T.C. ERZİNCAN BİNALİ YILDIRIM ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mahmud YAĞAN

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ERZİNCAN

2019 Her Hakkı Saklıdır.

Kabul ve Onay Sayfası

Doç.Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, Mahmud YAĞAN tarafından hazırlanan bu çalışma 03/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliği ile kabul edilmiştir.

Başkan : Dr.Öğr.Üyesi Arif Emre SAĞSÖZ

Üye : Doç.Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Üye : Dr.Öğr.Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

unit Îmza: Îmza: Îmza:

Yukarıdaki sonuç Enstitü Yönetim Kurulunun 19. / 97/ 2019 tarih ve 28/ 13 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY

rof. Dr. Mustafa Fatih ERTUGAY Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, şekil ve tabloların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

Bilimsel Etiğe Uygunluk Sayfası

"Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Yapısal Davranışlarının İncelenmesi" isimli "Yüksek Lisans" tezim tarafımca intihal tespit programı ile incelenmiştir. Buna göre tezimde bilimsel etik ihlali ve intihal olarak nitelendirilebilecek herhangi bir durum olmadığını taahhüt ederim.

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir biçimde elde edildiğini; aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi beyan ederim. 03/07/2019

M. Jung Mahmud YAĞAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇELİK DONATILI BETONARME KİRİŞLERİN YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ ALTINDA YAPISAL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mahmud YAĞAN

Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Bu çalışmada yüksek sıcaklıkların betonarme kirişlerin yapısal davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Araştırma kapsamında betonarme kirişler, küp beton numuneleri, çelik donatı ve çekip çıkarma deneyleri için hazırlanan numuneler aynı şartlar altında üretilmiş ve seramik fırında kademeli olarak 800°C'ye kadar sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Daha sonra ilgili standartlara uygun olarak deneylere tabi tutulmuştur. Deney sonuçları birbirleriyle mukayese edilerek değerlendirme yapılmıştır. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde 600°C'ye kadar çeliğin akma dayanımlarında kayda değer bir düşüş görülmezken beton basınç dayanımlarında yaklaşık %45 civarında bir düşüş görülmüştür. 800°C'de ise beton basınç dayanımında %82 civarındaki azalmaya karşılık çelik akma dayanımında ise %30 civarında bir düşüşe rastlanmıştır. Üretilen kiriş numunelerindeki taşıma gücü kaybının temel nedeninin betonda oluşan hasar ve bu hasardan ötürü beton donatı kenetlenmesinin azalması olduğu söylenebilir.

2019, 121 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yüksek Sıcaklık, Yangın Etkisi, Betonarme Kiriş, Çelik Donatı, Beton

ABSTRACT

Master Thesis

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL BEHAVIOR OF STEEL-REINFORCED CONCRETE BEAMS EXPOSED TO ELEVATED TEMPERATURES

Mahmud YAĞAN

Erzincan Binali Yıldırım University Institute of Natural and Applied Sciences Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

In this study, effects of high temperatures on the structrual behaviour of reinforced concrete beams were investigated. Within the scope of the research, reinforced concrete beams cube concrete specimens, steel reinforcement and pull-out specimens were produced under the same conditions and were gradually exposed to temperatures up to 800°C in the ceramic furnace. It was then subjected to tests inline with the related codes. The results of the experiments were evaluated by comparing with each other. When the results were investigated in general, there was not a significant decrease in yield strength of the steel up to 600°C, but a decrease in concrete compressive strength of nearly 45% was seen at 800°C, concrete compressive strength decreased by 82% while steel yield strength decreased by nearly 30%. It could be suggested that the main reason of the bond-bearing capacity of the produced beam specimens is the damage on the concrete and the reduction of the concrete-reinforcement bonding due to this damage.

2019, 121 Pages

Keywords: High Temperatures, Fire Effect, RC Beams, Steel Reinforcement, Concrete

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğimimin ve tez çalışmalarım boyunca yardımını ve desteğini esirgemeyen sayın hocam Doç.Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a teşekkürlerimi borç bilirim.

Laboratuvar çalışmaları sırasında sürekli destek ve yardımlarını gördüğüm Muhammed Orhan ÖZTÜRK ile Mehmet POLAT'a ayrıca teşekkür ederim.

Bütün hayatım boyunca üzerimde büyük emekleri olan çok kıymetli aileme şükranlarımı sunarım.

Ayrıca eğitim hayatım boyunca bana destek olan saygıdeğer eniştem Prof.Dr. Murat ÖZDEMİR ve ailesine teşekkürlerimi borç bilirim.

> Mahmud YAĞAN Temmuz, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZFT	i
	 ;;
TESEKKÜR	 iii
icindekiler	iv
SFKILLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	X
SİMGELER ve KISALTMALAR	xi
1. GİRİS	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	3
2.1. Yüksek Sıcaklıkların Çelik ve Beton Üzerine Etkileri	3
2.2. Yüksek Sıcaklıkların Betonarme Elemanlara Etkileri	7
2.3. Yüksek Sıcaklıkların Beton-Donatı Aderansı Üzerine Etkileri	9
3. KURAMSAL TEMELLER	16
3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi	16
3.2. Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi	19
3.3. Sargılı Beton Davranışı	22
3.4. Betonarme Kiriş Tasarımı İçin TS 500(2000) Hükümleri	24
3.4.1. Malzeme özellikleri ve kabulleri	24
3.4.2. Eğilme elemanlarının boyutları ve donatılar ile ilgili hükümler	25
3.4.3. Kesme Kuvveti Hesabı Hükümleri	26
3.5. Beton - Donatı Aderansı	27
3.6. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Hakkında Genel Bilgiler	29
3.7. Moment-Eğrilik İlişkisi	
4. MATERYAL ve YÖNTEM	
4.1. Malzeme Özellikleri	
4.1.1. Beton	
4.1.2. Çelik donatı	34
4.2. Deney Numunelerinin Tasarımı	
4.2.1. Eğilme numunelerinin tasarımı	
4.2.2. Kesme numunelerinin tasarımı	
4.3. Deney numunelerinin adlandırılması	41

4.4. De	eney düzeneği ve yükleme programı	41
4.4.1	. Ölçüm ve veri toplama sistemi	43
4.4.2	. Ölçümlerin değerlendirilmesi	44
4.5. Eğ	grilik Hesabının Yapılması	45
5. ARAŞT	IRMA BULGULARI	46
5.1. Be	eton Basınç Deneyleri	46
5.2. Çe	elik Donatı Çekme Deneyleri	48
5.3. Çe	ekip Çıkarma Deneyleri	50
5.4. Eğ	ğilme Grubu Kiriş Deneyleri	54
5.4.1	. SS000FL kirişi deneyleri	54
5.4.2	. SS100FL kirişi deneyleri	57
5.4.3	. SS150FL kirişi deneyleri	59
5.4.4	. SS200FL kirişi deneyleri	62
5.4.5	. SS250FL kirişi deneyleri	64
5.4.6	. SS300FL kirişi deneyleri	67
5.4.7	. SS400FL kirişi deneyleri	70
5.4.8	. SS500FL kirişi deneyleri	72
5.4.9	. SS600FL kirişi deneyleri	75
5.4.1	0. SS800FL kirişi deneyleri	77
5.5. Ke	esme Grubu Kiriş Deneyleri	80
5.5.1	. SS000SH kirişi deneyleri	80
5.5.2	. SS100SH kirişi deneyleri	83
5.5.3	. SS150SH kirişi deneyleri	86
5.5.4	. SS200SH kirişi deneyleri	89
5.5.5	. SS250SH kirişi deneyleri	92
5.5.6	. SS300SH kirişi deneyleri	95
5.5.7	. SS400SH kirişi deneyleri	98
5.5.8	. SS500SH kirişi deneyleri	101
5.5.9	. SS600SH kirişi deneyleri	104
5.5.1	0. SS800SH kirişi deneyleri	
6. SONUÇ	CLAR	110
KAYNAK	LAR	116
EKLER		
EK-1. T	ez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar	
ÖZGEÇMİ	ļŞ	

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1. Kiriş eksenine dik asal gerilmelerin değişimi (Arslan, 2005; Celeb v Kumbasar, 2005)	e 17
Şekil 3.2. Kesit tesirleri diyagramı (Arslan, 2005; Doğangün, 2008)	18
Şekil 3.3. Betonarme kirişte sekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı	20
Şekil 3.4. Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu	21
Şekil 3.5. Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Özhan, 2012)	21
Şekil 3.6. Üç eksenli gerilme altında betondaki davranış (Doğan, 1997)	23
Şekil 3.7. k ₁ parametre eğrisi (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)	24
Şekil 3.8. Kiriş kesit boyutları	25
Şekil 3.9. Soğuk işlem görmüş çeliğin aderans-sıyrılma ilişkisi	28
Şekil 3.10. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS, 2012)	30
Şekil 3.11. Eğilme ve eksenel yük altında deforme olmuş eleman parçası (Akkaya 2014; Çağlar vd., 2013)	ı, 31
Şekil 3.12. Moment-eğrilik ilişkisi (Akkaya, 2014)	32
Şekil 4.1. Beton basınç dayanımı test cihazı	34
Şekil 4.2. 1200 °C rejimli seramik fırını	35
Şekil 4.3. Çelik donatı test cihazı	36
Şekil 4.4. Çelik donatı gerilme-birim uzama grafiği	37
Şekil 4.5. Eğilme grubu kiriş tasarımı	38
Şekil 4.6. Eğilme grubu için üretilen kiriş numunesi	39
Şekil 4.7. Kesme grubu kiriş tasarımı	40
Şekil 4.8. Kesme grubu için üretilen kiriş numunesi	40
Şekil 4.9. Kiriş numuneleri için deney düzeneği	42
Şekil 4.10. Kiriş numunelerinin ön kısmına yerleştirilen yer değiştirme ölçerler	43
Şekil 4.13. Kiriş numunelerinin arka kısmına yerleştirilen yer değiştirme ölçerler	44
Şekil 5.1. Her sıcaklık grubu için beton küp numuneleri	46
Şekil 5.2. Sıcaklığa göre beton basınç dayanımlarının değişimi	47
Şekil 5.3. Sıcaklığa maruz kalmış demir numuneler	48
Şekil 5.4. Sıcaklığa maruz kalmış çelik çekme akma dayanımları	49
Şekil 5.5. Çekip çıkarma deneyleri için numune kalıpları	51
Şekil 5.6. Seramik fırınında ısıtılan numuneler	51

Şekil 5.7.	Yangın sıvası ile kaplanmış çekip çıkarma numunesi ve deneye hazır numune	. 52
Şekil 5.8.	ASTM D7913/D7913M-14 yönergelerine göre çekip çıkarma deney düzeneği	. 52
Şekil 5.9. (Çelik donatıların her sıcaklık grubu için bağ gerilmelerinin değişimi	.53
Şekil 5.10.	Deney öncesi SS000FL kiriş numunesi	.55
Şekil 5.11.	Deney sonrası SS000FL kiriş numunesi	.55
Şekil 5.12.	SS000FL için yük-sehim grafiği	.56
Şekil 5.13.	SS000FL için moment-eğrilik grafiği	.56
Şekil 5.14.	Deney öncesi SS100FL kiriş numunesi	.57
Şekil 5.15.	Deney sonrası SS100FL kiriş numunesi	.58
Şekil 5.16.	SS100FL için yük-sehim grafiği	.58
Şekil 5.17.	SS100FL için moment-eğrilik grafiği	. 59
Şekil 5.18.	Deney öncesi SS150FL kiriş numunesi	.60
Şekil 5. 19	. Deney sonrası SS150FL kiriş numunesi	.60
Şekil 5.20.	SS150FL için yük-sehim grafiği	.61
Şekil 5.21.	SS150FL için moment-eğrilik grafiği	.61
Şekil 5.22.	Deney öncesi SS200FL kiriş numunesi	.62
Şekil 5.23.	Deney sonrası SS200FL kiriş numunesi	.63
Şekil 5.24.	SS200FL için yük-sehim grafiği	.63
Şekil 5.25.	SS200FL için moment-eğrilik grafiği	.64
Şekil 5.26.	Deney öncesi SS250FL kiriş numunesi	.65
Şekil 5.27.	Deney sonrası SS250FL kiriş numunesi	.66
Şekil 5.28.	SS250FL için yük-sehim grafiği	.66
Şekil 5.29.	SS250FL için moment-eğrilik grafiği	.67
Şekil 5.30.	Deney öncesi SS300FL kiriş numunesi	.68
Şekil 5.31.	Deney sonrası SS300FL kiriş numunesi	.68
Şekil 5.32.	SS300FL için yük-sehim grafiği	. 69
Şekil 5.33.	SS300FL için moment-eğrilik grafiği	. 69
Şekil 5.34.	Deney öncesi SS400FL kiriş numunesi	.70
Şekil 5.35.	Deney sonrası SS400FL kiriş numunesi	.71
Şekil 5.36.	SS400FL için yük-sehim grafiği	.71
Şekil 5.37.	SS400FL için moment-eğrilik grafiği	.72
Şekil 5.38.	Deney öncesi SS500FL kiriş numunesi	.73
Şekil 5.39.	Deney sonrası SS500FL kiriş numunesi	.73

Şekil 5.40. SS500FL için yük-sehim grafiği	.74
Şekil 5.41. SS500FL için moment-eğrilik grafiği	.74
Şekil 5.42. Deney öncesi SS600FL kiriş numunesi	.75
Şekil 5.43. Deney sonrası SS600FL kiriş numunesi	.76
Şekil 5.44. SS600FL için yük-sehim grafiği	.76
Şekil 5.45. SS600FL için moment-eğrilik grafiği	.77
Şekil 5.46. Deney öncesi SS800FL kiriş numunesi	.78
Şekil 5.47. Deney sonrası SS800FL kiriş numunesi	.78
Şekil 5.48. SS800FL için yük-sehim grafiği	.79
Şekil 5.49. SS800FL için moment-eğrilik grafiği	.79
Şekil 5.50. Deney öncesi SS000SH kiriş numunesi	.80
Şekil 5.51. Deney sonrası SS000SH kiriş numunesi	.81
Şekil 5.52. SS000SH için yük-sehim grafiği	.82
Şekil 5.53. SS000SH için yük-çatlak grafiği	.82
Şekil 5.54. Deney öncesi SS100SH kiriş numunesi	.83
Şekil 5.55. Deney sonrası SS100SH kiriş numunesi	.84
Şekil 5.56. SS100SH için yük-sehim grafiği	.85
Şekil 5.57. SS100SH için yük-çatlak grafiği	.85
Şekil 5.58. Deney öncesi SS150SH kiriş numunesi	.86
Şekil 5.59. Deney sonrası SS150SH kiriş numunesi	.87
Şekil 5.60. SS150SH için yük-sehim grafiği	.88
Şekil 5.61. SS150SH için yük-çatlak grafiği	.88
Şekil 5.62. Deney öncesi SS200SH kiriş numunesi	. 89
Şekil 5.63. Deney sonrası SS200SH kiriş numunesi	.90
Şekil 5.64. SS200SH için yük-sehim grafiği	.91
Şekil 5.65. SS200SH için yük-çatlak grafiği	.91
Şekil 5.66. Deney öncesi SS250SH kiriş numunesi	.92
Şekil 5.67. Deney sonrası SS250SH kiriş numunesi	.93
Şekil 5.68. SS250SH için yük-sehim grafiği	.94
Şekil 5.69. SS250SH için yük-çatlak grafiği	.94
Şekil 5.70. Deney öncesi SS300SH kiriş numunesi	.95
Şekil 5.71. Deney sonrası SS300SH kiriş numunesi	.96
Şekil 5.72. SS300SH için yük-sehim grafiği	.97
Şekil 5.73. SS300SH için yük-çatlak grafiği	.97

Şekil 5.74. Deney öncesi SS400SH kiriş numunesi
Şekil 5.75. Deney sonrası SS400SH kiriş numunesi
Şekil 5.76. SS400SH için yük-sehim grafiği100
Şekil 5.77. SS400SH için yük-çatlak grafiği100
Şekil 5.78. Deney öncesi SS500SH kiriş numunesi101
Şekil 5.79. Deney sonrası SS500SH kiriş numunesi102
Şekil 5.80. SS500SH için yük-sehim grafiği103
Şekil 5.81. SS500SH için yük-çatlak grafiği103
Şekil 5.82. Deney öncesi SS600SH kiriş numunesi104
Şekil 5.83. Deney sonrası SS600SH kiriş numunesi105
Şekil 5.84. SS600SH için yük-sehim grafiği106
Şekil 5.85. SS600SH için yük-çatlak grafiği107
Şekil 5.86. Deney öncesi SS800SH kiriş numunesi107
Şekil 5.87. Deney sonrası SS800SH kiriş numunesi108
Şekil 5.88. SS800SH için yük-sehim grafiği109
Şekil 5.89. SS800SH için yük-çatlak grafiği109
Şekil 6.1. Her sıcaklık grubu için beton, donatı ve bağ gerilmesi korunan % dayanımları
Şekil 6.2. Kesme ve eğilme grubu numuneleri için deney sonrası korunan % dayanımlar
Şekil 6.3. Eğilme grubu için deney sonrası tüm kirişler112
Şekil 6.4. Eğilme grubu kiriş numuneleri sıcaklık- taşıma gücü kapasitesi değişimi113
Şekil 6.5. Kesme gr ubu için deney sonrası tüm kirişler114
Şekil 6.6. Kesme grubu kiriş numuneleri sıcaklık- taşıma gücü kapasitesi değişimi 114

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Beton sınıflarına göre kullanılacak k_1 değerleri	25
Tablo 4.1. Oda sıcaklığında çelik donatının mekanik özellikleri	37
Tablo 4.2. Eğilme numuneleri tasarım tablosu	
Tablo 4.3. Kesme numuneleri tasarım tablosu	40
Tablo 4.4. Tüm deney numunelerinin isimleri	41
Tablo 4.5. Yükleme sisteminde kullanılan aletler	41
Tablo 4.6. Ölçüm ve veri toplama cihazları listesi	44
Tablo 5.1. Her sıcaklık grubu için küp beton basınç dayanımları	47
Tablo5.2. Sıcaklığa maruz kalmış çeliğin akma dayanımları	49
Tablo5.3. Çekip çıkarma deney sonuçlarına göre her sıcaklık grubu için gerilmeleri	bağ 54

SİMGELER ve KISALTMALAR

Simgeler	
а	Eşdeğer dikdörtgen basınç bloku derinliği (TS- 500-2000)
а	Elemanın kesme kuvvetine dik ekseniyle kesme donatısının yaptığı açı (EC-2-2014)
a _{cw}	Basınç çubuğunun gerilme halinde dikkate alınan bir katsayı (EC-2-2014)
a_g	Maksimum agrega boyutu (CSA A.23.3-14)
a_1	Betonda basınç bloğunda ortalama basınç gerilmesi katsayısı
Α	Basınç çubuğu (EC-2-2014)
A _c	Kesme gerilmesini belirlemek için kullanılan beton alanı (EC-2-2014)
Acc	Eşdeğer basınç bloğu alanı
A _{ct}	Eğilmede çekme tarafındaki beton alanı (CSA A.23.3-14)
A_g	Brüt beton alanı (ACI-318-14)
$A_{s,min}$	Minimum donatı kesit alanı (EC-2-2014)
A_s	Çekme donatısı kesit alanı (ACI-318-14)
A_s	Kolon kesitinde toplam boyuna donatı alanı (CSA A.23.3-14)
A_{sp}	Fret donatının çapı
A _{st}	Kolon boyuna donatısı toplam kesit alanı (TS- 500-2000)
A_{sw}	Kesme donatisi toplam kesit alani (TS-500-2000)
$A_{v,min}$	Minimum kesme donatısı alanı (ACI-318-14)
A_{v}	Kesme donatisi alani (CSA A.23.3-14)
b	Kolonun eğilme doğrultusuna dik boyutu
b_w	Kiriş gövde genişliği (TS-500-2000)
b_w	Eleman kesitinde basınç ve çekme arasındaki en küçük genişlik (EC-2-2014)
В	Bağlantı kirişleri (EC-2-2014)
С	En dış donatı ağırlık merkezinden ölçülen beton örtüsü ve Tarafsız eksen derinliği (TS-500-2000)
С	Çekme çubuğu (EC-2-2014)

d	Eğilme elemanlarında ,faydalı yükseklik (TS- 500-2000)
d_s	Çekirdek çapı
$d_{ u}$	Etkili kesme derinliği (CSA A.23.3-14)
D	Kesme donatisi (EC-2-2014)
Ec	Betonun elastisite modülü (CSA A.23.3-14)
E_s	Donatı elastisite modülü (TS-500-2000)
f_{c}	Betondaki basınç gerilmesi
$f_{c'}$	Tek yönlü basınç dayanımı
$f_{c'}$	Karakteristik beton basınç dayanımı (ACI-318 14)
$f_{c'}$	Beton basınç dayanımı (CSA A.23.3-14)
f_{c_1}	Eksenel basınç dayanımı
f_{cc}	Çok eksenli taşıma gücü
f_{cd}	Beton tasarım basınç dayanımı (TS-500-2000)
f _{ck}	Betonun karakteristik basınç dayanımı
f ck	Betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı (EC-2-2014)
f ctd	Beton tasarım eksenel çekme dayanımı (TS-500-2000)
f_y	Eğilme donatısının karakteristik akma dayanımı
	(ACI-318-14)
f_y	Eğilme donatısının akma dayanımı (CSA A.23.3-14)
$f_{y\mathrm{h}}$	Fret donatının akma dayanımı
${f}_{y\mathrm{h}}$	Kesme donatısının akma dayanımı (CSA A.23.3- 14)
f_{yd}	Boyuna donatı tasarım akma dayanımı (TS-500- 2000)
f_{yt}	Kesme donatısının karakteristik akma dayanımı
	(ACI-318-14)
f_{ywd}	Enine donatı tasarım akma dayanımı (TS-500- 2000)
f_{ywd}	Tasarım akma dayanımı (EC-2-2014)
h	Kolonun eğilme doğrultusundaki boyutu
F _{cd}	Boyuna çekme donatısı için tasarım yükü (EC-2- 2014)

F_{sw}	Eğik çatlağın kestiği etriyelerdeki kesme kuvveti
F_{td}	Eleman kesitinde basınç bloğundaki tasarım yükü
	(EC-2-2014)
k	Katsayı (EC-2-2014)
k_1	Yanal basıncı eksenel basınç dayanımına katkısına dönüştüren katsayı
k_1	Eşdeğer dikdörtgen basınç bloku derinlik katsayısı
	(TS-500-2000)
k_3	Standart silindir deneyinden elde edilen beton dayanımı ile Elemanda ortaya çıkan beton dayanımı arasındaki fark katsayısı
L_n	Net açıklık (CSA A.23.3-14)
ℓ_0	Potansiyel plastik bölgenin uzunluğu (CSA A.23.3-14)
ℓ_p	Plastik mafsal boyu
M_d	Tasarım momenti
M_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan moment değeri (CSA A.23.3-14)
M_r	Kolon ve kirişlerin taşıma gücü momentleri
N_{Ed}	Tasarımda kullanılan eksenel yük miktarı (EC-2-2014)
Ν	Eksenel eksenel kuvveti
N _d	Tasarımda kullanılacak eksenel yük değeridir (TS-500-2000)
N_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan eksenel çekme kuvveti değeri (CSA A.23.3-14)
N_r	Kolon ve kirişlerin yük kapasitesi
Nu	Yük etkisi altında eleman kesitinde ortaya çıkan eksenel kuvvet (ACI-318-14)
P_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan eksenel basınç kuvveti değeri (CSA A.23.3-14)
P _{nt,max}	Elemanın maksimum nominal çekme dayanımı (ACI-318-14)
P_{nt}	Elemanın çekme dayanımı (ACI-318-14)
Po	Sıfır eksantrisitede eksenel yük kapasitesi (ACI- 318-14)
P _{r,max}	İzin verilen maksimum eksenel yük değeri (CSA

A.23.3-14)

P_{ro}	Eksantrisite olmadığında taşınabilecek maksimum eksenel yük
S	Etriye aralığı (ACI-318-14)
Sze	Çatlak genişliği parametresi (CSA A.23.3-14)
ν	Kesme kırılması gerçekleşen beton için dayanım azaltma katsayısı (EC-2-2014)
v_{cc}	Çatlamamış basınç bölgesinde taşınan kesme kuvveti
v_{cd}	Çekme donatısı tarafından taşınan kesme kuvveti
${\cal V}_{ci}$	Çatlak içi kesme gerilmeleri tarafından karşılanan kesme kuvveti
${\cal V}_W$	Kesme donatısı tarafından karşılanan kesme kuvveti
V	Kesme dayanımı
V _{Ed}	Uygulanan kesme kuvvetinin tasarım değeri (EC- 2-2014)
V _{Rd,c}	Elemanın kesme donatısı olmadan kesme dayanımı (EC-2-2014)
V _{Rd,max}	Maksimum tasarım kesme kuvveti değeri (EC-2-2014)
Vc	Betonun kesme dayanımına katkısı (ACI-318-14)
Vcr	Kesitin kesmede çatlama dayanımı (TS-500- 2000)
V_d	Tasarım kesme kuvveti (TS-500-2000)
V_f	Yük etkilerinde eleman kesitinde oluşan kesme kuvveti değeri
V_n	Nominal kesme dayanımı (ACI-318-14)
V _{r,max}	Mümkün olan maksimum kesme kuvveti (CSA A.23.3-14)
V_r	Kesme dayanımı (TS-500-2000)
V_s	Kesme donatısının kesme dayanımına katkısı (ACI-318-14)
V_u	Yük etkisi altında eleman kesitinde ortaya çıkan kesme kuvveti (ACI-318-14)
V_w	Kesme dayanımına kesme donatısı katkısı (TS- 500-2000)
у	Beton en dış basınç lifinin tarafsız eksene olan uzaklığı

Ζ	Moment etkisindeki eleman kesitinde etkili derinlik (EC-2-2014)
x	Basınç bölgesinde tarafsız eksene kadar olan uzaklık (EC-2-2014)
x_1	Birinci sıradaki donatının ağırlık merkezine olan uzaklığı
x _c	Kuvvet uygulanan taraftaki kolon yüzünden basınç bloğu bileşkesinin uzaklık
\boldsymbol{x}_i	Donatı ağırlık merkezinden kesit ağırlık merkezine olan mesafe
x_p	Ağırlık merkezi uzaklığı
β_1	Beton basınç bloğu derinliğini belirleme katsayısı
	(ACI-318-14)
γc	Beton için kısmi malzeme katsayısı (EC-2-2014)
ε _{ci}	Beton en dış basınç lifindeki birim kısalma
Ecu	Beton ezilme birim kısalması (TS-500-2000)
\mathcal{E}_{cu2}	Basınç lifindeki maksimum birim kısalma (EC-2-2014)
ε_{s_1}	Birinci sıradaki donatıda uzama
E _{su}	Donatı kopma uzaması (TS-500-2000)
Esu	Çeliğin maksimum izin verilen birim uzaması (ACI-318-14)
\mathcal{E}_{X}	Eleman kesitinin ortasındaki boyuna şekil değiştirme (CSA A.23.3-14)
$ ho_1$	Boyuna donatı oranı (EC-2-2014)
$ ho_t$	Kolonlarda boyuna donatı oranı
$ ho_t$	Kolonlarda toplam boyuna donatı oranı (TS-500-2000)
$ ho_w$	Hacimsel sargı donatısı oranı
σ_2	2 doğrultusundaki yanal basınç gerilmesi
σ_3	3 doğrultusundaki yanal basınç gerilmesi
σ_{cp}	Eksenel yük durumunda betondaki basınç gerilmesi (EC-2-2014)
σ_s	Donatı gerilmesi (TS-500-2000)
σ_{si}	Donatıdaki gerilme
ϕ_c	Beton için dayanım azaltma katsayısı (CSA A.23.3-14)

ϕ_s	Çelik için dayanım azaltma katsayısı (CSA A.23.3-14)
Ψ	Mekanik donatı oranı
β	Çatlamış betonun kesme dayanımı hesabında kullanılan bir katsayı (CSA A.23.3-14)
γ	Çatlama dayanımına eksenel kuvvet etkisini yansıtan katsayı (TS-500-2000)
γ	Betonun yoğunluğuna bağlı bir katsayı (CSA A.23.3-14)
η	Beton basınç bloğu gerilmesini belirlemede kullanılan katsayı (EC-2-2014)
θ	Elemanın kesme kuvvetine dik ekseniyle kafes basınç çubuğu arasındaki açı (EC-2-2014)
θ	Diyagonal basınç çubuğunun kesme kuvvetine dik eksen ile yapmış olduğu açıdır (CSA A.23.3 14)
κ	Eğrilik değeri
λ	Beton basınç bloğu derinliğini belirlemede kullanılan katsayı (EC-2-2014)
φ	Boyuna donatı çapı (TS-500-2000)

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
CEB-FIB	The Comité européen du beton (European Committee for concrete) (Avruba Beton Komitesi)- The Fédération internationale de la précontrainte (International Federation for Prestressing) (Uluslararası Öngerme Federasyonu)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CSA	Canadian Standards Association (Kanada Standartları Birliği)
FRP	Fiber Reinforced Polymer (Fiber Takviyeli Polimer)
GFRP	Glass Fiber Reinforced Polymer (Cam Fiber Takviyeli Polimer)
LP	Lifli Polimer
SFRC	Steel Fiber Reinforced Concrete (Çelik Lifli Beton)
TS	Türk Standardı

1. GİRİŞ

Betonarme sistemler, diğer binalara göre sağladıkları bir takım avantajlar nedeniyle yüksek binalarda ve altyapılarda oldukça sık kullanılmaktadır. Ülkemizde ve dünyada her yıl nüfusa bağlı olarak yapılaşma oranında da artış görülmektedir. Bu artışla beraber çeşitli riskler de giderek artmaktadır. Bu risklerden bir tanesi ise yangına bağlı yüksek sıcaklık ve bu yüksek sıcaklıkların yapılara verdiği yapısal hasarlardır. Yapısal elemanlar için uygun yangın güvenliği önlemlerinin sağlanması, tasarımın önemli bir unsurudur. Çünkü yangın, ömürleri boyunca yapıların maruz kalabileceği en ağır çevresel koşullardan biridir.

Betonarme elemanların yangın dayanımı genellikle standart yangın dayanımı deneylerine veya deneysel (ampirik) hesaplama yöntemlerine dayanan kuramsal yaklaşımlar kullanılarak belirlenir. Örnek vermek gerekirse, yapılarda yüksek sıcaklık etkisi (yangın, patlama vb. afetler) hem Türk Deprem Yönetmeliği hem de Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik'te yeterince işlenmemiştir (Bingöl, 2008).

Literatür incelendiğinde ise yapılan çalışmalar ağırlıklı olarak betonarmede kullanılan malzemelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki durumlarının incelenmesi ve deneysel– kuramsal olarak ele alınmasından ibarettir. Bu nedenle yüksek sıcaklıkların betonarme binaların yapı taşı olan betonarme elemanlara etkilerinin bilinmesi elzemdir.

Herhangi bir nedenle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme elemanlarda betonun ve çeliğin mekanik ve fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir. Bu değişikliklerin sonucu olarak betonda çatlama ve parçalanma gözlenirken aderansta da önemli kayıpların meydana geldiği tespit edilmiştir (Sağsöz, 2013; Bingöl, 2008).

Yüksek sıcaklık, mevcut tasarımlara bakıldığında ve betonarme yapı elemanları düşünüldüğünde önce beton sonrasında ise donatıya etki etmektedir. Betonu oluşturan her bir bileşen doğru tasarlandığında yüksek sıcaklığa karşı davranışı değiştirilebilir. Şöyle ki; silis esaslı agregalar ve çimentolar kullanıldığında, 573°C'de silisin %15 oranında hacimsel genleşmesi sonucu betonda parça atmalar görülmektedir. Doğru yerleştirilmemiş taze bir beton yeterli hidratasyona da erişmediyse serbest su muhteva etmekte ve bu su 100°C'de buharlaşarak parça atmaya sebep olmaktadır (Alonso, 2003). Ayrıca bu durum, hidrate olmuş elemanlarda ise bağlı suyun 300°C'de ayrışıp buharlaşmasını hızlandırarak betonda dayanımı hızla düşürmekte, dolayısıyla donatıda da sıcaklık artışı görülmektedir (Khory, 2003). 530°C'de ise önemli bir çimento bileşeni olan kalsiyum hidroksit %33 oranında büzülerek (yapısındaki suyu kaybederek) sönmemiş kirece dönüşmektedir (Akman, 2000). Yangın esnasında sıkılan su ile sönmemiş kireç tekrardan kalsiyum hidroksite dönüşerek %44 hacim genleşmesi ortaya çıkmakta ve bu hacimdeki ani değişimler çatlamalara sebebiyet vermektedir. İnşaat çeliği bu aşamalarda 600°C'den sonra artık akma dayanımını kaybetmeye başlamakta ve yapısal davranışa katkısı azalmaktadır (Akman, 2000). Yapı servis ömrünün tamamlanmasına yol açacak bu durumlar için yapı malzemelerinde yapılacak tasarım değişikliği yapıda mekanik olarak da değişikliği sağlamaktadır (Bingöl, 2008).

Bu çalışmada yüksek sıcaklıkların betonarme kirişlere etkileri incelenmek amacıyla laboratuvar ortamında betonarme kirişler üretilmiştir. Üretilen kirişler seramik firini yardımıyla 100, 150, 200, 250, 300, 400, 500, 600 ve 800°C'lere kadar yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Aynı zamanda her deney grubu için malzeme (beton ve çelik) ve donatı çekip-çıkarma deneyleri de yapılmıştır. Elde edilen deney verileri yardımıyla yük-sehim grafikleri, moment-eğrilik grafikleri, her sıcaklık grubu için malzeme deney sonuçları ve çekip-çıkarma deney sonuçları verilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yüksek sıcaklıkların betonarme elemanlara etkisi üzerine yapılan çalışmalar; çelik ve beton üzerindeki etkileri, betonarme elemanlar üzerindeki etkileri ve beton-donatı aderansı üzerine etkileri olmak üzere üç grupta incelenmiştir.

2.1. Yüksek Sıcaklıkların Çelik ve Beton Üzerine Etkileri

Gustaferro vd. (1971) tarafından hafif ve izolasyonlu betonun yangın dayanımına ilişkin ön araştırma olarak görülebilecek deneysel bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, birim ağırlığı 500-1600 kg/m³ olan betonun yangına direnci ve numunelerin nem içeriği ile bağıl nem arasındaki ilişki incelenmiştir. Deneysel programda hafif beton, perlit beton ve vermikülit beton tipleri kullanılmıştır. Çalışmanın en önemli sonucu olarak birim ağırlıktaki artışın her beton tipi için yangın direncinin azalmasına neden olduğu gösterilmiştir.

Zoldners ve Wilson (1973) tarafından yapılan çalışmada genleştirilmiş şist ve cüruf agregaları kullanılarak yüksek sıcaklık etkilerine beton karışımları maruz bırakılmıştır. Numuneler, oda sıcaklığındaki fırında 1000°C'ye kadar sıcaklıklara maruz bırakılmış ve havada soğumaya bırakılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, tam hafif betonun farklı sıcaklık etkileri altında yarı hafif betonlara göre daha iyi mukavemet gösterdiği ve yüksek fırın cürufu kullanımının yangın etkilerine karşı bir avantaj sağladığı belirtilmiştir.

Rostasy vd. (1980) tarafından cıva porozimetresi yöntemi ile betonun gözenekli yapısı üzerinde 900°C'ye kadar yükseltilmiş sıcaklıkların etkisi araştırılmış ve yüksek sıcaklıkların toplam gözenek hacminde bir artışa neden olduğu bulunmuştur.

Morley ve Royles (1982) tarafından yapılan çalışma sonucunda 250°C'ye kadar betonun iç yapısında oluşan termal gerilmeler nedeniyle beton basınç dayanımında bir miktar artış olduğu ancak sıcaklıklar arttığında bu durumun tersine döndüğü tespit edilmiştir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun mekanik özelliklerini belirleyebilmek amacıyla Ataman (1991) soğutma biçimleriyle beraber yüksek sıcaklığın basınç ve eğilme mukavemetleri yönünden betona etkilerini araştırmıştır. Soğutma şekillerinin betonun dayanımında etkili oldukları ve suda soğutulan numunelerin havada soğutulanlara göre daha düşük mukavemet kaybına sahip oldukları belirtilmiştir. Bu durumun suda soğutulan numunelerin yeniden hidratasyon yapabilecekleri ortama sahip olmaları ve bu vesileyle bir kısım mukavemetini geri kazanmalarıyla olabileceği belirtilmiştir.

Larrard vd. (1993) tarafından yüksek sıcaklık etkileri olmaksızın bağ kuvveti davranışını incelemek amacıyla çalışmalar yapılmıştır. Yaptıkları çalışmalarda çubuk çapı ve yüzey şartlarının yüksek performanslı beton ile donatı arasındaki bağ kuvvetine olan etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak; yüksek performanslı beton kullanımının bağ kuvvetini önemli ölçüde arttırdığını ve bağ kuvvetindeki bu artışın betonun gerilme mukavemetinin artmasından kaynaklanabileceğini ortaya koymuşlardır.

Betonun mikro yapılarını incelemek amacıyla yangın geçirmiş binalardan numune alan ve laboratuvarda numune üreten Lin vd. (1996) bu numuneler üzerinde SEM cihazını kullanmış ve stereo mikroskop ölçümleri yapmıştır. Betonun yangın davranışları; ısıtmadaki parçalanmalar ve soğutmadaki dağılmalar olarak tanımlanmıştır. Çalışmada üretilen standart silindir numuneler 20, 100, 250, 400, 550, 750 ve 900°C' ye kadar sıcaklıklara ısıtılmış ve deneyler yapılmıştır. Yapılan deneylerde 300°C 'ye kadar çatlak oluşumu gözlemlenmediği 300°C ile 500°C arasında agregada çatlak oluşumu olduğu ve 500°C'nin üzerinde ise hem agregada hem de çimento hamurunda ciddi çatlaklar oluştuğu belirtilmiştir.

Akman (2000)'ın ifade ettiği gibi; betonarme elemanlarda bulunan çelik donatı korozyon gibi çevresel etmenlerin tesirinden korunması için beton örtü ile kaplanmaktadır. Çeliğin yüksek sıcaklık altında davranışı incelendiğinde ise 200°C'de dislokasyonların yoğun olduğu tanelerde azot atomlarının difüzyon sonucu çeliğin çekme dayanımında artış görülse bile 300°C'de çekme ve akma sınırlarının düştüğü görülmüştür. 600°C'ye çıkıldığında ise çekme dayanımının öngörülen güvenlik bölgesinin altına indiği ayrıca yangın esnasında 600°C - 1200°C'de tesir eden ısının ise çeliğe plastik deformasyon yapacağı bilinmektedir. Gerilme ve yüksek sıcaklığa maruz kalan yapı elemanlarında çeliğin elastisite modülünde düşüşler gözlenmektedir. Elastisite modülü, 400°C ısıya maruz kalan çelikte %15 iken 600°C ısıya maruz kalan çeliğin

termik genleşme ve plastik deformasyonların başlaması ile birlikte çeliğin uzamasına neden olacaktır. Çeliğin sıcaklık altında korunması göz önüne alındığında ise betonun çelik donatıyı sıcaklıktan koruduğu görülmektedir. Bu nedenle betonun örtü kalınlığı ile termik izolasyonu önem arz etmektedir.

Alonso vd. (2003) yaptığı çalışmada; soğuk işlem görmüş çeliklerde maksimum sıcaklık 450°C'den az ise akma dayanımının çelik soğuduktan sonra tekrar kazanılacağını göstermiştir. Sıcak işlem görmüş çeliklerde ise maksimum sıcaklık 600°C'nin altında ise soğuma sonrası akma dayanımının tekrar kazanılacağından bahsetmiştir.

Ünlüoğlu vd. (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmada nervürlü inşaat çelikleri farklı dozajlarda hazırlanan katkılı beton harçların içerisine pas payı 25 mm olacak şekilde yerleştirilmiştir. Katkı olarak uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Üç farklı çapta (φ10, φ16 ve φ20) S420 nervürlü inşaat çeliği kullanılmıştır. Üretilen numuneler 20-950°C'lik sıcaklıklara kademeli olarak maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarına göre pas paylı numuneler ile pas payı olmayan numuneler arasında yaklaşık 250°C'lik bir sıcaklık farkı olduğu ortaya çıkmıştır. Sıcaklığın 500°C'ye kadar çıkartıldığı numuneler ile yüksek sıcaklığa maruz kalmamış kontrol numunelerinin akma ve çekme dayanımlarının yaklaşık olarak aynı olduğu ve 500°C'nin üzerine çıkıldığında bu dayanımlarını düştüğü gözlemlenmiştir.

Bingöl (2008) tarafından C20 ve C35 beton numuneleri ve farklı soğutma şekilleri kullanılarak aderans kuvvetlerinin yüksek sıcaklılarda değişimini incelemek amacıyla bir çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmada çekip-çıkarma deneylerinin sonucunda 50°C–150°C aralığında kenetlenme kuvvetlerinde artış görülmüş ancak bundan sonraki sıcaklıklarda düşüş görülmüştür. Bu artışın sebebinin ise bu sıcaklıklarda betonun su kaybetmesi sonucu büzülmesi ve dolayısıyla kenetlenme kuvvetinin arttığı olduğu belirtilmiştir. Sıcaklığa maruz bırakılan beton numunelerinin bünyelerinde bulunan suyun azalmasıyla birim ağırlıklarının da azaldığı ve bu azalmanın 700°C'de yaklaşık %7-8 olduğu belirtilmiştir. Hem C20 hem de C35 numunelerinin her ikisi için de suda soğutulanların havada soğutulanlardan daha fazla basınç kaybına uğradıkları tespit edilmiştir.

Chen vd. (2009), çalışmalarında yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betonun basınç ve yarmada çekme dayanımına etkisini incelemişlerdir. Bu amaçla üretilen betonlarda

Portland çimentosu ve doğal dere kumu ile en büyük dane boyutu 19 mm olan kırma granit agregası kullanılmıştır. Betonlar 100 mm ayrıtlı küp kalıplara doldurulmuştur. Sertleşmiş betonlar 20°C sıcaklıkta %95 neme sahip kür odalarında 1, 3, 7, 14, 28 gün boyunca küre maruz bırakılmıştır. Numuneler kür işlemlerinden sonra ayrı ayrı 200, 400, 600, 800, 1000°C sıcaklıklarda 3 saat bekletilmiştir. Daha sonra fırından çıkarılan numuneler normal laboratuvar şartlarında ve su spreyi ile hızlı soğutma işlemi uygulanarak iki farklı yolla 20°C sıcaklığa gelinceye kadar soğutulmuştur. Soğutma işlemi bittikten sonra numunelere tekrar nem oranı %90±5 olacak şekilde başka bir 28 günlük kür islemi uygulanmıştır. Bu islemlerden sonra numuneler başınç ve yarmada çekme deneyine tabi tutulmuşlardır. Çalışmada yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış betonun basınç dayanımı 35 MPa olarak belirlenirken bu betona kıyasla laboratuvar koşullarında havada soğutulan beton numunelerin basınç dayanımında 200°C'de %4 oranında artış, 400°C'de %16, 600°C'de %24, 800°C'de %53, 1000°C'de ise %61 oranlarında basınç dayanım kaybı tespit edilmiştir. Yine yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış betonlara kıyasla suda soğutulan beton numunelerde; 200°C'de %2, 400°C'de %24, 600°C'de %35, 800°C'de %57, 1000°C'de ise %74 oranlarında basınç dayanımında düşüş görülmüştür. Yarmada çekme dayanımlarında yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış betonun yarmada çekme değeri 5.4 MPa olarak belirlenirken bu betona kıyasla laboratuvar koşullarında havada soğutulan numunelerde; 200°C'de %4, 400°C'de %7, 600°C'de %26, 800°C'de %52, 1000°C'de %77 oranlarında düşüş görülmüştür. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış betonlara kıyasla suda soğutulan numunelerin yarmada çekme dayanımında ise 200 °C' de değişiklik yaşanmazken, 400°C'de %9, 600°C'de %26, 800°C'de %56, 1000°C'de %81 oranlarında kayıp meydana gelmiştir.

Abdallah vd. (2017) tarafından farklı özelliklere sahip dört tip beton harcının içerisine kancalı ve düz çelik çubuklar koyulup yeterli sayıda numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 100°C-800°C aralığındaki sıcaklıklara kademeli olarak maruz bırakılmıştır. Daha sonra numuneler çekip çıkarma deneylerine tabii tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre 400°C'den sonra hem betonun hem de çeliğin mekanik özelliklerinde azalmalar olmuştur. Artan sıcaklıklara paralel olarak bağ kuvvetlerinde de kademeli olarak azalmaların meydana geldiği gözlemlenmiştir. 600°C'den sonra ise bağ kuvvetlerinin neredeyse tamamen kaybolduğu belirtilmiştir.

Abdallah vd. (2017) tarafından dört farklı çimento türleri ile çeşitli agregalardan beton üretilmiş ve üretilen betonlar üzerinde çekip-çıkarma deneyleri yapmak amacıyla 4DH ve 5DH olarak adlandırılan çengelli çelik lifler gömülmüştür. Üretilen numuneler 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 ve 800°C derecelere kadar ısıtılmıştır. 4DH ve 5DH fiberlerin çekme davranışı benzer bir şekilde yüksek sıcaklıklardan etkilenmiş gibi görünmekte olduğu belirtilmiştir. Ayrıca her iki çeliğin çekme mukavemeti, 20-400°C sıcaklık aralığında önemli ölçüde değişmediği, ancak 500 ile 800°C sıcaklık aralığında, maksimum çekme yükü tüm betonlar için önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Zhang vd. (2018) yaptıkları bir çalışmada jeo-polimer beton ve inşaat demiri arasındaki bağ davranışları üzerine deneysel sonuçlar sunmaktadır. Bu çalışmada düz ve nervürlü inşaat demirleriyle gömülmüş jeo-polimer beton numuneleri üzerine çekme testleri, ortam sıcaklığında ve 100, 300, 500 ve 700°C'ye maruz bırakıldıktan sonra gerçekleştirilmiştir. 300°C'ye kadar bağlanma mukavemetinde önemli bir değişiklik görülmediği ancak 300°C'nin üzerinde önemli ölçüde azalma olduğu belirtilmiştir.

2.2. Yüksek Sıcaklıkların Betonarme Elemanlara Etkileri

Doptreppe vd.(1985) tarafından yapılan bir çalışmada şöyle bahsedilmiştir; genel olarak normal dayanımlı betonarme kirişler düşük geçirgenlik ve yüksek ısıl atalet nedeniyle yangın durumlarında iyi bir performans sergilerler. Yapısal elemanların yangın sırasında çökmesi ve düşük dayanım göstermesi nadir görülür. Ancak genellikle betonarme elemanların yangına karşı dayanımı standart yangın testleri ve ampirik hesaplamalar sonucu incelenmiştir. Bu nedenle betonarme elemanların yangın davranışı ampirik hesaplama yöntemlerine dayanan kuralcı yaklaşımlardır. Ancak bu standart yangın testleri betonarme kirişlerin yangından sonraki gerçek performansını göstermemektedir.

BYKHY (2002) yönetmeliğine göre yangına karşı 2 saat dayanabilmesi için betonarme elemanların, içindeki en dışta kalan donatı kısımlarının en az 4 cm kalınlığında beton (pas payı) ile kaplanmış olması gerekmektedir.

Zha (2003) tarafından yapılan bir çalışmada yangına bağlı yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının çeşitli yükleme durumları için doğrusal olmayan üç boyutlu sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Hertz tarafından geliştirilen basitleştirilmiş hesap yöntemi kullanılarak beton kesiti içindeki sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Hem tek taraftan hem de üç taraftan yangına bağlı yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan modeller için gerçekleştirilen incelemelerden bulunan sonuçlar karşılaştırıldığında, üç taraflı yangına bağlı yüksek sıcaklık etkisinin daha ağır hasarlara neden olabileceği görülmüştür.

Burnaz (2003) tarafından yapılan çalışmada belirlenen bir modelde gerçek sıcaklıkzaman eğrisinin elde edilebilirliği ve betonarme eleman kesitlerindeki sıcaklık dağılımlarının çeşitli yöntemlerle belirlenebildiği gösterilmiştir. Buna ek olarak betonarme elemanların yangına bağlı yüksek sıcaklık etkisi altındaki koşullarda taşıma güçleri incelenmiştir. Çalışmada özellikle uzun süreli yangına bağlı yüksek sıcaklık etkisine maruz kalma durumları için betonarme elemanların taşıma gücü sınır durumuna göre emniyetli olmadıkları ve bu tür yapıların tasarımında yangına bağlı yüksek sıcaklık koşullarının da dikkate alınması gerektiği vurgulanmıştır.

Uysal (2004) tarafından yapılan bir çalışmada ısı iletimi durumları çeşitli betonarme yapı elemanları için incelenmiştir. İlk olarak betonarme yapı elemanlarının matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Daha sonra uygun sınır koşulları için özel çözümler elde edilmiştir. Hesaplar için betonarme perde, kolon, döşeme ve kiriş elemanlar kullanılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinin perde elemanların iki yüzeyinden, kolon elemanların da dört yüzeyinden uygulandığı düşünülmüştür. Kiriş elemanlarda ise yüksek sıcaklık etkisinin üç yüzeyden de tesir ettiği düşünülmüştür. Yapılan incelemeler sonucunda betonarme yapı elemanlarındaki boyut artışının ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesinin yangın dayanımı üzerindeki olumlu etkileri açıklanmıştır. Betonarme perde, kiriş, kolon ve döşemelerde, eleman boyutu büyüdükçe eleman enkesiti içindeki herhangi bir uzaklıkta sıcaklığın daha düşük olduğu görülmüştür. Sonuç olarak betonarme eleman boyutu büyüdükçe yangından görülen hasarın azalacağı ortaya konulmuştur.

Yangın ve depremlerin betonarme yapılar üzerine olan etkisini incelemek amacıyla, Şentürk (2006) tarafından yapılan çalışmada; SAP2000 sonlu eleman programı kullanılarak seçilen bir otel binası için sayısal analizler gerçekleştirmiştir. Yangın ve depremin yapıya aynı anda etkime ihtimali oldukça düşük olduğu için, analizlerde bu iki durum ayrı ayrı dikkate alınmıştır. Analizlerin sonucunda elde edilen yer değiştirme değerleri incelendiğinde, sıcaklık artışı ile birlikte yer değiştirmelerin de artış gösterdiği belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonarme kirişlerde eğilme etkisini inceleyen Kodur vd. (2008) betonarme kirişlerin yüksek sıcaklık etkisi öncesi aşamadan çökmeye kadar olan davranışlarını takip edebilen makroskopik bir sonlu elemanlar modeli kullanmışlardır. Model; yangın senaryosu, yük seviyesi, beton örtü kalınlığı, agrega tipi, hasar kriterleri ve açıklık uzunluğu olmak üzere altı parametrenin betonarme kirişlere etkisini incelemek için kullanılmıştır. Bu altı parametrenin betonarme kirişlerin yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı üzerinde önemli etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Jau ve Huang (2008) yaptıkları bir çalışmada betonarme yapıların genellikle yangına bağlı yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklı olduklarını ve çoğu zaman yangından korunmak için ek önlemlere ihtiyaç duyulmadığını belirtmişlerdir. Bununla birlikte betonarme yapıların uzun süre yangına maruz kaldığında betonarme elemanlardaki sıcaklığının artması nedeniyle mukavemet kaybedeceklerini ve bu mukavemet kaybının derecesinin yangın esnasında beton ve donatı çeliğinin ulaştığı maksimum sıcaklığa bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Dwaikat vd. (2009) betonarme kirişler üzerine yaptıkları bir çalışmada; maksimum sıcaklığı beton ve donatı içerisinde tüm ısıtma ve soğutma döngüsü boyunca izlediklerini çünkü çelik ve beton için azami sıcaklığın kritik sıcaklığı aşması durumunda önemli olduğunu söylemişlerdir. Bu kritik sıcaklıkların çelik için 500°C ve beton için ise 200°C olduğunu belirtmişlerdir.

Yapmış olduğu bir çalışmada Huang (2010), betonarme yapısal elemanların, yangın durumunda olduğu gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldıklarında çelik donatı ve betonun mekanik özelliklerinde sıcaklık kaynaklı bozulma sonucu yapısal kapasitede kayıp yaşadıklarını belirtmektedir.

2.3. Yüksek Sıcaklıkların Beton-Donatı Aderansı Üzerine Etkileri

Morley ve Royles (1980) yaptıkları çalışmada yüksek sıcaklık uygulanması aşamasında ve sonrasında gerek betonun ve gerekse çeliğin dayanımını incelemiş, uygulanan sıcaklıktaki aderansın belirlenmesine yönelik yöntemler belirtmiş, aderans ile sıcaklık arasındaki ilişkileri değerlendirerek çeşitli öneriler sunmuşlardır.

Diederichs ve Schneider (1981) tarafından yapılan bir çalışmada çelik ile beton arasındaki aderans ilişkisi yüksek sıcaklık ortamlarında incelenmiş, kısa çelik çubuklar silindir örneklere yerleştirilerek çekip çıkartma denemeleri yapılmış, netice itibariyle düz ve nervürlü çubukların betona bağlanmalarında oldukça önemli farklılıkların bulunduğu sonucuna varılmıştır.

Yamazaki vd. (1995) tarafından yapılan çalışmada yüksek sıcaklık uygulanacak beton ve bileşimlerinin malzeme özellikleri irdelenmiş, yüksek sıcaklık altındaki kalan duvarları ısı aktarım özellikleri ile aynı şartlara tabi tutulan kirişlerin davranışı incelenmiştir. Belli bir model oluşturmak amacıyla donatılı beton elamanların 800 °C sıcaklık karşısındaki tepkileri sınanmış ve sınamadan edinilen bulgular aktarılmıştır. Bu bulgular ilgili materyalin ısıtılma ve soğuma süreçlerine ilişkin verilerden oluşmaktadır. Betondaki 1s1l genleşme katsayısı 200°C olmasına rağmen agregadaki kuvartz miktarına bağlı olarak 600°C'ye varan bir sıcaklık artışını gözlemişler ve bu durumun alfa kuvartzların 573°C'de beta kuvartza dönüsmesine bağlı olarak bunun %15 civarında hacim artışıyla ilgili olduğunu betimlemişlerdir. Sıcaklık artışıyla birlikte betonun ısıl iletkenlik katsayısında azalma olduğunu, 200°C betonun dayanıklılığında bir artış olduğunu, sıcaklık arttıkça mukavemetin düştüğünü gözlemlemişlerdir. Ayrıca 700°C'de kalsiyum silikat hidratenin bozulmasına bağlı olarak kayıplar başlamış ve dayanıklılık başlangıç değerinin %20'si olarak tespit edilmiştir. Çelik çubukların ısıl genleşme katsayıları sıcaklığın artmasıyla 400°C'ye kadar artış göstermiş, 400-700°C bandında sabit kalmış, daha sonra azalmış ve 800°C civarında yaklaşık olarak sıfıra düşmüştür. Akma direnci ise 300°C'ye kadar küçük değişimler göstermiş ise de sıcaklığın artmasıyla birlikte akma direnci doğrusal şekilde azalmıştır. Yapılan çalışmada boyu ve genişliği 1,5 metre, derinliği 2 metre olan iki adet beton duvar örneği kullanılmıştır. Ayrıca T-kesitli 6,4 mm kalınlığında çelik plaka numunenin ısıtılan yüzeyine ankrajlanmış, duvarın 4 tarafı ısı yalıtım malzemeleriyle kaplanmış ve numunelerin birisinde başlangıçta çatlak bulunmazken, diğerinde 0,3 mm genişliğinde bir çatlak bulunmuş, deney örneklerinde normal agrega ve portland çimentosu kullanılmıştır. Yapılan deney sonunda 130°C'de serbest su buharlaşmış, çatlaklı ve çatlaksız numuneler arasında çok küçük sıcaklık değişiklikleri belirlenmiş, geliştirilen model ile deney sonuçları uyumluluk göstermiştir.

Farklı bir yaklaşımla El-Hawary ve Hamoush (1996) yaptıkları çalışmada aderansa sıcaklığın, ısıtma süresi ve soğutma şeklinin etkisini belirleyerek, bağ modülünün donatı çapından bağımsız olduğunu ispatlamak ve ayrıca aderansı belirlemede bağ modülünün uygun bir parametre olarak kullanılabilirliğini sınamak istemislerdir. Deneylerde cimento/kum/cakıl oranı 1/2/3 ve su/cimento oranı 0,6 olan beton karışımları kullanılarak 20 cm boyunda, 10 cm çapında numuneler üretilmiştir. 10 cm uzunluğundaki, 6 mm, 8 mm ve 10 mm çaplı çelik çubuklar numunenin içerisinde ve dışarısında 5 cm kalacak şekilde betona gömülmüştür. Çeliğin akmasından ziyade beton ile celik arasındaki bağın zayıflaması neticesinde hasar olusumunu temin etmek maksadıyla gömme boyu yetersiz olarak belirlenmiştir. Numuneler kür edildikten sonra100 °C, 300 °C ve 500 °C sıcaklıklarda 2 saat 4 saat ve 8 saat sürelerde bekletilmiş ve nihayetinde numuneler kendiliğinden havada yavaş yavaş soğumaya bırakılmış veya ani olarak suda soğuma işlemine tabi tutulmuştur. Soğutulan numunelerde çekipçıkarma deneyleri (pull-out) yapılarak donatı betondan çekilmiş, aynı yöntem kontrol grubu olarak ısıtılmamış numunelerde de uygulanmıştır. Geliştirilen analitik model Hamoush tarafından lif donatılı beton için kullanılan modele dayanmaktadır. Betonun elastisite modülü, oda sıcaklığında donatı cağından bağımsız olup, malzemenin özelliğine dayanmaktadır. Yapılan çalışmada, kısa bir süre 100 °C'de ısıtılan numunelerin, betondaki suyun buharlaşması neticesinde rötre yapması ve daha iyi bir kenetlenme sağlanması bağlı olarak aderans kuvvetlerinde belli bir artış olduğu gözlenmiştir. Sıcaklığın ve ısıtma süresinin artmasıyla aderansın azaldığı ve bu azalmanın suda soğutulan numunelerde daha fazla olduğu görülmüştür. Isıtma süresi arttıkça aderans kuvvetlerinde azalmalar olmuş, bu azalmaların 100 °C için doğrusal olduğu, diğer sıcaklıklarda ise daha küçük değişimlerin bulunduğu tespit edilmiştir.

Durmuş vd. (2006), tarafından yapılan çalışmada yüksek dayanımlı beton–donatı aderansı normal dayanımlı beton ile karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Çalışmada yüksek dayanımlı beton ile geleneksel betonların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiş, bu betonlarla üretilen betonarme kirişler üzerinde eğilmede aderans deneyleri yapılmıştır. Çalışmada basınç deneyleri için 75*150 mm ölçülerinde silindir karot numuneleri, eğilmede çekme dayanımları için 40*40*160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Aderans deneyleri için 8, 10, 12 ve 14 mm düz ve nervürlü donatılar, kenetlenme boyları 200 olacak şekilde betona gömülmüşlerdir.

Çalışmada yüksek dayanımlı betonların basınç dayanımı 59 MPa, normal dayanımlı betonun basınç dayanımı 29 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre düz yüzeyli donatıların aderans gerilmelerinde geleneksel betona kıyasla, yüksek dayanımlı betonlarda %280'e varan oranlarda artış belirlenmiştir. Nervürlü donatıların aderans gerilmelerinde geleneksel betonlara kıyasla, yüksek dayanımlı betonlarda %114'e varan oranlarda artış tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin yüksek olmasının beton-donatı aderans gerilmesine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir.

Şener (2006), tarafından yapılan çalışmada, donatılar beton içerisine kalıba simetrik olarak yerleştirilmiş aderans deneylerinde eksenel yükleme etkisi altında göçme biçimleri ile çatlak dağılımları incelenmiştir. Bu amaçla yüksek ve normal dayanımlı betonlar ile düz ve nervürlü donatılı toplam 36 adet numune hazırlanmıştır. Bu kombinasyonlar; yüksek dayanımlı beton-düz donatı, normal dayanımlı beton-düz donatı, yüksek dayanımlı beton-nervürlü donatı ve normal dayanımlı beton-nervürlü donatıdan oluşmaktadır. Deneylerde akma dayanımı 220 MPa ve çapları 8, 16, 32 mm olan düz donatılar ile akma dayanımı 420 MPa ve anma çapları 8, 16, 32 mm olan nervürlü donatılar kullanılmıştır. Deney sonuçlarına göre, nervürlü büyük çaplı numunelerde göçme biçimi daha gevrek olmaktadır. Çatlak genişliklerinin nervürlü donatıda ve yüksek dayanımlı betonda, düz donatılı numunelere kıyasla daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Yüksek ve normal dayanımlı, nervür donatılı beton numunelerin hiçbirinde sıyrılma gözlenmemiş, tüm sıyrılmalar düz donatılı numunelerde görülmüştür. Yüksek dayanımlı betonlara gömülü 32 mm çaplı, 160 mm betona gömülü nervürlü donatılı örneklerin çekip çıkarma kuvvetleri 147 kN'a ulaşırken bu değer 32 mm çaplı, 160 mm betona gömülü nervürsüz düz donatılı örneklerde 155 kN mertebesine varmıştır. Normal dayanımlı betonlarda 32 mm çaplı, 160 mm betona gömülü nervürlü donatılı örneklerin çekip çıkarma kuvvetleri 79 kN'a, 32 mm çaplı, 160 mm betona gömülü nervürsüz düz donatılı örneklerin çekip çıkarma kuvvetlerinde ise 58 kN'a varan değerlerde elde edilmiştir. Yapılan incelemeler neticesinde yüksek dayanımlı betonlara gömülü nervürlü ve nervürsüz donatıları çekip çıkarmak için gerekli olan kuvvetin normal dayanımlı betona gömülü donatıları çekip çıkarmak için gerekli olan kuvvetlerden 2,5 kat daha fazla olduğu anlaşılmıştır.

Bingöl (2008), çalışmasında yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakıldıktan sonra farklı şekillerde soğutulmuş numuneler üzerinde beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetlerinin ve basınç mukavemetlerinin değişimlerini araştırmıştır. Çalışmada basınç mukavemetlerinin tayini için donatısız, C20 ve C35 sınıflarında beton numuneler üretilmiştir. 150*300 mm boyutlarındaki silindirlerin orta noktasına 8 mm çapındaki nervürlü çelik donatı çubukları; 60 mm, 100 mm ve 160 mm boylarında betona gömülerek donatılı beton örnekler üretilmiştir. Üretilen numuneler 50°C-700°C aralığında 13 farklı sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra havada veya suda soğutulmuştur. Numuneler üzerinde çekip çıkarma ve basınç deneyleri yapılmıştır. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C20 sınıfı betonun basınç dayanımı 24 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C20 sınıfi betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla basınç dayanımında 300°C'de %24, 500°C'de %49 oranında kayıp belirlenmiştir. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C35 sınıfı betonun basınç dayanımı 39 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C35 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla basınç dayanımında 300°C'de %16, 500°C'de %31 oranında kayıp belirlenmiştir. Araştırma bulgularına göre çekip çıkarma deneylerinden elde edilen kenetlenme kuvvetlerinde sıcaklık uygulanmamış örneklere kıyasla 50-150°C aralığında artış görülmekle beraber bundan sonraki bütün sıcaklık değerleri için kenetlenme kuvvetleri azalmıştır. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C20 sınıfı betona 60 mm boyunda gömülü donatının aderans dayanımı 15 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C20 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %42, 500°C'de %56 oranında kayıp belirlenmiştir. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C35 sınıfı betonuna 60 mm boyunda gömülü donatının aderans dayanımı 19 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C35 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %24, 500°C'de %35 oranında kayıp belirlenmiştir. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C20 sınıfı betonuna 100 mm boyunda gömülü donatının aderans

dayanımı 20 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C20 sınıfi betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %16, 500°C'de %55 oranında kayıp belirlenmiştir. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C35 sınıfı betonuna 100 mm boyunda gömülü donatının aderans dayanımı 24 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C35 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %16, 500°C'de %40 oranında kayıp belirlenmistir. 28 günlük kür isleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamıs C20 sınıfı betonuna 160 mm boyunda gömülü donatının aderans dayanımı 23 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C20 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %14, 500°C'de %28 oranında kayıp belirlenmiştir. 28 günlük kür işleminden sonra sıcaklık etkisine maruz bırakılmamış C35 sınıfı betonuna 160 mm boyunda gömülü donatının aderans dayanımı 25 MPa olarak belirlenmiştir. 300°C ve 500°C sıcaklık etkisine maruz bırakılan C35 sınıfı betona havada soğutma işlemi uygulandıktan sonra sıcaklık uygulanmamış betona kıyasla aderans dayanımında 300°C'de %11, 500°C'de %33 oranında kayıp belirlenmiştir. Donatı gömülme boyundaki artışın yüksek sıcaklık etkisinde kenetlenme kuvvetine olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. En büyük kenetlenme kuvvetleri 16 cm gömülme boyunda saptanmıştır. Aynı gömme boyunda ise C35 betonu ile üretilen numunelerin kenetlenme kuvvetlerinin bütün yüksek sıcaklık değerleri için C20 ile üretilen betonlardaki kenetlenme kuvvetlerinden büyük olduğu belirlenmiştir. Araştırmacı soğutma tiplerinin de kenetlenmeye etkisini karşılaştırmış, yüksek sıcaklıklarda ısıtıldıktan sonra suda soğutulan betonlarda kenetlenme kuvvetlerinin, havada soğutulan numunelerden daha düşük sonuçlar vermiş olduğunu belirlemiştir. Gerek C20 gerekse de C35 sınıflı beton numunelerde en önemli basınç mukavemeti kaybı 700°C'ye ısıtıldıktan sonra suda soğutulmuş betonlarda tespit edilmiştir. Bu numunelerde mukavemet kaybı sıcaklık uygulanmamış betonlara göre yüksek sıcaklık uygulanmış betonlarda %68 olarak bulunmuştur.

Hamad vd. (2017) tarafından çelik donatı, CFRP, GFRP ve BFRP malzemeleri kullanılarak çekip-çıkarma numuneleri üretilmiştir. Üretilen numuneler 0-450°C

derecelerine kadar ısıtılıp çekip çıkarma deneyine tabi tutulmuş ve bağ kuvvetleri araştırılmıştır. Yüksek sıcaklıkların çelik çubukların çekme mukavemeti ve elastik modülü üzerindeki etkisi, FRP çubuklarına kıyasla küçük olmuştur. GFRP ve BFRP çubuklarının erimiş olduğu ve gerilme mukavemeti kapasitesini tamamen kaybettiği 450°C'ye kadar olan sıcaklıklara maruz kaldığında FRP çubuklarının mekanik özelliklerinde önemli azalmalar bulunmuştur. FRP çubuklarının gerilme mukavemeti ve elastik modülündeki azalma, yaklaşık olarak 325°C'lik kritik bir sıcaklığa kadar doğrusal olduğu ve bu sırada sırasıyla (%45-55) ve (%20-30) azalma oranı fark edilmiştir. Sonuç olarak beklendiği gibi çelik donatılı numuneler en yüksek betondonatı aderans kuvvetine ulaşırken bunu sırasıyla GFRP, CFRP ve BFRP'nin takip ettiği belirtilmiştir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi

ASCE-ACI 426'ya göre kesme kırılması durumu; kirişlerde, kolonlarda, perdelerde, döşemelerde ve diğer yapı elemanlarında dikkate alınır. Kesme kuvveti aktarımı genelde her yapı elemanı için benzer şekildedir ancak göçme ve çatlama durumları her yapı elemanında farklı özelliktedir. Betonarme kirişler için kırılma biçimini belirleyen en önemli parametre (a/d) kesme açıklığının kiriş etkili yüksekliğine oranıdır. Bu oran aynı zamanda M/V_d terimleri ile de ifade edilmektedir. $M/V_d=2-6$ olan, betonarme kirişlerde kayma ve eğilme gerilmelerine bağlı olarak eğik çatlaklar oluşur. Bu eğik çatlaklar yaklaşık olarak yatayla 30°-60° açı oluşturmaktadır. Kirişlerde kesme kırılmasının çok farklı tipleri oluşur ki; bunlardan en sık karşılaşılanı, eğik çatlağın üzerinde basınç kenarının kayması ya da ezilmesi ile oluşan ve çekme donatısı boyunca ayrılmaların meydana gelmesi ile beliren göçme biçimidir (Celep ve Kumbasar, 2005).

Eğilme momenti ve kesme kuvveti etkisindeki bir elemanda iki eksenli gerilme durumu ortaya çıkar. Yeterli kesme donatısı bulunmayan bir kiriş, artan yük altında eğilme mukavemetine ulaşmadan, mesnetlere yakın bölgelerde oluşan, yatayla yaklaşık 45 eğimli çatlaklarla güç tükenmesi durumuna gelebilir (Celep ve Kumbasar, 2005).

Eğik çatlak oluşumunun nedeni, eğik çekme gerilmeleridir. Şekil 3.1'de mesnede yakın düşey bir kesit üzerinde alınan üç noktada sonsuz küçük elemanlar üzerinde gerilme hâlleri işaret edilmiştir. A noktasındaki eksene dik düzlemde kayma gerilmesi ile basınç gerilmesi, B noktasındaki eksene dik düzlemde sadece kayma gerilmeleri ve C noktasındaki eksene dik düzlemde ise kayma gerilmesi ile çekme gerilmesi meydana gelir (Celep ve Kumbasar, 2005).

Yönetmeliklerde kirişlerin enine donatısız olarak tasarlanmasına izin verilmez. Ancak davranışı anlayabilmek veya açıklayabilmek için bu tür çalışmaların yapılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Dolayısıyla bahis konusu olan bu kirişlerde açıklıkları doğrultusunda sadece boyuna donatı vardır. Yapılan birçok deneysel araştırma bu kırılma biçiminin "a/d" ile gösterilen " kesme açıklığı/etkili yükseklik" oranına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir (Celep ve Kumbasar, 2005).


Şekil 3.1. Kiriş eksenine dik asal gerilmelerin değişimi (Arslan, 2005; Celeb ve Kumbasar, 2005)

Enine donatısız kirişlerde, kirişin davranışını anlayabilmek için Şekil 3.2'deki kesit etkileri incelenmektedir. Genellikle enine donatısız kirişlerin incelenmesinde Şekil 3.2'deki gibi simetrik iki tekil yükle, inceleme yapıldığı gibi açıklığın ortasında yapılan bir tekil yük ile yükleme yapılarak da inceleme yapılabilmektedir (Celep ve Kumbasar, 2005).



Şekil 3.2. Kesit tesirleri diyagramı (Arslan, 2005; Doğangün, 2008)

(a/d)>7 ise; düşey yükler etkisiyle eğilme göçmesi oluşur. Eğilme çatlaklarının büyümesi ve çekme donatısının akması ile çekme kırılmasına erişilir. Kırılma üzerinde, kesme kuvvetinin etkisi sınırlıdır ve eğik çatlaklar önemli büyüklüklere ulaşmazlar. 2,5<(a/d)<7 ise; 7' ye yakınsa kesme-çekme kırılması, 2.5'e yakınsa kırılma mesnet üzerinde aderansın kaybolmasıyla oluşur. Çatlamanın başlamasıyla kırılma anındaki kesme kuvveti arasında fark çok azdır. Eğer "a/d" oranı büyük ise (7'ye yakınsa) çatlak hızla ilerleyip gelişerek kırılmaya yol açar. Bu kırılma ani, gevrektir. Eğer "a/d" oranı küçükse yükün oluşturduğu yerel basınç gerilmeleri çatlağın ilerleyişini engeller. Bu nedenle, eğik çatlakların mesnet bölgesinde aderans çatlakları olarak gelişmesiyle kırılma gerçekleşir. Bu tür kırılma, gerçek eğik çekme kırılması olarak tanımlanır. Kesit eğilme dayanımına erişmeden göçer. Kirişte öncelikle eğilme çatlakları ortaya çıkar. Yük artmaya devam ettikçe de, eğik çekme gerilmeleri artar ve gövdede çatlakları oluşmaya başlar. Ortaya çıkan bu çatlakların bazıları eğikleşerek yüke doğru ilerler (Celep ve Kumbasar, 2005).

1.0 < (a/d) < 2.5 ise; etrafındaki basınç gerilmeleri, çatlağın ilerlemesini önler. Kırılma, yük altındaki betonun ezilmesi veya mesnette donatı sıyrılması ile oluşabilir. Oluşan eğik çatlaklar, "*a/d*" oranının küçülmesi ile daha dikleşecektir. Bu da, asal beton basınç

gerilmelerinin dikleşmesine ve kemerleme etkisinin ortaya çıkmasına yol açar. Yük, yükün mesnede yakın olmasından dolayı, eğilmenin yanı sıra kemerleme etkisi olarak tanımlanan eğik çatlaklar arasında oluşan beton basınç çubukları ile de aktarılır. Kırılma, üst bölgedeki yüksek gerilmelerin etkisiyle, yük altındaki betonun ezilmesi ile olur (Celep ve Kumbasar, 2005).

(a/d)<1.0 ise; çatlak, yükleme noktasından mesnete doğru aktarılan basınç kuvvetinin parçalayıcı etkisiyle oluşur. İlk çatlak altta donatıdan d/3 mesafesinde meydana gelir. Çatlak, önce yükleme noktasına doğru ve sonra da mesnete doğru uzar (Celep ve Kumbasar, 2005).

3.2. Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi

Betonarme yapılardaki yatay olarak oluşturulan kiriş elemanlar uygulanan düşey ve yatay yükler altında eğilmeye çalışırlar. Bu tür elemanların kesitlerinde eğilmeye ek olarak kesme kuvveti, yüklemeye ve sistemi oluşturan elemanların düzenleniş biçimine bağlı olarak burulma momenti ve eksenel kuvvet de oluşabilir. Genel olarak eksenel kuvvet ve burulma momenti gibi ilave iç kuvvet etkileri, eğilme momenti yanında küçük kaldığından tasarımda sadece basit eğilme durumu ele alınır. Eksenel kuvvetin ölçütü ise TS 500-2000'de $N_d = 0,1.A_c. f_{ck}$ olarak alınmaktadır. Kesme kuvveti etkileri ise farklı gerilme durumu oluşturduğundan dolayı eğilme durumundan bağımsız olarak tasarımda ele alınır. (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Betonun çekme dayanımı düşük olduğu için kirişlerde çekme bölgesine çelik donatı yerleştirilir ve bu sayede betonun basınç bölgesinin daha verimli çalışması sağlanır. Moment kolu mesafesini arttırmak ve donatının etkili çalışmasını sağlamak amacıyla çelik donatılar çekme bölgesindeki en dış kısma yerleştirilir. Çekme bölgesindeki donatıyı pas, yangın vb. etkilerden korumak ve beton ile donatının kenetlenmesini sağlamak amacıyla beton örtü (pas payı) konulması zorunludur. (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).

Betonarme bir elemanda eğilme etkisi altında zorlamalar düşük düzeyde ise, çekme bölgesindeki beton çatlamayabilir. Bu durum beton ile donatının, kesitteki çekme kuvvetini ortaklaşa taşıdığının göstergesidir. Eğilme etkisi altındaki betonarme kirişlerde betonun çekme gerilmelerine karşı bir miktar katkısı vardır ancak bu katkı ihmal edilebilecek düzeyde olduğundan çekme gerilmelerinin tamamının donatı tarafından karşılandığı kabul edilir. Donatının diğer bir görevi ise çekme gerilmeleri nedeni ile oluşacak olan çatlak genişliğini minimum tutmaktır (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).



Şekil 3.3. Betonarme kirişte sekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı

Betonarme kirişlerde ilk çatlaklar, birim uzamanın, betonun çekmedeki birim deformasyon sınırına ulaşması ile en dış çekme lifinde meydana gelir. Çatlak oluşması, en dış lifteki betonun eğilmede çekme dayanımına ulaşması olarak tanımlanır. Bu sınır, çatlama momenti donatısız bir kirişin kırılma momentine eşittir (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).

$$M_{cr} = \frac{f_{ctfl}}{y}$$
 Denk. 3. 1

Kesit dikdörtgen ise I/y için maksimum değer mukavemet momenti olarak adlandırılan $W=b.h^2/6$ olur. Betonun eğilmede çekme dayanımı (f_{ctf}) ise eksenel çekme dayanımının (f_{ctk}) iki katı olarak alınır. Bu durumda Denk 3.1 ifadesi aşağıdaki son halini alır (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).

$$M_{cr} = f_{ctf} \frac{b_w h^2}{6} = \frac{2f_{ctk} b_w h^2}{6}$$
 Denk. 3.2

Momentin en yüksek olduğu bölgede ilk çatlaklar oluşur. Kılcal düzeyde olduğu için bu çatlakların görülmesi zordur. Bu çatlakların boyu ve genişliği yük arttıkça artmaya başlar ve yeni çatlaklar oluşur. Betondaki çatlama, asal çekme gerilmelerine dik yönde olacak şekilde gelişir. Yük arttıkça yük ile mesnet arasındaki bölgelerde de çatlama momentine ulaşıldığı için çatlaklar oluşur. Bu bölgelerde kayma gerilmelerinden dolayı asal çekme gerilmeleri kiriş eksenine paralel değildir ve oluşan çatlaklar kiriş ekseni ile belirli bir açıda oluşur (Şekil 3.4) (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).



Şekil 3.4. Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu

Kirişlerde eğilme etkisi altında oluşan ilk çatlaktan sonra beton ve çelik malzemedeki gerilme dağılımı için ilgili malzemelere ait bilinen gerilme sekil değiştirme (σ - ε) ilişkileri kullanılması gerekir (Şekil 3.5). İlk çatlak sonrası çekme bölgesinin en altında yer alan liflerde betonun çekme dayanımları aşılmış, çekme donatısında ise henüz akma sınırına ($\varepsilon_s < \varepsilon_{sy}$) ulaşılmamıştır ve basınç bölgesinin en üstünde yer alan liflerde birim kısalma henüz maksimum gerilmeye karşılık gelen (ε_{co}) ulaşmamıştır (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).



Şekil 3.5. Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Özhan, 2012)

Kirişe uygulanan yük arttıkça, eğilme momenti büyür ve çekme donatısı akma birim uzamasına ulaşır. Basınç bölgesindeki en dış lifteki şekil değiştirmeler ε_{co} 'a

ulaşmadığından dolayı bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} 'dan küçüktür. Donatı aktığından dolayı, donatıdaki çekme kuvveti $F_t = A_{s}f_{yk}$ olur. Yük artmaya devem ederse, donatıdaki deformasyonlar artacak, donatı akma sınırına ulaşacak ve gerilmelerde çok artış olmadan uzamalar artacaktır. Çeliğin elasto-plastik davranışından ötürü akma sonrası gerilmeler sabit kaldığı için donatıdaki çekme kuvvetleri değişmeyecektir. (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).

$$F_r = A_s. f_{vk} = F_c$$
 Denk. 3.3

Artan yükler altında tarafsız eksenin yukarı kayması sonrasında basınç bölgesinin en dış lifinde beton birim kısalması ε_{co} 'a ulaşılması nedeni ile bu lifteki beton basınç gerilmeleri f_{ck} değerini alacaktır. Betonda ezilmeler başladığı için, deformasyon artımı ancak gerilme azalması ile mümkün olacaktır. En dış lifteki beton birim kısalması ε_c , betonun nihai birim kısalması ε_{cu} 'ya ulaşıldığında basınç bölgesindeki beton ezilerek dağılacak, donatı aktığından dolayı, kiriş çökerek kırılacaktır (Ersoy ve Özcebe, 2001; Özhan, 2012).

Betonarme kirişlerin taşıma gücüne ulaşmasına kadar göstereceği davranışlarda çekme bölgesindeki donatı çok önemli rol oynamaktadır. Artan eğilme momenti etkisindeki bir betonarme kiriş, her zaman, basınç bölgesindeki en uç lifin betonun birim kısalmasının ezilme birim kısalmasına ulaşmasıyla (ε_{cu} = 0.003-0.0035) tasıma gücünü kaybederek kırılmaktadır. Ancak, sonuçta kırılmanın aynı şekilde olması kırılma durumuna gelinceye kadar, kirisin davranışının da aynı olduğu anlamına gelmez. Kirişteki çekme donatısının miktarı kirişin davranışını etkiler ve belirler (Eren, 2003; Özhan, 2012).

3.3. Sargılı Beton Davranışı

Eksenel basınç etkisi altındaki betonda şekil değiştirme, Poisson ilişkisi ile alakalı olarak beton üzerine uygulanan eksenel yükün doğrultusuna dik olacak şekilde gerçekleşir. Eksenel yük yanal basınç ve gerilmelere sebep olur ve betonu olumsuz yönde etkiler. Bu yanal basınç ve gerilmelerin oluşturduğu olumsuzluğu minimuma indirgemek amacıyla sargılı beton geliştirilmiştir. Sargılı beton durumunda donatılar, eksenel yükten kaynaklı yanal basınç ve gerilmelere karşı direnç oluşturarak üç yönlü gerilme durumu oluşturup beton dayanım ve sünekliliğini arttırmaktadır (Celep ve Kumbasar, 2005).

1982'de Richart, Brandzaeg ve Brown üç yönlü gerilme durumunu incelemek amacıyla kapsamlı bir deney yapmışlardır. Şekil 3.6'da görüldüğü üzere σ_2 ve σ_3 arttıkça betonun sünekliliği ve buna bağlı olarak da dayanımı artmaktadır.



Şekil 3.6. Üç eksenli gerilme altında betondaki davranış (Doğan, 1997)

Bu konu ile alakalı olarak bir çalışma da Saatçioğlu ve Ravzi (1992) tarafından yapılmıştır. Bu çalışmada aşağıdaki denklem kullanılmıştır (Denk. 3.5).

$$f_{cc}=k_3f_c+k_1\sigma_2$$
 Denk. 3.5

Bu denklemde, k_3 standart silindir deneyinden elde edilen beton dayanımı ile elemanda ortaya çıkan beton dayanımı arasındaki farkı ifade eden bir katsayıdır. Bu katsayı 0,85 ile 1,0 arasında değişebilmektedir. Richart deneylerini bir daha gözden geçiren Saatçioğlu ve Ravzi (1992), yanal basıncın 15 MPa'dan daha büyük olduğu durumlarda k_I = 4,0 katsayısının geçerli olabileceğini bulmuşlardır. Yine yaptıkları deney sonuçlarına göre k_I değerinin ise ancak yanal basıncın daha küçük olduğu durumlarda 4,0'dan büyük olabileceği kanıtlanmıştır. Bu deney sonuçlarına göre k_I parametresi için aşağıdaki Denk. 3.6 yazılmış ve Şekil 3.7'de göstermişlerdir (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992).

$$k_1 = 6,7 \div \sigma_2^{0,17}$$
 Denk. 3.6



Şekil 3.7. k₁ parametre eğrisi (Saatçioğlu ve Ravzi, 1992)

3.4. Betonarme Kiriş Tasarımı İçin TS 500(2000) Hükümleri

3.4.1. Malzeme özellikleri ve kabulleri

- Betonun çekme dayanımı ihmal edilir.
- Donatı çubuğu ile çevresini saran beton arasında tam aderans bulunduğu düşünülerek, donatı birim şekil değiştirmesi, aynı düzeydeki beton lifi birim şekil değiştirmesine eşit alınır.
- Taşıma gücüne erişildiğinde, tarafsız eksene en uzak beton basınç lifindeki birim kısalma $\varepsilon_{cu} = 0,003$ alınır.
- Donatı çeliğinin elasto-plastik davrandığı kabul edilir.

 $\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_{yd}$

- Tüm donatı çelikleri için ; $E_s=2x105$ MPa, $\varepsilon_{su}=0,1$ alınır.
- Taşıma gücüne erişildiği sıradaki beton basınç bölgesindeki gerilme dağılımı için, geçerliliği deneysel verilerle kanıtlanmış herhangi bir dağılım kullanılabilir. Ancak, hesaplarda kolaylık sağlamak amacıyla, gerçek basınç gerilmesi dağılımı yerine, aşağıdaki özellikleri taşıyan eşdeğer dikdörtgen basınç bloku kullanılabilir. Blok genişliği olarak, eşdeğer basınç şiddeti olan 0,85 f_{cd} alınır. Blok derinliği, tarafsız eksen derinliğinin, k_1 katsayısıyla çarpılmasıyla bulunur, $a = k_1.c$, bu ifade de kullanılacak olan k_1 değerleri, çeşitli beton sınıfları için Tablo 3.1'de verilmiştir.

Beton Sınıfı	C16	C18	C20	C25	C30	C35	C40	C45	C50
k_1	0,85	0,85	0,85	0,85	0,82	0,79	0,76	0,73	0,70

Tablo 3.1. Beton sınıflarına göre kullanılacak k_1 değerleri

3.4.2. Eğilme elemanlarının boyutları ve donatılar ile ilgili hükümler

- Hesap eksenel basınç değeri $N_d \leq 0, lf_{ck}A_c$ sınırını aşmayan elemanlar, eğilme elemanları olarak tanımlanmıştır.
- Kiriş toplam yüksekliği Şekil 3.8'de görüldüğü gibi, 300 mm'den ve döşeme kalınlığının üç katından daha küçük olamaz. Kiriş gövde genişliği 200 mm'den az, kiriş toplam yüksekliği ile kolon genişliği toplamından fazla olamaz.



Şekil 3.8. Kiriş kesit boyutları

- Kirişlerde net beton örtüsü, özel yapılar dışında, dıştaki elemanlarda 25 mm'den, içteki elemanlarda 20 mm'den az olmamalıdır. Elverişsiz çevre koşulları durumunda ve daha fazla yangın güvenliği gerektiren durumlarda bu değerler artırılmalıdır.
- Kirişlerde çekme donatısı oranı $\rho = \frac{As}{bwd} \ge \rho_{min} = 0.8 \frac{fctd}{fyd}$ koşulunu sağlamak zorundadır.

• Kirişlerde çekme ve basınç donatı oranları farkı, dengeli donatı oranının 0,85 katından fazla olamaz.

 $\rho - \rho' \leq \rho_{max} = 0.85 \rho_b$

- Ayrıca, çekme donatısı oranı, $\rho \le 0.02$ sınırını geçemez.
- Kirişlerde boyuna donatı olarak 12 mm den küçük çaplı çubuklar kullanılamaz.
- Açıklıktaki çekme donatısının, en az üçte birinin mesnete kadar uzatılıp kenetlenmesi gereklidir. Net açıklığı, toplam yüksekliğinin 2,5 katından küçük olan sürekli kirişler ve 1,5 katından küçük olan basit kirişler, yüksek kiriş olarak tasarlanıp donatılır. Bu tür kirişlerin tasarımı, doğrusal olmayan birim şekil değiştirme dağılımı ve yanal burkulma göz önüne alınarak yapılmalıdır.

3.4.3. Kesme Kuvveti Hesabı Hükümleri

- Betonarme yapı elemanlarında eğilme momenti ile birlikte etkiyen kesme kuvvetlerinin oluşturduğu asal çekme gerilmeleri, beton ve uygun kesme donatısı ile karşılanacak, asal basınç gerilmelerinin de gövdede ezilme oluşturmayacak bir düzeyde tutulması sağlanacaktır.
- Tasarım kesme kuvveti V_d, mesnet yüzünden "d" uzaklığında hesaplanmalıdır.
 Ancak, mesnet olarak başka bir eğilme elemanına oturan kirişlerde mesnet yüzündeki kesme kuvveti esas alınmalıdır.
- Tekil bir yükün mesnet yüzünden "d" veya daha az uzaklıkta etkime olasılığı bulunan durumlarda da, mesnet yüzünde hesaplanan kesme kuvveti temel alınmalıdır.
- Kesme güvenliği için V_r ≥ V_d koşulu sağlanmalıdır. Yan taraftaki denklemde, V_d tasarım kesme kuvveti, V_r ise kesitin kesme dayanımıdır. Kesitin kesme dayanımı, beton katkısı (V_c) ve kesme donatısı katkısının (V_w) toplanması ile elde edilir.(V_r=V_c+V_w)
- Etriye katkısı ise $V_w = \frac{Asw}{s} f_{ywd} d$ denklemi yardımıyla hesaplanır.
- Tasarım kesme kuvveti eğik çatlama dayanımına eşit veya ondan az ise ($V_d \le V_{cr}$) kesme donatısı hesabına gerek yoktur. Ancak bu durumda, minimum

etriyenin bulundurulması zorunludur. Minimum etriye hesabında $\frac{Asw}{s} \ge \frac{fctd}{fywd} b_w$ koşulu sağlanmalıdır.

 Yüksek asal basınç gerilmeleri nedeni ile gövde betonunun ezilmesini önlemek amacıyla, hesap kesme kuvveti V_d≤0,22f_{cd}b_wd formüldeki gibi sınırlanmıştır. Bu koşul sağlanamazsa, kiriş kesit boyutları büyütülmelidir.

Kesme dayanımını sağlamak için bireysel çubuklar (düşey ve yatay etriye, firkete, çiroz vb.) ve hasır donatı kullanılır. Etriye aralığı kiriş faydalı yüksekliğinin yarısından fazla olamaz ($s \le d/2$). Ayrıca, $V_d > 3V_{cr}$ olan durumlarda, etriye aralığı yukarıda verilen değerin yarısını aşamaz ($s \le d/4$).

3.5. Beton - Donati Aderansı

Beton ve çelik çubuklar arasında kenetlenmeyi sağlayan bağ kuvvetlerinden dolayı oluşan kayma gerilmelerine aderans denir. Beton ile donatı arasında var olan kenetlenme (bağ kuvveti) sebebiyle, gerilme dağılımı donatıdaki moment değişimiyle paralel olacak şekilde değişir ve aynı zamanda betona özgü şekil değiştirmeler (büzülme, sünme vb.) donatıya da etki eder. Betonarme bir elemanda çelik donatı beton içerisine yeterli olacak uzunlukta yerleştirilmiş ise çelik donatıyı çekip çıkartmak imkansızdır. Çelik donatının beton içerisine yerleştirilme(gömme) boyu yetersiz ise çelik donatının yüzey şekline bağlı olarak donatı betondan sıyrılabilir ya da etrafındaki betonu kırabilir. Çelik donatının beton içerisinde kalan kısmının uzunluğuna kenetlenme boyu denir. Beton ile çelik donatı arasındaki aderansın temelde üç sebebi vardır. Bunlar;

- Beton ile çelik donatı arasında var olan bağ kuvvetleri
- Çelik donatı ile beton arasındaki sürtünme kuvvetleri
- Beton ile çelik donatı arasında oluşan mekanik diş kuvvetleridir.

Beton ile çelik donatı arasındaki aderans betonun çekme mukavemeti, agrega cinsi, betondaki katkı maddeleri, donatı çapı, çeliğin akma mukavemeti, çelik donatının yüzey geometrisi, pas payı miktarı ve kenetlenme boyu gibi birden fazla değişkenden etkilenebilir (Bingöl, 2008; Ersoy, 1985).

Beton ile donatı arasındaki aderansı incelemek amacıyla yapılan deneyler inceledikleri özellikler bakımında iki gruba ayrılabilirler. Bunlardan birincisi aderansla direkt alakalı özellikleri (sınır gerilme, kenetlenme, bindirme) inceleyen deneylerdir İkincisi ise iç aderans olarak bilinen çatlama özelliklerini inceleyen deneylerdir. İlk gruba giren deneyler içerisinde en yaygın olarak kullanılanı çekip-çıkarma (pull-out) deneyleridir (Bingöl, 2008).

Yapılan deneysel çalışmalar, yüksek sıcaklığa maruz betonarme elemanların aderans dayanımının azaldığını ve betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışını belirlemedeki temel değişkenin aderans dayanımı olduğunu ortaya koymaktadır. Çünkü kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından daha büyük olmaktadır. Diederichs ve Schneider tarafından yapılan deneysel çalışmada, 172 mm çapında ve 191 mm yüksekliğindeki silindir beton numuneler içerisine çeşitli özellikteki donatılar yerleştirilmiş ve bu numunelerde çekip çıkarma deneyleri yapılmış, sıcaklığın yükselmesi ile aderansta belirgin bir düşüş gözlenmiştir (Şekil 3.9). Çeliğin düz veya nervürlü olması da aderansa etki etmektedir (Kayacı, 2014; Diederichs ve Schneider, 1981).



Şekil 3.9. Soğuk işlem görmüş çeliğin aderans-sıyrılma ilişkisi

Bu çalışmada yapılan çekip çıkarma deneylerinde gömme boyu donatı çapının 5 katı olacak şekilde ayarlanmıştır. Aynı zamanda beton alt yüzeyinden 2,5 cm olacak şekilde pas payı bırakılmıştır. Betonun içinde geriye kalan donatı ise plastik bir tüp yardımıyla korumaya alınmıştır. Deney sonrasında kayma gerilmeleri hesaplanırken makinadan alınan toplam uzama miktarından gömme boyunun dışında kalan serbest kısımdaki

uzama miktarı çıkarılarak net kayma miktarı hesaplanmıştır. Denklem 3.7'de serbest kısımdaki uzama miktarı ve denklem 3.8'de ise net kayma miktarı hesabı gösterilmiştir.

$$\Delta L_1 = \frac{F_{A \times L_1}}{E}$$
Denk. 3.7
$$S_{net} = \Delta L_{top} - \Delta L_1$$
Denk. 3.8

Burada;

 ΔL_1 : Serbest kısımdaki uzama miktarı

 L_1 : Serbest kısım ilk boyu

E : Elastisite modülü

 S_{net} : Net kayma miktarı

 ΔL_{top} : Makinadan alınan toplam uzama miktarı

3.6. Yangın ve Yüksek Sıcaklık Hakkında Genel Bilgiler

Yanma, yanıcı maddelerin ateşle tutuşturulmasından sonra oksijenle beslenerek hızlı bir şekilde reaksiyona girmesi sonucu, yanıcı madde içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Sağsöz, 2013; Ashre, 1997).

Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir. Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır (Sağsöz, 2013).

Şekil 3.10'da verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 650°C'ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C'ye

ulaşabileceği görülmektedir, ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri denklem 3.7 bağıntısı ile ifade edilmektedir (Sağsöz, 2013; TS, 2012).

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

Denk. 3.7

Denklemde, t yangın süresini (dakika), T_0 başlangıç sıcaklığını (23°C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (Haksever, 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır. (Sağsöz, 2013; TS 1263, 1983).



Şekil 3.10. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS, 2012)

3.7. Moment-Eğrilik İlişkisi

Betonarme yapı sistemlerinin iyi tasarlanabilmesi yapı davranışının, dolayısıyla yapı elemanlarının davranışının kavranabilmesine bağlıdır. Elemanın davranışının kavranabilmesi ise kesit davranışının bilinmesi ile mümkündür. Eğilme etkisi altındaki kesitlerin davranışı, en sağlıklı biçimde moment-eğrilik ilişkisi incelenerek anlaşılabilir. Ayrıca kesitin rijitlik ve dayanımının nasıl değiştiği, kesit davranışının süneklik durumu gibi olaylar yine moment-eğrilik ilişkisi üzerinden izlenebilir (Akkaya, 2014; Ersoy ve Özcebe, 1988).

Eğrilik, birim dönme açısı olarak tanımlanır. Bir elastik eğri üzerindeki iki komşu nokta arasındaki açının, bu noktalar arasındaki mesafeye bölünmesi ile elde edilir. Şekil 3.11'de eğilme ve eksenel yük altındaki bir elemana ait deformasyon şekli ve kesite ait birim deformasyon dağılımı gösterilmektedir. Denklem 3.8'de eğrilik, $d\phi/d_x$ şeklinde tanımlanmıştır (Akkaya, 2014)



Şekil 3.11. Eğilme ve eksenel yük altında deforme olmuş eleman parçası (Akkaya, 2014; Çağlar vd., 2013)

$$E$$
ğ $rilik = \phi = \frac{d_{\phi}}{d_x} = \frac{1}{p}$ Denk. 3.8

Betonarme kesitler, farklı özelliklere sahip malzemelerden oluşmaktadır. Donatı çeliğinin davranışının elasto-plastik olduğu ve çekme ile basınç gerilmeleri altındaki davranışının özdeş olduğu varsayılır. Beton ise çekme ve basınç gerilmeleri altında farklı deformasyon özelliklerine sahip olup, doğrusal olmayan davranışa sahiptir. Gerçek malzeme davranışını göz önüne alarak elde edilen moment-eğrilik ilişkisi eğrileri, doğrusal değildir. Bu eğriler, akma momenti, akma eğriliği, etkin eğilme rijitliği ve eğrilik sünekliği kapasitesini elde etmek amacıyla iki doğru (bilineer) haline getirilerek idealize edilir (Akkaya, 2014).



Şekil 3.12. Moment-eğrilik ilişkisi (Akkaya, 2014)

Betonarme kesitlerde süneklik, kesitin dayanımında önemli bir azalma olmadan (maksimum dayanımının %15'ini kaybetmesine izin verilir) yapabileceği doğrusal ötesi deformasyon kapasitesi olarak tanımlanır. Sayısal olarak ise süneklik, eğrilik süneklik katsayısı ile ifade edillir. Eğrilik süneklik katsayısı, kesitin kırılma anında yaptığı eğriliğin(ϕu), çekme donatısının aktığı anda kesitte oluşan eğriliğe(ϕy) oranıdır (Akkaya, 2014).

$\mu = \frac{\phi_u}{\phi_y}$ Denk. 3.9

Sunulan bilineer eğrideki ilk doğrunun eğimi, çatlamış kesite ait etkin eğilme rijitliğine (EI_e) karşılık gelmektedir (Akkaya, 2014).

$$EI_e = \frac{M_y}{\phi_y}$$
 Denk. 3.10

Burada; øy çekme bölgesindeki donatının aktığı andaki eğrilik ve My ise çekme bölgesindeki donatının aktığı andaki moment olarak tanımlanmaktadır (Akkaya, 2014).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde daha önce bahsedilen TS 500-2000 yönetmeliğindeki hükümler esas alınarak dikdörtgen kesitli betonarme bir kirişin tasarım detayları verilmiştir. Kiriş elemanları kesme ve eğilme etkisi altında hesaplanmıştır. Kesme ve eğilme donatısı olarak kullanılan çelik malzemelerinin yüksek sıcaklık etkileri altında mekanik özeliklerinin nasıl belirlendiği anlatılmıştır. Daha sonra deney çalışmalarında ne gibi hazırlıklar yapıldığı, hangi malzeme, düzenek ve aletlerin kullanıldığı, deney verilerinin alet ve düzenekler yardımıyla elde edilmesi gibi hususlarda detaylı açıklamalar yapılmıştır.

4.1. Malzeme Özellikleri

Bu bölümde deney numunelerinde kullanılan donatı ve beton malzemelerinin mekanik özelliklerini açıklayan deneyler ve kullanılan ekipmanlar hakkında bilgiler verilmiştir.

4.1.1. Beton

Hazır beton santralinden temin edilen beton, bütün deney elemanlarının aynı gün ve tek dökümlü olarak hazırlanabilmesi için kullanılmıştır. Betonun en büyük tane çapı 15 mm, 28 günlük dayanımı 45 MPa ve çökme değeri 20 cm olacak şekilde hazır beton santraline sipariş verilmiştir. Beton malzeme, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında FBA-2017-491 numaralı projeden sağlanan kaynak ile temin edilmiştir.

Beton dayanımını tespit edebilmek için farklı sıcaklıklardaki her deney grubu için 15x15x15 cm boyutlarında üçer adet küp numune alınmıştır. Alınan numuneler kür havuzlarında 23°C'de 24 saat boyunca betonarme elemanlarla aynı şartlarda kür edilmiş, daha sonra da betonarme kirişlerle aynı koşullarda elektrikli fırına atılmış ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Deneylerin yapıldığı günlerde her deney için üçer adet küp numune ve ayrıca beton basınç dayanımının tespiti amacıyla da 7. ve 28. günlerde üçer adet silindir ve üçer adet küp numune TS EN 12390-1, TS EN 12390-2 ve TS EN 12390-3 standartlarına uygun olarak Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarında Şekil 4.1'de gösterilen ELE marka

evrensel yükleme cihazında deneye tabi tutulmuş ve beton basınç dayanımları belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Beton basınç dayanımı test cihazı

Her sıcaklık grubu için betonarme kiriş deneylerinin gerçekleştirildiği günlerdeki küp numunelerinin basınç deneylerinde elde edilen basınç dayanımları araştırma bulguları bölümünde verilmiştir.

4.1.2. Çelik donatı

Üretilen kiriş numunelerinin hepsinde S420 üretim kalitesinde tek seferde aynı üretimden alınan donatılar kullanılmıştır. Her deney grubu için TS 500 standartlarına uygun olarak 12 mm çapında ve 80 cm uzunluğunda üçer adet numune alınmıştır. Alınan numuneler Erzincan Üniversitesi Temel Araştırma Bilimleri Merkezi Laboratuvarları bünyesinde bulunan maksimum sıcaklık rejimi 1200°C olan seramik fırınında (Şekil 4.2) tıpkı kiriş ve küp numunelerinde de olduğu gibi kademeli olarak 100°C ile 800°C arasında belirlenen sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır.



Şekil 4.2. 1200 °C rejimli seramik fırını

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Daha sonra numuneler Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarı bünyesindeki bulunan 100 kN çekme kapasitesine sahip Alşa marka çekme cihazında (Şekil 4.3) deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 4.3. Çelik donatı test cihazı

Bu deney sonuçlarının ortalama değerlerine göre bir grafik oluşturulmuştur. Oda sıcaklığındaki çelik için Şekil 4.4'te gerilme-birim uzama grafiği verilmiştir. Aynı zamanda, oda sıcaklığındaki çeliğin akma ve kopma anındaki uzama değerleri de Tablo 4.1'de verilmiştir. Diğer sıcaklık grupları için grafikler araştırma bulguları bölümünde verilecektir.



Şekil 4.4. Çelik donatı gerilme-birim uzama grafiği

Malzeme	Akma	Kopma	Akma Uzaması	Kopma Uzaması
	Dayanımı	Dayanımı	(%)	(%)
Çelik	505,38	617,34	0,235	18,17

Tablo 4.1. Oda sıcaklığında çelik donatının mekanik özellikleri

4.2. Deney Numunelerinin Tasarımı

Çelik donatı için yapılan malzeme deneylerine göre mekanik özellikler belirlenmiştir. Bu veriler dikkate alınarak kiriş numunelerinin tasarımı yapılmıştır. Kullanılan malzemenin gerilme- birim uzama eğrisi Şekil 4.4'teki grafikte, mekanik özellikleri de Tablo 4.1'de gösterilmiştir. Farklı sıcaklık değerlerinde kullanılmak için eğilme ve kesme numuneleri olmak üzere toplamda 2 farklı grup (her grupta toplam 10 adet numune) 20 adet betonarme kiriş üretilmiştir.

4.2.1. Eğilme numunelerinin tasarımı

Bu numune grubunda yüksek sıcaklık etkisi altındaki kirişlerde eğilme kuvveti etkisi incelenmek amacıyla kesme kuvveti etkisi yönünden güçlendirilerek TS 500'e göre geleneksel kancalı kapalı etriye formuna göre tasarlanmıştır. Bu gruptaki numunelerin detaylı çizimi Şekil 4.5'te gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Eğilme grubu kiriş tasarımı

TS 500 standardına göre tasarlanan kiriş numunelerinin en kesiti 15x20 cm'dir. Eğilme numunelerin çekme bölgesinde 2 adet ϕ 12 boyuna donatı, basınç bölgesinde ise 2 adet ϕ 8 montaj donatısı bulunmaktadır. Etriyeler için hem mesnet hem de orta bölgede 10 cm mesafe belirlenmiştir. Böylece kirişlerin kesme etkisiyle kırılmasının önlenmesi hedeflenmiştir. Belirlenen tasarıma göre eğilme numunelerinin üretimi için çelik donatılar fabrikadan hazır olarak istenmiş ve ϕ 8 ve ϕ 12'lik donatılar tasarımda öngörülen uzunluklara göre kesilmiştir. Etriyeler bükme kolu yardımıyla istenilen boyutlara getirilmiştir. Şekil 4.6'da gösterilen numunelerden 10 adet hazırlanmıştır.



Şekil 4.6. Eğilme grubu için üretilen kiriş numunesi

Tablo 4.2.	. Eğilme	numuneleri	tasarım	tablosu
------------	----------	------------	---------	---------

Çekme	Çekme	Kesme	Kesme	Kesmeye	Eğilmeye
Donatısı	Donatısı Oranı	Donatısı (Orta Bölge)	Donatısı (Sıklaştırma Bölgesi)	Karşı Taşıma Kapasitesi F _u ^V (kN)	Karşı Taşıma Kapasitesi Fu ^M (kN)
2 \$12	0,0083	\$ 8/10	\$ 8/10	220	100

4.2.2. Kesme numunelerinin tasarımı

Bu gruptaki numuneler ise yüksek sıcaklık etkisi altındaki kirişlerde kesme kuvvetinin etkisi incelenmek amacıyla eğilme etkisi yönünden güçlendirilerek TS 500'e göre geleneksel kancalı kapalı etriye formuna göre tasarlanmıştır. Böylece kirişlerin kesme etkisine bağlı olarak göçmesi hedeflenmiştir. Bu gruptaki numunelerin detaylı çizimi Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

TS 500 standardına göre tasarlanan kiriş numunelerinin en kesiti 15x20 cm'dir. Kesme numunelerin çekme bölgesinde 3 adet ϕ 16 boyuna donatı, basınç bölgesinde ise 2 adet ϕ 8 montaj donatısı bulunmaktadır. Etriye donatılar için mesnet bölgelerinde 10 cm, kiriş orta bölgesinde ise 15 cm mesafe belirlenmiştir. Şekil 4.8'de gösterilen numunelerden 10 adet hazırlanmıştır.







Şekil 4.8. Kesme grubu için üretilen kiriş numunesi

Çekme Donatısı	Çekme Donatısı Oranı	Kesme Donatısı (Orta Bölge)	Kesme Donatısı (Sıklaştırma Bölgesi)	Kesmeye Karşı Taşıma Kapasitesi F _u ^V (kN)	Eğilmeye Karşı Taşıma Kapasitesi Fu ^M (kN)
3 \$16	0,022	\$ 8/15	\$ 8/10	170	240

4.3. Deney numunelerinin adlandırılması

Deney numuneleri donatı cinsi, maruz kaldığı sıcaklık derecesi ve ait olduğu grup parametrelerine göre adlandırılmıştır. Örneğin 200°C'ye maruz kalmış eğilme grubu numunesinin adlandırılması SS200FL, kesme numunesinin adlandırılması ise SS200SH şeklinde olacaktır. Her iki grup için numunelerinin tamamının isimleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Yüksek sıcaklık uygulanmayan numuneler, aslında oda sıcaklığında bulunmalarına rağmen kontrol grubu olarak değerlendirildiklerinden, sıcaklık tanımlaması ''000'' şeklinde tercih edilmiştir.

Eğilme Grubu	Kesme Grubu
SS000FL	SS000SH
SS100FL	SS100SH
SS150FL	SS150SH
SS200FL	SS200SH
SS250FL	SS250SH
SS300FL	SS300SH
SS400FL	SS400SH
SS500FL	SS500SH
SS600FL	SS600SH
SS800FL	SS800SH

Tablo 4.4. Tü	m deney numune	lerinin	isimleri
---------------	----------------	---------	----------

4.4. Deney düzeneği ve yükleme programı

Kiriş numunelerine ait deneyler, Erzincan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 13 Mart Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerin yükleme sistemi için kullanılan aletler Tablo 4.5'te listelenmiştir.

Tablo 4.5. Yükleme sisteminde kullanılan aletler

Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite/ özellik
Hidrolik silindir	Eksenel yükleme	ENERPAC	60 ton/ itme ve çekme
Yük hücresi	Yük ölçümü	CAS	100 ton/ itme ve çekme

Laboratuvara kurulan çelik çerçeve sistem yardımıyla uygulanan eksenel yükleme sisteminde 60 ton itme-çekme kapasitesine sahip hidrolik silindir yardımıyla kiriş numuneler üzerine kademeli bir artış uygulanmasıyla yapılmıştır. Kiriş numunelerinde tekil yükü elde etmek için numunelerin 45 cm mesafesine (tam orta noktasına) silindir çelik parçası koyulmuştur. Deney düzeneği daha detaylı bir gösterimle Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Kiriş numuneleri için deney düzeneği

4.4.1. Ölçüm ve veri toplama sistemi

Ölçüm düzeneği hazırlanırken kirişte meydana gelen kesme çatlağı genişlikleri, eğilme çatlağı genişlikleri ve aynı zamanda kirişte meydana gelen sehim değerinin yer değiştirme ölçerler (D) yardımıyla tespiti hedeflenmiştir. Bütün bu ölçümler, deney esnasında 1 adet veri aktarım cihazı ile anlık olarak bilgisayar ortamına kayıt edilmiştir. Sehim değerini ölçmek için kullanılan yer değiştirme (D5) ölçer kirişin tam orta noktasında, kesme çatlağını ölçmek için noktasal yükten mesnetlere doğru uzanan doğrultulara (D3,D4) ve eğilme çatlağını ölçmek için ise kiriş boyu doğrultusunda çatlakların oluşacağı öngörülen yerlere (D1,D2) olmak üzere toplam 5 adet yer değiştirme ölçer kullanılmıştır. Yer değiştirme ölçerlerin kiriş üzerindeki ayrıntılı gösterimi Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'te verilmiştir.



Şekil 4.10. Kiriş numunelerinin ön kısmına yerleştirilen yer değiştirme ölçerler



Şekil 4.11. Kiriş numunelerinin arka kısmına yerleştirilen yer değiştirme ölçerler

Deneyde kullanılmış ölçüm ve veri aktarma cihazlarının özellikleri Tablo 4.6'da gösterilmiştir.

Adı	Kullanım Amacı	Marka	Kapasite/ özellik
Yer Değiştime Ölçer (D5)	Sehim ölçümü	OPKON	50 mm
Yer Değiştime Ölçer (D1, D2)	Eğrilik hesabı	OPKON	100 mm
Yer Değiştime Ölçer (D3, D4)	Kesme çatlağı ölçümü	OPKON	100 mm
Veri aktarma cihazı	Sinyallerin dijital veriye dönüştürülüp bilgisayar ortamına atılması	Test Box	8 kanal girişi

Tablo 4.6. Ölçüm ve veri toplama cihazları listesi

4.4.2. Ölçümlerin değerlendirilmesi

Yapılan ölçümler ile elde edilen eş zamanlı verilere göre değerlendirmeler aşağıda sıralanan yöntemler ile yapılmıştır:

- Her bir sıcaklık grubu için beton ve çeliğin mekanik özelliklerinin belirlenmesi,
- Her bir sıcaklık grubu için beton-donatı kenetlenme özelliklerinin belirlenmesi,
- Yük hücresi ve yer değiştirme ölçerler yardımıyla yük-sehim hesabının yapılması,

- Kiriş ön ve arka yüzeylerinde bulunan yer değiştirme ölçerler yardımı ile moment-eğrilik hesabının yapılması ve kesme çatlağı genişliklerinin belirlenmesi,
- Numunelerdeki enerji tüketim kapasiteleri,
- Elde edilen sonuçların birbiriyle mukayese edilmesi.

4.5. Eğrilik Hesabının Yapılması

Eğrilik, birim boy başına düşen, radyan cinsinden nispi dönme açısı olarak tanımlanmaktadır. İki kesit arasındaki dönme açısı radyan cinsinden tespit edilerek, bu açının ölçüm bölgesi uzunluğuna bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Ancak özellikle betonarme elemanların eğrilik değerinin ölçümünde henüz tam olarak bir kabul geliştirilememiştir. Zira eğrilik ölçümü yapılacak bölgenin uzunluğu, hesaplanacak değeri büyük oranda etkilemektedir. Bu bölgenin çok küçük seçilmesi halinde, bölge içerisinde çatlak oluşması ihtimali de çok düşük olacağından elemanın genel davranışını yansıtmada yetersiz kalabilmektedir. Bölge içerisindeki aynı çatlakları kapsayacak şekilde ölçüm bölgesinin uzunluğunun artırılması durumunda da dönme açısı sabit kalacağından eğrilik değeri gerçek değerden daha düşük olarak hesaplanacaktır. Görülmektedir ki, deneysel çalışmalarda ölçülen eğriliğin gerçek eğrilik değerine ne kadar yakın olduğu tartışmalı bir niteliktedir. Dolayısıyla eğrilik hesaplarının analitik hesaplarla karşılaştırmadan ziyade, eleman üzerindeki çatlak dağılımı hakkında fikir edinmek ve farklı deney numuneleri arasında mukayese amacıyla kullanılması tavsiye edilmektedir.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde her sıcaklık grubu için deneye tabi tutulan malzemelerin ve kiriş numunelerinin deney sonuçları; beton basınç deneyleri, donatı çekme deneyleri, çekip çıkarma deneyleri kesme numune grubu deneyleri ve eğilme numune grubu deneyleri olmak üzere beş başlık altında verilmiştir.

5.1. Beton Basınç Deneyleri

Her sıcaklık grubu için üçer adet küp beton numunesi alınmıştır. Beton basınç numuneleri, kirişler ile aynı şartlarda 28 gün kür havuzlarında kür edilmiştir. Daha sonra yine kirişlerle aynı şartlarda elektrikli seramik fırında her deney grubu için üçer adet küp numune 100°C–800°C'ye kadar ısıtılmıştır (Şekil 5.1). Yakılan numuneler oda sıcaklığında bekletildikten sonra her deney grubu için o deneyin yapılacağı günde Şekil 4.1'de gösterilen basınç makinasında kırılmıştır. Her sıcaklık grubu için beton basınç deneyleri sonuçları ise Tablo 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Her sıcaklık grubu için beton küp numuneleri

Sıcaklık(°C)	Beton Basınç Dayanımı (MPa)	Beton Basınç Dayanımı (%)
23	43,40	100
100	43,03	99,14
150	39,77	91,63
200	36,77	84,72
250	34,80	80,18
300	33,47	77,12
400	30,10	69,35
500	25,37	58,45
600	19,50	44,93
800	7,83	18,04

Tablo 5.1. Her sıcaklık grubu için küp beton basınç dayanımları

Tablodan da görüleceği gibi 150°C'ye kadar ciddi düşüş olmamıştır. 200°C'de beton basınç dayanımında kontrol grubuna (23°C) kıyasla %15 düşüş görülürken 250°C'de %20, 300°C'de %22, 400°C'de %30 düşüş görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklara çıkıldığında ise 500°C'de %41, 600°C'de %55 düşüş görülmüştür. 800°C'de ise beton neredeyse tüm özelliğini yitirmiş ve beton basınç dayanımında %82 düşüş görülmüştür. Sıcaklığa göre beton basınç dayanımlarının değişimi Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Sıcaklığa göre beton basınç dayanımlarının değişimi

5.2. Çelik Donatı Çekme Deneyleri

Üretilen kiriş numunelerinin hepsinde S420 üretim kalitesinde, tek seferde aynı üretimden alınan donatılar kullanılmıştır. Her deney grubu için TS 500 standartlarına uygun olarak 12 mm çapında ve 80 cm uzunluğunda üçer adet numune alınmıştır. Alınan numuneler Erzincan Üniversitesi Temel Araştırma Bilimleri Merkezi Laboratuvarları bünyesinde bulunan maksimum sıcaklık rejimi 1200°C olan elektrikli seramik fırınında (Şekil 4.2) tıpkı kiriş ve küp numunelerinde de olduğu gibi kademeli olarak 100°C ile 800°C arasında belirlenen sıcaklıklara kadar ısıtılmıştır (Şekil 5.3). Isıtıldıktan sonra Şekil 4.3'te gösterilen donatı çekme test cihazında deneye tabi tutulmuştur. Deney sonrası elde edilen veriler Şekil 5.4 ve Tablo 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Sıcaklığa maruz kalmış demir numuneler



Şekil 5.4. Sıcaklığa maruz kalmış çelik çekme akma dayanımları

Sıcaklık (°C)	Çelik Akma Dayanımı (MPa)	Çelik Akma Dayanımı (%)
23	505,38	100
100	495,72	98,08
150	496,69	98,28
200	499,51	98,83
250	487,93	96,54
300	497,45	98,43
400	493,81	97,71
500	495,65	98,07
600	490,95	97,14
800	356,09	70,45

Tablo5.2. Sıcaklığa maruz kalmış çeliğin akma dayanımları

5.3. Çekip Çıkarma Deneyleri

Beton-donatı kenetlenmesini ölçmek amacıyla her sıcaklık grubu için üçer adet olmak üzere toplamda otuz adet çekip çıkarma deney numunesi hazırlanmıştır. Numuneler için 20*20*20 cm boyutlarında kalıplar hazırlanmış (Şekil 5.5), küp beton numuneleri ve kirişler ile aynı şartlarda tek seferde beton dökümü gerçekleştirilmiştir.

Üretilen numuneler küp beton numuneleri ve kirişler ile aynı ortamda 28 gün kür havuzlarında kür edilmiştir. Daha sonra elektrikli seramik fırında her sıcaklık grubu için küp numune ve kiriş numuneleriyle beraber ısıtılmıştır (Şekil 5.6).

Çelik donatıları ASTM D7913/D7913M-14 yönergelerine göre çekip çıkarma deneyine tabi tutulmuştur. Donatı çaplarının 5 katı kadar bir mesafede beton numuneye saplanıp beton içinde geri kalan kısmı plastik bir tüp içerisinde serbest kalacak şekilde yerleştirilmiştir. Donatının beton dışarısında kalan kısmı ise yüksek sıcaklık seviyelerinin hem beton dışında kalan donatıda hasar oluşturmasını hem de donatı-beton arasındaki yüzey sıcaklığını daha erken arttırmasını önlemek amacıyla ve bir yangın ortamında sıcaklığın donatıya beton aracılığıyla aktarıldığını kabul ederek beton dışında kalan donatı yangın sıvasıyla korumaya alınmıştır (Şekil 5.7). Kullanılan yangın sıvasının teknik özellikleri ise Tablo 5.3'te verilmiştir.

Görünüş	Beyaz renkli ince toz
Toz Yoğunluk	550 ± 50 kg/ m3
Su Karışım Oranı	12-13 lt. su / 20 kg. toz
Uygulama Sıcaklığı	+5°C ile 35°C arası
Aderans Dayanımı	> 0,1 N/mm²
Ses Yalıtım Değeri	25 db (3cm/500Hz)
Basınç Dayanımı	> 1,6 N /mm²
Eğilme Dayanımı	> 0,9 N /mm²
Su Emme	0,240 (kg./m² min0,5)
lsı İletkenlik Katsayısı	0,055 (W/Mk)
Kabuklaşma Süresi	< 60 dk. 20 °C
Yanıcılık Sınıfı	A-1 Hiç Yanmaz

Tablo5.3. Kullanılan yangın sıvasının teknik özellikleri



Şekil 5.5. Çekip çıkarma deneyleri için numune kalıpları



Şekil 5.6. Seramik fırınında ısıtılan numuneler

ASTM D7913/D7913M-14 yönergelerine göre çekip çıkarma deney düzeneği şematik olarak Şekil 5.8'de verilmiştir.



Şekil 5.7. Yangın sıvası ile kaplanmış çekip çıkarma numunesi ve deneye hazır numune



Şekil 5.8. ASTM D7913/D7913M-14 yönergelerine göre çekip çıkarma deney düzeneği


Şekil 5.9. Çelik donatıların her sıcaklık grubu için bağ gerilmelerinin değişimi

Yukarıda özetlendiği şekilde uygulanan deneyler sonucunda betonun yüksek sıcaklıktaki davranışına bağlı olarak beton-donatı arası bağ gerilmesi tespit edilmiştir. Şekil 5.9'da sunulan bağ gerilmesi değişimleri incelendiğinde, çelik donatılar için sıcaklık artışına bağlı olarak kademeli bir düşüş görülmektedir. Deney sonuçlarına göre çelik donatılar için 400°C civarında bağ gerilmesinin %70'inin muhafaza edildiği, 600°C civarında bu değerin %50 seviyesine düşüp, sonrasında ise tamamına yakınını kaybettiği gözlenmektedir.

Sıcaklık (°C)	Bağ Gerilmesi (MPa)	Bağ Gerilmesi (%)
23	12,76	100
100	11,77	92,17
150	11,05	86,60
200	10,81	84,72
250	9,81	76,88
300	9,54	74,76
400	9,40	73,66
500	8,25	64,65
600	7,50	58,77
800	1,48	11,60

Tablo 5.4. Çekip çıkarma deney sonuçlarına göre her sıcaklık grubu için bağ gerilmeleri

5.4. Eğilme Grubu Kiriş Deneyleri

5.4.1. SS000FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS000FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra herhangi bir sıcaklığa maruz bırakılmadan oda sıcaklığında meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.10'da görüldüğü gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli olarak eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 35 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değerinin 50 ile 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.11'de gösterilmiştir. Ayrıca bu kiriş numunesinin deney sonunda çekme donatısının koptuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.10. Deney öncesi SS000FL kiriş numunesi



Şekil 5.11. Deney sonrası SS000FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşturulan yük-sehim grafiği Şekil 5.12'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 123,31 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 18,40 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.12. SS000FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.13'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.13. SS000FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.2. SS100FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS100FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.14'de gösterildiği gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.14. Deney öncesi SS100FL kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 45 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 120 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.15'te gösterilmiştir. Ayrıca deney sonrası numunenin sol üst kısmında beton hasarının oluştuğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.16'da gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan

maksimum yük değerinin 127,42 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 36,05 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.15. Deney sonrası SS100FL kiriş numunesi



Şekil 5.16. SS100FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.17'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.17. SS100FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.3. SS150FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS150FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik fırını yardımıyla 150°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.18'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 38 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 105 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası

oluşan çatlaklar Şekil 5.19'da gösterilmiştir. Ayrıca deney sonunda çekme donatısının koptuğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.18. Deney öncesi SS150FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşturulan yük-sehim grafiği Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 121,88 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 33,97 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5. 19. Deney sonrası SS150FL kiriş numunesi.



Şekil 5.20. SS150FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.21'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.21. SS150FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.4. SS200FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS200FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.22'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 45 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 120 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.23'te gösterilmiştir.



Şekil 5.22. Deney öncesi SS200FL kiriş numunesi



Şekil 5.23. Deney sonrası SS200FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.24'te gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 123,07 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 9,61 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.24. SS200FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.25'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.25. SS200FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.5. SS250FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS250FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 250°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.26'da gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.26. Deney öncesi SS250FL kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 43 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 5000 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 110,5 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.27'de gösterilmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.28'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 110,98 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 9,00 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.27. Deney sonrası SS250FL kiriş numunesi



Şekil 5.28. SS250FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.29'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.29. SS250FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.6. SS300FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS300FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.30'da gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 42 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 114 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.31'de gösterilmiştir.



Şekil 5.30. Deney öncesi SS300FL kiriş numunesi



Şekil 5.31. Deney sonrası SS300FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.32'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 113,92 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 9,96 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.32. SS300FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.33'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.33. SS300FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.7. SS400FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS400FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.34'te gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.34. Deney öncesi SS400FL kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 37 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 109 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.35'te gösterilmiştir.



Şekil 5.35. Deney sonrası SS400FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.36'da gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 107,44 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 28,16 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.36. SS400FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.37'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.37. SS400FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.8. SS500FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS500FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.38'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.38. Deney öncesi SS500FL kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 39 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 120 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.39'da gösterilmiştir.



Şekil 5.39. Deney sonrası SS500FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.40'ta gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 106,77 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 32,40 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.40. SS500FL için yük-sehim grafiği



Şekil 5.41. SS500FL için moment-eğrilik grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.41'de grafik olarak verilmiştir.

5.4.9. SS600FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS500FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.42'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.42. Deney öncesi SS600FL kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 40 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 50 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 95 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.43'te gösterilmiştir.



Şekil 5.43. Deney sonrası SS600FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.44'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 102,77 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 33,07 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.44. SS600FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.45'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.45. SS600FL için moment-eğrilik grafiği

5.4.10. SS800FL kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS800FL numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 800°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.46'da gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.46. Deney öncesi SS800FL kiriş numunesi

Ancak şekilden de görüleceği gibi beton aşırı hasar aldığı için deney kısa sürmüştür ve deney sonrası kiriş numunesi Şekil 5.47'de gösterilmiştir.



Şekil 5.47. Deney sonrası SS800FL kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.48'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 65,15 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 5,86 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.48. SS800FL için yük-sehim grafiği

D1 ve D2 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla moment-eğrilik değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.49'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.49. SS800FL için moment-eğrilik grafiği

5.5. Kesme Grubu Kiriş Deneyleri

5.5.1. SS000SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS000SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Bu numune hiçbir sıcaklığa maruz bırakılmadan oda sıcaklığında meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.50'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.50. Deney öncesi SS000SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 60 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 90 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 170 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.51'de gösterilmiştir.



Şekil 5.51. Deney sonrası SS000SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.52'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 205,39 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 6,46 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.52. SS000SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.53'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.53. SS000SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere maksimum yüke (205,39 kN) ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmamasına rağmen çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 10,467 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.2. SS100SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS100SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.54'te gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.54. Deney öncesi SS100SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 70 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 80 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 175 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.55'te gösterilmiştir.



Şekil 5.55. Deney sonrası SS100SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.56'da gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 182,86 kN ve bu yük seviyesinde oluşan sehim değerinin ise 6,09 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.56. SS100SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.57'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.57. SS100SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 100 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (188,86 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 10,642 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.3. SS150SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS150SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 150°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.58'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.58. Deney öncesi SS150SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 70 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 150 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.59'da gösterilmiştir.



Şekil 5.59. Deney sonrası SS150SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.60'ta gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 174,48 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 5,00 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.60. SS150SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.61'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.61. SS150SH için yük-çatlak grafiği
Grafikten de görüleceği üzere maksimum yüke (174,48 kN) ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmamasına rağmen çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 11,619 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.4. SS200SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS200SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.62'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.62. Deney öncesi SS200SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 150 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.63'te gösterilmiştir.



Şekil 5.63. Deney sonrası SS200SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.64'te gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 166,32 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 4,81 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.64. SS200SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.65'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.65. SS200SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 100 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (166,32 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 12,045 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.5. SS250SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS250SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 250°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.66'da gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.66. Deney öncesi SS250SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 60 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 150 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.67'de gösterilmiştir.



Şekil 5.67. Deney sonrası SS250SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.68'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 161,99 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 4,07 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.68. SS250SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.69'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.69. SS250SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 100 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (161,99 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 10,580 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.6. SS300SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS300SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik fırını yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.70'te gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.70. Deney öncesi SS300SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 130 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.71'de gösterilmiştir.



Şekil 5.71. Deney sonrası SS300SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.72'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 162,34 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 3,51 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.72. SS300SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.73'te grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.73. SS300SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere maksimum yüke (162,34) ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmamasına rağmen çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 7,204 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.7. SS400SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS400SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.74'te gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.74. Deney öncesi SS400SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 60 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 150 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.75'te gösterilmiştir.



Şekil 5.75. Deney sonrası SS400SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.76'da gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 159,05 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 2,94 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.76. SS400SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.77'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.77. SS400SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 100 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (159,05 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 7,357 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.8. SS500SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS500SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.78'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.78. Deney öncesi SS500SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 85 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 165 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan yeni çatlaklar işaretleme kalemiyle işaretlenmiş ve yük arttırılmaya devam etmiştir. Kiriş

artık yük alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.79'da gösterilmiştir.



Şekil 5.79. Deney sonrası SS500SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.80'te gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 150,59 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 4,90 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.80. SS500SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.81'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.81. SS500SH için yük-çatlak grafiği

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 100 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (150,59 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 9,784 mm olduğu saptanmıştır.

5.5.9. SS600SH kirişi deneyleri

TS 500 standartlarına göre üretilen SS600SH numunesi kalıbına yerleştirildikten ve beton dökümü gerçekleştikten sonra 28 günlük kür havuzuna bırakılmıştır. Arzulanan beton basınç dayanımını kazandıktan sonra seramik firini yardımıyla 600°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Meydana gelen değişimlerin incelenebilmesi için Şekil 5.82'de gösterildiği gibi deney düzeneğine yerleştirilmiş ve kademeli eksenel yük uygulanarak deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.82. Deney öncesi SS600SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu ve eksenel yük değerinin 125 kN'a ulaşacağı ana kadar mevcut çatlakların genişlediği ve ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Kiriş artık yük

alamayacak duruma gelene kadar bu işlem devam ettirilmiştir. Deney sonrası oluşan çatlaklar Şekil 5.83'te gösterilmiştir.



Şekil 5.83. Deney sonrası SS600SH kiriş numunesi

Numunenin eksenel yük etkisi altında oluşan kesme çatlakları yükün uygulandığı noktadan mesnetlere doğru oluştuğu aynı zamanda yük arttıkça oluşan ilave çatlakların genel olarak birbirleriyle birleştiği ya da çatlakların birbirlerine paralel olduğu gözlemlenmiştir.

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.84'te gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 136,88 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 5,48 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.84. SS600SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.85'te grafik olarak verilmiştir.

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 120 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (136,88 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 4,170 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.85. SS600SH için yük-çatlak grafiği

5.5.10. SS800SH kirişi deneyleri

Üretilen numune 28 gün kür havuzunda kür edildikten sonra seramik firini yardımıyla 800 °C' ye kadar ısıtılmıştır. Isıtıldıktan sonra oda sıcaklığında soğumaya bırakılmış ve daha sonra Şekil 5.86'da gösterildiği gibi deney düzeneğinde deneye tabi tutulmuştur.



Şekil 5.86. Deney öncesi SS800SH kiriş numunesi

Kirişteki ilk çatlakların uygulanan eksenel yükün 50 kN'a ulaştığı anda oluştuğu gözlemlenmiştir. Oluşan çatlaklar işaretleme kalemi yardımıyla işaretlenmiş ve eksenel yük arttırılmaya devam etmiştir. Eksenel yük değeri 75 kN'a ulaştığı anda ilave çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ancak şekilden de görüleceği gibi beton aşırı hasar aldığı için deney kısa sürmüştür ve deney sonrası kiriş numunesi Şekil 5.87'de gösterilmiştir.



Şekil 5.87. Deney sonrası SS800SH kiriş numunesi

Deney sonrası D5 yer değiştirme ölçerden ve yük hücresinden alınan veriler yardımıyla oluşan yük-sehim grafiği Şekil 5.88'de gösterilmiştir. Deney sonucunda uygulanan maksimum yük değerinin 76,87 kN ve bu yükte oluşan sehim değerinin ise 5,75 mm olduğu saptanmıştır.

Grafikten de görüleceği üzere yük değeri 40 kN'a ulaşıncaya kadar çatlakların genişliklerinin çok fazla artmadığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke (76,87 kN) ulaşıncaya kadar çatlak genişliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. Maksimum yüke ulaştıktan sonra ise yük değerinde çok fazla bir değişme olmadan çatlak genişliklerinin arttığı ve yük değerindeki düşüşle beraber çatlak genişliklerinin büyük oranda artmaya devam ettiği maksimum çatlak değerinin ise 0,71 mm olduğu saptanmıştır.



Şekil 5.88. SS800SH için yük-sehim grafiği

D3 ve D4 yer değiştirme ölçerlerden alınan veriler yardımıyla yük-çatlak değerleri hesaplanmış ve Şekil 5.89'da grafik olarak verilmiştir.



Şekil 5.89. SS800SH için yük-çatlak grafiği

6. SONUÇLAR

Çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, yüksek sıcaklık seviyelerinde beton dayanımı ve çelik akma dayanımı değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlara sebep olarak ise betonda çimento ve agrega yapısındaki bileşiklerin sıcaklıkla genleşme ve büzülmesi, çelik donatıdaki moleküler yapının yüksek sıcaklık etkisiyle bozulması; hâlihazırda bilinen durumlardır ve söz konusu çalışmada da benzer bulgulara ulaşılmıştır. Şekil 6.1'de beton, çelik donatı ve bağ gerilmesinin sıcaklık gruplarına göre korunan dayanımları yüzde olarak verilmiştir.



Şekil 6.1. Her sıcaklık grubu için beton, donatı ve bağ gerilmesi korunan % dayanımları

Morley ve Royles (1982) tarafından yapılan çalışma sonucunda 250°C'ye kadar beton basınç dayanımında bir miktar artış olduğu ancak sıcaklıklar arttığında bu durumun tersine döndüğü tespit edilmiştir. Ancak bizim çalışmada 250°C'ye kadar beton basınç dayanımında kademeli olarak düşüş olduğu ve daha sonrasında bu düşüşün hızlandığı gözlemlenmiştir. 250°C'ye kadar beton basınç dayanımındaki düşüşün sebebinin ise beton dökümü sırasında betonun iyi işlenmemiş veya sıkıştırma işleminin iyi yapılamamış olması ve termal genişleme olabileceği olduğu söylenebilir. Deneyde kullanılan betonun yapısında silis esaslı çimento ve kalker esaslı agrega kullanılmasına

rağmen beklenenin aksine beton numuneler 600°C'de basınç dayanımının %45'ini, 800°C'de ise %18'ini koruyabilmiştir.

Akman (2000) yaptığı çalışmada 600°C'de çeliğin akma dayanımının güvenli bölgenin altına indiğini belirtmiştir. Ancak bizim yaptığımız çalışmada korumasız halde yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan çelik donatıların eksenel çekme deneyleri incelendiğinde; beklendiğinin aksine çelik donatıların akma dayanımında 600°C'ye kadar bir değişim görülmezken, 800°C'de sadece %30 civarında bir kayıp söz konusudur. Alonso v.d (2003) tarafından yapılan çalışmada sıcak işlem görmüş çeliklerde maksimum sıcaklık 600°C seviyesinde ise soğuma sonrası akma dayanımının tekrar kazanılacağından bahsedilmiştir. Bu çalışmada kullandığımız çelik sıcak işlem görmüş çelik olup Alonso vd. (2003) tarafından yapılan çalışmayla paralellik göstermektedir.

Aderans gerilmesinin sıcaklıkla değişimi ele alındığında (Şekil 6.1); bağ gerilmelerinde sıcaklık artışına bağlı olarak kademeli bir düşüş görülmektedir. Çelik donatılar için 400°C civarında aderans gerilmesinin %70'inin muhafaza edildiği, 600°C civarında bu değerin %50 seviyesine düşüp, sonrasında ise tamamına yakınını kaybettiği gözlenmektedir. Bu sonuçlar Bingöl (2008) tarafından yapılan çalışmanın sonuçlarıyla benzerlik göstermektedir. Ancak Bingöl (2008) tarafından yapılan çalışmada 150°C'ye kadar aderans gerilmelerinde bir miktar artış olduğu saptanmıştır. Bizim çalışmada bu bulguya rastlanmamıştır.

Kesme ve eğilme grubu kiriş numune sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde (Şekil 6.2); birbirine paralel bir davranış sergiledikleri görülmektedir. Ancak kesme grubu kiriş numunelerinde eğilme grubuna göre yaklaşık %15 daha fazla dayanım kaybı görülmektedir. Bunun sebebinin ise kesme grubunda betonun davranışının ön planda olduğu ve yüksek sıcaklık etkileri altında betonun çeliğe göre daha fazla dayanım kaybetmesi (Şekil 6.1) olarak söylenebilir.



Şekil 6.2. Kesme ve eğilme grubu numuneleri için deney sonrası korunan % dayanımlar



Şekil 6.3. Eğilme grubu için deney sonrası tüm kirişler

Eğilme grubu kiriş numunelerinde çatlak oluşumu Şekil 6.3'ten de görüleceği gibi kirişin eğilme bölgesinde oluşmuş ve birbirleriyle benzer şekilde gelişmiştir. Buradan



da anlaşılacağı gibi eğilme için tasarlanan kirişlerin eğilmeye çalıştığı ve tasarımlarının başarılı olduğu görülmektedir.

Şekil 6.4. Eğilme grubu kiriş numuneleri sıcaklık- taşıma gücü kapasitesi değişimi

Şekil 6.4'ten de görüleceği üzere eğilme grubu kiriş numunelerinin taşıma gücü kapasiteleri 23 °C' deki değerler baz alınarak kıyaslandığında 100 °C' de %3 'lük bir artışın olduğu bunun haricinde 200 °C' ye kadar taşıma gücü kapasitelerinin ortalama değerlerde olduğu söylenebilir. Kiriş taşıma gücünün 250 °C' de %90 oranında, 300 °C' de yaklaşık %92 oranında, 400 °C' de %87 oranında, 500 °C' de % 86 oranında 600 °C' de %83 oranında ve 800 °C' de ise sadece %47 oranında korunduğu gözlemlenmektedir.

Kesme grubu kiriş numunelerinde çatlak oluşumu Şekil 6.5'ten de görüleceği gibi birbirleriyle benzer şekilde gelişmiş ve mesnet bölgelerinde son bulmuştur. Buradan da anlaşılacağı gibi kesme için tasarlanan kirişlerin kesmeye karşı çalıştığı ve tasarımlarının başarılı olduğu görülmektedir.



Şekil 6.5. Kesme grubu için deney sonrası tüm kirişler





Şekil 6.6'dan da görüleceği üzere kesme grubu kiriş numunelerinin taşıma gücü kapasiteleri 23°C'deki değerler baz alınarak kıyaslandığında kademeli olarak düştüğü gözlemlenmektedir. Kiriş taşıma gücünün 100°C'de %89 oranında, 150°C'de %84 oranında, 200°C'de yaklaşık %81 oranında, 250°C'de %78 oranında, 300°C'de %79

oranında 400°C'de %77 oranında 500°C'de %73 oranında, 600°C'de %66 oranında ve 800°C'de ise sadece %37 oranında korunduğu gözlemlenmektedir.

Genel olarak değerlendirildiğinde 600°C'ye kadar çeliğin akma dayanımlarında kayda değer bir düşüş görülmezken beton basınç dayanımlarında yaklaşık %45 civarında bir düşüş görüldüğünden (Şekil 6.1) hem eğilme grubu hem de kesme grubu kiriş numunelerindeki taşıma gücü kaybının temel nedeninin betonda oluşan hasar ve bu hasardan ötürü beton donatı kenetlenmesinin azalması olduğu söylenebilir. 800°C'de ise betonun özelliğini tamamen kaybetmesi ve dolayısıyla kenetlenmenin neredeyse sıfıra indiği gözlemlendiğinden böyle yüksek sıcaklıklara maruz kalabilecek betonarme elemanlarda önlem alınması elzemdir.

KAYNAKLAR

- Abdallah, S., Fan, M. and Cashell K.A. (2017) "Bond-Slip Behaviour of Steel Fibres in Concrete After Exposure to Elevated Temperatures" *Construction and Building Materials* 140 542–551.
- Abdallah, S., Mizi F. and David W.A. (2017) "Effect of elevated temperature on pullout behaviour of 4DH/5DH hooked end steel fibres." *Composite Structures* 165 (2017) 180–191.
- ACI Committee 318, (2014) "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-14) and Commentary", *American Concrete Institute*, Michigan, ABD, PA.
- Akkaya, A. (2014) "Betonarme Kolon Davranışının Moment-Eğrilik İlişkisi İle Parametrik Olarak İncelenmesi.", Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye.
- Akman, S. (2000) "Yapı Malzemeleri". İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Yayını, İstanbul, (ikinci baskı), s 162.
- Aköz, F., Türker, F., Koral, S. ve Yüzer, N., (1999). "Effects of raised temperature of sulfate solutions on the sulfate resistance of mortars with and without silica füme."*Cement and Concrete Research*, 29, 4, 537-544.
- Alonso, C., Andrade, C. and Khoury, G.A. (2003). "Porosity and Microcracking", *Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy.
- Andrade, C., Alonso, C. and Khoury, G.A. (2003) "Relating Microstructure to Properties", Course on Effect of Heat on Concrete, *International Centre for Mechanical Sciences (CISM)*, Italy.
- Arslan G. (2005) "Tersinir Yükler Altında Betonarme Çubukların Kesme mukavemeti", Doktora Tezi, **YTÜ Fen bilimleri Enstitüsü**, İstanbul.
- ASCE-ACI 426 (1973) "The Shear Strength of Reinforced Concrete Members", Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 99(ST6); 1091-1187.
- ASTM Standard D7913/D7913M-14, (2014) "Standard Test Method for Bond Strength of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite Bars to Concrete by Pullout Testing", *ASTM International*, West Conshohocken, PA,.
- Ataman, R. (1991) "Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi". Y.Lisans Tezi, *KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon.
- Bingöl, A. F. (2008) "Beton-Donatı Aderansına Yüksek Sıcaklıkların Etkisi". Doktora Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 164s.
- Burnaz, O. (2003) "Betonarme Yapılarda Yangın ve Yangın Tasarımlarının Bir Model Üzerinde İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, Türkiye.
- BYKHY, (2002) "Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik"
- Celep Z. ve Kumbasar N. (2005) "Betonarme Yapılar", Beta Dağıtım, İstanbul.

- Chen, B. and Liu, J. (2004) "Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures". *Cement and Concrete Research*, 34, 1065-1069.
- Coşkun, A., Tanyıldızı, H. ve Yazıcıoğlu, S. (2007) "Mineral Katkılı Betonun Aderans Dayanımına 800°C'nin Etkisi", *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 13, 3, Denizli, 347-351s.
- Demir, A. ve Çağlar, N. (2013) "Dairesel Betonarme Kolonlarda Çatlamış Kesite Ait Etkin Eğilme Rijitliklerinin İrdelenmesi." Sakarya, ISITES2013.
- Diederichs, U. and Schneider, U. (1981) "Bond strength at high temperatures". *Magazine of Concrete Research*, 33(115), 75-84.
- Doğan, M. (1997) "Depreme Dayanıklı Yapı tasarımında Kolonlarda Sürekli Etriye Sargı Donatısının Etkisi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi*, Ankara, 891-904.
- Doğangün, A. (2008) "Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı", Dördüncü Baskı, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Doptreppe J.C. and Franssen J.M. (1985) "The use of numerical models for the fire analysis of reinforced concrete and composites structures", *Engineering Analysis*, CML Publications, 2(2), 67-74.
- Döndüren, S. M., Çöğürcü, T. M. ve Altın, M. (2006) "Betonla Donatı Arasındaki Aderans Davranışının Deneysel İncelenmesi", *Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 57-68s.
- Durmuş, A., Dahil, H. ve Arslan, M. E. (2006) "Yüksek Dayanımlı Beton-Donatı Aderansının Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi", *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 441, 45-52s.
- Dwaikat, M.B.M. (2009) "Flexural response of reinforced concrete beams exposed fire", PhD Thesis, *Michigan State University*, USA.
- El-Hawary, M. and Hamoush, S.A. (1996) "Bond shear modulus of reinforced concrete at high temperatures". *Engineering Fracture Mechanics*, 55, 991-999.
- Eren, İ. (2003) "Betonarme I, Tasıma Gücü ve Kesit Hesapları". *TMMOB, İnşaat Mühendisleri Odası*, İstanbul Şubesi, İstanbul, 1-4.
- Ersoy, U. ve Özcebe G. (2001) "Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap", 6. baskı, *Evrim Yayınevi*, İstanbul, ISBN:978-975-503-233-7, 90-91, 31-37, 58-73, 459-477.
- Gustaferro, A.H., Abrams, M.S. and Litvin, A. (1971) "Fire resistance of lightweight insulating concrete." Lightweight Concrete, *ACI Publication* SP-29, 161-180.
- Huang Z. (2010) "Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in a fire." *Eng Struct* 2010;32:3660–9.
- Jau, W. and Huang, K. (2008) "A study of reinforced concrete corner columns after fire." *Cement and Concrete Composites*, 30(7), 622-638.

- Kayacı, H. (2014) "Betonarme Yüksek Binalarda Yangın Güvenliği ve Yangın Senaryoları Üzerinde İncelemeler", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Kodur, V.R. and Dwaikat, M.B.A. (2008) "Flexural response of reinforced concrete beams exposed to fire" *Cement and Concrete Composites*, doi:10.1680/stco.2008.9.1.45.
- Larrard, F., Schaller, I. and Fuchs, J. (1993) "Effect of bar diameter on the bond strength of passive reinforcement in high-performance concrete." ACI Materials Journal, 90(4), 333-339.
- Lin, W.M., Lin, T.D. and Couche, L.J. (1996) "Microstructures of Fire Damaged Concrete." ACI Materials Journal, 93 (3),p: 199-205.
- Morley, P.D. and Royles, R. (1983) "Response of the Bond in Reinforced Concrete to High Temperatures" *University of Edinburg: Depertman of Civil Engineering and Building Science* UDC 666.982-977:620.179.4.
- Orbay, A. (2005) "Betonarme-1", Birinci Baskı, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Özhan, V.K. (2012) "Farklı Beton Sınıfına Bağlı Betonarme Kirişlerin Eğilme Kapasitelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi". Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, 43s.
- Rami, J.A., Hamad, M.A., Johari, M. and Haddad, R.H. (2017) "Mechanical properties and bond characteristics of different fiber reinforced polymer rebars at elevated temperatures." *Construction and Building Materials* 142 (2017) 521–535.
- Richart, F.E., Brandzaeg, A. and Brown, R.L. (1928) "A study of the Failure of Concrete Under Combined Compressive Stresses", *University of Illinois, Engineering Experiment Station*, Bulletin No.185.
- Rostasy, F.S., Weiss, R. and Wiedemann, G. (1980) "Changes of pore structure of cement mortars due to temperature." *Cement and Concrete Research*, 10, 157-164.
- Saatçioğlu M. and Razvi S.R. (1992) "Strength and ductility of confined concrete", J. *Struct. Eng.*, 118, 1590-1607.
- Sağsöz, A. E. (2013) "Kendiliğinden Yerleşen Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinde Bazı Fiziksel Ve Mekanik Özelikleri İle Renk Değişiminin İncelenmesi", Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, Türkiye.
- Şener, H. D. (2006) "Aderans Eki Deneyinde Göçme Biçimleri ve Çatlak Dağılımları", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 128s.
- Şentürk, H.O. (2006) "Betonarme Binalarda Depremlerin ve Yangınların Binaya Etkisinin İncelenmesi ve Bir Uygulama Örneği", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Kültür Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- TS 2012. "Yapı malzemeleri ve bina elemanları Yangın sınıflandırılması" Ankara.
- Uysal, A. (2004) "Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

- Ünlüoğlu, E., Topçu, İ.B. ve Yalaman, B. (2007) "Yüksek Sıcaklıkta Kalmış Yapılarda Pas Payının Betonarme Çelik Donatı Özeliklerine Etkisi" *İMO Teknik Dergi*, 2007 4145 -4155, Yazı 273.
- Yalaman, B. (2006) "Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kalan Yapılarda Çelik Donatı Özelik Değişimine Betonarme Pas Payının Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir, Türkiye.
- Yamazaki, N.M., Mochida, T., Mutoh, A., Miyashita, T. and Ueda, M. (1995) "Structural behavior of reinforced concrete structures at high temperatures". *Nuclear Engineering and Design*, 156 (1-2), 121-138.
- Zha, X. (2003) "Three-Dimensional Non-Linear Analysis of Reinforced Concrete Members in Fire", *Building and Environment*, 38, 2, 297-307.
- Zhang, H.Y., Kodur, V., Wua, B., Yan, J. and Yuan, Z.S. (2018) "Effect of temperature on bond characteristics of geopolymer concrete." *Construction and Building Materials* 163 277–285.
- Zoldners, N.G. and Wilson, H.S. (1973) "Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete." Behavior of concrete under temperature extremes, *ACI Publication* SP-39, 149-178.

EKLER

EK-1. Tez Çalışması Süresince Yapılan Akademik Çalışmalar

Özkal, F. M., Polat, M., Yağan, M. ve Öztürk M. O. (2018) "Mechanical Properties and Bond Strength Degradation of GFRP and Steel Rebars at Elevated Temperatures" *Construction & Building Materials* - 184, 45-57.



ÖZGEÇMİŞ

Mahmud YAĞAN, 1994 yılında Düzce'de doğdu. İlköğrenimini Adıyaman'da ve Lise öğretimini Erzurum'da tamamladı. 2016 yılında Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünden mezun oldu. Construction and Building Materials isimli Dergide (sayı:184, sayfa:45-57) yayımlanmış bir makalesi bulunmaktadır. Erzincan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Standart Araştırma Projesi Kapsamında FBA-2017-491 Numaralı Projede araştırmacı olarak görev almıştır. Hâlihazırda bir yapı denetim firmasında inşaat mühendisi olarak çalışmaktadır.

