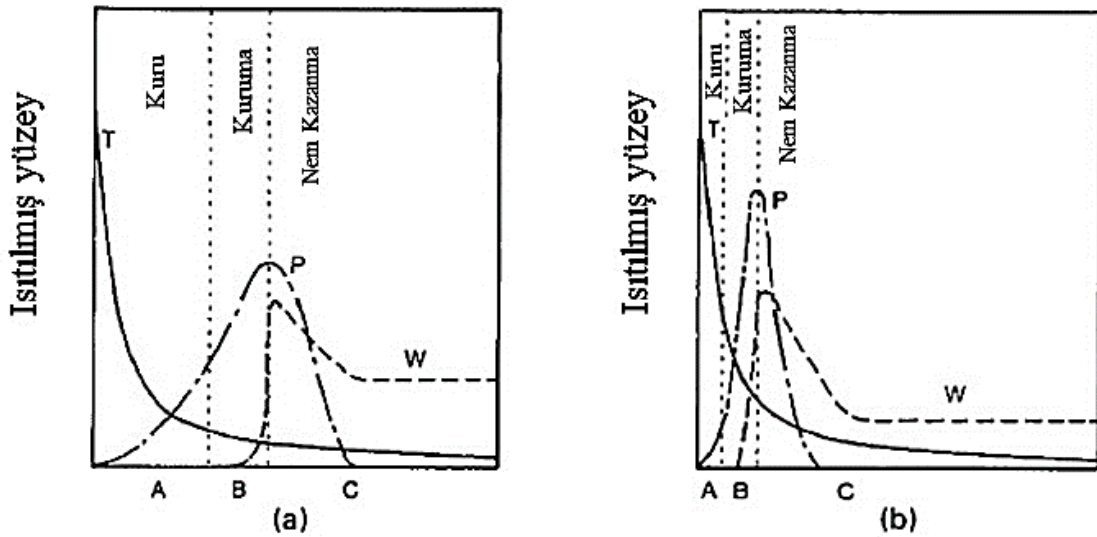
Kabuk atma	Oluşum zamanı (dak.)	Doğası	Sesi	Etkisi	Ana etkisi*
Agrega	7-30	Bölünme	Patlama	Yüzeysel	H, A, S, D, W
Köşe	30-90	Pasif	-	Ciddi olabilir	T, A, F _s , R
Yüzeysel	7-30	Şiddetli	Çatlama	Ciddi olabilir	H, W, P, F _t
Patlamalı	7-30	Şiddetli	Yüksek sesle patlama	Ciddi	H, A, S, F _s , G, L, O, P, Q, R, S, W, Z

*: A: malzemenin ısı genleşmesi, D: malzemenin ısı yayılımı, F_s: betonun kesme dayanımı, F_t: betonun çekme dayanımı, G: beton yaşı, H: ısıtma hızı, L: yük/mesnet, O: ısıtma profili, P: geçirgenlik, Q: kesit şekli, S: agrega boyutu, T: maksimum sıcaklık, W: nem içeriği, Z: kesit boyutu



Şekil 1.19. Normal dayanımlı beton için deneysel paspayı kabuk atmanın nem içeriği ve uygulanan gerilmeye bağlı olarak göstermesi (Zhukov VV., 1975)

Düşük geçirimsizliğe sahip yüksek dayanımlı betonların yüksek çekme dayanımına sahip olmalarına rağmen, geleneksel betona göre kabuk atma olasılığı çok yüksektir. Bu durum, malzemenin düşük geçirimsizliği nedeniyle ısıtma sırasında çok daha fazla boşluk basıncının oluşması şeklinde açıklanmaktadır (Şekil 1.20). Ayrıca, yangına maruz yüksek dayanımlı betonlarda, boşluk basıncındaki tepe noktası, betonun yüzeye daha yakın bölgelerinde meydana gelmektedir.



Şekil 1.20. Tek bir açık yüzeyden ısıtma sırasında (a) geleneksel ve (b) yüksek dayanımlı beton elemanlarda sıcaklık (T), boşluk basıncı (P) ve nem gradyanları (W)

1.7.1.2. Kabuk Atma Mekanizmaları

Betonun kabuk atmasını açıklamak için önerilen mekanizmalar, üç kategori altında incelenmektedir:

- Boşluk basıncı nedeniyle kabuk atma;

Bu mekanizma, Shorter ve Harmathy (Shorter GW ve Harmathy TZ., 1965), Meyer-Ottens (Meyer-Ottens C., 1972), Aktarruzzaman ve Sullivan (Akhtarruzaman AA ve Sullivan PJ., 1970), Khoylou (Khoylou N., 1997) ve Ichikawa (Ichikawa Y., 2000) tarafından önerilmiştir. Bu modelin tahmini ve önerilmesi için, “nem tıkanma modeli” (Shorter GW & Harmathy TZ., 1965), “buhar sürtünme kuvvetleri modeli” (Meyer-Ottens C., 1972) veya “idealize edilmiş küresel gözenek modeli” (Akhtarruzaman AA ve Sullivan PJ., 1970) kullanılmıştır. Boşluk basıncı etkisiyle kabuk atmanın ana etkenleri; betonun su geçirimsizliği, başlangıç su doyma seviyesi ve ısıtma hızıdır. Isıtılmış betonda boşluk basıncının oluşmasının güvenilir bir şekilde tahmini zordur (bkz. Şekil 1.23). Bu modelde basit buhar tablolarından, sonlu elemanlar analizine kadar birçok yöntem kullanılmaktadır (Bazant Z., Thonguthai W., 1979 ve Khoury GA, Majorana C, Kalifa P, 1998). Bu modelin üstünlüğü, betonun çekme dayanımından önemli derecede düşük olan boşluk basınç seviyelerinin tahmin edilebilmesidir. Ayrıca, yalıtılmamış beton numunelerdeki boşluk basınçları, genellikle betonun çekme dayanımından daha düşük seviyelerde belirlenmiştir (Sertmehmetoglu Y., 1977 - Bremer F., 1967 - Thelanderson S., 1974) Daha sonra, Khoylou (Khoylou N., 1997), hidrolik boşluk basıncı kabuk atmaya neden olan ısıtılmış doymuş kapalı küresel boşluklarda, büyük hidrolik basınçların üretilebileceğini öne sürmüştür. Elastik teoriye dayanan bu model, boşluklar arasındaki nem göçünün etkisini ve rötrenin rolünü dikkate almamaktadır. Bu nedenle boşluk basınçlarını olduğundan daha büyük olarak hesaba katmaktadır. Bütün bunlar, boşluk basıncı nedeniyle kabuk atma olayının sayısal yöntemlerle doğru bir şekilde tahmin edilmesinin ne kadar zor olduğunu göstermektedir.

- Isıl gerilme nedeniyle kabuk atma;

Bu mekanizma, Saito (Saito H., 1965) ve Dougill (Dougill JW., 1972) tarafından önerilmiştir. Yüksek hızlı bir ısıtma etkisinde, seramikler patlamalı kabuk atma yapabilirler. Bu durum, hızlı ısınmanın neden olduğu aşırı ısıl gerilmenin oluşumunu ve boşluk basınçları dışındaki etkenlerin patlamalı kabuk atmaya katkıda bulunabileceğini göstermektedir. Isıtma, betonun yüzeye yakın bölgelerinde, kısıtlanmış ısıl genişleme nedeniyle, basınç gerilmelerini ve soğuk iç bölgelerde ise çekme gerilmelerini oluşturmaktadır. Yüzeysel

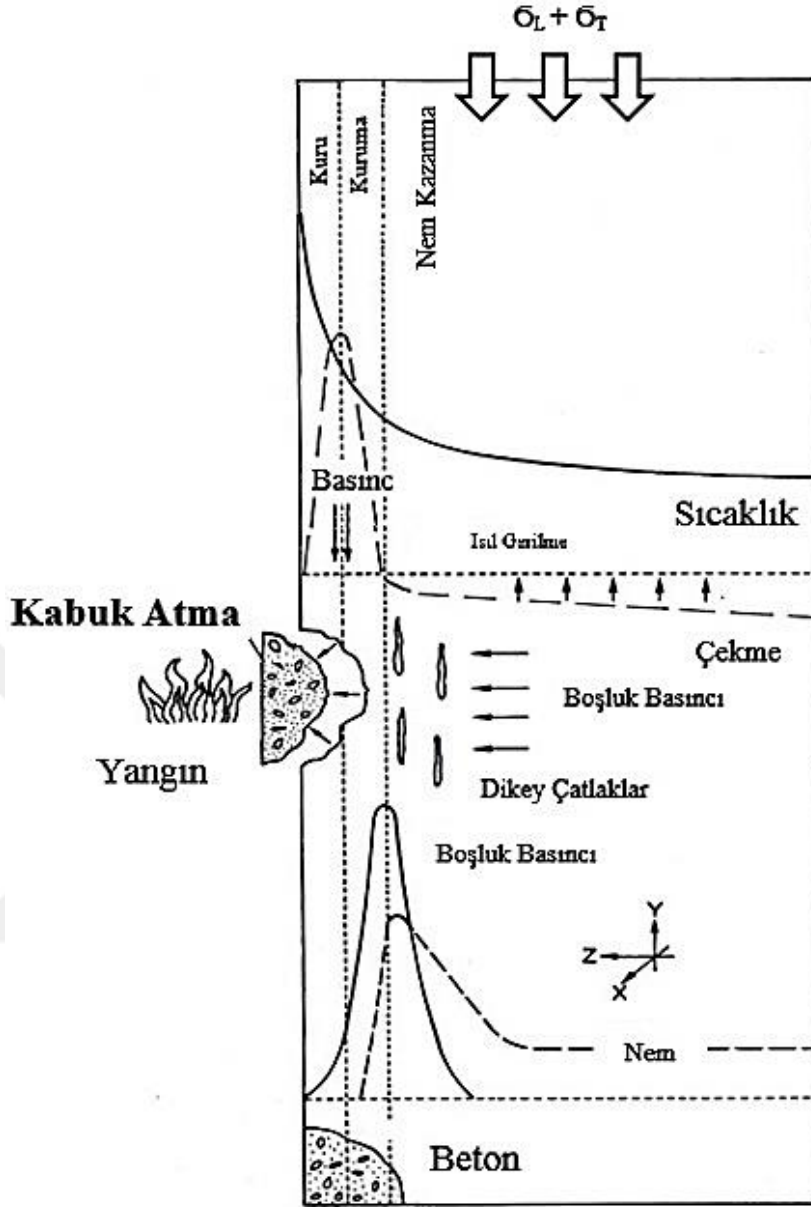
basınç gerilmeleri de, ısı gerilmeleri arttırır. Ancak, betonarme yapıların çok azı gerçekte nihai kırılma gerilmelerine kadar yüklenir. Betonarme yapılarda ısı gerilme nedeniyle kabuk atma olayı nadiren görülmektedir. Isı gerilmelere dayanarak kabuk atmanın tahmininde lineer olmayan modeller kullanılmaktadır.

- Isı gerilme ve boşluk basıncının birlikte etkimesi nedeniyle kabuk atma;

Bu mekanizma, Zhukov (Zhukov VV., 1975), Sertmehmetoglu (Sertmehmetoglu Y., 1977) ve Connolly (Connolly RJ., 1995) tarafından önerilmiştir. Bu olayda patlamalı kabuk atma, genellikle ısı gerilme ve boşluk basıncının birlikte davranışı, açıkta kalan yüzey bölgesinde sıkıştırma ve iç çatlama etkisinde gerçekleşir (Şekil 1.21). Boşluk basıncı nedeniyle kabuk atma, yüklenmemiş küçük numuneler için kendiliğinden oluşabilir. Daha büyük numuneler için, patlamalı kabuk atma oluşmadan önce hem ısı hem de yük kaynaklı gerilmeler ile birlikte boşluk basıncının dikkate alınması gerekmektedir. Toplam gerilme değeri, malzemenin çekme dayanımını aştığında, yüzeysel paralel çatlaklar gelişir. Bu olayı ani bir enerji boşalması ve ısıtılan yüzeyde oluşan ciddi bir hasar durumu şiddetlendirir. Hem boşluk basıncı hem de ısı gerilmeler, dış yüklere, yapı elemanın boyutlarına, betonun tipine ve nem içeriğine bağlı olarak etkilenmektedir. Deney sonuçları, hem normal hem de yüksek performanslı betonlarda, ısı gerilme ve boşluk basıncının birlikte olduğu zaman, daha şiddetli kabuk atmaların oluştuğunu göstermektedir. Bununla birlikte, bazı çalışmalara göre, yüksek oranda silika içeren bazı ultra yüksek performanslı betonlarda, ısı gerilme nedeniyle kabuk atmanın daha fazla öneme sahip olabileceği ve kabuk atmanın önlenmesi için büyük miktarlarda polipropilen liflerin kullanılması önerilmektedir.

1.7.2. Özkütlenin Değişimi

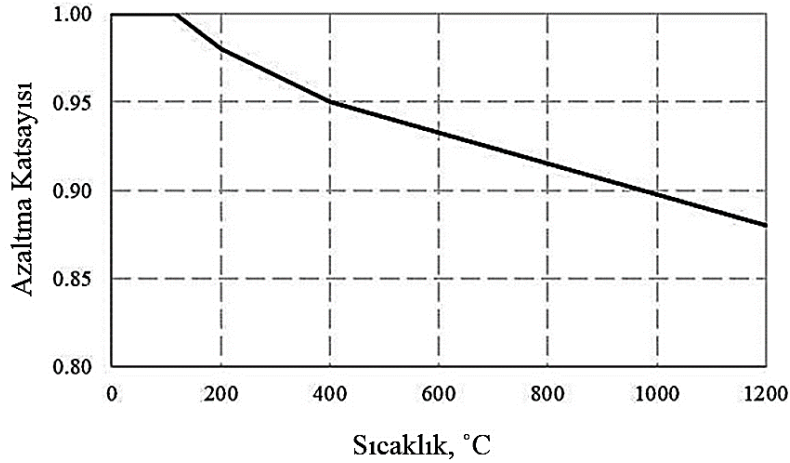
Betonun özgül ağırlığı, artan sıcaklık ile birlikte oluşan serbest ve kimyasal olarak bağlı olan suyun kaybindan etkilenmektedir. Beton içindeki suyun buharlaşması sonucunda, betonda ağırlık kaybı olacağı açıktır. Betonun özgül ağırlığının sıcaklığa bağlı olarak değişimi, EN 1992-1-2'de (2004) verilen ve aşağıda (1.14) nolu denklemler yardımıyla hesaplanabilmektedir.



Şekil 1.21. Boşluk basınçları ve ısıl gerilmelerden etkilenen betonda kabuk atma olayı (Khoury, G.A., 2008)

$$\rho_c(\theta) = \begin{cases} \rho(20^\circ C) , & 20^\circ C \leq \theta \leq 115^\circ C \\ \rho(20^\circ C) \cdot (1 - 0.02(\theta - 115)/85) , & 115^\circ C \leq \theta \leq 200^\circ C \\ \rho(20^\circ C) \cdot (0.98 - 0.03(\theta - 200)/200) , & 200^\circ C \leq \theta \leq 400^\circ C \\ \rho(20^\circ C) \cdot (0.95 - 0.07(\theta - 400)/800) , & 400^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C \end{cases} \quad (1.14)$$

Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi, yukarıda verilen denklemler yardımıyla oluşturulan bir grafik ile aşağıdaki Şekil 1.22’de gösterilmiştir. Betonun oda koşullarındaki özgül ağırlığı, ilgili beton sıcaklığına ait azaltma katsayısı ile çarpılarak, bu sıcaklığa karşılık gelen özgül ağırlık değeri elde edilebilmektedir.



Şekil 1.22. Betonun özgül ağırlığının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)

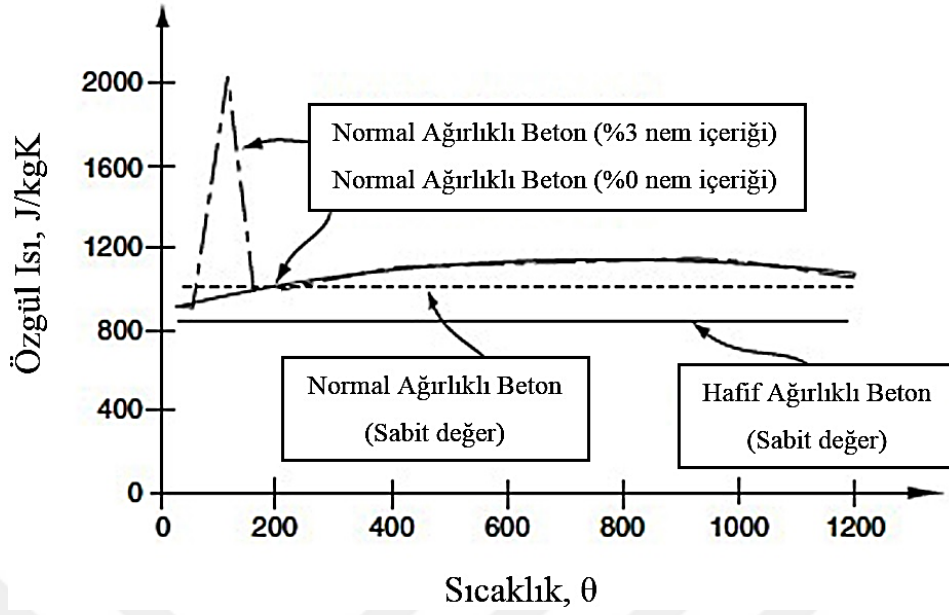
Şekil 1.22'den de görülebileceği gibi, buharlaşan su betonun özgül ağırlığında büyük bir değişime neden olmamaktadır. Dolayısıyla gerçekleştirilecek analizlerde betonun oda koşullarındaki özgül ağırlığının dikkate alınması, sonuçlar üzerinde önemli değişikliklere neden olmamaktadır. EN 1992-1-2'de (2004) geleneksel betonların özgül ağırlığının 2300 kg/m^3 olarak alınabileceği belirtilmiştir.

Bu çalışmada, beton özgül ağırlığının oda koşullarındaki değeri 2300 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.

1.7.3. Özgül Isı Katsayısının Değişimi

Beton sıcaklığının bir fonksiyonu olarak silisli ve kalkerli betonun özgül ısısı, $C_p(\theta)$ [$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$], nem içeriğinin iki farklı değeri için Şekil 1.23'te verilmiştir. 100°C ile 200°C arasındaki tepe değeri, beton içindeki suyun buharlaşması için gereken ısıya karşılık gelmektedir. Bu tepe noktası bölgesi, boşluk büyüklüğü ve boşluk basıncı nedeniyle su için değişken bir kaynama noktasından dolayı belirli bir genişliğe sahiptir (Jansson, 2008).

Hesaplarda sabit ve tek değer kullanmak istenildiğinde, kalker ve silis kökenli agregaların kullanıldığı betonlar için 1000 J/kgK , hafif betonlar için 840 J/kgK değerlerinin kullanımı önerilmektedir (EN 1994-1-2, 2005).



Şekil 1.23. Betonun özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi
(EN 1992-1-2, 2004)

Kalker ve silis kökenli agregaların kullanıldığı kuru betonlar (%0 nem içeriği) için betonun özgül ısısının hesaplandığı ifadeler aşağıdaki (1.15) nolu denklemler olarak verilmektedir:

$$C_p(\theta) = \begin{cases} 900 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} , & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \\ 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} , & 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} , & 200^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C} \\ 1100 \text{ (J/kg}^\circ\text{C)} , & 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.15)$$

Nemli betonda ise, C_p değerinin tepe noktası $100^\circ\text{C} - 115^\circ\text{C}$ arasında olduğunda doğrusal bir artış, ardından 115°C ila 200°C arasında doğrusal bir düşüş meydana gelmektedir (bkz Şekil 1.23). Diğer nem içeriği durumunda ise, doğrusal enterpolasyona izin verilmektedir. Bazı beton nem içeriklerine karşılık gelen özgül ısı tepe değerleri farklı nem içerikleri için aşağıda verilmektedir (EN 1992-1-2, 2004);

% 0 nem içeriği için,	$C_{p, \text{tepe}} = 900 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
% 1.5 nem içeriği için,	$C_{p, \text{tepe}} = 1470 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
% 3.0 nem içeriği için,	$C_{p, \text{tepe}} = 2020 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$
% 10.0 nem içeriği için,	$C_{p, \text{tepe}} = 5600 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$

1.7.4. Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi

Eurocode-2 (EN1992-1-2, 2004), betonun ısı iletkenliği, λ_c [W/m°C] için sadece bir alt ve üst sınır belirlemiştir. Ülkelerin ulusal yönetmeliklerinde, ek kurallar verilebilir. Örneğin, İsveç'te, en düşük sınır değeri uygulanmaktadır. Belçika'da, alt sınır, kalkerli beton için ve iki sınırın ortalaması ise, silisli beton için kullanılmaktadır. Eurocode-2'de (EN1992-1-2, 2004) farklı beton türleri üzerinde gerçekleştirilen yangın deneylerinde ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması yoluyla daha düşük ısı iletkenlik sınırları deneylerle elde edilebilir. Geleneksel betonda, üst sınır silis kökenli beton için, alt sınır ise kalker kökenli betonlar için önerilmiştir. Bu sınırlar aşağıdaki (1.16 ve 1.17) denklemlerle verilmektedir.

Alt sınır (Kalker agregalı beton için) :

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136 (\theta/100) + 0.0057(\theta/100)^2, \quad 20^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C \quad (1.16)$$

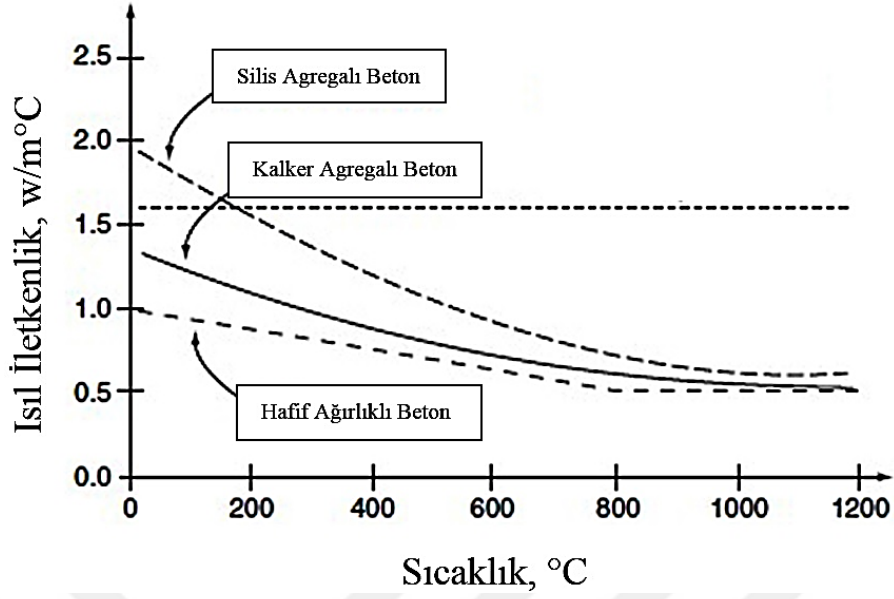
Üst sınır (Silis agregalı beton için) :

$$\lambda_c = 2 - 0.245 (\theta/100) + 0.0107(\theta/100)^2, \quad 20^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C \quad (1.17)$$

Hafif betonun ısı iletkenliğinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi ise, Eurocode-2'de (EN 1994-1-2, 2005) aşağıdaki (1.18) numaralı denklemlerle ifade edilmektedir.

$$\lambda_c(\theta) = \begin{cases} 1 - \theta_c/1600 & 20^\circ C \leq \theta_c \leq 800^\circ C \\ 0.5 & 800^\circ C < \theta_c \leq 1200^\circ C \end{cases} \quad (1.18)$$

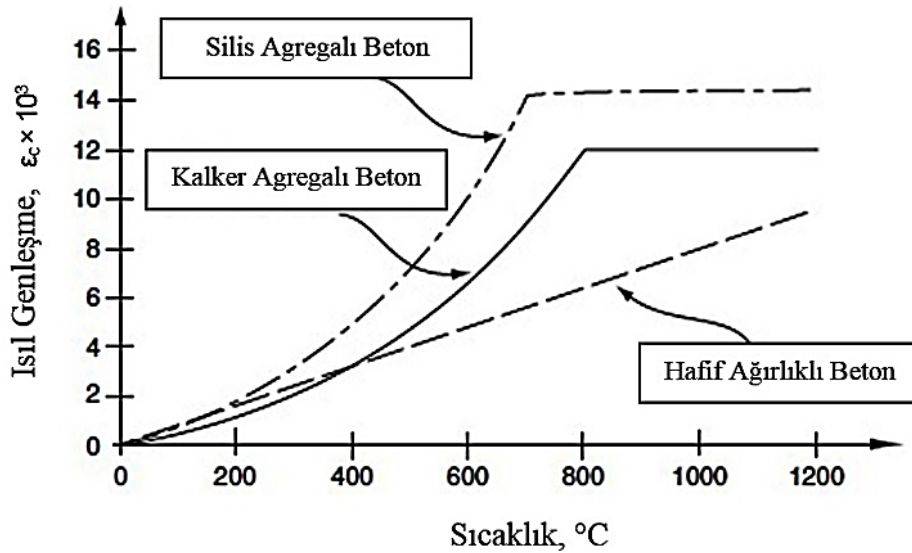
Yukarıda verilen bu denklemlerin grafiksel gösterimi aşağıdaki Şekil 1.24'te verilmektedir.



Şekil 1.24. Betonun ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)

1.7.5. Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi

Beton sıcaklığının bir fonksiyonu olarak betonun ısı genleşmesi Şekil 1.25'te gösterilmektedir.



Şekil 1.25. Betonun ısı genleşmesinin yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)

EN 1992-1-2 (2004), geleneksel betonların ısı genleşmesi, $\varepsilon_c(\theta)$, için aşağıdaki bağıntıları önermektedir. Ayrıca EN 1994-1-2, 2005’de, hafif betonların ısı genleşmesi ise doğrusal bir denklemle verilmiştir.

- Kalker kökenli agregaların kullanıldığı geleneksel betonlar için;

$$\varepsilon_c(\theta) = \begin{cases} -1.2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6}\theta + 1.4 \times 10^{-11}\theta^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 805^\circ\text{C} \\ 12 \times 10^{-3} & 805^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.19)$$

- Silisli agregaların kullanıldığı geleneksel betonlar için;

$$\varepsilon_c(\theta) = \begin{cases} -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}\theta + 2.3 \times 10^{-11}\theta^3 & 20^\circ\text{C} \leq \theta_c \leq 700^\circ\text{C} \\ 14 \times 10^{-3} & 700^\circ\text{C} < \theta_c \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.20)$$

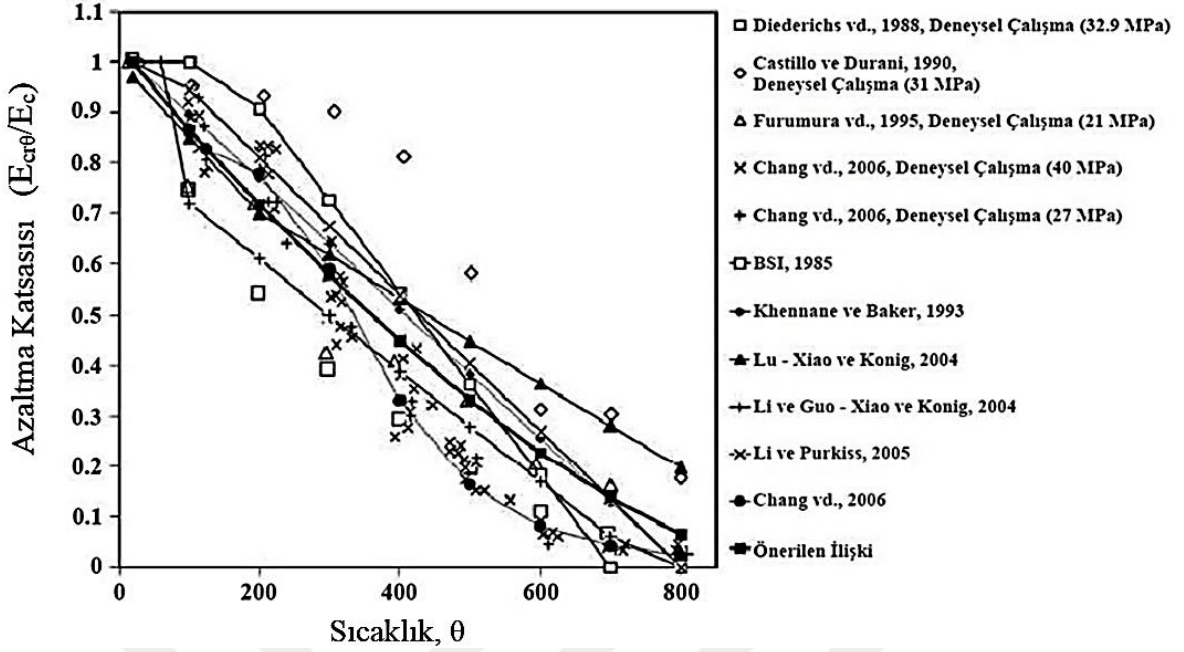
- Hafif betonlar için;

$$\varepsilon_c(\theta) = 8 \times 10^{-6}(\theta - 20) \quad (1.21)$$

1.7.6. Elastisite Modülünün Değişimi

Betonun elastisite modülü, betonun basınç dayanımını etkileyen tüm faktörlerden etkilenebilir (Malhotra, H.L., 1982). Yüksek sıcaklıklarda betonun elastisite modülü için deneysel yolla belirlenerek önerilmiş olan en önemli modeller Şekil 1.26’da özetlenmiştir (Diedreichts vd., 1989), (Castillo ve Durani, 1990), (Furumura vd., 1995).

Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıklarla bir ilişkisi olduğunu öne sürmek için mevcut deneysel veriler üzerinde regresyon analizleri yapılmış ve elastisite modülü azaltma katsayısı $E_{cr\theta}/E_c$ şeklinde ifade edilmiştir (Bastami vd., 2010). Betonun oda koşullarındaki elastisite modülü, ilgili beton sıcaklığına ait azaltma katsayısı ile çarpılarak bulunur. Farklı sıcaklıklara karşılık gelen azaltma katsayısı aşağıda verilen (1.22) numaralı denklem vasıtasıyla elde edilmektedir.

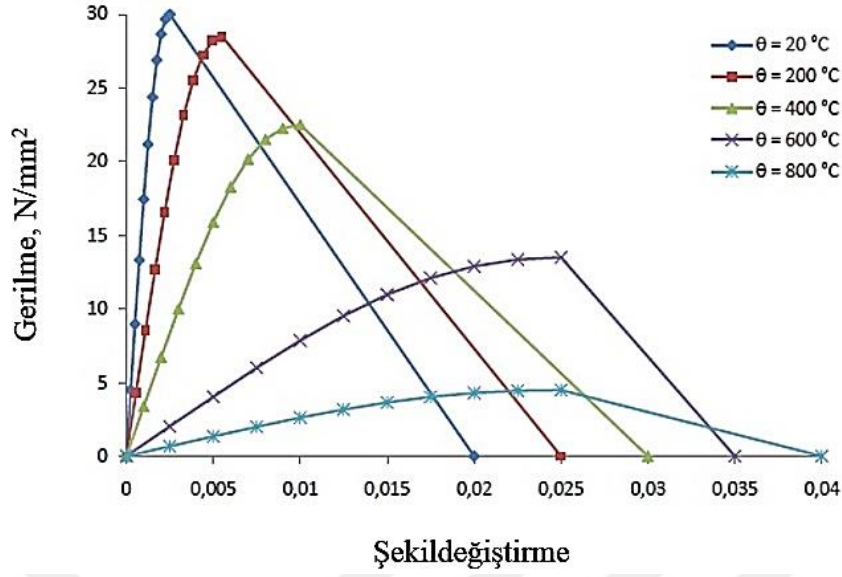


Şekil 1.26. Betonun elastisite modülünün yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan önemli deneysel çalışmaların karşılaştırılması (Bastami vd., 2010)

$$E_{cr\theta}/E_c = \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq \theta < 100^\circ\text{C} \\ 1.015 - 0.00154\theta + 2 \times 10^{-7}\theta^2 + 3 \times 10^{-10}\theta^3 & 100^\circ\text{C} < \theta \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} < \theta \end{cases} \quad (1.22)$$

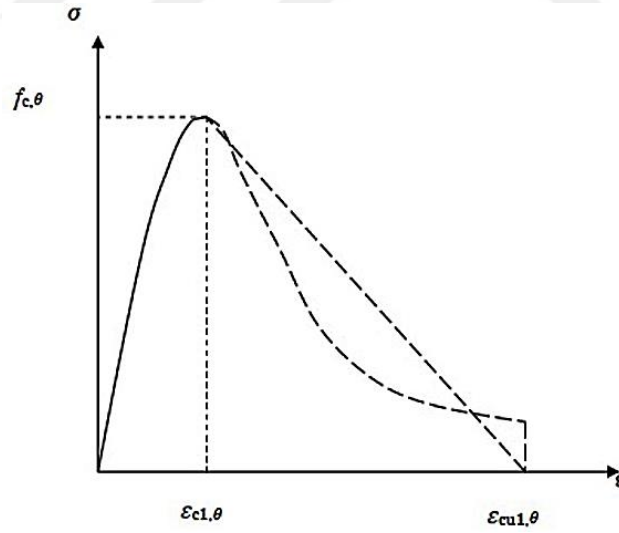
1.7.7. Basınç Dayanımının Değişimi

Tek eksenli basınç gerilmesine maruz betonun hem basınç dayanımı hem de rijitliği sıcaklık yükseldikçe azalmaktadır. Gerilme-şekildeğiştirme diyagramının aynı tip beton için sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 1.27’de verilmektedir. Eurocode-2’de silis kökenli ve kalker kökenli agregalarla üretilmiş betonlar arasında fark olduğu belirtilmesine rağmen, daha çok kalker kökenli agregalarla üretilmiş betonların davranışı kullanılmaktadır (De Wit, 2011).



Şekil 1.27. Betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramının yüksek sıcaklıkla değişimi

Tek eksenli basınca maruz betonun yüksek sıcaklardaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden model aşağıdaki Şekil 1.28' de gösterilmiştir (EN 1992-1-2, 2004)



Şekil 1.28. Tek eksenli basınca maruz uygulanan betonun yüksek sıcaklardaki gerilme-şekildeğiştirme modeli

Bu modelde yükselen kol için ($\epsilon \leq \epsilon_{c1,\theta}$), matematiksel ifade aşağıdaki (1.23) nolu denkemle önerilmiştir (EN 1992-1-2, 2004);

$$\sigma = \frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (1.23)$$

Burada $f_{c,\theta}$ betonun basınç dayanımını, $\varepsilon_{c1,\theta}$ bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmeyi, ε ilgili sıcaklığa ait olan şekildeğiştirme ve σ aynı sıcaklıktaki gerilmeyi göstermektedir.

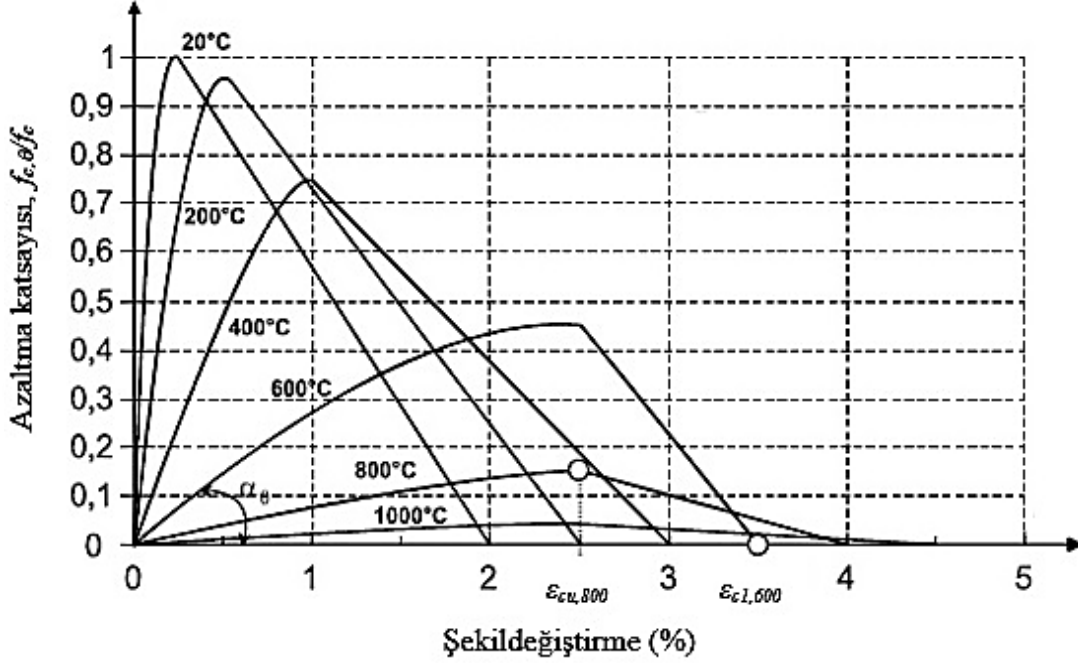
Modelleme sırasında sayısal dengesizliği önlemek için diyagramın alçalan kolu ($\varepsilon_{c1,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$), doğrusal olarak seçilir (Bulletin, 2008). Uygulamada ise, bu kol doğrusal veya doğrusal olmayan bir şekil olarak seçilebilir (bkz. Şekil 1.28). EN 1992-1-2, 2004'te gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin parametreleri sıcaklığa ve geleneksel betonun tasarlanan değerlerine bağlıdır. Bu parametreler Tablo 1.7'de verilmektedir. Bu matematiksel model, özellikle alçalan kol, doğal yangın modelleri için pek uygun değildir. Bu nedenle alternatif bir model kullanılmalıdır. Ancak gerekli olan değişiklikler Eurocode-2'de belirtilmemiştir. Ayrıca betonun soğuma aşamasındaki muhtemel dayanım kazanılmasını da hesaba katmamaktadır (EN 1992-1-2, 2004).

Tablo 1.7. Silis ve kalker kökenli agregaların kullanıldığı betonun yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisinin parametreleri (EN 1992-1-2, 2004)

Beton sıcaklığı, θ ($^{\circ}\text{C}$)	Silis kökenli agregalar			Kalker kökenli agregalar		
	$f_{c,\theta}/f_c$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta}/f_c$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
20	1.00	0.0025	0.0200	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.0055	0.0250	0.97	0.0055	0.0250
300	0.85	0.0070	0.0275	0.91	0.0070	0.0275
400	0.75	0.0100	0.0300	0.85	0.0100	0.0300
500	0.60	0.0150	0.0325	0.74	0.0150	0.0325
600	0.45	0.0250	0.0350	0.60	0.0250	0.0350
700	0.30	0.0250	0.0375	0.43	0.0250	0.0375
800	0.15	0.0250	0.0400	0.27	0.0250	0.0400
900	0.08	0.0250	0.0425	0.15	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.0250	0.0450	0.06	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.0250	0.0475	0.02	0.0250	0.0475
1200	0.00	-	-	0.00	-	-

Tablo 1.7'deki $f_{c,\theta}/f_c$ ifadesi, dayanım azaltma katsayısı olarak tanımlanmaktadır. Silisli agregaların kullanıldığı betonun, Tablo 1.7'deki parametreleri kullanarak belirlenen, yüksek sıcaklığa bağlı gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 1.29'da gösterilmektedir.

Burada $\varepsilon_{cu1,\theta}$ ve $\varepsilon_{cl,\theta}$ sırasıyla azalan doğrusal kolun başlangıç ve bitiş noktası olarak alınmışlar.

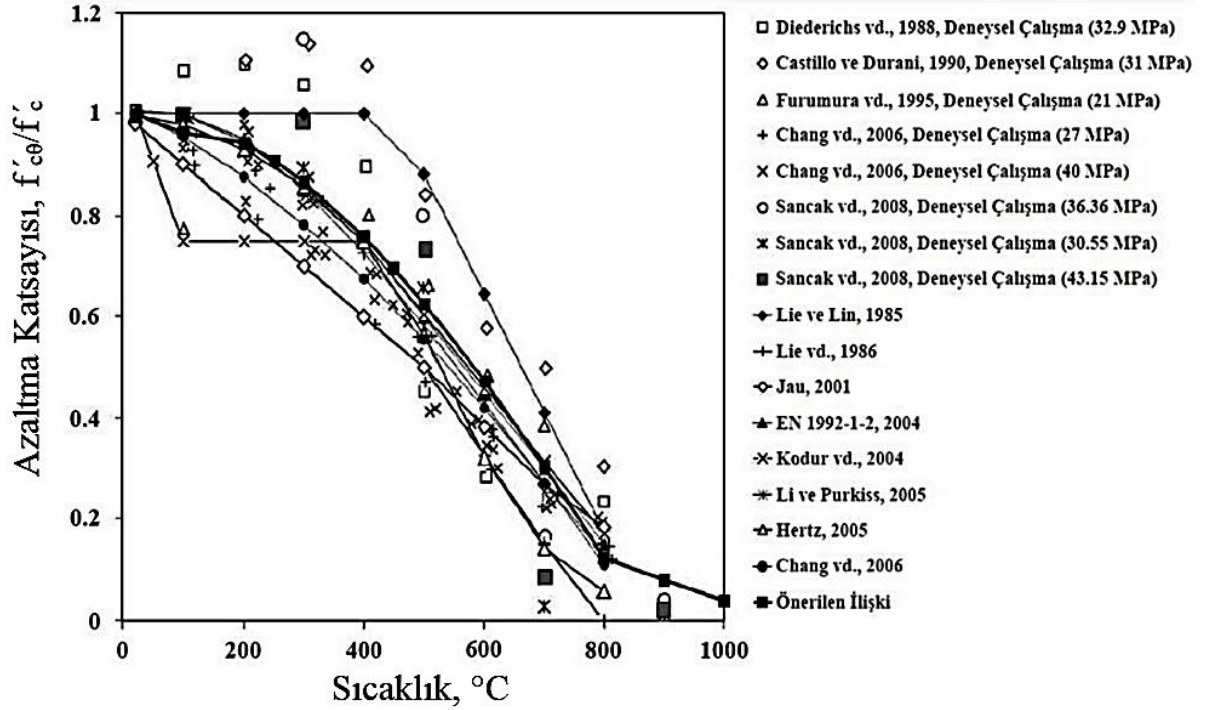


Şekil 1.29. Silisli agregaların kullanıldığı betonun yüksek sıcaklığa bağlı gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (EN 1992-1-2, 2004)

Betonarme yapılarda oluşan basınç gerilmelerinin çok büyük bir bölümü enkesitteki beton tarafından karşılanmaktadır. Bu nedenle, yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımına etkisinin bilinmesi önemli konulardan biridir. Teknik literatürde yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımı, genellikle numunelerin deney sıcaklığına kadar ısıtılıp, soğutulduktan sonra oda sıcaklığındaki dayanımı olarak verilmektedir. Bastami vd. (2010), gerçekleştirdikleri deneysel çalışmalar kapsamında betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi hakkında ve mevcut davranış modellerini inceleyerek, regresyon analizi yapmışlardır. Bu analizler sonucunda, betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi, bileşiminde kullanılan agrega türüne bağlı olarak modellenmiştir. Çalışmalar, betonun basınç dayanımının artan sıcaklıkla azaldığını ortaya koymuştur.

Şekil 1.30'da silisli agrega kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırılıp, aşağıdaki (1.24) numaralı denklemler elde edilmiştir.

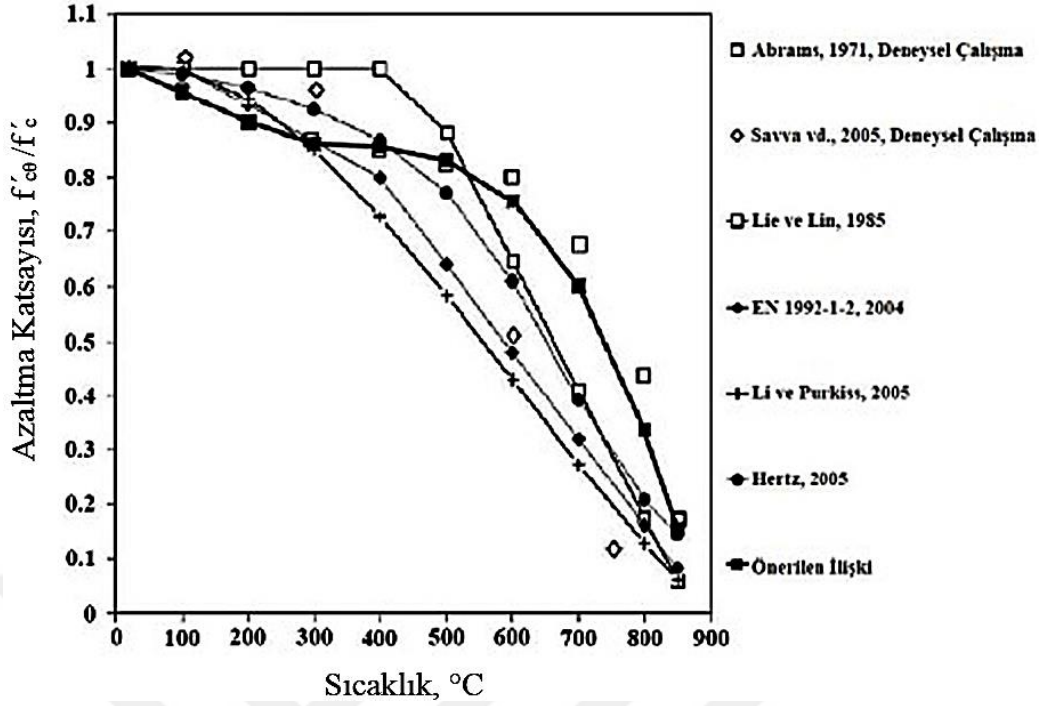
$$f'_{c\theta}/f'_c = \begin{cases} 1.012 - 0.0005\theta \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \\ 0.985 - 0.0002\theta - 2.235 \times 10^{-6}\theta^2 + 8 \times 10^{-10}\theta^3 & 100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C} \\ 0.44 - 0.0004\theta & 800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1000^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} < \theta \end{cases} \quad (1.24)$$



Şekil 1.30. Silisli agrega kullanılan betonda basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010)

Şekil 1.31’de kalker agregası kullanılan betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırılıp, bu davranış aşağıdaki (1.25) numaralı denklemler elde edilmiştir.

$$f'_{c\theta}/f'_c = \begin{cases} 1.01 - 0.0006\theta \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \\ 1.0565 - 0.0017\theta + 5 \times 10^{-6}\theta^2 - 5 \times 10^{-9}\theta^3 & 200^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C} \\ 0 & 900^\circ\text{C} < \theta \end{cases} \quad (1.25)$$

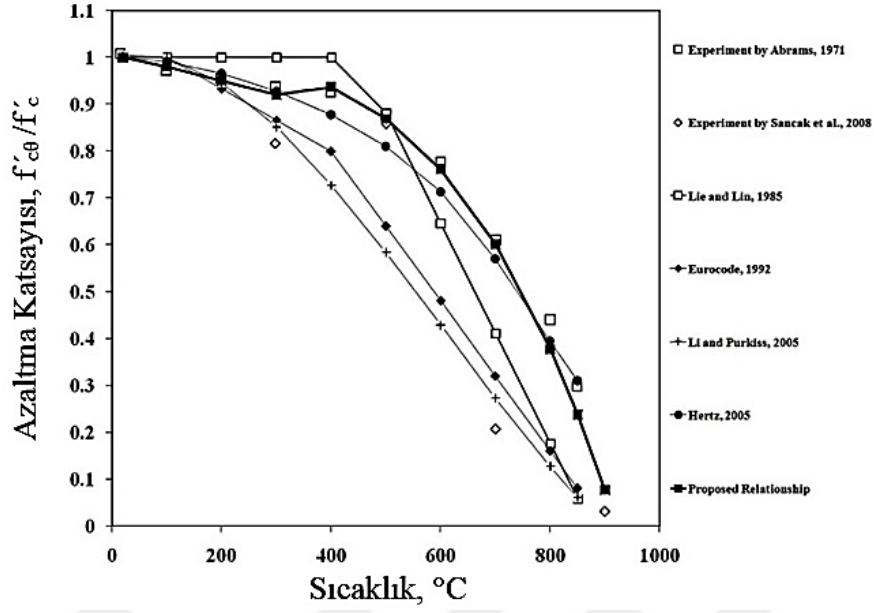


Şekil 1.31. Kalker agregalı betonda basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010)

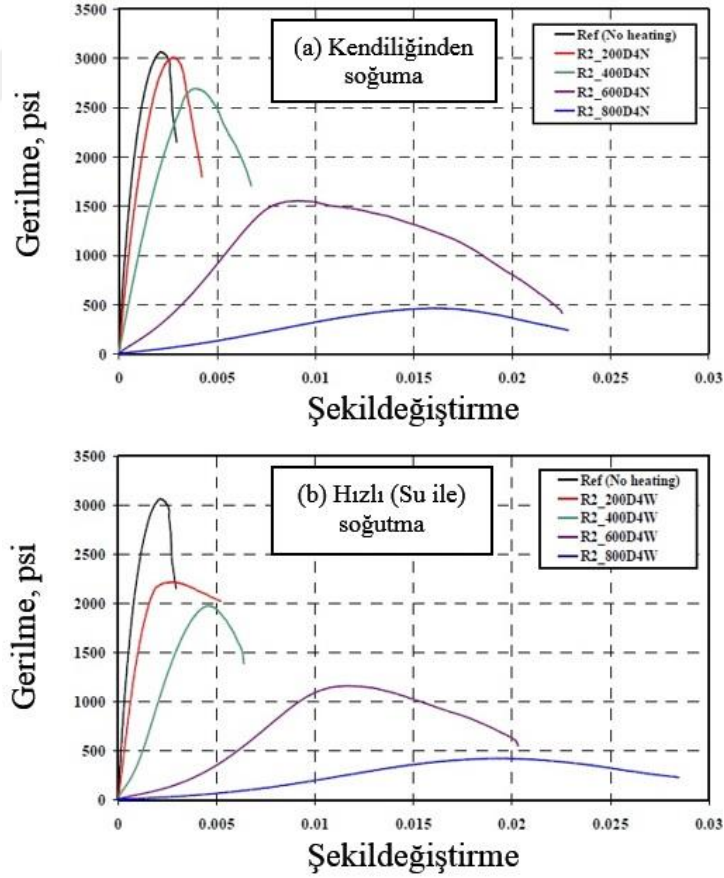
Şekil 1.32’de hafif betonun basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi konusunda yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırıp ve bu davranış aşağıdaki (1.26) numaralı denklemler elde edilmiştir.

$$f'_{c\theta}/f'_c = \begin{cases} 1.01 - 0.00037\theta \leq 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 300^\circ\text{C} \\ 1.0491 - 0.00036\theta + 10^{-6}\theta^2 - 2 \times 10^{-9}\theta^3 & 300^\circ\text{C} < \theta \leq 900^\circ\text{C} \\ 0 & 1000^\circ\text{C} < \theta \end{cases} \quad (1.26)$$

Farklı soğutma yöntemlerinin betonun gerilme-şekildeğiştirme eğrisi üzerindeki etkisini Şekil 1.33’te gösterilmektedir (Lee ve ark. 2008). Şekilden, kendiliğinden soğuma ve hızlı (su ile) soğutma deney sonuçlarının karşılaştırılmasıyla, hızlı soğutma yöntemi eğrilerinin hem tepe dayanımı değerini, hem de başlangıç eğiminin, kendiliğinden soğuma ile elde edilenlerden daha düşük olduğu açıkça görülebilmektedir. Bu nedenle, hızlı soğutmanın betonun hem dayanımı hem de rijitliği üzerinde olumsuz etkisi olduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 1.32. Hafif betonda basınç dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (Bastami vd., 2010)



Şekil 1.33. Beton numunelerin 200, 400, 600 ve 800°C'ye kadar ısıtılıp soğutulduktan sonra gerilme-şekildeğiştirme eğrileri (Lee ve ark. 2008)

1.7.8. Çekme Dayanımının Değişimi

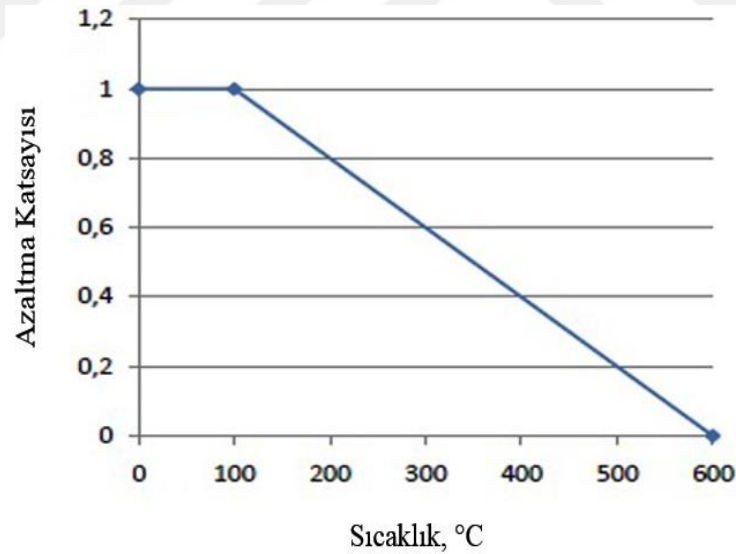
Betonun çekme dayanımı, genel olarak göz ardı edilmektedir. Bu kabul, betonarme hesaplarda ilave bir güvenlik sağlar. Buna rağmen, yüksek sıcaklığa maruz betonun çekme dayanımının bilinmesi gerektiğinde, aşağıdaki (1.27) nolu denklem kullanılabilir (De Wit, 2011).

$$k_{c,t}(\theta) = \begin{cases} 1 & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta_c \leq 100^{\circ}\text{C} \\ 1 - (\theta - 100)/500 & 100^{\circ}\text{C} < \theta_c \leq 600^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1.27)$$

Burada $k_{c,t}(\theta)$, betonun karakteristik çekme dayanımı azalma katsayısıdır ve

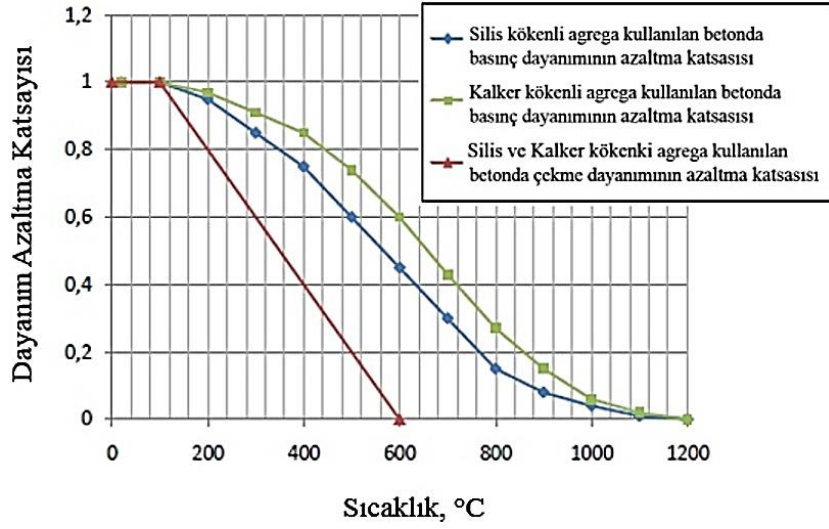
$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta) \cdot f_{ck,t} \quad (1.28)$$

olarak tanımlanmaktadır. Bu katsayı Şekil 1.34'te gösterilmektedir.



Şekil 1.34. Betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)

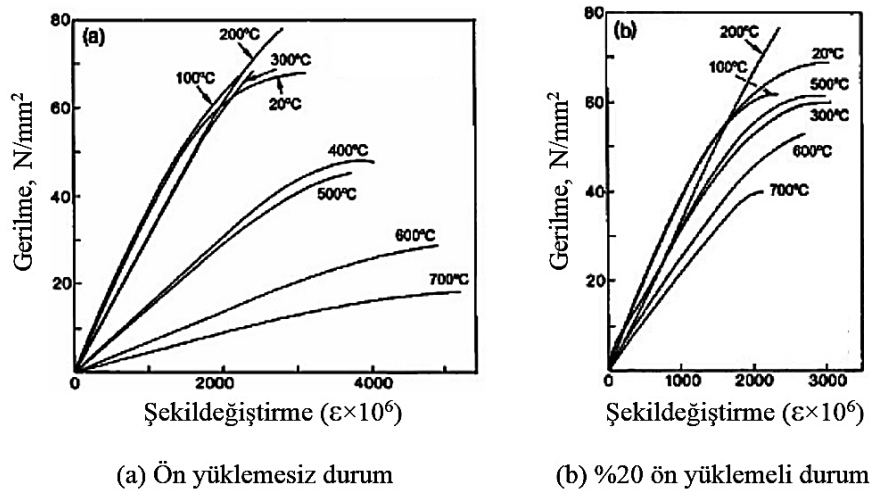
Betonun basınç ve çekme dayanımlarının sıcaklık artışıyla azalması Şekil 1.35'te görülmektedir. Bu şekilden, sıcaklık arttıkça, çekme dayanımının basınç dayanımından daha hızlı azaldığı görülmektedir (De Wit, 2011).



Şekil 1.35. Silis ve kalker agregalı betonda basınç ve çekme dayanımlarının farklı sıcaklıklarda karşılaştırmaları

1.7.9. Ön Yüklemenin Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Beton Dayanımına Etkisi

Khoury 2002 yılında gerçekleştirdiği deneysel çalışmalarının sonucunda, ısıtma sırasında yapılan ön yüklemenin, betonun hem basınç dayanımı hem de elastisite modülünü olumlu yönde etkilediğini belirtmiştir (Khoury, 2002). Şekil 1.36'da, yüksek sıcaklık altında denenmiş ultra yüksek performanslı beton için, ön yüklemenin dayanım ve elastisite modülü üzerinde olumlu etkisi görülmektedir. Ancak bu durumun tüm beton türleri için geçerliliği henüz kanıtlanmış olmamakla birlikte ön yükleme etkisinde oluşan basıncın çatlak gelişimini engelleyici etki gösterdiği söylenebilir.



Şekil 1.36. Ön yüklemenin yüksek sıcaklık altındaki beton dayanımına etkileri (Khoury, 2002)

1.8. Yüksek Sıcaklığın Betonarme Donatısının Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkileri

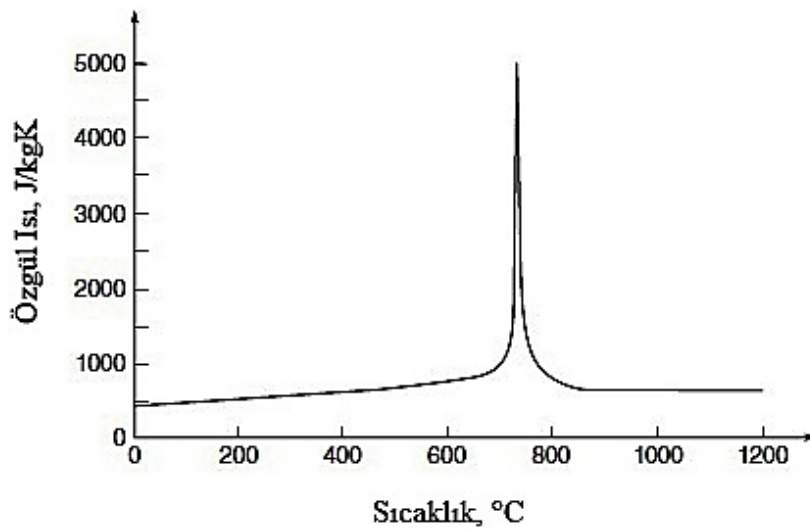
Yangına maruz kalan yapılarda sıcaklık hesaplamaları yapmak için malzemelerin ısı özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Betonarme çeliğin yüksek sıcaklıklardaki diğer ısı özellikleri ise aşağıda açıklanmaktadır.

1.8.1. Özgül Isı Katsayısının Değişimi

Çeliğin özgül ısısı, Şekil 1.37’de gösterildiği gibi, sıcaklıkla birlikte değişmektedir. Buradaki tepe noktası yaklaşık 735°C ’ye karşılık gelmekte ve bu noktada malzemenin metalurjik yapısında değişiklik meydana gelmektedir. Basit hesaplamalar için çeliğin özgül ısı katsayısı, C_p (J/kgK), 600 J/kgK olarak alınabilir ancak, aşağıda verilen (1.29) numaralı denklemlerin kullanılması daha uygun olacaktır (EN 1993-1-2, 2005).

$$C_p(\theta) = \begin{cases} 425 + 0.733\theta - 1.69 \times 10^{-3}\theta^2 + 2.22 \times 10^{-6}\theta^3 & 20^{\circ}\text{C} \leq \theta < 600^{\circ}\text{C} \\ 666 + 13002/(738 - \theta) & 600^{\circ}\text{C} \leq \theta < 735^{\circ}\text{C} \\ 545 + 17820/(\theta - 731) & 735^{\circ}\text{C} \leq \theta < 900^{\circ}\text{C} \\ 650 & 900^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \end{cases} \quad (1.29)$$

Burada θ çeliğin sıcaklığını göstermektedir.

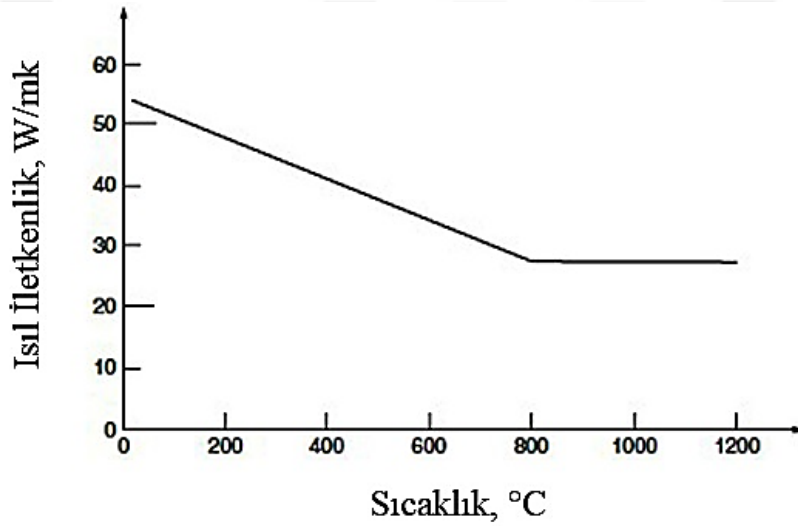


Şekil 1.37. Çeliğin özgül ısı katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1993-1-2, 2005)

1.8.2. Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi

Çeliğin ısı iletkenliği, Şekil 1.38’de gösterildiği gibi, sıcaklıkla birlikte değişmekte, 0°C’de 54 W/mK’den doğrusal olarak 800°C’de 27.3 W/mK’e düşmektedir (CEN-2005b, 1993-1-2-2005). Basit hesaplamalar için, ısı iletkenlik katsayısı (λ_s), 45 W/mK olarak alınabilir, ancak aşağıdaki (1.30) numaralı denklemin kullanılması daha uygun olacaktır (EN 1993-1-2, 2005).

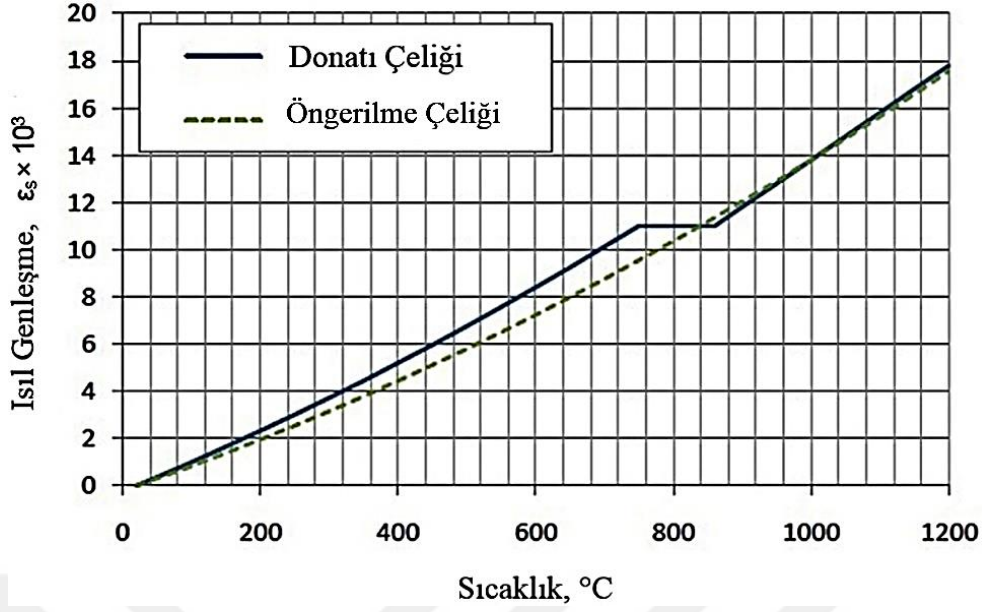
$$\lambda_s = \begin{cases} 54 - 0.0333\theta & 20^\circ\text{C} \leq \theta < 800^\circ\text{C} \\ 27.3 & 800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.30)$$



Şekil 1.38. Çeliğin ısı iletkenlik katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi

1.8.3. Isıl Genleşme Katsayısının Değişimi

Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak donatı ve öngerilme çeliğinin ısı genleşme katsayısının değişimi Şekil 1.39’da gösterilmektedir.



Şekil 1.39. Donatı ve öngerilme çeliğinin ısı genleşme katsayısının yüksek sıcaklıkla değişimi (EN 1992-1-2, 2004)

Isıl genleşme katsayısı, donatı ve öngerilme çeliği için aşağıdaki (1.31 ve 1.32) numaralı ifadeler yardımıyla hesaplanabilmektedir.

Donatı çeliği için:

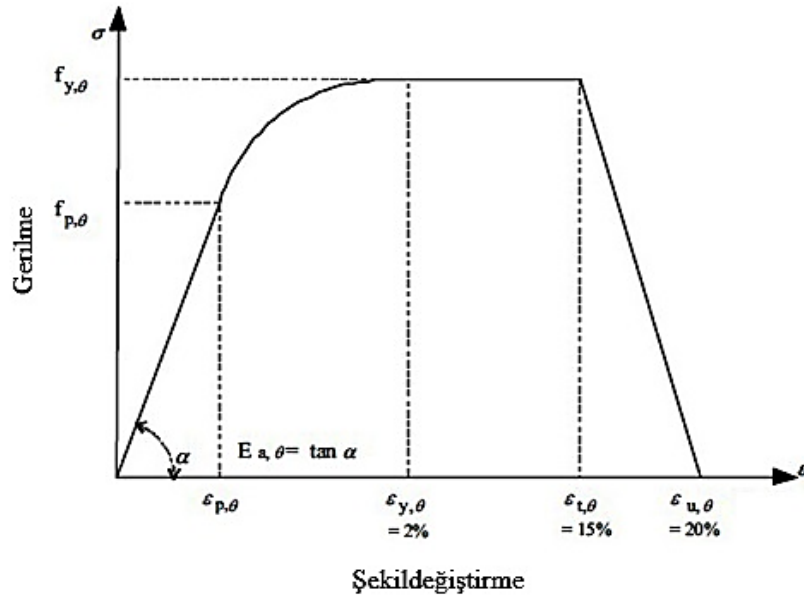
$$\varepsilon_s = \begin{cases} -2.416 \times 10^{-4} + 1.2 \times 10^{-5}\theta + 0.4 \times 10^{-8}\theta^2 & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C} \\ 11 \times 10^{-3} & 750^\circ\text{C} \leq \theta \leq 860^\circ\text{C} \\ -6.2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5}\theta & 860^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1.31)$$

Öngerilme çeliği için:

$$\varepsilon_s = -2.016 \times 10^{-4} + 10^{-5}\theta + 0.4 \times 10^{-8}\theta^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (1.32)$$

1.8.4. Gerilme-Şekildeğiştirme Eğrisinin Değişimi

Eurocode-2'ye göre, yüksek sıcaklığa maruz çeliğin gerilme-şekildeğiştirme modeli Şekil 1.40'ta, ilgili parametrelerin ifadeleri ise Tablo 1.8'de verilmektedir. Burada çeliğin yüksek sıcaklıklarda gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi dört bölgeye ayrılmaktadır (Annex C-EN 1992-1-2, 2004):

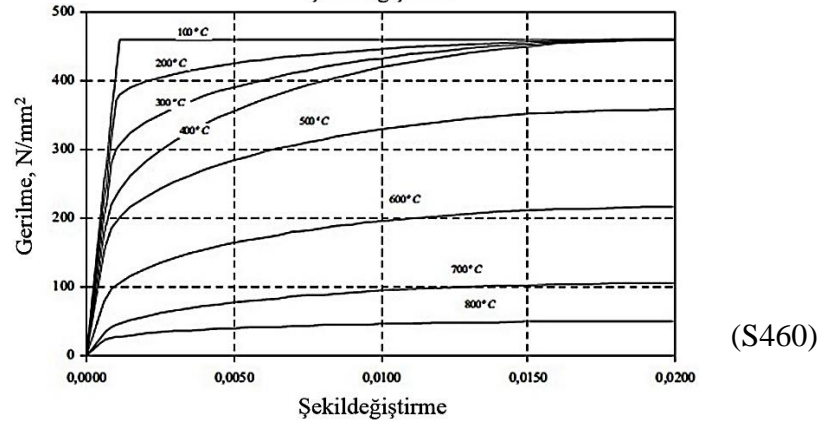
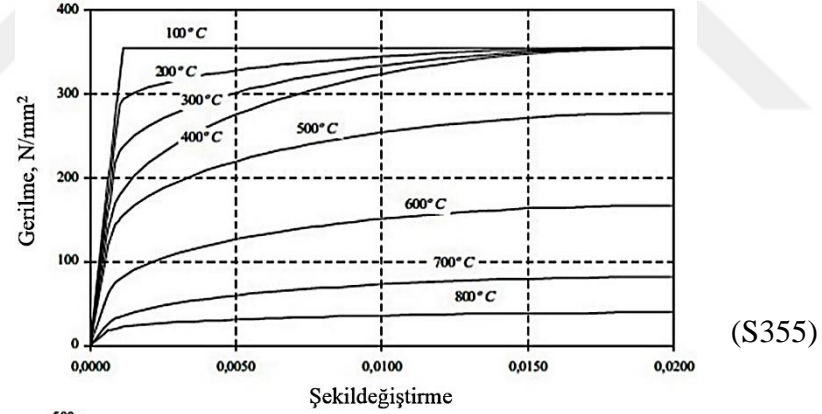
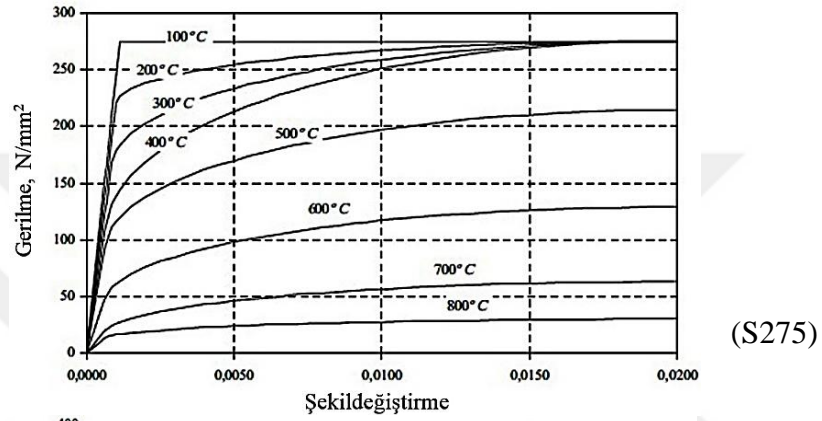
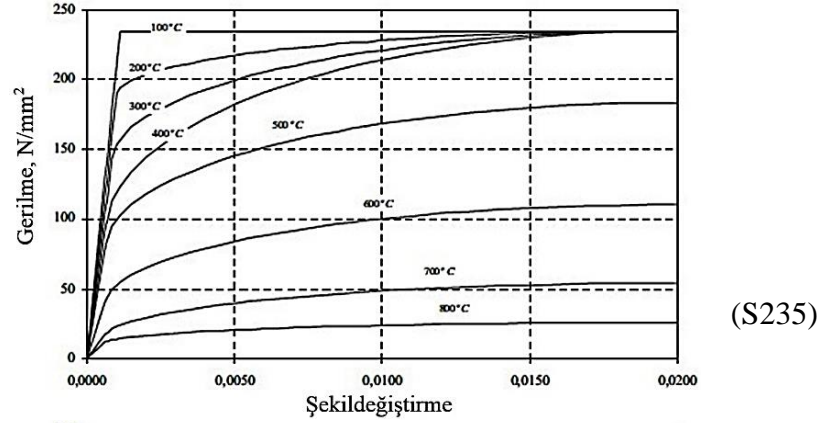


Şekil 1.40. Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini temsil eden model (EN 1992-1-2, 2004)

Tablo 1.8. Çeliğin yüksek sıcaklıktaki kullanılan esas formülleri (EN 1993-1-2, 2005)

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

Çelik için Tablo 1.8’de sunulan model kullanılarak, yüksek sıcaklıklarda gerilme-şekildeğiştirme diyagramları elde edilmiş ve verilerin grafiksel gösterimi sırasıyla S235, S275, S355 ve S460 çelik sınıfları için Şekil 1.41’de verilmiştir (EN 1993-1-2, 2005).

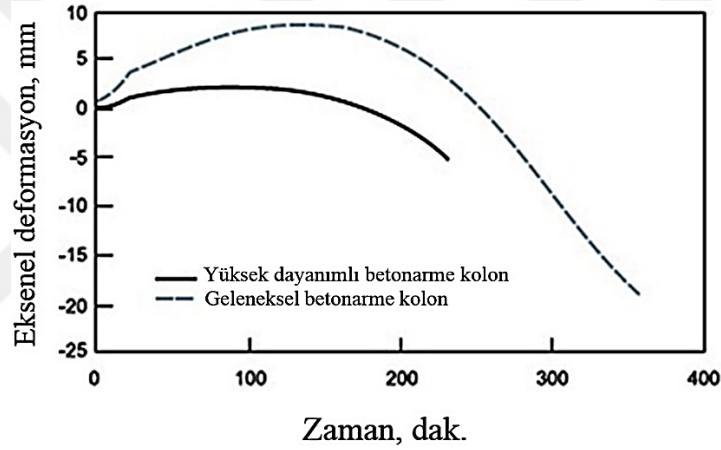


Şekil 1.41. Çeliklerin farklı sıcaklıklar için gerilme-şekildeğiştirme diyagramları (EN 1993-1-2, 2005)

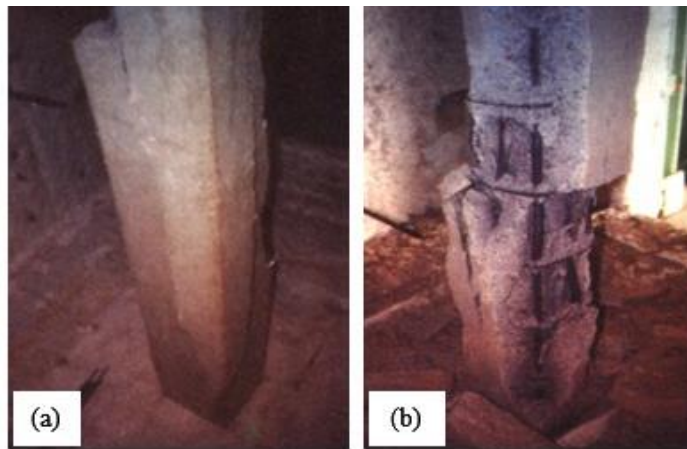
1.9. Konuyla İlgili Daha Önce Gerçekleştirilen Bazı Çalışmalar

Farklı nedenlerden dolayı yüksek sıcaklıkların etkisinde kalan beton ve betonarme yapılar hakkında bugüne kadar birçok deneysel ve teorik çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışmasının konusu olan betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları hakkında daha önce gerçekleştirilmiş olan bazı çalışmalara aşağıda yer verilmiştir:

Kodur (1999) tarafından yapılan çalışmada, geleneksel ve yüksek dayanımlı betonarme kolonlar üzerinde yangın deneylerini içeren bir araştırma gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.42 ve Şekil 1.43'te görüldüğü gibi, yüksek dayanımlı betona sahip numuneler geleneksel betona sahip numunelerden daha kötü yangın performansı sergilemiştir.



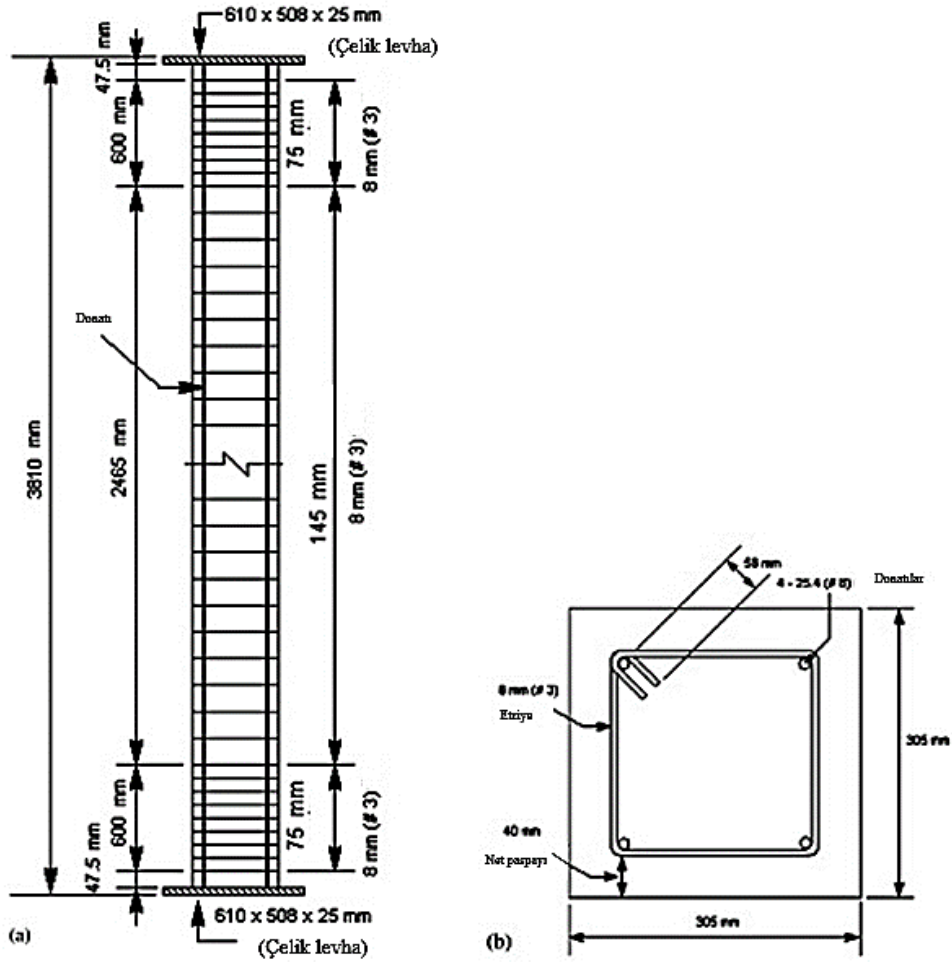
Şekil 1.42. Geleneksel ve yüksek dayanımlı betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları (Kodur, 1999)



Şekil 1.43. (a) Geleneksel ve (b) yüksek dayanımlı betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışları (Kodur, 1999)

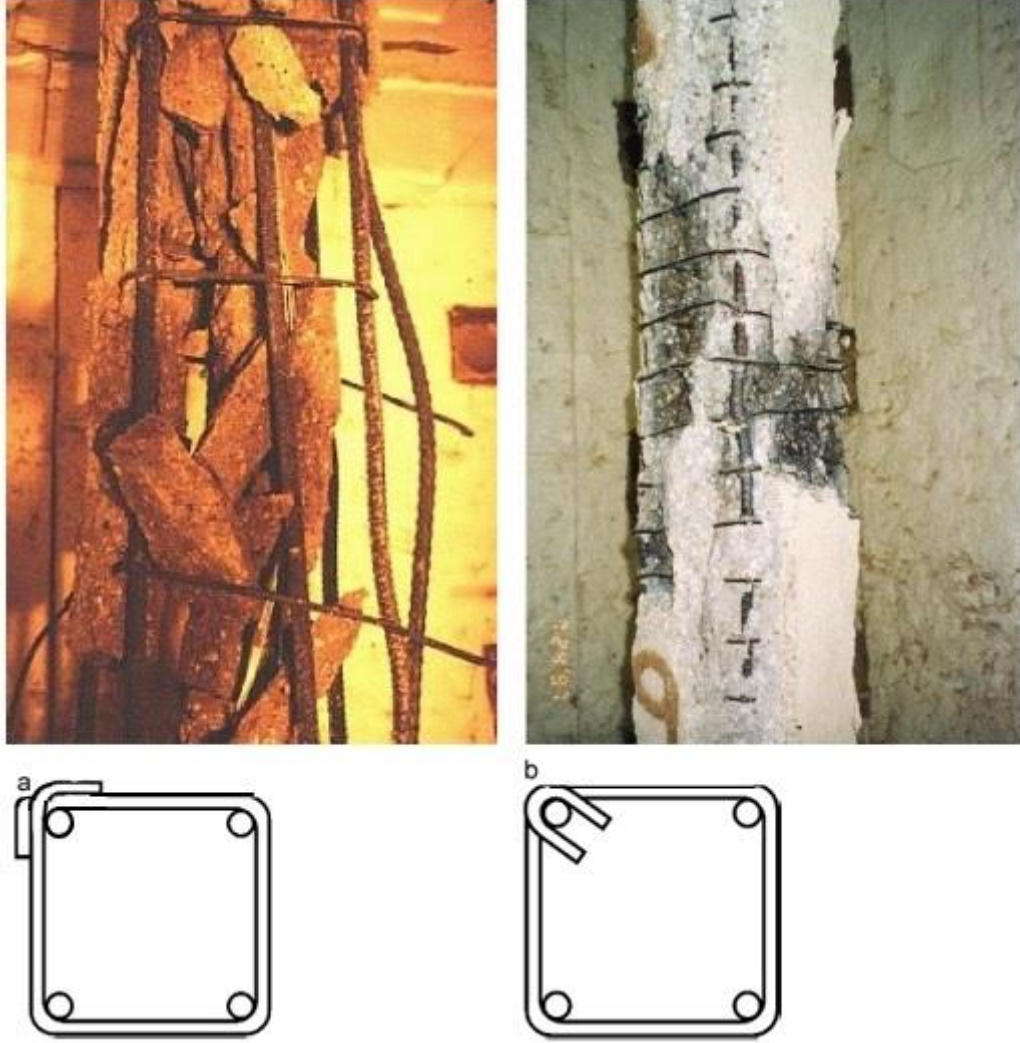
Franssen, ve Dotrepe (2003) tarafından betonarme kolonların yangın davranışını etkileyen parametreleri belirlemek amacıyla yapılan deneysel bir çalışma sonucunda bazı hesap yöntemleri elde edilmiştir. Önceki çalışmalarda sadece kare veya dikdörtgen kesite sahip betonarme kolonların incelendiği ve köşe kabuk atmasının çok sık görüldüğü belirtilerek, bu çalışmada, dairesel kolonların yangın performansı incelenmiştir.

Kodur vd. (2003 ve 2007) tarafından yapılan çalışmalarda, yüksek dayanımlı betonarme kolonların yangın performansı, deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilen sayısal modelleme sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırılıp, doğrulanmıştır. Önerilen modelde, yüksek dayanımlı kolonların yangın performansının tahmini için, yük düzeyi, kesit boyutları, lif takviyesi, kolon yüksekliği, beton dayanımı ve agrega tipi gibi önemli parametreler kullanılabilir. Şekil 1.44'te deneysel çalışmada kullanılan betonarme kolon detayları gösterilmektedir.



Şekil 1.44. Betonarme kolon numunelerin (a) boyut ve (b) kesitleri (Kodur vd., 2003)

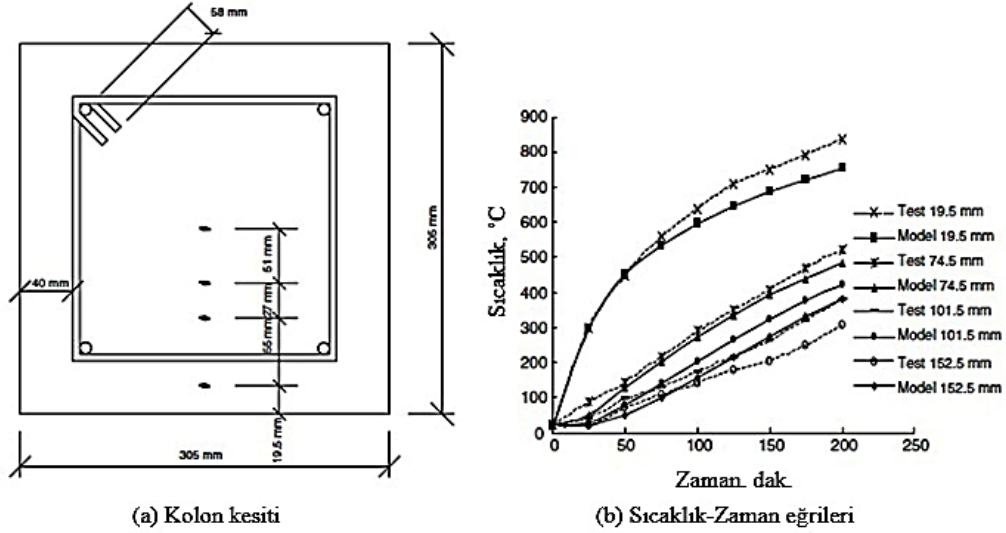
Kodur ve Phan (2007) tarafından yapılan çalışmada, farklı tip kancalı etriyelere sahip yüksek dayanımlı betonarme kolonlarda kabuk atma olayı karşılaştırılmıştır (Şekil 1.45).



Şekil 1.45. (a) 90° kancalı ve (b) 135° kancalı etriyelerle yapılmış yüksek dayanımlı betonarme kolon numunelerinde yangın sonrası kabuk atma olayın karşılaştırılması (Kodur ve Phan, 2007)

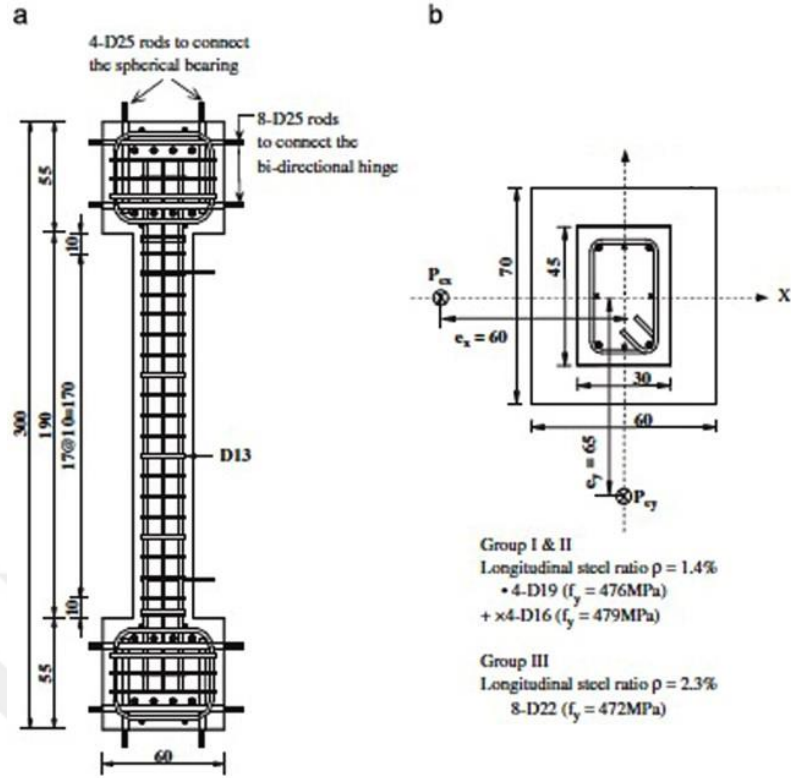
Wu Hong vd. (2007) tarafından yapılan çalışmada, yangın etkisindeki betonarme köşe kolonlarının davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Hem geleneksel, hem de yüksek dayanımlı betonda, kesit boyutları, aksel yük oranı ve eksantrikliğin yangın performansı üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir. Aksel yüklü geleneksel ve yüksek dayanımlı betonarme kolonlarında donatı oranının yangın dayanımı üzerinde önemli etkisi olmadığı ayrıca patlamalı kabuk atmanın, yüksek dayanımlı betondaki yangın performansı üzerinde oldukça etkili olduğu belirtilmiştir.

Şekil 1.46’da, betonarme kolon numuneler için enkesitin farklı bölgelerindeki sıcaklık dağılımının karşılaştırması gösterilmektedir.

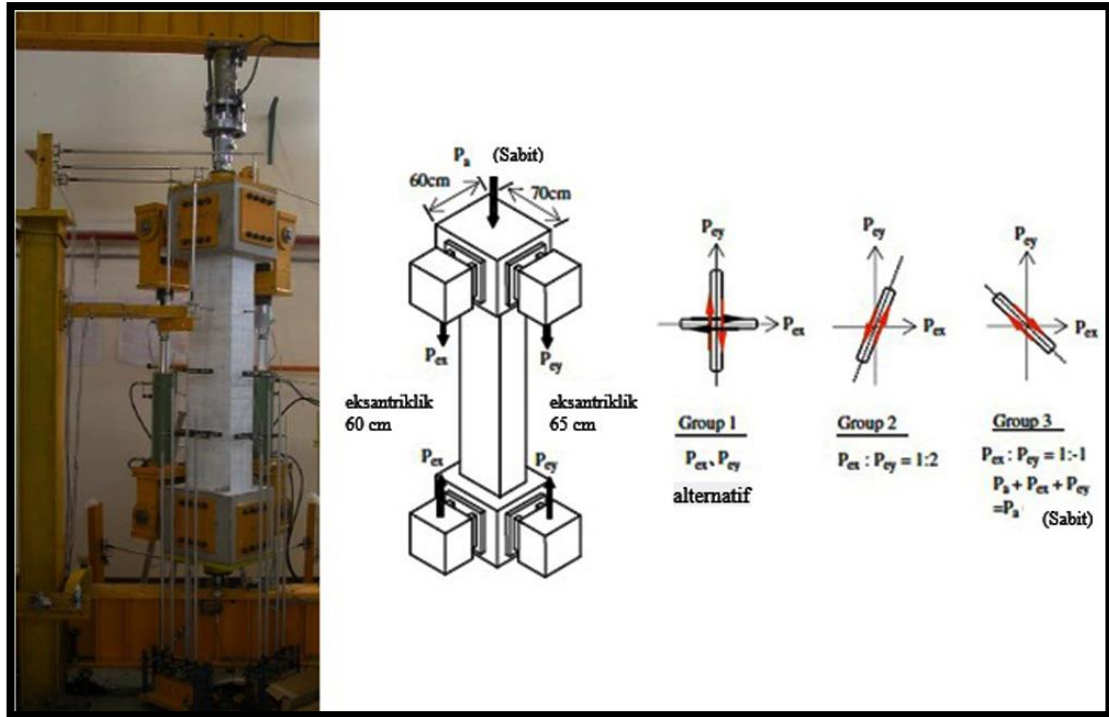


Şekil 1.46. Betonarme kolonun farklı derinliklerindeki sıcaklık dağılımının karşılaştırması (Wu, Hong vd., 2007)

Yih-Houng Chen vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, betonarme kolonların yangın süresi ve yangın sonrası davranışları üzerinde deneysel bir araştırma yapılmıştır. Burada, iki ve dört saatlik ISO 834 standart yangın eğrisine maruz kalan tek ve çift eksenli eğilme ile birlikte eksenel yüklü betonarme kolon numuneler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.47’de kolon numunelerin kesiti ve boyutları ve Şekil 1.48’de ise deney senaryosunun şeması gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçlarına göre, betonarme numunenin merkezindeki maksimum sıcaklık, çoğu zaman soğutma yapılırken gözükmemektedir. Yüksek sıcaklık uygulama süresi arttıkça, yük taşıma kapasitesi azalmış ve bu azalma 2 ve 4 saatlik sıcaklık için sırasıyla %27 ve %38 olarak görülmüştür.



Şekil 1.47. Betonarme kolon numunelerin (a) boyutları ve (b) enkesiti (Yih-Houng Chen vd., 2009)



Şekil 1.48. Deney şeması (Yih-Houng Chen vd., 2009)

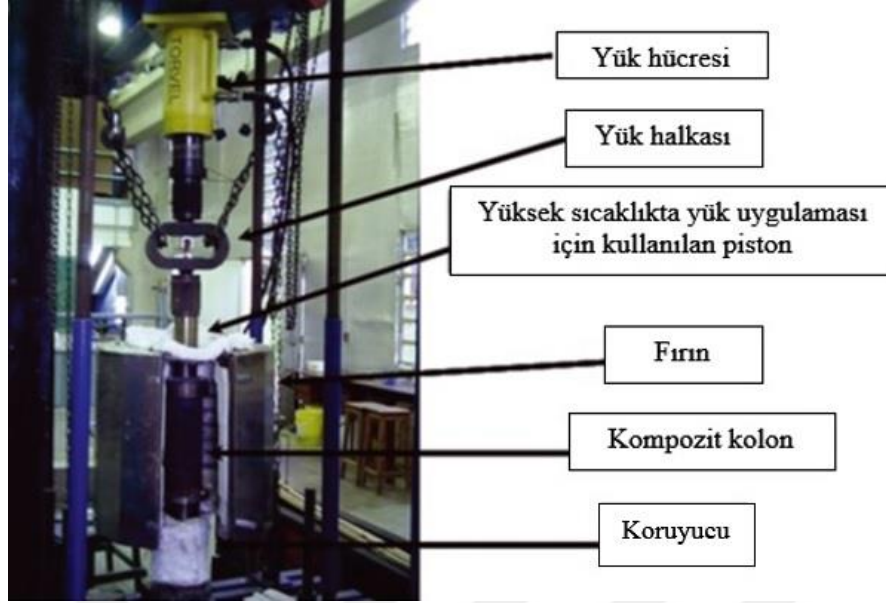
Yih-Houng Chen vd. (2009) tarafından gerçekleştirilen deneyler için üretilen çok amaçlı ve büyük ölçekli fırın Şekil 1.49'da görülmektedir.



Şekil 1.49. Yih-Houng Chen vd., (2009) tarafından kullanılan fırın

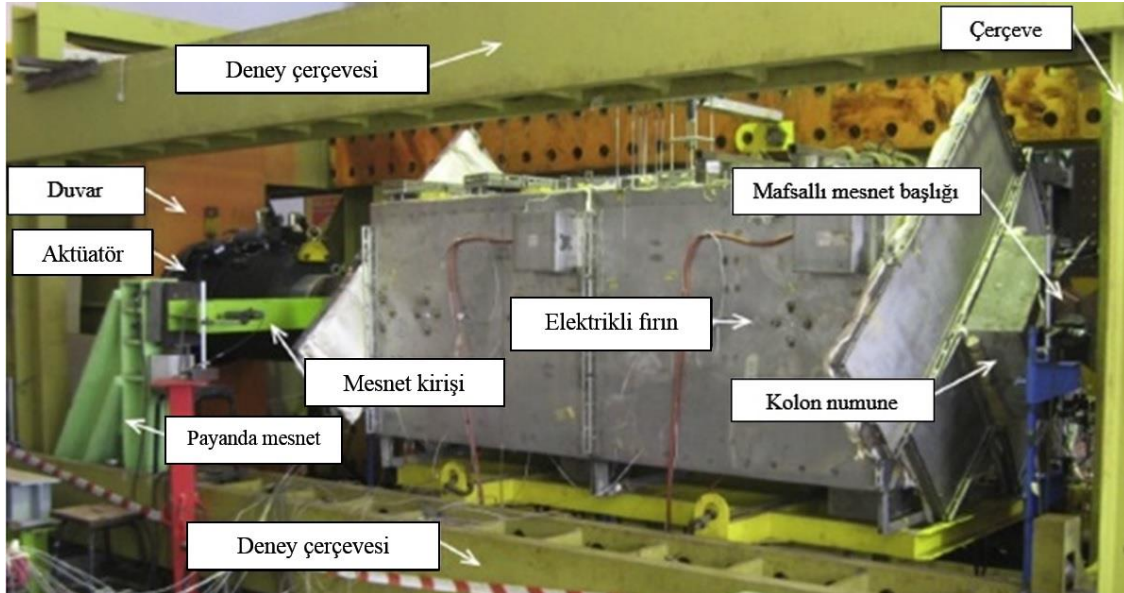
Jacintho vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış kısa kolonların aksenal yüklü ve yüksüz olarak 30 ve 60 dakikadaki sıcaklık dağılımları ile ilgili bir karşılaştırma yapılmıştır.

Şekil 1.50'de ISO 834 standart yangın eğrisine uygun olarak yüksek sıcaklık-yük uygulamasını yapan sistem gösterilmiştir. Sonuçlara göre 30 dakikalık bir sıcaklığın dayanım azalmalarında çok etkili olmadığı ve sadece kolon numunelerin 60 dakika ısıtılıp merkez sıcaklığının 300°C-400°C'ye eriştiğinde dayanımda azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca kolon numunelerin yüklü ve yüksüz olması onların yük taşıma kapasitelerinin çok farklı olmadığını ortaya koymuştur.



Şekil 1.50. Yüksek sıcaklık-yük uygulamasını yapan sistem (Jacintho vd., 2012)

Tan ve Nguyen (2013) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mesnet şartları, yüksek sıcaklıkların beton dayanımı ve betonarme kolonların eksantrik yükleme altındaki yapısal davranışları incelenmiştir (Şekil 1.51).



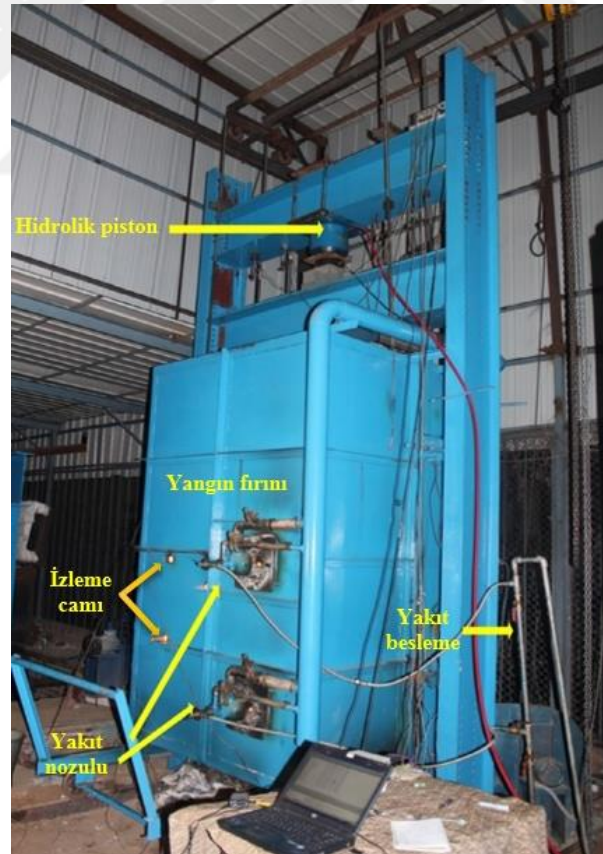
Şekil 1.51. Deneysel sistemin görünümü (Tan ve Nguyen, 2013)

Çalışmanın sonuçlarına göre, ısıtılmış kolonların yanal eğilmesi, iki doğrultudaki eksantrisitelerle orantılıdır. Ayrıca, ısıl kaynaklı mesnet kuvvetleri, mesnetleme oranı ve

beton dayanımı ile artmış olup, betonun ihmal edilen kabuk atma olayı sayısal analizler yardımıyla tahmin edilmiştir.

Bamonte ve Monte (2015) tarafından yapılan teorik çalışmada, yangına maruz betonarme kolonlar üzerinde, bir alt program geliştirilip, analiz sonuçlarının deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca bu çalışmada geçici sünme şekildeğişirmesinin analizde göz önünde bulundurulması gerektiğini vurgulamışlar.

Shah ve Sharma (2017) tarafından yapılan çalışmada, yüksek sıcaklığa maruz betonarme kolon davranışını elde etmek için deneysel bir model önerilmiştir. Önerilen modelin, beton dayanımı, enine ve boyuna donatı miktarı ve kolonların yük düzeyi gibi bazı önemli parametreler dikkate alınarak, yangın dayanımının tahmininde çok kullanışlı olduğu belirtilmiştir. Şekil 1.52’de, söz konusu deney düzeneği gösterilmiştir. Deney sonuçları, betonarme kolonlarda etriye sıkılaştırmanın yangın dayanımı üzerinde önemli bir rol oynadığını ve kabuk atma olayının azaltılabileceğini göstermektedir.



Şekil 1.52. Deney düzeneği (Shah ve Sharma, 2017)

1.10. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Son zamanlarda, kentleşmenin muazam büyümesi, inşaat sürecini yoğunlaştırmış ve bu durum, özellikle çok katlı binaların da artmasına neden olmuştur. Binaların hızla artışının beraberinde getirdiği önemli sorunlardan biri de, yangın olayıdır. Yangın sırasında taşıyıcı sistem elemanlarının yük taşıma kapasiteleri azalır ve sonuçta yapı çökebilir. Bu nedenle, yangın sonucu bina hasarlarını azaltmanın ilk adımı, taşıyıcı yapı elemanlarının ısı artışına karşı davranışlarının incelemesidir. Betonarme bir yapıda kolonların ana düşey taşıyıcı elemanlar olması nedeniyle, bu elemanların yangın ve diğer nedenlerle ortaya çıkan yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi, ya da kısaca yangın dayanımı, betonarme yapıların tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli konulardan biridir.

Bu nedenle bu çalışmanın temel amacı, betonarme kolonların yüksek sıcaklık sırasında ve sonrasındaki davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesidir. Bu çalışma ile yangın vb. nedenlerden dolayı ortaya çıkan yüksek sıcaklığa maruz kalan kare kesitli betonarme kolonların aksenal yük altındaki davranışları, farklı ısıtma ve soğutma senaryoları uygulanmak suretiyle, deneysel ve sayısal olarak belirlenmeye çalışılmıştır.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi amacıyla bu tez kapsamında yapılan çalışmalar başlıca iki kısma ayrılmaktadır. Birinci kısımda KTÜ Yapı ve Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. İkinci kısımda ise, gerçekleştirilen deneylerin sayısal modellenmesi yapılarak elde edilen sonlu eleman çözümleri verilmektedir.

2.1. Deneysel Çalışmalar

2.1.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

a. Beton Özellikleri

Bu çalışmada mevcut yapı stoğunda önemli bir yüzdeyi oluşturduğu düşünülen kalitesiz betonları temsil etmesi amacıyla düşük dayanımlı betonlar (CL) ve normal dayanımlı betonların (CN) kullanıldığı iki farklı beton dayanım sınıfına sahip betonarme kolon numuneler üretilmiştir. Bu çalışmada düşük dayanımlı beton laboratuvarında üretilmiş, normal dayanımlı beton ise piyasadan hazır beton olarak temin edilmiştir. Üretilen betonların bileşimleri Tablo 2.1’de, bu betonlardan alınan 150 mm’lik küp numuneler üzerinde gerçekleştirilen eksenel basınç deney sonuçları ise Tablo 2.2’de verilmiştir.

Tablo 2.1. Beton bileşimleri

Beton tipi	D_{max} , mm	S/Ç Oranı	Çimento tipi	Çimento miktarı, kg/m^3	Toplam su miktarı, kg/m^3	Toplam agrega miktarı, kg/m^3
CL	22.4	0.80	CEM-IV (32.5)	280	249	1766
CN	22.4	0.48	CEM-I (42.5)	290	160	1985

Tablo 2.2. Betonların eksenel basınç dayanım değerleri

Beton tipi	Numunelerin küp basınç dayanımları (MPa)			
	28 günlük ortalama basınç dayanımı	Standart sapma (MPa)	28 günlük karakteristik basınç dayanımı	Deney esnasında (180 günlük) ortalama basınç dayanımı
CL	13.74	1.05	12.19	14.21
CN	41.38	2.23	38.08	48.61

b. Donatı Özellikleri

Betonarme kolon numunelerde kullanılan nervürlü çelik donatılar üzerinde yapı ve malzeme laboratuvarında mevcut 600 kN kapasiteli üniversal deney aletinde gerçekleştirilen çekme deneylerinden belirlenen ortalama mekanik özellikleri aşağıdaki Tablo 2.3'te verilmektedir (Şekil 2.1).

Tablo 2.3. Kullanılan donatıların mekanik özellikleri

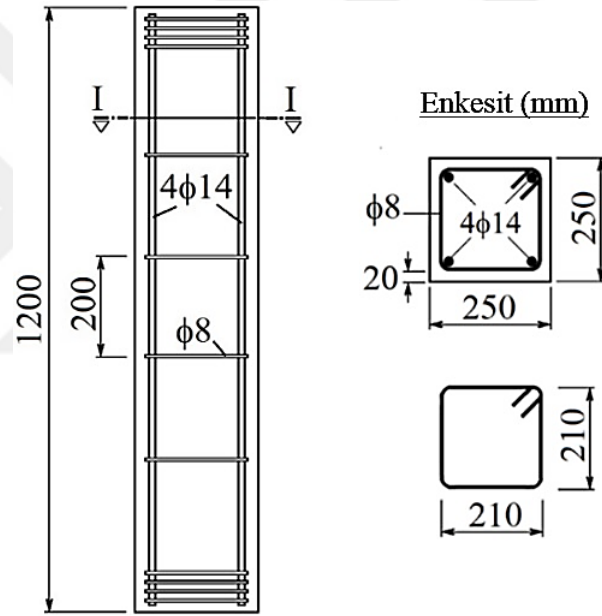
Donatı çapı (ϕ), mm	Akma dayanımı (R_e), N/mm ²	Çekme dayanımı (R_m), N/mm ²	R_m / R_e	Kopma uzaması, %
8	487	640	1.31	28.2
14	493	602	1.22	22.4



Şekil 2.1. Üniversal deney aleti

c. Betonarme Kolon Deney Numunelerinin Özellikleri

Betonarme kolon deney numunelerinde boyuna ve enine donatı olarak sırasıyla $\phi 14$ ve $\phi 8$ 'lik nervürlü donatılar kullanılmıştır. Numunelerde, boyuna donatı oranı %1.0 olacak şekilde, 4 adet 14 mm çapında donatı kullanılmıştır. Enine donatı çubuklarının aralığı 200 mm olarak seçilmiştir. Net beton örtüsü (paspayı) kalınlığı 20 mm alınmıştır. Numunelerin uç bölgelerinde deney sırasında oluşabilecek istenmeyen hasarları önlemek için, bu bölgelerde etriye sıklaştırması yapılmıştır. Kolon numunelerin boyutları ve enkesit detayları şematik olarak Şekil 2.2'de, kolon donatılarının hazırlanmış halleri ise Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Betonarme kolon numunelerinin boyutları ve enkesit detayları



Şekil 2.3. Hazırlanan donatıların görünümü

2.1.2. Numune Kalıplarının Özellikleri

Betonarme numune kalıpları enkesitleri 250 mm × 250 mm ve yükseklikleri 1200 mm olacak şekilde, plywood levhalar kullanılarak hazırlanmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Plywood levhalarından yapılan kolon kalıpları

2.1.3. Betonların Yerleştirilmesi ve Numunelerin Kürü

Üretilen betonlar, kolon numune kalıplarına dökülürken, beraberinde küp numuneleri de betonlanmıştır. Donatıların beton dökümü öncesi kalıplara yerleştirilmiş hali Şekil 2.5'te, kalıpların beton yerleştirme işleminden sonraki durumları ise Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Donatıların kalıp içine yerleştirilmiş hali



Şekil 2.6. Beton döküm sonrasında bir görünüm

Betonarme kolon numunelerin beton dayanımını belirlemek amacıyla her üretimden alınan 8 adet standart 150 mm'lik küp numuneler, ortam sıcaklığı $16^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, olan ve bu koşulları sürekli denetim altında tutulan kür odasında 24 saat bekletildikten sonra kalıplardan çıkartılıp su sıcaklığı $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ olan kür havuzuna yerleştirilmiştir. Küp numunelerin dördü 28 günlükken aksenal basınç deneyine tabi tutulmuştur. Küp numunelerin diğer dört adedi ise betonarme kolon numunelerin maruz kaldığı ortam koşullarına uyması amacıyla bu numunelerle birlikte laboratuvar ortamında (dışarıda) kürlenmiş ve kolon numuneler üzerindeki yüksek sıcaklık deneyleri yapılırken basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney esnasında küp numuneler yaklaşık 6 aylıktı (180 gün). Yanlarına küp numuneleri de yerleştirilen betonarme kolon numuneler, kalıplarından çıkarılmadan, ilk 15 gün boyunca üzerleri ıslak çuvallar ve naylon branda ile örtülmüş, bu süre boyunca numunelerin sürekli ıslak tutulması sağlanmıştır. Küp numunelerin standart kür havuzunda ve kolon numunelerin laboratuvar ortamında ıslak çuvallar altındaki görünüşleri Şekil 2.7'de verilmektedir. Kürlerini tamamlayan ve kalıplarından çıkarılan betonarme kolon numuneler ise Şekil 2.8'de görülmektedir.



Şekil 2.7. Küp ve kolon numunelerin kürlenmesi



Şekil 2.8. Betonarme kolon deney numuneleri

2.2. Betonarme Kolon Numuneler Üzerinde Yüksek Sıcaklık Deneyleri

Betonarme kolon numuneler üzerindeki yüksek sıcaklık deneylerinin aşağıda açıklanan iki ana grup altında gerçekleştirilmesi planlanmıştır.

Birincisi, betonarme kolonların sabit eksenel yük etkisi altında belli süreler boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasıdır. Bu grup deneylerde betonarme kolon numuneler, ISO 834 (1999)'te tanımlanan standart yangın eğrisi izlenerek, belli süreler boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış ve daha sonra numunelerin kendiliğinden ya da suyla müdahale ile soğutulduğu senaryolar uygulanmıştır (Tablo 2.4). Su ile soğutma senaryosunun gerçek yangında itfaiyenin yaptığı su püskürtme işleminin aynısı olduğu söylenebilir.

İkinci grup deneylerde ise, betonarme kolonlar, dayanım kaybı meydana gelinceye kadar, sabit eksenel yük etkisi altında ve ISO 834'te tanımlanan standart yangın eğrisi

izlenerek, yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bu senaryo ile yangına uzun süre müdahale edilememesi durumunda kullanım yükleri altındaki kolonların yangın başlangıcından göçmeye kadar geçen süredeki davranışının belirlenmesi hedeflenmiştir (Tablo 2.5).

Düşük ve normal dayanımlı deney elemanlarının adlandırması için sırasıyla CL ve CN kullanılmıştır. Ayrıca numune soğutma türlerine bağlı olarak suyla soğutma için W ve kendiliğinden (havada) soğutma için A harfi kullanılmıştır.

Tablo 2.4. Sabit eksenel yük etkisi altında belli süreler boyunca yüksek sıcaklığa maruz betonarme kolon numunelerin deney senaryoları

Numune	Beton tipi	Isıtma ve soğutma süresince uygulanan eksenel yük düzeyi	Isıtma	Soğutma
CL-R	CL	$0.40 f_{CL-R}^*$	Soğuk Referans	-
CL-R			Soğuk Referans	-
CL-R			Soğuk Referans	-
CL-30-W			30 dk ısıtma	Suyla soğutma
CL-30-A			30 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma
CL-60-W			60 dk ısıtma	Suyla soğutma
CL-60-A			60 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma
CN-R	CN	$0.40 f_{CN-R}^*$	Soğuk Referans	-
CN-R			Soğuk Referans	-
CN-R			Soğuk Referans	-
CN-60-W			60 dk ısıtma	Suyla soğutma
CN-60-A			60 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma
CN-120-W			120 dk ısıtma	Suyla soğutma
CN-120-A			120 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma

* : Referans kolon numunelerin ortalama basınç dayanımları

Tablo 2.5. Sabit eksenel yük etkisi altında dayanım kaybı yaşanıncaya kadar yüksek sıcaklığa maruz betonarme kolon deneyleri

Numune	Beton tipi	Isıtma ve soğutma süresince eksenel yük düzeyi	Isıtma	Soğutma
CL-Cont.	CL	$0.40 f_{CL-R}^*$	Artan Sıcaklık	Yok
CN-Cont.	CN	$0.40 f_{CN-R}^*$		

* : Referans kolon numunelerin ortalama basınç dayanımları

2.3. Yüksek Sıcaklık Deney Düzeneği

Eksenel yüklü betonarme kolon numuneler üzerinde yüksek sıcaklık deneylerinin gerçekleştirilmesinde KTÜ Yapı ve Malzeme laboratuvarında mevcut 6000 kN eksenel yüklemeye kapasitesine sahip hidrolik rijit yüklemeye çerçevesi ve bu çerçevenin içine yerleştirilen elektrikli yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Bu sayede, betonarme kolon numuneler üzerine aynı anda eksenel yüklemenin ve yüksek sıcaklığın uygulanabilmesi mümkün olmuştur. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2.9'da verilmektedir.



Şekil 2.9. Deney düzeneğinin görüntüsü

2.3.1. Elektrikli Fırın

KTÜ Yapı ve Malzeme Laboratuvarında mevcut yüksek sıcaklık elektrikli fırın, kolon numune üzerinde aksel yüklemeye mevcutken numuneyi çevreleyip ısıtmaya başlaması ve ısıtma işlemi bitince soğutma aşamasına geçebilmek için numuneden uzaklaştırılabilmesini sağlayan birbirinden bağımsız elektrik sistemine sahip özdeş iki yarım üniteden oluşmaktadır. Fırın üniteleri numuneye yaklaşip uzaklaşabilmek için raylar üzerinde hareket etmektedir. Her bir ünitenin dış boyutları 1100 mm × 850 mm × 850 mm, iç boyutları ise 800 mm × 450 mm × 700 mm'dir. Bu fırının numuneden uzaktaki hali ve boyutları Şekil 2.10'da gösterilmektedir.



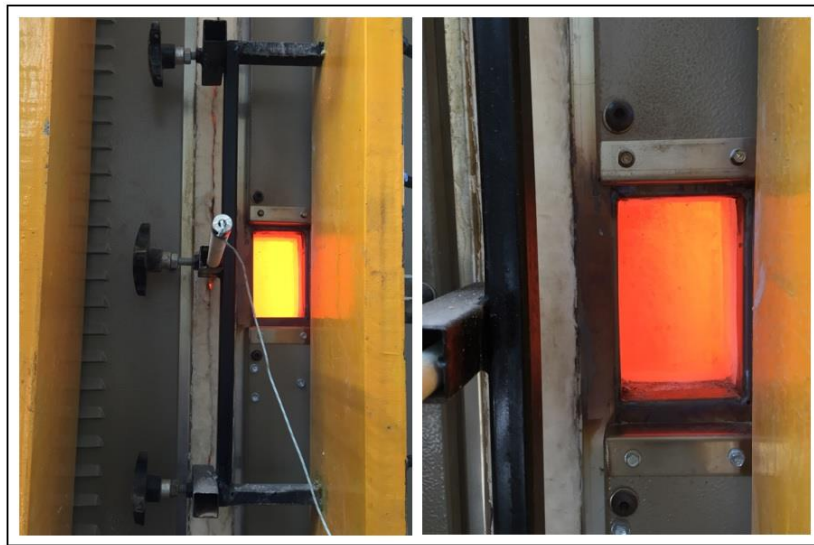
Şekil 2.10. Elektrikli fırının numuneden uzaktaki hali ve boyutları

Elektrikli fırının numuneye yaklaştırılıp ısıtma işleminin başlatıldığı haldeki bazı görünüşleri Şekil 2.11'de görülmektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi deney esnasında ölçüm sisteminin hasar görmemesi ve doğru ölçüm almak amacıyla fırının üst kısmında seramik izolasyon levhası mevcuttur. Ayrıca Şekil 2.12'de görüldüğü gibi deney esnasında

fırının içini ve kolonların kabuk atma durumunu gözlemek amacıyla 14 cm × 7 cm boyutlarına sahip ve yaklaşık 1600°C yüksek sıcaklığa dayanıklı özel kuvars izleme camı kullanılmıştır.



Şekil 2.11. Elektrikli fırının ısıtma işlemi sırasındaki hali



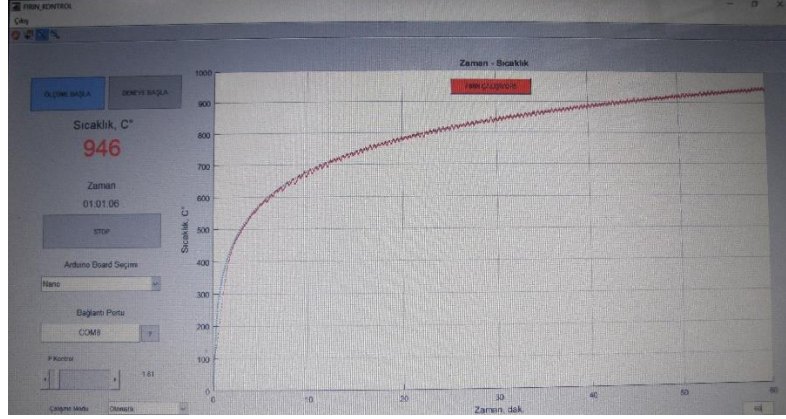
Şekil 2.12. Fırının izleme penceresi

2.3.2. Kontrol Düzenegi

Elektrikli fırın, ISO 834 standart yangın eğrisini otomatik olarak izlemesine imkan veren bilgisayar destekli bir ünite tarafından kontrol edilmektedir. MATLAB yazılımı ile programlanan “Arduino Nano” devre kartı içeren bu kontrol ünitesi USB portu ile bilgisayara bağlanabilmekte, uygulanan ısıtma ve soğutma rejimi görsel olarak da ekrandan izlenebilmektedir. Fırın ile Arduino devre kartının iletişimi, diğer bir deyişle fırın sıcaklığının anlık olarak ölçülmesi için K tipi termokupl kullanılmıştır. Fırın sıcaklığı deney boyunca otomatik olarak ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Fırının ısıtma sırasında sistemden çektiği yüksek akımın güvenle kapatılıp açılabilmesi için de elektrik sisteminde SSR (Solid-State-Relay) olarak bilinen ve Arduino tarafından kontrol edilen özel bir elektronik anahtar mevcuttur (Şekil 2.13). Anlık ölçülen fırın sıcaklığı, olması gereken değerin altında ise yazılım SSR aracılığı ile fırına elektrik vermekte, fırın sıcaklığı olması gerekenin üstünde ise bu sefer fırın enerjisi kesilmektedir. Böylelikle fırının iç sıcaklığı ISO 834’te verilen zamana bağlı sıcaklık eğrisine uygun şekilde ayarlanabilmektedir. Kullanılan fırın kontrol yazılımının arayüzünün bir deney sırasındaki ekran görüntüsü Şekil 2.14’te verilmiştir.

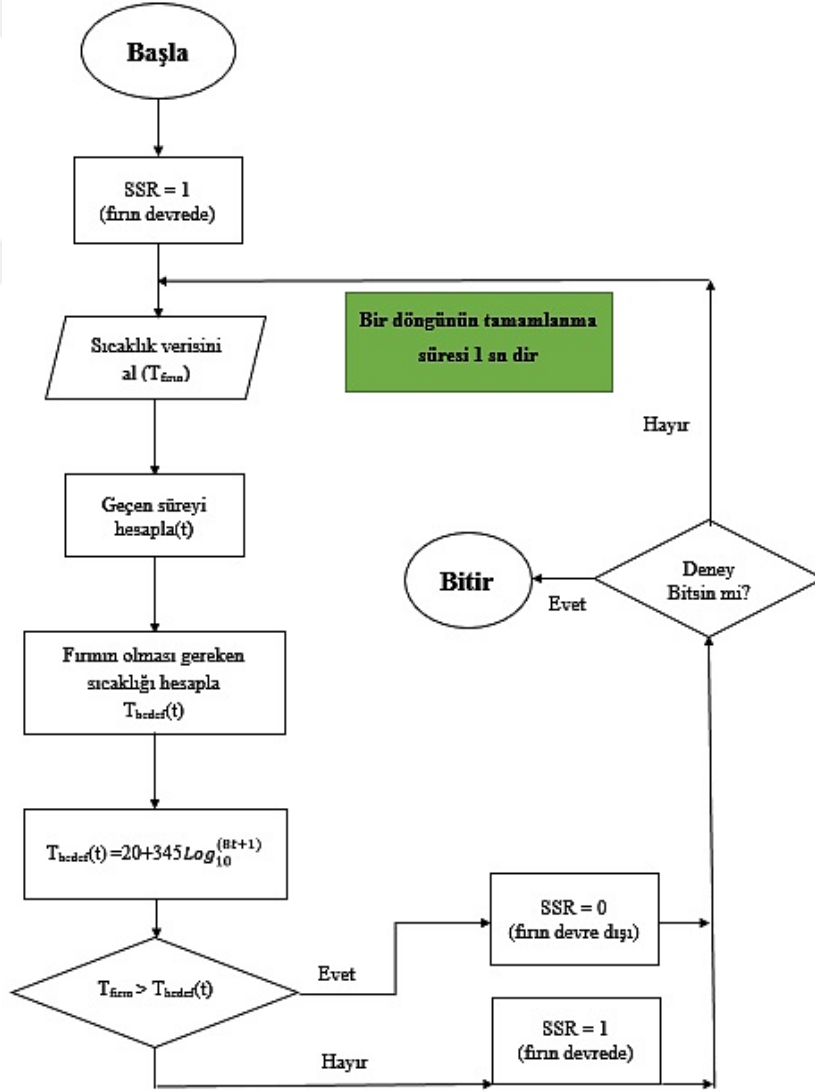


Şekil 2.13. Fırının kontrol düzenegi



Şekil 2.14. Fırın kontrol yazılımının arayüzünün bir deney sırasındaki ekran görüntüsü

Fırın kontrol yazılımının akış diyagramı ise Şekil 2.15'te verilmektedir.



Şekil 2.15. Fırın Kontrol düzeneğinin akış diyagramı

2.3.2.1. Fırın Sıcaklığının Ölçümü

Fırın sıcaklığının ölçülmesinde 1200°C kapasitesinde ‘K tipi’ termokupl kullanılmıştır (Şekil 2.16). Bu termokupl Şekil 2.17’de gösterildiği gibi, kolon numune yüksekliğinin ortasında ve numuneye yaklaşık 50 mm uzakta sabitlenerek fırın içi ortam sıcaklığı saniyede bir olacak şekilde (1.0 Hz) deney boyunca sistem tarafından otomatik olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.16. K tipi termokupl

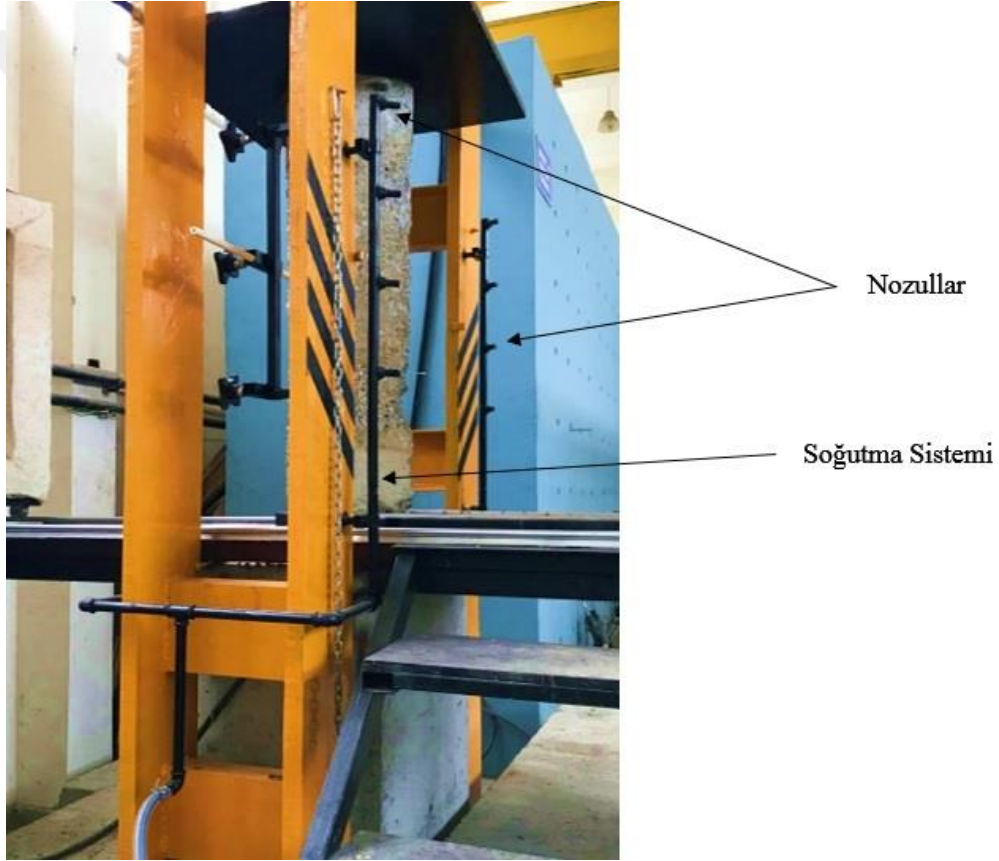


Şekil 2.17. Termokuplun yerleştirilmiş görüntüleri

2.3.2.2. Su İle Soğutma Sistemi

Yüksek sıcaklık uygulamasından sonra deney numunelerinin soğutulması işleminin su ile soğutma senaryosu için yükleme çerçevesine bağlı ve fırın ünitelerinden bağımsız, ayrı soğutma sistemi kullanılmıştır (Şekil 2.18).

Yüksek sıcaklık uygulaması sonrasında fırın ünitelerinin birbirinden uzaklaştırılarak betonarme kolon numunelerin dört yüzeyine aynı anda boru sistemindeki nozullar vasıtasıyla su püskürtülmüş ve böylece numuneler soğutulmuştur. Su ile soğutma aşamasına ait bazı görüntüler Şekil 2.19’da gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Su ile soğutma sistemi

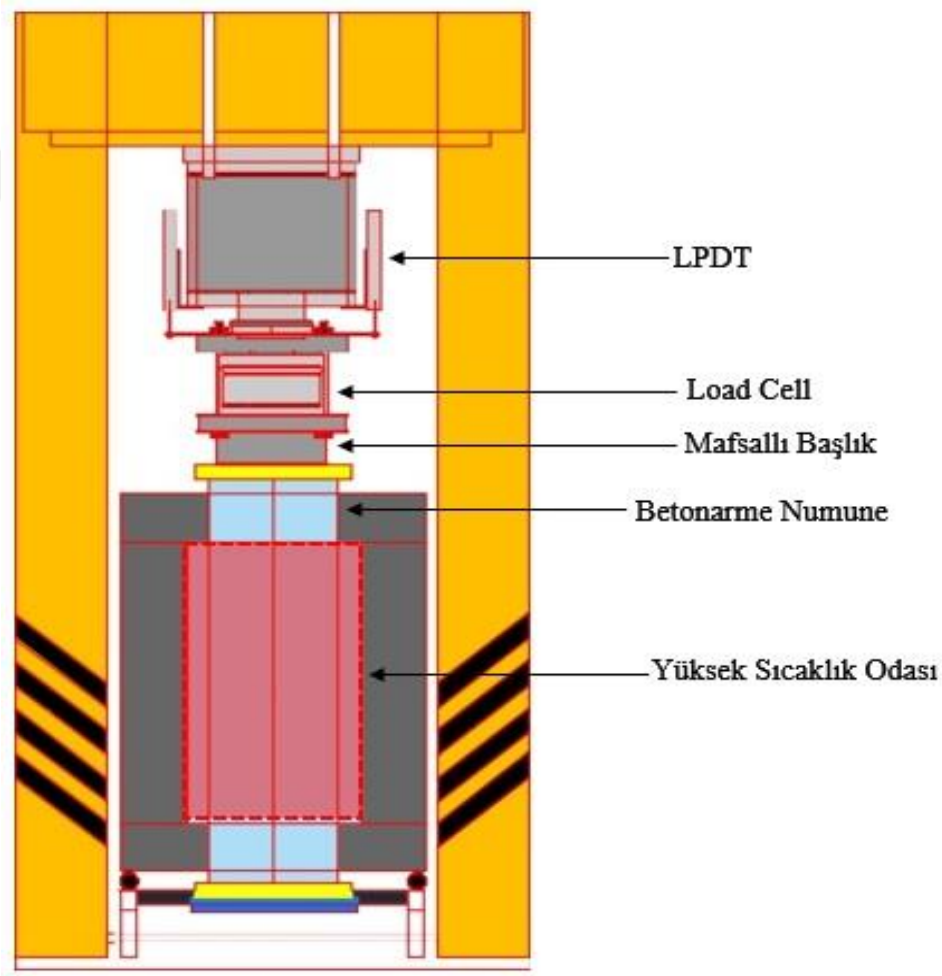
Numunelerin soğuma işlemi merkez ve yüzey sıcaklıkları yaklaşık olarak aynı değere ulaşmaya kadar devam ettirilmiştir. Soğutma işlemi, bu sıcaklık hem kendiliğinden, hem de su ile soğutma senaryoları için, 30 ve 60 dakika ısıtılan kolonlarda yaklaşık 100°C ve 120 dakika ısıtılan kolonlarda ise yaklaşık 150°C’ye düşünceye kadar uygulanmıştır.



Şekil 2.19. Su ile soğutma işlemine ait bazı görüntüler

2.4. Yükleme ve Yerdeğiştirme Ölçüm Düzenegi

Numuneler üzerine 6000 kN kapasiteli hidrolik yükleme çerçevesi aracılığı ile aksel yüklemeye uygulanmıştır. Numunelerdeki düşey yerdeğiştirme değerleri de fırın dışından, doğrudan piston çıkışına bağlanan iki adet doğrusal potansiyometrik yerdeğiştirme ölçer (LPDT) yardımıyla okunmuştur. Deney sisteminin bu kısmını, şematik olarak aşağıdaki Şekil 2.20’de, kullanılan LPDT ise Şekil 2.21’de verilmektedir.



Şekil 2.20. Numunelerin yükleme ve ölçüm sistemi



Şekil 2.21. Yerdeğiştirme ölçer (LPDT)

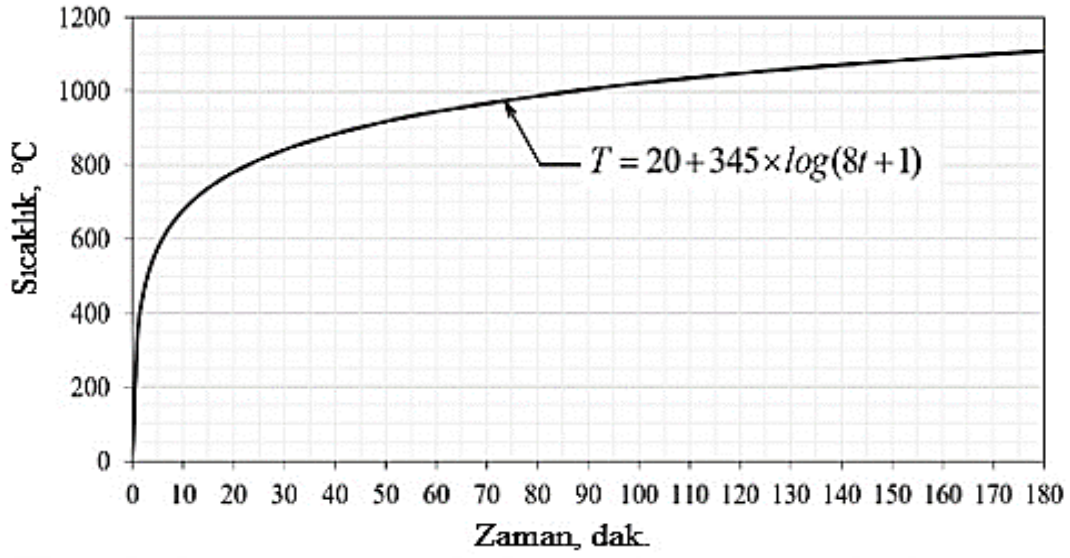
Yük ve yerdeğiştirme verilerin toplanmasında TDG markalı CODA-Ai8b model veri toplama ünitesi (data-logger) kullanılmıştır. Saniyede 16 veri kayıt edebilme özelliği ve 16 kanal girişi bulunan veri toplama ünitesi şekil 2.22’de gösterilmiştir.



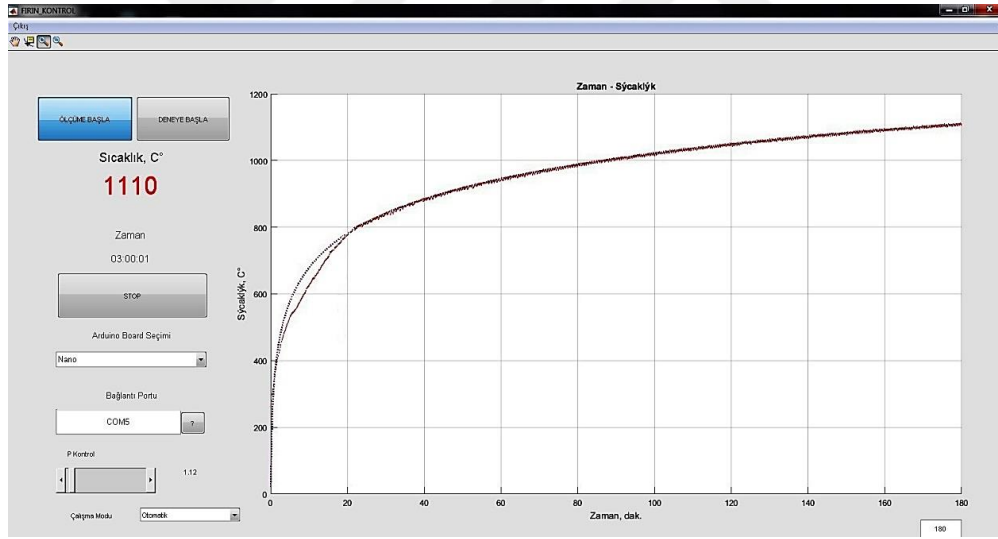
şekil 2.22. Veri toplama ünitesi (Data-logger)

2.5. Yüksek Sıcaklık Deneylerinin Gerçekleştirilmesi

Yükleme çerçevesindeki yerine özenle ve dik olacak şekilde yerleştirilen betonarme deney kolonları yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce bu kolonlar üzerine Tablo 2.4’te verilen şekilde, soğuk referans kolonlardan elde edilen ortalama eksenel basınç dayanımı değerinin %40’ına karşılık gelen sabit eksenel yüklemeye uygulanmıştır. Bu değer TBDY-2018’de kolonlar için izin verilen en büyük eksenel yük değerini olarak sečilmiřtir. Eksenel yük uygulaması yapıldıktan sonra bu yükün deney boyunca sabit kalması için hidrolik sistem kilitlenmifitir. Daha sonra fırının özdeş üniteleri numuneye yaklaştırılmadan ön ısıtma başlatılmıştır. Fırın rezistansları tam kızgınlığa ulaşınca üniteler numuneye yaklaştırılıp kilitlenmifitir ve ISO 834 eğrisinin izlenmesi için otomatik ısıtma programı başlatılmıştır. Deney elemanlarına uygulanan ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi şekil 2.23’te, planlanan ısıtma süreleri boyunca ısıtmaya tabi tutulan ve yaklaşık 3 saatlik ısıtma gerçekleştirilen bir deneyde kontrol ekranının görüntüsü ise şekil 2.24’te gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Deney elemanlarına uygulanan ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi



Şekil 2.24. Fırın iç sıcaklığının ISO 834 eğrisini izlemesi

Deneylerde ısıtma aşamasının ardından kendiliğinden ya da su ile soğutma aşamasına geçilmiştir. Bu sırada da aksel yük kolon üzerinde sabit olarak etkimeye devam etmektedir. Numunelerdeki iç-dış sıcaklık değerleri belli bir dengelenmeyi yakaladığında kolonun artık soğuduğu kabul edilerek üçüncü ve son aşama olan kırma aşamasına geçilmiştir. Bunun için mevcut aksel yük (kolon üst ucuna verilen yerdeğiştirme) yavaşça artırılmış ve numune kırılıncaya işleme devam edilmiştir. Deneylere ait bazı görüntüler Şekil 2.25'te verilmektedir.



Şekil 2.25. Deneylere ait bazı görüntüler

2.6. Sayısal Çalışmalar

Sayısal yöntemlerin geliştirilmesi, deneysel çalışmalarda kullanılması düşünülen deney elemanlarının davranışları hakkında ön bilgi vermesi ve doğrulama çalışmalarının gerçekleştirilmesi açısından önemlidir. Ayrıca tasarımcı tarafından deneysel çalışmalardan elde edilen veriler yardımıyla meselelerdeki farklı eleman boyutları, farklı malzemeler ve/veya sınır koşulları için çözümlene imkanı sağlanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında incelenen 16 adet eksenel yüklü betonarme kolonun yüksek sıcaklık etkisi altında davranışları sayısal olarak, sonlu elemanlar yöntemi yardımıyla incelenmiştir. Sonlu eleman analizlerin çözümlenmesinde ABAQUS/CAE 2017 yazılımı kullanılmıştır.

2.6.1. Malzeme Modellerinin Özellikleri

Sayısal çalışmada gerçeğe yakın sonuçlar elde edebilmek için, malzeme modelinin doğru seçilmesi önemlidir. ABAQUS programında malzeme parametrelerinin idealleştirilmesi için birçok farklı model mevcuttur. Analizlerde kullanılacak beton malzeme modeli için “Drucker-Prager” (DP) beton malzeme modeli parametreleri deneysel ve Eurocode-4 yönetmeliğindeki verilere bağlı olarak belirlenmiştir. DP malzeme modeli, betonun eksenel basınç ve çekme etkisi altındaki davranışını esas almaktadır. Yapılan modellemede malzemenin basınç ve çekme etkisi altındaki davranışı, standart numune deneylerinden elde edilen davranış eğrisine bağlı olarak tanımlanmıştır (EN 1994-1-2, 2005).

2.6.1.1. Beton Modeli

Çalışma kapsamında gerçekleştirilecek olan analizlerde deney numunelerinin sayısal olarak modellenmesi için standart numune deneylerinden elde edilen beton dayanımı esas alınarak malzeme parametreleri belirlenmiştir. Deney numunelerinde kullanılan betonun yüksek sıcaklık deneyleri sırasında ortalama küp basınç dayanımları düşük ve normal dayanımlı betonlar için sırasıyla 14.21 MPa ve 48.61 MPa olarak belirlenmiştir. Bu değerler sonlu eleman analizindeki malzeme modeline, 1.25 katsayısına bölünmek suretiyle, silindir dayanımına çevrilerek sırasıyla, 11.37 MPa ve 38.89 MPa olarak girilmiştir. CL ve CN beton için Drucker-Prager parametreleri olarak sürtünme açısı $\beta=25^\circ$ ve dilatasyon açısı $\psi=15^\circ$

olarak seçilmiştir (Abaqus analysis user's guide, 2016). Ayrıca, aşağıdaki Tablo 2.6'da CL ve CN betonun Drucker-Prager modeli için sıcaklığa bağlı olarak betonun çekme dayanımları verilmektedir. Bu tablolardaki betonun çekme dayanımı, basınç dayanımına bağlı olarak aşağıda yazılan (2.1) nolu denklem yardımıyla bulunmuştur (Du Beton, F.I., 1990). Bu denklemde f_{ctm} ve f_{cm} sırasıyla betonun çekme ve basınç dayanımlarını göstermektedirler.

$$f_{ctm} = 2.12 \times \ln(1 + f_{cm}/10) \quad (2.1)$$

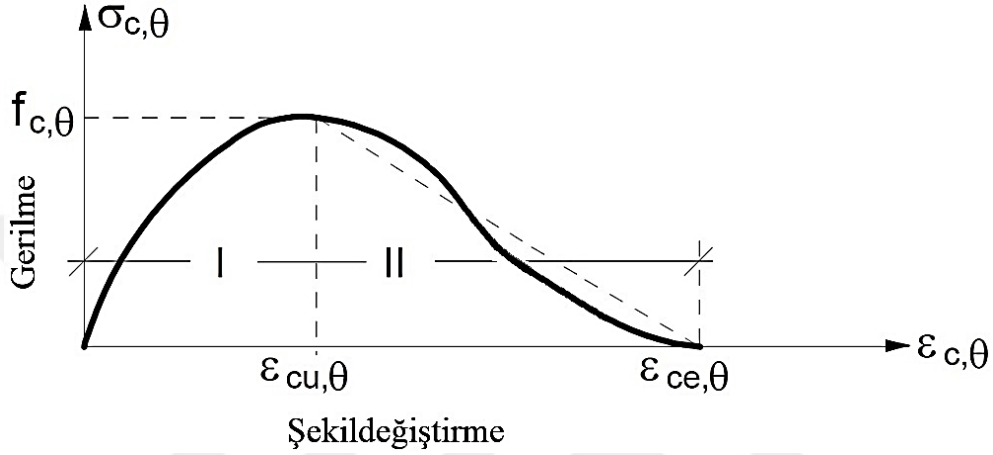
Tablo 2.6. CL ve CN betonlarının Drucker-Prager modeli için sıcaklığa bağlı olarak hesaplanan çekme dayanımları

Sıcaklık, °C	CL betonun çekme dayanımı (f_{ctm}), N/m ²	CN betonun çekme dayanımı (f_{ctm}), N/m ²
20	1609934.3	3364414.1
100	1609934.3	3364414.1
200	1552772.8	3278372.8
300	1433607.4	3095047.6
400	1307342.6	2894355.9
500	1102617.2	2552464.7
600	875987.8	2144632.5
700	622199.2	1639195.2
800	333844.3	974230.9
900	184563.1	574269.3
1000	94289.4	306520.4
1100	23968.4	80884.0

Beton malzemesinin farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme değerleri kalker kökenli agregalar için EN 1994-1-2, 2005'te önerilen yöntem yardımıyla hesaplanmıştır. Bu modelde yükselen kol için ($\epsilon \leq \epsilon_{cu,\theta}$), aşağıdaki (2.2) nolu denklem kullanılmıştır (EN 1992-1-2, 2004);

$$\sigma_{c,\theta} = \frac{3 \epsilon_{c,\theta} \times f_{c,\theta}}{\epsilon_{cu,\theta} \left(2 + \left(\frac{\epsilon_{c,\theta}}{\epsilon_{cu,\theta}} \right)^3 \right)} \quad (2.2)$$

Burada $f_{c,\theta}$ betonun basınç dayanımını, $\varepsilon_{cu,\theta}$ bu dayanıma karşılık gelen şekildeğiştirmeyi, $\varepsilon_{c,\theta}$ ilgili sıcaklığa ait olan şekildeğiştirmeyi ve $\sigma_{c,\theta}$ aynı sıcaklıktaki gerilmeyi göstermektedir (EN 1992-1-2, 2004). Analizlerdeki sayısal dengesizliği önlemek için modellemede diyagramın alçalan kolu ($\varepsilon_{cu,\theta} < \varepsilon \leq \varepsilon_{ce,\theta}$), doğrusal kabul edilmiştir. Diyagram aşağıdaki Şekil 2.26’da görülmektedir.



Şekil 2.26. Betonun gerilme-şekildeğiştirme diyagramının yüksek sıcaklıkla değişimi için önerilen sayısal model (EN 1992-1-2, 2004)

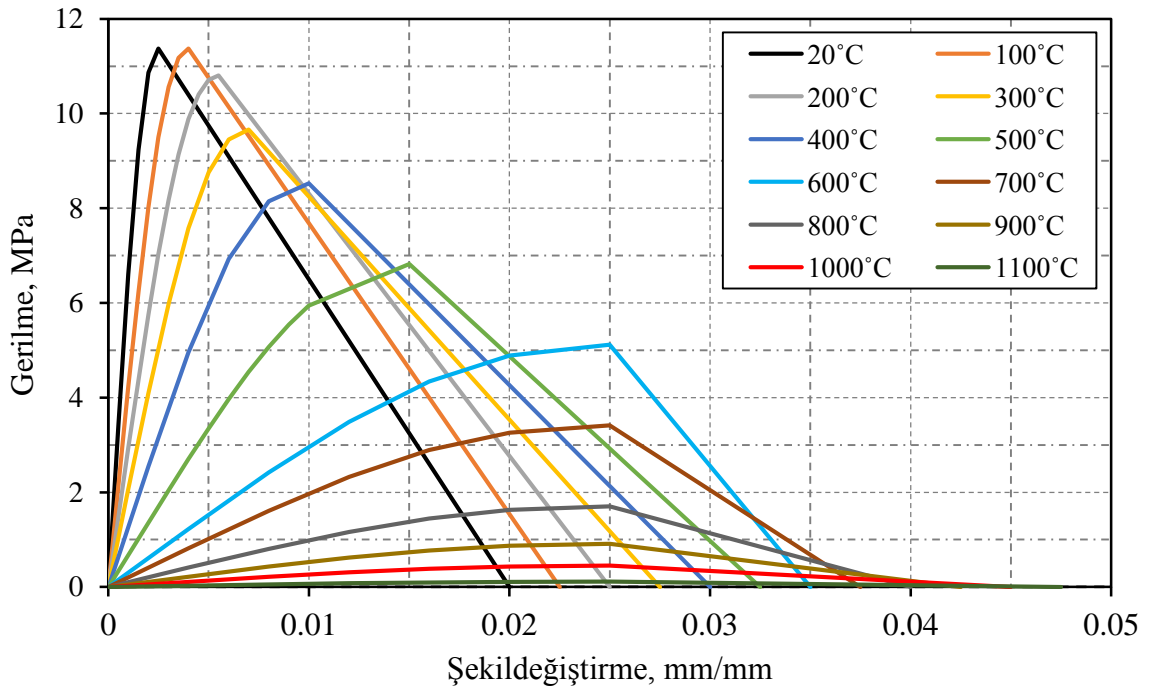
EN 1992-1-2, 2004’te gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin parametreleri sıcaklığa ve betonun tasarlanan değerlerine bağlıdır. Bu parametreler kalker agregalı geleneksel beton için Tablo 2.7’de verilmektedir (EN 1992-1-2, 2004). Bu tablodaki $k_{c,\theta}$ değeri dayanım azaltma katsayısı olarak aşağıdaki (2.3) nolu denklem vasıtasıyla tanımlanmaktadır.

$$k_{c,\theta} = f_{c,\theta} / f_c \quad (2.3)$$

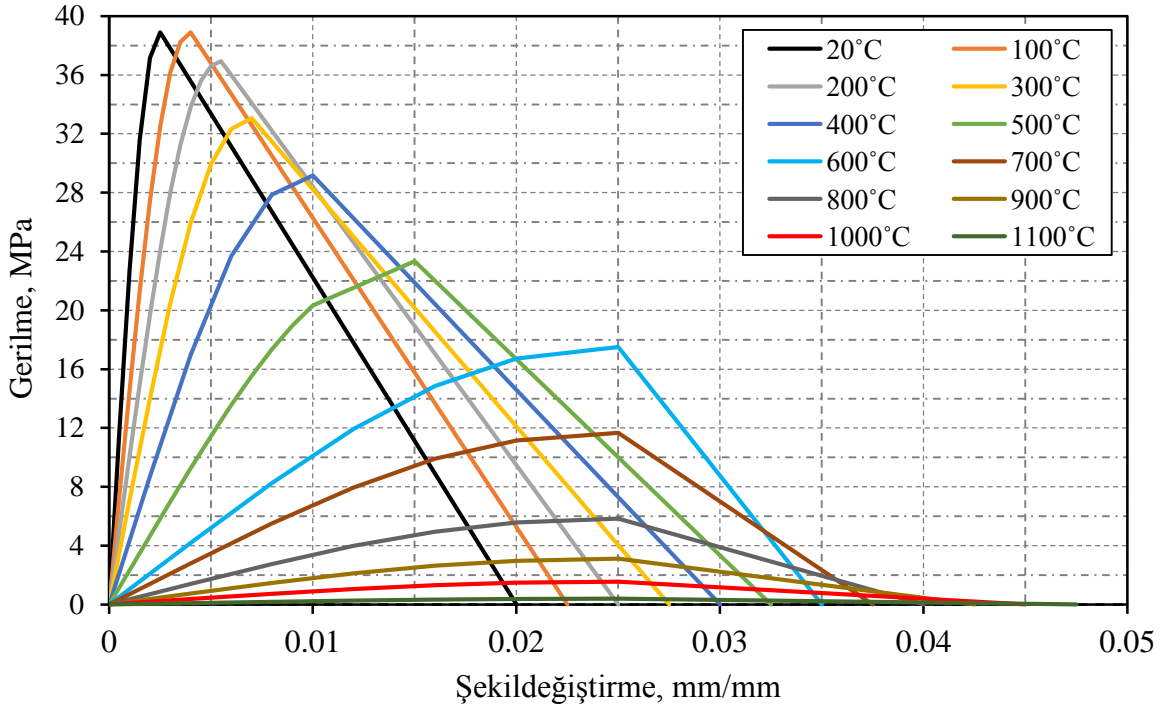
CL ve CN beton için EN 1992-1-2, 2004’te önerilen sayısal yöntem yardımıyla farklı sıcaklıklar için belirlenen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri aşağıdaki Şekil 2.27 ve Şekil 2.28’de verilmektedir. Bu eğriler sonlu eleman modelinde malzeme özelliği olarak ABAQUS’e girilmiştir.

Tablo 2.7. Kalker agregalı betonun yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisine ait dayanım azaltma katsayıları ve şekildeğiştirme parametreler (EN 1992-1-2, 2004)

Beton sıcaklığı, θ (°C)	Dayanım azaltma katsayısı, $k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_c$	$\epsilon_{cu,\theta}$	$\epsilon_{ce,\theta}$
20	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225
200	0.97	0.0055	0.0250
300	0.91	0.0070	0.0275
400	0.85	0.0100	0.0300
500	0.74	0.0150	0.0325
600	0.60	0.0250	0.0350
700	0.43	0.0250	0.0375
800	0.27	0.0250	0.0400
900	0.15	0.0250	0.0425
1000	0.06	0.0250	0.0450
1100	0.02	0.0250	0.0475
1200	0.00	-	-



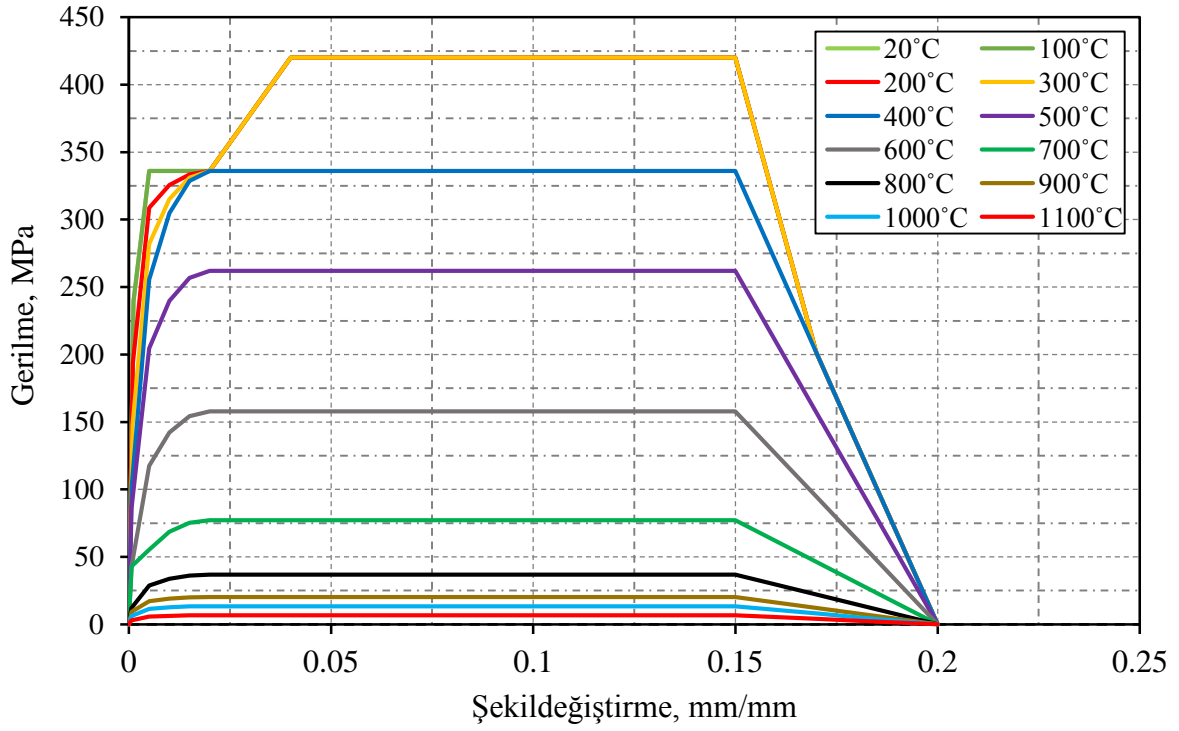
Şekil 2.27. CL betonun farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri



Şekil 2.28. CN betonun farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

2.6.1.2. Donatı Modeli

Analizlerde donatı malzeme modeli için S420 çeliği malzeme özelliklerine bağlı olarak ABAQUS sonlu eleman yazılımındaki “Elasto-Plastik” modeli kullanılmıştır. Donatıya ait malzeme modeli oluşturulurken EN 1993-1-2, 2005’te önerilen çeliğin yüksek sıcaklıktaki formülasyonu dikkate alınmıştır (bkz. Tablo 1.8). Bu şekilde EN 1993-1-2, 2005’e göre farklı sıcaklıklardaki donatı çeliği için belirlenen malzeme modeli Şekil 2.29’da verilmiştir.



Şekil 2.29. S420 donatı çeliği için kullanılan elasto-plastik malzeme modeli

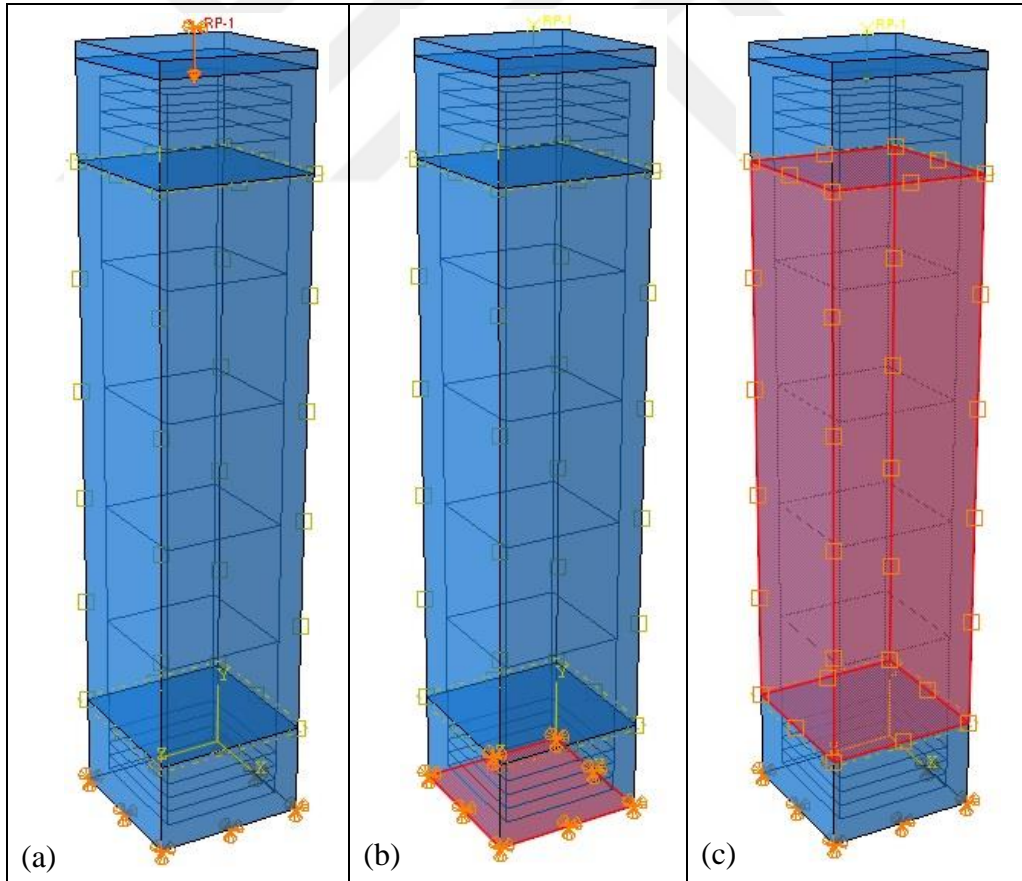
Belirlenen malzeme modelinde çelik için Tablo 2.8’deki farklı sıcaklıklara bağlı olarak elastisite modülü (E), özgül ısı (C_p) ve ısıl genleşme katsayısı (α) kullanılmıştır.

Tablo 2.8. Donatı çeliğinin farklı sıcaklıklar için kabul edilen bazı özellikleri

Sıcaklık, °C	Elastisite modülü, MPa	Özgül ısı, J/kg °C	Isıl genleşme katsayısı, [°C] ⁻¹
20	200000	420.38	1.20×10^{-5}
100	200000	471.34	1.24×10^{-5}
200	180000	522.30	1.28×10^{-5}
300	160000	573.25	1.32×10^{-5}
400	140000	624.20	1.36×10^{-5}
500	120000	675.16	1.40×10^{-5}
600	62000	726.11	1.44×10^{-5}
700	26000	751.60	1.46×10^{-5}
800	18000	1184.71	1.48×10^{-5}
900	13500	1401.27	1.49×10^{-5}
1000	9000	579.62	1.52×10^{-5}
1100	4500	579.62	1.56×10^{-5}

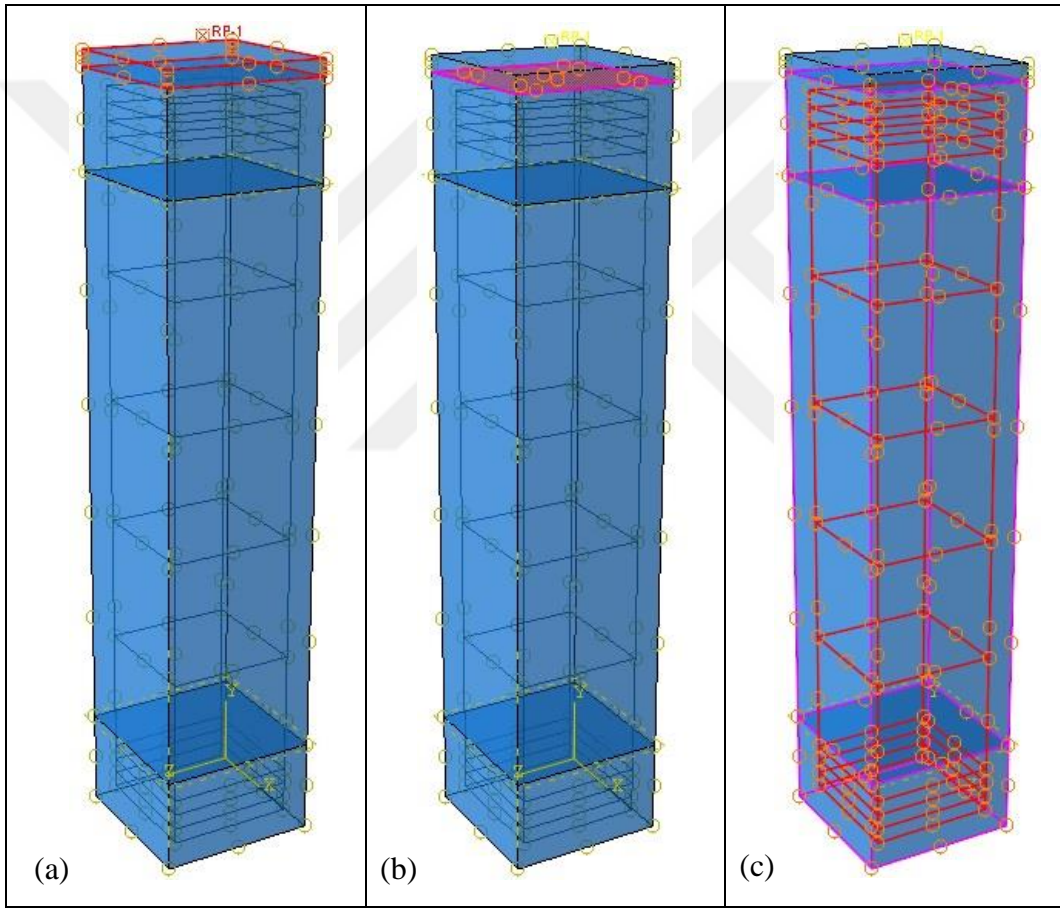
2.6.2. Sınır Şartları ve Yapılan Kabuller

Sayısal modellemelerden elde edilen sonuçların doğruluğunu etkileyen temel etkenlerden biri, sınır şartlarının ve yüklemelerin deneysel modele olan benzerliği ve uyumudur. Bu çalışmada eksenel yüklü betonarme kolonların sayısal modellenmesinde, deneylerde olduğu gibi, kolonların eksenel yükün verildiği yönde serbestçe şekil değiştirebilmeleri için sadece bu yönde serbestlik tanımlanmıştır ($U_1=U_3=0$, $U_2 \neq 0$, $UR_1=0$, $UR_2=0$, $UR_3=0$). Şekil 2.30.b'de gösterildiği gibi, eksenel yükün (ya da yer değiştirmenin) verilmediği alt uçta ise tüm noktalar ankastre bağlı olarak modellenmiştir ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). Başka bir sınır şartı olarak ısıtma ve soğutma esnasında kolonun yüzeyine etki eden alana ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi uygulanmıştır. Şekil 2.30.c'de bu eğrinin uygulandığı bölge görülmektedir. Analizlerde ortam sıcaklığı 25°C olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2.30. Betonarme kolonun sonlu eleman analizlerindeki sınır koşulları

Eksenel yükün yüzeye üniform bir şekilde etki etmesi için kolonun üst ucunda boyutları kolonun enkesit boyutları ile aynı ve kalınlığı 25 mm olan bir rijit plaka modellenmiştir (Şekli 2.31.a). Rijit plaka ve kolonun temas eden yüzey arasındaki sürtünme katsayısı $\mu_f = 0.20$ olarak seçilmiştir. Şekli 2.31.b’de gösterildiği gibi, bu yüzeyin (hard contact) tanımlanması için friction fomulation (penalty) yöntemi kullanılmıştır. Beton ve donatı arasındaki aderansın tanımlanması için donatıların beton içerisinde gömülü olduğu (embedded region) yöntem uygulanmıştır. Şekil 2.31.c’de betonla donatılar arasındaki aderansın tanımlaması şematik olarak gösterilmektedir.



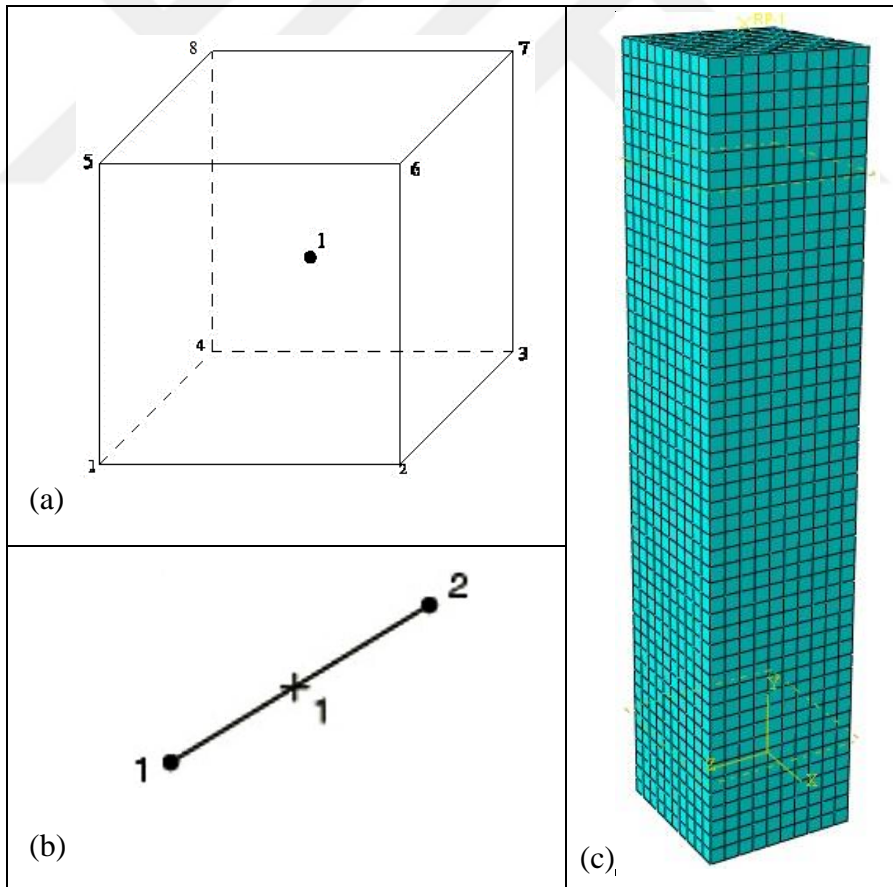
Şekil 2.31. (a) Rijit plakanın yerleştirilmesi (b) kolonla plaka arasındaki yüzeyin tanımlanması (c) betonla donatılar arasındaki aderansın tanımlaması

2.6.3. Modellemede Kullanılan Eleman Tipleri

Eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisi altında sayısal modelleri oluşturulurken aynı zamanda hem yük hem de yüksek sıcaklık etkisini temsil eden ‘birleşmiş sıcaklık-yük’ (Coupled Temperature-Displacement) metodu kullanılmıştır.

Betonun sonlu eleman ağı (mesh), üç boyutlu, sekiz düğüm noktalı, geometrik mertebesi üç çizgili olan, tek azaltılmış integrasyon noktalı ve sıcaklığa bağlı olan C3D8RT sonlu eleman tipi seçilmiştir. Bu sonlu eleman tipi, özellikle malzemelerin elastik ötesi davranışlarının modellenmesi durumunda, hem doğru sonuçlar vermesi aynı zamanda analiz süresini azaltma avantajını sağladığı açısından tercih edilmiştir (Şekil 2.32.a).

Donatı çeliğinin modellenmesinde iki düğüm noktalı, lineer, üç boyutlu, sıcaklığa bağlı olan T3D2T eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 2.32.b). Şekil 2.32.c’de betonarme kolonun sonlu eleman ağı gösterilmiştir.



Şekil 2.32. (a) C3D8RT beton eleman tipi (b) T3D2T donatı çeliği eleman tipi (c) betonarme kolonun sonlu eleman ağı

Eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisi altındaki sayısal modelleri üç boyutlu olarak oluşturulmuştur. Bu model aynı deneysel numunedeki gibi üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada önce sabit eksenel yükleme uygulanmıştır. Eksenel yük kolon üzerinde sabit olarak etkimeye devam edilmiştir. Daha sonra ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi Tablo 2.9’da planlanan ısıtma ve soğutma süreleri boyunca uygulanmıştır. Analizin son aşamasında numune kırılması gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.9. Sayısal numuneler için oluşturulan analiz modelleri

Model adı	Beton tipi	Isıtma	Soğutma	Deneysel olarak test edildi mi?
CL-R	CL	Soğuk Referans	-	Evet
CL-30-W		30 dk ısıtma	Suyla soğutma	Evet
CL-30-A		30 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Evet
CL-60-W		60 dk ısıtma	Suyla soğutma	Evet
CL-60-A		60 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Evet
CL-120-W		120 dk ısıtma	Suyla soğutma	Hayır
CL-120-A		120 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Hayır
CL-Cont.		Artan Sıcaklık	Yok	Evet
CN-R	CN	Soğuk Referans	-	Evet
CN-30-W		30 dk ısıtma	Suyla soğutma	Hayır
CN-30-A		30 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Hayır
CN-60-W		60 dk ısıtma	Suyla soğutma	Evet
CN-60-A		60 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Evet
CN-120-W		120 dk ısıtma	Suyla soğutma	Evet
CN-120-A		120 dk ısıtma	Kendiliğinden soğuma	Evet
CN-Cont.		Artan Sıcaklık	Yok	Evet

3. BULGULAR VE İRDELEMELER

3.1. Giriş

Bu çalışma kapsamında, eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisi altında davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla 16 adet betonarme kolon deney elemanı daha önce verilen boyutları ve enkesit detaylarına uygun olarak üretilmiştir (bkz. Şekil 2.2). Deney numuneleri sabit eksenel yüklendikten sonra yüksek sıcaklığa tabi tutulup, devamında soğutma aşamaları uygulanmıştır. Tüm ısıtma uygulamalarında ISO 834 standart yangın eğrisi kullanılmıştır. Deneylerden elde edilen bulgular, her bir deney elemanı için aşağıda verilmekte ve karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir. Daha sonra, lineer olmayan sonlu elemanlar yardımıyla yapılan analizlerden elde edilen sayısal bulgular, deneysel sonuçlar ile irdelenmektedir.

3.1.1. Eksenel Yüklü Deney Elemanlarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Davranışları

3.1.2. CL-R ve CN-R Kolonları

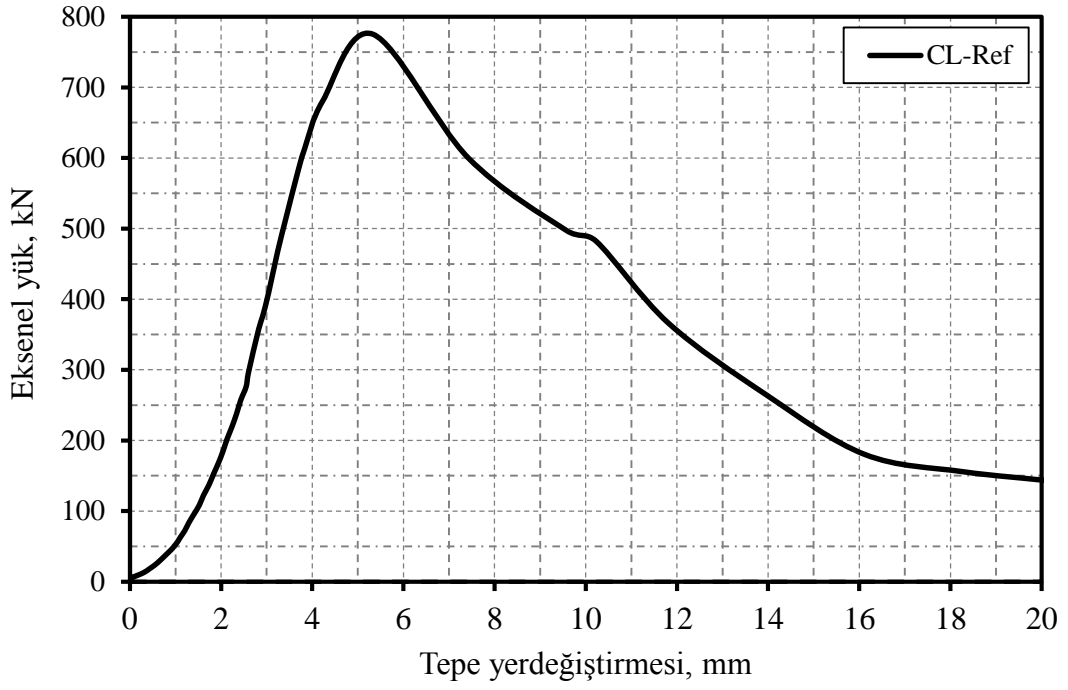
Betonarme kolon numunelerin 8 adeti düşük dayanımlı ve diğer 8 adeti ise normal dayanımlı beton kullanılarak üretilmiştir. Bu kolonların taşıma kapasitesinin belirlenmesi için 3'er adet soğuk referans kolon numunesi öncelikle deneye tabi tutulmuştur. Daha sonra bu referans numunelerden elde edilen ortalama dayanım, betonarme kolon numunelerinin eksenel yük taşıma kapasiteleri olarak kabul edilmiştir. Soğuk referans numunelerden elde edilen ortalama dayanım, düşük dayanımlı betonarme kolon numuneler (CL) için 775 kN ve normal dayanımlı numuneler (CN) için ise 2750 kN olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.1 ve Şekil 3.2'de deney sonrası CL ve CN soğuk referans numunelerine ait bazı görüntüler verilmektedir. Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te deney elemanlarına ait eksenel yükleme etkisi altında elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri gösterilmektedir.



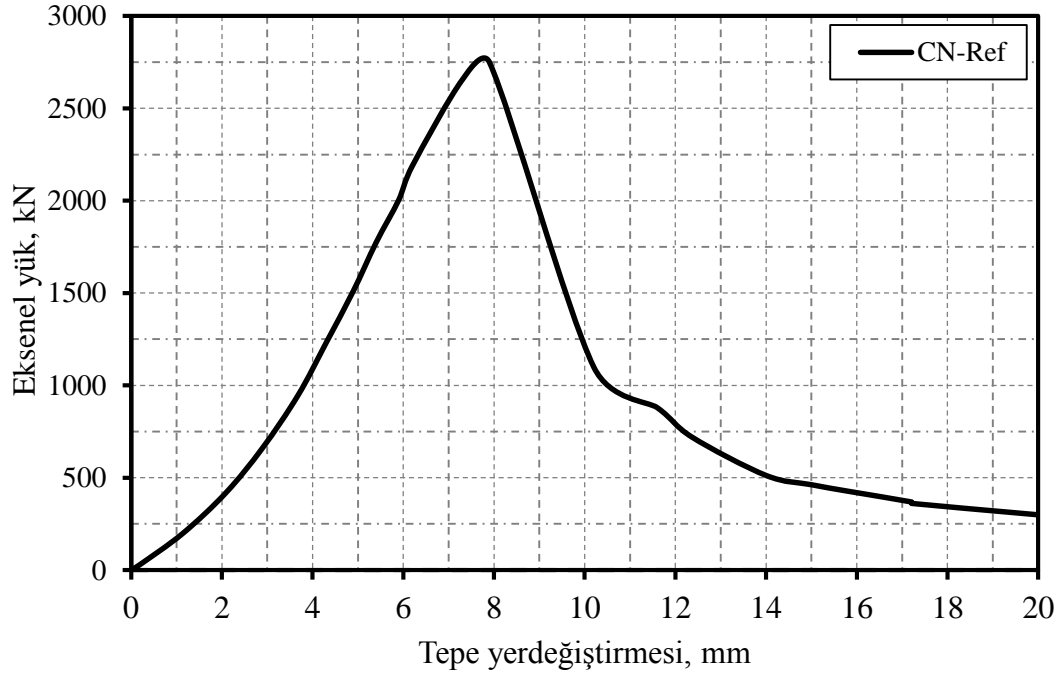
Şekil 3.1. CL soğuk referans deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.2. CN soğuk referans deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.3. CL soğuk referans numunelerinin ortalamasından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



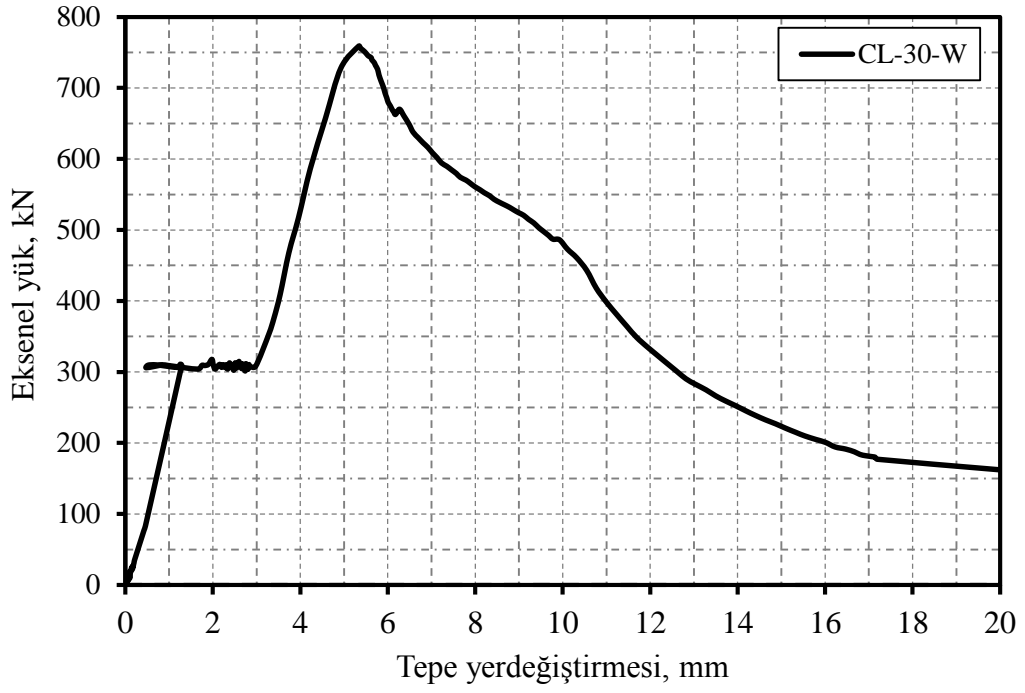
Şekil 3.4. CN soğuk referans numunelerinin ortalamasından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

3.1.3. CL-30-W Kolonu

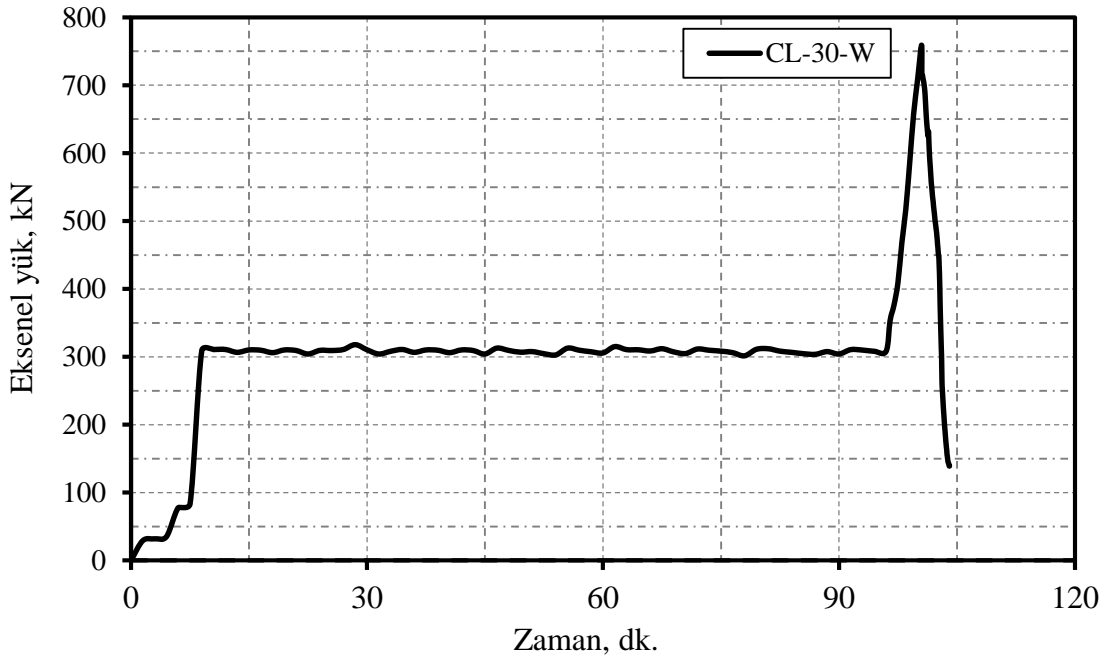
Isıtma ve soğutma süresince uygulanan aksenal yük düzeyi, hem deneysel hemde sayısal çalışmalar esnasında, Türkiye bina deprem yönetmeliğine göre (TBDY-2018) betonarme kolonların maksimum aksenal yük seviyesinin %40'ı olarak ($0.4f_{C-R}$) seçilmiştir. Dolayısıyla aksenal yük düzeyi düşük ve normal dayanımlı numuneler için sırasıyla 310 MPa ve 1100 MPa olarak uygulanmıştır. CL-30-W deney elemanındaki 30, bu numuneye uygulanan 30 dakikalık ISO 834 yüksek sıcaklık eğrisi, W ise soğutma tipinin suyla olduğunu göstermektedir. Bu deney için suyla soğutma aşaması numunenin beton yüzeyinden 20 mm derinlikteki (beton örtü kalınlığı) sıcaklığının yaklaşık 100°C 'ye düşmesine kadar devam ettirilmiştir. Deney sonrası CL-30-W numunesine ait görünüm Şekil 3.5'te ve bu deneyden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.6'da gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait aksenal yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmektedir.



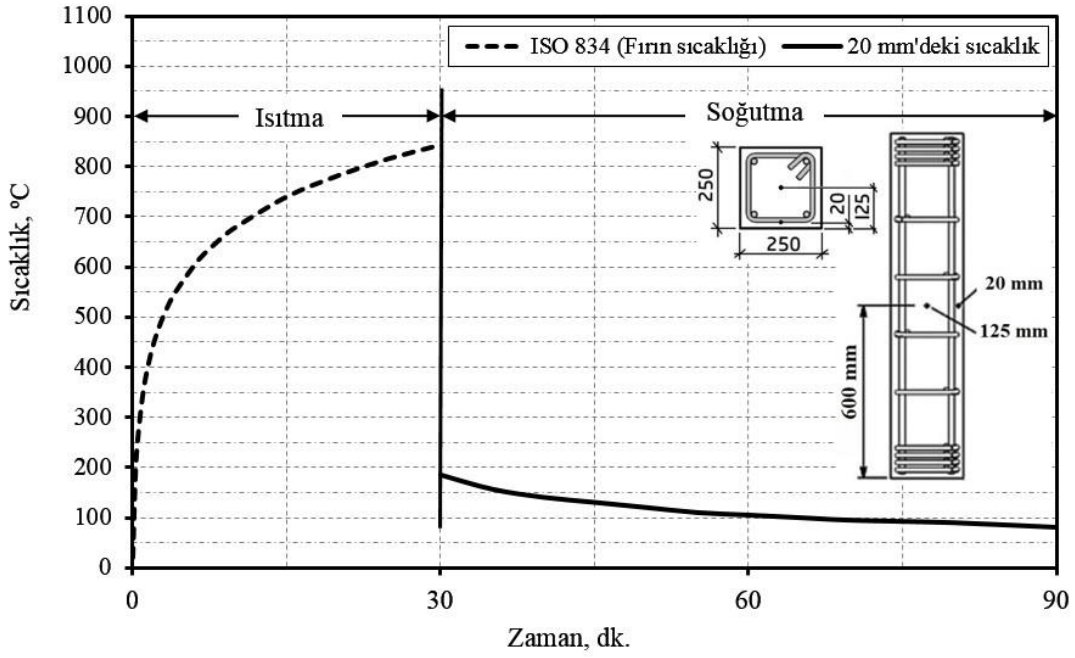
Şekil 3.5. CL-30-W deney numunesine ait görüntüler



şekil 3.6. CL-30-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



şekil 3.7. CL-30-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



Şekil 3.8. CL-30-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.4. CL-30-A Kolonu

CL-30-A deney elemanı, 30 dakika ısıtıldıktan sonra havada kendiliğinden soğutulmaya bırakılmıştır. Numune kodundaki “A” kendiliğinden (havada) soğutmayı sembolize etmektedir. Deney numunesinin kendiliğinden soğutma sırasındaki sıcaklık değişimi termokupl vasıtasıyla 5 dakikada bir kaydedilmiştir. Bunun için sıcaklık aşaması bittikten hemen sonra betonarme kolon numunesinin ortasına matkapla termokupl çapına uygun iki delik açılmıştır. Deliklerden biri numunenin paspayı kalınlığı olan, 20 mm derinlikte, hemen yanına delinen diğeri ise enkesitin ortası olan 125 mm derinliktedir. Numunenin beton yüzeyinden 20 mm derinlikteki sıcaklığı soğutma aşaması başladıktan sonra sürekli bir şekilde azalmaya başlarken, 125 mm derinlikteki sıcaklığı (merkez sıcaklığı) ilk başta artış gösterip ve sonra azalmaya başlamıştır. Bu olay soğutma aşaması başlarken yüzey sıcaklığın merkez sıcaklıktan daha fazla olduğundan dolayı ortaya çıkmıştır. Yüzey ve merkez sıcaklıkları soğutmaya başladıktan yaklaşık 70 dakika sonra (107°C’deyken) birbirine eşitlenmiş, daha sonra her iki sıcaklık da azalmaya başlamıştır. Soğutma aşaması 3 saat boyunca ve merkez sıcaklığı yaklaşık 100°C’ye düşünceye kadar devam ettirilmiştir. Soğutma aşamasının sonunda termokupl sıcaklığını doğrulamak için ek olarak analog termometre kullanılarak tekrar sıcaklık ölçülmüştür. Şekil 3.9’da soğutma

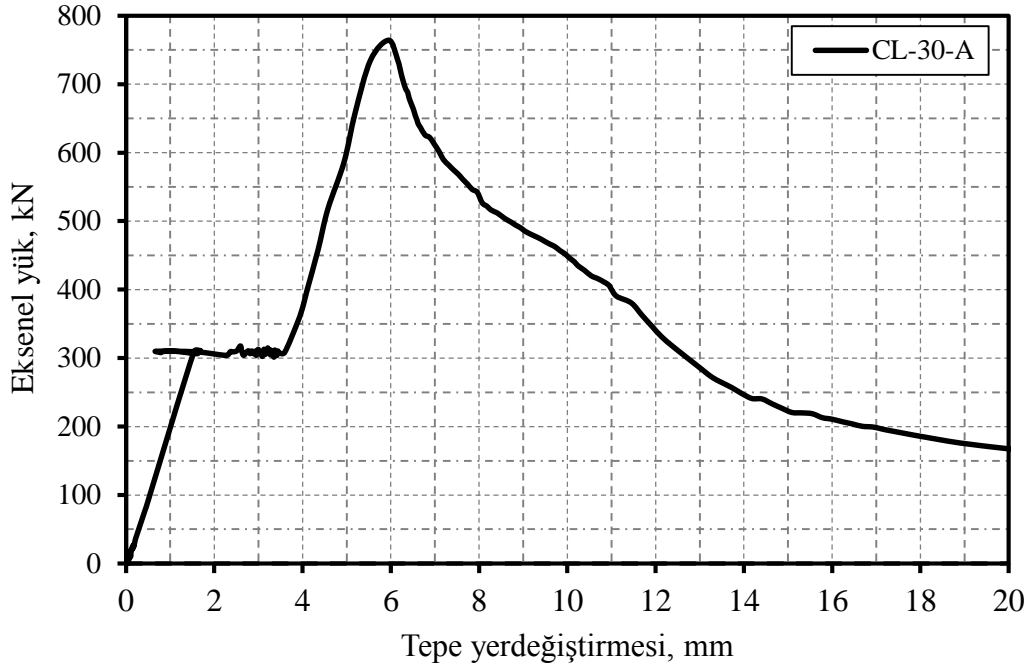
aşamasına ait olan termokuplun yerleştirilmiş görüntüsü verilmektedir. Deney sonrası CL-30-A numunesine ait görünüm Şekil 3.10'da ve bu deneyden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.11'de gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait aksenal yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



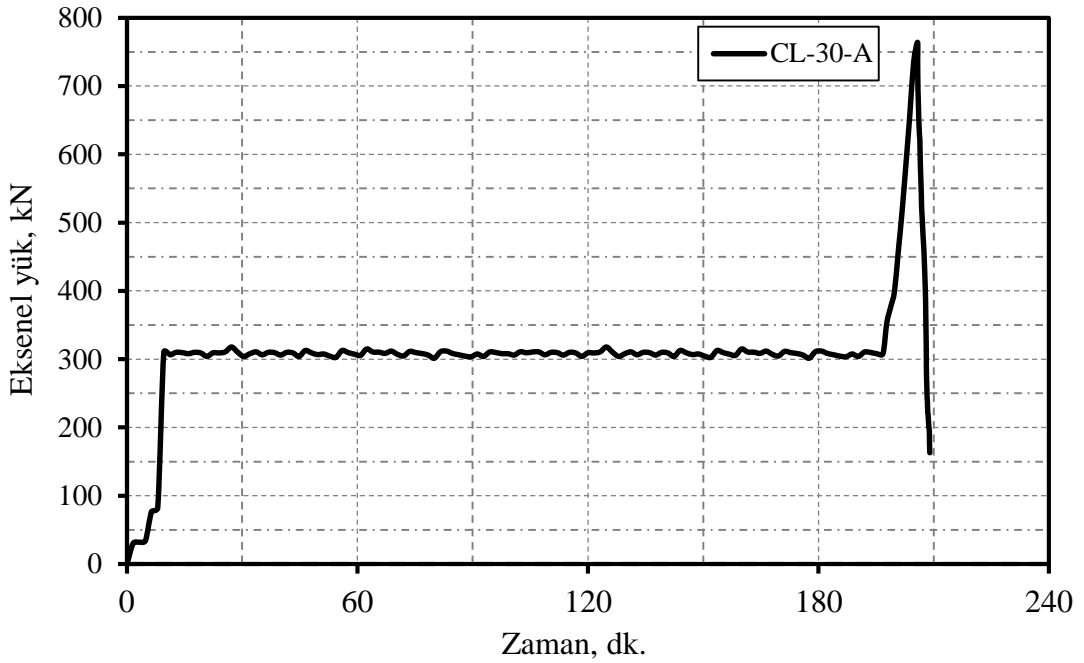
Şekil 3.9. Soğutma aşamasına ait termokuplun yerleştirilmiş görüntüsü



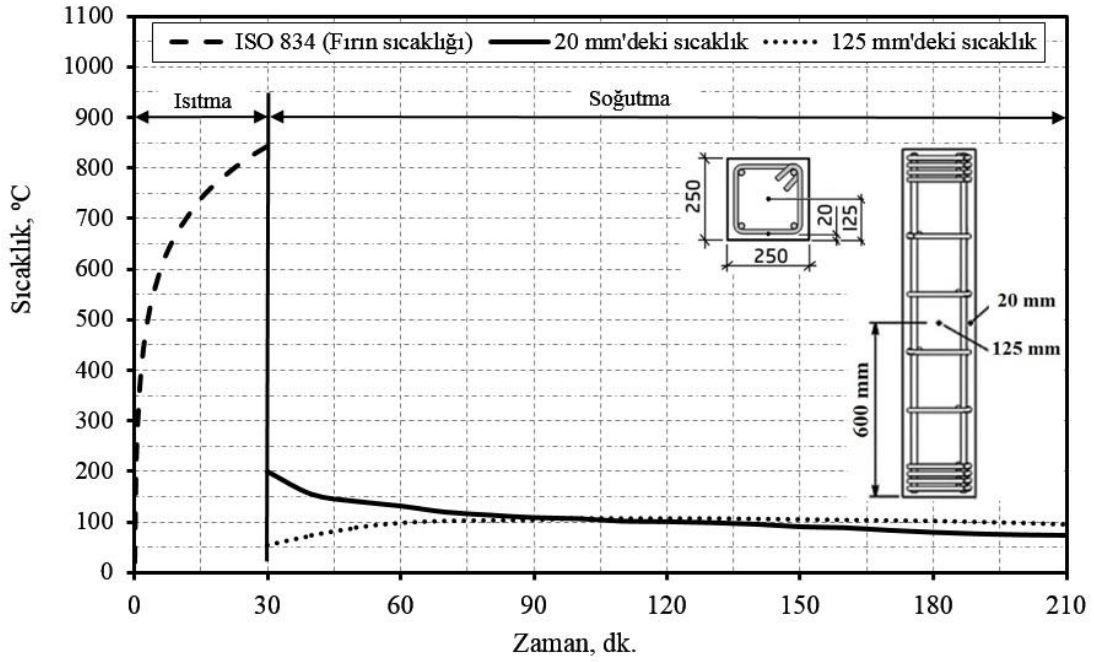
Şekil 3.10. CL-30-A deney numunesine ait görüntüler



şekil 3.11. CL-30-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



şekil 3.12. CL-30-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



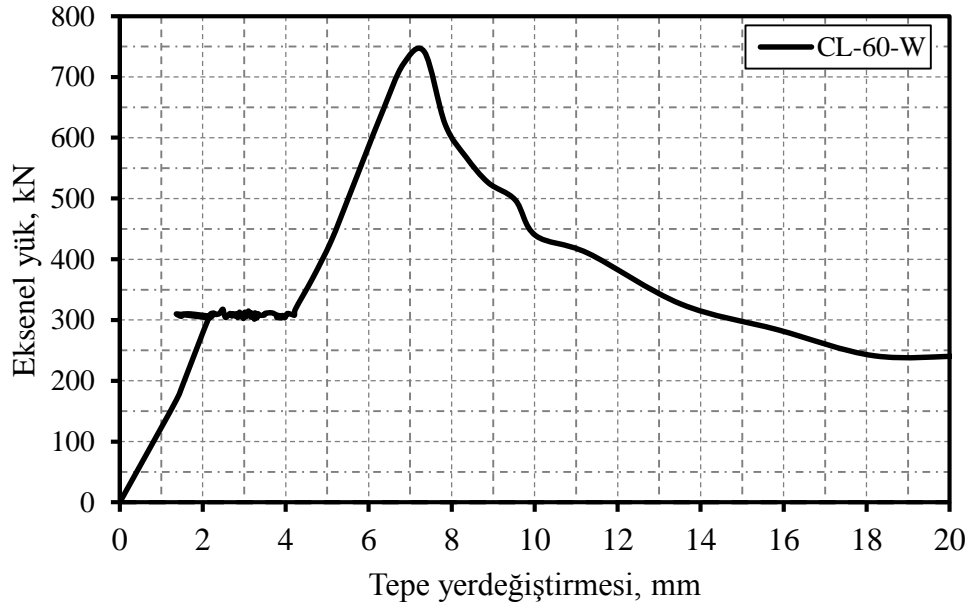
Şekil 3.13. CL-30-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.5. CL-60-W Kolonu

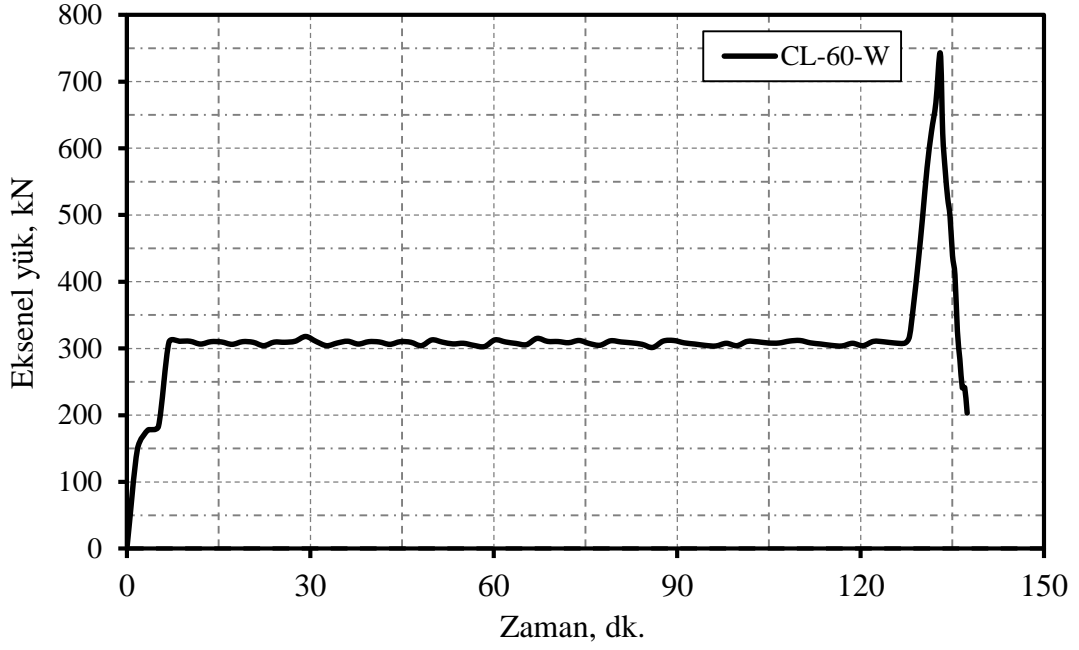
CL-60-W deney elemanı, 60 dakika ısıtıldıktan sonra suyla soğutulmuştur. Aynı 30 dakika soğutulan numune gibi bu deney için de suyla soğutma aşaması numunenin beton yüzeyinden 20 mm derinlikteki (beton örtü kalınlığı) sıcaklığının yaklaşık 100°C'ye düşmesine kadar devam ettirilmiştir. Soğutma aşaması yaklaşık 1 saat boyunca sürdürülmüştür. Deney sonrası CL-60-W numunesine ait görünüm Şekil 3.14'te ve bu deneyden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.15'te gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait aksenal yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de gösterilmektedir.



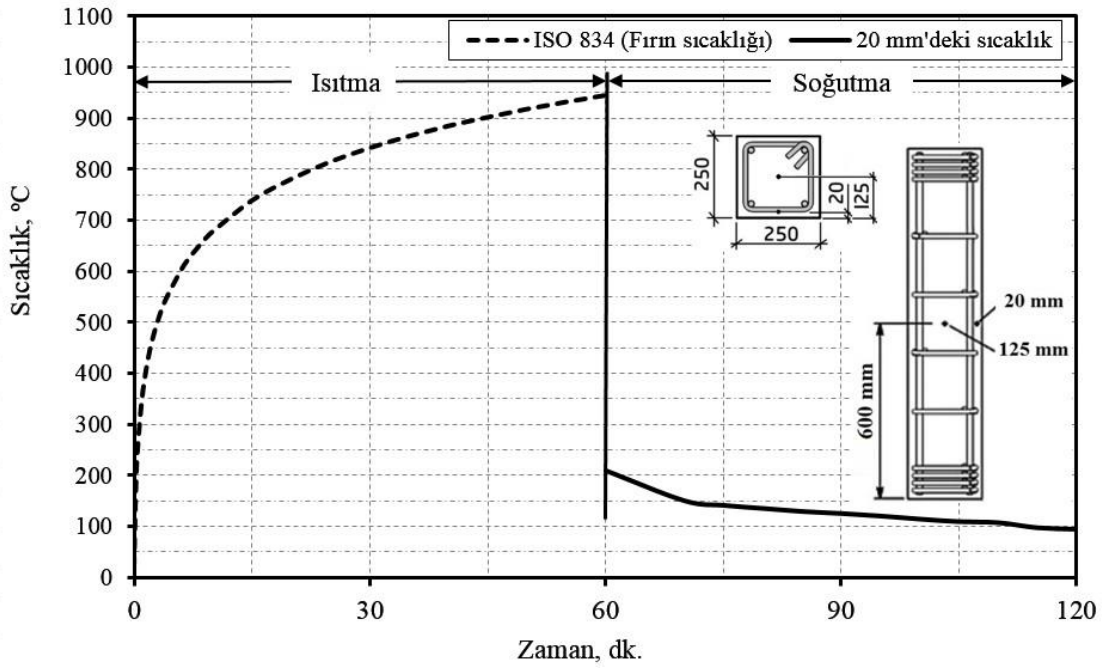
Şekil 3.14. CL-60-W deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.15. CL-60-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.16. CL-60-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



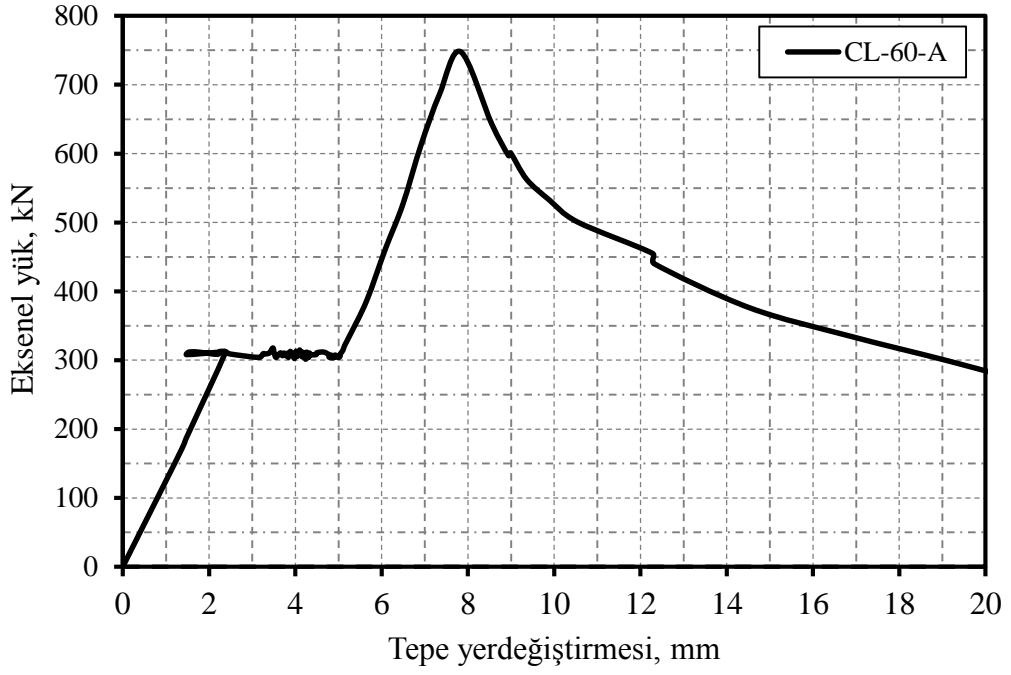
Şekil 3.17. CL-60-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.6. CL-60-A Kolonu

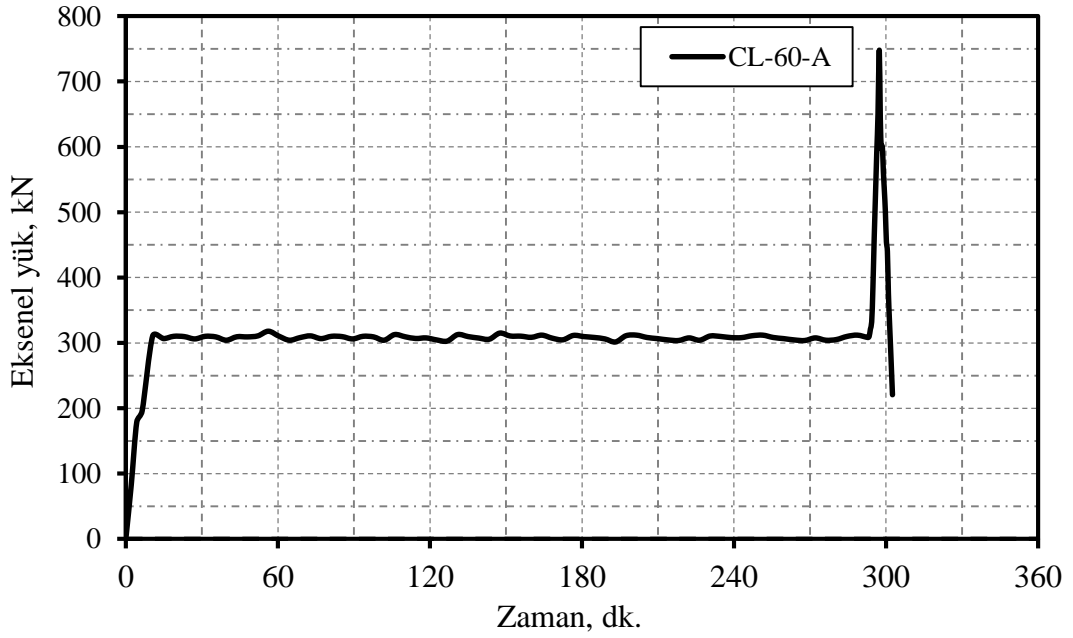
CL-60-A deney elemanı, 60 dakika ısıtıldıktan sonra havada kendiliğinden soğutulmaya bırakılmıştır. Aynı CL-30-A numunesi gibi bu deney için de sıcaklık aşaması bittikten hemen sonra betonarme kolon numunesinin ortasına termokupl çapına uygun 20 mm ve 125 mm derinliklerdeki deliklere yerleştirilen termokupl ile sıcaklık ölçme işlemi 5 dakikada bir yapılmıştır. Soğutma aşamasının başlangıcında numunenin merkez sıcaklığının yüzey sıcaklığından az olması nedeniyle, beton yüzeyinden 20 mm (beton örtü kalınlığı) derinlikteki sıcaklığı soğutma aşaması başladıktan sonra sürekli bir şekilde azalmaya başlarken, 125 mm derinlikteki sıcaklığı (merkez sıcaklığı) ilk başta artış gösterdikten sonra azalmaya başlamıştır. Yüzey ve merkez sıcaklıkları soğutmaya başladıktan yaklaşık 100 dakika sonra (140°C’de) birbirine eşit olmuşlar ve daha sonra her iki sıcaklık azalmaya başlamıştır. Bu numune için soğutma aşaması yaklaşık 3.5 saat boyunca sürdürülmüştür. Deney sonrası CL-60-A numunesine ait görünüm Şekil 3.18’de ve bu deneyden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.19’da gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait aksenal yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’de gösterilmektedir.



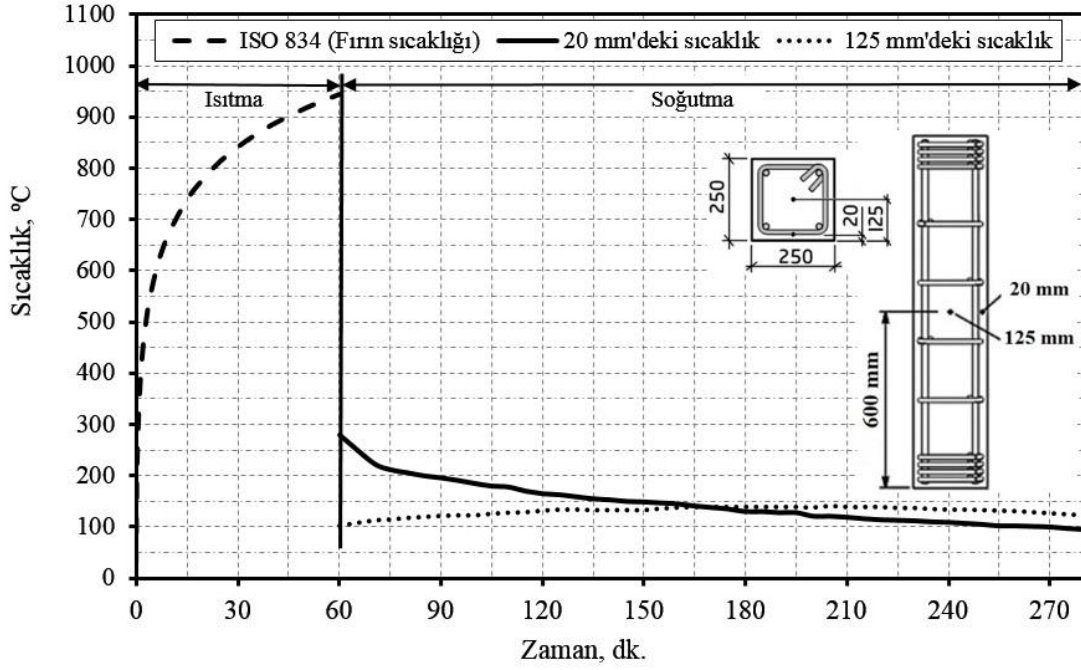
Şekil 3.18. CL-60-A deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.19. CL-60-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.20. CL-60-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



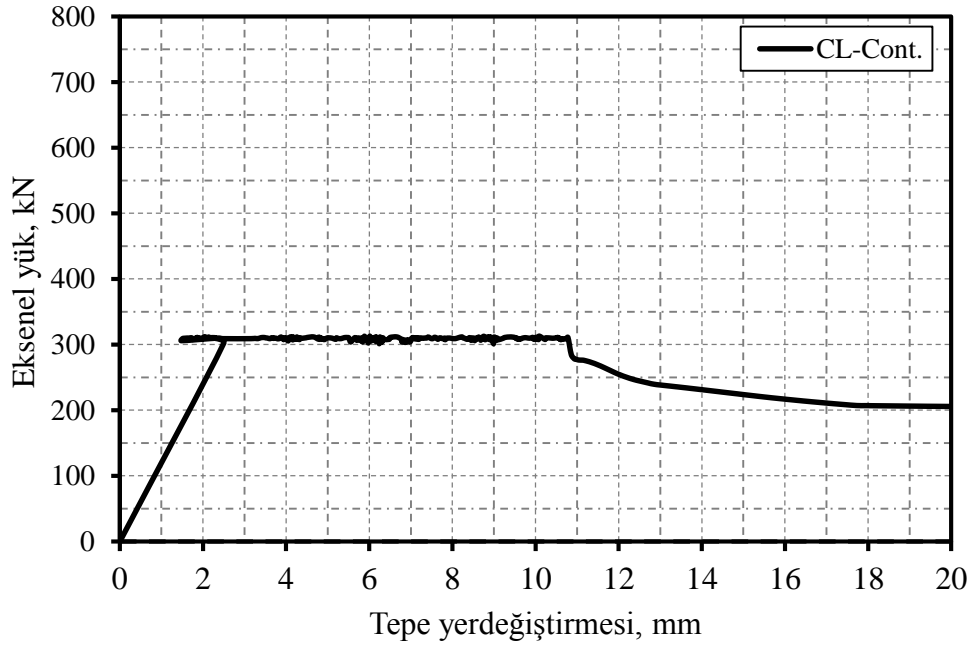
Şekil 3.21. CL-60-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.7. CL-Cont. Kolonu

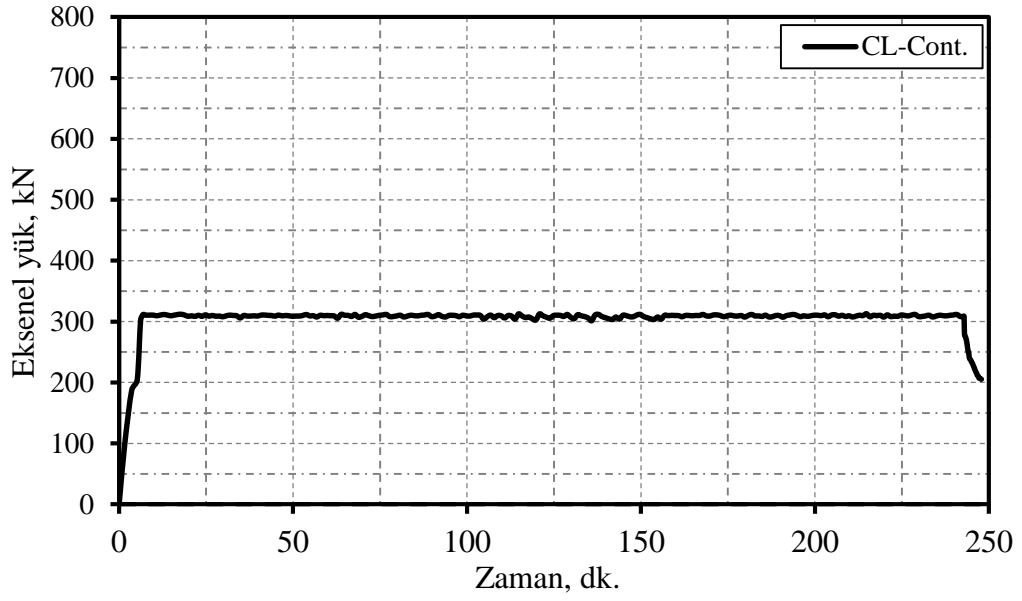
CL-Cont. deney elemanı dayanım kaybı meydana gelinceye kadar, sabit aksenal yük etkisi altında, sürekli olarak ISO 834 yüksek sıcaklık eğrisine maruz bırakılmıştır. Deney sonrası CL-Cont. numunesine ait görünüm Şekil 3.22'de, bu deneyden elde edilen aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.23'te ve bu elemana ait aksenal yük-zaman eğrisi Şekil 3.24'te gösterilmektedir. Şekil 3.24'den de anlaşıldığı gibi, düşük dayanımlı betondan yapılmış olan betonarme kolon numunesi yaklaşık 4 saat sonra yük taşıma kapasitesini ani olarak kaybetmiştir.



Şekil 3.22. CL-Cont. deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.23. CL-Cont. deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



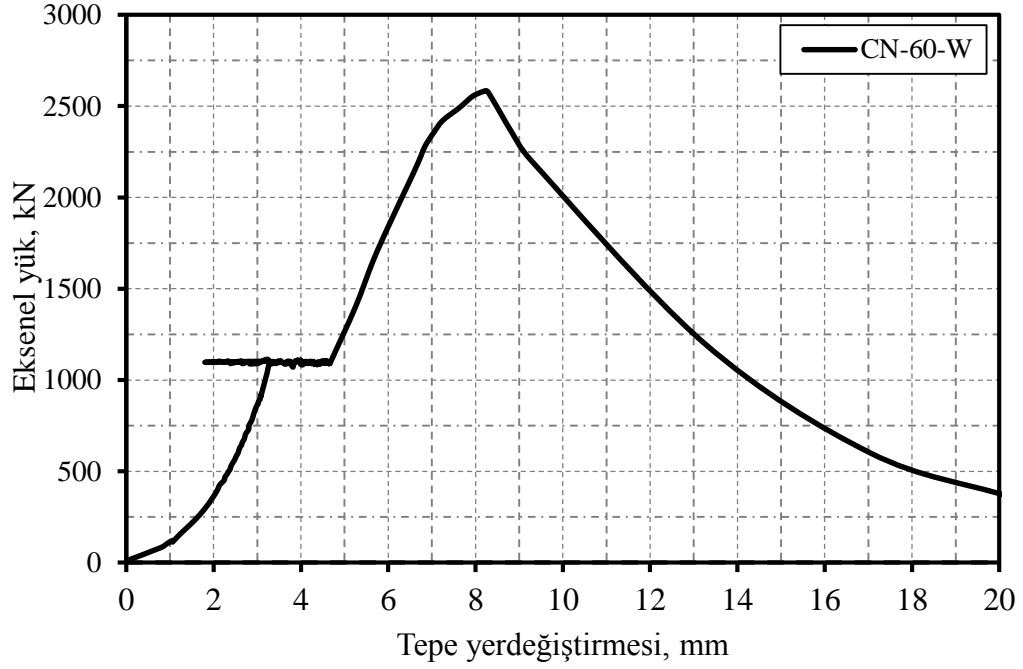
Şekil 3.24. CL-Cont. deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi

3.1.8. CN-60-W Kolonu

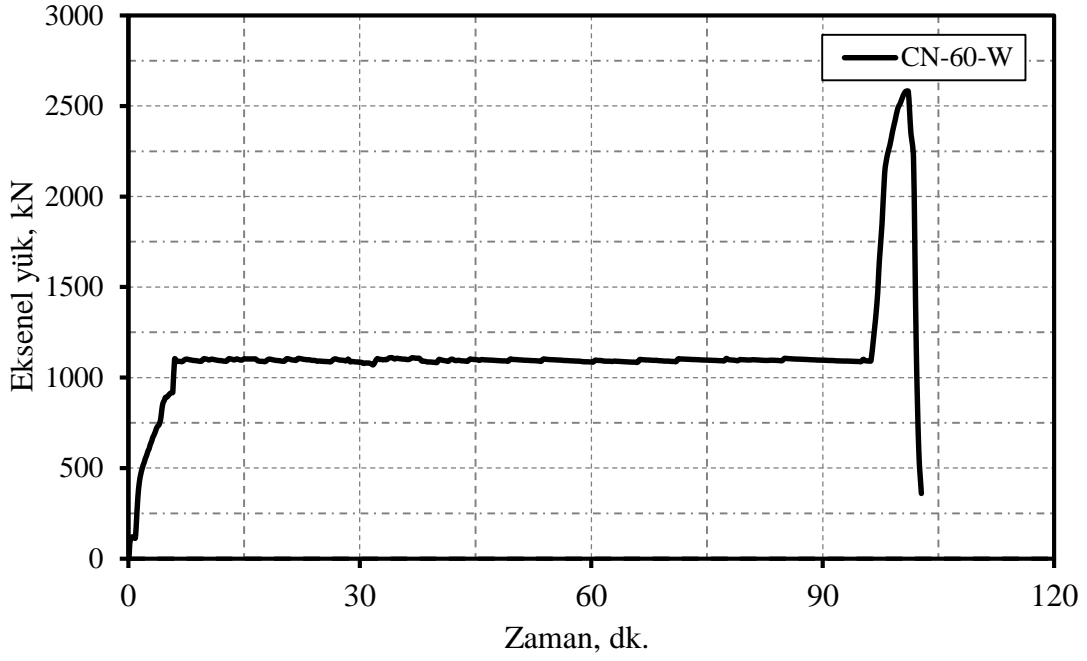
CN-60-W deney elemanı için suyla soğutma aşaması numunenin beton yüzeyinden 20 mm derinlikteki (beton örtü kalınlığı) sıcaklığının yaklaşık 100°C 'ye düşmesine kadar devam ettirilmiştir. Soğutma aşaması yaklaşık 120 dakika sürdürülmüştür. Deney sonrası CN-60-W numunesine ait görünüm Şekil 3.25'te ve bu deneyden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.26'da gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait eksenel yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de gösterilmektedir.



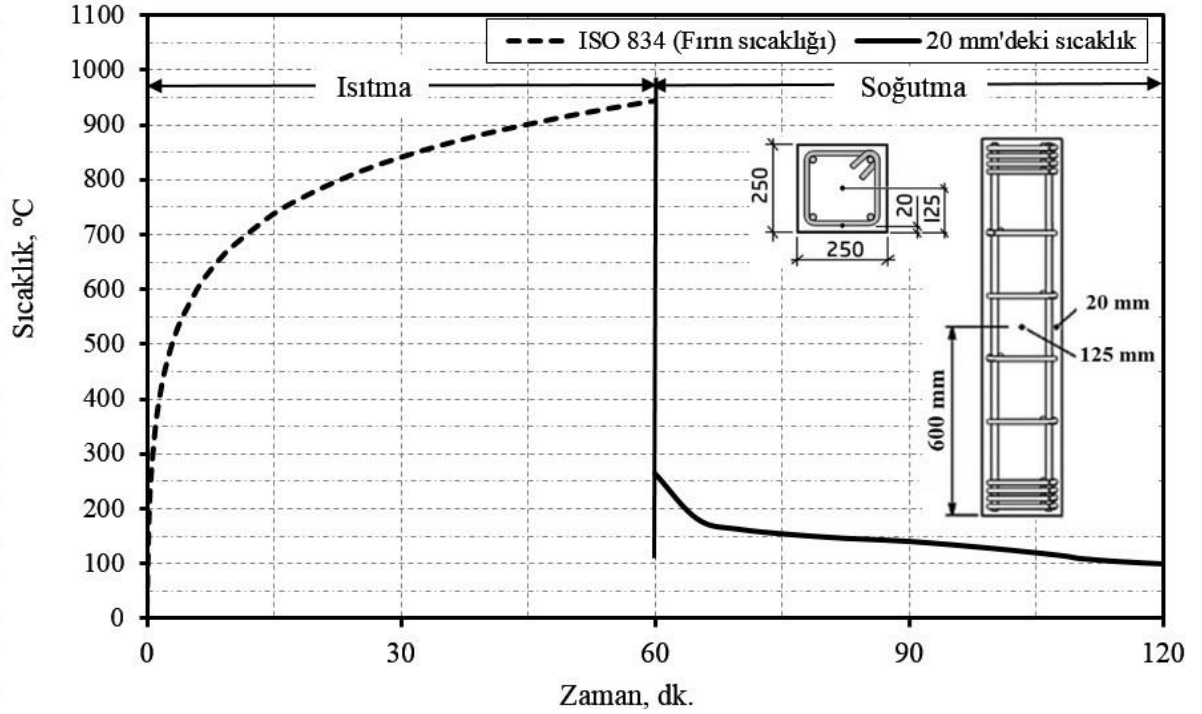
Şekil 3.25. CN-60-W deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.26. CN-60-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.27. CN-60-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



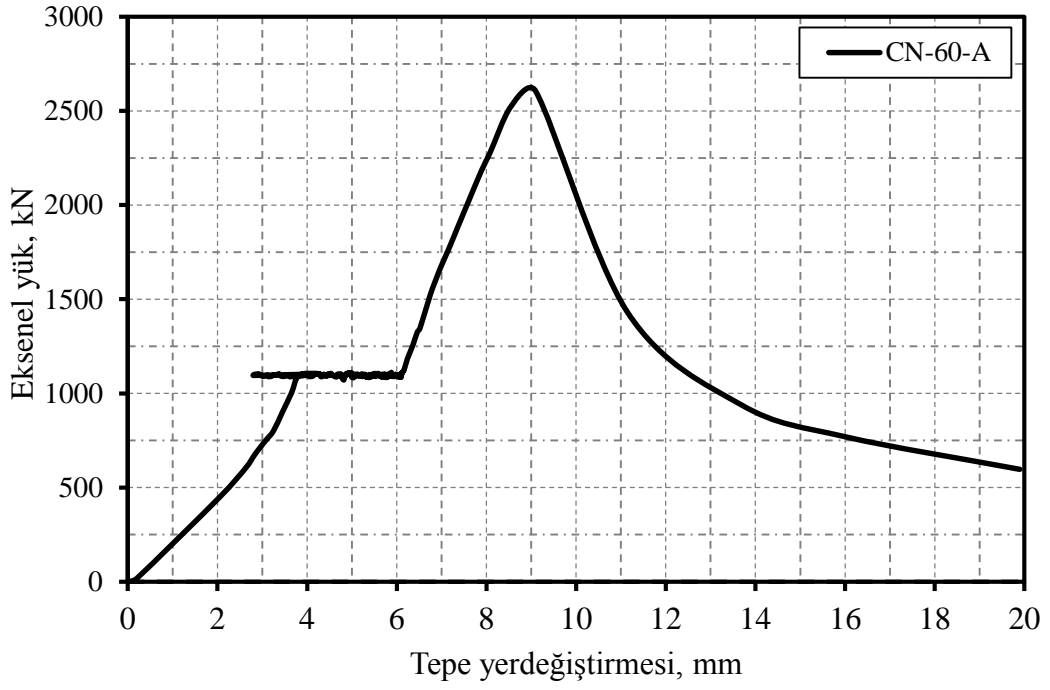
Şekil 3.28. CN-60-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.9. CN-60-A Kolonu

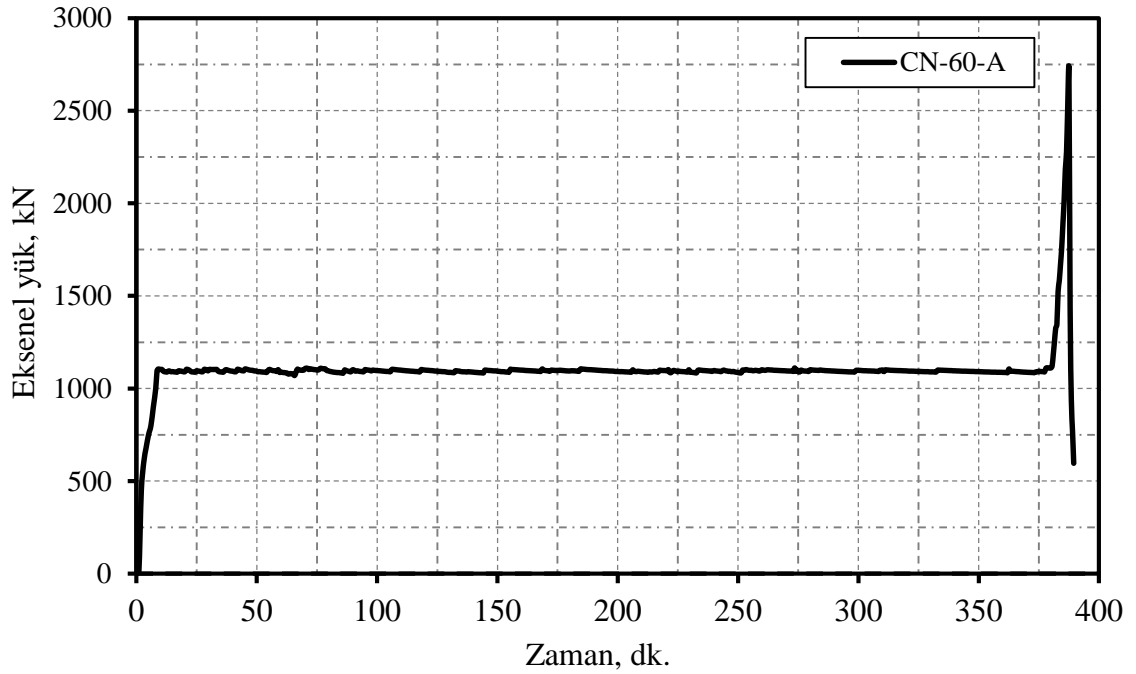
CN-60-A deney numunesi 60 dakika ısıtıldıktan sonra yaklaşık 5 saat boyunca havada soğutulmaya maruz bırakılmıştır. Diğer numunelerde olduğu gibi, bu numunede de merkez sıcaklığının yüzey sıcaklığından az olması nedeniyle 20 mm derinlikteki sıcaklık soğutma aşaması başladıktan sonra sürekli bir şekilde azalmaya başlarken, 125 mm derinlikteki sıcaklığı ilk başta artış gösterip, sonra azalmaya başlamıştır. Yüzey ve merkez sıcaklıkları soğutmaya başladıktan yaklaşık 90 dakika sonra (200°C 'de) birbirine eşitlenmişler ve daha sonra her iki sıcaklık azalmaya başlamışlar. Deney sonrası CN-60-A numunesine ait görünüm Şekil 3.29'da ve bu deneyden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.30'da gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait eksenel yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.31 ve Şekil 3.32'de gösterilmektedir.



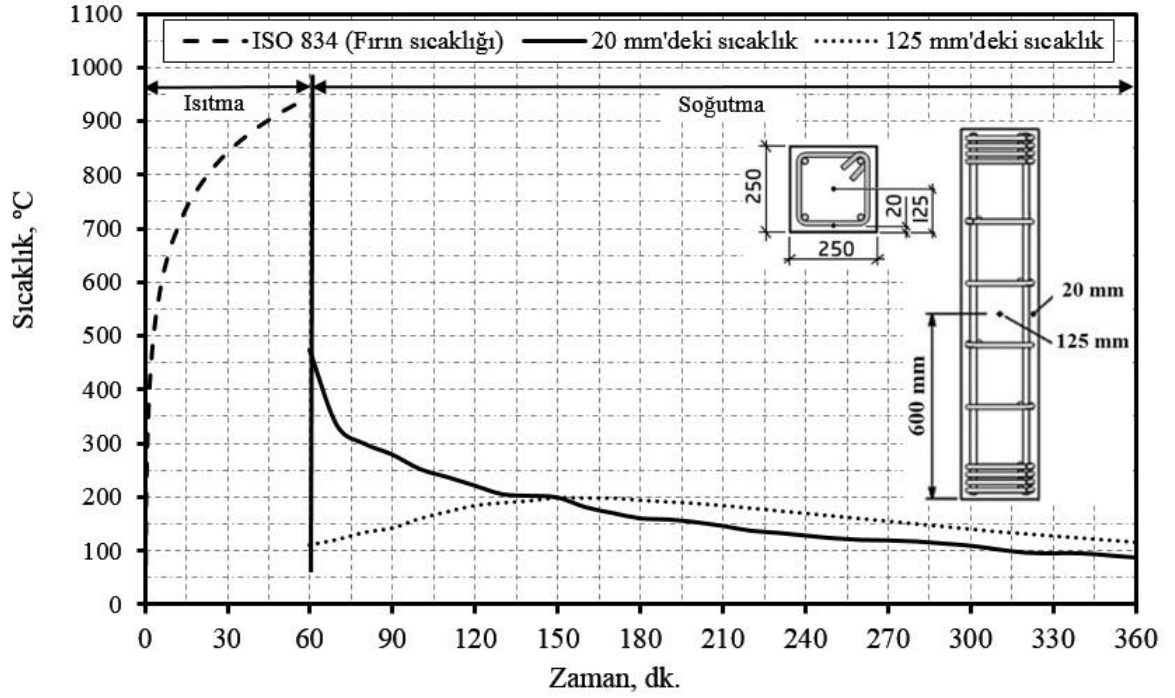
Şekil 3.29. CN-60-A deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.30. CN-60-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.31. CN-60-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



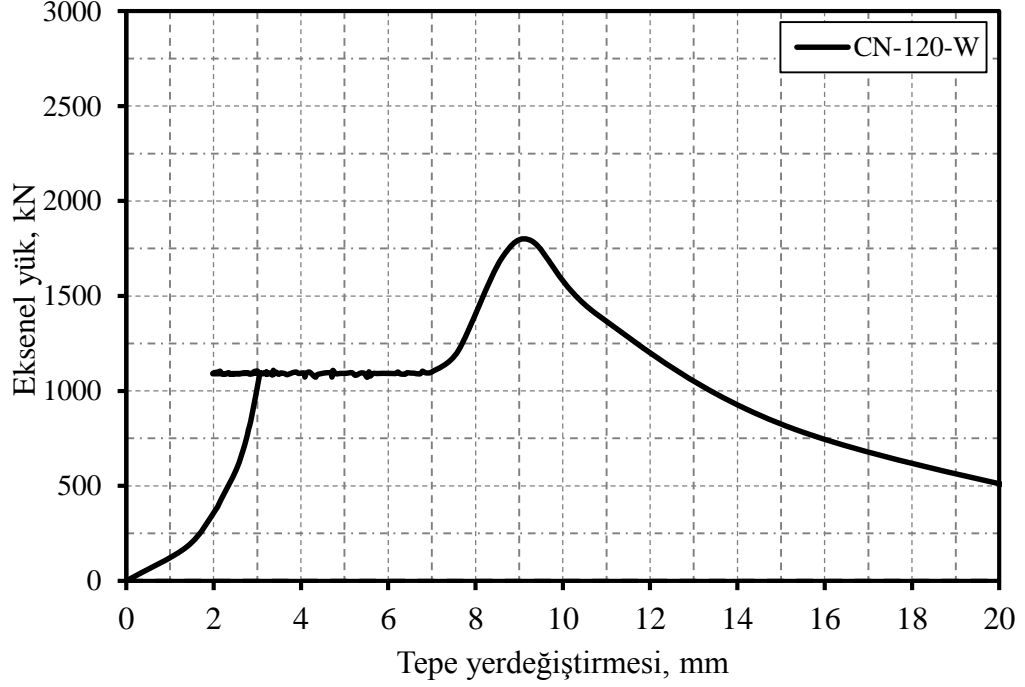
Şekil 3.32. CN-60-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.10. CN-120-W Kolonu

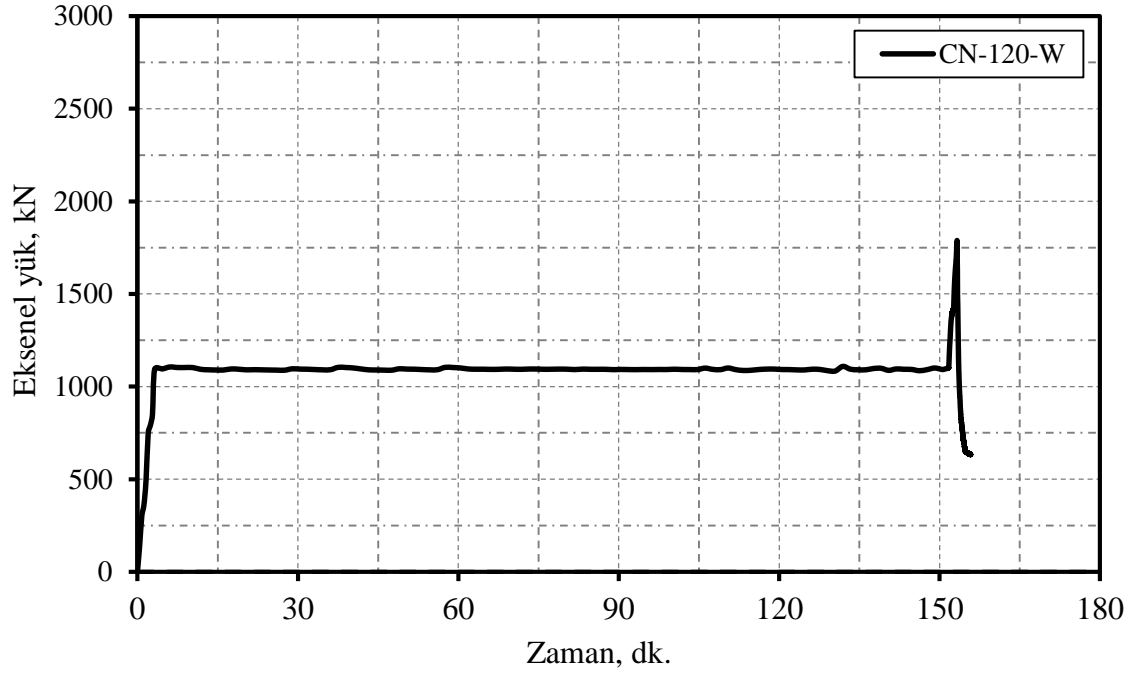
CN-120-W deney elemanı için suyla soğutma işlemi numunenin beton yüzeyinden 20 mm derinlikteki sıcaklığının yaklaşık 150°C'ye düşmesine kadar devam ettirilmiştir. Soğutma aşaması yaklaşık 80 dakika sürdürülmüştür. Deney sonrası CN-120-W numunesine ait görünüm Şekil 3.33'te ve bu deneyden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.34'te gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait eksenel yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.35 ve Şekil 3.36'da gösterilmektedir.



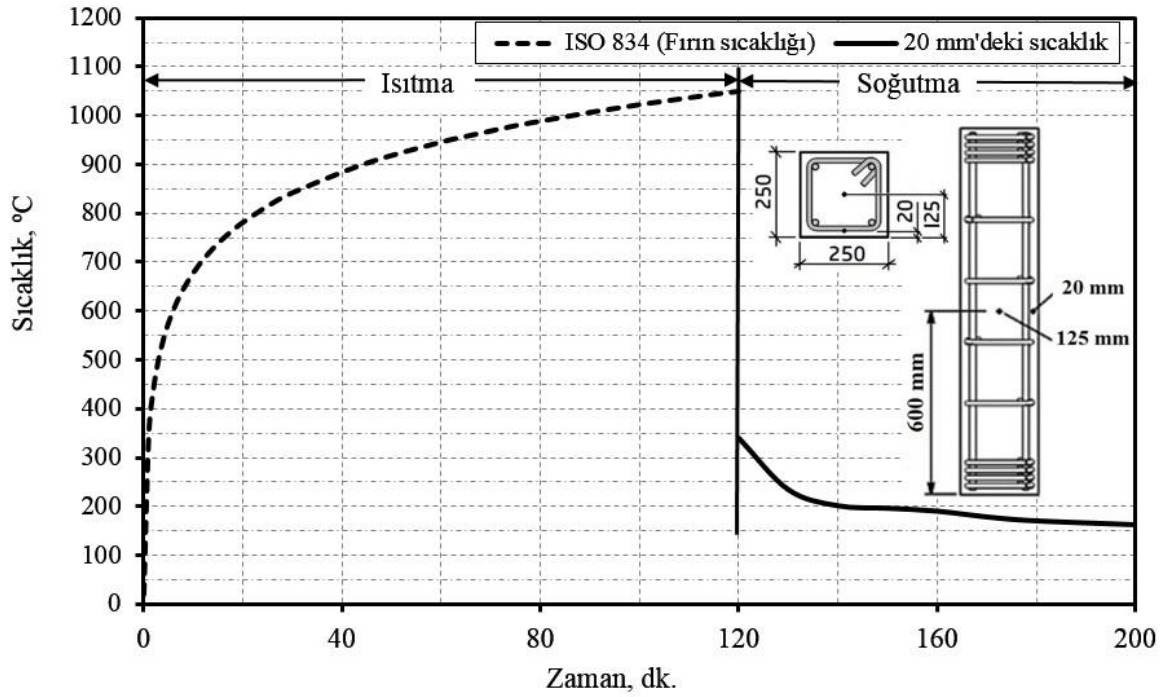
Şekil 3.33. CN-120-W deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.34. CN-120-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.35. CN-120-W deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



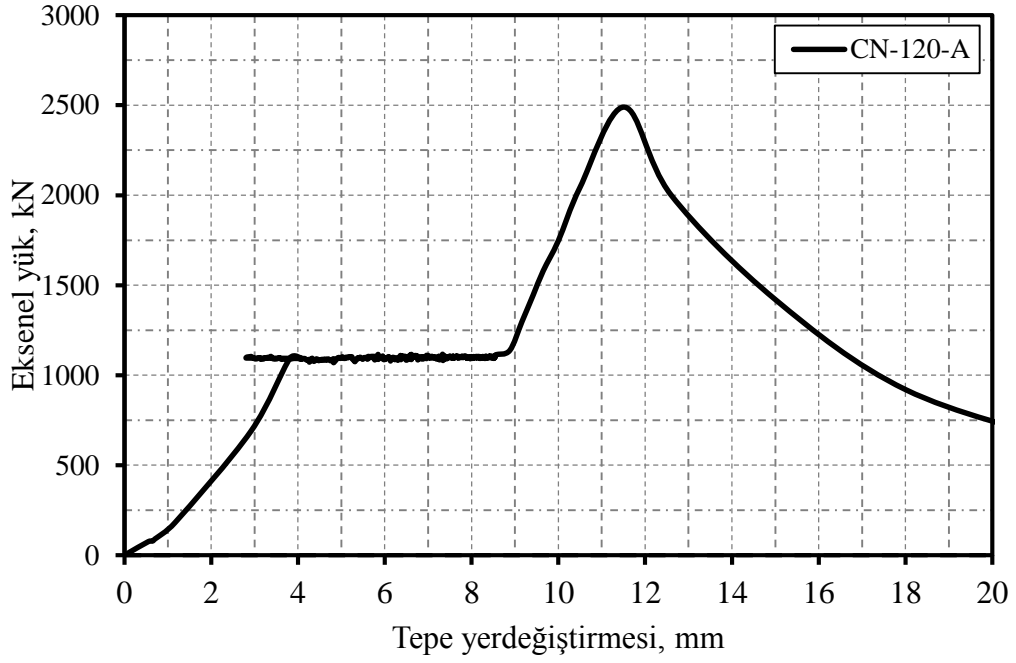
Şekil 3.36. CN-120-W deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.11. CN-120-A Kolonu

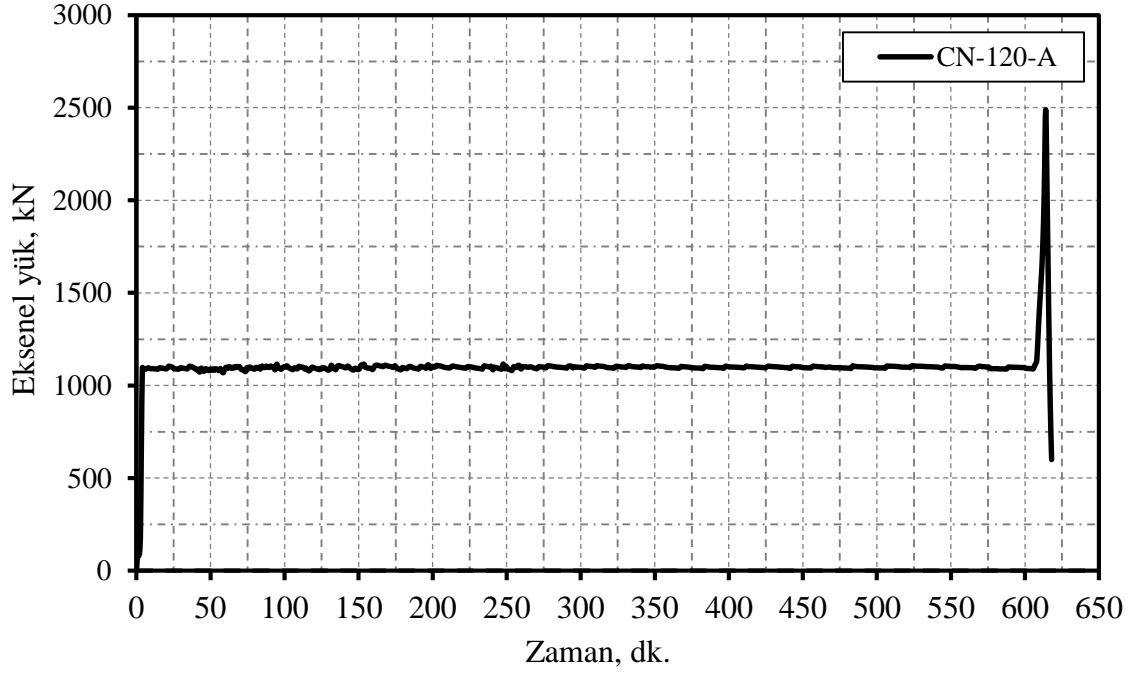
CN-120-A deney numunesi 120 dakika ısıtıldıktan sonra yaklaşık 8 saat boyunca havada soğutulmaya maruz bırakılmıştır. Bu numunede yüzey ve merkez sıcaklıkları soğutmaya başladıktan yaklaşık 50 dakika sonra (380°C 'de) eşitlenmişler ve sonra azalmaya başlamışlardır. Deney sonrası CN-120-A numunesine ait görünüm Şekil 3.37'de ve bu deneyden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.38'de gösterilmektedir. Ayrıca bu deney elemanına ait eksenel yük-zaman ve sıcaklık-zaman eğrileri sırasıyla Şekil 3.39 ve Şekil 3.40'da gösterilmektedir.



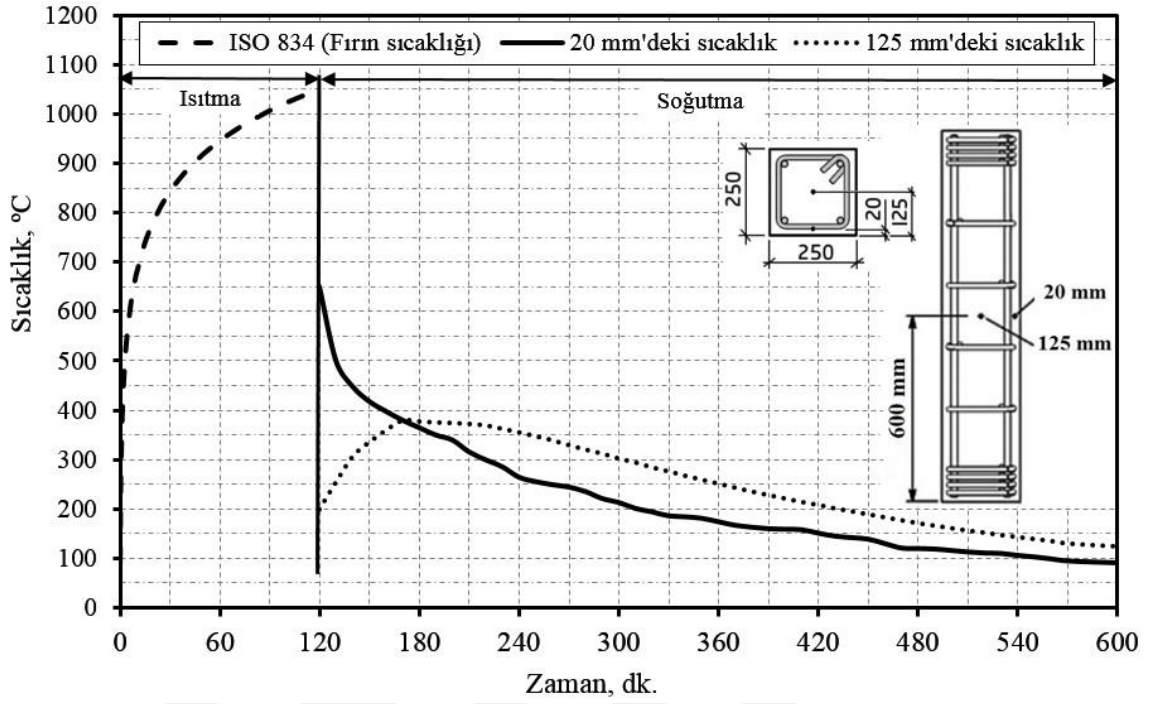
Şekil 3.37. CN-120-A deney numunesine ait görüntüler



şekil 3.38. CN-120-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



şekil 3.39. CN-120-A deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi



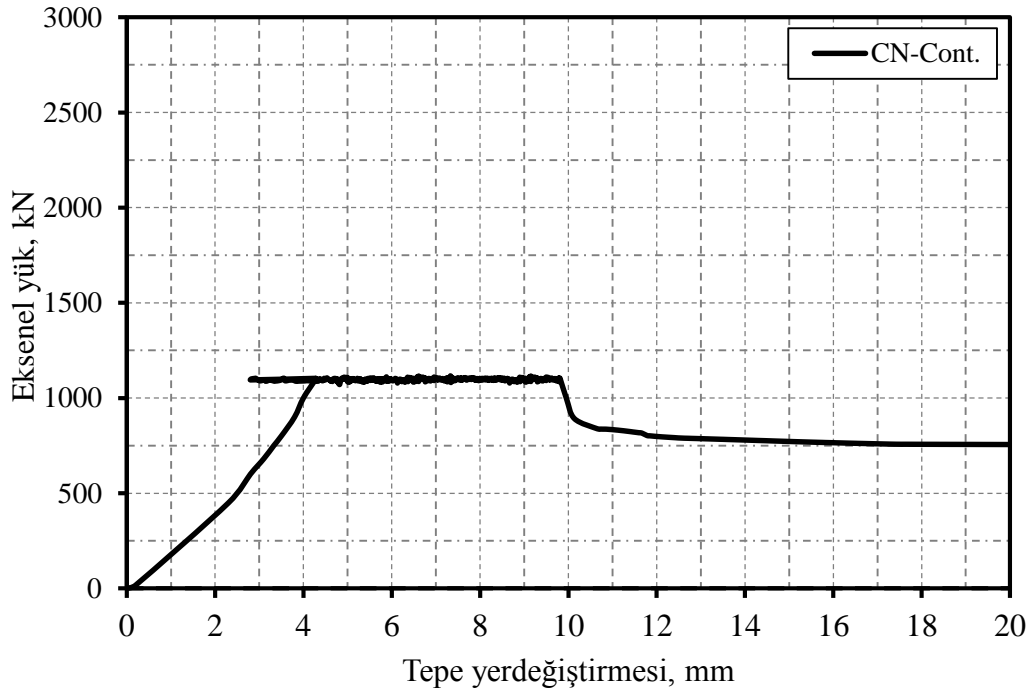
Şekil 3.40. CN-120-A deney numunesine ait sıcaklık-zaman eğrisi

3.1.12. CN-Cont. Kolonu

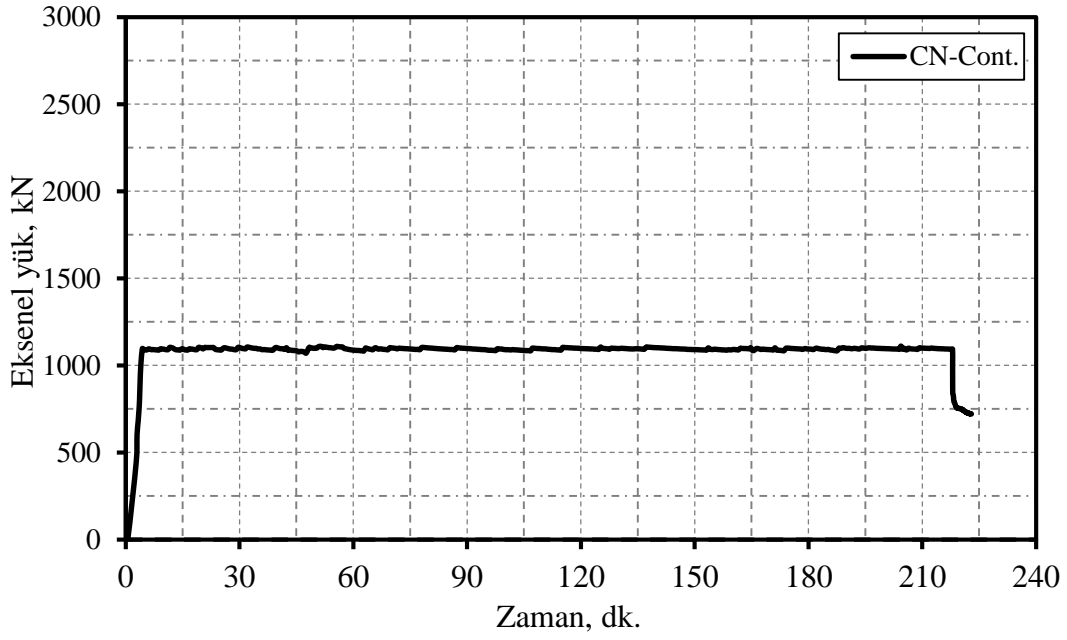
CN-Cont. deney elemanı dayanım kaybı meydana gelinceye kadar, sabit eksenel yük etkisi altında, soğutma aşaması olmadan, ISO 834 yüksek sıcaklık eğrisine maruz bırakılmıştır. Deney sonrası CN-Cont. numunesine ait görünüm Şekil 3.41’de, bu deneyden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.42’de ve bu elemana ait eksenel yük-zaman eğrisi Şekil 3.43’te gösterilmektedir. Şekil 3.43’ten de anlaşıldığı gibi, normal dayanımlı betondan yapılmış olan betonarme kolon numunesi yaklaşık 3.5 saat (210 dakika) sonra yük taşıma kapasitesini kaybetmiştir.



Şekil 3.41. CN-Cont. deney numunesine ait görüntüler



Şekil 3.42. CN-Cont. deney numunesinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

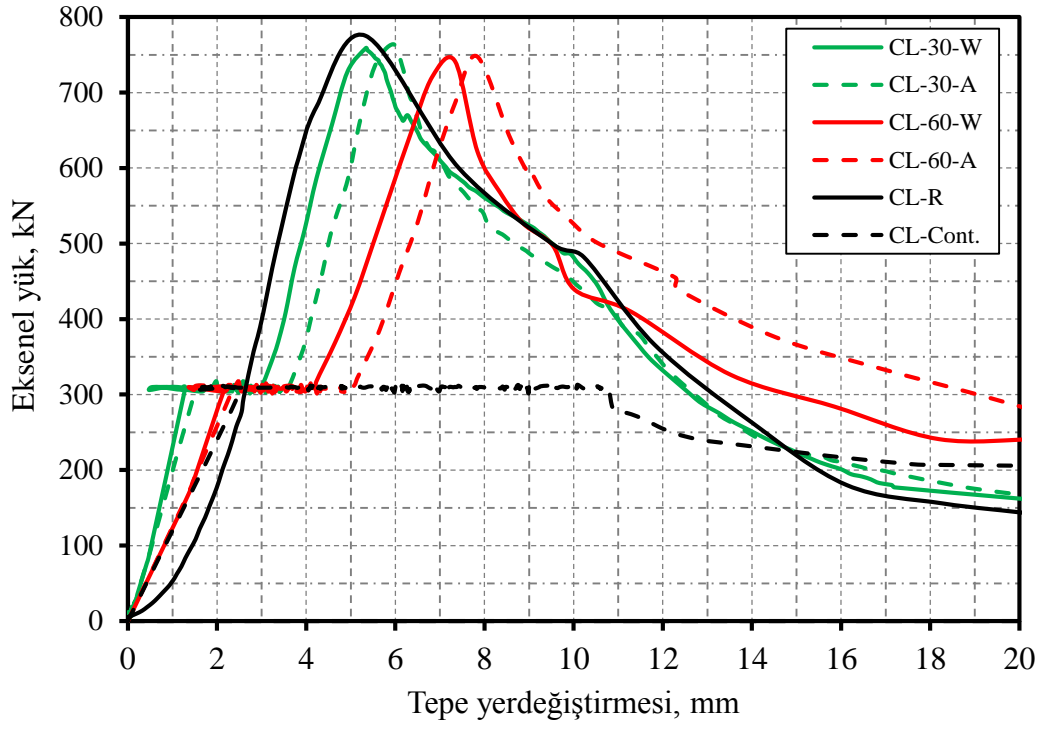


Şekil 3.43. CN-Cont. deney numunesinden elde edilen eksenel yük-zaman eğrisi

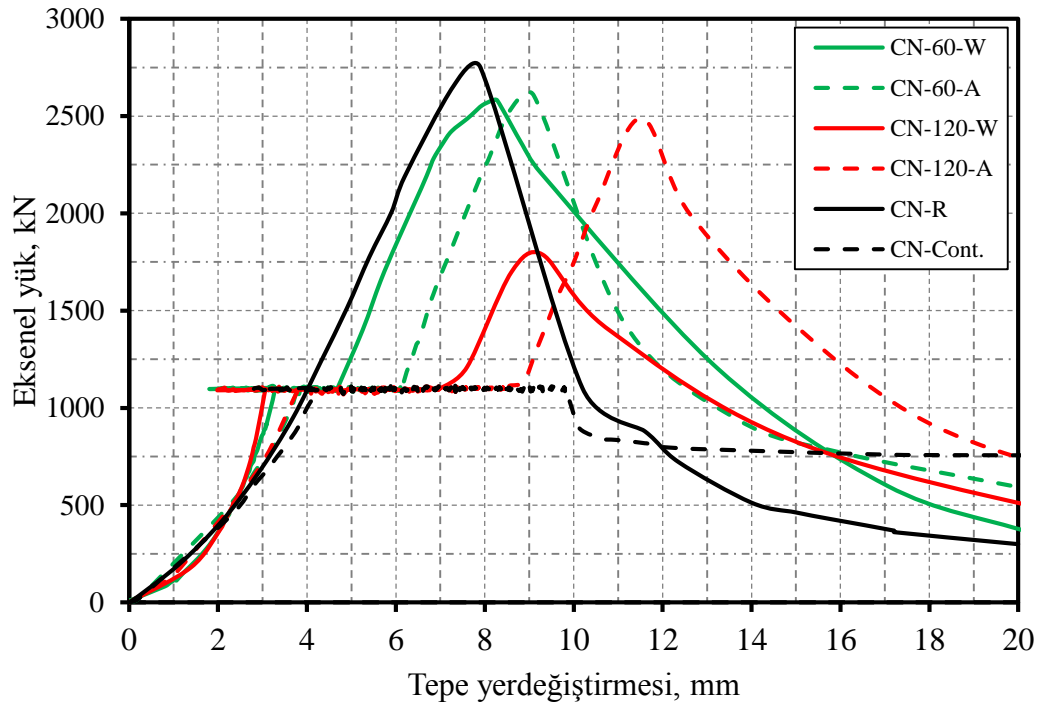
3.2. Deneysel Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması

3.2.1. Yük Taşıma Kapasiteleri

Deney elemanlardan elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri düşük ve normal dayanımlı betonarme kolon numuneler için sırasıyla Şekil 3.44 ve Şekil 3.45'te karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Tüm eğrilerden görüldüğü gibi, ısıtma aşaması başladıktan sonra ısıl genleşmelerinden dolayı sabit eksenel yük etkisi altında ilk başta numunelerde bir miktar boy uzaması (eksi yerdeğiştirme) meydana gelmekte, daha sonra soğutma aşamasının sonuna kadar boy kısalması (artı yerdeğiştirme) değerleri artmaktadır. Farklı ısıtma-soğutma senaryoları uygulandıktan sonra betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitelerindeki değişim % olarak hesaplanmıştır. Numunelerdeki eksenel yük taşıma kapasiteleri ve değişim yüzdeleri aşağıdaki Tablo 3.1'de verilmektedir.



şekil 3.44. CL deney numunelerinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



şekil 3.45. CN deney numunelerinden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

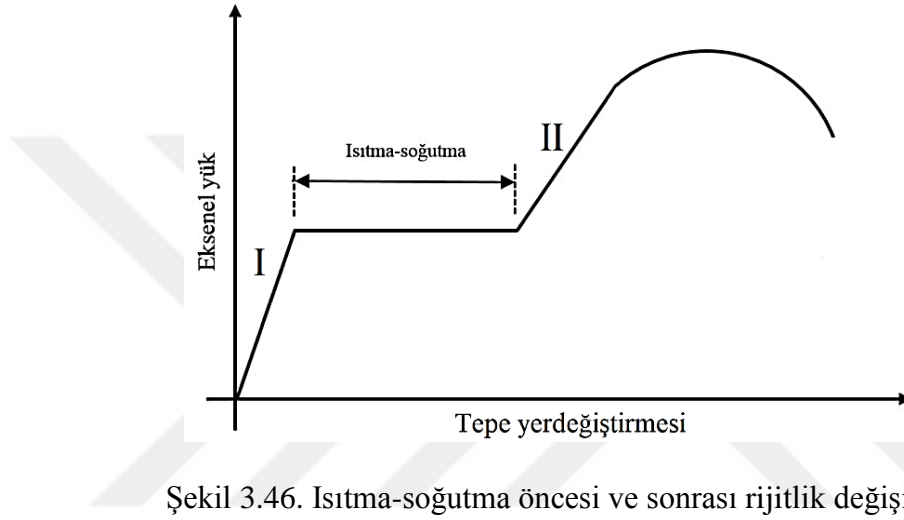
Tablo 3.1. Betonarme kolon numunelerin eksenel yük taşıma kapasitelerinin değişimi

Numune	Eksenel yük taşıma kapasitesi (kN)	Eksenel yük taşıma kapasitesinin azalması (%)
CL-Ref	775	----
CL-30-W	759	%2.0
CL-30-A	764	%1.4
CL-60-W	742	%4.2
CL-60-A	748	%3.5
CN-Ref	2750	----
CN-60-W	2580	%6.2
CN-60-A	2605	%5.3
CN-120-W	1788	%35.0
CN-120-A	2489	%9.5

Yukarıdaki Tablo 3.1'e göre, betonarme kolon numunelerde ısıtma süresi ve soğutma tipinin değişimi kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini etkilemektedir. 30 dakika ısıtılan düşük dayanımlı suyla soğutulan numunenin (CL-30-W) eksenel yük taşıma kapasitesinin azalması aynı numunenin kendiliğinden soğuyan özdeşininkinden (CL-30-A) %0.6 daha fazladır. Bu oran CL-60, CN-60 ve CN-120 numunelerinde sırasıyla %0.7, %0.9 ve %25.5 olarak belirlenmiştir. Normal dayanımlı betonarme kolonların ısı iletkenlik katsayılarının düşük dayanımlı kolonlara göre daha fazla olması nedeniyle bu kolonlar uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında eksenel yük taşıma kapasitelerinde daha fazla düşüş gözlenmiştir. 60 dakika ısıtılmış ve kendiliğinden soğumuş normal dayanımlı numune (CN-60-A) düşük dayanımlı numuneye (CL-60-A) göre %1.8 oranında daha fazla kapasite kaybına uğramıştır. Suyla soğutulanlarda ise bu kayıp oranı %2.0'dir. Hem düşük hem de normal dayanımlı numunelerde ısıtma süresinin artmasıyla yük taşıma kapasitesinin azalma oranı da artmaktadır. Tüm numunelerde ısıtma süresi arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi azalmakta, numunenin suyla soğutulması halinde ise ortaya çıkan ısı şokunun malzemede yıkıcı etkisi de bu azalmayı pekiştirmektedir. Zira yaklaşık oda sıcaklığındaki soğutma suyunun aşırı ısınmış numuneye temas etmesi durumunda ısı şok nedeniyle elemanda hacim büzülmesi ve buhar basıncı etkisi ortaya çıkmakta, bu da malzemede harabiyete neden olmaktadır.

3.2.2. Rijitlik Değişimleri

Farklı ısıtma-soğutma senaryolarındaki kolon rijitlik değişimlerinin hesaplaması için eksenel yük-tepe şekildeğiştirme eğrilerden elde edilen eğrilerin ısıtma-soğutma öncesi ve sonrası eğimleri hesaplanmıştır. Şekil 3.46’da rijitlik değişimlerinin hesaplamalarında kullanılan eğimlerin genel hali gösterilmektedir. Ayrıca betonarme kolon numunelerin rijitlik değişimleri aşağıdaki Tablo 3.2’de verilmektedir.



Şekil 3.46. Isıtma-soğutma öncesi ve sonrası rijitlik değişimleri

Tablo 3.2. Betonarme kolon numunelerin rijitlik değişimleri

Numune	I. Bölgenin rijitliği (Isıtma öncesi) kN/mm	II. Bölgenin rijitliği (Soğutma sonrası) kN/mm	Rijitlik azalması (%)
CL-30-W	206	197	%4.4
CL-30-A	205	198	%3.4
CL-60-W	176	156	%11.4
CL-60-A	139	130	%6.5
CN-60-W	762	625	%18.0
CN-60-A	588	534	%9.2
CN-120-W	747	489	%34.5
CN-120-A	562	478	%15.0

Yukarıdaki Tablo 3.2’den, hem düşük hem de normal dayanımlı betonarme kolon numunelerde kendiliğinden soğuyan numunelerin rijitlik değişimlerinin suyla soğutulanlardan daha az olduğu görülmektedir. 30 dakika ısıtılan düşük dayanımlı suyla soğutulan numunenin (CL-30-W) rijitlik kaybı aynı numunenin kendiliğinden soğuyan özdeşinin (CL-30-A) rijitlik kaybından %1.0 daha fazladır. Bu oran CL-60, CN-60 ve

CN-120 numunelerinde sırasıyla %4.9, %8.8 ve %14.5 olarak hesaplanmıştır. Hem düşük hem de normal dayanımlı numunelerde ısıtma süresi arttıkça rijitlik azalması da artmıştır. Suyla soğutulan numuneler kendiliğinden soğuyan numunelere göre de daha fazla rijitlik azalması göstermişlerdir. Bu olayın nedeni de ısıl şok etkisi olarak açıklanabilmektedir. Normal dayanımlı betonarme kolon numunelerinin rijitlik değişimleri düşük dayanımlı numunelere göre daha fazla olmaktadır. Bu durum normal dayanımlı numunelerinin ısıl iletkenlik katsayılarının düşük dayanımlı numunelere göre daha fazla olması ile açıklanabilmektedir. 60 dakika ısıtılmış ve kendiliğinden soğumuş normal dayanımlı numune (CN-60-A) düşük dayanımlı numuneye (CL-60-A) göre %2.7 daha fazla rijitlik kaybına uğramıştır. Suyla soğutulanlarda ise bu kayıp %6.6'dır.

3.2.3. Yüzey Erozyonu ve Kabuk Atma Olayı

Son yıllarda yapılan pek çok araştırmalara göre betonarme elemanlardaki kabuk atma olayı yüklenmemiş küçük numuneler için kendiliğinden ve sadece boşluk basıncı nedeniyle oluşsa bile, yük etkisine maruz büyük ve daha gerçekçi numuneler için, hem ısıl gerilmeler hemde boşluk basıncının birlikte dikkate alınması olarak gözükmektedir. Bu olay, dış yüklere, yapı elemanının boyutlarına, betonun tipine ve nem içeriğine bağlı olarak etkilenmektedir. Deney sonuçları, hem düşük hem de normal dayanımlı betonarme kolonlarda, ısıl gerilme ve boşluk basıncının birlikte olduğu zaman, daha şiddetli kabuk atmaların oluştuğunu ortaya koyulmuştur. Çalışmada, tüm numuneler iç nemin azalması amacıyla deney öncesi 90 gün bekletilmişler ve genel olarak ısıtma aşaması başladıktan ilk 20 dakika sonra numunelerin iç suyu tamamen buharlaşmıştır. Isıtma aşaması başladıktan sonra normal dayanımlı numunelerde kabuk atma olayı meydana gelmesine rağmen düşük dayanımlı numunelerde çok ciddi ve belirgin kabuk atmalar gözükmemiştir. Bunun nedeni, normal dayanımlı betonun ısıl iletkenlik katsayısının düşük dayanımlı betonunkinden daha fazla oluşudur. Düşük dayanımlı numunelerde 4 saatlik ısıtma süresince kabuk atma gözükmezken, normal dayanımlı betonarme numunelerde kabuk atmalar ilk dakikalardan itibaren, fırın sıcaklığı yaklaşık 600°C'ye ulaştığında, başlayıp yaklaşık 600°C'ye ulaşıncaya kadar küçük ve büyük patlamalar şeklinde devam etmiştir. Genel olarak kabuk atma olayları 5 ila 10 dakika arasında sürmüştür. Su buhar basıncı ve ısıl gerilmeler etkisi altında meydana gelen kabuk atmalar sıkça numunelerin köşelerinde gözükmektedir. Şekil 3.47'de numunelerdeki köşe kabuk atmalardan bazı görüntüler verilmektedir.



Şekil 3.47. Numunelerdeki genel kabuk atma görüntüleri

Isıtma aşaması bittikten hemen sonra oda sıcaklığındaki soğuk suyla temas eden numune yüzeylerinde ortaya çıkan ısıl şok etkisi nedeniyle yaklaşık 15 mm derinliğe kadar soyulma (erozyon) meydana gelmiştir. Isıl şok etkisinde meydana gelen bu yüzeysel soyulma olayı sadece su ile soğutulan kolon numunelerde gözükmiştir. Şekil 3.48’de sıcak betonarme kolon numunesinin su ile soğutulduktan sonra yüzey erozyonuna uğramış hali görülmektedir.

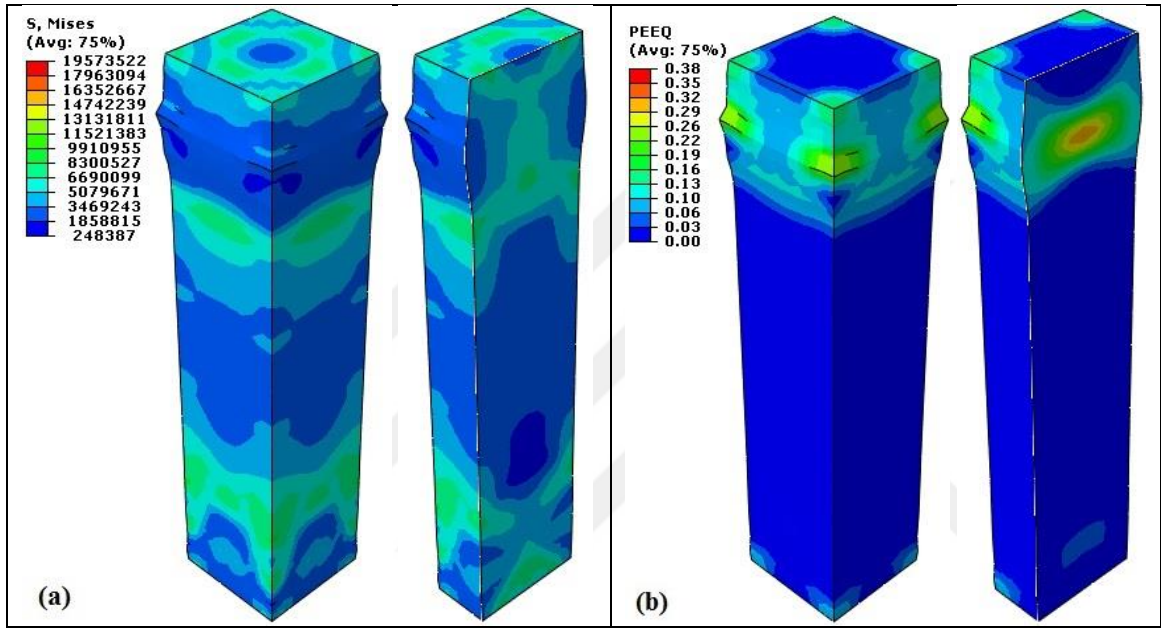


Şekil 3.48. Betonda ısıl şok etkisinde oluşan yüzeysel soyulma

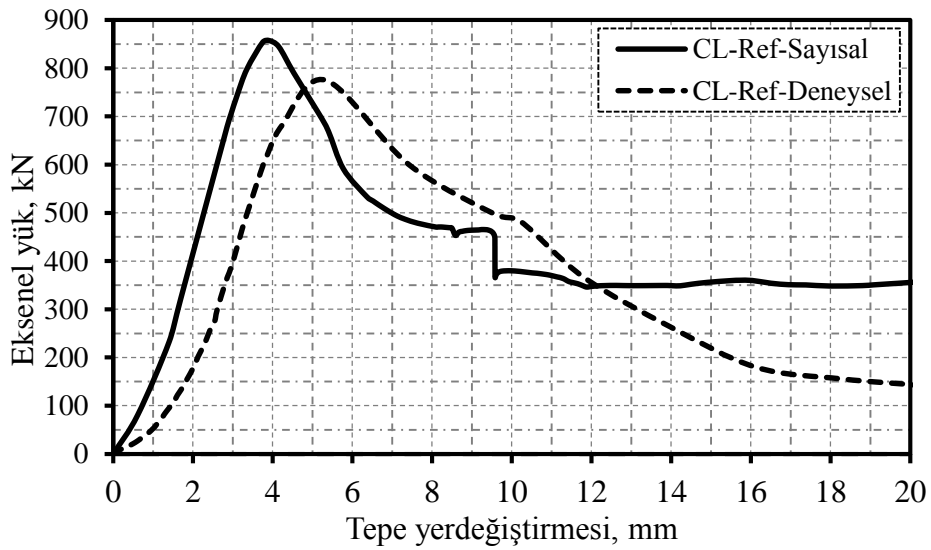
3.3. Kolonların Sonlu Eleman Analizi Sonuçları

3.3.1. CL-R Kolonu

CL-R kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı ve plastik şekildeğiştirme Şekil 3.49'da ve eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.50'de gösterilmektedir.



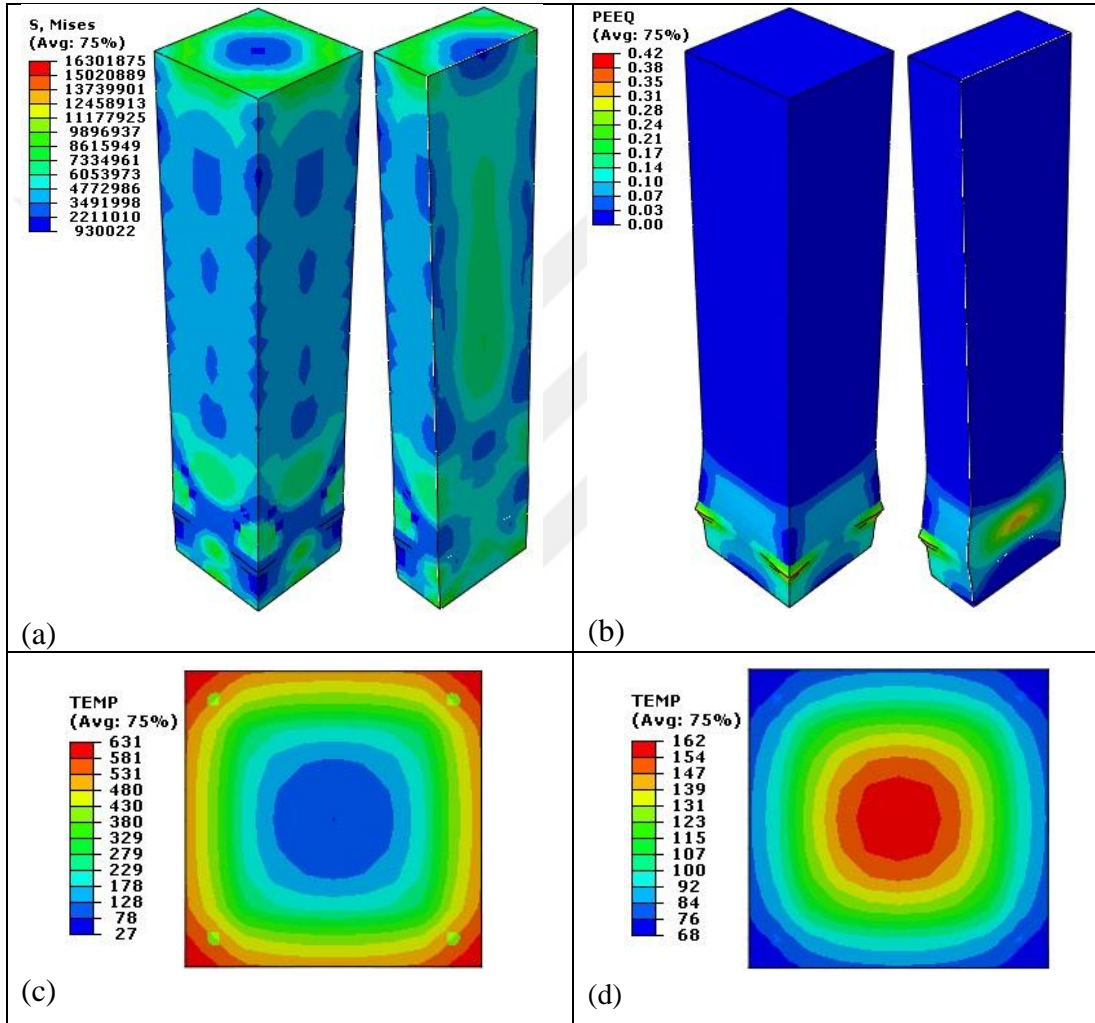
Şekil 3.49. CL-R numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi



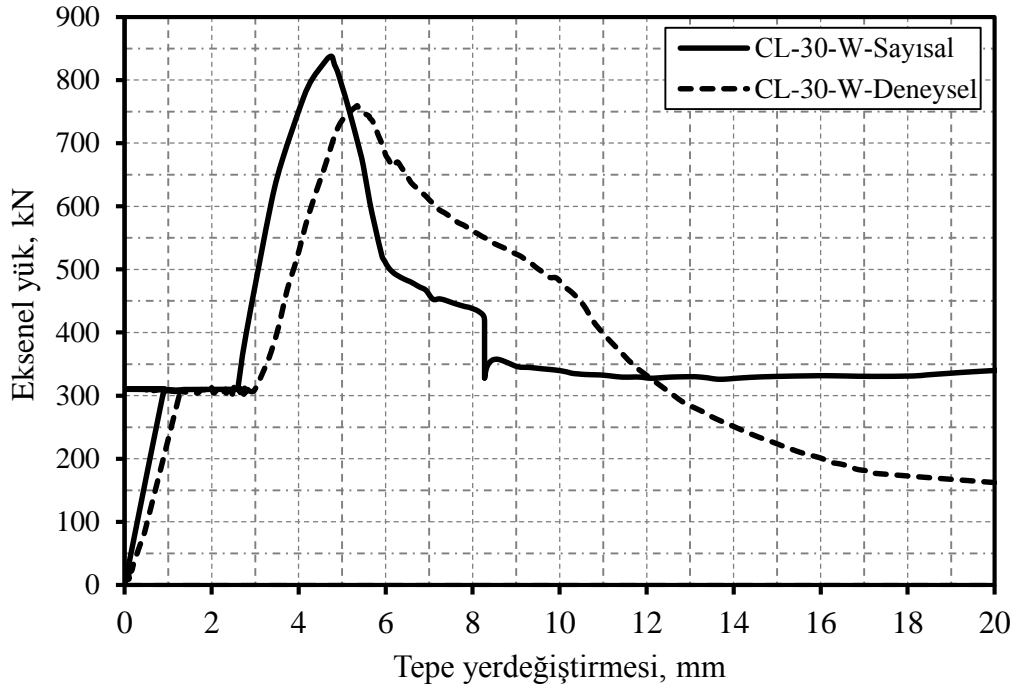
Şekil 3.50. CL-R numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

3.3.2. CL-30-W Kolonu

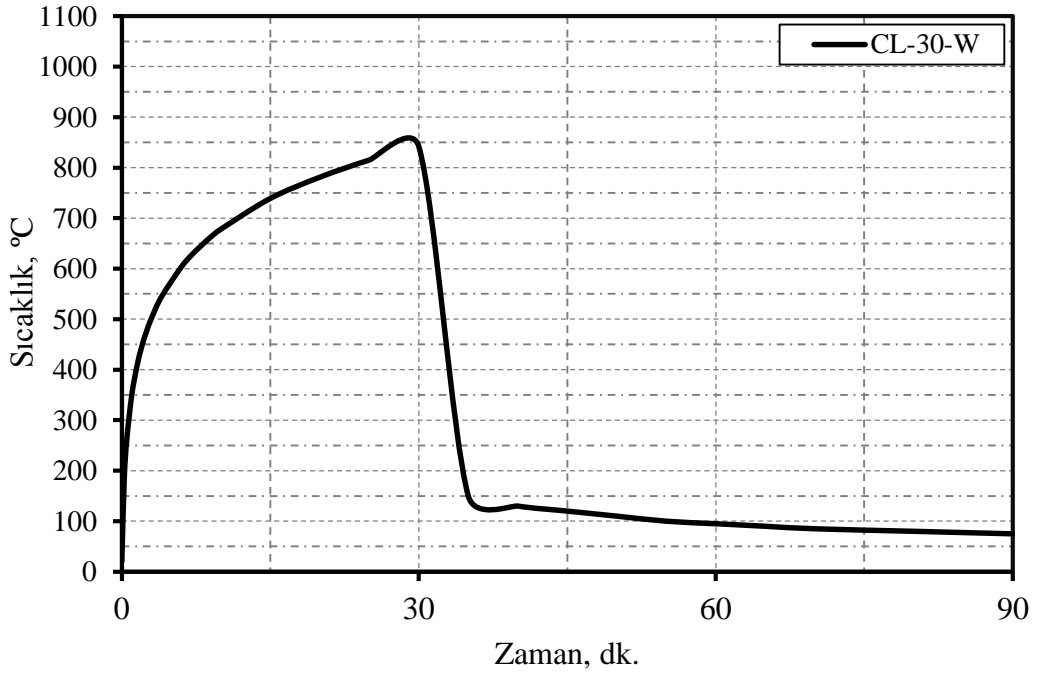
CL-30-W kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.51’de verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.52 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.53’te gösterilmektedir.



Şekil 3.51. CL-30-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



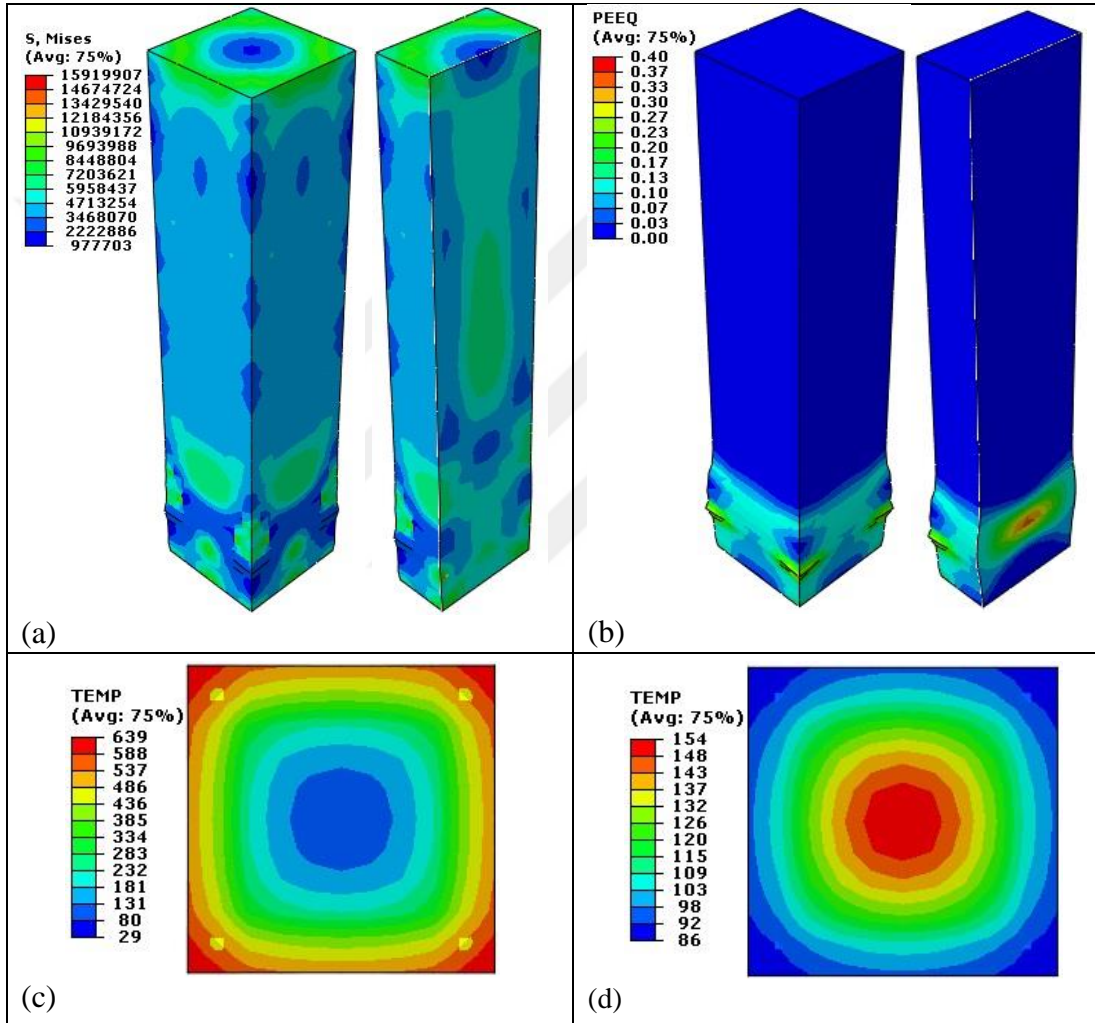
şekil 3.52. CL-30-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



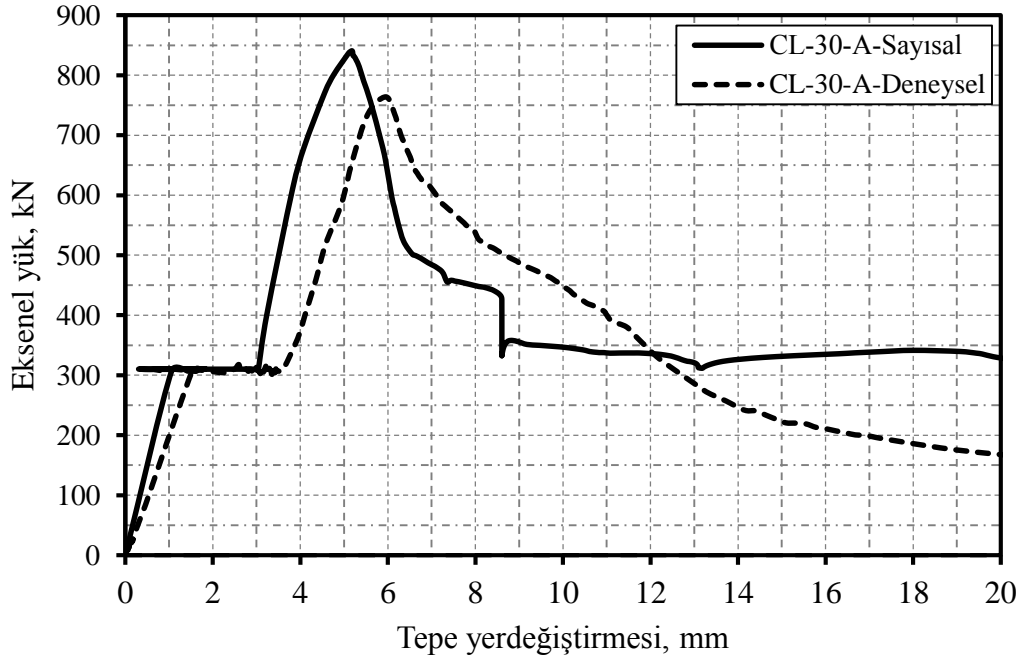
şekil 3.53. CL-30-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.3. CL-30-A Kolonu

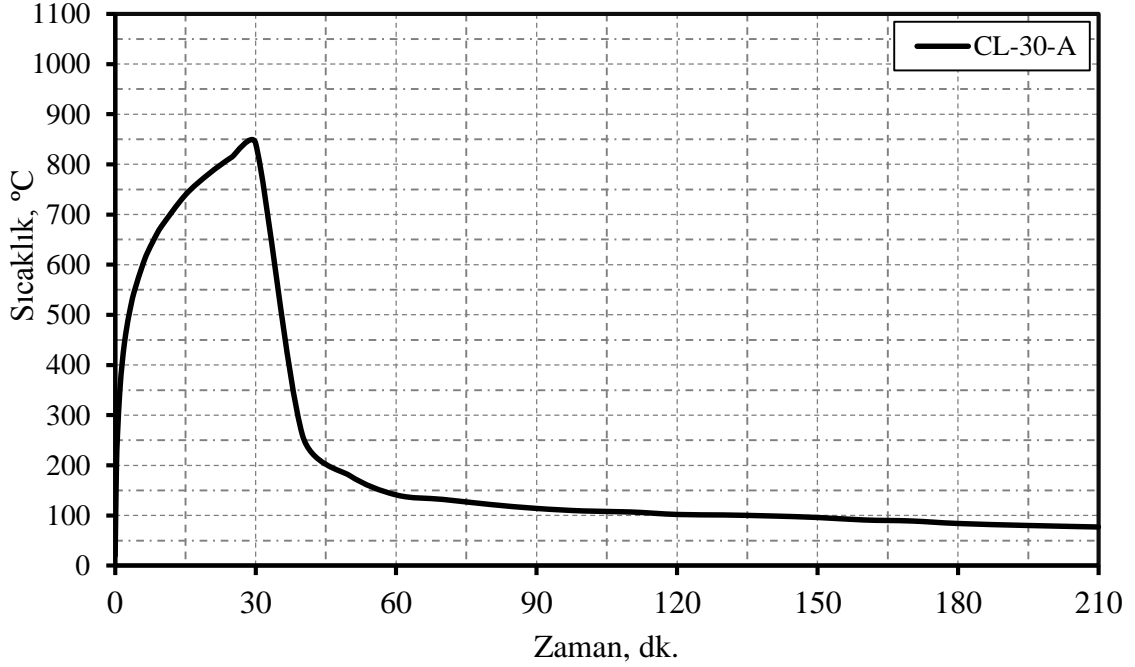
CL-30-A kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.54'te verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.55 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.56'da gösterilmektedir.



Şekil 3.54. CL-30-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



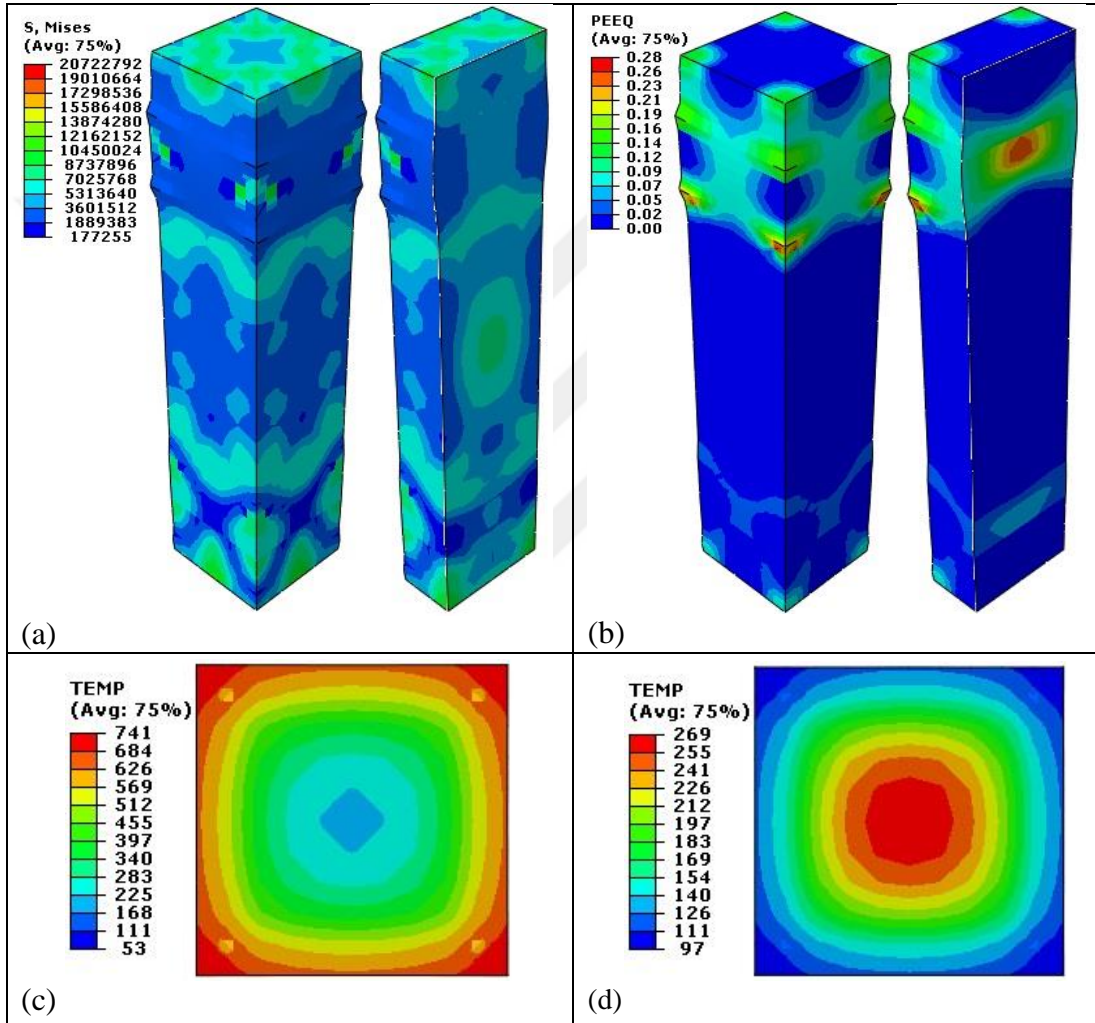
şekil 3.55. CL-30-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



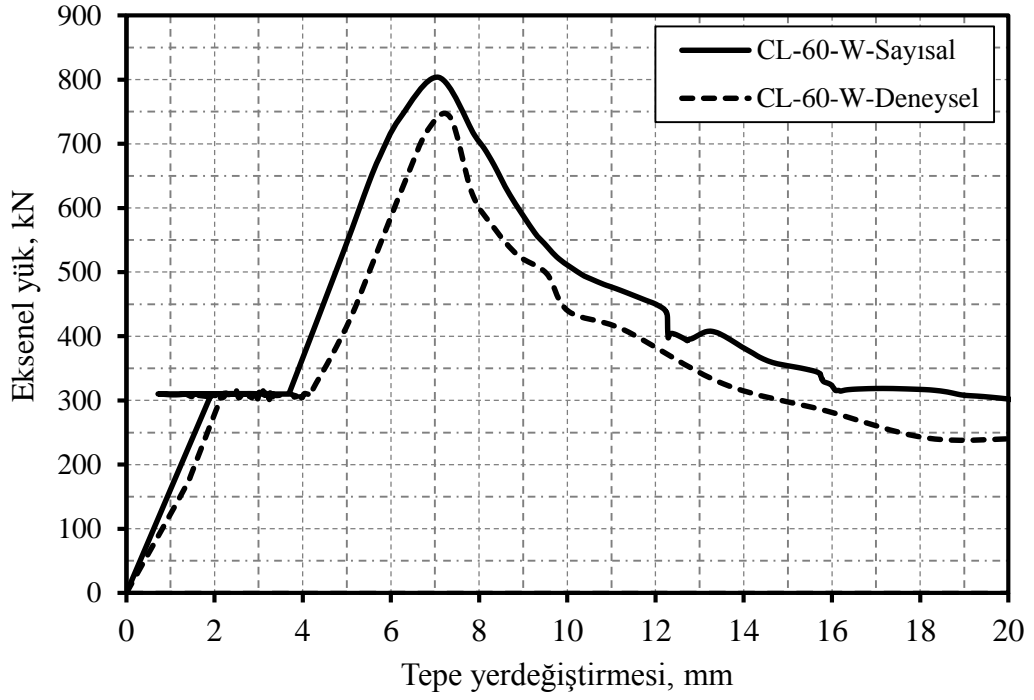
şekil 3.56. CL-30-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.4. CL-60-W Kolonu

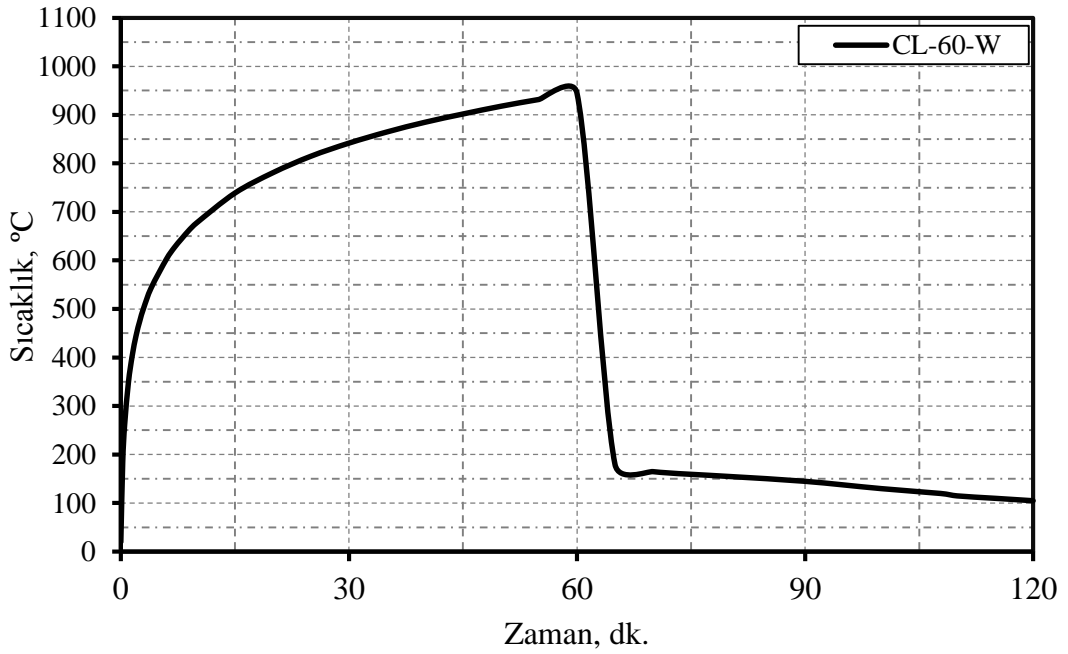
CL-60-W kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.57’de verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.58 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.59’da gösterilmektedir.



Şekil 3.57. CL-60-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



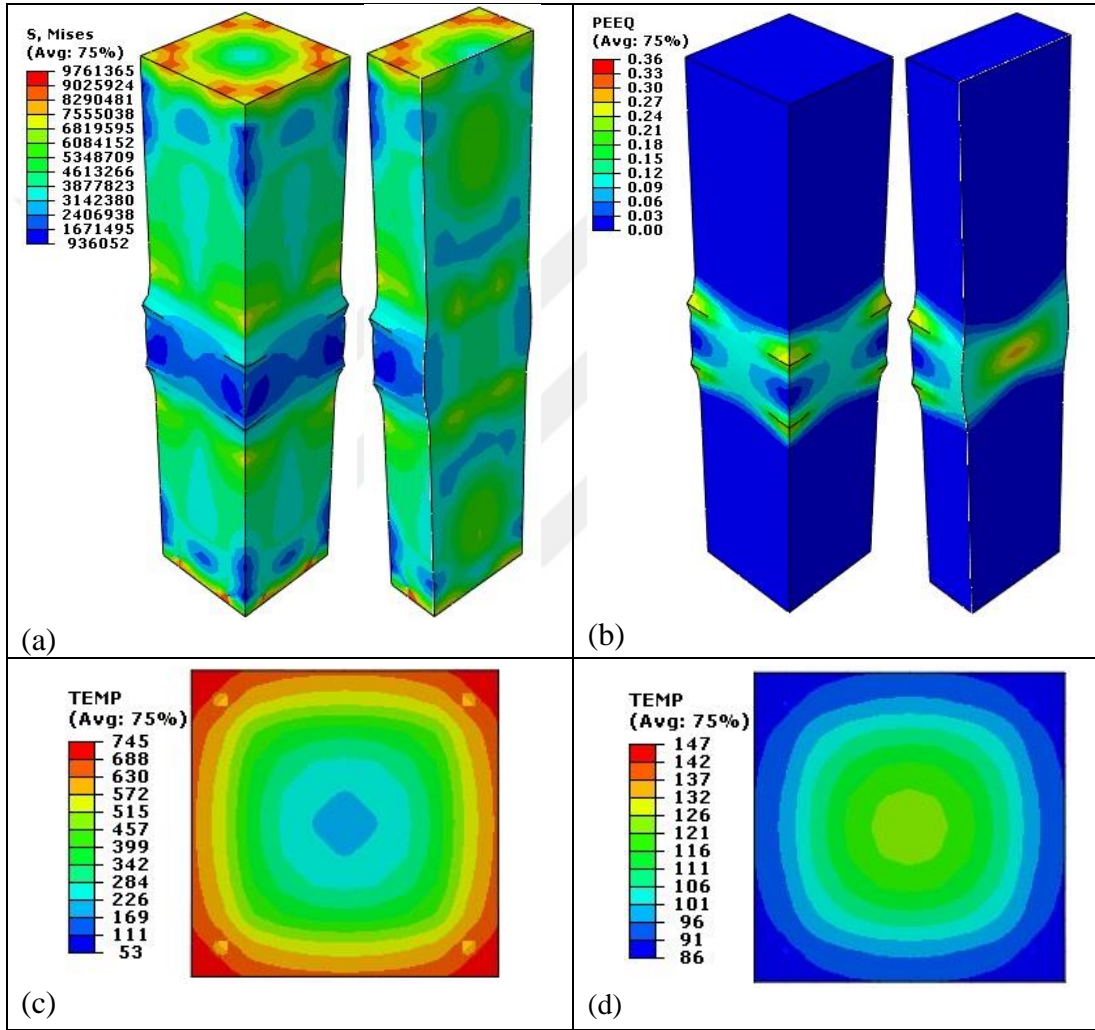
şekil 3.58. CL-60-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



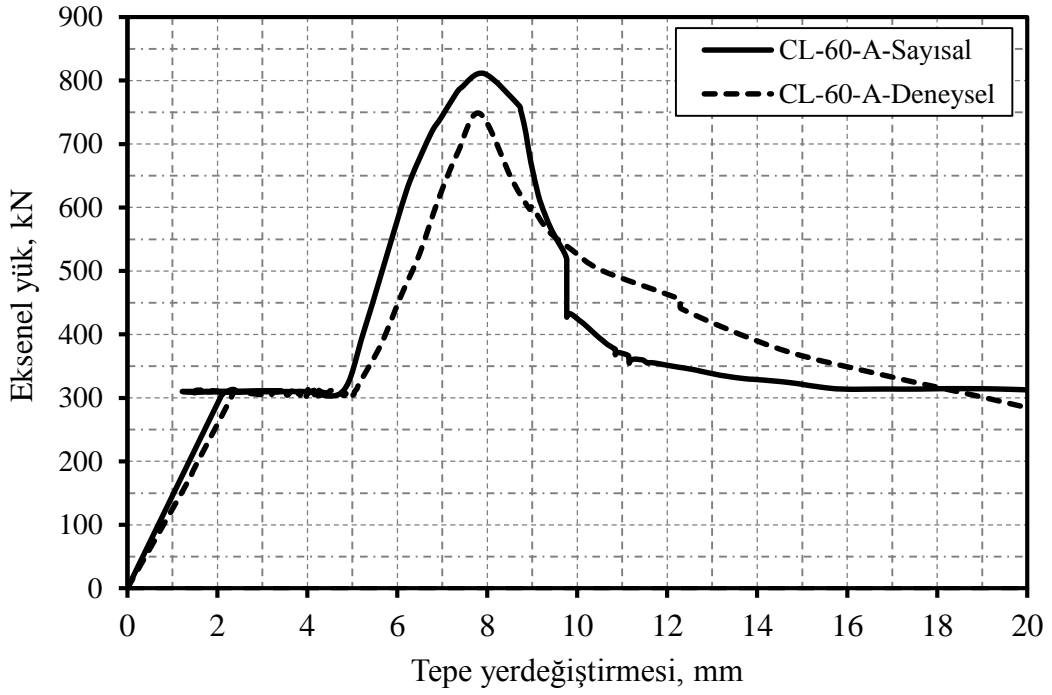
şekil 3.59. CL-60-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.5. CL-60-A Kolonu

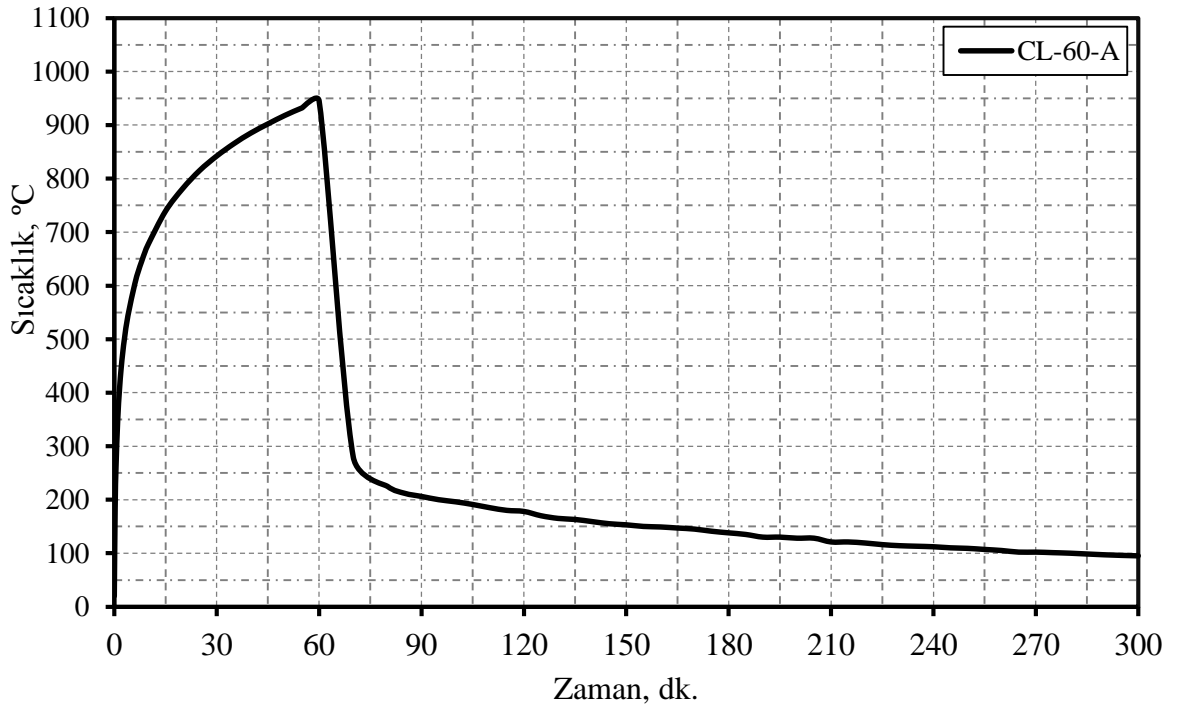
CL-60-A kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekildeğiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.60'da verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.61 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.62'de gösterilmektedir.



Şekil 3.60. CL-60-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



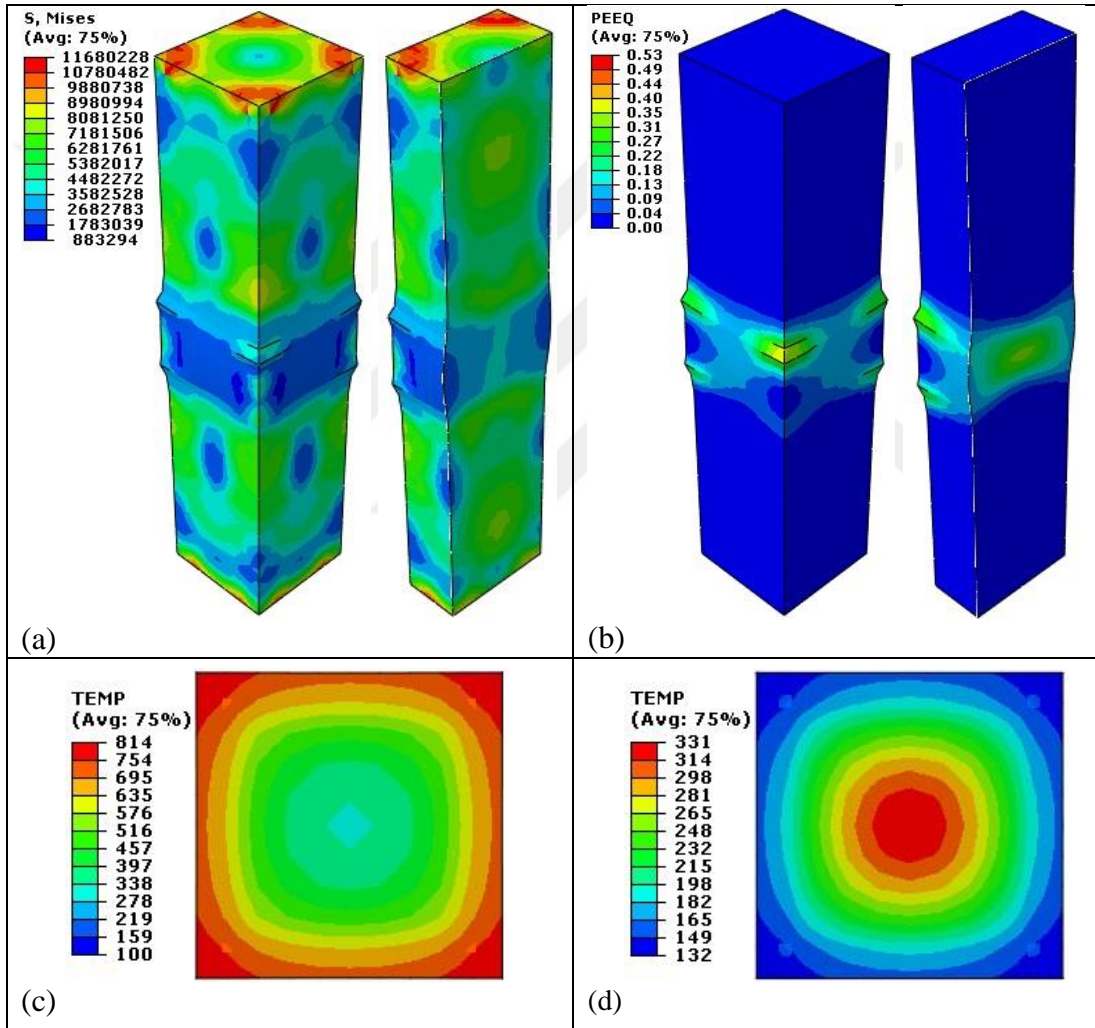
Şekil 3.61. CL-60-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



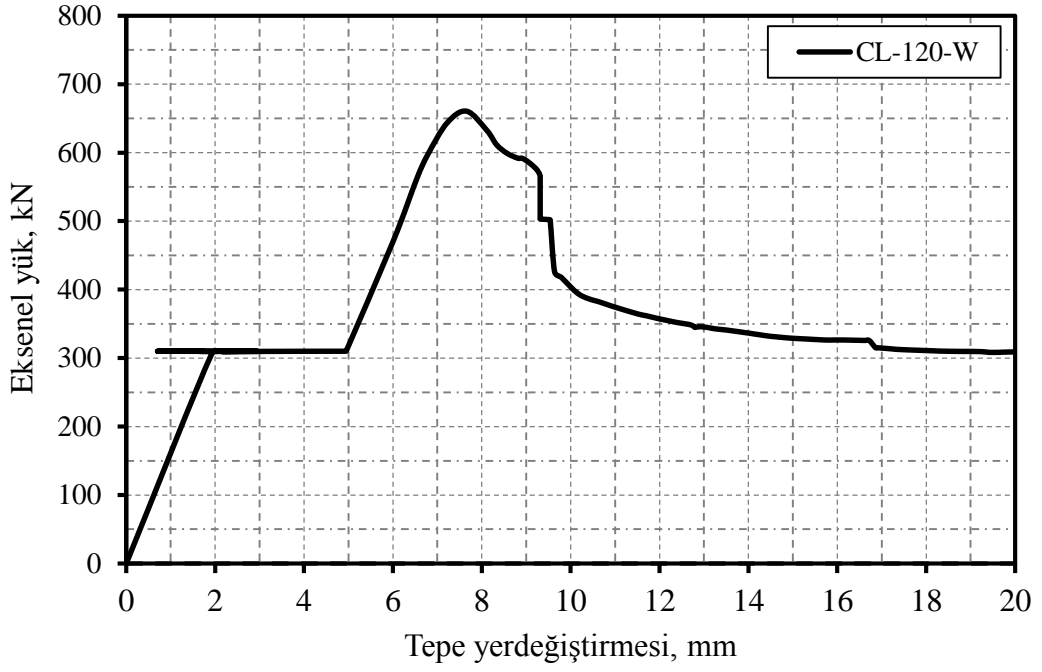
Şekil 3.62. CL-60-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.6. CL-120-W Kolonu

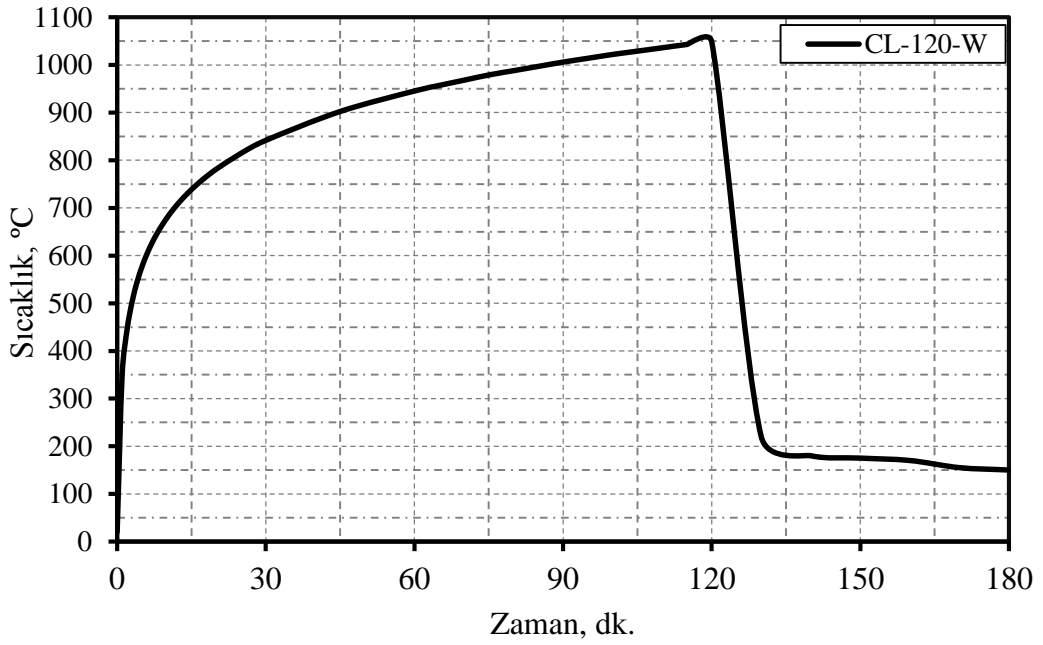
CL-120-W kolonu deneysel olarak incelenmemiş, sadece sayısal olarak modellenerek analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.63'te verilmektedir. Ayrıca eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.64 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.65'te gösterilmektedir.



Şekil 3.63. CL-120-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirme, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



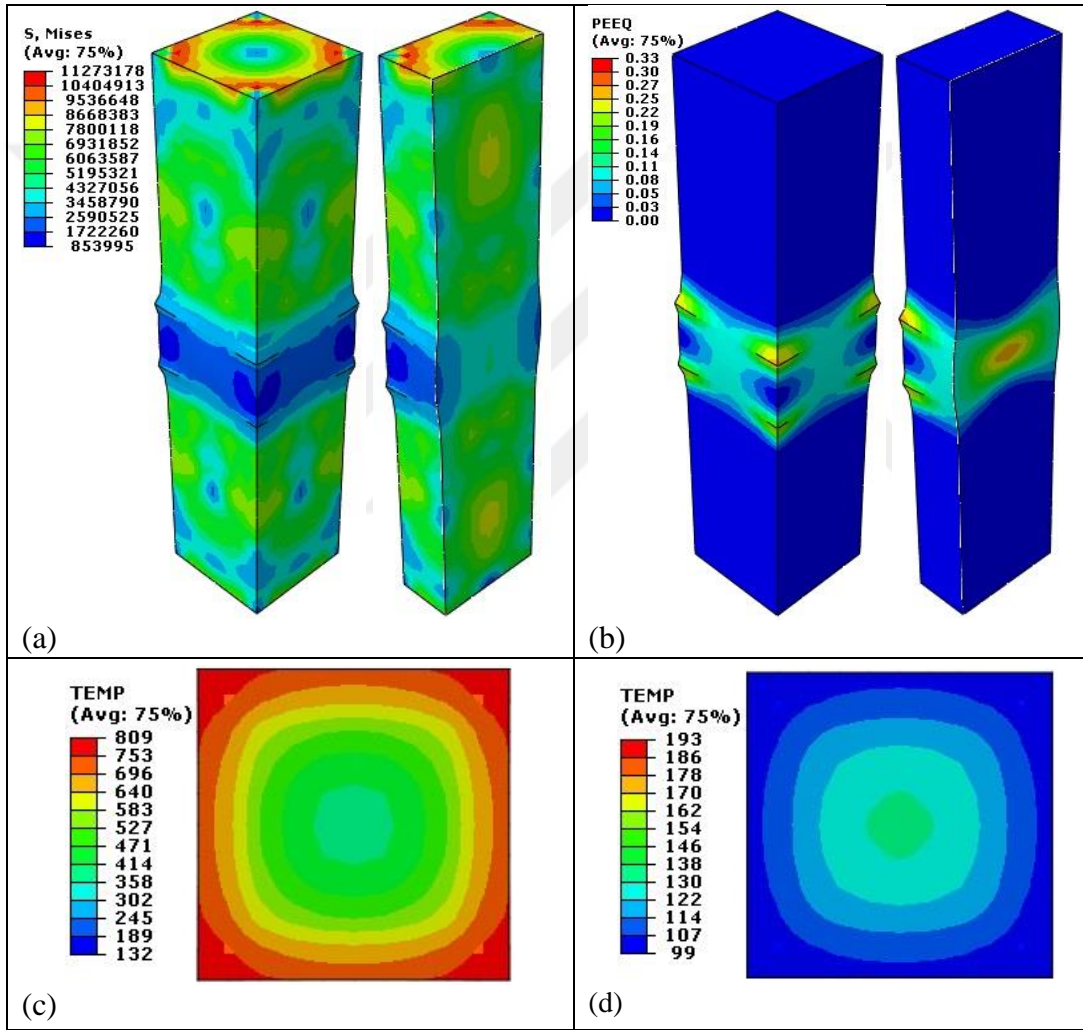
Şekil 3.64. CL-120-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



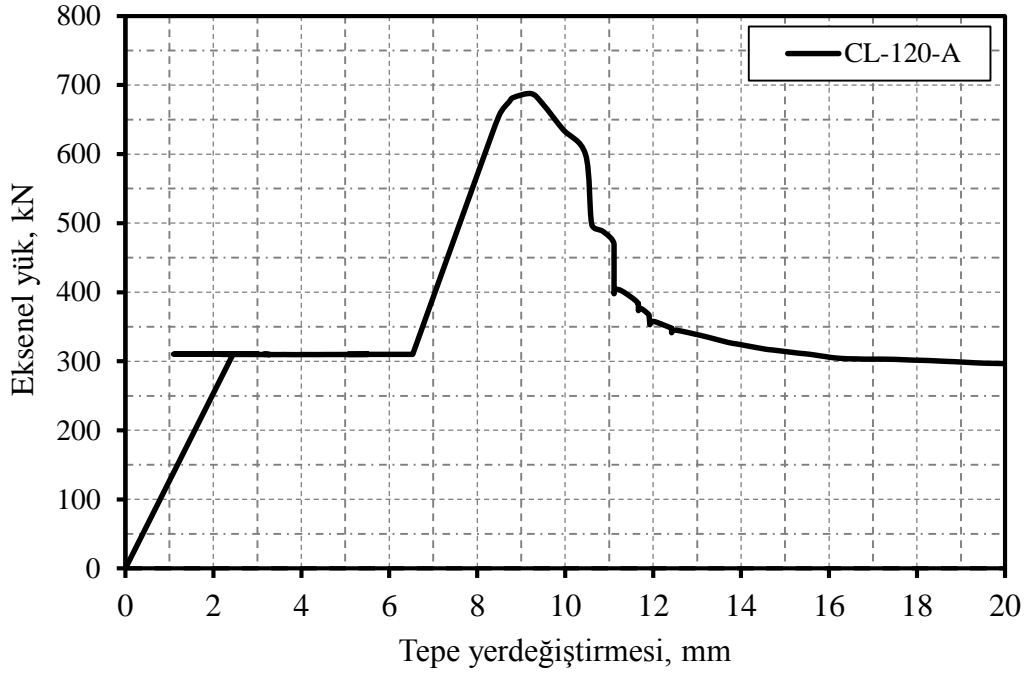
Şekil 3.65. CL-120-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.7. CL-120-A Kolonu

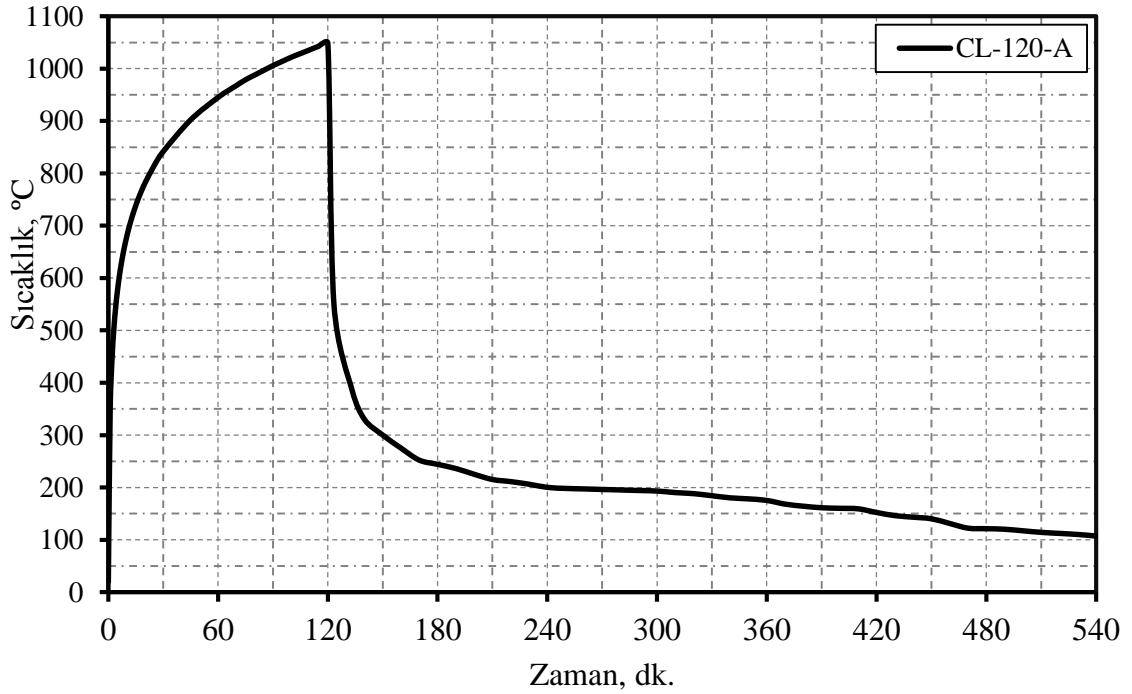
CL-120-A kolonu deneysel olarak incelenmemiş, sadece sayısal olarak modellenerek analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.66’da verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.67 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.68’de gösterilmektedir.



Şekil 3.66. CL-120-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



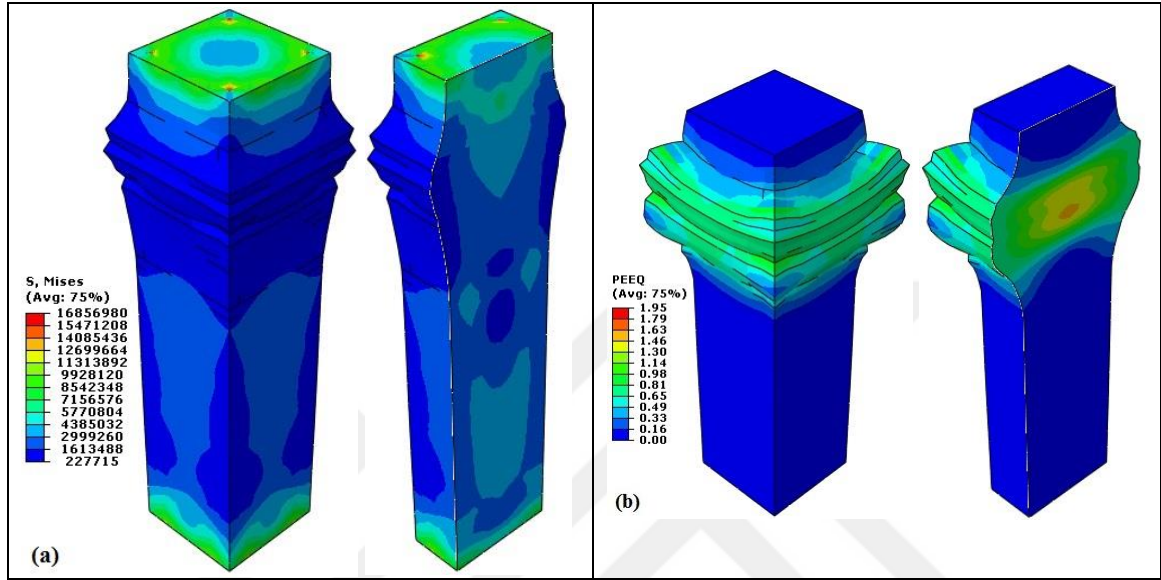
şekil 3.67. CL-120-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



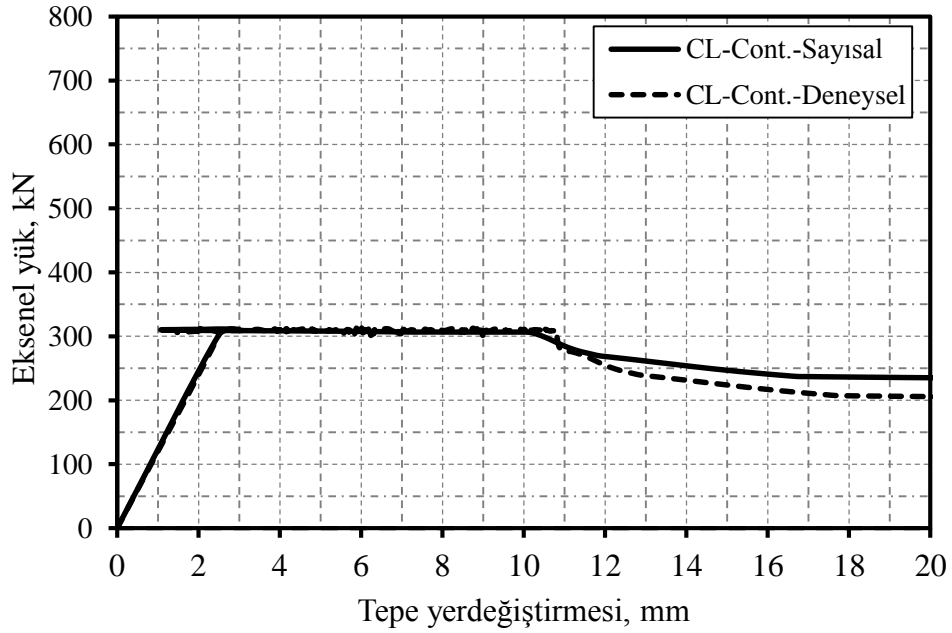
şekil 3.68. CL-120-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.8. CL-Cont. Kolonu

CL-Cont. kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı ve plastik şekildeğiştirme Şekil 3.69'da ve eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.70'de gösterilmektedir.



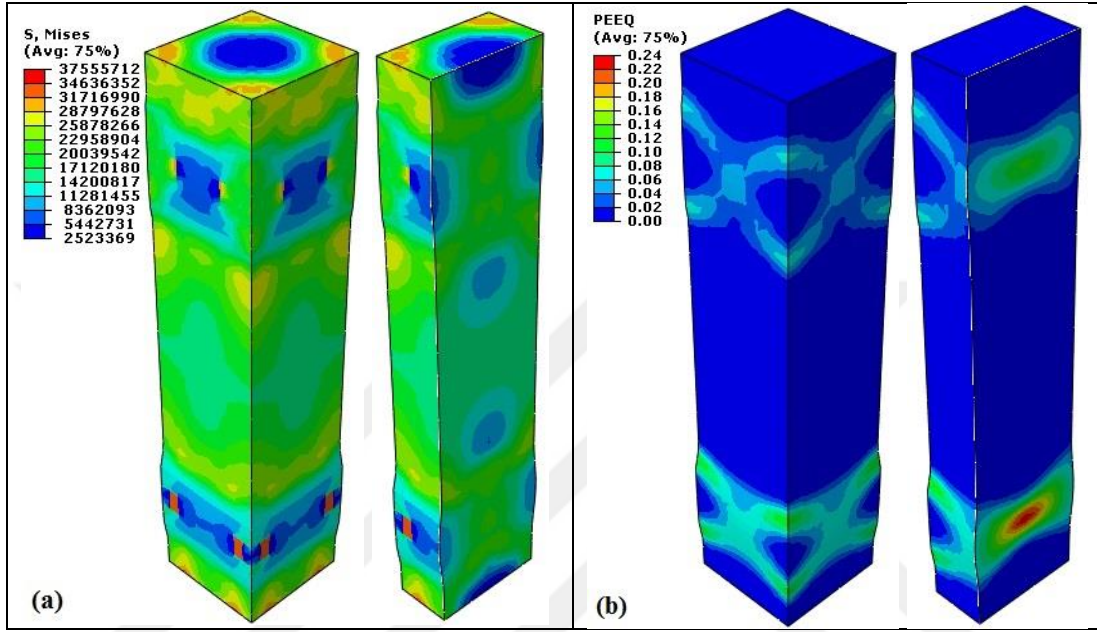
Şekil 3.69. CL-Cont. numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi



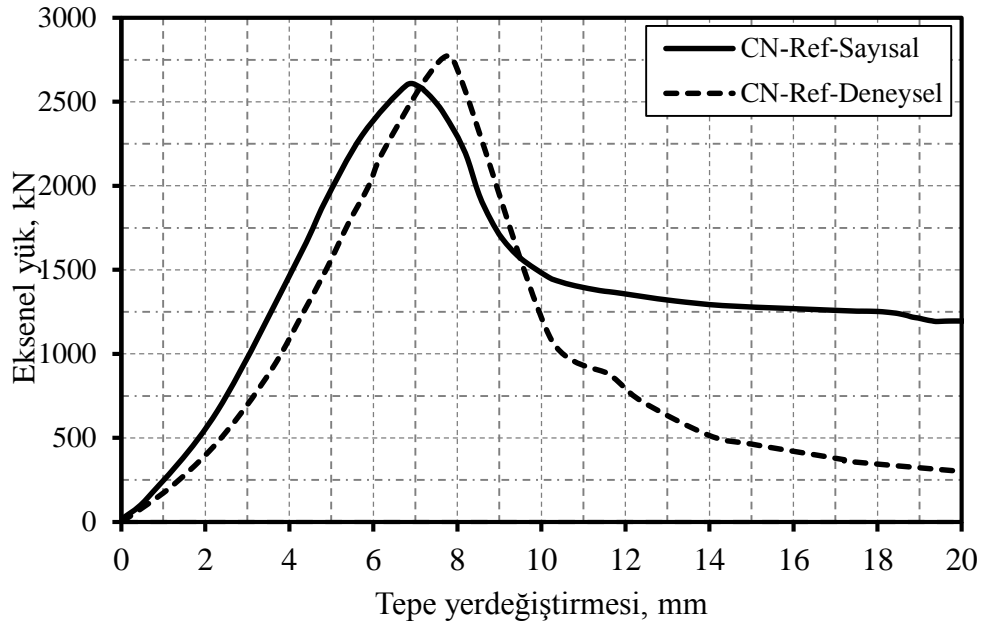
Şekil 3.70. CL-Cont. numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

3.3.9. CN-R Kolonu

CN-R kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı ve plastik şekildeğiştirme Şekil 3.71’de ve eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.72’de gösterilmektedir.



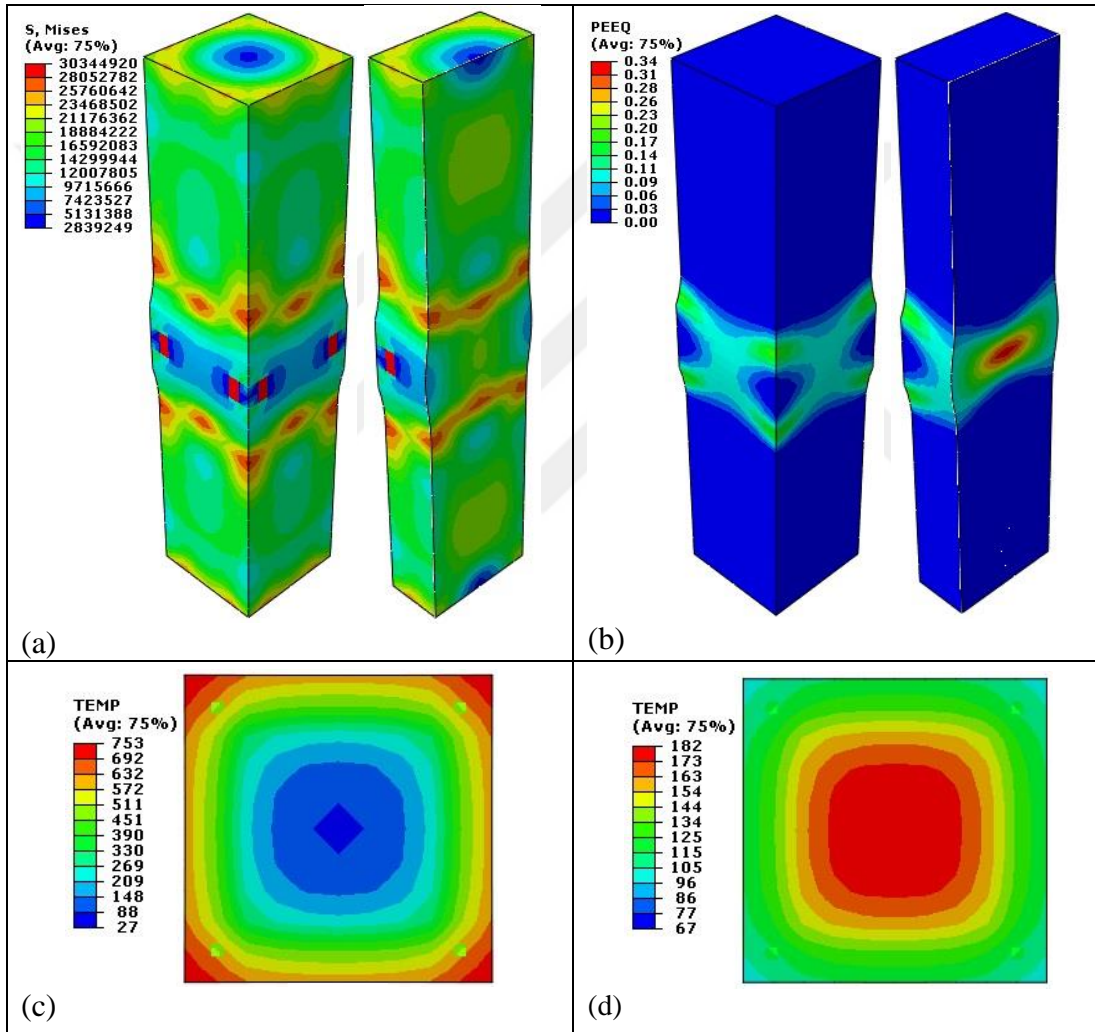
Şekil 3.71. CN-R numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirmesi



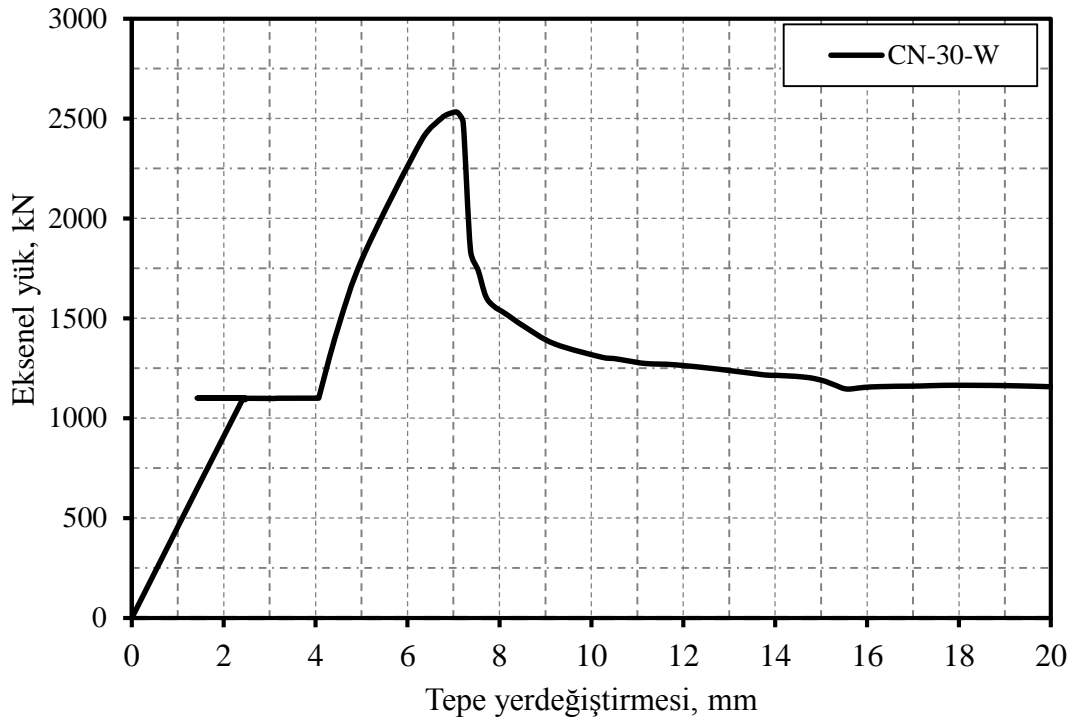
Şekil 3.72. CN-R numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

3.3.10. CN-30-W Kolonu

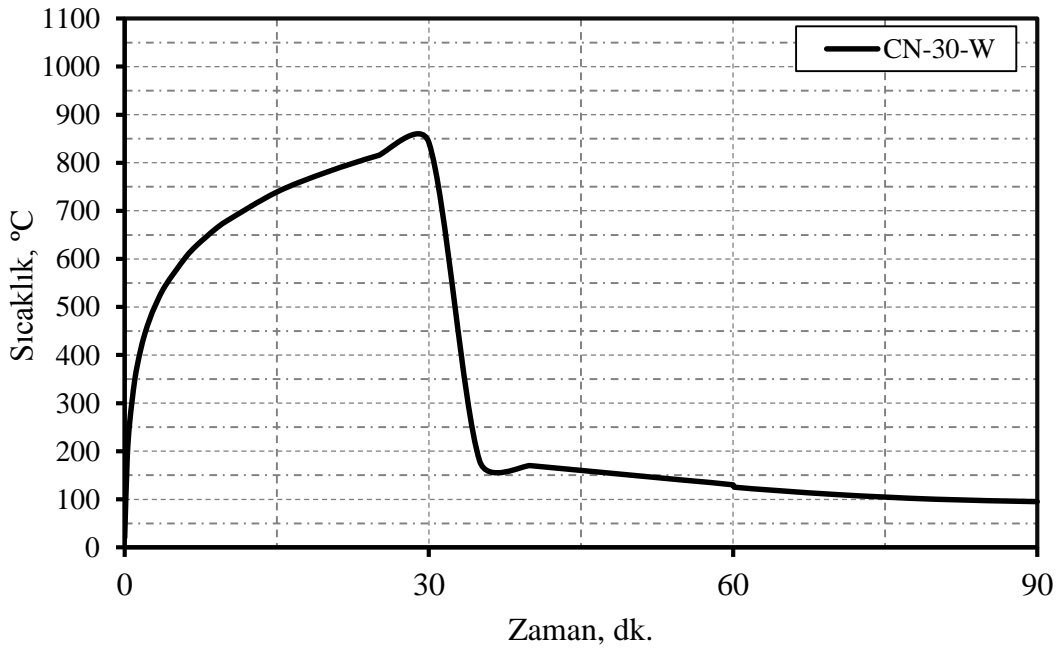
CN-30-W kolonu deneysel olarak incelenmemiş, sadece sayısal olarak modellenerek analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.73'te verilmektedir. Ayrıca eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.74 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.75'te gösterilmektedir.



Şekil 3.73. CN-30-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



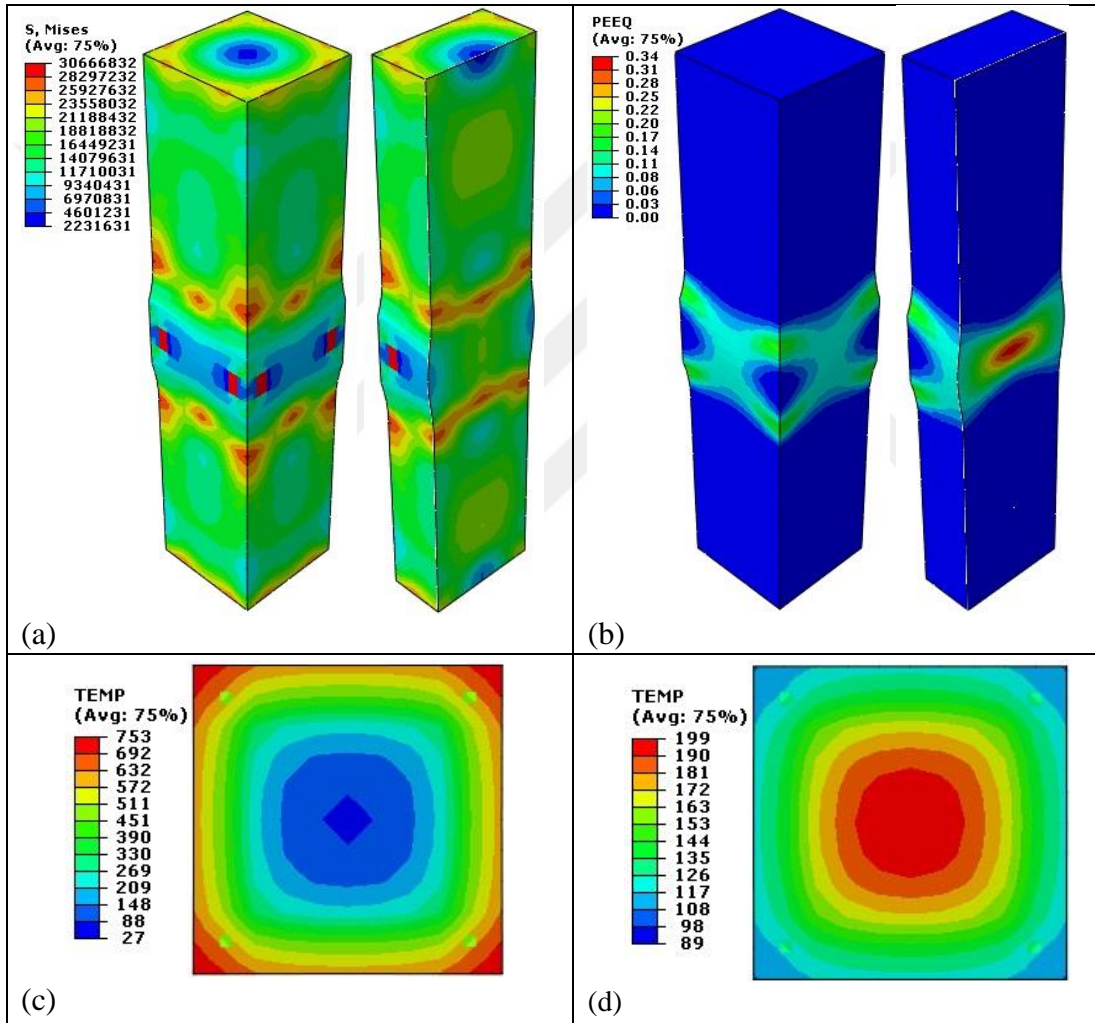
Şekil 3.74. CN-30-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



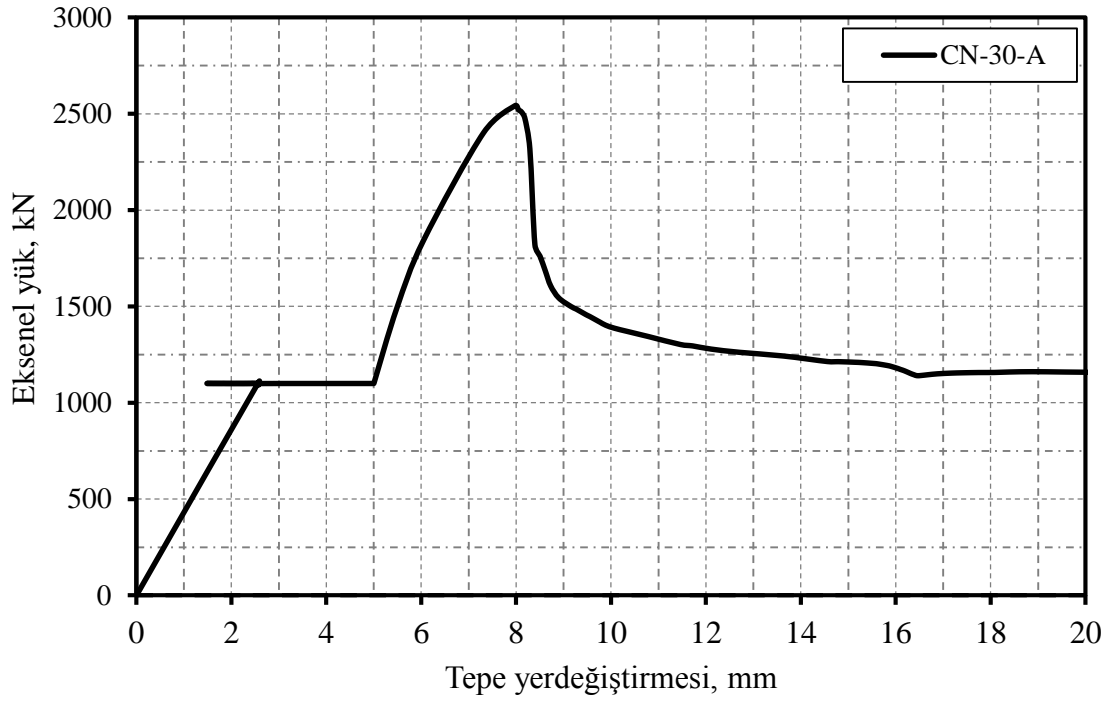
Şekil 3.75. CN-30-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.11. CN-30-A Kolonu

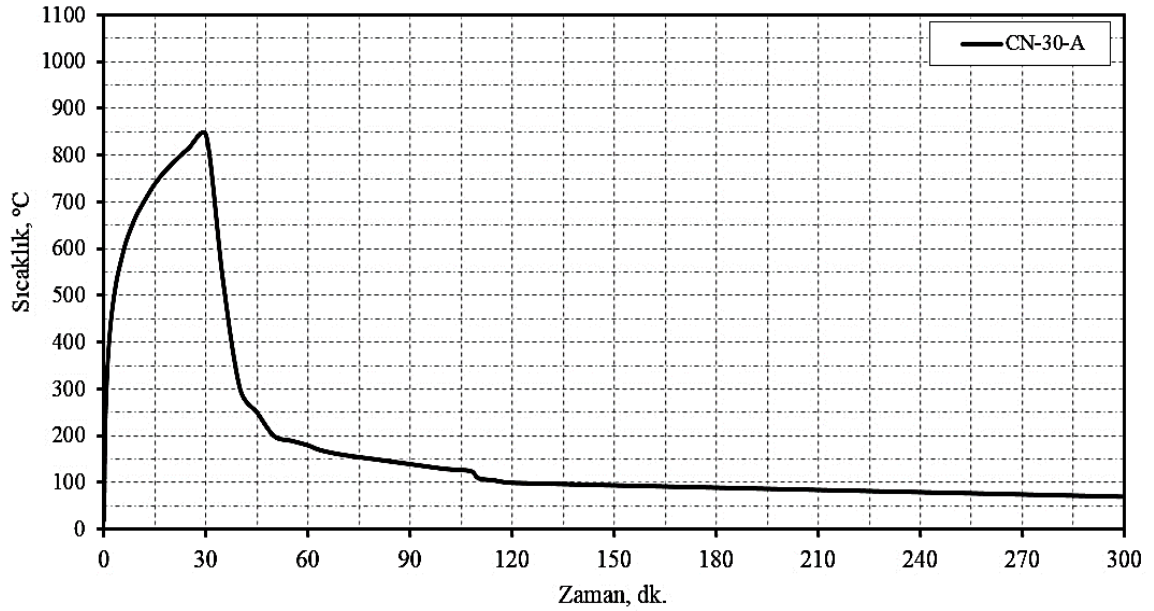
CN-30-A kolonu deneysel olarak incelenmemiş, sadece sayısal olarak modellenerek analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekildeğiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.76’da verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.77 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.78’de gösterilmektedir.



Şekil 3.76. CN-30-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirme, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



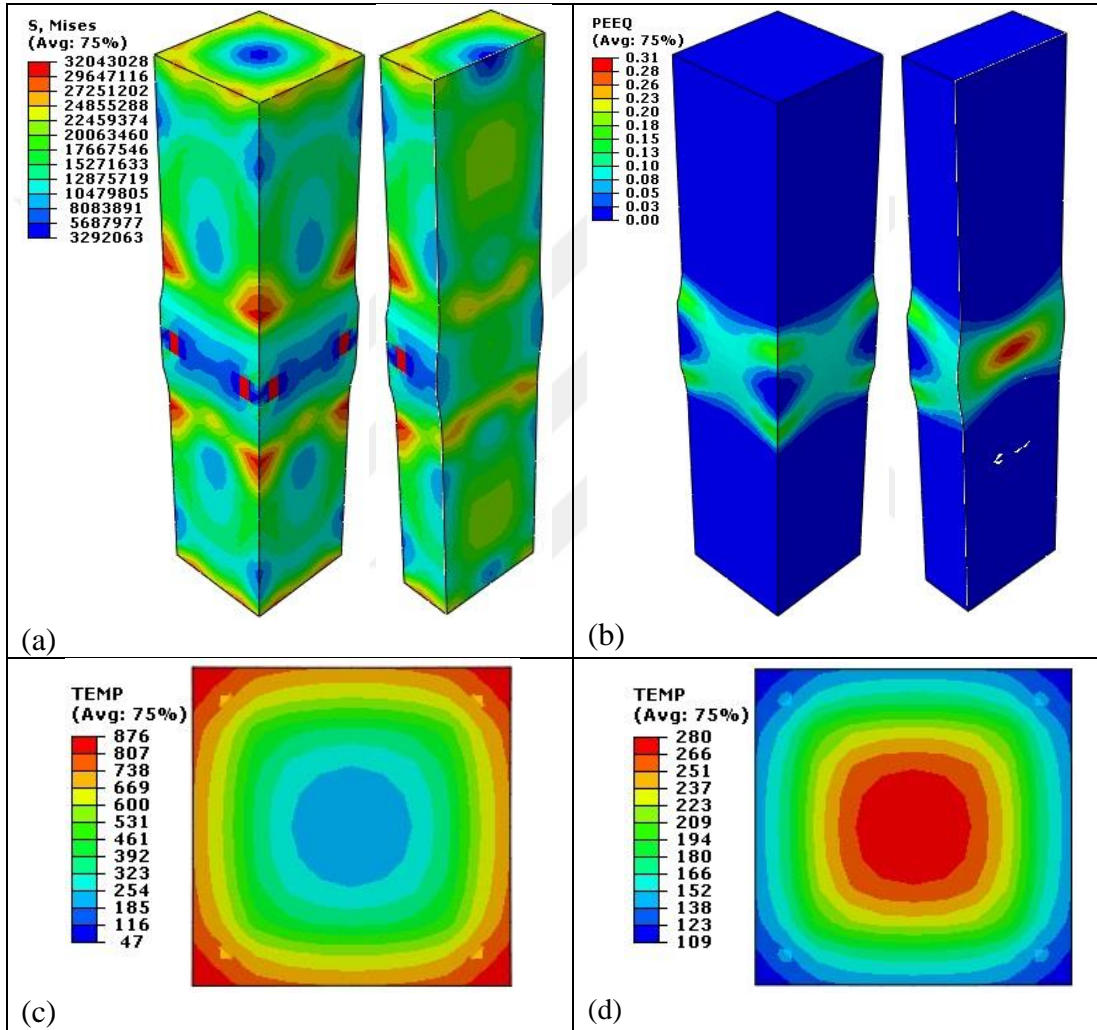
Şekil 3.77. CN-30-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



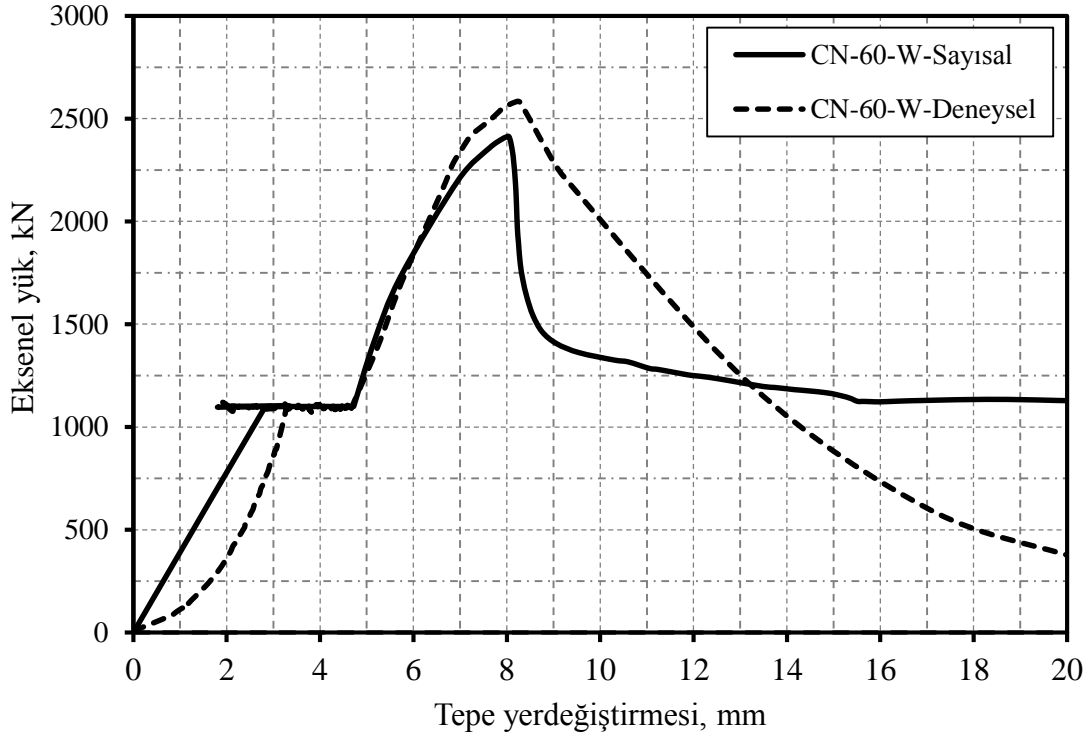
Şekil 3.78. CN-30-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.12. CN-60-W Kolonu

CN-60-W kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.79’de verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.80 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.81’de gösterilmektedir.



Şekil 3.79. CN-60-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



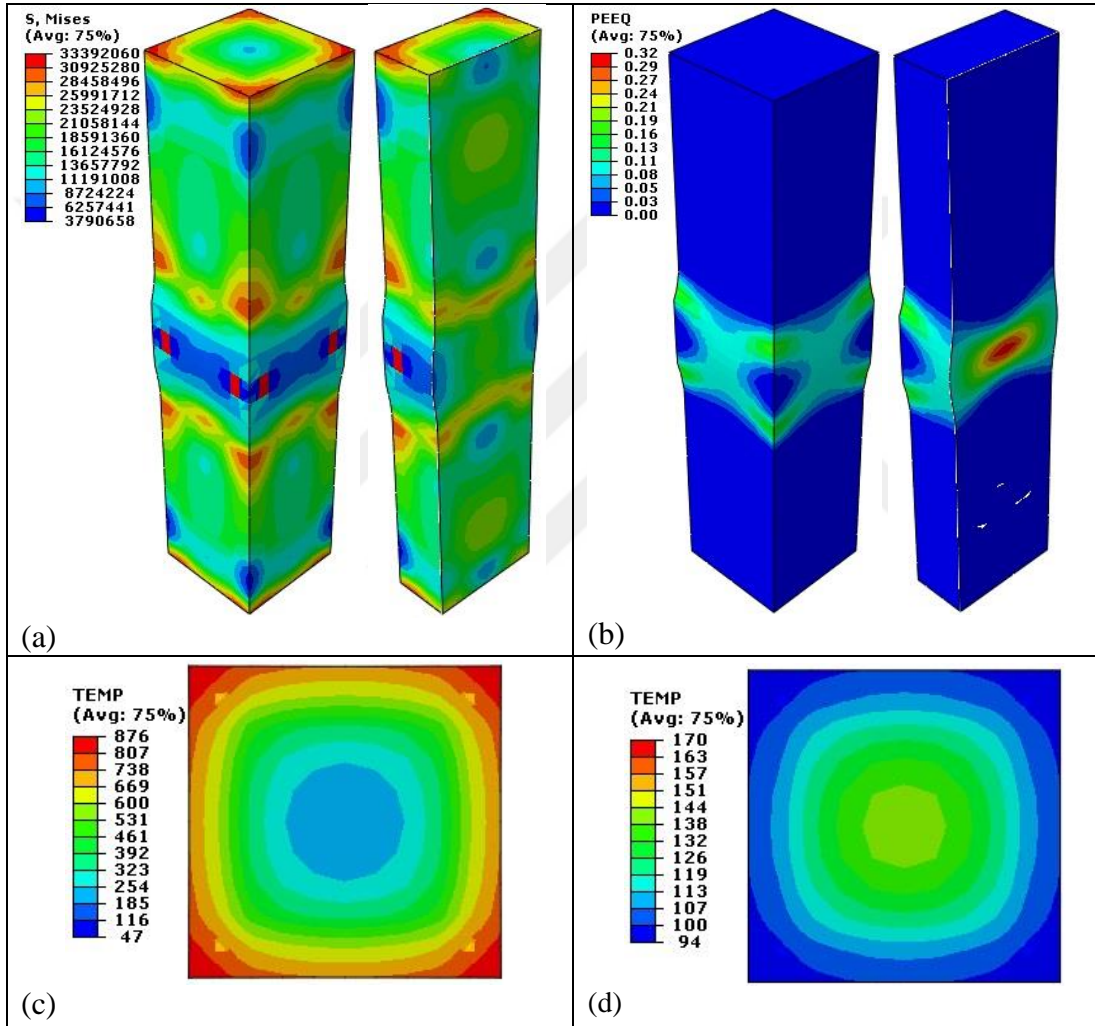
şekil 3.80. CN-60-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



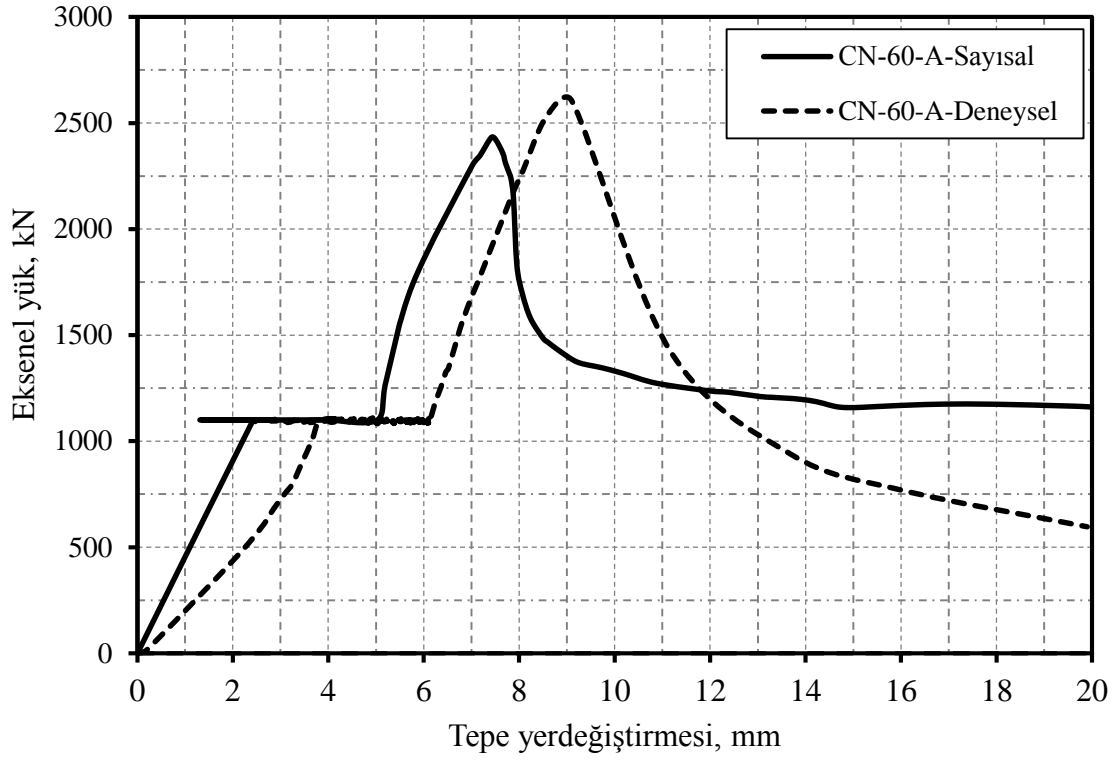
şekil 3.81. CN-60-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.13. CN-60-A Kolonu

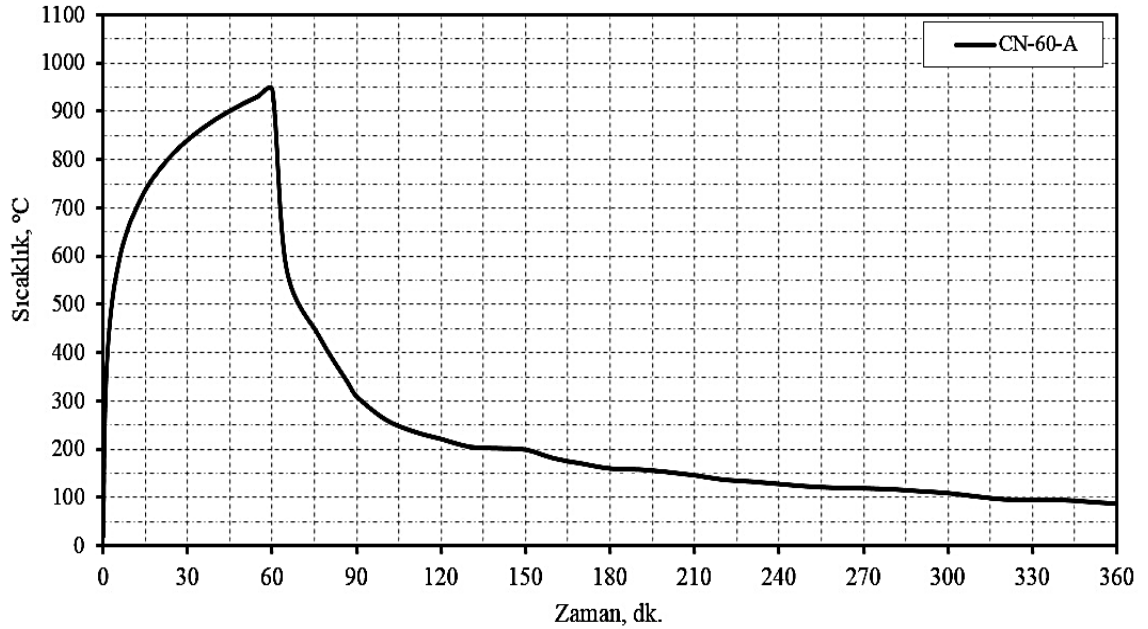
CN-60-A kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.82’de verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.83 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.84’te gösterilmektedir.



Şekil 3.82. CN-60-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



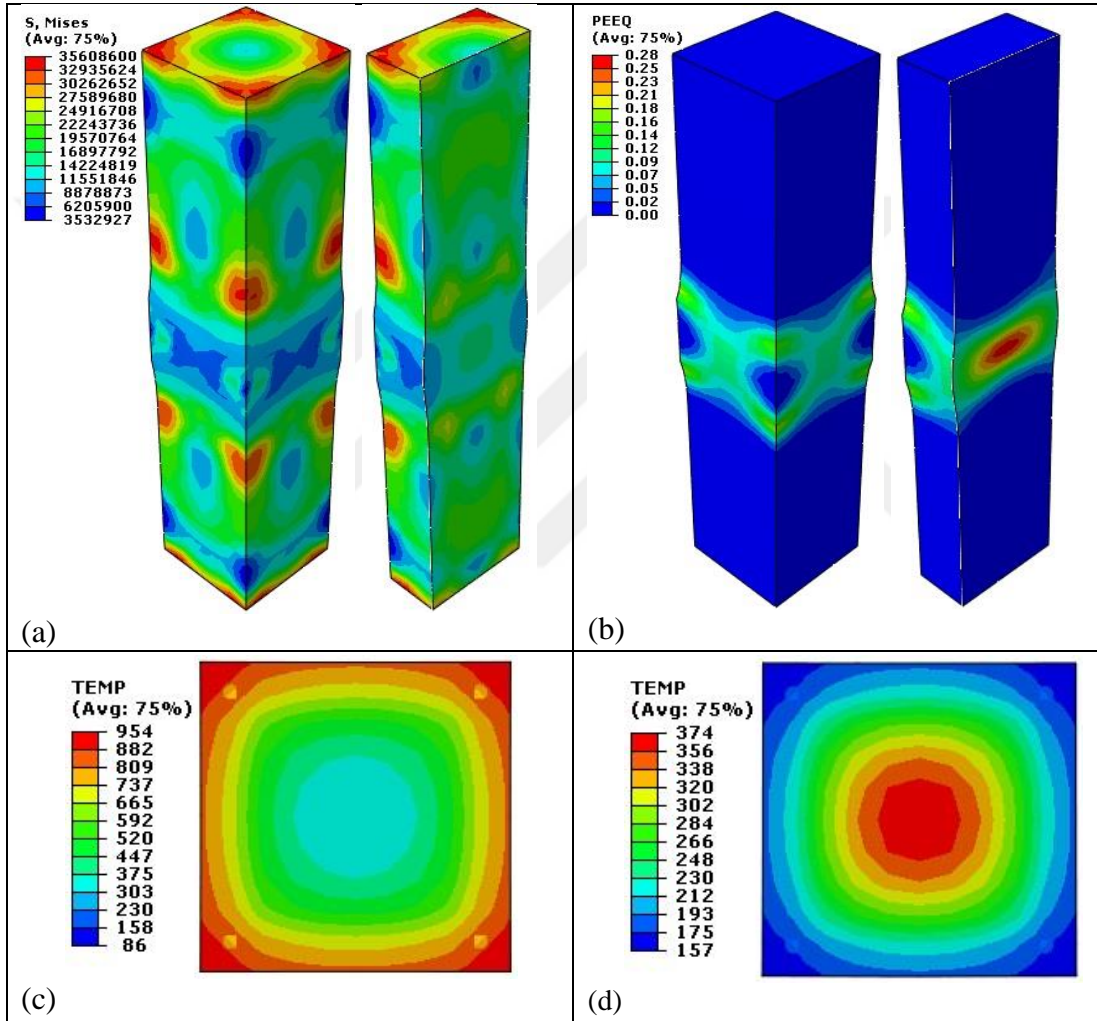
Şekil 3.83. CN-60-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



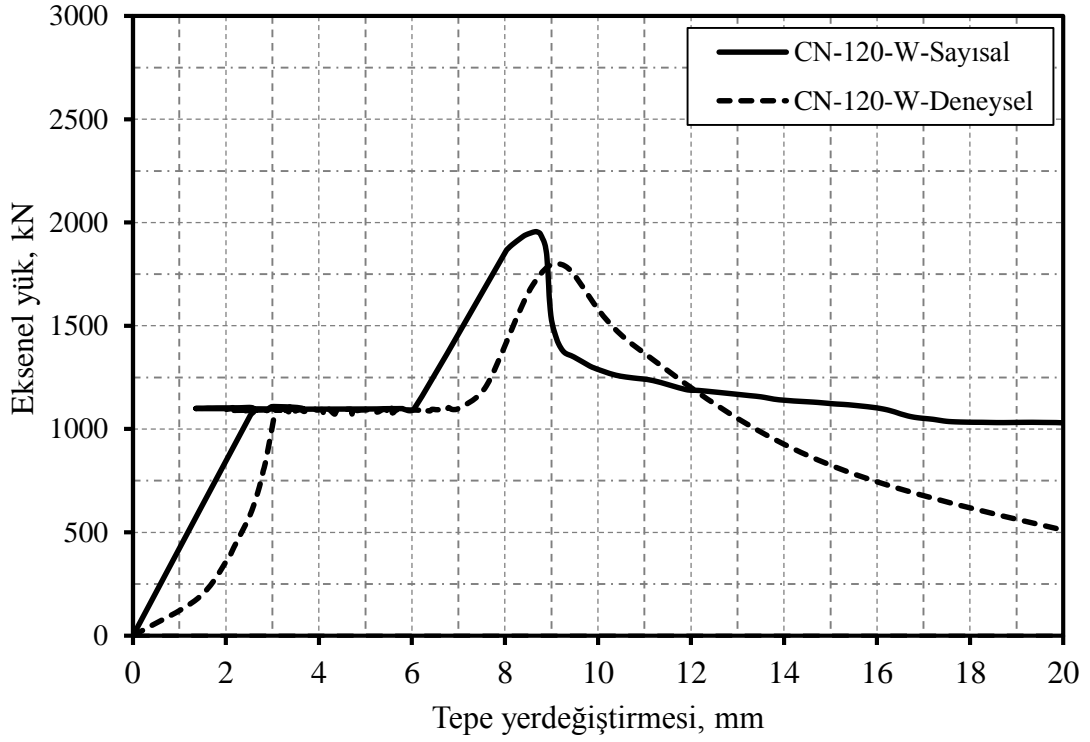
Şekil 3.84. CN-60-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.14. CN-120-W Kolonu

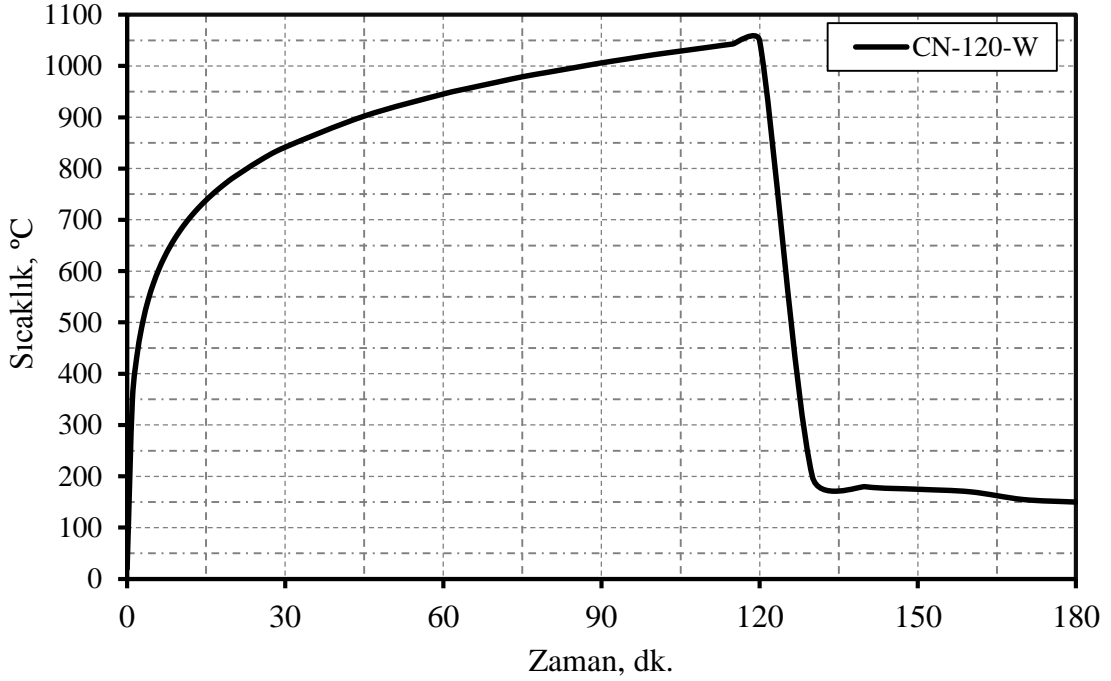
CN-120-W kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.85'te verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.86 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.87'de gösterilmektedir.



Şekil 3.85. CN-120-W numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



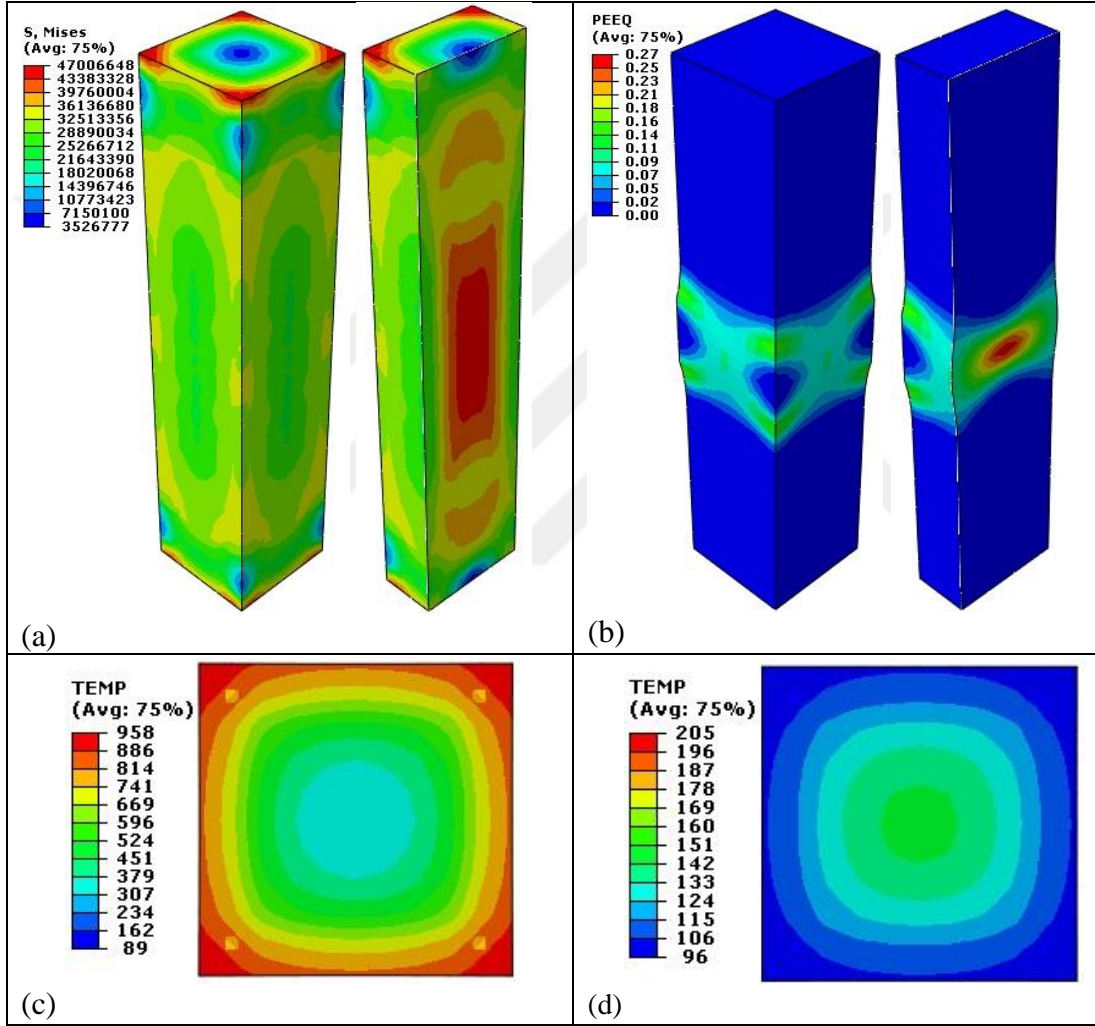
Şekil 3.86. CN-120-W numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



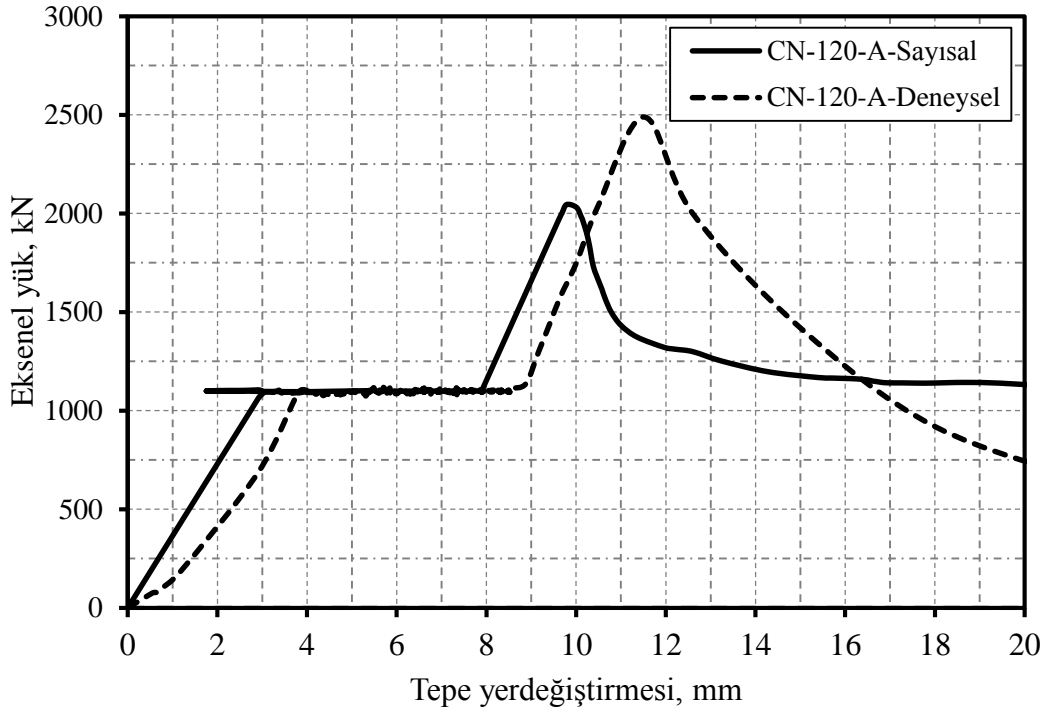
Şekil 3.87. CN-120-W numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.15. CN-120-A Kolonu

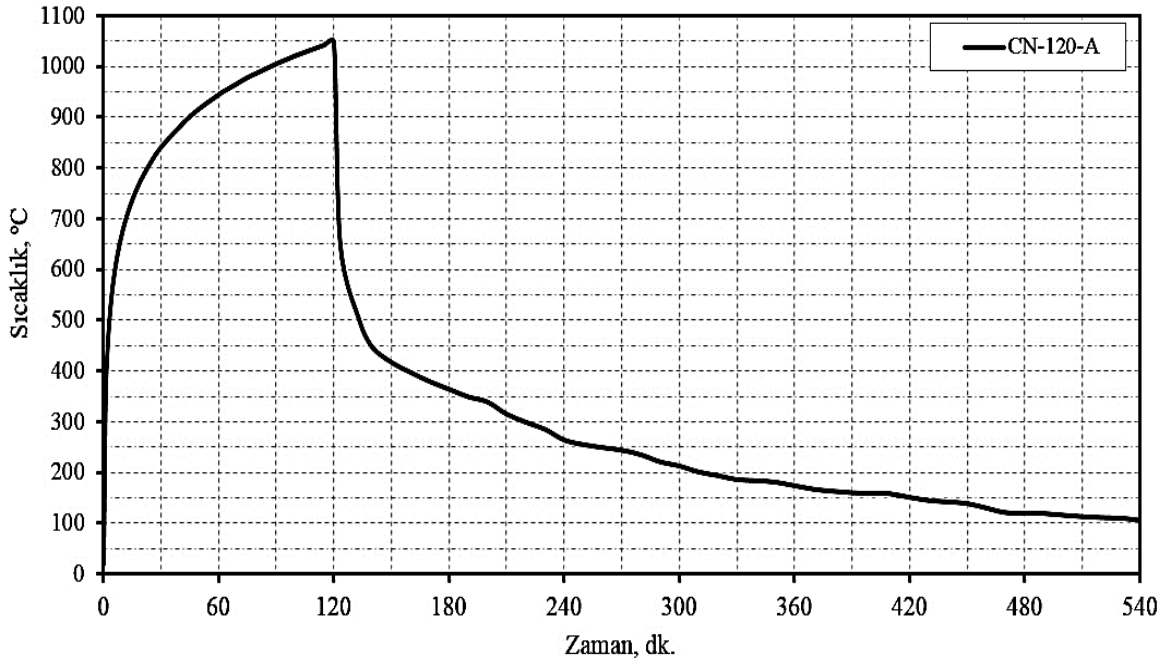
CN-120-A kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı, plastik şekil değiştirme ve sıcaklık dağılımları Şekil 3.88’de verilmektedir. Ayrıca aksenal yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.89 ve numunenin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi ise Şekil 3.90’da gösterilmektedir.



Şekil 3.88. CN-120-A numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekil değiştirmesi, (c) ısıtma sonunda sıcaklık dağılımı, (d) soğutma sonunda sıcaklık dağılımı



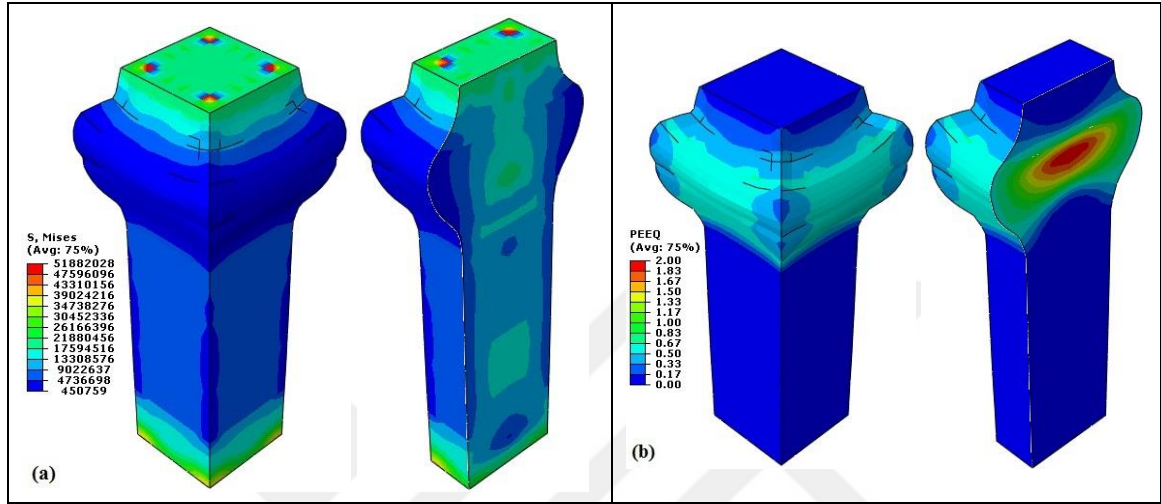
Şekil 3.89. CN-120-A numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



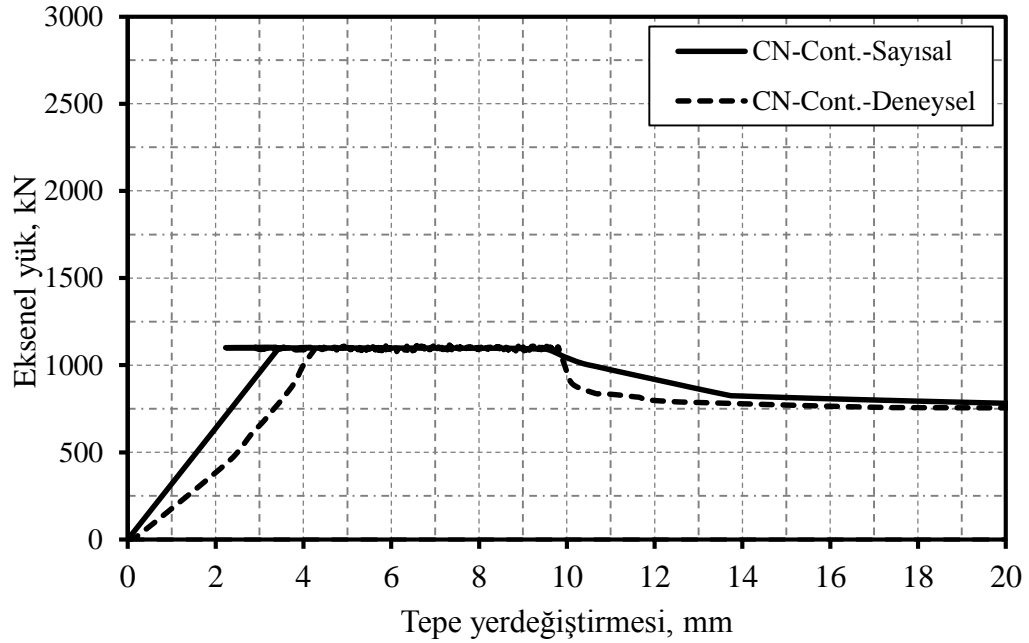
Şekil 3.90. CN-120-A numunesinin yüzeyine etki eden sıcaklık-zaman eğrisi

3.3.16. CN-Cont. Kolonu

CN-Cont. kolonunun analiz sonuçlarından elde edilen kırılma anındaki gerilme dağılımı ve plastik şekildeğiştirme Şekil 3.91’de ve eksenel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.92’de gösterilmektedir.



Şekil 3.91. CN-Cont. numunesinin; (a) kırılma anındaki gerilme dağılımı (Pa), (b) plastik şekildeğiştirme

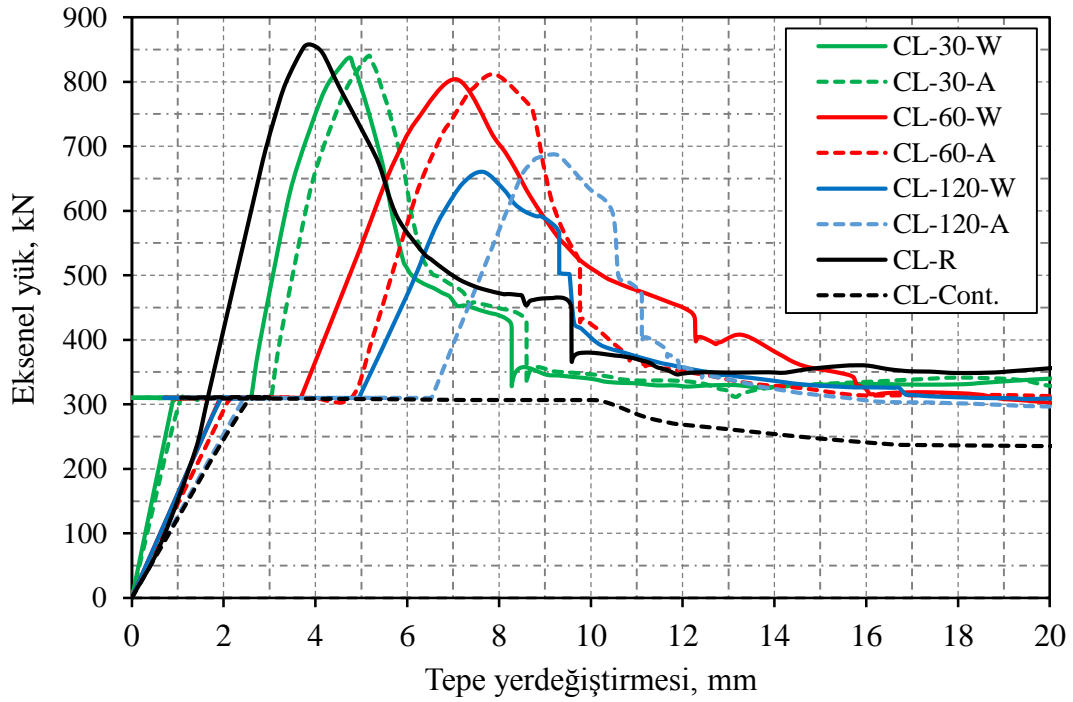


Şekil 3.92. CN-Cont. numunesinin analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

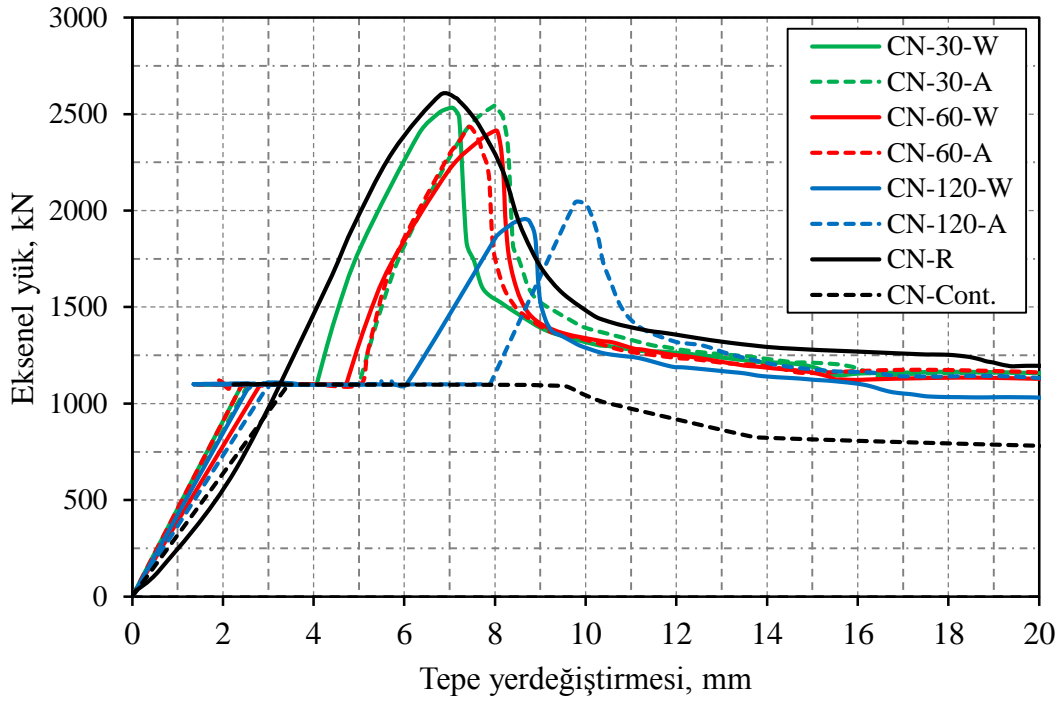
3.4. Sayısal Çalışmalardan Elde Edilen Bulguların Karşılaştırılması

3.4.1. Yük Taşıma Kapasiteleri

Analiz sonuçlarından elde edilen aksel yük-tepe yerdeğiştirme ilişkileri düşük ve normal dayanımlı betonarme kolon numuneler için sırasıyla Şekil 3.93 ve Şekil 3.94'te karşılaştırılmalı olarak gösterilmektedir. Aynı deneysel eğrilerdeki gibi sıcaklık aşaması başladıktan sonra kolon numunelerinin ısıl genleşmelerinden dolayı sabit aksel yük etkisi altında ilk başta numuneler eksi yerdeğiştirme yapıp ve daha sonra soğutma aşamasının sonuna kadar yerdeğiştirme değerleri artmaktadır. Farklı ısıtma-soğutma senaryoları uygulandıktan sonra betonarme kolonların aksel yük taşıma kapasitelerindeki değişim oranları yüzde (%) olarak hesaplanmıştır. Numunelerin sonlu eleman analizi sonuçlarından elde edilen aksel yük taşıma kapasiteleri ve değişim yüzdeleri Tablo 3.3'te verilmektedir.



Şekil 3.93. CL numuneler için sayısal analizlerden elde edilen aksel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi



Şekil 3.94. CN numuneler için sayısal analizlerden elde edilen eksenel yük-tepe yerdeğiştirme eğrisi

Tablo 3.3. Betonarme kolon numuneleri için analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük taşıma kapasitelerinin değişimi

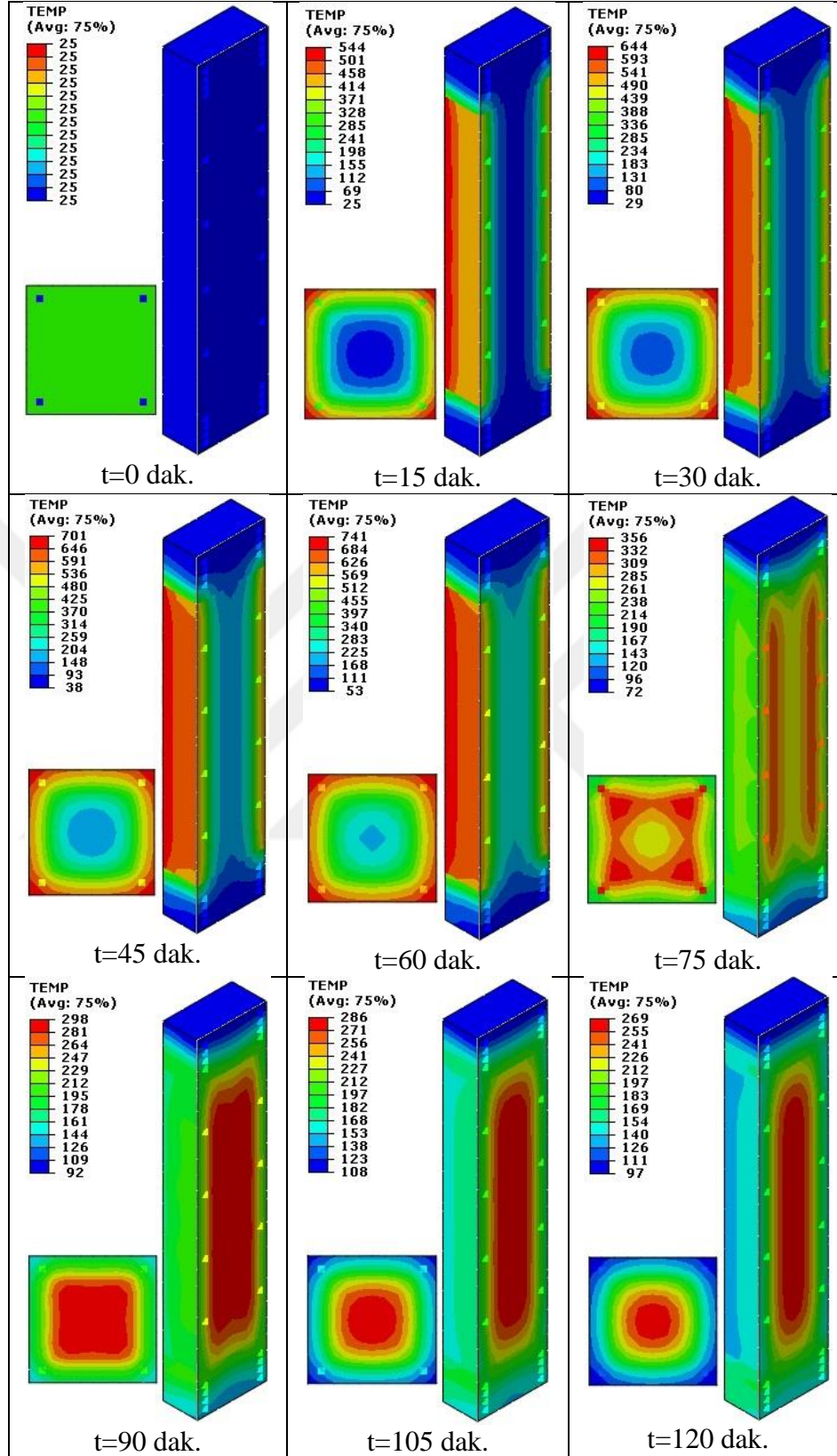
Model adı	Eksenel yük taşıma kapasitesi (kN)	Eksenel yük taşıma kapasitesinin azalması (%)
CL-Ref	857	----
CL-30-W	838	%2.2
CL-30-A	840	%2.0
CL-60-W	804	%6.2
CL-60-A	811	%5.4
CL-120-W	661	%22.9
CL-120-A	688	%19.7
CN-Ref	2600	----
CN-30-W	2533	%2.6
CN-30-A	2543	%2.2
CN-60-W	2413	%7.2
CN-60-A	2431	%6.5
CN-120-W	1956	%24.8
CN-120-A	2046	%21.3

Tablo 3.3'teki analiz sonuçlarına göre de, betonarme kolon numunelerde ısıtma süresi ve soğutma tipinin değişimi kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini etkilemektedir. 30 dakika ısıtılan düşük dayanımlı suyla soğutulan numunenin (CL-30-W) eksenel yük taşıma kapasitesinin azalması aynı numunenin kendiliğinden soğuyan özdeşininkinden (CL-30-A) %0.2 daha fazladır. Bu oran CL-60, CL-120, CN-30, CN-60 ve CN-120 numunelerinde sırasıyla %0.8, %3.2, %0.4, %0.7 ve %3.5 olarak belirlenmiştir. Normal dayanımlı betonarme kolonların ısı iletkenlik katsayılarının düşük dayanımlı kolonlara göre daha fazla olması nedeniyle bu kolonlar uzun süre yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında eksenel yük taşıma kapasitelerinde daha fazla düşüş gözlenmiştir. Ayrıca tüm numunelerde ısıtma süresi arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi azalmaktadır.

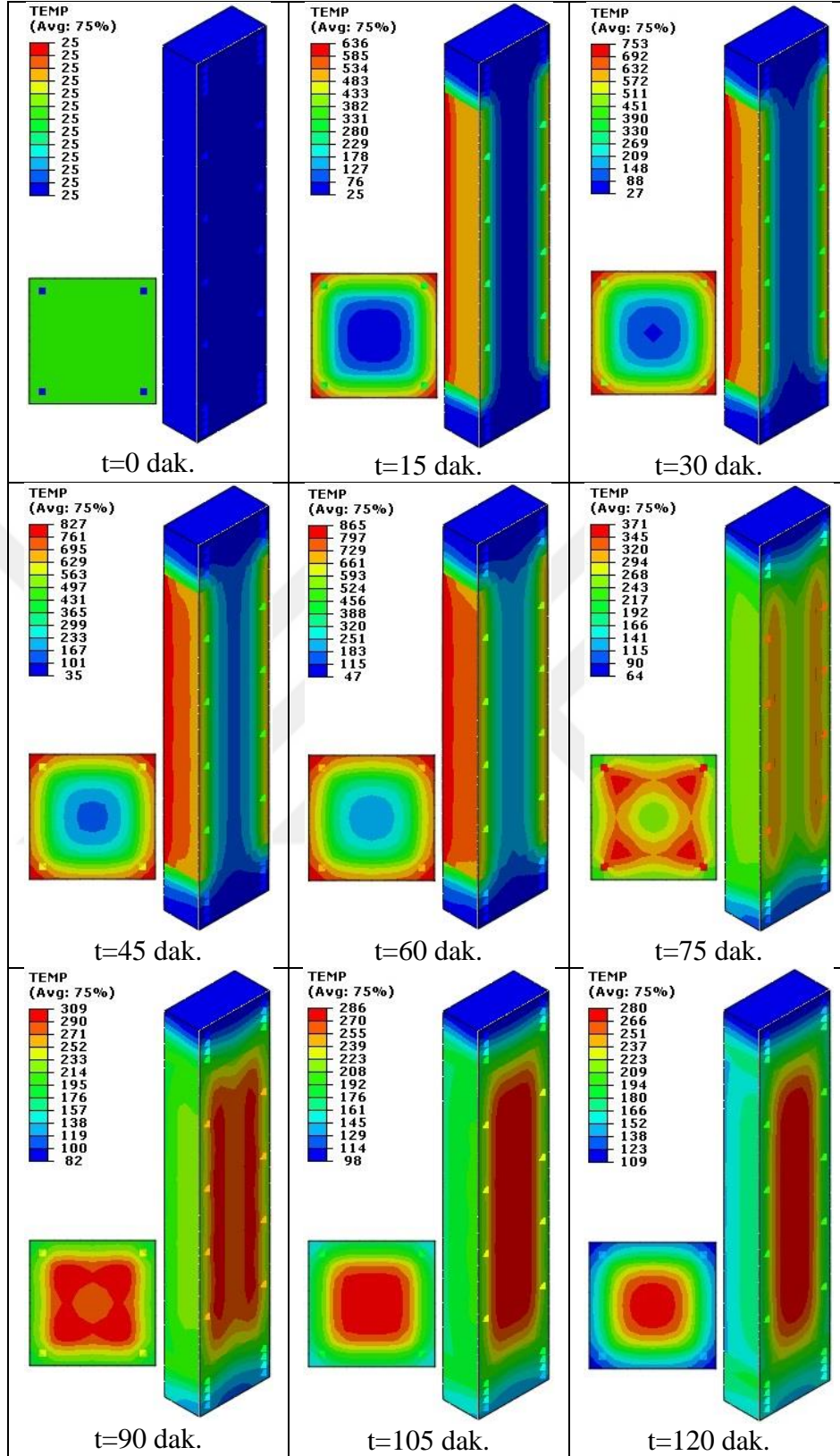
3.4.2. Sıcaklık Dağılımının Kesit İçinde Değişiminin İncelenmesi

Şekil 3.95 ve Şekil 3.96'da, örnek olarak seçilen CL-60-W ve CN-60-W numunelerine ait ısıtma-soğutma aşamalarında sıcaklığın 15 dakika ara ile değişimi gösterilmektedir. Şekillerden de gözüktüğü gibi sıcaklık dağılımı ısıtma-soğutma aşamasının sonuna kadar yüzeyden merkeze doğru artmaktadır. Bu sıcaklık değişimi deneylerdeki zaman-sıcaklık eğrilerinde ısı transferi mekanizması ile açıklanan durumu doğrulamaktadır.

Soğutma aşaması başladıktan sonra ısı iletimi yüzeyden merkeze doğru devam etmekte ve bu aşamanın sonunda numunenin merkez sıcaklığı yüzeydeki sıcaklıktan daha fazla olmaktadır. Agregata türü aynı olmakla birlikte, malzeme oranlarının farklılığından dolayı daha boşluklu bir yapıya sahip olan ve bu nedenle de daha düşük dayanım veren CL numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı da bu boşluklu yapı nedeniyle düşüktür. Bu nedenle CL numunelerinin ısıtma aşaması sonundaki merkez sıcaklığı aynı süre boyunca ısıtılan CN numunelere göre daha azdır. Bu olay açık bir şekilde tüm numunelerde gözlenmiştir.



Şekil 3.95. CL-60-W numunesinin ısıtma-soğutma aşamalarındaki sıcaklık değişimi



Şekil 3.96. CN-60-W numunesinin ısıtma-soğutma aşamalarındaki sıcaklık değişim

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada eksenel yüklü betonarme kolonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışlarının belirlenmesi amacıyla deneysel ve sayısal incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çok ender yapılan bir uygulama olarak, betonarme kolon numuneler eksenel yüklenmiş ve bu durumdayken ISO 834 yüksek sıcaklık uygulamasına tabi tutulmuşlardır. Eksenel yüklü ve ısıtılmış kolon numunelere su ile soğutma uygulaması ise bu çalışmanın en özgün yanı olarak değerlendirilebilir. Sunulmuş olan çalışmaların tümünden çıkartılabilecek bazı sonuç ve öneriler aşağıda özetlenmektedir.

- Hem ısıtma süresinin hem de soğutma yönteminin, eksenel yüklü betonarme kolonların yük taşıma kapasitesini etkileyebileceği açıkça görülmüştür. Tüm numunelerde ısıtma süresi arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi azalmakta, numunenin suyla soğutulması halinde ise ortaya çıkan ısı şokunun malzemedeki yıkıcı etkisi de bu azalmayı pekiştirmektedir. Böylece, suyla soğutulan tüm numunelerin yük taşıma kapasiteleri, kendiliğinden soğutulan numunelere göre daha fazla düşüş göstermiştir.
- Düşük dayanımlı numuneler 30 ve 60 dakika ısıtılıp kendiliğinden soğuduktan sonra yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %1.4 ve %3.5 azalırken, suyla soğutuldukları zaman yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %2.0 ve %4.2 oranında azalmıştır.
- Normal dayanımlı numuneler 60 ve 120 dakika ısıtılıp kendiliğinden soğuduktan sonra yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %5.3 ve %9.5 azalırken, suyla soğutuldukları zaman yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %6.2 ve %35.0 oranında azalmıştır.
- Sayısal sonuçlara göre, düşük dayanımlı numuneler 30, 60 ve 120 dakika ısıtılıp kendiliğinden soğuduktan sonra yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %2.0, %5.4 ve %19.7 azalırken, suyla soğutuldukları zaman yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %2.2, %6.2 ve %22.9 oranında azalmıştır.
- Sayısal sonuçlara göre, normal dayanımlı numuneler 30, 60 ve 120 dakika ısıtılıp kendiliğinden soğuduktan sonra yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %2.2, %6.5 ve %21.3 azalırken, suyla soğutuldukları zaman yük taşıma kapasiteleri sırasıyla %2.6, %7.2 ve %24.8 oranında azalmıştır.

- Suyla soğutma işleminde soğuk suyun yüzey sıcaklığı yaklaşık 1100°C olan aşırı ısınmış numuneye temas etmesi durumunda ani hacim büzülmesi (ısıl şok) ve buhar basıncı etkisi ortaya çıkmakta, bu da malzeme yapısında fazladan harabiyete neden olmaktadır.
- Normal dayanımlı numunelerin rijitlik kaybı düşük dayanımlı numunelere göre daha fazla olmaktadır. Bu durum normal dayanımlı numunelerinin ısıl iletkenlik katsayılarının düşük dayanımlı numunelere göre daha fazla olmasıyla açıklanabilir.
- Kendiliğinden soğuyan tüm numunelerin rijitlik kayıpları suyla soğutulanlardan daha az olmuştur.
- Düşük dayanımlı numunelerin 30 ve 60 dakika ısıtılıp suyla soğutulduktan sonra rijitlik kaybı sırasıyla %4.4 ve %11.4 iken, aynı numunelerin kendiliğinden soğuyan özdeşlerinin rijitlik kayıpları sırasıyla %3.4 ve %6.5 olarak hesaplanmıştır.
- Normal dayanımlı numunelerin 60 ve 120 dakika ısıtılıp suyla soğutulduktan sonra rijitlik kaybı sırasıyla %18.0 ve %34.5 iken, aynı numunelerin kendiliğinden soğuyan özdeşlerinin rijitlik kayıpları sırasıyla %9.2 ve %15.0 olarak hesaplanmıştır.
- Tüm numunelerde ısıtma süresi arttıkça rijitlik kaybı da artmıştır.
- Suyla soğutulan numunelerin kapasite değerinden (tepe noktası) sonra iniş kolu eğimleri kendiliğinden soğuyan numunelerinkinden daha büyük olduğundan, su püskürtme işleminin betonun kırılma enerjisini azaltabileceği söylenebilir.
- ISO-834 yüksek sıcaklık eğrisine 30 dakika boyunca maruz bırakılan ve kendiliğinden soğuyan numune referans numune ile en yakın davranışı sergilerken, en uzak davranış 120 dakika boyunca yüksek sıcaklığa maruz bırakılan ve suyla soğutulan numunede belirlenmiştir. Bu durum, hem ısıtma süresinin hem de soğutma yönteminin betonarme kolonların plastik davranışını etkilediğini göstermektedir.
- Betonarme kolonlarda ısıtma aşamasında fırın sıcaklığının yaklaşık 600°C olduğu sırada başlayan kabuk atma olayı normal dayanımlı numunelerde görülmüş, düşük dayanımlı numunelerde ise bu olay gözlemlenmemiştir. Bu durum, betonlar arasındaki ısıl iletkenlik katsayısının farklı oluşuyla açıklanabilir.

- Suyla soğutulan numunelerde hızlı ve belirgin bir yüzey bozulması (yüzey erozyonu) gözlenmiştir. Bu durum, kolonların aşırı sıcak yüzeyine değen soğuk suyun oluşturduğu ani sıcaklık düşüşüne bağlı ısıl şok sebebiyle meydana gelmektedir. Hem düşük hem de normal dayanımlı numunelerde erozyon olayı ısıtma süresinin artmasına bağlı olarak, çoğalmaktadır. Numunelerin kapasitesinin erozyondan dolayı ortaya çıkan kesit kaybından da etkilendiği açıktır.
- Ayrı bir durum olarak, sürekli ısıtmaya tabi tutulan normal dayanımlı kolon numune ısıtmanın 210. dakikasında, düşük dayanımlı kolon numunesi ise yaklaşık 240. dakikasında yük taşıma kapasitesini ani olarak kaybetmiştir. Bu sırada fırın sıcaklığı yaklaşık 1150°C olarak ölçülmüştür.
- Tüm betonarme kolon numuneleri için deneysel ve sayısal analiz sonuçlarından elde edilen eksenel yük taşıma kapasiteleri ve rijitlik değişim oranlarının birbirine yakın olduğu görülmüştür. Bu da, yapılan sayısal modellemenin oldukça gerçekçi ve başarılı olduğunu göstermektedir.

Özetle bu tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalara göre, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan eksenel yüklü betonarme kolonların yük taşıma kapasitelerinin yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi ve ardından uygulanan soğutma işlemi tipine göre %35'e varan oranda azalma gösterebildiği belirlenmiştir. Buradan hareketle, yangın geçirmekte olan betonarme bir yapıya söndürme ve soğutma müdahalesi yapılırken aşırı ısınmış taşıyıcıların yukarıda belirtilen nedenle daha fazla dayanım kaybına uğrama riskinin dikkate alınması gerektiği söylenebilir. Buna ek olarak, bu çalışma ile ortam sıcaklığının 900°C'nin üzerinde çıktığı ve bu durumun iki saati aşığı yüksek sıcaklık ya da yangın maruziyetine uğramış betonarme yapıların, beton ve çelik malzemelerdeki yapı bozulmaları ve dolayısıyla elemanlardaki dayanım kayıpları nedeniyle, yeniden kullanımının oldukça riskli olduğu kanaatine varılmıştır.

Burada verilen tüm sonuçların çalışmaya konu olan sınırlı sayıdaki deney elemanlarına ve deney koşullarına ait olduğu, daha kesin kanaate varabilmek için farklı çalışmaların da yapılmasının yararlı olacağı açıktır.

5. KAYNAKLAR

- Abaqua/CAE V6.12, 2017. Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- Akhtararzaman, A. ve Sullivan, P., 1970. Explosive Spalling of Concrete Exposed to High Temperature. Concrete Structures and, Technology Research Report, Imperial College, London.
- Anderberg, Y., 1978. Analytical Fire Engineering Design of Reinforced Concrete Structures Based on Real Fire Characteristics, Proc. FIP Eight Congress.
- Anderberg, Y., 1998. Fire Engineering Design of Structures Based on Design Guides, Proc. 2nd Int. Conf. on "Performance-Based Codes and Fire-Safety Design Methods", Maui (Hawaii, USA).
- Anderberg, Y., 1973. Fire-Exposed Hyperstatic Concrete Structures, Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin, 32.
- Anderberg, Y., 1986. TEMPCALC User Manual, Lund, Sweden: Institute of Fire Safety Design (IFSD).
- Arduino Project web site. Available on line (requested date: 05/25/17): <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno/>
- Bamonte, P. ve Monte, F.L.J.F.S.J., 2015. Reinforced Concrete Columns Exposed to Standard Fire: Comparison Among Different Constitutive Models for Concrete at High Temperature, 71, 310-323.
- Bazant, Z.P. ve Thonguthai, W., 1979. Pore Pressure in Heated Concrete Walls: Theoretical Prediction, Magazine of Concrete Research, 31,107. 67-76.
- Becker, J., Bresler, B. ve FIRES-RC, A., 1974. A Computer Program for the Fire Response of Structures-Reinforced Concrete Frames, Uni. of Calif., Berkeley.
- Bremer, F., 1967. Multi-Layer (Double-Wall) Prestressed Concrete Pressure Vessel, Nuclear Engineering and Design, 5,2. 183-190.
- B-2., 1985. Structural Use of Concrete: Code of Practice for Special Circumstances.
- BSI, B., 1985. 8110 Part 2, Structural Use of Concrete. Code of Practice for Design and Construction.
- Castillo, C. ve DURRANI, A., 1990. Effect of Transient High-Temperature on High-Strength Concrete-Closure, ACI Materials Journal, 87,6, 653-653.
- Connelly, R., 1995. The Spalling of Concrete in Fires, PhD Thesis Submitted to Aston University.

- Dassault Systèmes, 2016. D. Abaqus Analysis User's Guide.
- De Wit, A., 2011. Behaviour and Structural Design of Concrete Structures Exposed to Fire.
- Diederichs, U., Jumppanen, U.-M. ve Penttala, V., 1989. Behaviour of High Strength Concrete at High Temperatures: Espoo 1989, Teknillinen Korkeakoulu.
- Dougill, J., 1972. Modes of Failure of Concrete Panels Exposed to High Temperatures, Magazine of Concrete Research, 24,79. 71-76.
- Du Beton, F.I., 1990. Structural Concrete, Textbook on Behavior, Design and Performance- Updated Knowledge of the CEB/FIP Model Code, vol 1-3, Federation Internationale du Béton (FIB), Lausanne.
- 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, B., 1-1. 2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures- Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings, European Committee for Standardization (CEN).
- Forsen, N., 1982. A Theoretical Study on the Fire Resistance of Concrete Structures. SINTEF Report No: STF65 A82062, Cement and Concrete Research Institute, Norwegian Institute of Technology.
- Franssen, J.M. ve Dotreppe, J.C., 2003. Fire Tests and Calculation Methods for Circular Concrete Columns, Fire technology, 39,1, 89-97.
- Furumura, F., Abe, T. ve Shinohara, Y., 1995. Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures, Proceedings of The Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design, 254.
- Hilsdorf, H. ve Müller, H., 1990. Concrete. In fib-Bulletin No 1: Structural Concrete- Textbook on Behaviour, Design and Performance. Updated knowledge of the CEB/FIP Model Code, 1, 41-46.
- Ichikawa, Y., 2000. Prediction of Pore Pressures, Heat and Moisture Transfer Leading to Spalling of Concrete During Fire.
- Iding, R., Bresler, B. ve Nizamuddin, Z., 1977. FIRES-T3, A Computer Program for the Fire Response of Structures-Thermal, Report No. UCB FRG 77, 15.
- Incropera, F.P., Lavine, A.S., Bergman, T.L. ve DeWitt, D.P., 2007. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Wiley.
- ISO, I., 834, 1999. Fire Resistance Tests-Elements of Building Construction, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

- Jacintho, A., Silva, V., Requena, J., Lintz, R., Barbosa, L. ve Pimentel, L., 2012. Short Steel and Concrete Columns Under High Temperatures, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 5,4, 530-547.
- Khoury, G.A., 2000. Effect of Fire on Concrete and Concrete Structures, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2,4, 429-447.
- Khoury, G., Algar, S., Felicetti, R. ve Gambarova, P., 1999. Mechanical Behavior of HPC and UHPC Concretes at High Temperatures in Compression and Tension, ACI International Conference on State-of-the-Art in High Performance Concrete, Illinois.
- Khoury, G., 1999. Mechanical Behaviour of HPC and UHPC at High Temperature in Compression, Final HITECO BRITE Report.
- Khoury, G., 2008. Polypropylene Fibres in Heated Concrete. Part 2: Pressure Relief Mechanisms and Modelling Criteria, *Magazine of Concrete Research*, 60,3, 189-204.
- Khoury, G. ve Anderberg, Y., 2000. Fire Safety Design-Concrete Spalling Review, Swedish National Road Administration.
- Khoylou, N., 1997. Modelling of Moisture Migration and Spalling Behaviour in Non-Uniformly Heated Concrete.
- Kodur, V.K.R., 1999. Fire Performance of High-Strength Concrete Structural Members, Institute for Research in Construction, National Research Council of Canada.
- Kodur, V. ve Phan, L., 2007. Critical Factors Governing the Fire Performance of High Strength Concrete Systems, *Fire Safety Journal*, 42,6-7, 482-488.
- MathWorks, 2017. Graphical User Interfaces in MATLAB, The Language of Technical Computing, Version 9.2.0.538062 (R2017a).
- Malhotra, H.L., 1982. Design of Fire-Resisting Structures, Surrey University Press.
- Meyer-Ottens, C., 1972. The Question of Spalling of Concrete Structural Elements of Standard Concrete under Fire Loading, Technical University of Braunschweig.
- Read, R., Adams, F. ve Cooke, G., 1980. Guidelines For the Construction of Fire Resisting Structural Elements, Department of the Environment, Building Research Establishment.
- Regulations, B. ve Schedule, I, 1992. The New Zealand Building Code, New Zealand Government, Wellington, New Zealand.
- Rigberth, J., 2000. Simplified Design of Fire Exposed Concrete Beams and Columns.
- Riva, P., 2008. Structural Behavior of Continuous Beams and Frames. *Fib Bulletin 46: Fire Design of Concrete Structures-Structural Behavior and Assessment*.

- Rudolph, K., Richter, E., Hass, R. ve Quast, U., 1986. Principles for Calculation of Load-Bearing and Deformation Behaviour of Composite Structural Elements under Fire Action, Fire Safety Science, 1, 301-310.
- Saito, H., 1966. Explosive Spalling of Prestressed Concrete in Fire, Bulletin of Japan Association for Fire Science and Engineering, 15,2, 23-30.
- Sertmehmetoglu, Y., 1977. On a Mechanism of Spalling of Concrete Under Fire Conditions, University of London.
- Shah, A.H., Sharma, U.J.C. ve Materials, B., 2017. Fire Resistance and Spalling Performance of Confined Concrete Columns, 156, 161-174.
- Shorter, G. ve Harmathy, T., 1965. Moisture Clog Spalling, Proceedings of Institution of Civil Engineers, 20, 75-90.
- Standard, B.B., 1985. Structural Use of Concrete: Code of Practice for Design and Construction: BS8110, Part 1, British Standards Institution.
- Sunar, Ş., 1981. Yangından Korunma ve Bina Yangın Güvenliği: İlkeler-Çelişkiler-Gerçekler, ITU.
- Taerwe, L., Bamonte, P., Both, K., Denoël, J., Diederichs, U., Dotreppe, J., Felicetti, R., Fellinger, J., Franssen, J. ve Gambarova, P., 2008. Fib Bulletin 46: Fire Design of Concrete Structures–Structural Behaviour and Assessment, State-of-the art Report, International Federation for Structural Concrete (FIB TG 4.3.2), Lausanne, Switzerland.
- Tan, K.H. ve Nguyen, T.T., 2013. Experimental Behaviour of Restrained Reinforced Concrete Columns Subjected to Equal Biaxial Bending at Elevated Temperatures. Engineering Structures, 56, 823-836.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, TSE, Ankara.
- Terro, M.J., 1991. Numerical Modelling Thermal and Structural Response of Reinforced Concrete Structures in Fire.
- Thelandersson, S., 1974. Mechanical Behaviour of Concrete under Torsional Loading at Transient, High Temperature Conditions, Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 46.
- TS500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.
- Wickström, U., TASEF-2: 1979. A Computer Program for Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire, Lund Institute of Technology, Department of Structural Mechanics.

Wu, B., Hong, Z., Tang, G.-H. ve Wang, C., 2007. Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns with Square Cross-Section, *Advances in Structural Engineering*, 10,4, 353-369.

Zhukov, V., 1975. Explosive Failure of Concrete During a Fire, Translation No. DT, 2124.



ÖZGEÇMİŞ

Arman HOSSEIN ESKANDANI, 1987 yılında İran'ın Tebriz Şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Tebriz'de tamamladı. Saadi Fen Lisesi'nden 2005 yılında mezun olduktan sonra aynı yıl Tebriz Azad Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne başladı ve bu bölümden 2009 yılında mezun oldu. Aynı yıl Azad Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Anabilim Dalında tezli yüksek lisans eğitimine başladı ve 2012 yılında tamamladı. Kısa bir süre özel sektörde İnşaat Mühendisi olarak çalıştıktan sonra 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri İnşaat Mühendisliği Doktora öğrenimine başladı. Doktora ders döneminde Yabancı Uyruklu Başarı Destek Bursunu almaya hak kazandı. 2014 yılında ERASMUS programı kapsamında Çek Cumhuriyeti'ndeki Brno Teknik Üniversitesi'ne gitti. 2015 yılında Avrasya Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olduktan sonra 2017 yılında Öğretim Görevlisi olarak atandı ve halen bu görevine devam etmektedir. Bekar olan Arman HOSSEIN ESKANDANI iyi derecede Azerice, Türkçe, Farsça ve İngilizce bilmektedir.