



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YANGINA MARUZ KALAN BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

HÜSEYİN TAŞTAN

DANIŞMAN
DOÇ. DR. EMİN HÖKELEKLİ

BARTIN-2022



T.C.

**BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YANGINA MARUZ KALAN BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN
DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin TAŞTAN

BARTIN-2022

KABUL VE ONAY

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ danışmanlığında hazırlamış olduğum “YANGINA MARUZ KALAN BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

15.12.2022

Hüseyin TAŞTAN

ÖNSÖZ

Bu akademik tezin gerçekleşme süresince derin bilgisi, tecrübesi ve deneyimleri ile çalışma boyunca bana desteklerini yapıcı yönde ve sabırla hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ'ye;

Bu tezin her adımında hazırlanması ve sonuçlandırılmasında değerli bilgi birikimini paylaşan, destek ve yardımlarından faydalanma şansı bulduğum değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Fethi ŞERMET'e, sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deney numunelerin hazırlanmasındaki katkılarından dolayı İzmir Dere Grup ve bünyesinde çalışan kıymetli emekçilerine teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca üzerimde büyük emekleri olan, koşulsuz şartsız desteklerini esirgemeyen kıymetli babam ve anneme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bir insanın hayatta isteyebileceği en güzel şey benim hayatımda yer alıyor. Hayatıma girdikten sonra hayallerime yön veren yaşama sevincimi katbekat artıran, günlerimi güzelliklerle dolduran, bu yolda bana hiçbir zaman desteğini esirgemeyen canım karım Dilara Özaydın TAŞTAN'a yürek dolusu teşekkür ederim.

Hüseyin TAŞTAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YANGINA MARUZ KALAN BETONARME YAPISAL ELEMANLARIN DAVRANIŞININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

Hüseyin TAŞTAN

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Emin HÖKELEKLİ

Ortak Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Fethi ŞERMET

Bartın-2022, sayfa: 57

Yangın, betonarme bir binanın hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği en ciddi ve tehlikeli durumlardan biridir. Betonarme elemanların yangına maruz kalma sırasında mukavemet ve rijitlikleri önemli bir düşüşe uğrar ve bu dayanım kaybının çoğu geri kazanılamaz. Bunun nedeni beton ve çelik donatının sıcaklığının artması ve malzeme özelliklerinin bozulmasıdır.

Bu çalışma kapsamında, aynı kesit ve donatı konfigürasyonuna sahip, biri referans eleman görevi gören toplam beş (5) adet betonarme kolon üretilmiştir. Referans eleman yangına maruz bırakılmadan sadece dört noktalı statik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Diğer dört deney elemanı sadece alt yüzeylerinden 90 dakika boyunca yangına maruz bırakılmıştır. Test elemanları oda sıcaklığında soğumaya bırakıldıktan sonra dört noktalı statik yükleme testlerine tabi tutulmuştur. Yangına maruz bırakılan elemanların akma dayanımı ve rijitliği %12 ile %20 oranında azalmıştır. Numunelerde gözlemlenen kırılma modu tipik olarak çekme bölgesinde başlayan ve basınç bölgesine doğru ilerleyen eğilme çatlakları şeklinde olmuştur. Ayrıca, beton ve donatı çeliğindeki mukavemet kaybından dolayı yangına maruz kalan elemanlarda elastisite modülleri referans elemana göre %60 oranında azalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Betonarme Kolon, Yangın Dayanımı, Betonarme Kolon Eğilme Davranışı

Bilim Alanı Kodu: 91127, 91131

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL ELEMENTS EXPOSED TO FIRE

Hüseyin TAŞTAN

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Emin HÖKELEKLİ

Co-Advisor: Asst. Prof. Fethi ŞERMET

Bartın-2022, pp: 57

Fire is one of the most serious and dangerous situations that a reinforced concrete (BS) building can encounter during its service life. Reinforced concrete members lose significant strength and stiffness when exposed to fire, and the majority of the strength loss is irreversible. This is due to the temperature rise of concrete and steel reinforcement, as well as the deterioration of material properties.

Within the scope of this study, five (5) reinforced concrete columns with the same cross-section and reinforcement configuration were produced, one of which serves as a reference element. The reference element was only subjected to four-point static loading and was not exposed to fire. The other four test elements were only exposed to fire from their lower surfaces for 90 minutes. The test elements were subjected to four-point static loading tests after being allowed to cool at room temperature. The yield strength and stiffness of fire-exposed elements decreased by 12% to 20%. The fracture mode observed in the specimens was typically bending cracks that began in the tensile zone and progressed to the compression zone. Furthermore, because of the loss of strength in concrete and reinforcement steel, the elasticity modules of the fire-exposed elements decreased by 60% when compared to the reference element.

Keywords: Reinforced Concrete Column, Fire Resistance, Bending Behavior of RC Column

Scientific Field Code: 91127, 91131

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	ii
BEYANNAME.....	iii
ÖNSÖZ.....	iv
ÖZET.....	v
ABSTRACT.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tez Amaçları ve Hedefleri.....	2
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	4
2.1 Yangın Senaryosu.....	15
2.2 ISO834.....	15
2.3 Hidrokarbon (HC) eğrisi.....	16
2.4 Harici yangın eğrisi (External fire curve).....	16
2.5 Beton.....	16
2.5.1 Betonda Isıl Genleşme.....	18
2.5.2 Beton Dökülmesi.....	19
2.5.3 Beton Yangın Dayanımı.....	20
2.5.4 Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi.....	20
2.5.5 Elastisite Modülü.....	21
2.6 Yüksek Sıcaklıklarda Betonarme Kolon Davranışı.....	22
2.7 Yangına Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Artık Tepkisi.....	23
2.8 Yangının Fiziksel ve Kimyasal Tepkisi.....	24
2.9 Parçalanma.....	24
2.10 Çatlak.....	25
2.11 Yangında Donatı Performansı.....	25
2.12 Isıl Genleşme Etkisi.....	26
2.13 Isıl İletkenliğe Etkisi.....	26

2.14 Gerilme Şekil Değişirme Etkisi	27
3. MATERYAL VE METOT.....	29
3.1 Materyal	29
3.1.1 Deney Elemanlarının Hazırlanması ve Özellikleri	29
3.1.2 Yangın Deneyleri	32
3.1.3 Mekanik Yükleme Deneyleri	39
3.1.3.1 Test Yükleme Düzenegi.....	39
3.1.3.2 Ölçüm Aletleri.....	40
3.1.3.3 Veri Toplama Sistemi.....	40
3.1.3.4 Potansiyometrik Cetveller (Deplasman Ölçer) ve Yerleşimi.....	41
3.1.3.5 Termokupl (Sıcaklık Sensörü)	42
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1 Giriş	43
4.2 Numunelerin Yükleme Sonrası Davranışlarının İncelenmesi.....	43
4.2.1 Referans Numunesi	43
4.2.2 Deney Elemanı-1.....	44
4.2.3 Deney Elemanı-2.....	46
4.2.4 Deney Elemanı-3.....	47
4.2.5 Deney Elemanı-4.....	48
4.2.6 Dayanım	49
4.2.7 Rijitlik.....	49
4.2.8 Çatlak modu.....	50
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	52
KAYNAKLAR.....	54
ÖZGEÇMİŞ	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Sayfa No
2. 1: Standart sıcaklık-yangın eğrileri: (a) global, (b) ilk sıcaklık artışı (ilk 30 dakika).....	15
2. 2: (a) Portland çimento betonundaki termal maruziyet sırasında kemo-fiziksel etkiler; (b) yüksek sıcaklıklarda beton yüzey (Arioz O., 2007).	17
2. 3: (a) Portland çimento hamur numunelerinin uzunluk değişimi; (b) çeşitli kayaların doğrusal termal genişmesi (Bažant ve Kaplan, 1996'dan uyarlanmıştır).	19
2. 4: Farklı test (basınç) sıcaklık seviyeleri için gerilme-şekil değiştirme eğrileri;	21
2. 5: Farklı beton türleri için elastisite modülünün değişimi (Schneider ve diğerleri, 1981).	22
2. 6: Donatıda Sıcaklık Isıl İletkenlik Değişimi (EN1993-1-2, 2005).	26
2. 7: Donatıya Ait Gerilme Şekil Değiştirme Formu (EN1993-1-2, 2005).....	27
3. 1: Kolon Boyut ve Donatı Detayı.....	30
3. 2: Kolon En Kesit Detayı	31
3. 3: a) Deney Elemanları Donatılarının Bağlanması b) Deney Elemanlarının Kalıba Yerleştirilmesi	31
3. 4: Numunelerin düzeneğe yerleştirilmesi.....	32
3. 5: Yangın deneyleri	33
3. 6: Deney elemanı-1 için alev sıcaklığı-zaman ilişkisi.....	34
3. 7: Deney elemanı-1 için sıcaklık-zaman soğuma eğrisi.....	35
3. 8: a) Deney elemanı-3 60. dakikadaki alt yüzey dış sıcaklık değeri b) Deney elemanı-3 60. dakikadaki Termokupl-3'teki iç sıcaklık değeri.....	36
3. 9: Deney elemanı-4 için 45. dakika iç ve dış sıcaklık değerleri.....	37
3. 10: Numunelerdeki bozulmalar a) Soyulma-toz haline gelme-dökülme b) Su kaybı c) Çatlaklar d) Kararmalar	38
3. 11: Numunelerin deney sonunda yerçekimi yönünde hafif eğilmesi.....	38
3. 12: Yükleme Düzeneği.....	40
3. 13: Veri Toplama Sistemi Ön Panel ve Arka Panel Görünümü.....	41
3. 14: Verilerin Toplama Yazılımı.	41
3. 15: Potansiyometrik Cetvel	41
3. 16: Termokupl (Isıl Çift-Sıcaklık Sensörü).....	42

4. 1: Referans elemanında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi	43
4. 2: Referans elemanında 100 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi	44
4. 3: Referans elemanı yük – orta deplasman eğrisi.....	44
4. 4: S1 elemanında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi	45
4. 5: Deney elemanı-1 100 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi.....	45
4. 6: Deney elemanı-1 yük – orta deplasman eğrisi	46
4. 7: Deney elemanı-2 103 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi.....	46
4. 8: Deney elemanı-2 yük – orta deplasman eğrisi	47
4. 9: Deney elemanı-2 103 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi.....	47
4. 10: Deney elemanı-3 yük – orta deplasman eğrisi	48
4. 11: Deney elemanı-4, 93 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi.....	48
4. 12: Deney elemanı-4 yük – orta deplasman eğrisi	49
4. 13 : Deney elemanları deplasman grafiği.....	50
4. 14: Test elemanlarında meydana gelen tipik eğilme çatlakları	51

TABLolar DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
2. 1: Yüksek Sıcaklıklarda Donatının Gerilme Karşısında Tanjant Modül Formülleri (EN1993-1-2, 2005).	28
3. 1: Deney elemanları kesit özellikleri ve donatı oranları.....	29
3. 2: Deney elemanı-1(S1) için sıcaklık-zaman değerleri	33
3. 3: Deney Elemanı-2(S2) için sıcaklık zaman değerleri.....	35
3. 4: Deney elemanı-3(S3) için sıcaklık-zaman değerleri	36
3. 5: Deney elemanı-4(S4) için sıcaklık zaman değerleri	37
4. 1: Deney elemanlarına ait test sonuçları.....	49

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

t	: Zaman
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat Derece
$\varepsilon_c(\theta)$: Betonun termal gerinimi
θ	: Sıcaklık değeri
$\sigma(\theta)$: Gerilme
c_v	: Hacim yoğunluğu
$\varepsilon_s(\theta)$: Sıcaklık karşısında uzama
$\lambda_s(\theta)$: Isıl iletkenlik
f_{sp}	: Donatı dayanımı
$\varepsilon_{sp}(\theta)$: Donatının sıcaklık karşısında uzama miktarı
$\varepsilon_{p,\theta}$: Sınır gerinim
$\varepsilon_{y,\theta}$: Verim gerinimi
$\varepsilon_{t,\theta}$: Akma sınır gerinimi
$\varepsilon_{u,\theta}$: Nihai gerinim
$f_{y,\theta}$: Efektif akma dayanımı
T	: Sıcaklık

KISALTMALAR

ASTM E-119	: Uluslararası Amerikan Standartları
DBYBYH-2018	: Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
E	: Elastisite Modülü
EN 1992-1-2	: Avrupa Betonarme Yapıların Tasarımı
EN1993-1-2, 2005	: Avrupa Çelik Yapılar Tasarımı
HPC	: Yüksek Dayanımlı Beton
ISO834	: Yangın Eğrisi
LPG	: Sıvılaştırılmış Petrol Gazı
NSC	: Normal Dayanımlı Beton
PC	: Potansiyometrik Cetvel
RC	: Betonarme Kolon

1. GİRİŞ

Hizmet ömrü boyunca beton ve betonarme yapılar yangın, patlama, çarpma ve deprem gibi aşırı yüklenme koşullarına maruz kalabilir. Patlama ve dolayısıyla yangın olasılıklarının nispeten yüksek olduğu kimya endüstrilerinde olduğu gibi belirli durumlarda aşırı yüklerin kombinasyonu büyük bir risk oluşturur. İlgili yapının yanı sıra çevredeki binalar için maliyet ve can kayıpları açısından güvenlik koşullarını sağlamak için çoklu tehlike olasılıklarının etkisini hesaba katmak önemlidir.

İki aşırı termo-dinamik yüklemenin birleştirilmesi, mekanik ve fiziksel malzeme özelliklerinde ciddi ve çok hızlı bir bozulmaya ve ayrıca yapısal elemanlarda ani bir hasara neden olabilir. Yüksek yüklenme hızları durumunda somut davranışın yarı statik koşullar altında gözlemlenenden önemli ölçüde farklı olduğu iyi bilinmektedir. Ayrıca, yüksek termal maruziyet, beton iç yapısında mikro çatlaklara ve kimyasal değişikliklere neden olarak orijinal malzeme özelliklerinde global bir bozulmaya neden olur. Yangına maruz kalma, yalnızca beton dayanımını bozmakla kalmaz, aynı zamanda gerilme hızı etkilerini, beton dinamik direncini ve çatlak ilerlemesini önemli ölçüde etkiler.

Yangın, betonarme bir binanın hizmet ömrü boyunca karşılaşılabileceği en ciddi ve tehlikeli koşullardan biridir. Yangın sırasında bir betonarme yapı elemanının yüksek sıcaklıklara maruz kalması, beton ve donatının dayanım ve rijitliğinde ve bunların arasındaki bağda önemli kayıplara yol açar. Bu nedenle, betonarme yapısal elemanların yangın dayanımı, betonarme binalarının tasarımında dikkate alınması gereken önemli bir konudur. Yangından dolayı hasar alan yapıların hasar seviyesinin belirlenmesi ve yangından sonra kullanılabilirlik durumlarının tespiti hem güvenlik hem de ekonomik açıdan önemlidir. Bu tür olayların etkisini en aza indirmek için kullanılan yapısal malzemenin davranışını analiz etmek ve anlamak önemlidir. Beton yapılar söz konusu olduğunda yangın sonrası malzeme özelliklerinin belirlenmesi diğer malzemelere göre daha karmaşıktır. Yüksek sıcaklık seviyeleri altında beton davranışının oldukça karmaşık olduğu bilinmektedir; çünkü ana beton bileşenlerinde, yani çimento hamurunda, agregalarda ve gözenek suyunda farklı fiziksel ve kimyasal değişiklikler meydana gelmektedir. Ayrıca heterojen beton yapısı, agregalar ve çimento macunu arasında farklı termal genişlemelere ve büzülmelere neden olur. Tüm bu olasılıklar sıcaklığa maruziyetin artmasıyla mekanik özelliklerin analiz edilmesiyle

kolayca izlenebilen betonun güçlü bozulmasından sorumludur. Dahası, beton bozulmasının artması ve termal deformasyonların birikmesi, nem kaybı, ısıtma ve soğutma oranları, yangına maruz kalma süresi, elde edilen maksimum sıcaklık, olası harici uygulanan yük vb. dahil olmak üzere diğer birçok etkiden etkilenir.

Yangından zarar görmüş betonarme kolon ve kirişlerin kalan kapasitesini değerlendirmek için sınırlı yaklaşımlar mevcuttur. Mevcut yaklaşımların çoğu, yangına maruz kalma sırasında yaşanan en yüksek sıcaklıklara dayanan, betonun ve donatı çeliğinin mekanik özelliklerinde sıcaklığa bağlı bozulmayı hesaba katmak için sıcaklığa bağlı mukavemet azaltma faktörleri ile modifiye edilmiş oda sıcaklığı mukavemet denklemlerini kullanır. Mevcut yaklaşımlar, artık kapasitenin değerlendirilmesinde yangına maruz kalma sırasında ve sonrasında beton ve donatı çeliğinin gerçekçi malzeme özelliklerini, yangın sonrası artık deformasyonları, yük seviyesini ve yangına maruz kalma sırasında mevcut olan sınır koşullarını hesaba katmaz. Bu nedenle, yangına maruz kalan betonarme kolon ve kirişlerin artık kapasitesini değerlendirirken gerçekçi yangına maruz kalma senaryolarını, yapısal koşulları ve artık mekanik özellikleri göz önünde bulunduran rasyonel bir yaklaşım geliştirmek gerekir.

1.1 Tez Amaçları ve Hedefleri

Bu araştırmanın amacı, betonarme yapısal elemanların termal maruziyetten sonra malzeme özelliklerindeki ve hasar modlarındaki değişimi deneysel çalışma sonucunda analiz ederek beton davranışını incelemektir.

Çalışma kapsamında, 5 adet betonarme kolon deney elemanı prefabrik tesislerinde üretilmiştir. Deneysel çalışma Ege Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın temel hedefleri;

- Beton ve betonarme yapılar üzerindeki birleşik ısı ve statik yükleme etkilerinin deneysel olarak araştırılması.
- Betonarme yapı elemanlarının yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranış ve dayanım kaybını tespit etmek.
- Gerçek yapısal kapasitenin tahmini için betonun termal maruziyetinin etkilerini dikkate almanın öneminin araştırılması.
- Deneysel çalışma sonucu elde edilen verilerin ortam sıcaklığında nihai sıcaklık, hasar

modları, yangına karşı dayanım, yük-deplasman ve zaman-deformasyon ilişkileri açısından irdelenmesi.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

(Lie, vd., 1986), iki normal mukavemetli beton kolon (305×305×3810 mm) numuneler hazırlanmış ve bunları ISO 834'te belirtilen kontrollü soğutma fazıyla ASTM E119 standart yangına maruz bırakmışlardır. Kolonlardan biri 60 dakika ve diğeri 120 dakika boyunca yangına maruz bırakmışlardır. 60 dakikalık yangına maruz kalma durumunda, saatte 500°C'de soğutma sağlanmıştır. 120 dakikalık yangına maruz kalma testinde saatte 250°C'de soğutma yapılmıştır. Yangına maruz kalma sırasında korunan yük seviyesi, her bir kolonun tasarım ACI kapasitesinin yaklaşık %60'ı kadar olduğunu belirtmişlerdir.

(Lie, vd., 1986), yangına maruz kaldıktan sonra kalan betonarme kolon kapasitesini bulmaya yönelik bir çalışma yapmışlardır. Oda sıcaklığında kolonların hesaplanan (faktörsüz) nominal eksenel kapasitesi 3545 kN olarak bildirmişlerdir. Yangına maruz kalan kolonların bildirilen artık kapasitesi, 60 dakikalık ve 120 dakikalık yangına maruz kalma için sırasıyla 1987 kN ve 2671 kN olarak bulunmuştur. Daha uzun yangın sürelerine maruz kalan yapısal elemanlar, benzer bir eleman üzerindeki daha kısa yangına maruz kalma süresine kıyasla daha az kapasiteye sahip olmalıdır. Ayrıca 120 dakikalık bir yangına maruz kalan kolonun bildirilen darbe hızları, betonun 60 dakikalık bir yangına maruz kalan kolona göre daha fazla hasar gördüğünü göstermektedir. (Lie, vd. 1986), bu çelişkiler için herhangi bir gerekçe sunmamışlardır ve ayrıca betonarme kolonların yangına maruz kaldıktan sonra kalan kapasitesi alanında ek araştırmanın gerekli olduğuna dair bildirimde bulunmuşlardır.

(Lie, vd., 1986), her bir kolonun yangına maruz kalmasından önce, yangın testinin başlamasından yaklaşık 20 saat sonra ve yangın testinin başlamasından yaklaşık 25 saat sonra, her bir kolonun sadece orta bölümünde parçalanmış bölgede ultrasonik darbe hızı testleri gerçekleştirmişlerdir. Alınan ölçüm şeması, kolon kesiti boyunca doğrudan aktarımdan oluşturulmuştur (yani transdüser, kolonun bir yüzüne yerleştirilir ve alıcı, transdüser ile aynı hizada kolonun karşı yüzüne yerleştirilir). Doğrudan ultrasonik darbe hız ölçümleri, yangın testinden önce ve sonra kolonun tüm yüksekliği boyunca alınmıştır. Kolonun orta kısmındaki delamine malzeme el aletleri ile ufalanmış ve bu bölgede ultrasonik darbe hız ölçümleri de yapılmıştır. Dönüştürücüden gelen mekanik ses dalgası geçiş süresi, bir darbe hızı vererek kat edilen mesafeye bölünür. 60 dakikalık bir yangına maruz kalan kolon için darbe hızı ölçümleri, yangına maruz kalmadan önceki orijinal ölçülen değerden

%64 daha düşüktü. 120 dakikalık yangına maruz kalan kolonun darbe hızı, orijinal değerden %71 daha düşüktü. Bu bulgular, daha düşük darbe hızlarının, daha fazla yangın hasarı yaşamış betonla çakıştığını göstermektedir. Çalışma, ultrasonik darbe hız ölçümlerinden yangına maruz kaldıktan sonra betonarme kolonlarının kalan kapasitesinin tahminini rapor etmemiştir.

(Ataman, 1991), ısı geçiş kuralları, ısı taşınmasının sonlu farklar yöntemiyle incelenmesi üzerinde durmuştur. Yüksek sıcaklık etkisiyle oluşan sıcaklık farklarının beton ve donatı üzerinde etkilerini ve sıcaklık etkisiyle betonda oluşan kırılmalar gibi genel bilgiler üzerinde durmuştur. Yüksek sıcaklıkların ve soğutma türlerinin betonun eğilme ve basınç dayanımları üzerindeki etkilerinin deneysel olarak incelemiştir.

(Shi, X. vd., 2004), yangına maruz kalan betonarme elemanlarının özelliklerini araştırmak için altı adet numuneyi test etmişlerdir. Numunelerin altlarına ve yan yüzeylerine ısı verilmiştir. Test sırasında betonarme yükleme numunenin kalınlığının sıcaklık karşısında önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Böylece betonarme elemanların kalınlıkların artırılması yangın dayanımı açısından önemli olduğuna değinmişlerdir.

(Tan, 2004), kolonların yangına dayanımlarını tahmin edebilmek için basit ve rasyonel bir tasarım yöntemi geliştirmiştir. İlk olarak kolonun bir yüzeyini yangına maruz bırakmış. Burada ısıtılan kolon için sadece tek eksenli eğilmeleri dikkate almıştır. İki yönlü sıcaklığa maruz bırakılan betonarme kolon için ise çift yönlü eğilme etkisi dikkate almıştır. Yangınları hesaplamak için Amerikan kodları, tabloları ve çizelgeleri dikkate alınmıştır. Bu çizelgelere bağlı olarak yangın koşullarındaki kolonlar için kritik gerilmeleri hesaplamıştır.

(Uysal, 2004), yüksek sıcaklığın, betonarme yapıların dayanımları için önemli bir faktör olduğunu göstermiştir. Yapı elemanları için sıcaklık dağılımlarını incelemiş ve yapı elemanları için tehlike arzı oluşturabilecek sınır değerleri hakkında çalışma yapmıştır. Bu sınır koşullarında yangına maruz kalan betonarme elemanların boyutlarının arttırılmasının yangına karşı dayanımını önemli ölçüde arttırdığını tespit etmiştir. Kütle şeklinde dökülen büyük hacimli betonların yangından etkilenmeyeceğini iddia etmiştir.

(Bratina S. vd, 2005), yaptıkları çalışmada doğrusal olmayan bir yapı elemanını sonlu elemanlar yöntemiyle formülize ederek, betonarme kolonların yangındaki davranışlarını

incelemişlerdir. İlk aşamada yangın sırasında sıcaklık dağılımlarını inceleyip, bu dağılımları sıcaklık yükleri olarak almışlardır. Sonrasında oluşturdukları modele bu yükleri yansıtarak gerçek modelle kıyas yapmışlardır.

(Chung J.H ve Consolazio G., 2005), yangın gibi hızlı ısınmaya maruz kalmış betonarme yapıların ısı ve kütle modelini sonlu elemanlar yaklaşımı ile simüle ederek, yangın esnasında betonarme yapının termo-hidrolojik tepkisine bakmışlardır. Sonrasında betonun sıcaklığı, boşluk basıncı, sıcaklığın zamana bağlı değişimi, termal yüklemeler altında yükleme koşullarını tahmin etmişlerdir. Yüklemeler ve ısı karşısında betonarme yapısındaki agregalar, çimento ve çeliğin davranış özelliklerinin tespitinde katkı vermişlerdir.

(Xiao ve Zhang, 2007), yüksek sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agregalardan oluşan betonun artık basınç dayanımını değerlendirmeyi amaçlayan deneysel bir çalışma yürütmüştür. Tüm beton küpler, 200 °C ile 800 °C arasında değişen önceden belirlenmiş bir maksimum sıcaklığa kadar ısıtılmış ve ardından oda sıcaklığına soğutulduktan sonra test edilmiştir. Çalışma sonucunda, agrega oranının, soğutmadan sonra basınç yüküne dayanmada beton performansı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir.

(Terro, 2008), yapılardaki yangın analizlerini iki aşamada incelemiştir. İlk olarak, doğrusal olmayan termal elementler içindeki sıcaklık dağılım geçişleri için analiz yapmıştır. İkincisi rijitlik matrisindeki değişimler nedeniyle yapının malzeme özelliklerindeki değişiklikleri buna göre hesaplayıp statik bir analiz dizini gerçekleştirmiştir. Hem termal hem de sonlu eleman yöntemi ile çözümler gerçekleştirerek zaman kavramı üzerine inceleme yapmıştır.

(Zeybek, 2008), yangına maruz bırakılmış betonarme kolonlar hakkında deneysel ve bir takım teorik çalışmalar yapmıştır. İki ayrı yöntem irdelemesi yapmıştır. Betonarme bir kolonun yangına dayanıklı olarak tasarımı hususunda ve belirli bir geometrisi ve donatıları olan bir betonarme kolonun ISO 834 standartlarına göre yangın dayanım sürelerinin tahkikini yapmıştır.

(Kodur V.K.R, ve Dwaikat M., 2008), yangına maruz kalan betonarme kirişlerin davranışını değerlendirmek için sayısal model önermişlerdir. Betonarme kirişlerin yangın direncini değerlendirmek için sayısal prosedürle ilişkili üç aşama; yani yangın sıcaklığı hesabı, ısı

analiz ve dayanım analizi açıklanmıştır. Betonarme kirişlerin yangın dayanımını değerlendirirken sehim ve sehim göçme oranı kriteri dikkate alınması gerektiğini belirtmişlerdir.

(Xavier, 2009), Yangın sırasında betonarme binaların davranışlarını incelemiştir. Çalışmasında farklı yangın senaryoları oluşturmuş ve betonarme çerçeve hazırlamıştır. Malzemelerin mukavemetini sonlu elemanlar metodu kullanarak yangın kaynaklı etkiler üzerine araştırma yapmıştır. Yangın güvenliği değerlendirilmesini tek elemana dayalı basitleştirilmiş kesit hesap yöntemleri ile gerçekleştirmiştir. Gerçek sonuçlardan elde edilen veriler ile sonlu elemanlardan aldığı verileri kıyaslamıştır. Bu kıyaslamaları kullanarak, kesme kuvvetinin kritik hale gelebileceğini işaret etmiştir.

(Ali F v.d., 2010) beş yükleme seviyesi (0.2, 0.3, 0.4, 0.5 ve 0.6) altında otuz adet yüksek dayanımlı beton kolonları test etmişlerdir. Deneysel çalışmalar ile sonlu elemanlar analiz sonuçları arasında kıyaslama yapmışlardır. Bazı numunelerin aynı şartlar altında beton dökülmesine rağmen kendi aralarında farklılıklar gözlemlemişlerdir.

(Martins A.M.B., vd., 2010), yangına maruz kalan sınırlandırılmış termal uzamaya sahip betonarme kolonların davranışı üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Boyuna donatı oranı, kolon narinliği, sınırlama seviyesi, yük seviyesi ve yük eksantrikliği dahil olmak üzere, yangına maruz kalan kolonların davranışına çeşitli parametrelerin etkisini test etmişlerdir. Çalışma sonucunda, boyuna donatı oranının artırılması betonarme kolonların yangına dayanımını arttırdığını ancak donatı çubukları için geniş bir çapın kullanılmasının, donatı oranını artırarak sağlanan yangına dayanıklılık üzerindeki olumlu etkiyi ortadan kaldırabildiğini belirtmişlerdir. Boyuna çelik donatı alanını arttırmak gerekirse, kolon yüzleri etrafına eşit olarak dağıtılmış daha fazla sayıda daha küçük çaplı çubukların kullanılmasını önermişlerdir. Artan narinliğin, yangın direncinde önemli bir azalmaya yol açtığını ifade etmişlerdir.

(Xiaoyong L. ve Fanjie B., 2011), yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonlar üzerine bir çalışma yapmıştır. 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde silindir ve 15×15×15cm küp numuneler hazırlayıp, bu numuneleri 100°C – 600°C sıcaklığa maruz bırakarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklığa maruz bırakılan numuneler oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra test etmişlerdir. Yaptıkları deney sonuçlarında 200°C – 300°C

sonrasında betonun basınç dayanımında ciddi azalma olduğunu ve kritik eşiği ise 400°C olarak belirlemişlerdir.

(Nassar, 2011), sıcaklıktaki önemli artışların betonun ve donatının mekanik etkisine önemini irdelemiştir. Yangın sıcaklıkları, yeni gerilmelere ve termal etkilere neden olmuştur. Bu sıcaklık artışları betonun patlayarak dökülmesine sebep olmuştur. Çalışmasında farklı içeriklerde üç beton karışımı hazırlamıştır. 10×10×30 cm boylarında numuneleri 2, 4 ve 6 saat boyunca 400°C, 600°C ve 800°C’de sıcaklığa maruz bırakmıştır. 400°C’e üstündeki bütün numunelerin akma dayanım sınırlarını geçtiğini belirtmiştir.

(Gernay, 2011), ilk olarak sıcaklık gelişimini incelemiştir. İkinci olarak yangına maruz kalan yapı elemanın sıcaklığını belirlemek için termal analiz yapmış ve son olarak yüksek sıcaklığa maruz kalan elemanın var olan standartlarla yük kapasitesi kıyaslamasını yapmıştır.

(Martins A.M, ve Rodrigues J.P.C., 2012), yüksek yangına maruz kalan betonarme kolonların yangın esnasında donatı davranışlarını incelemişlerdir. Boyuna donatının narinliğini ve rijitliğini deneysel çalışmalarında EN 1992-1-2’yi baz alarak kıyaslama yapmışlardır. Yapının yangına dayanımının kolonlara bağlı olduğu sonucuna varmışlardır. Kolonun boyutları, donatı oranı, narinliği, eksantrikliği ve yük seviyesi yangın direncini etkileyen ana parametreleri incelemişlerdir.

(Kodur V., Raut N., 2012), parametrik çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile, çift eksenli eğilme altında betonarme kolonların yangın dayanımını değerlendirmek için basitleştirilmiş bir denklem sunmuşlardır. Önerilen denklem, yangının neden olduğu dökülme, 1, 2, 3 veya 4 taraflı yangına maruz kalma, iki eksantrik yükleme ve tasarım yangını senaryolarının etkilerini açıklamaktadır. Denklem geçerliliğini, denklemdeki tahminlerin sonlu eleman analizi ve test verilerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır.

(Kodur V., vd. 2013), etriye konfigürasyonunun betonarme kolonların yangına dayanıklılığı üzerindeki etkisini modellemek için analitik bir yaklaşım sunmuşlardır. Çalışma kapsamında yüksek dayanımlı betondan imal edilmiş betonarme kolonlar seçilmiştir. Önerilen yaklaşım, sismik tasarım ilkelerine dayanmaktadır ve gözenek basıncı, mekanik gerilme ve termal genişmeden kaynaklanan etkili gerilmeleri değerlendirerek etriyelere etki eden kuvvetin

hesaplanmasını içermektedir. Önerilen etriye modeli, betonarme kolonların yangın tepkisini izleyebilen mevcut bir makroskopik sonlu eleman tabanlı yangına dayanıklılık analizi bilgisayar programıyla modellenmiştir. Sayısal çalışmalar sonucu, 135° bükülmüş etriyeye sahip yüksek dayanımlı kolonlarının 90° bükülmüş etriyelere sahip yüksek dayanımlı kolonlardan daha yüksek yangın dayanımına sahip olduklarını belirtmişlerdir.

(Emberley, 2013), betonarme kolonların mukavemetini etkileyen faktörleri ele almıştır. Uzunluk, eksantriklik, yük, kesit alanı, beton ve donatı mukavemeti parametrelerini seçmiştir. Betonarme kolonlar sıcaklığa maruz kaldığı zaman malzeme özelliklerinde ve donatılarda sıcaklık artışına bağlı değişiklikler gözlemlemiştir. Akma dayanımındaki ve elastisite modülündeki azalma kolonun taşıma gücünde azalmaya neden olmuştur. Yangın süresini, yangına maruz kalmanın başlangıcından sonuna kadar maruz kaldığı süreyi yangın süresi olarak tanımlamıştır.

(Kodur vd., 2013), beton basınç dayanımlarının 62 ile 91 MPa arasında değişen beş yüksek mukavemetli beton kolon (203×203×3350 mm) imal edip, test etmişlerdir. Her numune standart bir ASTM E-119 yangınına ve ardından iyi tanımlanmış bir soğutma fazına tabi tutulmuştur. Betonarme kolonların yangına maruz kaldıktan sonra artık kapasitesini değerlendirmişlerdir. Beş yüksek dayanımlı betonarme kolon, soğutma fazı tamamlandıktan sonra artık kapasite açısından test edilmiştir. Test edilen kolonların her biri için her yangına maruz kalma süresi boyunca, kolonun tasarım yük taşıma kapasitesinin yüzde 40 ila 60'ı arasında bir yük oranı muhafaza edilmiştir. Yangına maruz kalma bölgesi, her bir kolonun orta bölgesi olan 1700 mm bölgesi seçilmiştir. Yangına dayanıklılık testlerinin tamamlanmasından 24 saat sonra her numune üzerinde yangın sonrası artık mukavemet testleri gerçekleştirilmiştir. Kolonlar, yangına maruz kalma sırasındaki ile aynı destek koşulları altında test edilmiştir. Kolonlar, hasar oluşana kadar dakikada 10 kN oranında yükleme yapılmıştır. Bu testlerden çıkarılan temel sonuçlar, betonarme kolonlarının, özellikle yangından kaynaklanan dökülme meydana gelmediğinde, yangına maruz kaldıktan sonra orijinal yük taşıma kapasitelerinin çoğunu (yüzde 80 ila 90) koruduklarıdır.

(Bikhiet, M.M., Shafey N.F., ve El-Hashimy., 2014), yangın, betonarme kolonların taşıma gücünün önemli ölçüde azalmasına neden olabileceğini belirtmişlerdir. Araştırmanın ilk kısmında (15×15×100cm) on beş adet numune hazırlamışlardır. Bu on beş numune 600°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Daha sonrasında bu numenleri üç boyutlu doğrusal olmayan

sonlu elemanlar programı kullanarak yapılan deneyin teorik analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Bu çıkan parametrelerle betonun dayanımını, yangın süresini, yük kapasitesini, donatıların akma dayanımları için kıyaslama yapmıştır. Yangına tabi tutulmayan kolonda yanal yük altında ilk çatlak; %80 kuvvetten sonra meydana gelirken, yangına maruz kalan kolonun ilk çatlağı %50 yük seviyelerinde meydana gelmiştir. Yüksek kaliteli donatı demiri, düşük kaliteli donatı demirine nazaran %55 daha fazla yük taşıma kapasitesi olduğunu ortaya koymuşlardır.

(Shah A.H. ve Sharma U.K., 2017), sekiz farklı tipte güçlendirilmiş kolon üzerinde yapılan yangına dayanıklılık deneylerinden elde edilen sonuçları sunmuşlardır. Çalışma beton dayanımının, donatı ve donatı konfigürasyonunun betonarme kolonların yangına dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemek için yapılmıştır. Yüksek mukavemetli betonun dökülmeye eğilimli olmasının dezavantajı, betonarme kolonların güçlendirilmiş donatı konfigürasyonu ile hafifletilebileceğini belirtmişlerdir.

(Hajiloo H., vd., 2017), tamamen cam elyaf takviyeli polimer çubuklarla güçlendirilmiş iki beton döşemenin yangına dayanıklılığı, tam ölçekli bir standart yangın testi ile deneysel olarak araştırmışlardır. Yangın testi boyunca döşemelere yükleme yapılmıştır. Beton yapılarda fiber takviye çubuklarının daha verimli ve ekonomik bir çözüm sağlayacağını ifade etmişlerdir.

(Xiao J., Xie Q., ve Xie W., 2018) yüksek sıcaklığın betona ve çeliğe verdiği zararları incelemeye yönelik bir çalışma yürütmüşlerdir. Yüksek sıcaklığın belli bir seviyeden sonra betonun çekme mukavemetini azalttığını, donatının akma dayanımına yaklaştığı için beton ve donatı aderansının zayıfladığını ortaya koymuşlardır. Aderanstaki bozulmanın betonun yapısındaki bozulmadan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Nervürlü çelik donatının, nervürsüz donatıya nazaran yüksek sıcaklıkta bağ kuvvetlerinin azaldığını ifade etmişlerdir.

(Jin L., vd., 2018), dört adet çelik lifli betonarme kiriş, yangına dayanıklılıklarını araştırmak için darbe öncesi ve yüklemmeden sonra (darbe hızı $\frac{1}{4}$ 5,4 m / s) test etmişlerdir. Kirişler önce darbe yüklemelerine tabi tutulmuş, ardından sabit bir yük ile yangına maruz bırakılmıştır. Kirişlerin hasar mekanizmaları, orta açıklık deplasmanları, sıcaklık alanı ve donatılarda meydana gelen uzamaları incelemişlerdir. Aynı zamanda şekil değiştirme hızı ve yüksek sıcaklığın etkilerini dikkate alan üç boyutlu bir sonlu eleman sayısal modeli

oluşturmuşlardır. Simülasyonlarda iki aşamalı bir analiz yöntemi kullanılmıştır. İlk adımda, darbeli yükleme süreci simüle edilmiş, ikinci aşamada hem yangına hem de sürekli mekanik yüklemeye maruz kalan çelik lifli betonarme kirişlerin hasar davranışı, sıralı olarak bağlanmış bir ısıl gerilme analizi yöntemi ile modellenmişlerdir. Çalışma sonucunda, düşük enerjili ön darbe ile sınırlı olan çelik elyaf içeriği, hasarlı kirişlerin termal ve mekanik davranışı üzerinde ihmal edilebilir bir etkiye sahiptir. Hem darbe yüklemesine hem de yangına maruz kalan çelik lifli betonarme kirişlerin mekanik ve termal davranışları, mevcut FE modeli ile etkin bir şekilde simüle edilebileceğini belirtmişlerdir.

(Alogla S., Kodur V.K.R., 2018), eşzamanlı yükleme altında yangına maruz bırakılan betonarme (RC) kolonların üzerindeki geçici sünmenin etkisini izlemek için üç boyutlu bir sonlu eleman modeli ABAQUS programında oluşturmuşlardır. Farklı koşullar altında betonarme kolonlarının yangına tepkisi ve geçici sünmenin etkisini değerlendirmek için yangına maruz kalma süresi, farklı yük seviyeleri ve yangına maruz kalan tarafların sayısı dahil olmak üzere modele farklı parametreler uygulamışlardır. Bir kolon iki veya üç yandan yangına maruz kalmasından kaynaklanan asimetrik termal gradyanlar, geçici sünme etkilerini artırabilir ve dolayısıyla yangına dayanıklılığı etkileyebileceğini belirtmişlerdir. Genel olarak, analizden elde edilen sonuçlar, geçici sünmenin ihmal edilmesinin, eksenel yer değiştirmelerin daha düşük tahminine ve dolayısıyla, özellikle şiddetli yangın senaryolarına ve daha yüksek termal gradyanlara maruz kaldığında, betonarme kolonlarda yangın dayanımının iyi tahmin edilebilmesine yol açabileceği sonucuna varmışlardır.

(Yang Y., vd., 2019), hazırladıkları 12 adet betonarme T kirişinin 11 tanesini yangına maruz bırakıp sekiz tanesini öngerilmeli çelik levhalarla güçlendirmişlerdir. Örneklerin kesme göçme modu ve kesme kapasitesi üzerine çeşitli parametrelerin etkileri, ısıtma süresi, kayışlarla takviye edilen katman sayısı ve bantların aralığı dahil olmak üzere incelenmiştir. Testler sonucunda, yangın sonrası güçlendirilmiş numunelerin kesme kapasitesinin ve sünekliğinin, güçlendirilmemiş numunelere göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Öngerilmeli çelik levhalarla güçlendirildikten sonra, T-kirişler, sırasıyla 60, 90 ve 120 dakika yangına maruz kaldıktan sonra nihai yükün %122, %138 ve %106'ya kadar çıktığını belirtmişlerdir.

(Buch S.H., vd., 2019), çalışma kapsamında yürütülen testlerden ve literatürde bulunan diğer çalışmalardan elde edilen veriler, deneysel bir model geliştirmek için kullanmışlardır.

Yangın sırasında betonun patlayarak dökülmesi dahil olmak üzere çeşitli anahtar parametrelerin etkisini dahil ederek betonarme kolonların yangına dayanıklılığını belirlemek için bir model geliştirmişlerdir. Beton kabuk dökülmesinin %15'ten %80'e yükselmesi, yangın dayanımının %77 oranında azalmasına neden olacağını belirtmişlerdir.

(Han L-H., vd., 2020), betona gömülü çelikten yapılmış kompozit kolonların yangın sonrası performansına ilişkin sayısal bir çalışma sunmuşlardır. 600×600 mm kesitli bir kompozit kolonunun, 45 dakikalık bir ısıtma süresi ve ardından 139 dakikalık bir doğrusal soğutma aşaması ile tam aralıklı yangına maruz kaldıktan sonra orijinal yük taşıma kapasitesinin 0,87 katını koruduğunu belirtmişlerdir. Kompozit kolonu ortam sıcaklığına kadar tamamen soğuduktan sonra, çelik bölümün taşıdığı yük oranı, ortam sıcaklığındaki seviyeden (%20) önemli ölçüde daha yüksek olan %73'e yükselmiştir. Parametrik çalışma sonucunda, bir dizi faktörün, yani yangına maruz kalma süresi, kesit boyutu, narinlik oranı ve beton dayanımının, yangın sonrası artık dayanımı önemli ölçüde etkilediğini ifade etmişlerdir.

(Xu H., vd., 2020), prekast beton kolonların yangın dayanımına donatı formları, yük şiddeti ve yangın koşullarının etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Testler sonucunda, prekast beton kolonların bağlantı bölgesinin yangına dayanıklılığının, bağlantısız bölgeninkinden daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Betonda yangının neden olduğu dökülme, kolonların ısıl tepkilerini önemli ölçüde etkiler ve yangın dayanımının azalmasına neden olacağını, büyük çaplı donatı ile güçlendirilmiş prekast beton kolonların, normalde daha kalın beton örtüsüne sahip olduklarından, büyük miktarda beton dökülmesi ve etriye hasarı olma olasılığı daha yüksek olacağını ifade etmişlerdir.

(Albrifkani S. ve Wang Y.C., 2020), yapısal tepkinin büyük deformasyon aşamasını göz önünde bulundurarak, farklı doğrusal eksenel ve dönme kısıtlama seviyelerine sahip yangına maruz betonarme kirişlerin davranışını incelemek amacıyla sonlu elemanlar tabanlı bilgisayar programında sayısal simülasyon çalışması yapmışlardır. Kiriş uçlarındaki dönme kısıtlama rijitliği arttıkça, betonarme kirişler üç eğilme hasarı modu yaşayabilir: (I) orta açıklıkta pozitif eğilme dayanımı tarafından yönetilen kiriş eğilme hasarı, (II) uçlarda üst boyuna donatının ve orta açıklıkta alt boyuna donatının birleşik kırılmasıyla ve (III) uçlarda beton ezilmesi ile olabileceğini ve bu eğilme hasar modlarının, kirişin eğilme dayanımı süresini ve zincir hareketinin gelişimini etkileyeceğini belirtmişlerdir. Kiriş uçlarının altındaki yüksek sıcaklıkların beton üzerindeki katkı maddesi etkileri nedeniyle yangında

betonarme kirişler üzerindeki aksel ve dönme kısıtlamaları arasında güçlü etkileşimler olduğunu ifade etmişlerdir. Beton gevrek bir şekilde kırılmıştır. Bu nedenle, ilk olarak betonun, betonarme kiriş uçlarında yangına maruz kalan yüzeyde sıkıştırılarak ezilmesi gerçekleştiğinde, kiriş orta açıklığında plastik bir mafsal geliştirirken kiriş uçlarında negatif eğilme dayanımını korumanın zor olduğunu belirtmişlerdir.

(Jafarzadeh H. ve Nematzadeh M., 2020), çelik lifli ve lifsiz GFRP çubuklarla güçlendirilmiş yüksek dayanımlı beton (HSC) kirişler imal edip ve 20, 250, 400 ve 600 °C sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra dört noktalı eğilme testine tabi tutmuşlardır. Ayrıca, servis koşullarında elde edilen ampirik sonuçlar, yani çatlak genişliği ve deplasmanlar, kodların ve diğer araştırmacıların tahminleriyle karşılaştırmışlardır. Son olarak, kesit analizi yöntemi kullanarak ısıtılmış ve ısıtılmamış kiriş numunelerinin yük-sehim ilişkisini tahmin etmek için bir analitik model önermişlerdir. GFRP-RC kirişlerin artık eğilme davranışı, sıcaklıktan önemli derecede etkilendiğini belirtmişlerdir. Bu bağlamda kirişlerin yük taşıma kapasitelerinde 250 °C'de önemsiz azalma, 400 °C'de önemli artış ve 600 °C'de ciddi bozulmalar gözlenmiştir. Özellikle yüksek sıcaklıklarda çatlakların derinleşmesi ve genişlemesinin kontrol altına alınmasında çelik lif ilavesi ve donatı oranının artırılmasının etkileri önemli olduğunu belirtmişlerdir.

(Kodur V. ve Banerji S., 2021), yangın koşulları altında gözenek basıncı, termal gradyanlar ve yapısal yüklenme nedeniyle oluşan gerilmeleri hesaba katarak beton yapı elemanlarında parçalanmayı tahmin etmek için sayısal bir yaklaşım sunmuşlardır. Parçalanmada boşluk basıncı kaynaklı gerilmelerin birincil tetikleyici olduğunu, termal ve mekanik gerilme seviyelerinin ise beton dökülme oluşumu üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, dökülme seviyesi, şiddetli yangına maruz kalan beton kirişlerin özellikle yüksek dayanımlı beton (YDB) ve ultra- yüksek performanslı beton (UYDB) kirişlerin yangın direncini önemli ölçüde etkileyeceğini bildirmişlerdir.

(Zhang H.Y. vd., 2021), her biri hasarsız bir kiriş ve farklı ön hasar seviyelerine sahip üç kiriş içeren, orantılı geometrik boyutlara (1:2) ve aynı donatı oranına sahip iki grup betonarme kirişin, yangın koşulları altında etkisini araştırmak için test etmişlerdir. Önceden hasar görmüş kirişlerin yangın direncini belirlerken, yangına maruz kalmadan önce oluşan artık deplasman dahil (veya hariç), toplam deplasmanın yangına dayanıklılık değerleri üzerinde dikkate değer bir etkisi olmadığını belirtmişlerdir. Hafif ön hasarın (hizmet

seviyesindeki yüklenme nedeniyle karşılaşılan) kirişin yangın direnci üzerinde önemli bir etkisi olmadığını, ancak büyük ön hasarın (örneğin, donatının akma noktasına gelmesi gibi) yangın direnci üzerinde, özellikle daha büyük ölçekli kirişler için etkisi olduğunu ifade etmişlerdir. Bunun nedeni, daha yüksek bir ön hasar seviyesi ile ateş altında kirişlerde meydana gelen rijitlik ve mukavemetteki daha yüksek bir bozulmadır.

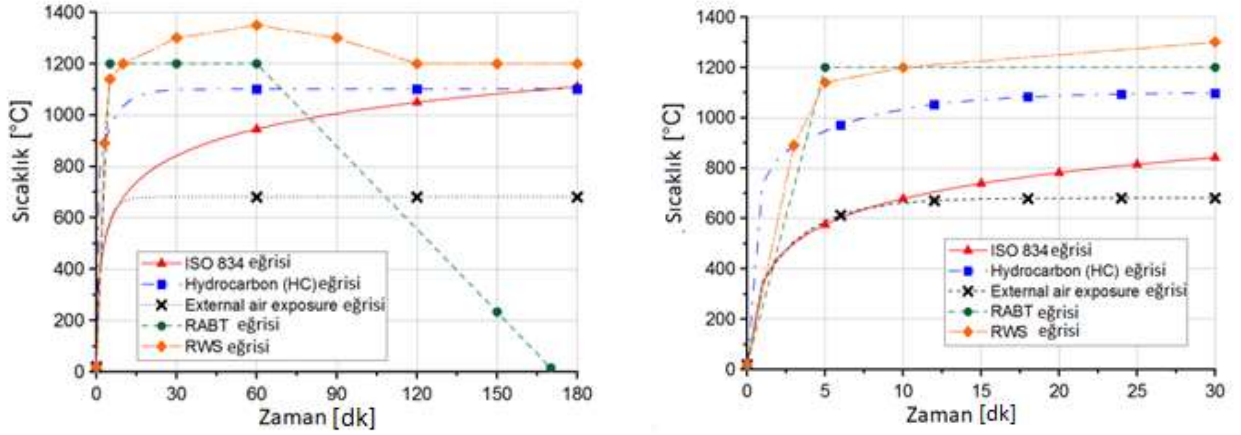
(Rehman A. vd., 2021), yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme kirişlerin eğilme bağ dayanımını sayısal ve deneysel olarak incelemişlerdir. Orta açıklıkta sağlanan farklı bindirme boylarına sahip 80 120 900 mm boyutunda normal ve yüksek dayanımlı (NDB ve YDB) betonarme kirişler 28 gün boyunca kürlenmiştir. Betonarme kirişler daha sonra, 5 °C/dk'lık bir ısıtma hızına karşılık gelen 200 °C'lik bir aralıkta 200 °C ile 800 °C arasında değişen tek bir ısıtma-soğutma döngüsünden sonra bağ kuvveti için eğilme testine tabi tutulmuştur. NDB kirişleri 600 °C'ye kadar dayanmıştır, YDB kirişleri ise 800 °C'ye kadar termal maruziyetten bir miktar artık güçle kurtulmuştur. Kirişlerin dayanım ve rijitliklerinin sıcaklığın artması ve bindirme uzunluğunun azalmasıyla azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca donatı çapının küçülmesiyle bağ dayanımının arttığı, kirişin rijitliğinin artmasıyla çekme ekinin çapı artıp sünekliğin azaldığı gözlemlenmiştir.

(Cheng P. vd., 2022) betonda oluşan parçalanmalarda, termal etkinin önemli bir rol oynadığı ve buhar basıncının parçalanma oluşumunu hızlandırdığını ve parçalanmanın birleşik termal genişleme ve buhar basıncının bir sonucu olduğunu ifade etmişlerdir.

(Liu C. vd., 2023) Yüksek sıcaklığın RC kirişlerin termal ve statik mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek ve artık taşıma kapasitesinin tahmini için bir yöntem önermişlerdir. 4 adet basit mesnetli kiriş üzerinde yangın testleri ve doğal soğuma sonrası statik yüklenme testleri gerçekleştirmişlerdir. Yangına maruz kalma süresinin artmasıyla betonarme kirişlerin artık eğilme kapasitesinin azaldığını ve enkesitin alt kısmındaki çekme donatı gerilmesi azalmış, donatı ile beton arasındaki kayma ise artmıştır.

2.1 Yangın Senaryosu

Termal maruziyetin etkisini araştırmak ve yapının dayanımını doğrulamak için, gerçek yangın davranışını şematik bir şekilde temsil etmek gerekir. Bu nedenle sıcaklık-zaman eğrileri benimsenmiştir. Tasarım yangın eğrilerinin tümü sıcaklık-zaman (T-t) eğrileri olarak ifade edilir ve esas olarak Eureka testleri, ISO eğrileri, Eurocode eğrilerinin sonuçlarına dayanır. Hidrokarbon eğrileri ve Rijakswaterstaat eğrisi (ISO834, Eurocode1), yangına maruziyetin yoğunluğunun bir ölçüsü olarak kabul edilebilecek yangın şiddeti kavramı konusunda birbirlerinden farklılaşırlar. Farklı olası yangın senaryolarının davranışını şematize ettikleri ve yapının maruz kaldığı gazın sıcaklığına atıfta buldukları için (yangın yükü (yakıt) türü ve miktarının işlevi), başlangıç eğimi, maksimum sıcaklık ve ısıtma süresi her eğri için farklıdır. (Şekil 2.1). Genel olarak, standart sıcaklık-zaman eğrileri, ana uygulama alanlarına (binalar, açık deniz / petrokimya, tüneller) göre üç gruba ayrılabilir (Khoury, 2000).



Şekil 2. 1 Standart sıcaklık-yangın eğrileri: (a) global, (b) ilk sıcaklık artışı (ilk 30 dakika).

2.2 ISO834

Standart ISO834 eğrisi, yapısal elemanların ve binaların tasarlanması ve analiz edilmesinde en sık kullanılan eğridir. Ana yangın kaynağının kağıt, ahşap, kumaş vb. olduğu varsayıldığından Selülozik eğri olarak da bilinir. İlk eğim, ilk 10 dakikada 20 °C'den 671 °C'ye artışla çok yüksektir. Bir saat sonra 945 °C sıcaklığa ulaşılır. Sıcaklık-zaman artışı T (t), (°C cinsinden) aşağıdaki denklemle temsil edilir:

$$T(t) = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1)$$

2.3 Hidrokarbon (HC) eğrisi

HC eğrisi, belirli bir durumda benimsenen alternatif bir sıcaklık-zaman gösterimidir. Aslında açık deniz ve petrokimya endüstrilerinde yangın geliştiğinde, farklı kaynak yakıt nedeniyle maksimum sıcaklık çok daha yüksek seviyelere ulaşır. Bu durumlarda benzin, gaz, kimyasallar yanmaya dahil olur ve termal yükselme de selülozik malzemenin yanması durumundan çok daha hızlıdır, yani ilk 10 dakikada sıcaklık neredeyse 1100 °C'ye ulaşır.

Hidrokarbon (HC) yangın eğrisinin sıcaklık eğilimi aşağıdaki denklemle tanımlanır:

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

2.4 Harici yangın eğrisi (External fire curve)

ISO834 ve HC eğrisine ek olarak, Eurocode 1'de harici yangın eğrisi açıklanmıştır. Bu eğri, ana yapının dışındaki bir cephedeki yapısal elemanların davranışını şematize eder:

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

2.5 Beton

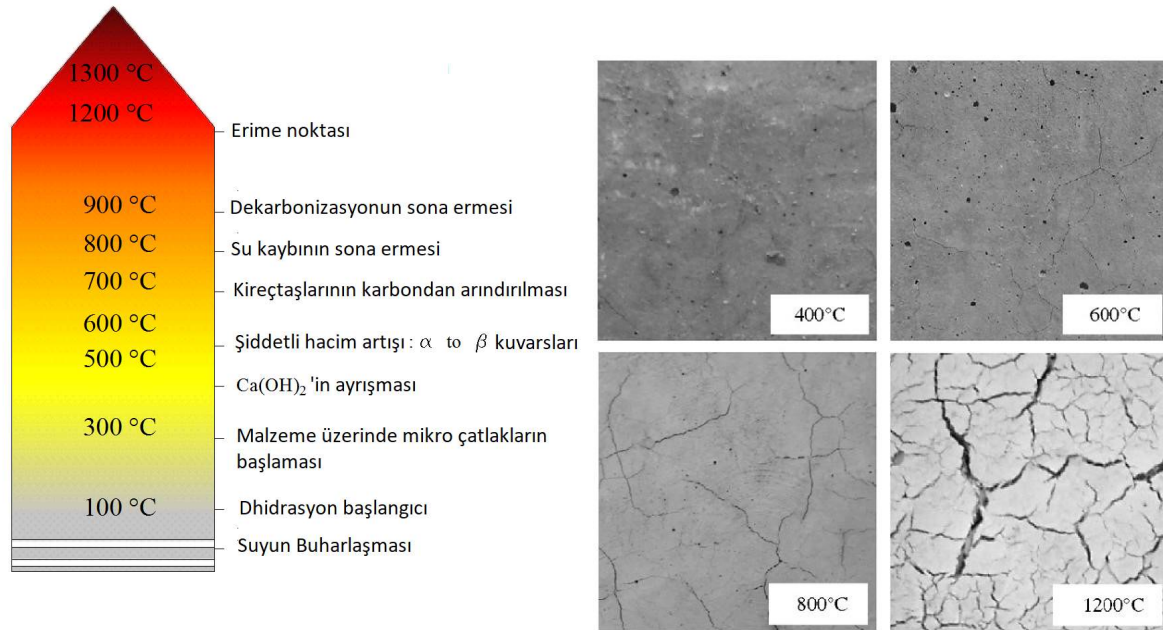
Beton, agrega, çimento ve sudan oluşan kompozit heterojen bir malzemedir. Beton ve betonarme yapılar, karışım bileşenlerinin mekanik ve fiziksel özelliklerindeki farklılıklar nedeniyle, ateş altında veya yüksek sıcaklıklarda karmaşık bir davranış sergiler. Ayrıca, malzeme özelliklerindeki değişiklikler sadece fiziksel değişikliklerden değil, aynı zamanda her bir beton bileşen seviyesindeki kimyasal reaksiyonlardan da kaynaklanmaktadır.

Beton dayanımı, çimento hamurunda gelişen kimyasal reaksiyon süreçleriyle doğrudan bağlantılıdır. Portland tipi betonda çimento, imalat sürecinde mikro partiküllerde indirgenen kireç ve silika içeren kalkerli ve kil materyallerinin karışımından yapılır. İşlem sonunda trikalsiyum silikat (C₃S) ve dikalsiyum silikat (C₂S) elde edilir. Hidrasyon aşamasında, bu iki bileşen, serbest su ile etkileşerek, bazı kalsiyum hidroksit kristalleri [Ca(OH)₂] ile çimento parçacıkları arasında bir kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli yapısı oluşturur. Beton bileşenlerinin oranını / türünü ve su-çimento oranının (w / c) değiştirmesi, nihai mekanik özelliklerinin değişmesine ve dolayısıyla termal maruziyetin etkisinin de değişmesine neden olacaktır.

Isıtma aşamalarında betonun mekanik özelliklerinin bozulması şunlarla ilgilidir: Çimento hamurundaki fiziko-kimyasal değişiklikler, agregadaki fiziko-kimyasal değişiklikler ve agregalar ile çimento hamuru (bağ bölgesi) arasındaki ısıl uyumsuzluk. Sıcaklıktaki bir artış, Portland çimento hamurunda mikroyapısal düzeyde kimyasal bileşimde önemli bir değişikliğe yol açar (Şekil 2.2).

Düşük seviyede termal maruziyette dehidrasyon ve su tahliyesi olayı gerçekleşir. Yaklaşık 105 °C'de beton kütlelerinde bulunan serbest nem buharlaşır ve sıcaklık yaklaşık 110 °C'ye ulaştığında, kimyasal olarak birleşik su (hidrasyon suyu: kimyasal olarak bağlı suyun kalsiyum silikat hidrattan (CSH) salınması) ve güçlü bir şekilde emilen su 850 °C'de esasen tamamlanan dehidrasyon ile çimento hamuru hidratlarından kademeli olarak kaybolur (Naus DJ, 2006).

İç kimyasal yapının değişmesi ve agregaların ısıl genişlemesi nedeniyle, 300 °C civarında, malzeme boyunca mikro çatlakların oluşması ile iç gerilmelerde artış gözlenmektedir. Ayrıca, yaklaşık 530 °C sıcaklığa ulaşıldığında, beton dayanımından en çok sorumlu olan kalsiyum hidroksit $[Ca(OH)_2]$ ayrılarak beton büzülmesine neden olur. 600 ila 700 °C arasında CSH'nin ayrışması gerçekleşir ve 900°C'de kireçtaşlarının dekarbonasyonu kaydedilir. Bu sıcaklık seviyelerinde beton ufalanır ve 1200 °C'nin üzerinde 1300 °C'ye kadar betonun içindeki bazı bileşenler erimeye başlar.



Şekil 2. 2 (a) Portland çimento betonundaki termal maruziyet sırasında kemo-fiziksel etkiler; (b) yüksek sıcaklıklarda beton yüzeyi (Arioz O., 2007).

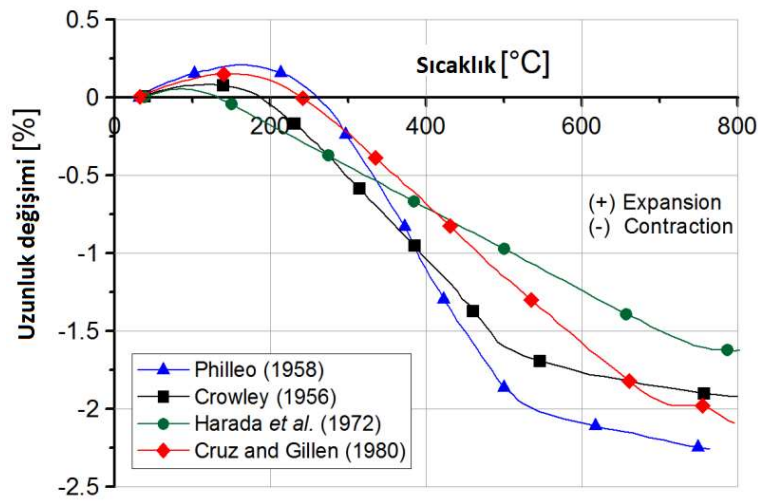
Bozunma süreci tüm beton bileşenleri içerdiğinden, termal etkilerin farklı beton türü ve sınıfı üzerinde farklı bir şekilde etki etmesi mantıklıdır. Silisli agregalarda veya kireçtaşlarında kuvars miktarının değişmesi, termal genleşme, büzülme veya mukavemet azalması varlığı değişir.

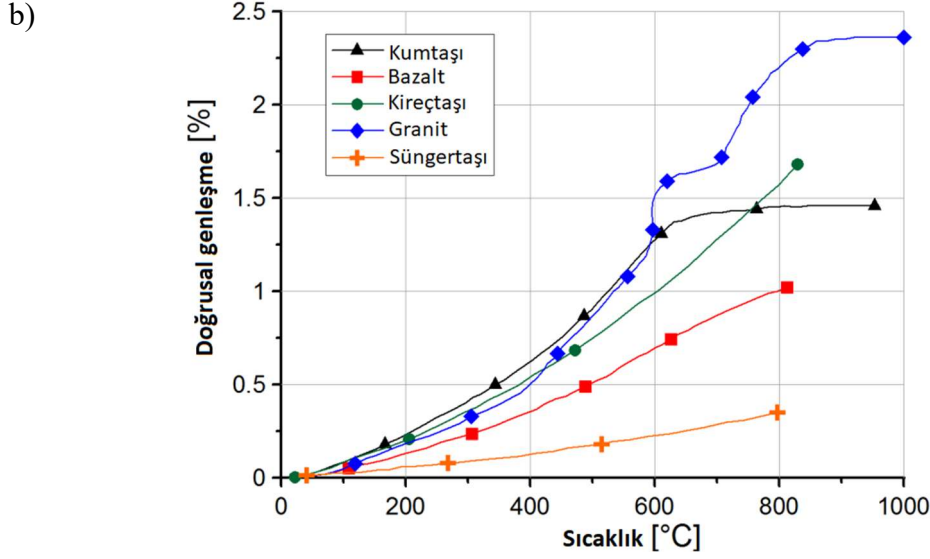
2.5.1 Betonda Isıl Genleşme

Yüksek sıcaklığa maruz kaldığında, diğer birçok yapı malzemesi gibi, beton ve betonarme de ısıl genleşme meydana gelir. Yukarıda belirtilen kemo-fiziksel süreçlerin (çimento hamurunda ve agregalarda buharlaşabilir su kaybı, hidrasyon ürünlerindeki kimyasal olarak birleştirilmiş suyun azaltılması, silisli agregaların dönüşümü, kalsiyum hidroksitin ayrılması, kalkerli agregaların dekarbonasyonu) ile birleştirilmesi. Sertleştirilmiş çimento hamurunun ve agregaların farklı termal genleşmeleri, tüm beton mikroyapısının mikro gerilmesine, mikro çatlamasına ve bozulmasına neden olur. Özellikle, betonda önemli derecede mukavemet azalması, agregalar ve çimento macunu arasındaki hacim genleşmesi farkına doğrudan bağlanabilir.

150 °C'ye kadar ısıtma aşamasının başlangıcında, sertleştirilmiş çimento hamuru maksimum %0.2 dilatasyon ile genleşir; sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında küçülmeye başlar ve yaklaşık 800 °C'de daralma % 1.6-2.2'ye ulaşır (Şekil 2.3). Öte yandan, beton karışımlarında kullanılan agregalar, genellikle normal sıcaklıkta 5.5×10^{-6} ile $11.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ arasında, ortalama ısıl genleşme katsayısı (α) ile yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında genleşirler. (Bažant ve Kaplan, 1996).

a)





Şekil 2. 3: (a) Portland çimento hamur numunelerinin uzunluk değişimi; (b) çeşitli kayaların doğrusal termal genişmesi (Bažant ve Kaplan, 1996'dan uyarlanmıştır).

Özetle, ısıtma sırasında sertleşmiş çimento hamuru önce genişler, sonra büzülür, bu sırada agrega sürekli genişler. İki beton bileşen arasındaki termal uyumsuzluk nedeniyle, farklı gerilmeler oluşur ve bağ (temas) bölgesinde mikro çatlaklar oluşur.

Genellikle normal beton karışımında agregaların genişmesi çimento hamurunun büzülmesinden daha fazladır ve toplam davranış betonun genişmesi ile sonuçlanır. Hafif betonda olduğu gibi (süngertaşı agregaları ile yapılmış) bazı özel durumlarda, ters davranış gözlemlenebilir; yani malzeme, yaklaşık 300 °C'de büzüşebilir.

2.5.2 Beton Dökülmesi

Betonun ısıtılması sırasında iç su dağılımı değişir ve gözenek basıncında önemli bir artış olur. Özel durumlarda, iç boşluk basıncının artması, ısı kaynaklı gerilmelerle birlikte, beton parçalarının yapısal elemanın yüzeyinden kopmasına neden olur (dökülme). Bu olay şiddetli olabilir veya olmayabilir. Bu durum, ısıtma hızı, gözenek şekli ve boyutu, ulaşılan sıcaklık, geometri vb. gibi farklı faktörlere bağlıdır.

Betonun dökülmesi olayı dört gruba ayrılabilir: agrega dökülmesi, beton kaplamasının patlayarak dökülmesi, yüzey dökülmesi ve köşe dökülmesi. İlk üç olay genellikle yangına maruz kaldıktan ilk 20-30 dakikasında meydana gelirken sonuncusu 30-60 dakika sonra ortaya çıkar. Bu olayların en şiddetli olanı patlayıcı ve yüzey dökülmesidir ve ısıtma

hızından (20-30°C /dk) etkilenirler. Normal dayanımlı beton (NDB) ve yüksek performanslı beton (YPB), yüksek sıcaklığa maruz kaldığında farklı bir şekilde davranır. YPB, su/çimento oranını düşürerek (düşük geçirgenlik) veya silis dumanı (daha düşük geçirgenliğe sahip yoğun beton) kullanılarak elde edildiğinden, dökülme olasılığı NDB'den çok daha yüksektir (Bošnjak, 2014).

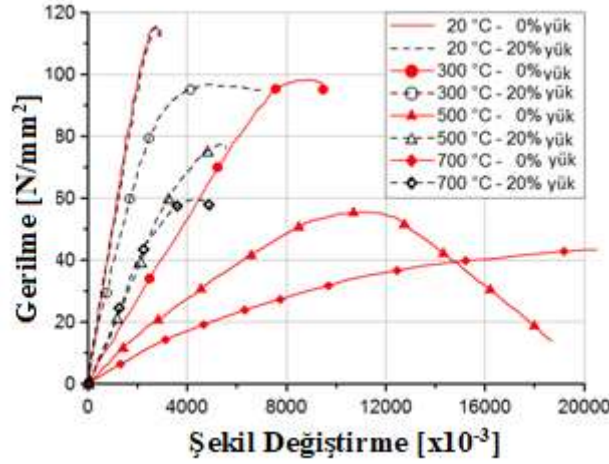
2.5.3 Beton Yangın Dayanımı

Beton ve betonarme yangın davranışı, bunları oluşturan beton ve çelik malzemelerin özelliklerinden büyük ölçüde etkilenir. Her iki malzeme için de mekanik, termal ve deformasyon özelliklerinin birbirleriyle ve dış çevre koşullarıyla nasıl etkileşime girdiğini analiz etmek ve anlamak önemlidir.

Mukavemetin bozulmasından sıcaklığa bağlı mekanik özellikler sorumluyken, termal özellikler doğrudan yapısal bölüm boyunca ısı transferinin genişlemesiyle bağlantılıdır. Yangına maruz kalma sırasında meydana gelen nem göçü olgusu nedeniyle ısı yüküne maruz kalan beton davranışının analizi diğer malzemelerle karşılaştırıldığında çok daha zordur. Bu parametrenin etkisi çok güçlüdür, yani farklı beton türleri ve dayanımları için somut yanıt değişebilir.

2.5.4 Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkisi

Betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, beton yapıların davranışını tahmin etmek için esastır. Birçok yazar tarafından daha önce tartışıldığı gibi (Schneider ve Diederichs, 1981; Khoury, 1999; Schneider 1982; vb.), yükleme yapılmadan ısı verilen numuneler sıcaklık artışıyla birlikte elastisite modülü azalırken maksimum gerilme artmaktadır. Beton numuneler basınç yükü altında ısıtıldığında, gözlemlenen etkiler benzerdir, ancak daha az belirgindir (Şekil 2.4).

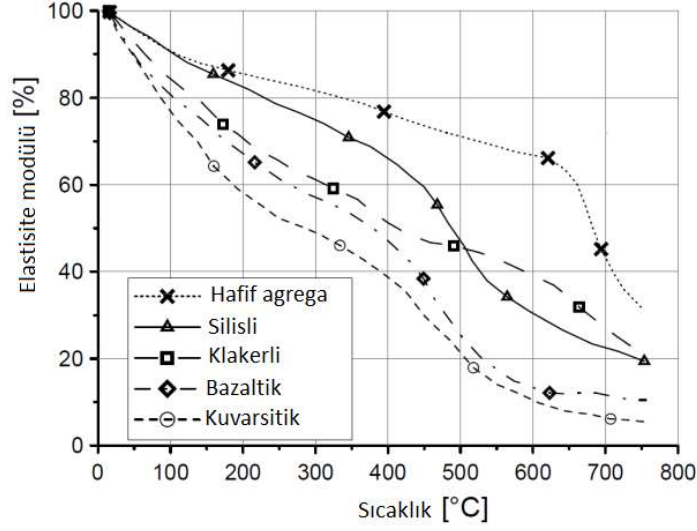


Şekil 2. 4: Farklı test (basınç) sıcaklık seviyeleri için gerilme-şekil değiştirme eğrileri; Çelik lifler içeren Ultra Yüksek Mukavemetli beton numuneleri için yüksüz (%0 uygulanan yük) ve yüklü (%20 uygulanan yük) testleri arasındaki karşılaştırma (Khoury, 1999).

2.5.5 Elastisite Modülü

Elastisite modülü (E), global beton davranışından ve yapı içindeki gerilme dağılımından sorumlu olan mekanik özelliklerden biridir. Malzemenin rijitliğinin bir ölçüsüdür ve diğer beton mekanik özelliklerinde olduğu gibi, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında sürekli bir bozulma gözlemlenir (Şekil 2.5).

Rijitlikteki monotonik azalma, esas olarak beton mikroyapısındaki agregalar ile çimento macunu arasındaki bağ temaslarının kopmasından kaynaklanmaktadır (yüksek sıcaklıkta hidratlanmış çimento ürünleri ayrışır ve farklı genleşmeler nedeniyle, bağ bölgesinde mikro çatlaklar oluşur). Beton rijitlik kaybını etkileyen ana faktörler, agregaların türü (kalker beton modülü kuvars beton modülünden çok daha az azalır; Şekil 2.5) ve ısıtma sırasında uygulanan yükün varlığıdır (Şekil 2.5). Su / çimento oranı, sızdırmazlık veya yangına maruz kalma süresi gibi diğer faktörler, küçük veya önemsiz etkiler sergiler (Schneider, 1982; Schneider ve diğerleri, 1982 vb).



Şekil 2. 5: Farklı beton türleri için elastisite modülünün değişimi (Schneider ve diğerleri, 1981).

2.6 Yüksek Sıcaklıklarda Betonarme Kolon Davranışı

Betonarme kolon, yangına maruz kalma sırasında mukavemet ve rijitlikte önemli bir düşüşe uğrayabilir ve dayanım kaybının çoğu geri kazanılamaz. Bu hem beton hem de çelik donatı sıcaklığının artmasının, malzeme özelliklerinin bozulmasına neden olmasının bir sonucudur. Gerçek bir yangına maruz kalan bir betonarme kolon mukavemet kaybının derecesini etkileyecek birkaç faktör vardır. Bu faktörler arasında, bunlarla sınırlı olmamak üzere, yangına maruz kalmanın türü ve süresi, kolon üzerindeki boyut ve yük ve bir yangın sırasında beton ve çelik donatılarında meydana gelen sıcaklık seviyeleri bulunur.

Bir betonarme kolon elemanı şiddetli yangına maruz kalırsa, yapısal elemanlarda kısmen veya tamamen göçmeye yol açan önemli yapısal hasara neden olabilir. Bu hasar patlayıcı dökülmeyi, donatı çeliğinin açığa çıkmasını ve elemanın büyük kalıcı deformasyonlarını içerebilir. Bu tür hasarlar, betonarme elemanlarının yapısal olarak hasar aldığını ve artık uygulanan yükü kaldıramayabileceğinin göstergesidir. Orta dereceli bir yangına maruz kalması durumunda, betonarme elemanlarında beton dökülmesi meydana gelmeyebilir, ancak yük taşıma kapasitesi azalabilir. Bu nedenle, hasarın boyutunun hemen belli olmadığı bu tür yapısal elemanların artık kapasitesini değerlendirmek için bir yol oluşturmak zorunludur.

Yapısal bir elemanın yangın direncini değerlendirmenin mevcut uygulaması, o elemanı ASTM E-119 veya ISO-834 gibi standart bir yangına maruz bırakmak ve yangına maruz kalma süresi boyunca davranışını izlemektir. Eleman artık amaçlanan tasarım kapasitesini sürdüremediğinde, o noktaya kadar geçen süre, yapısal elemanın yangına dayanıklılığı olarak alınır.

2.7 Yangına Maruz Kalmış Betonarme Kolonların Artık Tepkisi

Bir yangın olayı sırasında bir betonarme kolonunda meydana gelen hasarın boyutu, yangın şiddeti, donatı çeliği ve betonun artık malzeme özellikleri, soğutma dönemini takip eden kurtarma süresi, sıcaklığa bağlı bağ bozulması, yük seviyesi ve yangın sırasında mevcut olan sınır koşulları gibi çeşitli faktörlerden etkilenir.

Yangına maruz kalmanın şiddeti, yangına maruz kalan bir betonarme kolonunun yangından sonraki taşıma gücü kapasitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Bir yapıda yangına maruz kalma, yakıt yükü yoğunluğuna, havalandırma özelliklerine ve yangın bölmesinin geometrik parametrelerine bağlıdır (Brussels 2002).

Bu faktörler yangının büyümesiyle gelişebilir, örneğin cam pencerelerin kırılması nedeniyle havalandırmada ani bir artış meydana gelebilir.

Ayrıca, Yükten kaynaklanan termal gerinimler (uzamalar) yük altında ilk ısıtma sırasında betonda meydana gelir ve elemanın soğuması ile geri kazanılmaz.

Betonun soğutma sonrası yani yangın sonrası artık malzeme özellikleri, yangına maruz kalma sırasındaki özelliklerden önemli ölçüde farklıdır. Şöyle ki, 220 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalan betonun artık basınç dayanımı, yangına maruz kaldıktan sonra bir ila altı hafta boyunca, yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımından %10'a kadar daha düşük olabilir (Topic., vd. 2013).

Ek olarak, yangına maruz beton, oda sıcaklığında en az altı ay süre ile bırakıldığında, orijinal oda sıcaklığındaki basınç dayanımının bir kısmını geri kazanacaktır (V.K.R. Kodur. Vd., 2013).

Betonarme kolonda sıcaklığın neden olduğu bozulmanın yanı sıra, yangına maruz kalma sırasında mevcut olan yükleme seviyesi ve sınır koşulları, yangın hasarının seviyesini etkileyebilir. Daha büyük yüklerin ve eksenel kısıtlamanın varlığı, yangına maruz kalma

sırasında betonarme kolonunun gerilme dağılımını etkiler.

Bu nedenle, yangına maruz kalan betonarme kolonların artık mukavemet değerlendirmesi oldukça karmaşıktır ve birkaç faktöre bağlıdır. Yangına maruz kalan betonarme kolonların artık kapasitesini değerlendirirken, yukarıda tartışılan kritik faktörlerin hesaba katılması gerekir.

2.8 Yangının Fiziksel ve Kimyasal Tepkisi

Yapı sektöründe yaygın kullanılan beton, diğer yapı malzemelerine oranla daha ekonomik ve üretimi kolay olmasından dolayı günümüz şartlarında en çok tercih sebebi olan yapı malzemesidir. Beton yüksek sıcaklığa maruz kaldığında diğer yapı malzemelerine göre yangına karşı daha dayanıklı malzemedir. Yangında tutuşmaması sebebiyle yangın sırasında zehirli gaz ve duman salınımı azdır. Bunun yanında yüksek ısı yoğunluğuna sahip olmasından kaynaklı uzun süre yüksek sıcaklığa direnç gösterebilmektedir. Fakat, kompleks bir yapı malzemesi olan betonun, yüksek sıcaklıklar altında değişim gözlenebilmektedir. Kompleks yapı sebebiyle bileşenlerinin her biri sıcaklık karşısında farklı davranışlar sergilemektedir. Dolayısıyla bileşenleri arasında termal bir uyumsuzluk söz konusudur.

Fiziksel ve kimyasal değişim ilk olarak düşük sıcaklıkta çimento hamurunda meydana gelir. Oda koşullarında beton ısınmaya başladığında sertleşmeye başlayan çimento hamuru genişlemeye başlar. Beton içerisinde serbest halde bulunan su, 100-200°C’lerde buharlaşmaya başlar. Bu buharlaşma sayesinde beton içerisinde buharlaşma basıncını meydana getirir. Sıcaklık 300°C seviyelerine geldiğinde agregalar genişip, dağılmaya başlarlar. Daha fazla su buharı oluşmaya devam ederse iç gerilmelerin artmasıyla, fiziksel anlamda önemli güç kayıplarına neden olur (Jansson 2008).

2.9 Parçalanma

Parçalanma, yüksek sıcaklığa maruz kalmış yapı elemanlarının yüzeylerinden betonun tabakalar halinde koparak ayrılması olarak tanımlanmaktadır. Yüksek dayanımlı betonlar, normal dayanımlı betonlara nazaran parçalanma eğilimleri daha fazladır.

Parçalanma; agrega, yüzey, köşe ve patlayıcı parçalanma olmak üzere dört tür olarak

nitelendirilir. Agregası, yüzey ve patlayıcı parçalanma yangından 7 ila 30 dakika arasında gerçekleşirken, köşe kavrulması 30 ila 90 dakikalık yangın sonrasında gerçekleşmektedir (Khory ve Anderbeg 2000).

Parçalanmanın ölçüsü değişiklik gösterebilir. Betonda hasar çok yüzeysel olabileceği gibi, ciddi sonuçlara ve yapının göçmesine kadar giden bir neticesi de olabilir. Parçalanma, eleman kesitini azaltacağı için, geriye kalan eleman alanında daha fazla gerilmelere sebep olabilmektedir. Parçalanma ayrıca betonun, kalınlığını önemli ölçüde değiştirebilir hatta ortadan kaldırabilir. Bu durumlar yapı elemanının taşıma gücünü azaltmasının yanında, elemanlarda oluşabilecek boşluklar neticesinde yangının yayılmasına neden olabilmektedir.

2.10 Çatlak

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yaymasına, ısı iletkenliğine, ısı genleşmesine, özgül ısısına ve rengine etki etmektedir. Betondaki fiziksel değişmelerin yanında, mekanik özelliklerinde de değişimler olmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun iç yüzeylerinde de sıcaklık farkları oluşur.

Anizotropik, malzemenin farklı yönlerde farklı özelliklere sahip olması demektir. Yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanı içerisindeki karışım oranlarına bağlı olarak, 300°C'ye kadar olan sıcaklıklarda arayüz çatlakları, 300-500°C arasında çimento ve arayüz, 500°C'den fazla sıcaklıklarda ise çimento ve agrega birleşiminde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. 500 °C'den yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonda anizotropik özellikler gözlemlenir (Riley, 1991).

2.11 Yangında Donatı Performansı

Yapı çeliği yüksek sıcaklığa doğrudan veya dolaylı maruz kalması durumunda çeliğin belirli bir sığa ulaşır erimesi mümkün olmaktadır. Bu durum, çelikte iç gerilme farklılıklarına neden olabilir. Gerilme farklılıklarından dolayı donatının mekanik özelliklerinde değişim gözlenir. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış donatıların elastisite modülünde de bir düşüş gözlemlenir.

2.12 Isıl Genleşme Etkisi

Yüksek sıcaklığa maruz kalan donatı elemanın boyu, hacmi ve yüzey alanı aldığı sıcaklığa doğru orantılı olarak değişime uğrar. Sıcaklığa bağlı olarak ısıl genleşme EN 1992 1-2’de verilen denklem sayesinde hesaplara dahil edilebilir.

$$\varepsilon_s(\theta) = -2,416 \cdot 10^{-4} + 1,2 \cdot 10^{-5}\theta + 0,4 \cdot 10^{-8}\theta^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 750^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon_s(\theta) = 11 \cdot 10^{-3} \quad 750^\circ\text{C} < \theta \leq 860^\circ\text{C}$$

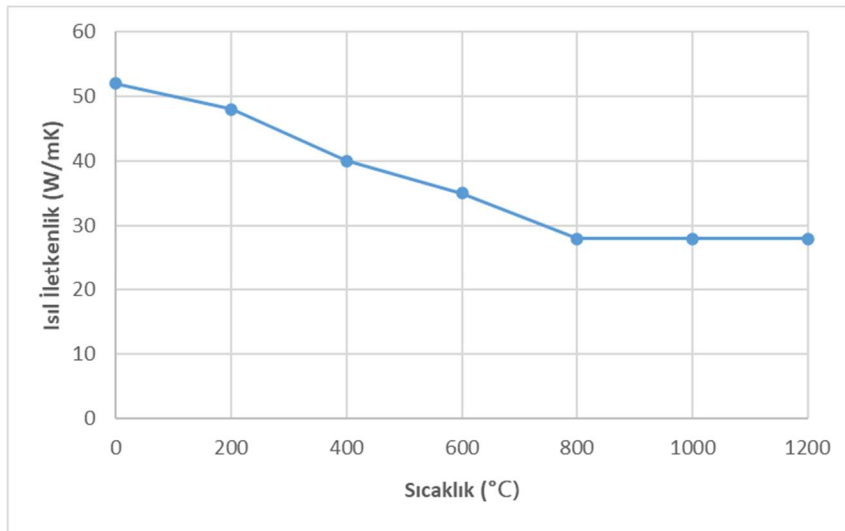
$$\varepsilon_s(\theta) = -6,2 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-5}\theta \quad 860^\circ\text{C} < \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.1)$$

2.13 Isıl İletkenliğe Etkisi

Donatının haddelenmesine bağlı olarak ısıl iletkenliği değişiklik gösterir. Sıcaklığa bağlı donatının ısıl iletkenlik değişimi aşağıda verilmiştir (EN1993-1-2, 2005).

$$\lambda_s(\theta) = 54 - 3,33 \cdot 10^{-2}\theta_s \text{ W/mK} \quad 200^\circ\text{C} \leq \theta_s < 800^\circ\text{C}$$

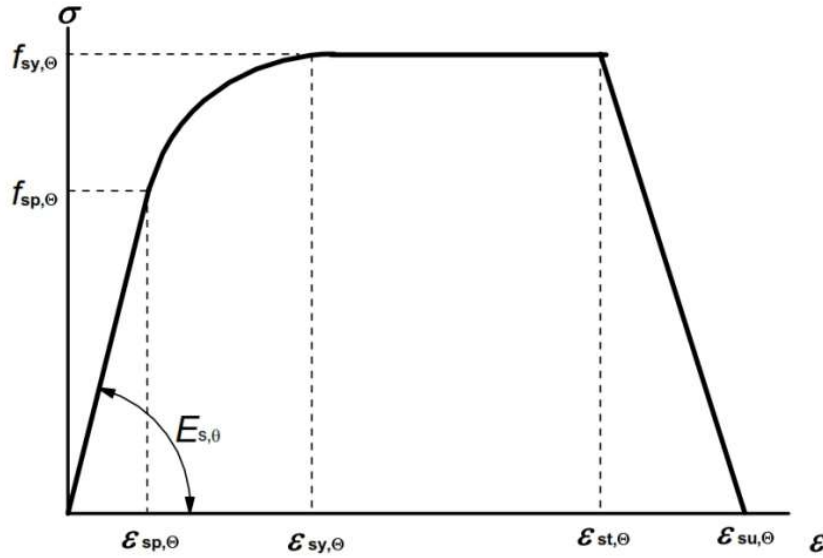
$$\lambda_s(\theta) = 27,3 \text{ W/mK} \quad 800^\circ\text{C} \leq \theta_s \leq 1200^\circ\text{C} \quad (2.2)$$



Şekil 2. 6: Donatıda Sıcaklık Isıl İletkenlik Değişimi (EN1993-1-2, 2005).

2.14 Gerilme Şekil Değişirme Etkisi

Yüksek sıcaklığın donatı çeliğinin mekanik özelliklerini etkilediği bilinmektedir. EN 1993 1-2’de sıcaklığın değerleri verilmiştir. Tablo 2.1’de olmayan ara değerler için interpolasyon yapılarak ara değerlerin sıcaklık karşısında gerilme şekil değiştirmeleri tespit edilebilir. Donatı için gerilme şekil değiştirme diyagramı şekil 2.7’de verilmiştir.



Şekil 2. 7: Donatıya Ait Gerilme Şekil Değişirme Formu (EN1993-1-2, 2005)

Şekil 2.6’da görüldüğü gibi sıcaklık karşısında donatı çeliğinin gerilme şekil değiştirmesi dört fazda gerçekleşmektedir. Donatı çeliği 1.bölgede doğrusal artmakta iken, 2.bölgede parabolik olarak artmakta, 3.bölge lineer olarak devam etmekte ve 4.bölgede çeliğin akma dayanımı düşüş sergilemiştir (EN1993-1-2, 2005).

Tablo 2. 1: Yüksek Sıcaklıklarda Donatının Gerilme Karşısında Tanjant Modül Formülleri (EN1993-1-2, 2005).

Şekil Değişirme Aralığı	Gerilme $\sigma(\theta)$	Tanjant Modülü
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + \left(\frac{b}{a}\right) \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta})}{a \left[a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2 \right]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{t,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{t,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} (1 - \varepsilon - \varepsilon_{t,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{t,\theta})$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parametreler	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{t,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$	
Fonksiyonlar	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	

3. MATERYAL VE METOT

3.1 Materyal

3.1.1 Deney Elemanlarının Hazırlanması ve Özellikleri

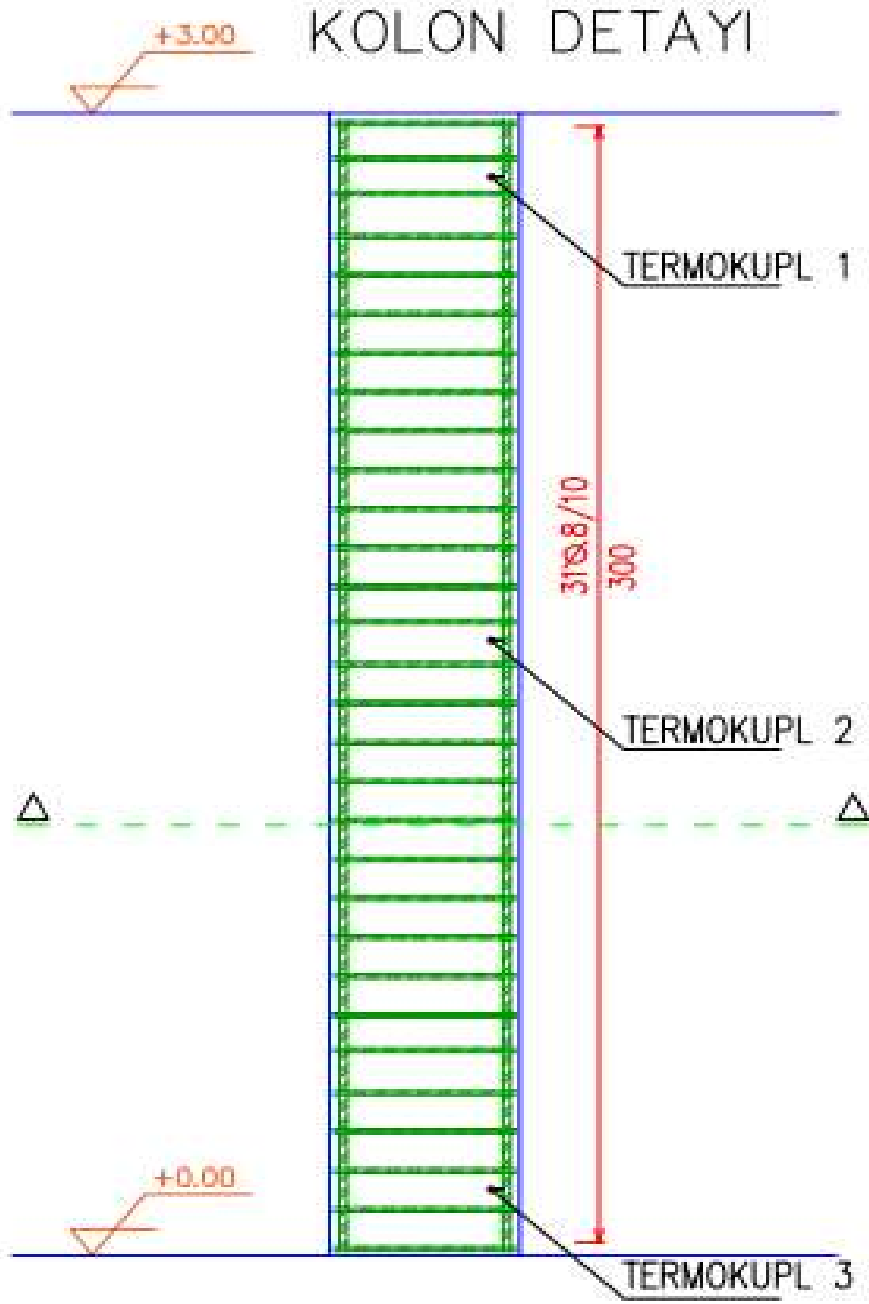
Yangın nedeniyle hasar alan betonarme yapı elemanlarının (kolon) davranışını, taşıma gücü değişimini ve yangından sonra kullanılabilirlik durumlarına ilişkin deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Deneysel çalışma için 5 adet kolon deney elemanı üretilmiştir. Bütün deney elemanları DBYBYH-2018 yönetmelik şartlarına göre tasarlanmıştır. Betonarme kolonlar 3000 mm boyunda ve 200×200 mm kesitlerine sahiptir ve bütün kolonların geometrik boyutları aynıdır. Kolonlarda, 4 adet 16 mm çaplı boyuna donatı ve 31 adet 8 mm çaplı etriye kullanılmıştır (Şekil 3.1, Şekil 3.2).

Tüm deney elemanlarında beton basınç dayanımı 30 MPa olup, boyuna donatı ve etriye donatıları 420 MPa akma dayanımına sahiptir. Şekil 3.3a deney elemanları donatılarının bağlanması, Şekil 3.3b hazırlanan donatıların kalıba yerleştirilmesini göstermektedir.

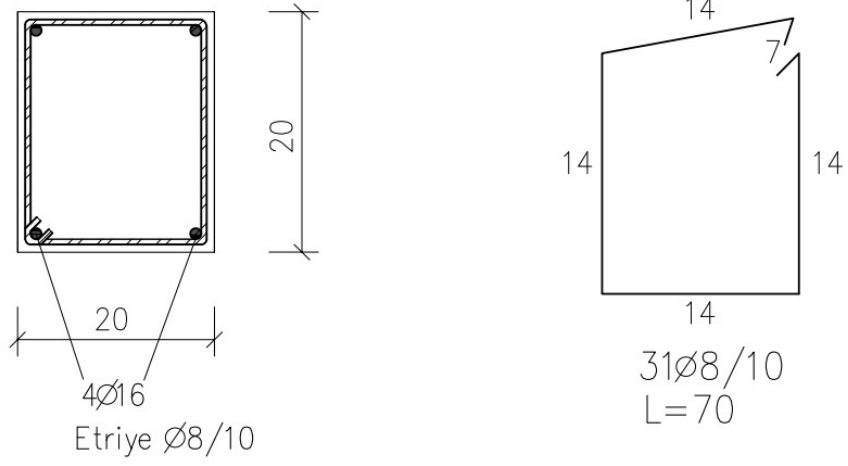
Deney elemanlarına ait kesit özellikleri ve donatı oranları Tablo 3.1’de gösterilmiştir. Tablo3.1’de referans eleman-R, deney elemanı-1 – S1, deney elemanı-2 – S2, deney elemanı-3 – S3, deney elemanı-4 – S4 olarak isimlendirilmiştir. Deneysel çalışmalar Ege Üniversitesi Yapı Mekaniği Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Tablo 3. 1: Deney elemanları kesit özellikleri ve donatı oranları

Kolon Elemanlar	Kesit		Boyuna Donatı		Donatı Oranı (A_s/A_c) (%)
	hxb (mm)	Area, A_c (mm ²)	Adet ve çap (mm) (mm ²)	Alan, A_s	
R	200 x 200	40000	4Φ16	804.2	2.01
S1	200 x 200	40000	4Φ16	804.2	2.01
S2	200 x 200	40000	4Φ16	804.2	2.01
S3	200 x 200	40000	4Φ16	804.2	2.01
S4	200 x 200	40000	4Φ16	804.2	2.01



Şekil 3. 1: Kolon Boyut ve Donatı Detayı



Şekil 3. 2: Kolon En Kesit Detayı



(a)



(b)

Şekil 3. 3: a) Deney Elemanları Donatılarının Bağlanması b) Deney Elemanlarının Kalıba Yerleştirilmesi

3.1.2 Yangın Deneyleri

Yangın deneyleri için hazırlanan düzenekte, 20 adet $15 \times 25 \times 60$ cm³'lük gaz beton ve 100 adet yangın kiremit tuğlası ısı dağılımını dışarıya yayılmasını engelleyecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra her bir numune basit mesnetli olacak şekilde bu düzeneğin içerisine yerleştirilmiştir. Bu işlem sonrasında başlığı 5 cm çapa sahip, uzunluğu 75 cm olan Turbo Tetikli İzolasyon Şalome – Pürmüz ve 4 adet 12 kg LPG tüp yardımıyla numuneler 90 dakika boyunca alt yüzeylerinden yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Numunelerin dış yüzey sıcaklıkları LYK 8010H Kızılötesi Çift Lazerli Termometre aracılığıyla, iç sıcaklıkları ise termokuplların Extech True RMS Multimeter 430 bağlanması vasıtasıyla her 15 dakikada bir ölçülmüştür.

Yangın deneyleri süresince her 15 dakikada bir ölçülen sıcaklıklar numunelerin pozisyonlarına ve pürmüzün alev gücüne bağlı olarak değişkenlik göstermiştir. Numune-1 için pürmüz alev gücü maksimum seviye olan 6 barın bir seviye altı 5 bar olarak denenmiştir. Bu deneyin sonucunda numunenin dış maksimum sıcaklık düzeyi (Alt Yüzey) 500.7 °C olarak ölçülmüşken, iç maksimum sıcaklık düzeyi (Termokupl-3) 295 °C olarak ölçülmüştür. Deney elemanı-1 için her 15 dakikada bir ölçülen sıcaklık – zaman değerleri Tablo 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3. 4: Numunelerin düzeneğe yerleştirilmesi



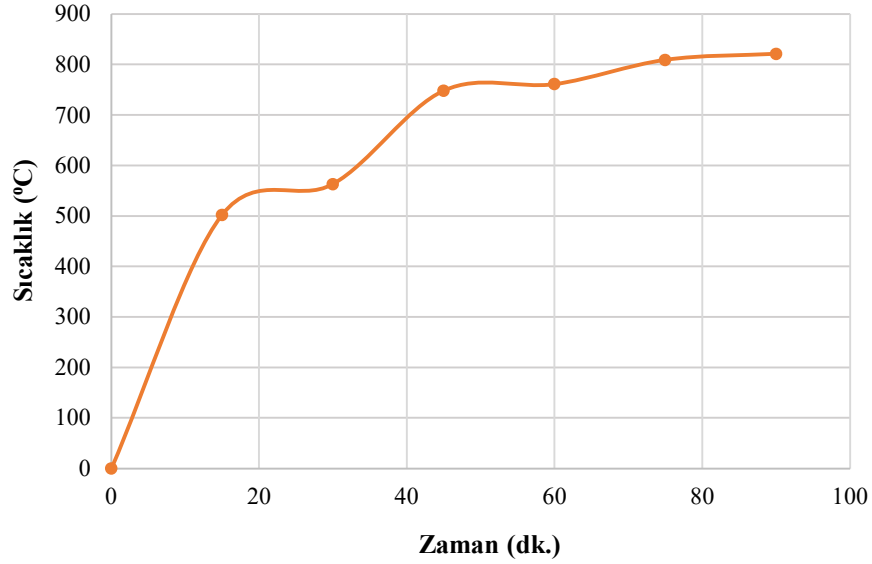
Şekil 3. 5: Yangın deneyleri

Tablo 3. 2: Deney elemanı-1(S1) için sıcaklık-zaman değerleri

Deney elemanı-1

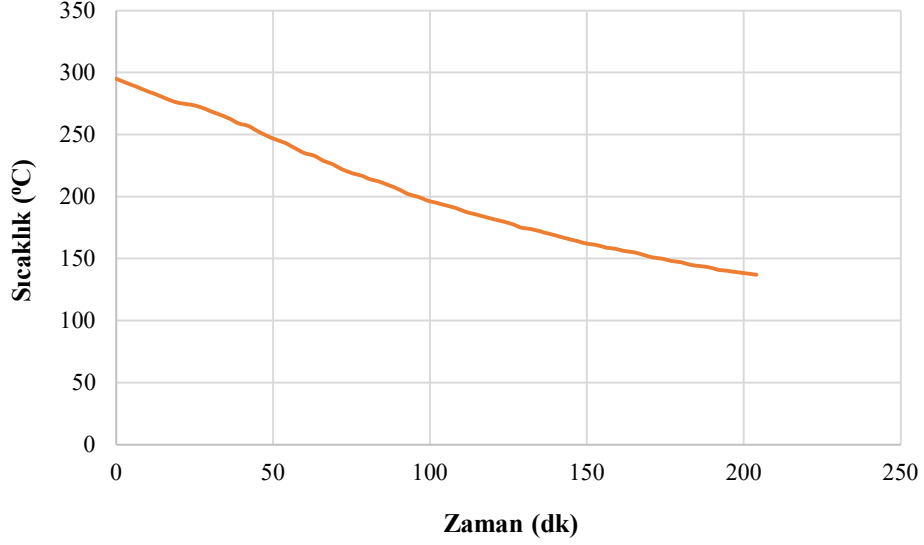
Zaman (dk)	Karşı Yüzey Sıcaklık (°C)	Alt Yüzey Sıcaklık (°C)	Termokupl 1 (Sıcaklık (°C))	Termokupl 2 Sıcaklık (°C)	Termokupl 3 Sıcaklık (°C)
0	28	28.5	29	30	30
15	84.8	347.3	43	55	100
30	104.5	364.4	58	66	125
45	130.2	389.1	65	74	157
60	161.2	436.2	80	86	191
75	188.8	471.1	100	101	255
90	197.6	500.7	110	130	295

Deney elemanı-1, 5 bar alev gücü için 90 dakika sonunda maksimum sıcaklık 821.4 °C olarak ölçülmüştür. Deney elemanı-1 için sıcaklık – zaman grafiği şekil 3.6’da gösterilmektedir.



Şekil 3. 6: Deney elemanı-1 için alev sıcaklığı-zaman ilişkisi

Gerçek yangın olaylarında her zaman yangının ısınma evresini takip eden bir soğuma evresi vardır. Deney elemanı-1 için her 3 dakikada bir Termokupl-3 soğuma sıcaklıkları ölçülmüştür. Başlangıçta lineer bir şekilde dakikada 1 °C düşen sıcaklık zaman geçtikçe 3 dakikada 1 °C derece düşecek biçimde lineer olmayan bir şekilde azalmıştır. S1 deney elemanı için sıcaklık – zaman soğuma eğrisi şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 7: Deney elemanı-1 için sıcaklık-zaman soğuma eğrisi

Deney elemanı-2 için ise alev gücü 6 bar seviyesine çıkartılmış ve aynı deney tekrarlanmıştır. Bu deneyin sonucunda numunenin dış maksimum sıcaklık düzeyi (Alt Yüzey) 546.2 °C olarak ölçülmüşken, iç maksimum sıcaklık düzeyi (Termokupl-3) 374 °C olarak ölçülmüştür. İki değerde de Numune-1'in değerlerine nazaran daha yüksek değerler elde edilmiştir. Deney elemanı-2 için sıcaklık – zaman değerleri Tablo-3.3'de gösterilmektedir.

Tablo 3. 3: Deney Elemanı-2(S2) için sıcaklık zaman değerleri

Deney elemanı-2

Zaman (dk)	Karşı Yüzey Sıcaklık (°C)	Alt Yüzey Sıcaklık (°C)	Termokupl 1 (Sıcaklık (°C))	Termokupl 2 Sıcaklık (°C)	Termokupl 3 Sıcaklık (°C)
0	29.5	29.7	30	30	30
15	94.6	389.5	42	44	138
30	104.9	405.2	71	76	227
45	130.3	432.2	95	95	242
60	152	481.5	103	109	308
75	172.7	520.4	111	121	352
90	197.2	545.2	126	140	374

Deney elemanı-3'ün pürmüz alev gücü, tıpkı deney elemanı-2'de olduğu gibi 6 bar olarak belirlenmiş ve ölçümler yapılmıştır. Bu deneyin sonucunda numunenin dış maksimum sıcaklık düzeyi (Alt Yüzey) 550.4 °C olarak ölçülmüşken, iç maksimum sıcaklık düzeyi ise

(Termokupl-3) 374 °C olarak ölçülmüştür. Dış yüzey maksimum sıcaklığı deney elemanı-2'ye göre daha fazla olsa da iç değer maksimum sıcaklığı deney elemanı-2 ile eşit olarak ölçülmüştür. Deney elemanı-3 için sıcaklık – zaman değerleri Tablo-3.4'de gösterilmektedir. Şekil 3.8'de 60. Dakikada deney elemanı-3'ün dış ve iç sıcaklık değerlerinin ölçümleri gösterilmektedir.

Tablo 3. 4: Deney elemanı-3(S3) için sıcaklık-zaman değerleri

Deney elemanı-3

Zaman (dk)	Karşı Yüzey Sıcaklık (°C)	Alt Yüzey Sıcaklık (°C)	Termokupl 1 (Sıcaklık (°C))	Termokupl 2 (Sıcaklık (°C))	Termokupl 3 (Sıcaklık (°C))
0	28.3	28.5	30	29	30
15	93	409	32	63	139
30	111	409.6	45	102	199
45	133.9	439.6	62	118	253
60	149.1	491.9	79	147	300
75	189.2	519.4	94	170	340
90	206.6	550.4	110	193	374

a)



b)



Şekil 3. 8: a) Deney elemanı-3 60. dakikadaki alt yüzey dış sıcaklık değeri b) Deney elemanı-3 60. dakikadaki Termokupl-3'teki iç sıcaklık değeri

Deney elemanı-4'te ise; numune diğer numunelerden farklı olarak saat yönünün 90° ters yönüne çevrilip ancak 2 ve 3. Numunelerde olduğu gibi yine alev gücü 6 bar olacak şekilde yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Bu deneyin sonucunda deney elemanının dış maksimum sıcaklık düzeyi (Alt Yüzey) 552.5 °C olarak ölçülmüşken, iç maksimum sıcaklık

düzeyi ise (Termokupl-3) 129 °C olarak ölçülmüştür. Dış yüzey maksimum sıcaklığı diğer tüm numunelere göre daha fazla olsa da iç değer maksimum sıcaklığı termokuplların konumundan dolayı diğer tüm numunelerden daha az olarak ölçülmüştür. Deney elemanı-4 için sıcaklık – zaman değerleri Tablo-3.5'te gösterilmektedir. Şekil 3.9'da 45. dakikada deney elemanı-4'ün dış ve iç sıcaklık değerlerinin ölçümleri gösterilmektedir.

Tablo 3. 5: Deney elemanı-4(S4) için sıcaklık zaman değerleri

Deney elemanı-4

Zaman (dk)	Karşı Yüzey Sıcaklık (°C)	Alt Yüzey Sıcaklık (°C)	Termokupl 1 (Sıcaklık (°C))	Termokupl 2 Sıcaklık (°C)	Termokupl 3 Sıcaklık (°C)
0	29.9	30.4	30	30	31
15	131.7	446.1	32	49	58
30	150.1	462.1	48	78	82
45	170.6	476.2	61	91	94
60	189.4	501	79	106	106
75	204.5	528.8	92	110	115
90	220.3	552.5	113	129	129



Şekil 3. 9: Deney elemanı-4 için 45. dakika iç ve dış sıcaklık değerleri

Yangın deneyleri boyunca numunelerin yapısal bütünlüğünde bozulma meydana gelmiştir. İlk 15 dakikada numunelerde betondaki su kaybı gözlemlenmiştir. Daha sonraki süreçlerde betonda soyulma, kararma, çatlaklar ve toz halinde dökülmeler meydana geldiği gözlemlenmiştir. Deney sonunda ise numunelerde orta kısımdan yerçekimi yönünde hafif bir eğilme meydana gelmiştir.

a)



b)



c)



d)



Şekil 3. 10: Numunelerdeki bozulmalar a) Soyulma-toz haline gelme-dökülme b) Su kaybı c) Çatlaklar d) Kararmalar



Şekil 3. 11: Numunelerin deney sonunda yerçekimi yönünde hafif eğilmesi

3.1.3 Mekanik Yükleme Deneyleri

3.1.3.1 Test Yükleme Düzeneği

Deneysel çalışma Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda bulunan çelik deney platformunda gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.12). Çelik deney platformu iki adet rijit çelik kolon ve iki adet rijit çelik kirişten oluşan kapalı bir çerçevedir. Rijit kolonlar ve kirişler yüksek dayanımlı çelikten imal edilmiş olup kirişlerin kalınlıkları 1000 mm, kolonların kalınlıkları ise 500 mm'dir. Çerçeve net açıklığı 6000 mm'dir.

Deney elemanları platform üzerine yerleştirildikten sonra iki adet U-140 çelik profilin birbirine kaynaklanmasıyla imal edilmiş 4 adet kutu profil yardımıyla rijit kirişe mesnetlenmiştir. Deney elemanları hidrolik piston ve payanda arasında sıkıştırılarak yatay hareketleri engellenmiştir.

Deney elemanlarına uygulanan yük, çerçevede bulunan rijit çelik kolona yerleştirilmiş iki ucu mafsallı bir yükleme sistemi vasıtasıyla uygulanmıştır. Bu yükleme sistemi iki hareketli mafsal ve bu mafsallar arasında bulunan bir adet hidrolik kriko ve yük hücresinden oluşmaktadır. Hidrolik kriko 500 mm genliğe sahiptir. Yük hücresi ise 500 kN basınç, 300 kN çekme kapasitesine sahiptir.

Deney elemanları dört noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Yükleme kirişlerin tam orta noktasından tek noktadan yükün kirişe temas etmesi sağlanarak aşağıya doğru hidrolik pompa aracılığıyla monotonik ve yük kontrollü olarak 3 kgf/s hızda yapılmıştır. Yükleme hızı yapılan literatür çalışmaları incelenmiş ve bunun üzerine 1,5 ile 3,5 kgf/s arasında bir değer olan 3 kgf/s hız seçilerek çatlak gelişiminin iyi bir şekilde gözlenmesi sağlanmıştır.

Deney esnasında yükleme işlemi hidrolik pistonla bağlı olan elektrikli motorlar vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Elektrikli motorun frekansı istenilen seviyede tutulabilmektedir. Bu şekilde yükleme işlemi mümkün olduğunca düzenli ve çatlak gelişimleri kolaylıkla gözlenebilecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde yük aktarımı kontrollü bir şekilde başlayıp, elemanın maksimum yük taşıma kapasitesi geçildikten sonra deplasman kontrollü olarak devam edilmiştir.



Şekil 3. 12: Yükleme Düzenegi

3.1.3.2 Ölçüm Aletleri

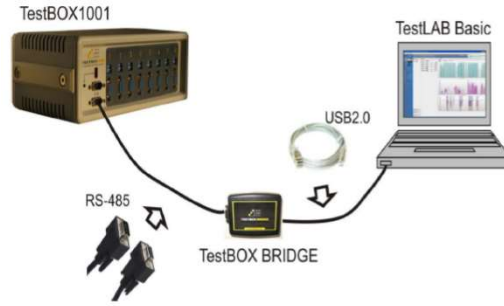
Hazırlanan bütün deney elemanlarında 3 adet termokupl kullanılmıştır. Yükleme esnasında meydana gelen yer değiştirmeleri ölçmek için potansiyometrik cetveller (deplasman ölçer) kullanılmıştır. Deney elemanlarına bilgisayar kontrollü yük vermek için yük hücresi ve tüm bu elemanlardan alınan verilerin bilgisayara iletilip verilerin kaydedilmesi için veri toplama cihazı kullanılmıştır.

3.1.3.3 Veri Toplama Sistemi

Test edilen yapı modelinin deneysel davranışını elde etmek amacıyla model yapıların farklı noktalarından deplasman ölçümleri alınmıştır. Bunların bazıları doğrusal sistem deplasmanları için kullanılmış bazıları da elemanların deformasyonlarının hesaplanabilmesi amacıyla kullanılmıştır. Deneylerde, deplasmanların ölçümü için doğrusal potansiyometrik cetveller (PC) kullanılmıştır. Deplasman ve yük ölçümlerinin toplanmasında TDG firması tarafından üretilen 8 kanallı TestBOX1001 statik veri toplama sistemi (Şekil 3.13) ve TestLAB-BASIC veri toplama yazılımı kullanılmıştır (Şekil 3.14).



Şekil 3. 13: Veri Toplama Sistemi Ön Panel ve Arka Panel Görünümü.



Şekil 3. 14: Verilerin Toplama Yazılımı.

3.1.3.4 Potansiyometrik Cetveller (Deplasman Ölçer) ve Yerleşimi

Deney sırasında deney elemanlarında oluşabilecek yer değiştirmelerin ve hasarların belirlenebilmesi için potansiyometrik cetveller (PC) kullanılmıştır. Potansiyometrik cetveller potansiyometrik (rezistif) prensiple lineer olarak çalışarak çok hassas olarak pozisyon ve hareketlerini elektronik olarak ölçebilmektedir (Şekil 3.15). Ölçümler bir veri toplayıcısı ile bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayarda deney sırasında deplasman ölçümlerini düzenli olarak alan, bilgisayarın sabit hafızasına kaydeden ve istenilen deplasman ölçümünün yüke karşı grafiğini çizerek deneyin takibini kolaylaştıran bir yazılım mevcuttur.



Şekil 3. 15: Potansiyometrik Cetvel

3.1.3.5 Termokupl (Sıcaklık Sensörü)

Termokupl veya ısı çifti, bir tür sıcaklık sensörüdür. Farklı iki iletken malzemeden oluşur. Bu malzemelerin iki ucu birleştirilir (sıcak nokta) ve ısıtılırsa, diğer uçlarda (soğuk nokta) gerilim elde edilir. Bu gerilimin değeri kullanılan malzemenin cinsine ve birleşim noktasının ısınma miktarına bağlıdır. Sıcak nokta ile soğuk nokta sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkıyla orantılıdır. Sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkı termokupl üzerinde gerilim (EMF) yaratır. Sıcak nokta sıcaklığı aynı kalmak koşulu ile soğuk nokta sıcaklığı değiştiğinde farklı sıcaklıklar okunur. Bu nedenle mV tablolarındaki değerlerde standart sağlamak için ölçülen sıcaklık karşılığı mV değerleri soğuk noktanın 0 °C'de tutulması ile elde edilir. Termokupllar -200°C'den 2320 °C'ye kadar çeşitli sıcaklıklarda, ölçüm ve kontrol için yaygın olarak kullanılır (Şekil 3.16). Ayrıca sıcaklık gradyanını elektrığe dönüştürürler. Her bir deney elemanında 3 adet termokupl kullanılmış olup termokuplların yerleşimi 3.bölüm Şekil 3.1 ve Şekil-2'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 16: Termokupl (Isıl Çift-Sıcaklık Sensörü).

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Giriş

Bu bölümde yangına maruz kalmış betonarme elemanların aksel yük altında elde edilen sonuçlar ve dayanımları incelenmiştir. Bu kapsamda beş adet numune en kesit şekillerine ve TS 500 standartlarına uygun olarak üretilmiş, daha sonra numuneler üzerine yangın senaryosu uygulanmış ve aksel yük uygulanarak numuneler üzerinde gerilim dayanımları ölçülmüştür.

4.2 Numunelerin Yükleme Sonrası Davranışlarının İncelenmesi

4.2.1 Referans Numunesi

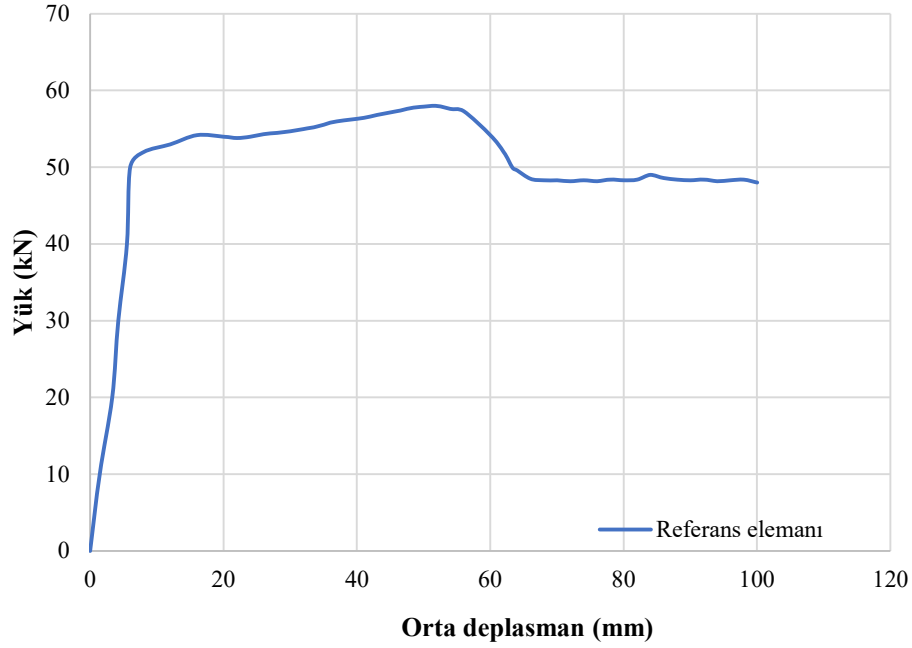
Üç noktalı eğilme yüklemesi altında referans elemanında, 15 kN yük etkisi altında kılcal eğilme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. 25 kN yük etkisi altında eğilme çatlakları artışı devam etmiştir. 52 kN yük etkisi altında numune akmaya başlamıştır. 58 kN yük ve 52 mm deplasmanda beton ezilmeye başlamıştır (Şekil 4.1). Deplasman miktarının 60 mm'ye ulaşmasıyla eğilme ve ezilme çatlakları artışı devam etmiştir. Deney, orta noktadaki deplasman ölçerde 100 mm deplasman değeri gözlemlendiğinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.2). Deney sonucunda elde edilen yük deplasman eğrisi Şekil 4.3'te gösterilmektedir.



Şekil 4. 1: Referans elemanında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



Şekil 4. 2: Referans elemanında 100 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



Şekil 4. 3: Referans elemanı yük – orta deplasman eğrisi

4.2.2 Deneysel Elemanı-1

Üç noktalı eğilme yüklemesi altında deneysel elemanı-1 (S1), 10 kN yük etkisi altında numunede kılcal eğilme çatlakları oluşumu gözlemlenmiştir. 25 kN yük etkisi altında eğilme çatlakları artışı devam etmiştir. 41kN yük etkisi altında numune akmaya başlamıştır. 42 kN yük ve 40 mm deplasmanda beton ezilmeye başlamıştır (Şekil 4.4). 50 mm deplasmanda eğilme ve ezilme çatlakları artışı devam etmiştir. Deneysel, orta noktadaki deplasman ölçerinde 105 mm deplasman değeri gözlemlendiğinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.5). Deneysel elemanı-1

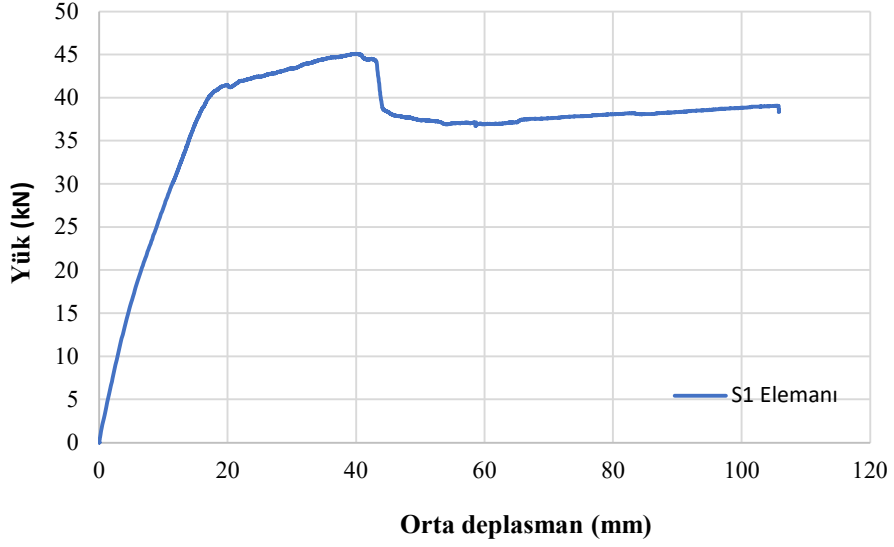
(S1)'e ait yük deplasman eğrisi Şekil 4.6'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 4: S1 elemanında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



Şekil 4. 5: Deney elemanı-1 100 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



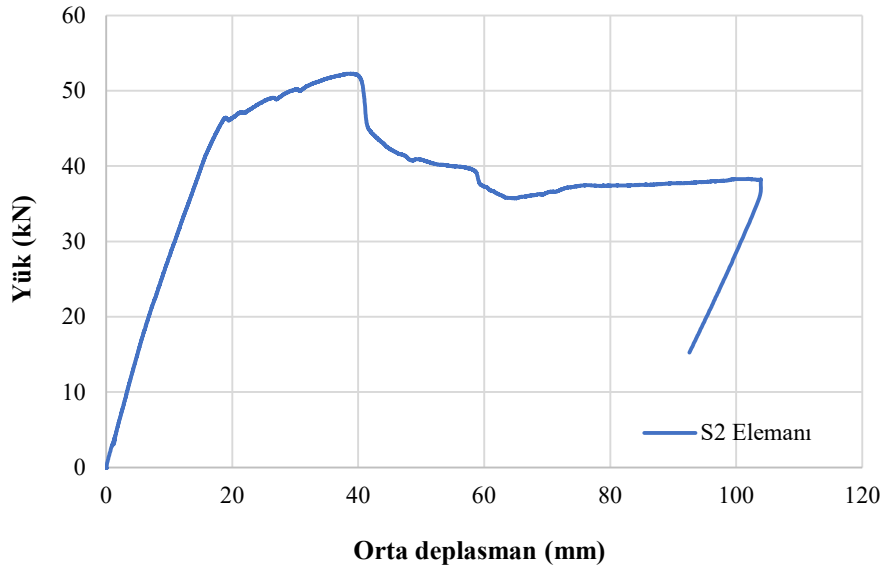
Şekil 4. 6: Deneş elemanı-1 yük – orta deplasman eğrisi

4.2.3 Deneş Elemanı-2

Eğilme yüklemesi altında deneş elemanı-2, 9 kN yük etkisi altında numunede ilk kılcal eğilme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. 25 kN yük etkisi altında eğilme çatlakları artışı devam etmiştir. Yük artışıyla birlikte S2 elemanı 46 kN yük altında akmaya başlamıştır. 52 kN yük etkisi altında ve 40 mm deplasmanda beton ezilmeye başlamıştır. 70 mm deplasmanda eğilme ve ezilme çatlakları artışı devam etmiştir. Deneş, orta noktadaki deplasman ölçerde 103 mm deplasman değeri gözlemlendiğinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.7). Deneş elemanı-2 (S2)'e ait yük - deplasman eğrisi şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 7: Deneş elemanı-2 103 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



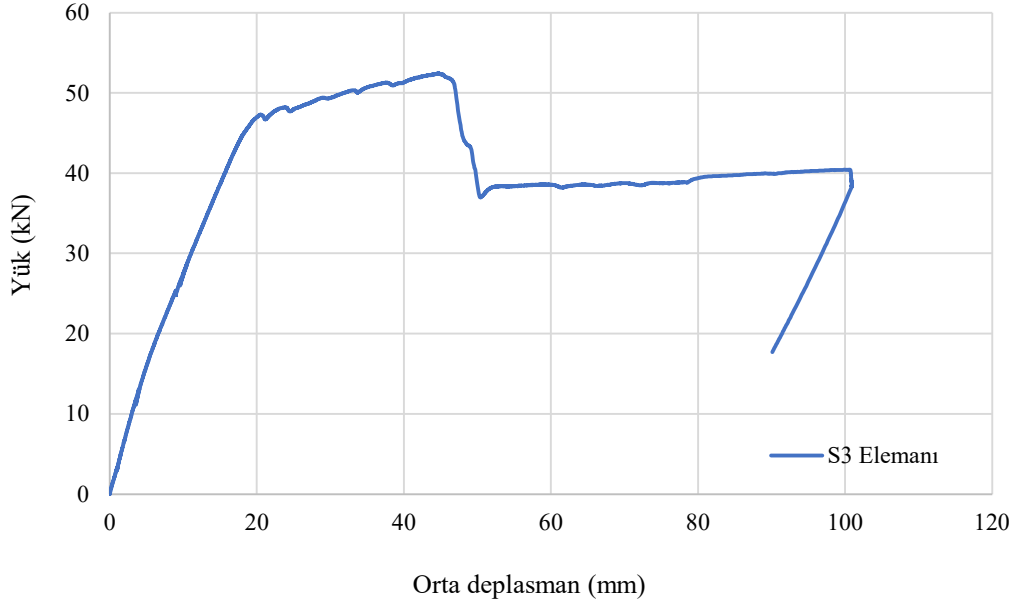
Şekil 4. 8: Deneş elemanı-2 yük – orta deplasman eğrisi

4.2.4 Deneş Elemanı-3

Eğilme yüklemesi altında deneş elemanı-3 (S3), 8 kN yük etkisi altında numunede kılcal eğilme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. 25 kN yük etkisi altında eğilme çatlakları artışı devam etmiştir. Yükün 46 kN'a ulaşmasıyla numune akmaya başlamıştır. 52 kN yük ve 40 mm deplasmanda beton ezilmeye başlamıştır. 70 mm deplasmanda eğilme ve ezilme çatlakları artışı devam etmiştir. Deneş, orta noktadaki deplasman ölçerde 103 mm deplasman değeri gözlemlendiğinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.9). Deneş elemanı-3 (S3)'e ait yük - deplasman eğrisi Şekil 4.10'da gösterilmektedir.



Şekil 4. 9: Deneş elemanı-3 103 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



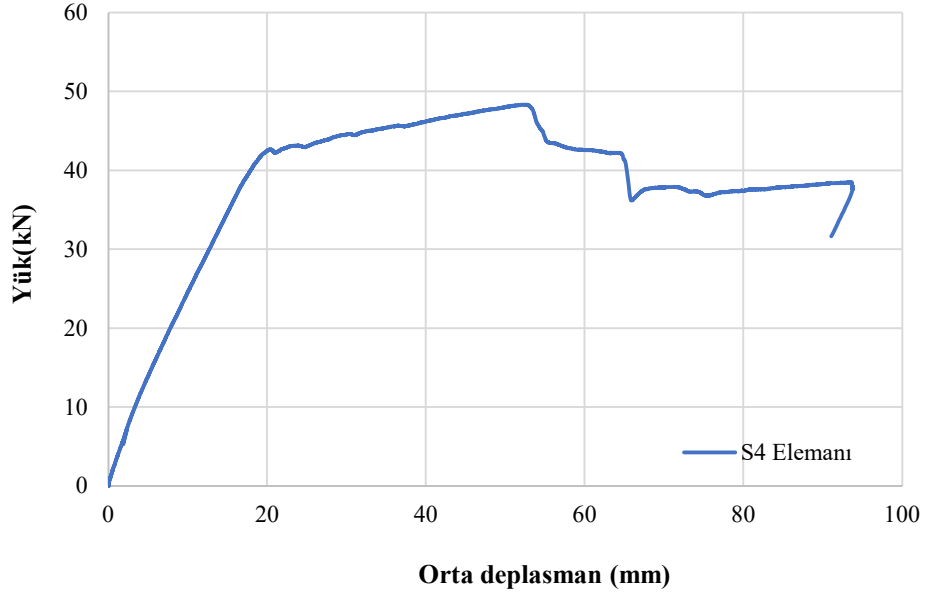
Şekil 4. 10: Deney elemanı-3 yük – orta deplasman eğrisi

4.2.5 Deney Elemanı-4

Eğilme yüklemesi altında deney elemanı-4 (S4), 10 kN yük etkisi altında numunede kılcal eğilme çatlakları oluşumu gözlenmiştir. 30 kN yük etkisi altında eğilme çatlakları artışı devam etmiştir. Yük artışıyla birlikte 42 kN yük altında numune akmaya başlamıştır. 48 kN yük etkisi altında ve 53 mm deplasmanda beton ezilmeye başlamıştır. 70 mm deplasmanda eğilme ve ezilme çatlakları artışı devam etmiştir. Deney, orta noktadaki deplasman ölçerde 93 mm deplasman değeri gözlemlendiğinde sonlandırılmıştır (Şekil 4.11). Deney elemanı-4 (S4)'e ait yük - deplasman eğrisi Şekil 4.12'de gösterilmektedir.



Şekil 4. 11: Deney elemanı-4, 93 mm deplasman altında meydana gelen eğilme çatlakları ve beton ezilmesi



Şekil 4. 12: Deney elemanı-4 yük – orta deplasman eğrisi

4.2.6 Dayanım

İlk eğilme çatlağı ve akma yükleri incelendiğinde, yangına maruz kalan betonarme elemanların dayanımlarında %20 azalma olduğu gözlenmiştir (Tablo 5.1). Yangına maruz kalan S1, S2, S3 ve S4 deney elemanlarının referans elemana kıyasla daha düşük yüklerde akmaya başladığı ve daha düşük yüklerde betonda ezilmeler meydana gelmiştir. Deneye elemanlarına ait test sonuçları Tablo 5.1’te özetlenmiştir.

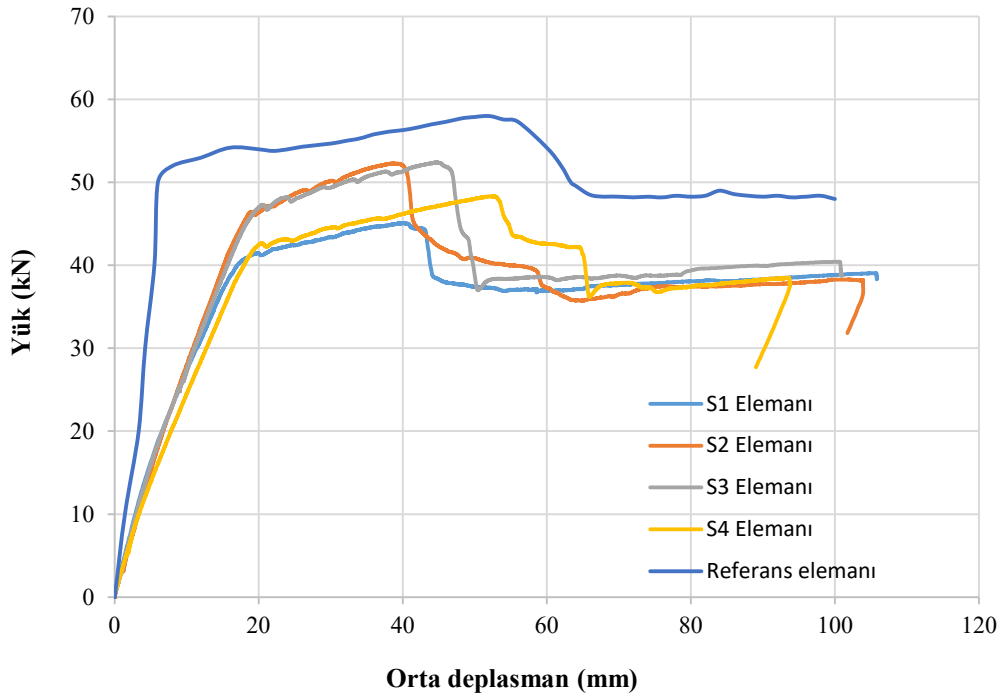
Tablo 4. 1: Deney elemanlarına ait test sonuçları

<i>Numune</i>	<i>İlk eğilme çatlağı (kN)</i>	<i>Akma dayanımı (kN)</i>	<i>Ezilme değeri (kN-mm)</i>
<i>R</i>	15	52	58-52
<i>S1</i>	10	41	42-40
<i>S2</i>	9	46	52-40
<i>S3</i>	8	47	52-45
<i>S4</i>	10	42	48-53

4.2.7 Rijitlik

Bir malzemenin bir yük altında eğilmeye, gerilmeye veya deformasyona dayanmasına izin veren göreceli sertliktir. Bu, malzemenin Elastisite modülünün ve şeklinin bir

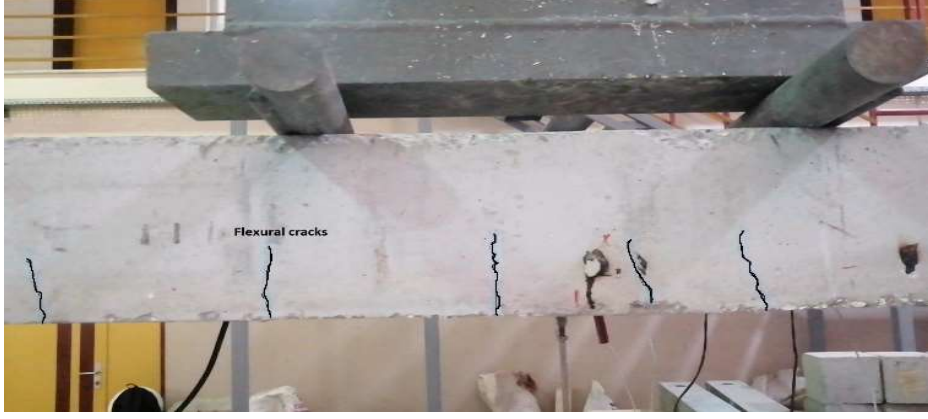
fonksiyonudur. Numunelere uygulanan eğilme yükü-orta deplasman verileri sonucu elde edilen grafik Şekil 4.13'te gösterilmektedir. Referans numunesinin eğimi yangına maruz kalan betonarme elemanların (S1, S2, S3, S4) eğimine göre daha az olmuştur, böylece daha az deplasman yaparak daha rijit bir davranış sergilemiştir. Yangına maruz kalan betonarme elemanların eğimleri birbirlerine çok yakın olmuştur ve benzer rijitlik davranışı sergiledikleri görülmektedir (Şekil 4.13).



Şekil 4.13 : Deneysel elemanların deplasman grafiği

4.2.8 Çatlak modu

Numunelerde gözlemlenen kırılma modu tipik olarak çekme alanından başlayıp basınç alanına ilerleyen eğilme çatlaklarıdır. Çatlakların büyük bir çoğunluğu düşey yük etki noktaları arasında kalan alanda ortaya çıkmış ve mesnet noktalarına yakın taraflarda neredeyse hiç gözlemlenmemiştir. Yangına maruz kalmış ve referans kolon numunesi arasında çatlak oluşum düzenlerinde fark gözlemlenmemiştir. Bütün deneysel elemanlarında hakim kırılma modu eğilme çatlakları olmuştur (Şekil 4.14).



Şekil 4. 14: Test elemanlarında meydana gelen tipik eğilme çatlakları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Biri referans eleman olmak üzere beş (5) tam ölçekli betonarme kolonun yangın sonrası eğilme davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Numunelerde ilk 15 dakika içerisinde betonda su kaybı gözlenmiştir. Sonraki işlemlerde betonda soyulma, kararma, çatlaklar ve dökülmeler gözlenmiştir.

Referans elemanı, yangına maruz kalan betonarme elemanlara göre %20 daha rijit bir davranış sergilemiştir. Bunun nedeni, yangına maruz kalan betonarme kolonların mekanik özelliklerindeki önemli azalmanın yanı sıra, donatı çeliği ile beton arasındaki bağında azalmadır.

Yangın sırasında beton ve donatı çeliği mukavemetini kaybeder. Bunun sonucunda, yangına maruz kalan betonarme kolonların elastisite modüllerinde %60 oranında bir kayıp meydana gelmiştir. Ayrıca yangın sırasında beton su kaybedeceği için elastisite modülü azalacaktır.

Deney elemanları sadece alt yüzeylerinden (1 yüzeyden) 90 dakika sonunda 821 °C'ye ulaşan bir yangına maruz bırakılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğutulduktan sonra dört noktalı eğilme deneyine maruz bırakılan elemanlar ile hiç yangına maruz kalmadan statik yükleme yapılan referans elemanı arasında akma noktası, taşıma gücü ve çatlak modunda önemli bir değişiklik oluşmamıştır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre betonarme elemanların yangından sonra normal kuvvet taşıma kapasiteleri ve eğilme kapasitelerinin değişimini gözlemek için çok daha yüksek sıcaklık ve daha uzun bir yangın süresine ihtiyaç olduğu görülmektedir. Beton 600 °C üzerinde uzun süreli 90 dakika, 120 dakika süre ile yanması sonucunda ciddi bozulmalar meydana geleceği ve taşıma gücü açısından önemli bir değişim meydana geleceği görülmektedir. Kısa süreli ve 600 °C altındaki sıcaklıklarda betonda önemli bir bozulma meydana gelmeyecek ve taşıma gücü açısından değerlendirme yapmak oldukça güçleşecektir.

Isı kaybının minimum olduğu düzenekte birden fazla yüzeyde daha yüksek sıcaklıklara ve daha uzun süre yangına maruz bırakılan elemanların artık kapasite ve hasar modları araştırılmalıdır.

Yangına dayanıklılıkların daha doğru tahminleri için, betonarme kolonlarının yüksek sıcaklıklardaki mekanik ve deformasyon özelliklerine ilişkin veriler gereklidir. Yangına maruz kalan elemanların gömülü donatılarındaki uzama ve gerilmeler araştırılmalıdır.

Isı kaybının az olduğu düzenek kullanılması ve yangının yüzeye üniform olarak verilmesi

sonuçların daha doğru değerlendirilmesini sağlayacaktır.

İlerde yapılacak çalışmalarda yangın süresinin 90 dakikadan daha fazla ve etki edilen yüzey sayısının birden fazla olması, etki edilen yangın sıcaklık değerinin 800 °C üzerinde olması sonuçların yorumlanmasını kolaylaştıracaktır.

Bu alışma kapsamında elde edilen sonuçların, değişken sayısı çoğaltılarak daha fazla numune ve iyileştirilmiş deney düzenekleri kullanılarak teyit edilmesi gerekmektedir. Örneğin farklı beton örtüsü kalınlığı, aynı donatı oranına sahip farklı çaplı donatı, daha uzun süreli yüksek sıcaklığın farklı yüzeylerden etkimesi durumu ve ısı kaybının az olduğu yangın düzeneği kullanılarak yapılacak deneyler daha net sonuçlar elde edilmesinde önemli katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Albrifkani S., Wang Y. C., (2020). Behaviour of Axially and Rotationally Restrained Reinforced Concrete Beams in Fire, *Engineering Structures* 213 110572.
- Ali F. Nadjai A., Choi S., (2010). Numerical and Experimental Investigation of the Behavior of High Strength Concrete Columns In Fire, *University of Ulster Engineering Structures*.
- Alogla S., Kodur V.K.R., (2018). Quantifying Transient Creep Effects on Fire Response of Reinforced Concrete Columns, *Engineering Structures* 174 Pages: 885–895.
- Ataman R. (1991). Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Bažant Z. P. and Kaplan M. F., (1996). Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models, *Longman Group Limited*.
- Bikhiet M.M., Shafey N.F., El-Hashimy H.M. (2014). Behavior of Reinforced Concrete Short Columns, *Alexandria University Engineering Journal*.
- Bosnjak J. (2014). Explosive Spalling and Permeability of High Performance Concrete Under Fire: Numerical and Experimental Investigations, *PhD thesis, Universität Stuttgart*.
- Bratina S., Cas B. ve Saje M. (2005). Numerical Modelling of Behaviour of Reinforced Concrete Columns In Fire And Comparison with Eurocode 2, *Elsevier International Journal of Solids and Structures*.
- Buch S. H., Sharma U. K., (2019). Empirical model for determining fire resistance of Reinforced Concrete columns, *Construction and Building Materials* 225 838–852.
- Cheng P, Zhu H, Zhang Y, Jiao Y, Fish J. (2022). Couple thermo-hydro-mechanical-phase field modeling for fire-induced spalling in concrete, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 389 114327.
- Chung J. H., Consolazio G., (2005). Numerical Modeling of Transport Phenomena In Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Research*.
- Emberley R. L. (2013). A Study into the Behavior of Reinforced-Concrete Columns under Fire Exposures using a Spreadsheet-Based Numerical Model, Degree of Master of Science, *Worcester Polytechnic Institute*.
- European Committee for Standardization (2002). Actions on Structures Exposed to Fire, *Brussels*,

- EN1992-1-2. (2004). Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. *European Standard Norme*.
- EN1993-1-2. (2005). Eurocode 3 Design of Steel Structures - Part 1-2: General Rules - Structural Fire Design. *European Standard Norme*.
- Gao W. Y., Dai J-G., Teng J.G., G. M. Chen, (2013). Finite Element Modeling of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire,” *Engineering Structures* 52 488–501.
- Gernay, T., Dimia, M.S., (2013). Structural Behaviour of Concrete Columns Under Natural Fires, *The National Fund for Scientific Research Department of Structural Engineering*.
- Han L-H., Zhou K., Tan Q-H., T-Y. Song, (2020). Performance of Steel Reinforced Concrete Columns After Exposure to Fire: Numerical analysis and application, *Engineering Structures* 211 Pages: 110-421.
- Hajiloo H., Green M. F., Noël M., N. Bénichou, M. Sultan, (2017). Fire Tests on Full-Scale FRP Reinforced Concrete Slabs, *Composite Structures* 179 705–719.
- Jafarzadeh H, Nematzadeh M. Evaluation of post-heating flexural behavior of steel fiber-reinforced high-strength concrete beams reinforced with FRP bars: Experimental and analytical results, *Engineering Structures* 225 (2020) 111292.
- Jin L., Zhang R., Dou G., X. Du, (2018). Fire Resistance of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams After Low-Velocity Impact Loading, *Fire Safety Journal* 98 24–37.
- Jansson R., 2008. Material Properties Related to Fire Spalling of Concrete, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, Sweden.
- Kodur V.K.R., Dwaikat M., (2008). A Numerical Model for Predicting The Fire Resistance of Reinforced Concrete Beams, *Cement & Concrete Composites* 30 Pages: 431–443.
- Kodur V. K. R., Raut N., (2012). A Simplified Approach for Predicting Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Under Biaxial Bending, *Engineering Structures* 41 Pages: 428–443.
- Kodur V. K. R., Khaliq W., N. Raut, (2013). An Approach to Account for Tie Configuration In Predicting Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns, *Engineering Structures*, 56.
- Kodur V. K. R., Agrawal A., (2017). Effect of Temperature Induced Bond Degradation on Fire Response of Reinforced Concrete Beams, *Engineering Structures* 142 Pages:98–109.

- Kodur V, Banerji S., *Modeling the fire-induced spalling in concrete structures incorporating hydro-thermo-mechanical stresses, Cement and Concrete Composites* 117 (2021) 103902.
- Khoury, A. ve Anderberg, Y., (2000). Fire Safety Design – Concrete Spalling Review, Swedish National Road Administration.
- Lie T. T., Rowe T. J., and Lin T. D., (1986). Residual Strength of Fire-Exposed Reinforced Concrete Columns, *ACI Structural Journal*, vol. 92, pp. 153-174.
- Liu C, Zhou B, Guo X, Liu C, Wang L. *Analysis and prediction methods for the static properties of reinforced concrete beams under fire, Structures* 47 (2023) 2319–2330.
- Martins A. M., Rodrigues J.P.C., (2012). Fire Behaviour of Concrete Columns with Restrained Thermal Elongation, *Department of Civil Engineering, Faculty of Sciences and Technology of the University of Coimbra*.
- Nassar K. M. (2011). Improving Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns, *Islamic University of Gaza Higher Education Deanship Faculty of Engineering*.
- Naus Dan J. (2006). The Effect of Elevated Temperature on Concrete Materials and Structures: a Literature Review. No. ORNL/TM-2005/553. Oak Ridge National Laboratory (ORNL).
- Rehman A, Masood A, Akhtar S, Ibrahim S.M, Shariq M. *Experimental and numerical investigation into flexural bond strength of RC beams exposed to elevated temperature, Construction and Building Materials* 282 (2021) 122630.
- Riley M.A., (1991). Possible New Method for the Assessment of Fire Damaged Concrete *Magazine of Concrete Research*, sayı 43, sayı 87-92.
- Schneider U., and U. Diederichs. (1981). Physical of Concrete from 20 C Up to Melting. *Betonwerk Fertigteil-Technik* 3. Pages: 141-141.
- Shah, A.H., Sharma U.K., (2017). Fire Resistance and Spalling Performance of Confined Concrete Columns, *Construction and Building Materials* 156 161–174.
- Shi X., Tan T.-H., Tan K.-H., Guo Z., (2004). Influence of Concrete Cover on Fire Resistance of Reinforced Concrete Flexural Members, *Journal of Structural Engineering*.
- Tan K.-H. (2004). Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns Subjected to 1-, 2-, and 3-Face Heating. *Journal of Structural Engineering ASCE*.

- Terro M. (2008). Numerical Modelling of The Behaviour of Concrete Structures In Fire, *ACI Structural Journal*.
- Toric N., Boko I., and Peros B., (2013). Reduction of Post Fire Properties of High Strength Concrete, *Advanced Material Science*, pp. 1-13, 2013.
- Uysal A. (2004). Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkisi, Yüksek Lİsans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Xavier H. F. (2009). Analysis of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire. *Faculdade de Engenharia Universidade Do Porto*.
- Xiao, J., Xie, Q., Xie, W. (2018). Study on high-performance concrete at high temperatures in China. *Page 11-24 Fire Safety Journal*.
- Xiaoyong, L., Fanjie, B. (2011). Residual Strength for Concrete after Exposure to High Temperatures . *North China University of Technology*.
- Xu H., Yu M., Xue C., Xu L., J. Ye, (2020). Experimental Study on Fire Resistance of Precast Concrete Columns with Efficient Reinforcement, *Engineering Structures* 204 109947.
- Yang Y., Feng S., Y. Xue, Y. Yu, H. Wang, Y. Chen, (2019). Experimental Study on Shear Behavior of Fire-damaged Reinforced Concrete T-Beams Retrofitted with Prestressed Steel Straps, *Construction and Building Materials* 209 644–654.
- Zeybek A. (2008). Betonarme Kolonların Yangın koşullarında Tasarımı ve Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Zhang H.Y, Li Q.Y, Kodur V, Lv H.R. *Effect of cracking and residual deformation on behavior of concrete beams with different scales under fire exposure, Engineering Structures* 245 (2021) 112886.

ÖZGEÇMİŞ