

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ BIRAKILAN BETONARME
ÇERÇEVELERİN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI

DOKTORA TEZİ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

MAYIS 2024

TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ BIRAKILAN BETONARME
ÇERÇEVELERİN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI**

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

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

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 04 / 04 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 17 / 05 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Metin HÜSEM

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılan Betonarme Çerçevelerin Tekrarlı Yatay Yük Etkisindeki Davranışı” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Metin HÜSEM’e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Şevket ATEŞ’e, Sayın Prof. Dr. Tevfik KÜÇÜKÖMEROĞLU’na, Sayın Prof. Dr. Zeki KARACA’ya ve Sayın Prof. Dr. Şükrü YETGİN’e, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma ve ortak olarak çalışmalar yürüttüğümüz ve tez çalışması süresinde de hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Arş. Gör. Yunus Emrahan AKBULUT’a, Dr. Öğretim Üyesi Ali Fuat GENÇ’e ve Arş. Gör. Yılmaz YILMAZ’a teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen İnşaat Mühendisliği Bölümü’ndeki tüm değerli hocalarıma ve asistan arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması boyunca hiçbir yardımdan kaçınmayan İnşaat Mühendisliği Bölümü personeli Ömer GEBİÇ’e teşekkür ederim.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Güner ÇOLAKOĞLU ve babam Fikret ÇOLAKOĞLU’na ve değerli eşim Gizem Nur ÇOLAKOĞLU ile biricik oğlum Asil Polat ÇOLAKOĞLU’na teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılan Betonarme Çerçevelerin Tekrarlı Yük Etkisindeki Davranışı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Metin HÜSEM’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 17 / 05 /2024

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ	XVI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XVII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş	1
1.2. Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri.....	2
1.2.1. Yüksek Sıcaklığın Çimento Hamuru Üzerindeki Etkisi	3
1.2.2. Yüksek Sıcaklığın Agrega Üzerindeki Etkisi	3
1.2.3. Yüksek Sıcaklığın Betonun Basınç Dayanımına Etkisi.....	4
1.2.4. Yüksek Sıcaklığın Betonun Çekme Dayanımına Etkisi	7
1.2.5. Yüksek Sıcaklığın Betonun Elastisite Modülüne Etkisi	7
1.3. Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliği Üzerindeki Etkileri.....	8
1.4. Konu ile İlgili Yapılan Çalışmalar	9
1.5. Literatür Özeti, Amaç ve Kapsam	23
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	24
2.1. Deney Elemanlarının Tasarım Detayları ve Üretimi.....	24
2.2. Deney Elemanlarının Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri ve Deneyleri	28
2.2.1. Donatı Özellikleri ve Çelik Çekme Deneyi	28
2.2.2. Beton Özellikleri ve Tek Eksenli Basınç Deneyi.....	29
2.2.3. Beton Özellikleri ve Yarmada Çekme Deneyi.....	32
2.3. Betonarme Çerçeve Deney Elemanlarında Beton Dökümü	33
2.4. Deney Elemanlarının Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılması	35
2.5. Deney Düzeneği	37
2.6. Tekrarlı Yatay Yüklemede Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler	43

2.6.1.	Hidrolik Piston	43
2.6.2.	Yük Hücresi	44
2.6.3.	LPDT (Lineer Potansiyometrik Cetvel).....	44
2.6.4.	Veri Toplama Sistemi.....	45
2.7.	Tekrarlı Yatay Yükleme Protokolü	45
2.8.	Deneysel Ölçümlerin Değerlendirilmesi	46
2.8.1.	Yatay Yük - Yatay Yerdeğiştirme Eğrilerinin Oluşturulması	46
2.8.2.	Dayanım Zarfı Eğrilerinin Oluşturulması.....	47
2.8.3.	Etkili Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması.....	47
2.8.4.	Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesaplanması.....	48
2.9.	Sayısal Çalışmalar	48
2.9.1.	Yüksek Sıcaklık Etkisinin Uygulanması ile İlgili Sayısal Çalışmalar	49
2.9.2.	Tekrarlı Yatay Yük Etkisinin Uygulanması ile İlgili Sayısal Çalışmalar	53
3.	BULGULAR VE TARTIŞMA	62
3.1.	Giriş	62
3.2.	Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Deney Elemanlarının Tekrarlı Yatay Yükleme Altındaki Davranışı	63
3.2.1.	RCF_13_Referans Deney Elemanı	63
3.2.2.	RCF_1_200_60 Deney Elemanı	67
3.2.3.	RCF_4_400_60 Deney Elemanı	71
3.2.4.	RCF_7_600_60 Deney Elemanı	75
3.2.5.	RCF_10_800_60 Deney Elemanı.....	79
3.2.6.	RCF_2_200_120 Deney Elemanı.....	83
3.2.7.	RCF_5_400_120 Deney Elemanı.....	87
3.2.8.	RCF_8_600_120 Deney Elemanı.....	91
3.2.9.	RCF_11_800_120 Deney Elemanı.....	95
3.2.10.	RCF_3_200_180 Deney Elemanı.....	99
3.2.11.	RCF_6_400_180 Deney Elemanı.....	103
3.2.12.	RCF_9_600_180 Deney Elemanı.....	107
3.2.13.	RCF_12_800_180 Deney Elemanı.....	111
3.3.	Deneysel Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	114
3.3.1.	Deney Elemanlarının Yatay Yük Taşıma Kapasitelerinin Değerlendirilmesi	123
3.3.2.	Deney Elemanlarının Rijitliklerinin Değerlendirilmesi	132

3.3.3. Deney Elemanlarının Enerji Tüketim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi	140
3.4. Sayısal Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	145
3.5. Deneysel ve Sayısal Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi	153
3.5.1. RCF_13_Referans Deney Elemanı	153
3.5.2. RCF_1_200_60 Deney Elemanı	156
3.5.3. RCF_4_400_60 Deney Elemanı	157
3.5.4. RCF_7_600_60 Deney Elemanı	158
3.5.5. RCF_10_800_60 Deney Elemanı.....	158
3.5.6. RCF_2_200_120 Deney Elemanı.....	159
3.5.7. RCF_5_400_120 Deney Elemanı.....	160
3.5.8. RCF_8_600_120 Deney Elemanı.....	161
3.5.9. RCF_11_800_120 Deney Elemanı.....	162
3.5.10. RCF_3_200_180 Deney Elemanı.....	163
3.5.11. RCF_6_400_180 Deney Elemanı.....	164
3.5.12. RCF_9_600_180 Deney Elemanı.....	165
3.5.13. RCF_12_800_180 Deney Elemanı.....	166
4. SONUÇLAR	168
5. ÖNERİLER.....	171
6. KAYNAKLAR	172
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİNE MARUZ BIRAKILAN BETONARME ÇERÇEVELERİN TEKRARLI YATAY YÜK ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2024, 194 Sayfa

Bu tez çalışmasında önce yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevenin daha sonradan deprem gibi tekrarlı yük etkisine maruz kalması durumundaki davranışı ve bu davranışa etki eden parametrelerin değişimi incelenmiştir. Bu amaçla yüksek sıcaklığın derecesi ve etki etme süresi gibi değişkenler dikkate alınmış, betonarme çerçeve deney numuneleri, 60, 120 ve 180 dakika süresince, 200, 400, 600 ve 800 °C sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra tekrarlı yük etkisinde davranışları deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Tez çalışması beş aşamada gerçekleştirilmiş olup, ilk aşamada betonarme çerçevelerin uygun boyut ve malzeme özelliklerinin belirlenerek numunelerin üretilmesi sağlanmıştır. İkinci aşamada betonarme çerçeveler yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Üçüncü aşamada yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçevelerin FEMA 461 yükleme protokolüne uygun olarak tekrarlı yük etkisi altındaki deneyleri yapılmıştır. Dördüncü aşamada betonarme çerçeve deney elemanlarının ABAQUS programı kullanılarak sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, ısı – yapısal analizleri gerçekleştirilmiştir. Beşinci aşamada ise tekrarlı yükleme deneylerinden elde edilen deneysel sonuçlar ile sonlu eleman analizlerinden elde edilen sayısal sonuçlar değerlendirilmiş, deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, yüksek sıcaklığın derecesi ve etki etme süresinin artmasıyla betonarme çerçevenin yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesinde önemli oranda azalmanın meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme çerçeve, Yüksek sıcaklık, Tekrarlı yükleme, Yapısal davranış, Sonlu eleman analizi

PhD. Thesis

SUMMARY

BEHAVIOR UNDER CYCLIC LOAD EFFECT REINFORCED CONCRETE FRAMES EXPOSED TO HIGH TEMPERATURE

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Dr. Metin HÜSEM
2024, 194 Pages

In this thesis study, the behavior of reinforced concrete frames exposed to high-temperature conditions and subsequently subjected to cyclic loading, such as earthquakes, was investigated, along with the changes in parameters affecting this behavior. To achieve this goal, variables such as the degree and duration of high temperature were considered. Experimental and numerical analyses were conducted on reinforced concrete frame test specimens exposed to temperature effects of 200, 400, 600, and 800°C for 60, 120, and 180 minutes, followed by cyclic loading. The thesis study was conducted in five stages. In the first stage, suitable dimensions and material properties of the reinforced concrete frames were determined, and the specimens were produced. In the second stage, the reinforced concrete frames were exposed to high-temperature conditions. In the third stage, reinforced concrete frames subjected to high temperature effects were tested under cyclic load in accordance with FEMA 461 loading protocol. In the fourth stage, finite element models of the reinforced concrete frame test elements were created using the ABAQUS program, and thermal-structural analyses were conducted. In the fifth stage, the experimental results obtained from cyclic loading experiments and numerical results obtained from finite element analysis were evaluated and the experimental and numerical results were analyzed comparatively. As a result of the study, it was determined that as the degree of high temperature and the exposure time increased, there was a significant decrease in the lateral load carrying capacity, stiffness and energy absorption capacity of the reinforced concrete frame.

Key Words: Reinforced concrete frame, High temperature, Cyclic loading, Structural behavior, Finite element analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Agrega türünün beton bağıl basınç dayanımına etkisi.....	4
Şekil 2. Betonun basınç dayanımının yükleme durumuna bağlı olarak sıcaklıkla değişimi.....	5
Şekil 3. Betonun basınç dayanımının soğutulma türüne bağlı olarak sıcaklıkla değişimi.....	6
Şekil 4. Normal ve yüksek dayanımlı micro betonun basınç dayanımının soğutulma türüne bağlı olarak sıcaklıkla değişimi.....	7
Şekil 5. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi.....	8
Şekil 6. Yüksek sıcaklık etkisinde farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları.....	9
Şekil 7. Deney elemanlarına ait boyutlar, enkesit ve boykesit detayları.....	25
Şekil 8. Deney elemanlarında gijon boşluklarına ait yerleşim detayı.....	26
Şekil 9. Deney elemanlarına ait donatı yerleşim planı.....	27
Şekil 10. Donatıların çekme deneyleri.....	29
Şekil 11. Tek eksenli basınç deneyleri.....	30
Şekil 12. Silindir beton numunelerin yarmada çekme deneyleri.....	32
Şekil 13. Deney elemanlarının temel betonunun dökülmesi.....	34
Şekil 14. Deney elemanlarının kolon ve kiriş betonunun dökülmesi.....	34
Şekil 15. Beton küp ve silindir numuneler.....	35
Şekil 16. Test fırını.....	36
Şekil 17. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve numuneler.....	37
Şekil 18. Deney düzeneği ve tekrarlı yatay yükleme sisteminin üç boyutlu görünüşü.....	38
Şekil 19. Deney düzeneğinin boyutlandırılması.....	40
Şekil 20. Deney düzeneği ve tekrarlı yatay yükleme sistemi elemanlarının gösterimi.....	41
Şekil 21. Deney düzeneğinin mesnetlenme detayları.....	42
Şekil 22. Hidrolik psiton ve güç ünitesi.....	43
Şekil 23. Yük hücresi (loadcell).....	44
Şekil 24. Doğrusal potansiyometrik cetvel (LPDT).....	44
Şekil 25. Veri toplama sistemi (data logger).....	45

Şekil 26.	Tekrarlı yatay yükleme protokolü	46
Şekil 27.	Tekrarlı yatay yüklemde herbir çevrim için rijitlik değerlerinin hesaplanması	47
Şekil 28.	i.çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekil değiştirme enerji	48
Şekil 29.	Betonun ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi	49
Şekil 30.	Beton yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	50
Şekil 31.	Beton özgül ısının sıcaklıkla değişimi	51
Şekil 32.	Çeliğin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi	51
Şekil 33.	Çelik yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi	52
Şekil 34.	Çelik özgül ısının sıcaklıkla değişimi	52
Şekil 35.	Yüksek sıcaklık etkisinin termal analizde uygulanması	53
Şekil 36.	Hasar ve plastisite arasındaki ilişki	54
Şekil 37.	Betonun idealleştirilmiş gerilme - birim şekildeğiştirme eğrisi (Eksenel basınç yüklemesi)	55
Şekil 38.	Betonun idealleştirilmiş gerilme - birim şekildeğiştirme eğrisi (Eksenel çekme yüklemesi)	56
Şekil 39.	Rijitlik azaltma parametresinin elastik olmayan şekildeğiştirmeye bağlı değişimi (Basınç için)	56
Şekil 40.	Rijitlik azaltma parametresinin elastik olmayan şekildeğiştirmeye bağlı değişimi (Çekme için)	57
Şekil 41.	a) C3D8R elemanı b) T3D2 elemanı	59
Şekil 42.	Betonarme çerçeve deney elemanlarının sonlu eleman modeli	59
Şekil 43.	Betonarme çerçevenin zemine mesnetlenmesi	60
Şekil 44.	Betonarme çerçeveye yatay yükün uygulanması	61
Şekil 45.	Deney elemanında hasarın tanımlanması	62
Şekil 46.	RCF_13_Referans deney elemanının genel görünümü	63
Şekil 47.	Deney sonu RCF_13_Referans deney elemanında oluşan hasar durumları	65
Şekil 48.	RCF_13_Referans deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri	66
Şekil 49.	RCF_1_200_60 deney elemanının genel görünümü	67
Şekil 50.	Deney sonu RCF_1_200_60 deney elemanında oluşan hasar durumları	69
Şekil 51.	RCF_1_200_60 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri	70
Şekil 52.	RCF_4_400_60 deney elemanının genel görünümü	71
Şekil 53.	Deney sonu RCF_4_400_60 deney elemanında oluşan hasar durumları	73

Şekil 54.	RCF_4_400_60 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	74
Şekil 55.	RCF_7_600_60 deney elemanının genel görünümü	75
Şekil 56.	Deney sonu RCF_7_600_60 deney elemanında oluşan hasar durumları	77
Şekil 57.	RCF_7_600_60 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	78
Şekil 58.	RCF_10_800_60 deney elemanının genel görünümü	79
Şekil 59.	Deney sonu RCF_10_800_60 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	81
Şekil 60.	RCF_10_800_60 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	82
Şekil 61.	RCF_2_200_120 deney elemanının genel görünümü	83
Şekil 62.	Deney sonu RCF_2_200_120 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	85
Şekil 63.	RCF_2_200_120 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	86
Şekil 64.	RCF_5_400_120 deney elemanının genel görünümü	87
Şekil 65.	Deney sonu RCF_5_400_120 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	89
Şekil 66.	RCF_5_400_120 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	90
Şekil 67.	RCF_8_600_120 deney elemanının genel görünümü	91
Şekil 68.	Deney sonu RCF_8_600_120 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	93
Şekil 69.	RCF_8_600_120 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	94
Şekil 70.	RCF_11_800_120 deney elemanının genel görünümü	95
Şekil 71.	Deney sonu RCF_11_800_120 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	97
Şekil 72.	RCF_11_800_120 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	98
Şekil 73.	RCF_3_200_180 deney elemanının genel görünümü	99
Şekil 74.	Deney sonu RCF_3_200_180 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	101
Şekil 75.	RCF_3_200_180 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	102
Şekil 76.	RCF_6_400_180 deney elemanının genel görünümü	103
Şekil 77.	Deney sonu RCF_6_400_180 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	105

Şekil 78.	RCF_6_400_180 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	106
Şekil 79.	RCF_9_600_180 deney elemanının genel görünümü	107
Şekil 80.	Deney sonu RCF_9_600_180 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	109
Şekil 81.	RCF_9_600_180 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	110
Şekil 82.	RCF_12_800_180 deney elemanının genel görünümü	111
Şekil 83.	Deney sonu RCF_12_800_180 deney elemanında oluşan hasar durumları.....	113
Şekil 84.	RCF_12_800_180 deney elemanına ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	114
Şekil 85.	Deney elemanlarından karot numunesi alma işlemi.....	115
Şekil 86.	Beton karot numunelerinin basınç dayanımının belirlenmesi.....	116
Şekil 87.	Betonarme çerçeve deney elemanlarının beton basınç dayanımının sıcaklık ile değişimi	117
Şekil 88.	Betonarme çereçve deney elemanlarının beton çekme dayanımının sıcaklık ile değişimi	117
Şekil 89.	Çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımının belirlenmesi	119
Şekil 90.	Çelik donatı numunelerinin akma dayanımının sıcaklık ile değişimi	120
Şekil 91.	Çelik donatı numunelerinin çekme dayanımının sıcaklık ile değişimi.....	121
Şekil 92.	Beton basınç dayanımının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması.....	122
Şekil 93.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (60 dakika)	125
Şekil 94.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (120 dakika)	127
Şekil 95.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (180 dakika)	129
Şekil 96.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 - 120 dakika).....	130
Şekil 97.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 - 180 dakika).....	131
Şekil 98.	Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 - 180 dakika).....	132
Şekil 99.	Deney elemanlarının rijitlik - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	134
Şekil 100.	Deney elemanlarının rijitlik - yatay yerdeğiştirme eğrileri (60 dakika)	137
Şekil 101.	Deney elemanlarının rijitlik - yatay yerdeğiştirme eğrileri (120 dakika)	138
Şekil 102.	Deney elemanlarının rijitlik - yatay yerdeğiştirme eğrileri (180 dakika)	139
Şekil 103.	Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi - yatay yerdeğiştirme eğrileri.....	141

Şekil 104. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi - yatay yerdeğiştirme eğrileri (60 dakika)	142
Şekil 105. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi - yatay yerdeğiştirme eğrileri (120 dakika).....	143
Şekil 106. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi - yatay yerdeğiştirme eğrileri (180 dakika).....	144
Şekil 107. Deney elemanlarının tümünün kümülatif enerji tüketimi - yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması.....	144
Şekil 108. Isıl - yapısal sonlu eleman analizlerinden elde edilen dayanım zarfı eğrileri	146
Şekil 109. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 dakika).....	148
Şekil 110. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 dakika).....	149
Şekil 111. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (180 dakika).....	150
Şekil 112. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 - 120 dakika).....	151
Şekil 113. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 - 180 dakika).....	152
Şekil 114. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 - 180 dakika).....	153
Şekil 115. RCF_13_Referans deney elemanının deneysel ve sayısal yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri ile dayanım zarfı eğrileri.....	154
Şekil 116. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan çatlaklar	155
Şekil 117. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan plastik şekildeğiştirmeler	155
Şekil 118. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan gerilme dağılımı.....	156
Şekil 119. RCF_1_200_60 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	156
Şekil 120. RCF_4_400_60 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	157
Şekil 121. RCF_7_600_60 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	158
Şekil 122. RCF_10_800_60 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	159
Şekil 123. RCF_2_200_120 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	160

Şekil 124. RCF_5_400_120 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	161
Şekil 125. RCF_8_600_120 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	162
Şekil 126. RCF_11_800_120 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	163
Şekil 127. RCF_3_200_180 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	164
Şekil 128. RCF_6_400_180 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	165
Şekil 129. RCF_9_600_180 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	166
Şekil 130. RCF_12_800_180 deney elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması.....	167

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Deney elemanlarında kullanılan donatıların mekanik özellikleri.....	29
Tablo 2. Hazır beton santralinden temin edilen betonun basınç deneyi sonuçları.....	31
Tablo 3. Silindirik beton numunelerin yarma deneyinden elde edilen kırılma yükü ve çekme dayanımları	33
Tablo 4. Yüksek sıcaklık etkisinin uygulanması.....	36
Tablo 5. Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun gerilme - birim şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenmesi (TS EN 1992-1-2).....	55
Tablo 6. Beton karot numunelerinin basınç ve çekme dayanımları	116
Tablo 7. Beton karot numunelerinin basınç ve çekme dayanımlarındaki azalma oranları	118
Tablo 8. Çelik donatı numunelerinin bazı mekanik özellikleri.....	120
Tablo 9. Çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımındaki değişim oranı	121
Tablo 10. Beton basınç dayanımlarının karşılaştırılması	122
Tablo 11. Etki etme süresi - maksimum yatay yük - maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (deneysel)	124
Tablo 12. Etki etme süresi - maksimum yatay yük - maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (sayısal).....	147
Tablo 13. RCF_1_200_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	157
Tablo 14. RCF_4_400_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	157
Tablo 15. RCF_7_600_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	158
Tablo 16. RCF_10_800_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	159
Tablo 17. RCF_2_200_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	160
Tablo 18. RCF_5_400_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	161
Tablo 19. RCF_8_600_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	162
Tablo 20. RCF_11_800_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	163
Tablo 21. RCF_3_200_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	164
Tablo 22. RCF_6_400_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	165
Tablo 23. RCF_9_600_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	166
Tablo 24. RCF_12_800_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar	167

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

f_{ct}	: Yarmada çekme dayanımı
$f_{c\theta}$	: Betonun farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımı
$\varepsilon_{c1\theta}$	: Betonun termal birim şekildeğiştirmesi
F_i, F'_i	: i. çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinde okunan yük
δ_i, δ'_i	: i. çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinde okunan yerdeğiştirme
λ_c	: Betonun ısı iletkenlik katsayısı
λ_a	: Çeliğın ısı iletkenlik katsayısı
p	: Beton yoğunluğu
C_p	: Beton özgül ısısı
C_a	: Çeliğın özgül ısısı
Δ	: Yatay yerdeğiştirme (mm)
φ	: Dilasyon açısı
μ	: Viskozite
d	: Silindir numune çapı (mm)
e	: Dışmerkezlik
h	: Silindir numune uzunluğu (mm)
P	: Kırılma anındaki maksimum yük

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyadaki birçok fiziksel ve kimyasal olayın temel nedeni olarak sıcaklık gösterilebilir. Yeryüzünde bulunan birçok maddeye etki eden sıcaklık aynı zamanda mühendislik yapılarının tümüne de tesir etmektedir. Yangın ise yanıcı maddelerin kontrol dışı yanma olayı olup, yüksek sıcaklığın oluşmasını sağlayan ve yapılar için davranışı etkileyen çok önemli bir durumdur (Altunışık vd., 2018).

Genova İstatistik Derneği'nin yaptığı bir çalışmaya göre İngiltere'de yıllık ortalama 100000 bina yangını meydana gelmektedir. Bu yangınların ülke ekonomisine zararının yaklaşık olarak yıllık ortalama 1.9 milyar € olduğu tahmin edilmektedir. Bu rakam ABD 'de 17 milyar \$, Almanya'da ise 3 milyar €' ya ulaşmaktadır. 1994 yılından itibaren meydana gelen bina yangınlarının ABD'ye maliyeti 350 milyar \$ dır. Buna karşılık, ABD'de 1994 yılında yaşanan Northridge depremi için 20 milyar \$ zarar hesaplanmıştır. Bu karşılaştırmaya göre yangınların depremlerden daha ciddi ekonomik zarara neden olduğu söylenebilir (Selamet, 2017).

Tüm dünyada inşaat teknolojisinin gelişmesine paralel olarak, yüksek yapı sayısı da giderek artmaktadır. Yüksek yapı sayısındaki artış bu yapıların yangına karşı güvenlik sorunlarını da beraberinde getirmekte, betonarme yüksek yapılarda, maddi ve manevi kayıplara neden olmaktadır. Yapı ve elemanlarında aktif ve pasif koruma olmak üzere iki başlık altında incelenen yangın güvenliği ülkemizde daha çok aktif koruma önlemleriyle ön planda tutulmaktadır. Aktif koruma önlemleri küçük bir elektrik kesintisinde devre dışı kalabilmekte ve deprem gibi doğal afetler sırasında veya sonrasında çıkabilecek yangınlarda yapıların tamamen savunmasız kalmasına neden olabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı pasif koruma önlemleri yangın güvenliği önlemlerinin temelini oluşturmaktadır (Salman, 2017). Betonarme bir yapının yangın nedeniyle maruz kalacağı yüksek sıcaklık etkisine karşı güvenliğinin sağlanması tüm yapı elemanlarının yüksek sıcaklığa karşı dirençli olarak tasarlanmasına bağlıdır. Ancak betonarme yapılar tasarlanırken, elemanların enine kesitlerinin minimum boyutları ile pas payı tabakasının kalınlığı gibi sadece belli temel parametrelerin kullanılması yapının yüksek sıcaklık etkisine karşı dirençli olmasını sağlamakta yeterli olmayabilir (EN 1992-1-2. 2004). Yangın nedeniyle oluşacak yüksek

sıcaklık etkisinin bir yapının nihai sınır durumlarının test edildiği tesadüfi bir tasarım durumu olduğu düşünüldüğünde daha kesin bir yapı güvenliği elde edilebilir (TS EN 1992-1-2, 2004; TS EN 1991-1-2, 2002).

Yangın süresi boyunca ortaya çıkan yüksek sıcaklık, beton ve çelik malzemeden meydana gelen betonarme yapının dayanımını azaltmakta ve beraberinde taşıma gücünü olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun bir sonucu olarak betonarme yapıda yerel veya toptan göçmeler meydana gelebilmektedir. Oda sıcaklığında belirli bir süneklik ve dayanıma sahip olan çelik yapı elemanlarında belirli bir sıcaklık derecesine erişilmesi durumunda ani düzensizlikler ve göçme durumları oluşurken, betonarme yapı elemanlarında yüksek sıcaklık etkisinde beton basınç dayanımında azalma, pas payı tabakalarında kayıp ve sıyrılma adı verilen çeşitli hasarlar oluşmaktadır (Altunışık vd., 2018). Bu durum yangın süresi boyunca yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan betonarme yapıların dayanımında meydana gelen kayıpların hızlı ve güvenilir bir şekilde tespit edilerek binanın yangın sonrası deprem performansının belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Zira günümüzde yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme binalar çoğu zaman ufak çaplı tadilatın geçirilerek kullanılmaya devam edilmektedir. Yapıda yangın nedeniyle göçme meydana gelmemiş olsa bile yapının hasar durumu ve kullanılmaya devam edilip edilmemesi kararının verilmesi, sonradan meydana gelebilecek deprem gibi durumlar için büyük önem arz etmektedir.

1.2. Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri

Beton, yanmayan bir malzeme olup, belirli süreler içerisinde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması halinde zarar görmez ve zehirli duman çıkarmaz (Neville, 2000). Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri, yüksek sıcaklığın derecesi ve etki etme süresine bağlı olarak değişmekle birlikte, kullanılan agreganın türü ve çimento hamuru da bu değişimde büyük rol oynamaktadır. Betonun termal karakteristikleri farklı olan bileşenlere sahip olması, nem ve boşluklu yapısından dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergilemesine neden olmaktadır (Li vd., 2004). Bu sebeple çimento hamuru ve agrega gibi bileşenlerinin yüksek sıcaklık etkisindeki değişimlerini ayrı ayrı incelemek gerekmektedir.

1.2.1. Yüksek Sıcaklığın Çimento Hamuru Üzerindeki Etkisi

Çimento hamuru, yüksek sıcaklığın etki etmesiyle beraber ilk ısıtmadan itibaren oldukça kararsız bir davranış sergilemektedir. Bu kararsız davranışın sebebi, 100 °C ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100 °C'den sonra ise kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı olarak gösterilmektedir (Khoury, 1992).

Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımında azalma oluşmaktadır. Bilindiği gibi beton içerisinde CSH jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları mevcuttur. Çimento hamuru ve agregada yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler betondaki porozite ve gözenek boyutunda farklılaşmalara neden olmaktadır. 20 – 200 °C arasında çimento hamurunda genleşme, 200 °C'nin üzerindeki farklı sıcaklıklarda ise çimento hamurunda büzülme ve agregalarda ise genleşme meydana gelmektedir. Bu değişimler beraberinde çimento hamuru içerisindeki gözenek boyutunu büyütmektedir. 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olmaktadır (Haddad vd., 2004) ve boşluk hacmindeki artış 600 °C'ye kadar devam etmektedir. 900 °C'nin üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ise küçük boşlukların oranı azalmakta ve bu durum sinterleşmeye neden olabilmektedir (Alonso vd., 2003a).

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonda oluşan termal gerilmelere bağlı olarak çatlak oluşumları meydana gelmektedir. Çimento hamurunun sertleşmesi esnasında meydana gelen rötre nedeniyle oluşan mikroçatlakların büyük bir kısmı yüksek sıcaklıkların etkisiyle ilerlemektedir. 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda mikroçatlakların bir kısmı yok olmakta, kalan çatlaklar daha da büyümektedir. 300 °C civarındaki sıcaklıklarda çatlak oluşumları çimento fazına geçerek agregaların etrafını çevirmektedir. Yüksek sıcaklığın 500 °C'yi geçmesi halinde çatlaklar çimento hamurunda oluşmakta ve boyutları 0,01mm'den daha büyük olabilmektedir. Bu yüksek sıcaklıkta agregalarda çatlaklar meydana gelir ve gözle görülebilir şekilde 0,05mm'den büyük boyuta ulaşır (Alonso vd., 2003a).

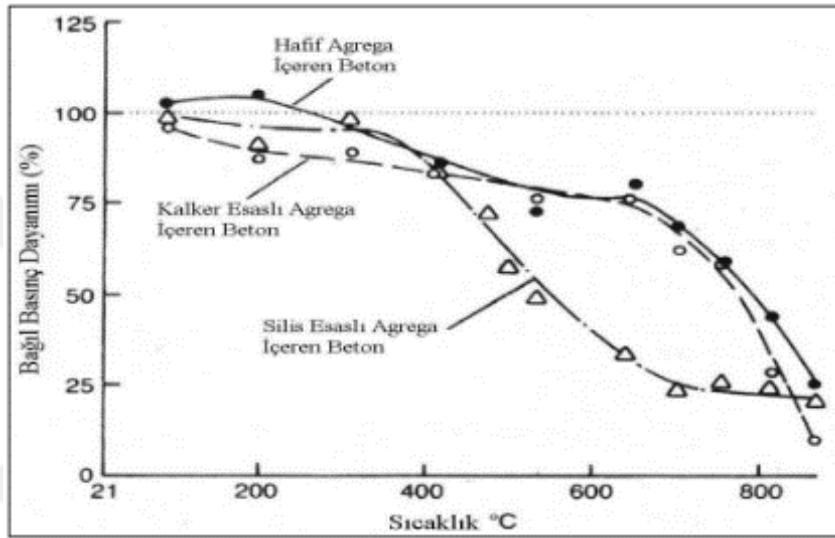
1.2.2. Yüksek Sıcaklığın Agregada Üzerindeki Etkisi

Agregalar betonun %60 – 80 'lik hacmini oluşturan ve betonun ana iskelet yapısını meydana getiren en önemli öğelerden biridir. Agregalar genel anlamda yüksek sıcaklığa dayanıklı olmaklar beraber, mineral yapılarına bağlı olarak betona etki ederler.

Beton karışımında kullanılan silis türevli agregalarda 250 °C ile 575 °C arası sıcaklık değerleri kritik sıcaklık olarak ifade edilmektedir (Perkins, 1986).

Kalker ve dolomit kökenli agregalar 700 °C'ye kadar kararlıdır (Alonso vd., 2003a). Yüksek sıcaklığın 800 °C ile 900 °C'ye yükselmesi halinde CaO ve MgO dönüşümleri meydana gelmektedir.

Khoury (1992), yaptığı bir çalışmada, üç farklı agrega kullanılarak üretilen beton numuneleri yüksek sıcaklık etkisi altında incelemiştir. Çalışmada yüksek sıcaklığın 600 °C'ye kadar uygulandığı durumda kalker türevli ve hafif agregalı betonların silis türevli agregalara göre daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu belirlenmiştir (Şekil 1).

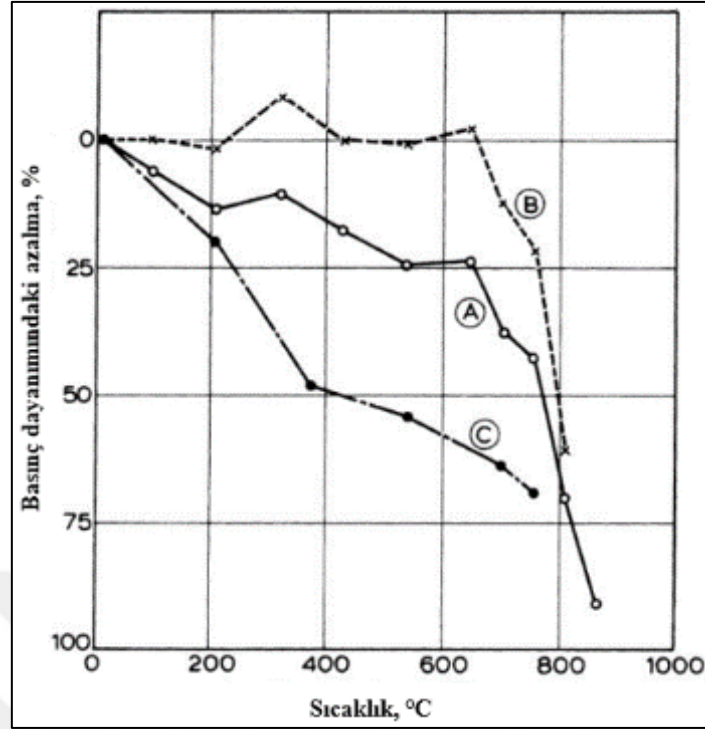


Şekil 1. Agreganın türünün betonun basınç dayanımına etkisi (Khoury, 1992 ve Mahsanlar, 2006)

1.2.3. Yüksek Sıcaklığın Betonun Basınç Dayanımına Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun basınç dayanımındaki değişim hem betonun üretiminde kullanılan malzemelerin özelliklerine bağlı olarak değişmekte hem de yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi, yüksek sıcaklık derecesi, ısınma ve soğuma hız ve şekli ile yükleme durumu gibi çeşitli faktörlere bağlıdır.

Neville (2000), yaptığı bir çalışmada yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişimi incelemiştir. Çalışmada A grubu numuneler herhangi bir yüklemeye maruz kalmadan ısıtılan, B grubu numuneler basınç dayanımlarının %40'ı kadar bir gerilme altında ısıtılan ve C grubu numuneler ısıtılıp 7 gün boyunca 21 °C'de bekletilen numunelerin basınç dayanımlarını göstermektedir. Çalışmanın sonucunda yük uygulanmadan ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının tespit edilmesi yönteminin daha güvenli olduğu belirlenmiştir (Şekil 2).

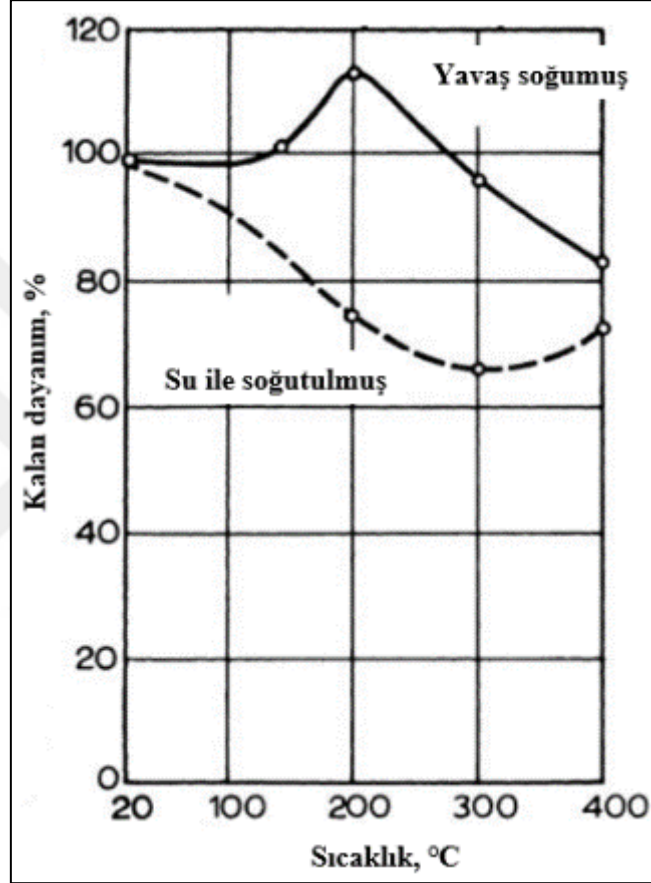


Şekil 2. Betonun basınç dayanımının yükleme durumuna bağlı olarak sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

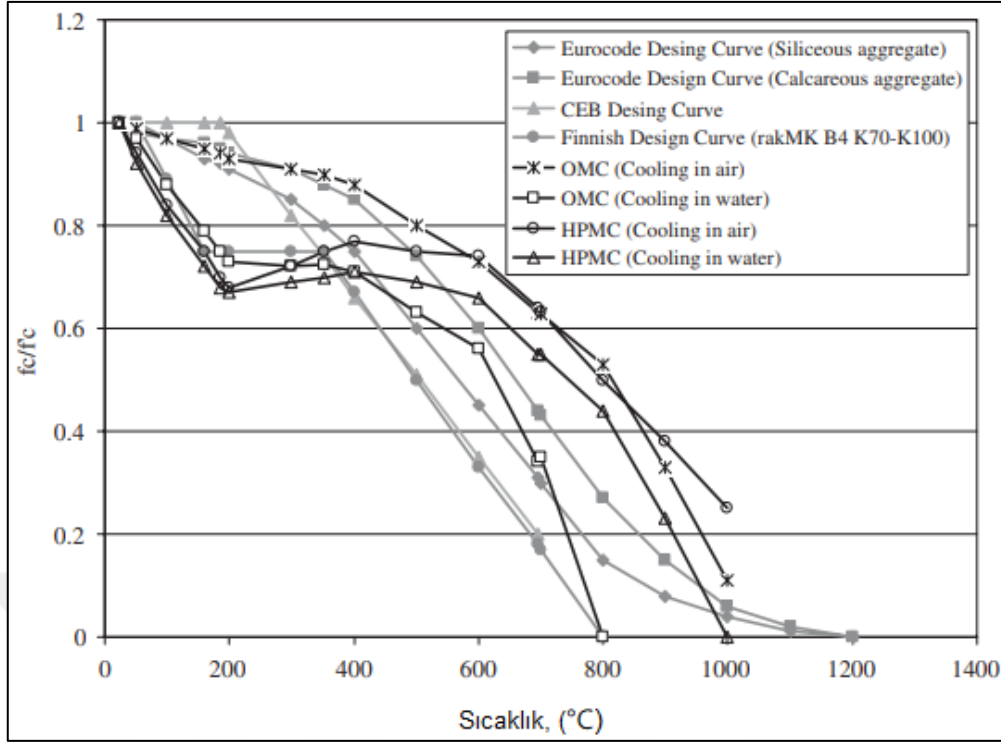
Neville (2000), tarafından yapılan başka bir çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonun soğutulma türünün de basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu belirlenmiştir. Buna göre su ile soğutulmuş olan betonun basınç dayanımındaki azalma, kendi halinde havada soğumuş olan betonlara göre daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 3).

Hüsem (2006), tarafından yapılan çalışmada ise yüksek sıcaklığının normal ve yüksek performanslı mikro betonun basınç ve eğilme dayanımı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, üretilen normal ve yüksek performanslı mikro beton elemanları 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklık etkilerine maruz bırakılmış ve daha sonra farklı şekillerde (suda ve havada) soğutulmuştur. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış normal ve yüksek dayanımlı micro betonlarda sıcaklığın artmasıyla birlikte eğilme ve basınç dayanımının azaldığı, bu azalmanın suda soğutulanlarda daha fazla olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, mikro betonların havada soğutulması durumunda basınç dayanımı kazanımının %13, suda soğutulması durumunda ise %5 olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, yüksek performanslı betonun 800 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra suda soğutulması ve normal betonun 600 °C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra suda soğutulması durumunda deney numunelerinin büyük ölçüde hasar gördüğü ve basınç dayanımlarını kaybettiği belirlenmiştir. Çalışmada, soğutma türünün betonun basınç ve eğilme dayanımını etkilediğini, sıcaklık arttıkça bu

etkinin daha belirgin hale geldiği belirlenmiştir. Yüksek dayanımlı mikro betonun basınç dayanımının 200 °C'ye kadar azaldığı, 200 – 400 °C arasında ise arttığı, normal dayanımlı mikro betonda ise basınç dayanımın sürekli olarak azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4). Normal dayanımlı mikro betonda 600 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda, yüksek dayanımlı mikro betonda ise 800 °C nin üzerindeki sıcaklıklarda numunelerin parçalandığı belirlenmiştir.



Şekil 3. Betonun basınç dayanımının soğutulma türüne bağlı olarak sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)



Şekil 4. Normal ve yüksek dayanımlı mikro betonların basınç dayanımının soğutulma türüne bağlı olarak değişimi (Hüsem, 2006)

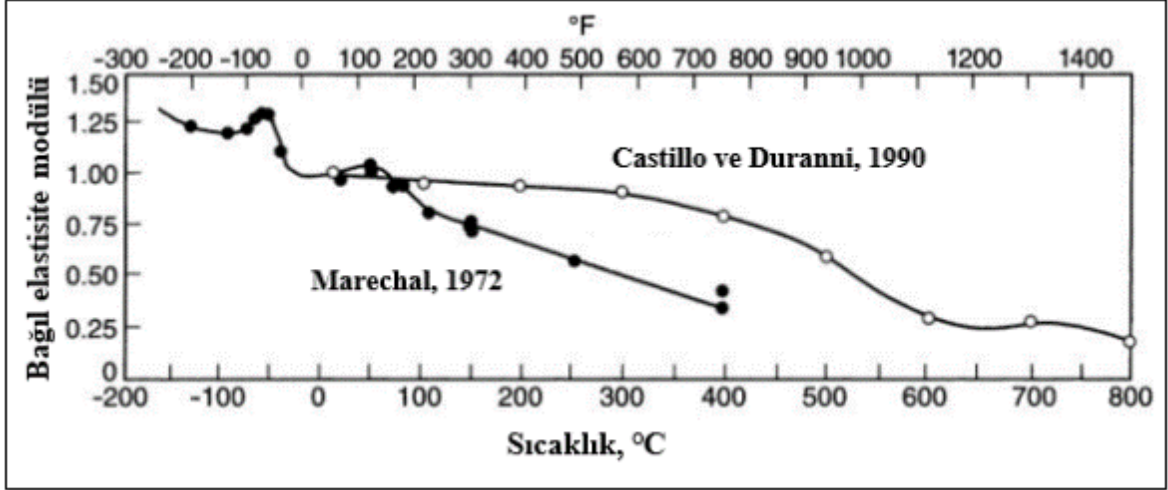
1.2.4. Yüksek Sıcaklığın Betonun Çekme Dayanımına Etkisi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan beton silindir numuneler soğutulduktan sonra yapılan yarmada çekme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre 100 °C'den itibaren çekme dayanımında önemli azalmalar meydana geldiği, 600 °C'de çekme dayanımı kayıplarının % 70 civarına ulaştığı belirlenmiştir (CEB, 1991).

1.2.5. Yüksek Sıcaklığın Betonun Elastisite Modülüne Etkisi

Betonun elastisite modülü sıcaklıktan çok fazla etkilenmektedir. Betonarme yapıların davranışında önemli bir faktör olan elastisite modülünün bu yönüyle yüksek sıcaklık etkisi altındaki değişiminin incelenmesi gerekmektedir. Betonda 21 °C ile 96 °C arasında elastisite modülünün değerinde herhangi bir değişiklik olmamaktadır. Sıcaklığın 121 °C'ye ulaşması ile beraber elastisite modülünün değerinde azalmalar oluşmaktadır. Beton içindeki suyun yüksek sıcaklık etkisiyle uzaklaşmaya başlaması ile birlikte 50 °C ile 800 °C arasındaki

sıcaklıklarda elastisite modülü giderek azalmaktadır (Neville, 2000). Bu azalma Şekil 5’de gösterilmiştir (Castillo ve Duranni, 1990), (Marechal, 1972).

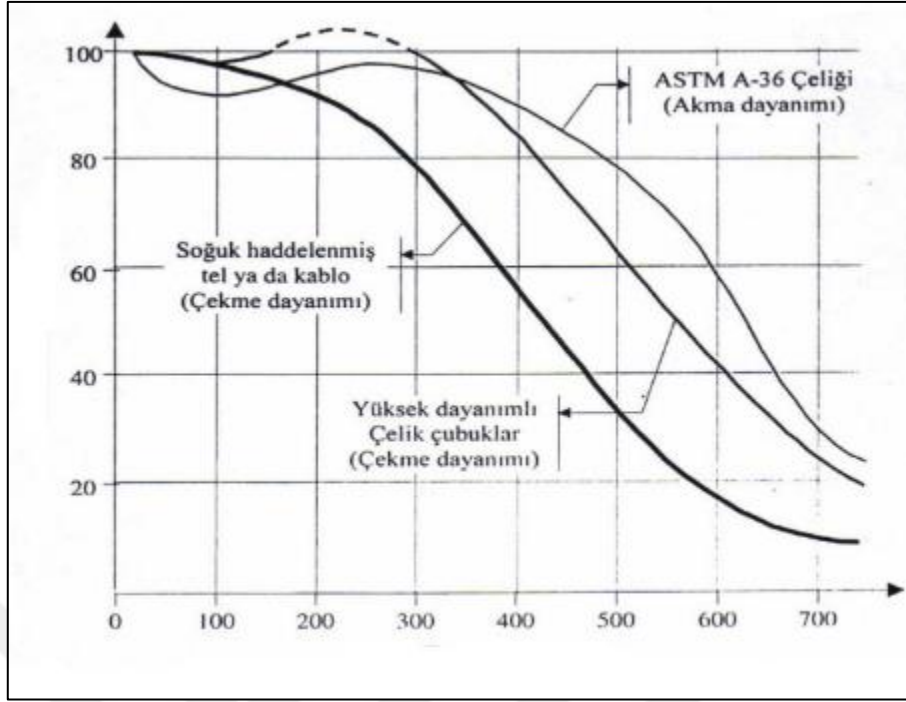


Şekil 5. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi

1.3. Yüksek Sıcaklığın Betonarme Çeliği Üzerindeki Etkileri

Yüksek sıcaklık etkileri altında betonarme çeliğinin davranışı incelendiğinde 200 °C ‘de çeliğin çekme dayanımında artış görülmekle birlikte 300 °C’de çekme ve akma sınırlarında azalma oluşacağı ve 600 °C’de çekme dayanımının güvenli sınırın da altına ineceği belirlenmiştir. Ayrıca, betonarme çeliğinin 600 °C ile 1200 °C arasındaki sıcaklıklarda plastik deformasyona maruz kalacağı bilinmektedir (Akman, 2000). Yüksek sıcaklık etkisi altında farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımlarının değişimi Şekil 6’da gösterilmiştir.

Betonarme çeliğinin elastisite modülü 400 °C’de %15, 600 °C’de %40 civarında azalmaktadır. Bu azalma plastik deformasyonların başlaması sonucunda çeliğin aşırı uzamasına sebep olacaktır.



Şekil 6. Yüksek sıcaklık etkisinde farklı tür yapı çeliklerinin akma ve çekme dayanımları (Baradan vd., 2002)

1.4. Konu ile İlgili Yapılan Bazı Çalışmalar

Son yıllarda yangın vb. sebeplerden dolayı meydana gelen yüksek sıcaklıkların yapı elemanları üzerindeki etkisinin belirlenmesi amacıyla araştırmacılar tarafından hem deneysel hem de sayısal olarak birçok çalışma yapılmaktadır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışı başlığıyla yapılan bu çalışma konusu ile ilişkili olan güncel literatür aşağıda verilmektedir.

Erdem (2010), yüksek sıcaklık koşullarına maruz kalan T kesitli betonarme kirişlerin eğilme taşıma gücünün nasıl değiştiğini incelemiştir. Bu araştırmanın temel amacı, ISO834 standardında belirtilen formülasyon kullanılarak betonarme kiriş kesitlerine etki eden sıcaklığı hesaplamaktır. Ardından, Laplace ısı iletim denklemleri yardımıyla kiriş kesiti içindeki sıcaklık dağılımı ve dayanım kayıpları belirlenmiştir. Sonlu farklar yöntemiyle yapılan analizler sonucunda, kesit içindeki sıcaklık dağılımı küçük parçalara bölünerek elde edilmiştir. Bu küçük parçalardaki dayanım kayıpları dikkate alınarak çekme ve basınç kuvvetleri hesaplanmış ve buna bağlı olarak moment taşıma kapasiteleri belirlenmiştir. Araştırmanın devamında, T kesitli betonarme kirişlerin yüksek sıcaklık altındaki sıcaklık

dağılımını belirlemek için bir yöntem önerilmiştir. Bu önerilen yöntemin güvenilirliği test edilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, önerilen yöntemin özellikle tablalı kiriş kesitlerinde sıcaklık dağılımının belirlenmesinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma tablalı kesitlerin yüksek sıcaklık etkisine karşı daha başarılı olduğunu ortaya koymuştur. Bu başarının nedeni, tablalı kesitin döşeme kısmının kirişin çekme bölgesini yandan kuşatması ve donatılardaki sıcaklık artışını engellemesidir. Ek olarak, sıcaklık dağılımının tüm kat kesiti için değil, sadece hesap yapılacak tablalı kesit için belirlenmesini sağlayacak bir hesaplama yöntemi önerilmiştir. Bu öneriye göre, sıcaklık döşeme kalınlığı içinde sabit kalırken, tablalı kesitin döşeme içinde kalan sol ve sağ kenarlarındaki sıcaklık değişiminin bir boyutlu olduğu ve döşeme kalınlığı içindeki sıcaklık değişiminin buna göre hesaplanabileceği belirtilmiştir. Ancak, çalışmanın sadece T kesitli betonarme kirişler üzerinde yapılmış olması ve yüksek sıcaklık etkisi sonrası dinamik davranışın incelenmemiş olması, çalışmanın kapsamını sınırlamıştır.

Ozbolt vd., (2013), betonarme kirişlerin yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında gösterdiği davranışları incelemiştir. Çalışmada, zamana bağlı çözümleme için üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (FE) yöntemi kullanılarak termo-mekanik bir model benimsenmiştir. Araştırmada kullanılan betonarme kirişlerin deneysel detayları literatürden alınmış ve aynı yükleme koşulları sayısal olarak modellenmiştir. Kirişler, önce ISO 834 yangın yüküne, ardından da dört noktalı eğilme yüküne maruz bırakılmıştır. İncelenen kirişler arasında 1, 1,5 ve 2 saatlik yangına maruz kalanlar ile ısıtılmamış olanlar bulunmaktadır. Yangına maruz kalma süresinin artmasıyla birlikte kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve başlangıçtaki dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Çalışma, deneysel verilerin kısıtlı olduğunu belirtmekle birlikte, sayısal çözümlemenin daha fazla bilgi sağlayabileceğini öngörmüştür. Elde edilen sonuçların literatürdeki deneysel çalışmalarla uyumlu olduğu belirtilmiştir. Özellikle, 1,5 saatlik yangına maruz kalmanın kirişler üzerinde ciddi hasara neden olduğu vurgulanmıştır. Araştırma, modelin kirişlerin genel tepkisini öngörmesinin yanı sıra, deneysel olarak gözlemlenmesi zor olan bazı olguları sayısal olarak araştırmak için etkili bir araç olabileceğini vurgulamıştır.

Hacıemiroğlu (2014) yaptığı çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme bir yapının deprem etkisindeki davranışını incelemiştir. Çalışmada yangın etkisinde kalan kat sayısı, pas payı ve üç farklı yangın süresi dikkate alınarak otuz farklı yangın senaryonu oluşturulmuştur. Yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme yapının deprem performansı araştırılmıştır. Yapılan testler neticesinde

yüksek sıcaklığın etki etme süresinin artmasının yapının taşıma gücünü olumsuz etkilediği ve pas payının artmasının yüksek sıcaklık etkisinin donatıya ulaşmasını engellemesi nedeniyle dayanım kayıplarını azalttığı sonucuna varılmıştır.

Balaji vd., (2015) yaptıkları çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve yapıların dinamik davranışının değişimi üzerine bir inceleme yapmışlardır. Çalışmada betonarme kolon – kiriş – döşemeden oluşan bir yapı ile döşemesiz çerçeve bir yapı sonlu eleman modelleme tekniği kullanılarak modellenmiş ve bu modeller ISO 834 standart yangın eğrisine uygun olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çerçeve yapıda yangında sınırlayıcı durumlar nedeniyle ilave iç kuvvetlerin oluştuğu ve oluşan iç kuvvetlere bağlı deformasyonların meydana geldiği tespit edilmiştir. Analizler sonucunda çerçeve yapının göçme mekanizmasının kolon kırılma mekanizmasına bağlı olduğu görülmüştür. Ancak bu çalışma mevcut haliyle sadece yüksek sıcaklık etkisinin betonarme çerçeve yapılarda oluşturduğu hasarı incelemiş olup, yüksek sıcaklık etkisi sonrası yapının deprem performansının nasıl değiştiği hakkında bir bilgi vermemektedir. Çalışma bu yönüyle sınırlıdır.

Kamath vd., (2015) yaptıkları çalışmada, depremin ardından meydana gelen yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme çerçevenin davranışını incelemişlerdir. Çalışmada, dört adet 300 x 300 mm enkesitli ve 3000 mm yüksekliğinde kolon ile 230 x 230 mm enkesitli kiriş elemanlar kullanılarak tek katlı betonarme çerçeve yapı oluşturulmuştur. Betonarme çerçeve yapının kolonları 6750 x 8550 mm boyutlarında ve 900 mm kalınlığında radye temel içerisine gömülmüştür. Betonarme çerçevenin üretiminde kullanılan betonun basınç dayanımının 33.6 MPa olarak belirlenmiştir. Kolonlarda 8 adet Ø20 boyuna donatı ve gövdede 150 mm aralıklarla, sarılma bölgesinde ise 75 mm aralıklarla Ø10 sargı donatısı kullanılmıştır. Kirişlerde 3 adet kiriş üstünde ve 3 adet kiriş altında olmak üzere 6 adet Ø16 boyuna donatı ile 100 mm aralıklarla Ø8 sargı donatısı kullanılmıştır. Çalışmada üç aşamalı tam ölçekli yükleme testleri yapılmıştır. Birinci aşamada, döngüsel yarı statik yanal yükler tarafından üretilen deprem testi, ikinci aşamada yangın testi ve üçüncü aşamada ise deprem ve yangından zarar görmüş betonarme çerçevenin kalan kapasitesini değerlendirmek için monoton bir itme testi gerçekleştirilmiştir. Ancak bu çalışmada deprem ve ardından meydana gelen yangın nedeniyle yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonarme çerçevede oluşan dayanım kaybını belirlemek amacıyla sadece monoton bir itme testi gerçekleştirilmiş, deprem gibi tekrarlı yük altındaki davranış

araştırılmamıştır. Betonarme çerçevenin döngüsel ve yarı statik yanal yüklemekten sonra yapılan yangın testinde literatürdeki (Thomas ve Heselden, 1972) uygulamalara uygun olarak kerosen yağı kullanılarak 900-1000 °C arasında sıcaklık değerine ulaşılan bir bölme yangını oluşturulmuştur. Yangın yüklemesinin ardından betonarme çerçevenin kalan kapasitesini belirlemek ve döngüsel ile yangın yüklemelerinde meydana gelen dayanım ve rijitlik kayıplarını ölçmek için monoton bir itme yüklemesi yapılmış, yük etkisi altında yatay ötelenme ölçülmüştür. Test verilerini alabilmek amacıyla betonarme çerçeve, termokuplur, dayanım ölçerler, doğrusal değişken diferansiyel dönüştürücüler (LVDT'ler) ve basınç sensörlerinden oluşan çok sayıda sensörle iyi bir şekilde takip edilmiştir. Sıcaklık dağılımı, yer değiştirmeler ve gerilmelerden oluşan geniş bir sonuç veri tabanı elde edilmiştir. Çalışmada, meydana gelen olağandışı derin duman katmanından dolayı, bölme yangını olarak tasarlanan yangının, sıcak üst katman ve soğuk alt katman bölme yangın modeline uymadığı belirlenmiştir. En yüksek sıcaklık değerinin bölmenin orta üçte birlik kısmında olduğu ve üst katmanda orta sıcaklık değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada en büyük yangın hasarına önce kolonların daha sonra da kirişlerin maruz kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, betonarme çerçevenin simüle edilmiş deprem yüklemesinin neden olduğu çatlakların, beklendiği gibi yangın hasarını şiddetlendirmedeği tespit edilmiş ancak kiriş ve kolonlardaki hasarın bu elemanlar üzerinden ısı transferini hızlandırdığı sonucuna varılmıştır. Kolon ve kirişlerin orta bölümleri konumlarından bağımsız olarak yangın kaynağına yakınlıkları nedeniyle uç bölümlerinden daha yüksek sıcaklıklara ulaşmıştır.

Kada vd., (2016) tarafından yürütülen çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüksek açıklıklı çelik kirişlerin davranışını incelemek amacıyla ANSYS yazılımı ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Çalışmanın odak noktası, göçme süresi, kirişin orta açıklık eğilmesi ve göçme sırasındaki sıcaklık gibi parametreleri tahmin etmek üzerine kurulmuştur. Sonlu elemanlar modelleri, farklı yük seviyeleri altında sunulmuş çeşitli senaryolar incelenmiştir. Araştırma, yakın aralıklı açıklıklara sahip kirişlerin yangın durumunda dayanım göçmesinin çoğunlukla kirişin gövdesinden kaynaklandığını göstermiştir. Bu sonuçlar, çelik kirişlerin yangına maruz kalma durumunda davranışlarını anlamak ve tasarım süreçlerinde dikkate almak için önemli bir katkı sağlamaktadır.

Kodur ve Agraval (2016) tarafından yapılan çalışmada, yangın geçirmiş betonarme kirişlerin kapasitesini değerlendirmek amacıyla bir metodoloji önerilmiştir. Bu yöntem, betonarme kirişlerin çevresel koşullar altında gösterdiği yapısal tepkiyi, yangına maruz kaldıkları süreçte termo-mekanik tepkiyi ve yangın sonrası soğuma sürecindeki tepkiyi üç

aşamada ele almaktadır. Betonarme çeliğinin ve betonun farklı malzeme özellikleri, yangına maruz kaldıkları aşamada, soğutma aşamasında ve soğuma sonrası analiz aşamasında dikkate alınmıştır. İlave olarak, yangın sonrasında betonarme kirişlerin dayanımı değerlendirilirken, ilgili yük seviyeleri, belirli yangın senaryoları, sınır koşulları ve kirişlerde meydana gelen plastik deformasyonlar da incelenmiştir. Önerilen metod, ayrıntılı bir sayısal modelin kullanıldığı ABAQUS sonlu elemanlar bilgisayar programı üzerinde uygulanmıştır. Sayısal modelden elde edilen tahminler, yangına maruz kalan betonarme kirişlerin dayanımını değerlendirmek için yapılan deneylerde ölçülen parametrelerle uyumlu olmuştur. Ayrıca, sonlu eleman çözümlemesinden elde edilen dayanım sonuçları, maksimum donatı çeliği sıcaklıklarını dikkate alarak basitleştirilmiş kesitsel çözümlemeden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, sonlu elemanlar çözümlemesinin, basitleştirilmiş kesitsel çözümlemeden elde edilen dayanım sonuçlarından daha gerçekçi olduğunu göstermiştir. Yangına maruz kalan betonarme kirişlerinin dayanımının değerlendirilmesinde önerilen metodun uygulanabilirliği, bir örnek olay ile desteklenmiştir.

Raouffard ve Nishiyama (2016) yaptıkları çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme yapıların kalan dayanımının değişimini incelemiştir. Çalışmada iki katlı betonarme çerçeve yapının yangın sonrasındaki durumunun yapısal olarak değerlendirilebilmesi için deneysel ve sayısal çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla, iki adet 1250 x 250 x 250 mm boyutlarında kolon ve bir adet 2400 x 200 x 250 mm boyutlarında kirişten üretilen betonarme çerçeve kullanılmış, betonarme çerçevenin geometrisi, 6500 x 2000 x 1000 mm tam ölçekli bir fırının mevcut optimum montaj alanını kullanacak şekilde belirlenmiştir. Betonarme çerçevede kullanılan betonun basınç dayanımı 31,3 MPa olup, kolon ve kirişlerde kullanılan çapı 19,1 mm ve 15,9 mm olan boyuna donatıların akma dayanımı sırasıyla 408 MPa ve 351 MPa olarak belirlenmiştir. Çapı 9,53 mm olan enine donatıların akma dayanımı ise 377 MPa olarak kullanılmıştır. Servis yüklerine tabi tutulan test numunesinin alt katı, ISO-834 standardı yangın testine uygun olarak 120 dakika ısıtılmış, yangın seyri sırasında tatmin edici bir yapısal performans sergilemiş ve soğutulduğunda, yangın öncesi sapma durumunun çoğunu önemli ölçüde geri kazanmıştır. Test numunesi, altı ay boyunca % 50 ~ 60 hava nemi ile sıcaklıkta (15 ~ 18 °C) test laboratuvarında tutulmuş ve sonrasında soğutulmuş test numunesinin yeniden servis edilebilirliğini ve kalan yük taşıma kapasitesini araştırmak için çevrimsel düşey yükleme gerçekleştirilmiştir. Test sonuçlarına göre soğutulmuş betonarme çerçeveye ait kiriş elemanın ortasında beş kat daha fazla (3,87 mm) bir sehim meydana geldiği belirlenmiştir.

Çalışmada, betonarme çerçevenin yangın sonrası kalan dayanımını tespit etmek için sayısal bir modelleme yaklaşımı sunulmuş, test ve analiz sonuçları karşılaştırıldığında, yangın hasarı nedeniyle test numunesinin yük taşıma kapasitesinin % 30'unu kaybettiği belirlenmiştir. Çalışma yangın sonrası soğutulmuş yapının güvenli bir şekilde işlevsel olup olmadığını veya acil onarım gerekip gerekmediğini belirlemek açısından büyük önem taşımaktadır. Ancak bu çalışmada yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevenin deprem yükü gibi tekrarlı yatay yük etkileri altındaki performansı incelenmemiş, sadece çerçeve yapının kiriş elemanının yüksek sıcaklık etkisi sonrası kalan dayanımını değerlendirmek adına çevrimsel düşey yükleme yapılmıştır.

El-Fitiany ve Youssef (2017) yaptıkları çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevenin performansını incelemişlerdir. Çalışmada, betonarme çerçevenin yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış bölümlerindeki sıcaklık dağılımını hesaplayabilmek amacıyla geliştirilmiş basit bir ısı transfer tekniği kullanılmıştır. Böylece eğilme ve eksenel rijitlik ile sınırlandırılmamış termal deformasyonlar kesit analizi kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada önerilen yöntem betonarme çerçevenin yangın performansını tahmin etmek için kullanılan mevcut ticari yapısal analiz yazılımları ile kolayca uygulanabilir. Önerilen yöntem, ısı transferi ve doğrusal olmayan gerilme analizleri yapmak için yangına maruz kalan bir bölümü sonlu elemanlara veya katmanlara bölme ihtiyacını ortadan kaldırmıştır. Standart olmayan yangın senaryolarında önerilen yöntemi doğrulamak için ek deneysel ve analitik çalışma gereklidir.

Açıkel (2017) yaptığı çalışmada, betonarme kısa kolonları yangın nedeniyle oluşan yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakarak beton dayanımı, pas payı ve yüksek sıcaklığın etki etme süresi parametrelerinin değişiminin betonarme kolonun normal kuvvet taşıma gücüne etkisini deneysel olarak incelemiştir. Bu amaçla çalışmada 12 farklı tipte toplam 60 adet 25 x 30 x 30 cm boyutlarında betonarme kısa kolon numunesi üretilmiştir. Üretilmiş olan bu numunelerde 3 farklı beton dayanım sınıfı, 4 farklı pas payı kalınlığı ele alınarak 30, 60, 90 ve 120 dakikalık süreler içerisinde yüksek sıcaklık etkisi uygulanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde yüksek sıcaklık etkisine maruz kalma süresinin artması halinde betonarme kısa kolon numunelerin normal kuvvet taşıma gücünün azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca yüksek beton dayanımına sahip olan numunelerde pas payının artması ve yüksek sıcaklığın etki süresinin uzaması halinde daha büyük kapasite kaybının meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Shah vd., (2017) yaptıkları çalışmada, deprem sonrasında meydana gelen yangın nedeniyle oluşan yüksek sıcaklık etkisinin betonarme çerçevede oluşturduğu hasarda donatı detaylandırmasının, dolgunun ve hasar öncesi seviyenin etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, enkesit boyutları 300 x 300 mm olan dört adet kolon, enkesit boyutları 230 x 230 mm olan dört çatı kirişi, enkesit boyutları 230 x 230 mm olan dört bağlantı kirişi ve 120 mm kalınlığında çatı döşemesinden oluşan betonarme çerçeve üretilmiştir. Betonarme çerçevenin tüm elemanları monolitik olarak dökülmüş ve kolonlar 6900 x 8700 mm boyutundaki 900 mm kalınlığında bir betonarme radye temele bağlanmıştır. Betonarme çerçevenin test edilmesinde üç aşamalı bir deney yöntemi benimsenmiştir: a) betonarme çerçevenin simüle edilmiş yarı statik çevrimsel yatay yüke tabi tutulması, b) hasarlı çerçevenin bir saatlik kompartıman yangınına maruz bırakılması c) artık yük testi. Çalışmada deprem sonrası yangın etkisini belirlemek üzere yeni bir deney düzeneği geliştirilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Sonuçlar (gerilme dağılımları, yer değiştirmeler ve sıcaklıklar açısından) yangında, depremden zarar görmüş betonarme yapılar hakkında tam gelişmiş ve hasarın aşamaların belirlenmesinde değerli bilgiler sağlamıştır. Sonuçlar, kapalı bir alan içindeki yapısal sıcaklıklarda önemli farklılıklar göstermiştir ve birçok tasarım yangınındaki sıcaklık değerlerinin bu nedenden dolayı hatalı olduğunu ortaya çıkartmıştır. Donatının sünek detaylandırılmasıyla tasarlanan betonarme çerçeveler, yangın öncesi ve sonrası daha iyi yatay yük taşıma kapasiteleri sergilemiştir. Ön hasar seviyesi, yapısal elemanlarda sıcaklık artışı etkilemiş ve elemanların dökülmesini de hızlandırmıştır. Öyle ki, yüksek başlangıç hasar seviyeleri, çerçevenin yapısal elemanlarında daha yüksek sıcaklıkların gelişmesine yol açan daha fazla sayıda geniş çatlaklara neden olmuştur. Deneyler, sünek olmayan betonarme çerçevelerin levha ve kabuk gibi ince elemanlarının deprem sonrası yangın olaylarında dökülmeye karşı savunmasız olduğunu göstermiştir. Mevcut çalışma, normal dayanımlı betona sahip hasarlı beton elemanların (özellikle sünek olmayan elemanlarda) da çatlamaya duyarlı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmada ayrıca, farklı malzemelerin farklı sıcaklık profilleri ortaya çıkarması nedeniyle standart yangın eğrisinin kullanılmasının gerçek yangın senaryoları için dezavantaj oluşturacağı belirlenmiştir. Tuğla dolgu duvarlar, betonarme yapı elemanlarına yalıtım sağlamış ve ısı bu elemanlara geçişini yavaşlatmıştır. Bu sebeple yığma duvarlara entegre edilen kolon ve kirişler tasarlanırken kagir duvarların bu faydalı etkisi göz önünde bulundurulmalıdır. Çalışmada, deprem sonrası meydana gelen yangın etkisinin betonarme çerçevede oluşturduğu dayanım kaybı incelenmiş, ancak yangın olayının ardından meydana

gelebilecek deprem etkisi üzerinde durulmamıştır. Oysaki deprem hasarı almamış bir yapının meydana gelen yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalması ve yüksek sıcaklık etkisinin yapıda oluşturduğu hasar incelenmeden yapının kullanımına devam edilmesi günümüzde çok sık karşılaşılan bir durum olup, mutlaka üzerinde çalışılması gereken bir konu olduğu düşünülmektedir.

El Tayeb vd., (2017) yapmış oldukları çalışmada, sıcaklık değişiminin betonarme kiriş ve çerçevedeki sabit ve hareketli yüklerin varlığını ve davranışı nasıl değiştirdiğini araştırmışlardır. Bu amaçla, ABAQUS programını kullanarak betonarme kiriş ve çerçeveleri malzemenin çatlama davranışını da hesaba katarak uygun şekilde modellemişlerdir. Doğrusal ve doğrusal olmayan sıcaklık gradyanlarını da dikkate alarak termal analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda betonarme kiriş ve çerçevelerin davranışının doğrusal ve doğrusal olmayan sıcaklık gradyanına bağlı olarak önemli ölçüde değiştiği belirlenmiştir. Özellikle analizlerde doğrusal olmayan sıcaklık gradyanının kullanılmasının daha gerçekçi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Kumar ve Srivastana (2017) yapmış oldukları çalışmada, yangına maruz kalan dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin davranışını araştırmışlardır. Bu amaçla sayısal modellemeye özel olarak vurgu yapılarak hem deneysel hem de numerik çalışmalar ele alınmıştır. Çalışmada dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin yüksek sıcaklık etkisi altındaki davranışını simüle etmek amacıyla geliştirilen sayısal modelleme stratejilerinin uygulanabilirliği incelenmiştir. Dolgu duvarlı betonarme çerçevelerin termo-mekanik davranışının modellenmesinde sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin eksikliği, doğrulama için deneysel çalışmaların azlığı ve termal-yapısal analiz arasındaki bağlantıdaki idealleştirmelerin engel teşkil ettiği belirlenmiştir.

Ryu vd., (2018) farklı kesit özelliklerine ve yükleme durumlarına sahip on iki adet betonarme kirişi, ISO 834 standart yangın eğrisi kullanarak yüksek sıcaklıklara maruz bırakmıştır. Yangın çözümlemesi sonrasında, yangından etkilenen kirişlere dört noktalı yükleme deneyi uygulanmıştır. Bu işlemler önce deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve ardından program yardımıyla sayısal çözümlemeler yapılmıştır. Yangından etkilenen kirişlerin yapısal analizlerinde ABAQUS programı kullanılmıştır. Yangın etkisine maruz kalan kirişlerin kesit boyutlarına bağlı olarak ısı özellikleri ve yapısal davranışları incelenmiştir. Deneylerde elde edilen sıcaklık verileri, kirişin kesiti içindeki konuma göre 100 ile 600°C arasında değişmiştir. Sonuçlar, yük seviyesinin artmasıyla birlikte sıcaklık dağılımlarının değiştiği ve bu değişimin de yüklemekten kaynaklanan çatlak yayılımlarıyla

açıklanabileceğini göstermiştir. Yangın sıcaklığının artmasıyla birlikte kirişlerdeki göçmenin arttığı belirlenmiştir. Betonarme kirişlerin yüksek sıcaklık altındaki etkilerini incelemek için kesit boyutu, yük seviyesi ve yangına maruz kalma süresi gibi faktörler arasındaki ilişkiyi anlamak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu vurgulanmıştır.

Li vd., (2019) yapmış oldukları çalışmada, farklı kolon-kiriş eğilme kapasitesi oranlarına sahip betonarme çerçevelerin yangın sonrasındaki sismik davranışını araştırmışlardır. Bu amaçla dört adet güçlü kiriş-zayıf kolon ve güçlü kolon-zayıf kiriş elemanı üretmişlerdir. Üretilen betonarme çerçevelerin yangın testi fırın odasında yapılmış, daha sonra düşük frekanslı döngüsel yük altında yarı statik yüklemeler yapılmıştır. Çalışmada yangına maruz kalma ve kolon-kiriş eğilme kapasitesi oranı faktörlerinin mekanik performans, süneklik, rijitlik ve enerji kaybı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, betonarme çerçevelerin nihai taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik faktörü ve enerji yayma kapasitesinin yangına maruz kaldıktan sonra azaldığını göstermiştir. Özellikle güçlü kiriş zayıf kolon çerçevesinin taşıma kapasitesinin daha da azaldığı belirlenmiştir. Çalışmada yangın sonrası betonarme çerçevelerin akma yer değiştirmeleri artmasına rağmen, nihai yerdeğiştirmeleri azalmıştır. Ayrıca güçlü kolon zayıf kiriş çerçevesi oda sıcaklığında kiriş uç plastik mafsallık şeklinde bozulurken, yangına maruz kaldıktan sonra kırılma modu kolonda kesme bağ kırılmasına dönüşmüştür.

Pires vd., (2019) yapmış oldukları çalışmada, betonarme kirişlerin yangın etkisi altındaki davranışını araştırmışlardır. Bu amaca ulaşmak için sayısal formüller geliştirilmiş ve bu formüllerin doğruluğu değerlendirilmiştir. Çalışmada yangın analizi ve yangın yapısal analizi olmak üzere iki aşama gerçekleştirilmiştir. Yangın analizi aşamasında sonlu eleman metodu kullanılarak yapı elemanlarının kesitlerindeki sıcaklık alanını belirlemek amaçlanmıştır. Yangın yapısal analizinde ise sonlu eleman formülasyonu kullanılarak yangın etkisindeki yapıların ikinci dereceden doğrusal olmayan analizi gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, betonarme kirişin yüksek sıcaklık altında doğrusal olmayan analizlerinden elde edilen sonuçlar, literatürde mevcut olan sayısal ve deneysel çözümlerle karşılaştırılmıştır.

Alcaino vd., (2020) yaptıkları çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme çerçevelerin yangın sonrasındaki dayanımının değişimini incelemiştir. Çalışmada bina gerçekliğini temsil etmek için on sekiz adet kolon ve kiriş elemanı üretilmiştir. Kolon enkesit boyutları 200 x 250 mm, yüksekliği ise 600 mm olarak, kiriş enkesit boyutları ise 150 x 250 mm, uzunluğu da 650 mm olarak tasarlanmıştır.

Çalışmada yüksek sıcaklık etkisiyle betonarme çerçevede meydana gelen mukavemet kaybını belirlemek amacıyla kolon ve kiriş üzerinde yüksek sıcaklık etkisinden önce ve sonra tahribatsız deneyler yapılmış, literatüre (Alcaino vd., 2018) uygun olarak yüksek sıcaklık etkisini temsil etmek için 700 °C ile 1000 °C arasındaki kontrollü bir sıcaklık elektrikli fırın kullanılarak sağlanmıştır. Çalışmada, kolonların tüm yan yüzeyleri, kirişlerin ise dört yan yüzeyinden üçü 0, 30, 60, 120 ve 180 dakika sürelerde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası numuneler kendi halinde (su veya diğer kimyasal maddeler olmadan) soğumaya bırakılmıştır. Kolonları dayanımı tek eksenli basınç deneyleri ile kirişlerin dayanımı ise dört noktalı eğilme deneyleri ile belirlenmiştir. Sonuç olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan çerçeve yapı elemanları kolon ve kirişler için yüksek sıcaklığa maruz kalma süresi arttıkça, dayanım ve rijitliğin azaldığı belirlenmiştir. Tahribatsız deney verileri ile dayanım kaybı arasında kurulan korelasyon ile yangın nedeniyle oluşan yüksek sıcaklık etkisi sonrası mevcut dayanımın hızlı bir şekilde belirlenmesi sağlanmıştır. Bu da yanmış bir betonarme bina üzerinde gelecekteki eylemlerin tanımlanmasına yardımcı olacaktır. Ancak bu çalışmada yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve yapıda sadece yangın sonrası dayanımdaki değişim incelenmiş, çerçevenin yüksek sıcaklık etkisinden sonra maruz kalacağı deprem gibi dinamik yük etkileri altındaki davranışı araştırılmamıştır.

Vitorino vd., (2020) yaptıkları çalışmada, sismik olayların neden olduğu hasarın, betonarme çerçevelerin yüksek sıcaklık dayanıklılığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışmada, SAFIR programı kullanılarak, betonarme çerçeve yapının termal ve mekanik analizleri yapılmıştır. Betonarme çerçeve kat yüksekliği 300 cm ve açıklığı 600 cm olan iki katlı ve tek açıklıklı olarak tasarlanmış olup, kiriş genişliği 30 cm, yüksekliği 60 cm, kolon enkesiti ise 40 x 40 cm olarak belirlenmiştir. Analizlerde değişken olarak, çerçevelerdeki hasarın türü (D0/D1, D2 ve D3) ve kolonlardaki yangın sınırı sayısı alınmıştır. D0 hasar türü sağlam bir bölüme, D1 hasar türü küçük çatlaklara sahip bölüme karşılık gelmektedir. D2 hasar türü beton paspayı tabakasının kısmen döküldüğü, D3 hasar türü ise paspayı tabakasının tamamen döküldüğü çelik donatının açıkta kaldığı duruma karşılık gelmektedir. Bununla birlikte D0/D1, D2 ve D3 hasarlarının sırasıyla Acil Kullanım (IO), Can Güvenliği (LS) ve Göçmeyi Önleme (CP) 'ye karşılık geldiği düşünülmüştür. Termal analiz, standart yangın eğrisi ISO 834 kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, depremin betonarme çerçevelere verdiği hasarın çerçevelerin yangın dayanımını azalttığını göstermiştir. Çalışmada betonarme çerçeveyi oluşturan kolonlarda üç veya dört yangın

sınırının dikkate alınmasının, çerçevelerin göçmesine kadar olan süre içerisinde, yerdeğiştirmelerde önemli değişiklikler yaratmadığı belirlenmiştir. Tüm bölgelerde hasar sınır D3 ve kolonlarda dört yangın sınırı olan betonarme çerçevenin, en kısa sürede göçen yapı olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan ve ciddi hasar olarak kabul edilen etki altında betonarme çerçevelerin göçmesine kadar geçen sürenin, yangına maruz kalmayan betonarme çerçevelere kıyasla yaklaşık olarak iki saat daha düşük olduğu belirlenmiştir. Çalışmada, büyük bir depremden sonra daha az hasar gören betonarme yapıların, deprem sonrası yangına daha dayanıklı olacağı bu nedenle deprem sonrası yangına dayanıklılığı iyi olan bir yapıya sahip olmanın ilk şartının, yapının depreme karşı iyi davranış gösterecek şekilde tasarlanması olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak bu çalışmada deprem hasarı seviyesi ile yangın sınırının betonarme çerçevelerin yüksek sıcaklık performansını nasıl etkilediği araştırılmış, yüksek sıcaklık sonrası sismik davranıştan bahsedilmemiştir. Çalışma bu yönüyle sınırlıdır.

Elshorbagy ve Abdel-Mooty (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonarme kirişlerin hem ısıl tepki hem de yapısal tepkisini etkileyen önemli parametreleri belirlemek için bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmada, hem mekanik yükler hem de yangın yükleri altında herhangi bir betonarme elemanını simüle etme yeteneğine sahip güvenilir bir algoritma geliştirilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen algoritma, ısıl çözümleme ile yapısal çözümlemenin birleştirilmesine dayanmaktadır. Bu yaklaşım, iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluk gibi ısıl malzeme özelliklerini hesaba katarak doğrusal olmayan olarak beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, ısıl genleşme katsayısı, basınç dayanımı ve çeliğin akma dayanımı gibi mekanik özellikleri dikkate almıştır. Geliştirilen algoritma, detaylı sayısal sonlu eleman modelleri kullanılarak ANSYS programıyla elde edilmiştir. İncelenen ana parametreler arasında, beton basınç dayanımının artırılması, beton paspayanın artırılması ve kirişin yatay rijitliğinin artırılması yer almıştır. Bu çalışmanın amacı, betonarme kirişlerin hem ısıl hem de yapısal davranışını daha iyi anlamak ve tasarım sürecinde kullanılabilecek güvenilir bir analiz yöntemi geliştirmektir.

Chaudhary vd., (2020) yaptıkları çalışmada, yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme çerçevenin sünekliğindeki değişimi incelemişlerdir. Çalışmadaki betonarme çerçeve, enine kesiti 300 x 230 mm olan 2700 mm net açıklığa sahip bir kiriş ile 3000 mm yüksekliğe sahip 300 x 300 mm enine kesitli iki kolondan oluşmaktadır. Kirişte 6 adet Ø16 boyuna donatı ve 100 mm aralıklarla Ø6 sargı donatısı kullanılmış, kolonlarda ise 8 adet Ø25 boyuna donatı ile kolon uç kısmında 500 mm lik sarılma bölgesi oluşturularak

75 mm aralıklarla Ø10 sargı donatısı ve gövde kısmında ise 150 mm aralıklarla Ø10 sargı donatısı kullanılmıştır. Çalışmada, betonarme çerçeveyi oluşturan elemanların öz ağırlıkları düşünülerek ölü yük hesaplanmış, hareketli yük ise $2,5 \text{ kN/m}^2$ olarak alınmıştır. Betonarme çerçevenin sismik tasarımı, çerçevenin elastik olmayan deformasyonu sürdürebildiği ve yanal sismik yük altında enerji dağıtımını sağlayabildiği varsayılarak, Hindistan'da Yeni Delhi'de bulunan seçilmiş bir sahaya ait deprem yer hareketi altında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, betonarme çerçevenin, yangın yükleri gibi kaza sonucu oluşan yüklere dayanacak şekilde özel olarak tasarlanmadığı varsayılmış, yangın yükünün kirişin alt yüzeyinde ve kolonların iç taraflarında etkidiği, yani kiriş ve kolonların yangın yüküne tek taraflı olarak maruziyetinden hareket edilen senaryo bazlı yangın yüklemesi dikkate alınmıştır. Çalışmada, betonarme çerçevenin üç boyutlu sonlu eleman modeli oluşturularak doğrusal olmayan termo-mekanik analizi yapılmıştır. Çalışma, yangına maruz kalan yapısal elemanların sünekliğini ölçmek için sınır sapma durumuna dayalı kırılma eğrileri geliştirilerek yürütülmüştür. Çalışmada, yangın yükündeki belirsizliklerin, betonarme çerçevenin performansı ve sünekliği üzerindeki etkisini araştırmak için malzeme özellikleri değiştirilmiştir. Yüksek beton dayanımına sahip yapılar ile düşük beton dayanımına sahip yapıların yangın yükü yoğunluğuna bağlı olarak yangın performanslarının değiştiği tespit edilmiştir. C30 sınıfı betondan üretilen çerçeve yapı elemanlarının yüksek sıcaklığa verdiği tepkideki azalma, C20 sınıfı betona göre %31, C40 sınıfı beton kullanıldığından ise %60 olarak belirlenmiştir. Yani, yüksek beton dayanımına sahip yapılarda daha yüksek yangın yükü yoğunluğunda kritik etkilerin oluştuğu belirlenmiştir. Bu nedenle, betonarme yapıların yangın direncinin, sadece elemanların boyutlarından ziyade, elemanın mukavemetine dayandırılması önerilmiştir. Ayrıca, beton kalitesindeki artışın, betonarme çeliğinin kalitesindeki artışa kıyasla betonarme çerçevenin yangında bozulma olasılığını önemli ölçüde azalttığı, malzemelerin yanması nedeniyle ulaşılan maksimum yangın sıcaklığının, $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den itibaren yapısal sorunlara neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle yangın yüklemesinde, yapı için izin verilen maksimum yangın sıcaklığının $1000 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmemesi önerilmiştir. Ancak bu çalışmada betonarme çerçevenin yüksek sıcaklık etkisinde maruz kalacağı deformasyonlar, kullanılan betonun dayanım parametrelerine bağlı olarak değerlendirilmiş, yüksek dayanımlı ve düşük dayanımlı beton kullanılması halinde çerçevenin yangın performansı araştırılmıştır. Çalışma bu yönüyle sınırlıdır.

Wang vd., (2021) yaptıkları çalışmada, çelik betonarme kompozit kolonların (SRC) yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra sismik davranışını deneysel ve analitik olarak

incelemişlerdir. Çalışmada, biri ortam sıcaklığında, diğer üçü yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış, enine kesiti 300 x 300 mm, yüksekliği ise 0,6 m olan toplam dört adet çelik betonarme kompozit kolon (SRC) üretilmiştir. Kolonların hepsinde beton dayanımı 47,4 MPa, elastisite modülü ise 34,4 GPa olarak belirlenmiştir. SRC kolonlarda kullanılan donatıların akma ve çekme dayanımları ise sırasıyla 473 MPa ve 615 MPa olarak alınmıştır. Kolonlar fırın odasında maksimum 600 °C ye kadar farklı sürelerle (0 dk, 60 dk, 120 dk ve 180 dk) ısıtılmış ve kendi halinde soğuduktan sonra çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Test sonucunda çelik betonarme kompozit kolonların yatay yük-ötelenme eğrisi, süneklik, rijitlik bozulması ve enerji dağıtma kapasitesi analiz edilmiştir. Deneysel sonuçlar, SRC kolonların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra bir eğilme kırılma modu sergilediğini ve yüksek sıcaklık sonrası sismik davranışlarının gömülü kesit çeliği tarafından yönetildiğini göstermektedir. Isıtma süresi ile çelik ve beton arasındaki yetersiz aderans durumu SRC kolonların yüksek sıcaklık sonrası çatlama yükünü (% 67'ye kadar) büyük ölçüde etkilemektedir. Profil çeliğinin geliştirilmiş sünekliği ve geri kazanılmış mukavemeti sayesinde SRC kolonun yüksek sıcaklık sonrası enerji yayma kapasitesi yükselmektedir. 600 °C 'de 60 dakika, 120 dakika, 180 dakika ısıtma süresi için süneklikteki iyileşme başlangıç değerinin sırasıyla yaklaşık % 16, % 22 ve % 31'ine ulaşmaktadır. Çalışmada ilave olarak, SRC kolonların yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kesme kapasitesini hesaplamak için bir formül önerilmiştir. Yüksek sıcaklık sonrası kesme kapasitesinin maksimum sıcaklıklardan büyük ölçüde etkilendiği ancak ısıtma süresine duyarlı olmadığı belirlenmiştir. Kolonların 200, 400, 600, 800 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz kalması halinde sırasıyla % 90, % 80, % 65, % 50 ve % 40'lık bir azaltma faktörünün ihtiyatlı bir şekilde kullanılabileceği belirlenmiştir. Ayrıca, SRC kompozit kolonların içerisindeki çelik profilin katkı oranlarının maksimum sıcaklıkların 200 °C 'den 900 °C 'ye çıkması halinde % 38 ila % 68 aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Ancak çalışma her ne kadar yüksek sıcaklık etkisi sonrası dinamik durumu incelese de, sadece betonarme kompozit kolon ile sınırlı kalmıştır. Zira, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme elemanlar ile kompozit betonarme elemanların yangın davranışı birbirinden çok farklı olacağından, sismik davranışın nasıl değişeceği bilinmemektedir.

Parthasarathi ve Satyanarayanan (2021) yaptıkları çalışmada, ABAQUS programı kullanılarak modelledikleri üç katlı, dört açıklıklı betonarme çerçevenin 200 °C - 1200 °C arasındaki termal yük etkisine maruz bırakılarak yapısal performansını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan betonarme çerçevenin giriş elemanı 300 x 300 mm enkesitinde ve 3000

mm uzunluğunda olup bir ucu sabit, diğer ucu hareketli mesnetlere oturtulmuştur. Kolon elemanlar ise 300 x 400 mm enkesitli ve zemin kat için 3500 mm, ikinci ve üçüncü katlar için 3000 mm yüksekliğinde tasarlanmıştır. Betonarme çerçevenin kolon elemanında 4 adet Ø16 boyuna donatı ile 150 mm aralıklarla Ø8 çapında enine donatı kullanılmıştır. Betonarme çerçeveye 3,5 kN/m hareketli yük ile 14,7 kN/m duvar yükü uygulanmış ve C30 sınıfı beton kullanılmıştır. ABAQUS programı kullanılarak modellenen betonarme çerçeve; dolgu duvarsız, tamamı dolgu duvarlı, tek açıklığı dolgu duvarlı, iki açıklığı dolgu duvarlı ve üç açıklığı dolgu duvarlı olmak üzere beş farklı durum için sonlu eleman tekniği kullanılarak tasarlanmıştır. Sonlu eleman modellerinde 25 mm boyutlarında 8 düğüm noktalı termal olarak birleştirilmiş C3D8T eleman kullanılmıştır. Çalışmada sonlu eleman modeli yapılan betonarme çerçeve ISO 834 standart yangın eğrine uygun olarak yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış ve farklı simülasyon zaman aralığı ile beş durum çalışması altında test edilmiştir. Sonuç olarak, dolgusuz ve dolgulu betonarme çerçevelerde orta ve köşe kolonlardaki deformasyonlar karşılaştırıldığında, köşe kolonlardaki deformasyonun, orta kolonlara göre daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Sıcaklığın düzenli olarak artırılması ve malzemenin ısı özelliklerinin değişmesinden dolayı kolonda oluşan deformasyonların arttığı tespit edilmiştir. Çalışmada, betonarme çerçevenin artan yüksek sıcaklık etkisi nedeniyle iki saat içerisinde göçtüğü belirtilmiştir.

Türkay ve Altun (2022) yapmış oldukları çalışmada, betonarme perde duvarların burulma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu amaçla en/boy oranı 7,6 ve 5 olan ½ ölçekli betonarme perde duvar üretilmiştir. Buna ilave olarak en/boy oranı altı olan referans numunesi de üretilmiştir. Referans numune üzerinde yük artışları değiştirilerek optimum yük artışı belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada oluşturulan deney düzeneği yanal yükleme altındaki betonarme perde duvarların geleneksel deney düzeneğinden farklıdır. Geleneksel test düzeneğinde yatay yük tek bir hidrolik kriko kullanılarak uygulanmaktadır. Bu çalışmada ise burulma etkilerini elde etmek için iki adet yatay yük hidrolik kriko kullanılmıştır. Ayrıca geleneksel test düzeneğinde eğilme yönündeki yerdeğiştirmeler önemli olduğu için yerdeğiştirme ölçerler o yönde yerleştirilir. Çalışmada burulma açıları da önemli olduğu için yerdeğiştirme ölçerler duvar boyu boyunca yerleştirilmiştir. Çalışma sonucunda betonarme perde duvarların çatlama ve maksimum burulma momentleri, burulma rijitlikleri, enerji tüketimleri ve hasar durumları elde edilmiştir.

1.5. Literatür Özeti, Amaç ve Kapsam

Literatür incelendiğinde betonarme çerçevenin deprem etkisine maruz kaldıktan sonra meydana gelen yangın nedeniyle yüksek sıcaklık etkisine de maruz kalması durumunun birçok araştırmada konu alındığı görülmektedir. Buna paralel olarak çoğu araştırmada yüksek sıcaklık etkisinin oluşturacağı deformasyonların betonun dayanım parametresine bağlı olarak sınırlı sayıda parametre dikkate alınarak değerlendirildiği belirlenmiştir. Ayrıca literatürde var olan birçok çalışmada yüksek sıcaklık etkisindeki betonarme kompozit elemanların davranışı araştırılmıştır.

Bu tez çalışmasında, yangın vb. nedenlerle yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmış betonarme çerçevede meydana gelen dayanım kayıplarının nasıl değişeceği, bu dayanım kayıplarına sebep olan yüksek sıcaklığın derecesi ve etki etme süresi gibi parametrelerin çerçevenin daha sonra maruz kalacağı deprem etkisinde performansına nasıl etki edeceğinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevenin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışı; yatay yerdeğiştirme, rijitlik kaybı, dayanım zarfı ve enerji sönmüleme kapasitesindeki değişim incelenmiştir.

Çalışmada bir adedi referans deney elemanı olmak üzere on üç adet betonarme çerçeve deney elemanı üretilmiştir. On iki adet deney elemanı 60, 120 ve 180 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçeve deney elemanları kendi halinde soğuduktan sonra tekrarlı yatay yük etkisi altında deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışmalara ek olarak sonlu elemanlar yöntemi ile deney elemanlarına ait sonlu eleman modelleri oluşturularak, termo-mekanik analizler gerçekleştirilmiştir. Sonlu eleman analizlerinden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak irdelenmiştir.

Tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Çalışmanın amaç ve kapsamı doğrultusunda, genel bilgiler ile konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalar Bölüm 1’de, betonarme çerçeve deney elemanlarının tasarımı, üretimi ve tekrarlı yatay yük altında gerçekleştirilen deneyleri ile sonlu eleman analizleri Bölüm-2’de sunulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular ve bu bulgulara ait değerlendirmeler Bölüm-3’de, sonuç ve öneriler ise Bölüm-4’de verilmiştir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

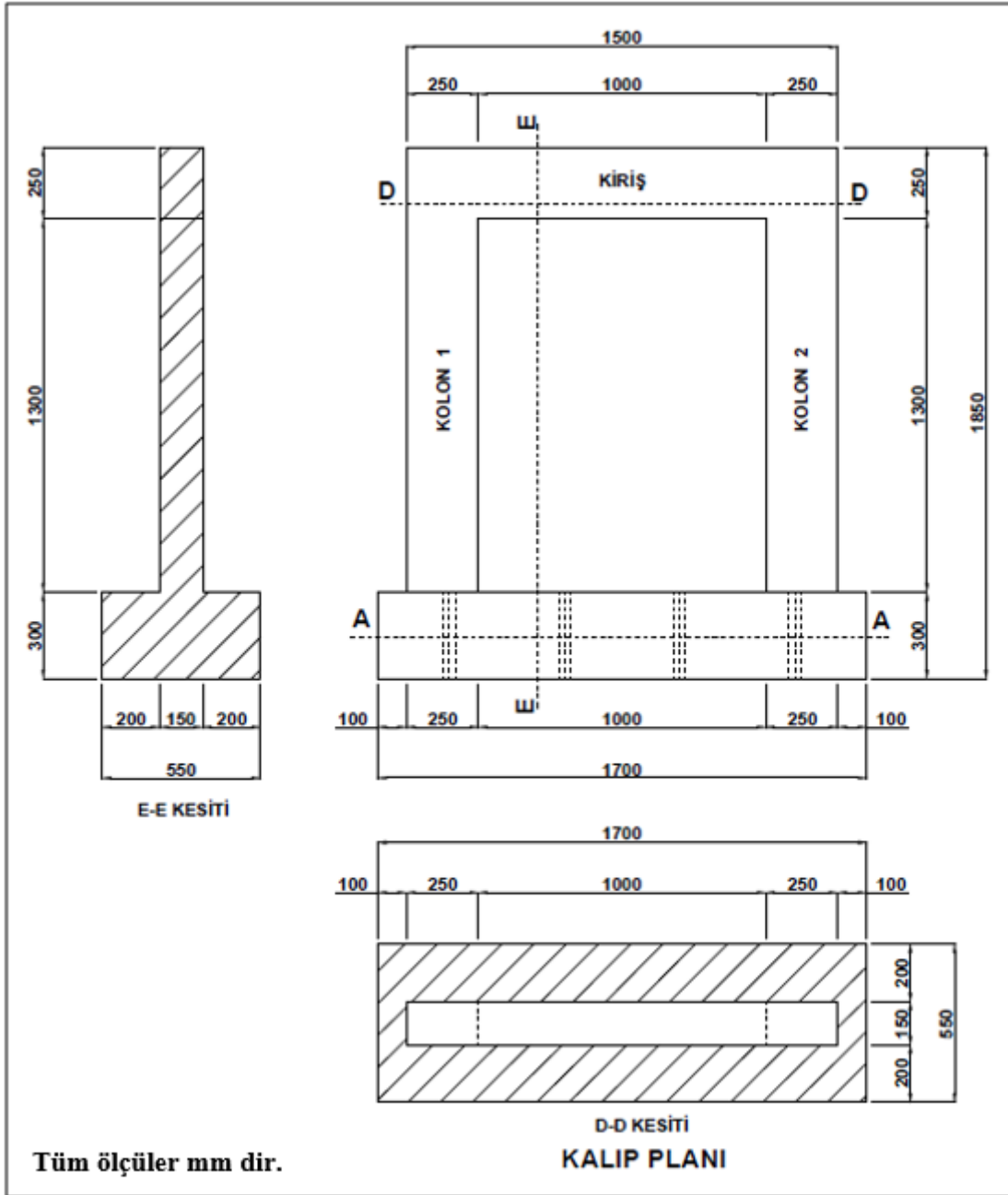
Bu bölümde, çalışma kapsamı doğrultusunda üretilmesi planlanan betonarme çerçeve deney elemanlarının hazırlanmasında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin özellikleri ile deney elemanlarına ait tasarım detayları, üretim aşamaları, yüksek sıcaklık etkisinin uygulanması, tekrarlı yatay yükleme deney düzeneği ve deneylerde kullanılan cihazlara ait bilgiler verilmektedir.

2.1. Deney Elemanlarının Tasarım Detayları ve Üretimi

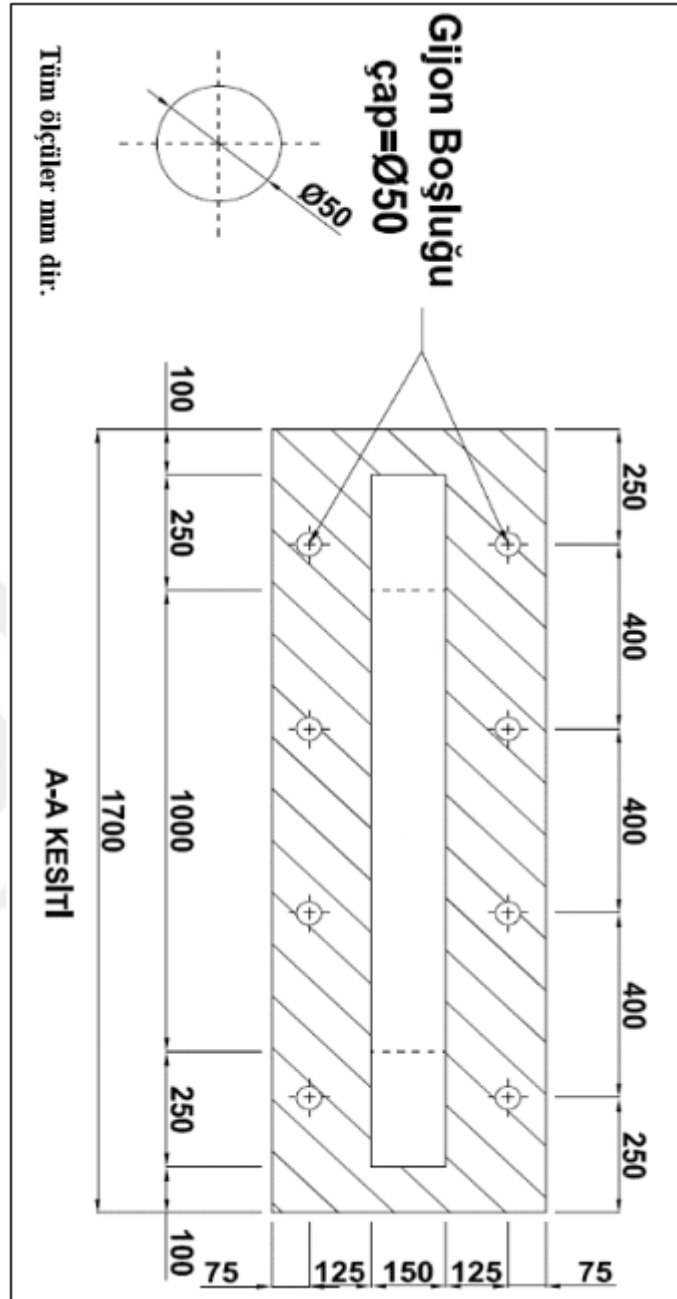
Çalışma kapsamında bir âdeti referans deney elemanı olmak üzere toplam 13 adet betonarme çerçeve deney elemanı üretilmiştir. Betonarme çerçeve deney elemanlarının tamamında boyut ve enkesit özellikleri aynı alınmıştır. TBDY 2018'e göre bina türü yapılarda C25'den daha düşük dayanım sınıfında beton kullanılmaması şartı düşünülerek üretilmiş olan betonarme çerçevelerde beton dayanım sınıfı C25/30 olarak belirlenmiştir. Deney elemanları 1/2 ölçekli olarak tasarlanmış olup, deney elemanlarına ait kalıp planları Şekil 7'de verilmiştir.

Betonarme çerçeve deney elemanlarının temel boyutları 550 x 1700 x 300 mm (en x boy x yükseklik) olarak, toplam yüksekliği ise 1850 mm olarak belirlenmiştir. Deney elemanlarının yatay yük etkisindeki deneysel çalışmalarda zemine mesnetlenmesinin sağlanması amacıyla temel içerisinde 50 mm çapında, 400 mm aralıklarla sekiz adet gijon boşluğu bırakılmıştır (Şekil 8).

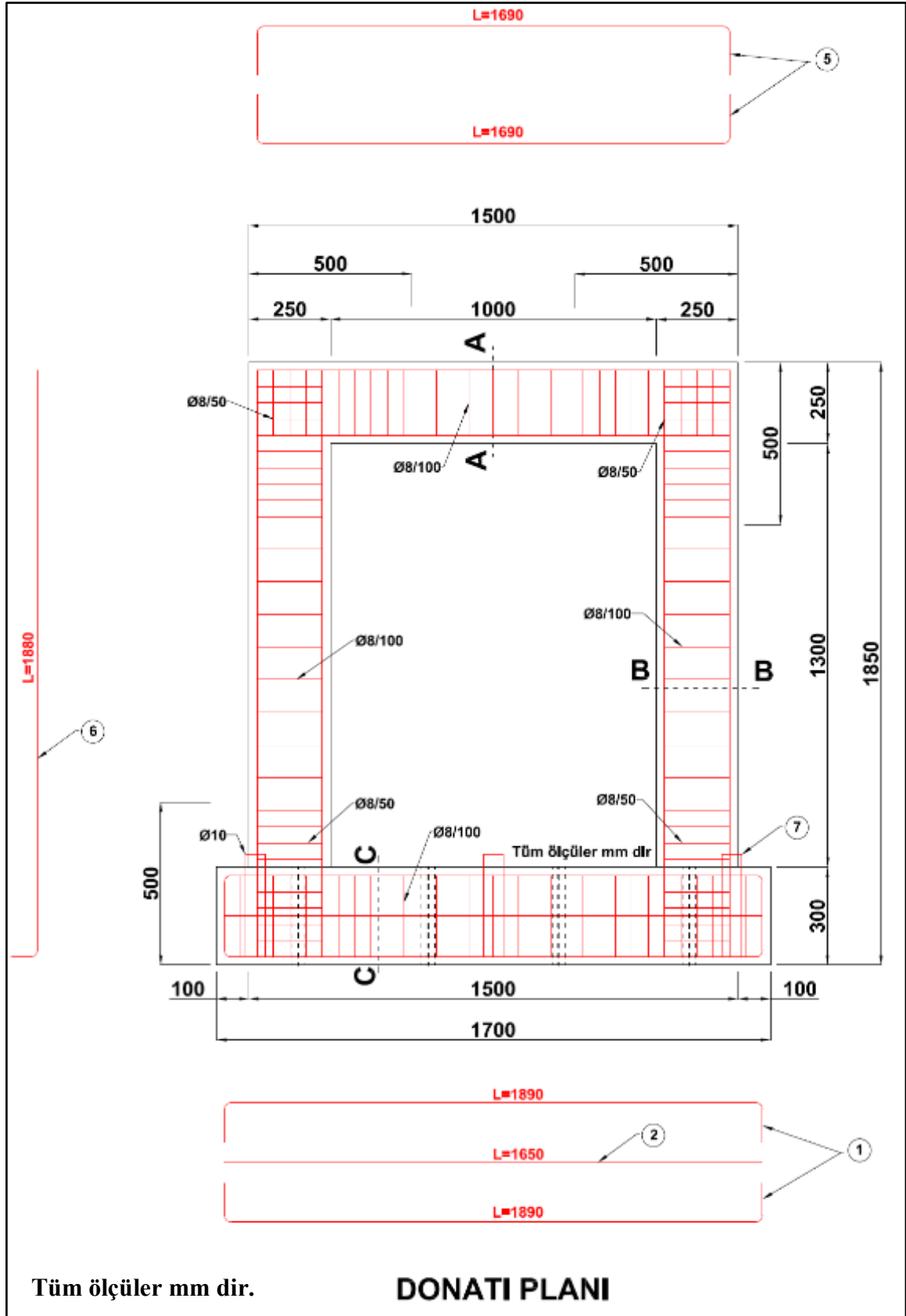
Deney elemanlarının tamamında B420C dayanım sınıfındaki betonarme çeliği kullanılmıştır. Betonarme çerçeve yapıyı oluşturan kolon elemanlarda minimum donatı oranı ($\rho = 0,001$) olacak şekilde 6 adet 10mm boyuna donatı, kiriş elemanlarda ise sünek davranışın sağlanması için, minimum donatı oranı ($\rho_{min} = 0,0026$) ile maksimum donatı oranı ($\rho_{max} = 0,017$) arasında kalacak şekilde 3 adet 8mm boyuna donatı seçilmiştir. Deney elemanlarının tamamında enine donatı, sarılma bölgesinde 50 mm, sarılma bölgesi dışında ise 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir. Betonarme çerçeve deney elemanlarına ait donatı planı Şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 7. Deney elemanlarına ait boyutlar, enkesit ve boykesit detayları

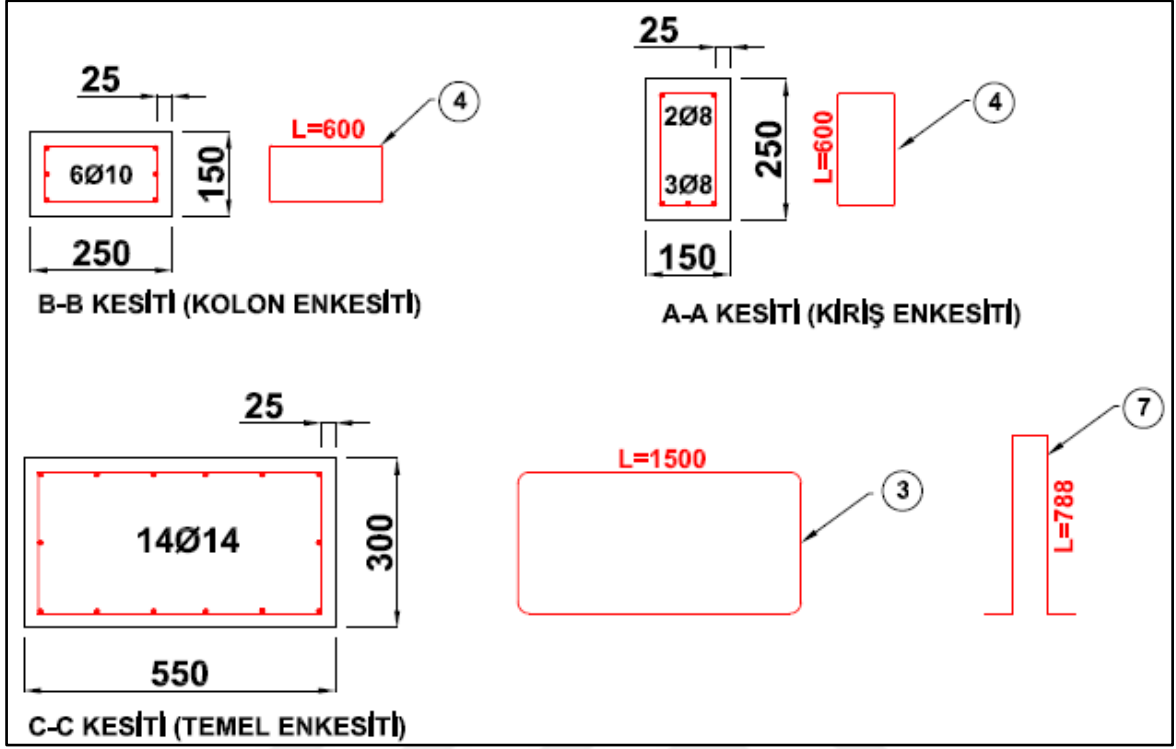


Şekil 8. Deney elemanlarında gijon boşluklarına ait yerleşim detayı



Şekil 9. Deney elemanlarına ait donatı yerleşim planı

Şekil 9'un devamı



2.2. Deney Elemanlarının Üretiminde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri ve Deneyleri

2.2.1. Donatı Özellikleri ve Çelik Çekme Deneyi

Betonarme çerçeve deney elemanlarının üretilmesinde 8 mm, 10 mm ve 14 mm çapında B420C dayanım sınıfında betonarme çeliği kullanılmıştır. Kullanılan donatıların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla her çaptan üçer adet numuneye çekme deneyi yapılmıştır (Şekil 10).

Çekme deneylerinde Dinç marka, 50 kN kapasiteli cihaz kullanılmış olup, çelik donatılara ait gerçek mekanik özellikler Tablo 1'de belirtilmiştir.



Şekil 10. Donatıların çekme deneyleri

Tablo 1. Deney elemanlarında kullanılan donatıların mekanik özellikleri

Donatı çapı	Num. no	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Elastisite modülü (MPa)
8mm	1	410	520	207070,7
	2	411	524	200487,8
	3	435	525	207142,8
	Ort.	418,67	523	204900,43
10mm	1	451	592	205000
	2	417	569	177446,81
	3	442	574	212500
	Ort.	436,67	578,33	198315,60

2.2.2. Beton Özellikleri ve Tek Eksenli Basınç Deneyi

Betonarme çerçeve deney elemanlarının tamamında C25/30 dayanım sınıfında beton kullanılmıştır. Kullanılan beton hazır beton santralinden temin edilmiştir. Hazır beton santralinden temin edilen betondan her bir deney elemanı için üç adet 150mm x 150mm x

150mm boyutlarında küp ve üç adet 150mm x 300mm boyutlarında silindir beton numuneleri olmak üzere toplamda 39 adet küp ve 39 adet silindir numune alınmıştır. Küp ve silindir beton numuneleri beton döküldükten bir gün sonra kalıbından çıkartılarak sıcaklığı 22 ± 2 °C olan kür havuzunda 28 gün süreyle bekletilmiştir. Bu sürenin sonunda üç adet küp ve üç adet silindir beton numunesi kür havuzundan çıkartılmış ve Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarında bulunan 2500 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü hidrolik pres kullanılarak tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır (Şekil 11). Geriye kalan 36 adet küp ve 36 adet silindir beton numunesi ise kür havuzundan çıkartıldıktan sonra yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmış ardından tek eksenli basınç deneyi yapılmıştır. Elde edilen veriler Tablo 2’de verilmiştir.



Şekil 11. Tek eksenli basınç deneyleri

Tablo 2. Hazır beton santralinden temin edilen betonun basınç deneyi sonuçları

Numune adı	Numune sayısı	Basınç dayanımı (MPa)		Ortalama basınç dayanımı (MPa)	
		Küp numune	Silindir numune	Küp numune	Silindir numune
RCF_13_Referans	1	32,24	27,31	30,17	26,44
	2	28,92	25,58		
	3	29,37	-		
RCF_1_200_60	1	29,61	21,99	28,94	24,74
	2	29,74	27,49		
	3	27,48	-		
RCF_4_400_60	1	24,54	23,28	24,38	23,28
	2	25,17	20,24		
	3	23,42	-		
RCF_7_600_60	1	23,33	19,38	23,51	18,76
	2	22,66	18,14		
	3	24,54	-		
RCF_10_800_60	1	21,05	14,80	21,31	15,05
	2	22,78	15,30		
	3	20,09	-		
RCF_2_200_120	1	28,23	20,67	28,22	21,26
	2	28,64	21,86		
	3	27,80	-		
RCF_5_400_120	1	23,75	14,92	22,95	14,06
	2	22,15	13,19		
	3	-	-		
RCF_8_600_120	1	19,65	13,03	19,27	13,03
	2	18,89	-		
RCF_11_800_120	1	8,85	-	9,52	-
	2	10,18	-		
RCF_3_200_180	1	27,65	21,35	27,48	18,49
	2	27,30	15,63		
RCF_6_400_180	1	19,53	10,58	19,24	11,83
	2	18,88	13,08		
	3	19,29	-		
RCF_9_600_180	1	14,42	8,50	15,07	10,12
	2	16,35	11,73		
	3	14,45	-		
RCF_12_800_180	1	6,78	6,30	7,29	5,65
	2	7,80	5,00		

2.2.3. Beton Özellikleri ve Yarmada Çekme Deneyi

Betonarme çerçeve deney elemanlarında kullanılan betonun çekme dayanımını belirlemek amacıyla 13 adet silindir numune üzerinde yarmada çekme deneyleri yapılmıştır. Yarmada çekme deneyinde 2500 kN kapasiteli bilgisayar kontrollü hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 12). Deney sonucunda elde edilen sonuçlar Bağıntı 1’de kullanılarak beton numunelerin çekme dayanımları hesaplanmış ve Tablo 3’de gösterilmiştir.

$$f_{ct} = \frac{2P}{\pi dh} \quad (1)$$



Şekil 12. Silindir beton numunelerin yarmada çekme deneyi

Tablo 3. Silindir beton numunelerin yarma deneyinden elde edilen kırılma yükü ve çekme dayanımları

Numune adı	Kırılma yükü (kN)	f_{ct} (MPa)
RCF_13_Referans	126,39	1,79
RCF_1_200_60	123,50	1,75
RCF_4_400_60	121,26	1,72
RCF_7_600_60	-	-
RCF_10_800_60	68,48	0,97
RCF_2_200_120	114,67	1,62
RCF_5_400_120	70,98	1,00
RCF_8_600_120	47,30	0,67
RCF_11_800_120	-	-
RCF_3_200_180	97,48	1,38
RCF_6_400_180	68,16	0,96
RCF_9_600_180	-	-
RCF_12_800_180	22,61	0,21

2.3. Betonarme Çerçeve Deney Elemanlarında Beton Dökümü

Çalışma doğrultusunda 1 âdeti referans deney elemanı olmak üzere toplamda 13 adet betonarme çerçeve deney elemanı üretilmiştir. Deney elemanlarının tamamında C25/30 dayanım sınıfında hazır beton kullanılmıştır. Betonarme çerçeve deney elemanlarının beton döküm işlemi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada betonarme çerçevenin temel, kolon ve kiriş elemanlarına ait enine ve boyuna donatılarının montajı yapılmış, temel kalıp montajı tamamlanarak temel betonu dökülmüştür (Şekil 13). İkinci aşamada ise kolon ve kiriş elemanların kalıp montajı tamamlanarak betonları dökülmüştür (Şekil 14). Deney elemanlarının boyutlarının küçük olması ve özellikle kolon – kiriş birleşim bölgelerindeki donatıların yoğun olması nedeniyle beton döküm işlemlerinde vibratör uygulamasına özen gösterilmiş, böylece beton içerisindeki boşlukların en aza indirilmesi sağlanmıştır. Deney elemanları beton dökümü sonrasında ıslak çuvallarla sarılarak betonun kürüne dikkat edilmiştir (Şekil 14). Beton dökümü esnasında küp ve silindir deney numuneleri alınmıştır (Şekil 15).



Şekil 13. Deney elemanlarının temel betonunun dökülmesi



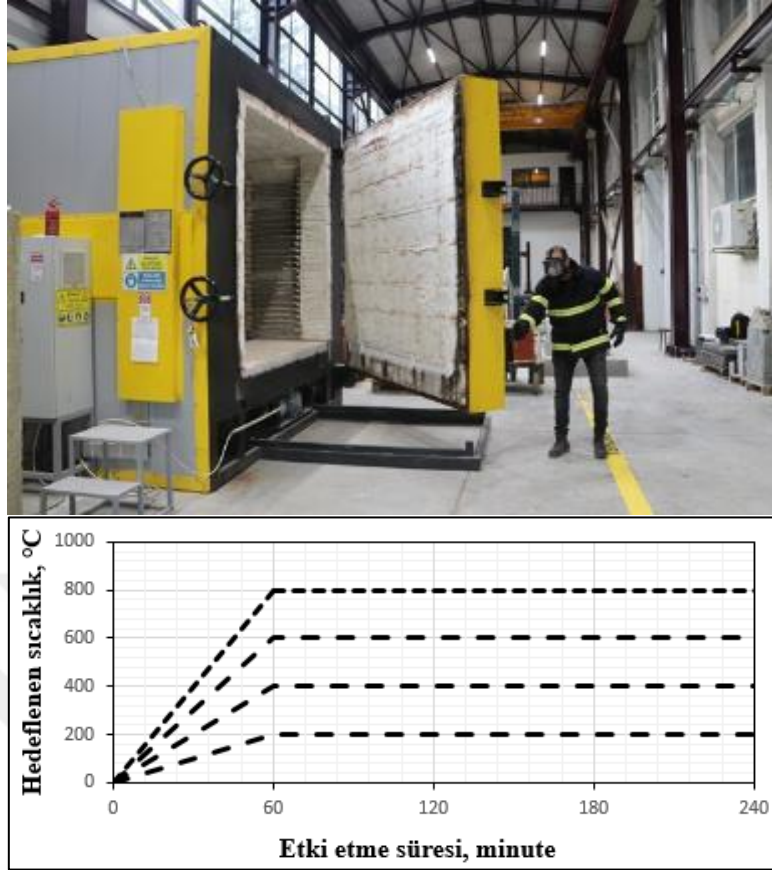
Şekil 14. Deney elemanlarının kolon ve kiriş betonlarının dökülmesi



Şekil 15. Beton küp ve silindir numuneler

2.4. Deney Elemanlarının Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Bırakılması

Çalışma doğrultusunda, üretim süreci tamamlanan betonarme çerçeve deney elemanları Tablo 4’de gösterilen sıcaklık ve sürelerde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Numune isimlendirmesi *Numune adı_Sıcaklık derecesi_Isıtma süresi* şeklinde yapılmıştır. Örneğin RCF_1_400_60 için numune adı; Betonarme Çerçeve_1, maruz kaldığı sıcaklık 400 °C ve sıcaklığın etki etme süresi 60 dakikadır. Yüksek sıcaklık etkisinin uygulanması test fırını vasıtasıyla yapılmıştır (Şekil 16). Test fırını araba tabanlı olup, ısıtma işlemi tabii tutulacak malzemeler hareketli bir araba vasıtasıyla fırına yüklenir. Test fırınının eni boyu ve yüksekliği sırasıyla 2000mm, 1500mm, 2000 mm dir. Maksimum çalışma sıcaklığı 1100 °C olan test fırını içerisinde 2 adet K tipi termokupl bulunmaktadır. Termokuplardan biri fırın içerisindeki sıcaklığın ölçümünü, diğeri ise fırın iç sıcaklığının istenmeyen sıcaklık değerine erişmesini önlemek için yerleştirilmiştir. Test fırınında PC771 Model adım kontrollü bir termostat yardımıyla, fırına sıcaklık - zaman eğrisi girilebilmektedir.



Şekil 16. Test fırını

Tablo 4. Yüksek sıcaklık etkisinin uygulanması

Grup No	Numune adı	Isıtma süresi (dakika)	Sıcaklık derecesi (°C)
1	RCF_1_200_60	60	200
	RCF_4_400_60		400
	RCF_7_600_60		600
	RCF_10_800_60		800
2	RCF_2_200_120	120	200
	RCF_5_400_120		400
	RCF_8_600_120		600
	RCF_11_800_120		800
3	RCF_3_200_180	180	200
	RCF_6_400_180		400
	RCF_9_600_180		600
	RCF_12_800_180		800
4	RCF_13_Referans	-	-

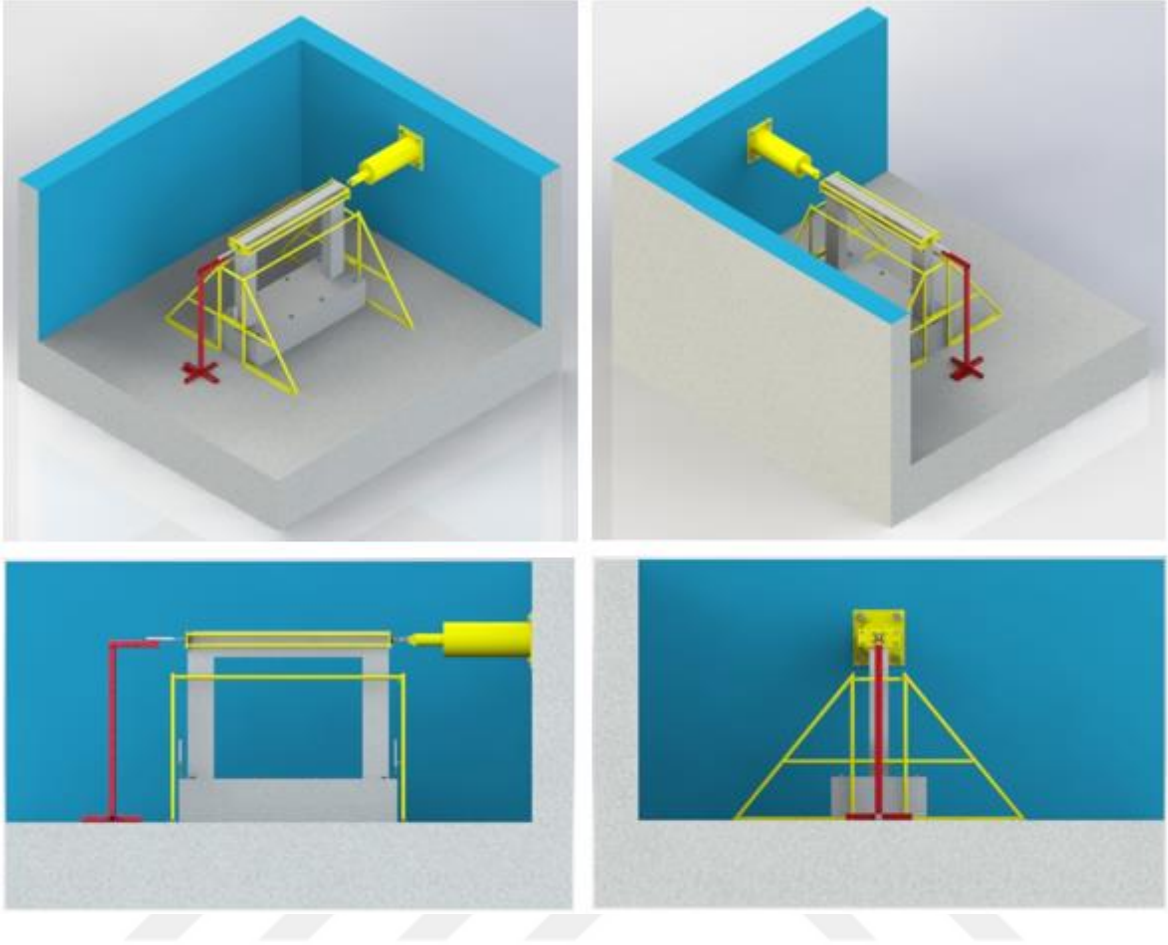
Betonarme çerçeve deney numunelerinin tamamı bir saatlik süre içerisinde hedeflenen sıcaklığa ulaştırılmış ve 60, 120 ile 180 dakika sürelerle bu hedef sıcaklık derecelerinde yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanları kendi halinde soğumaya bırakılmış, oda sıcaklığına ulaştığında fırından çıkartılarak tekrarlı yatay yükleme deneyine hazır hale getirilmiştir (Şekil 17).



Şekil 17. Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve numuneler

2.5. Deney Düzeneği

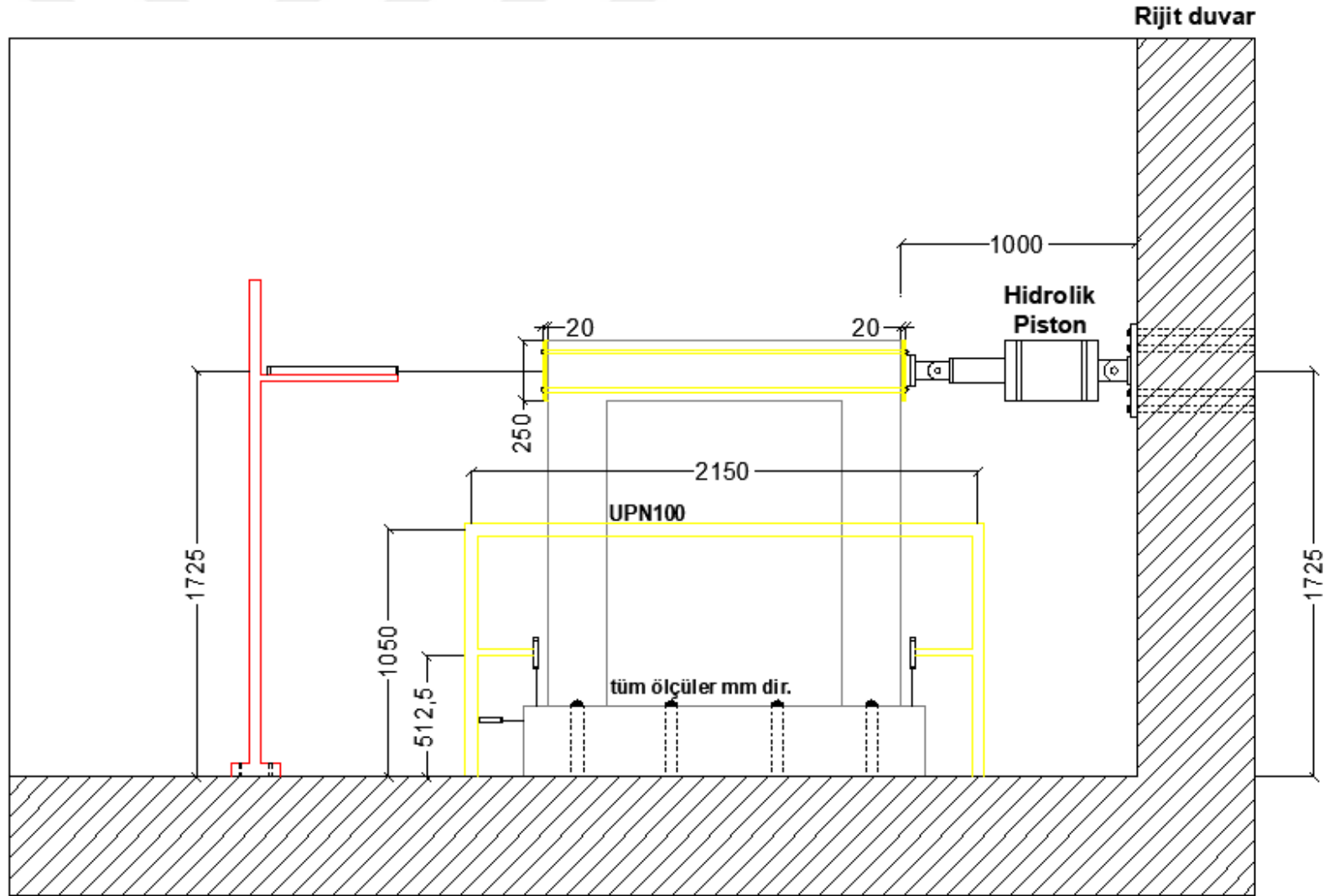
Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçeve deney elemanlarına tekrarlı yük etkisinin uygulanması amacıyla Şekil 18’de üç boyutlu görünümü ve Şekil 19’da da geometrik ölçüleri gösterilen deney düzeneği hazırlanmıştır.



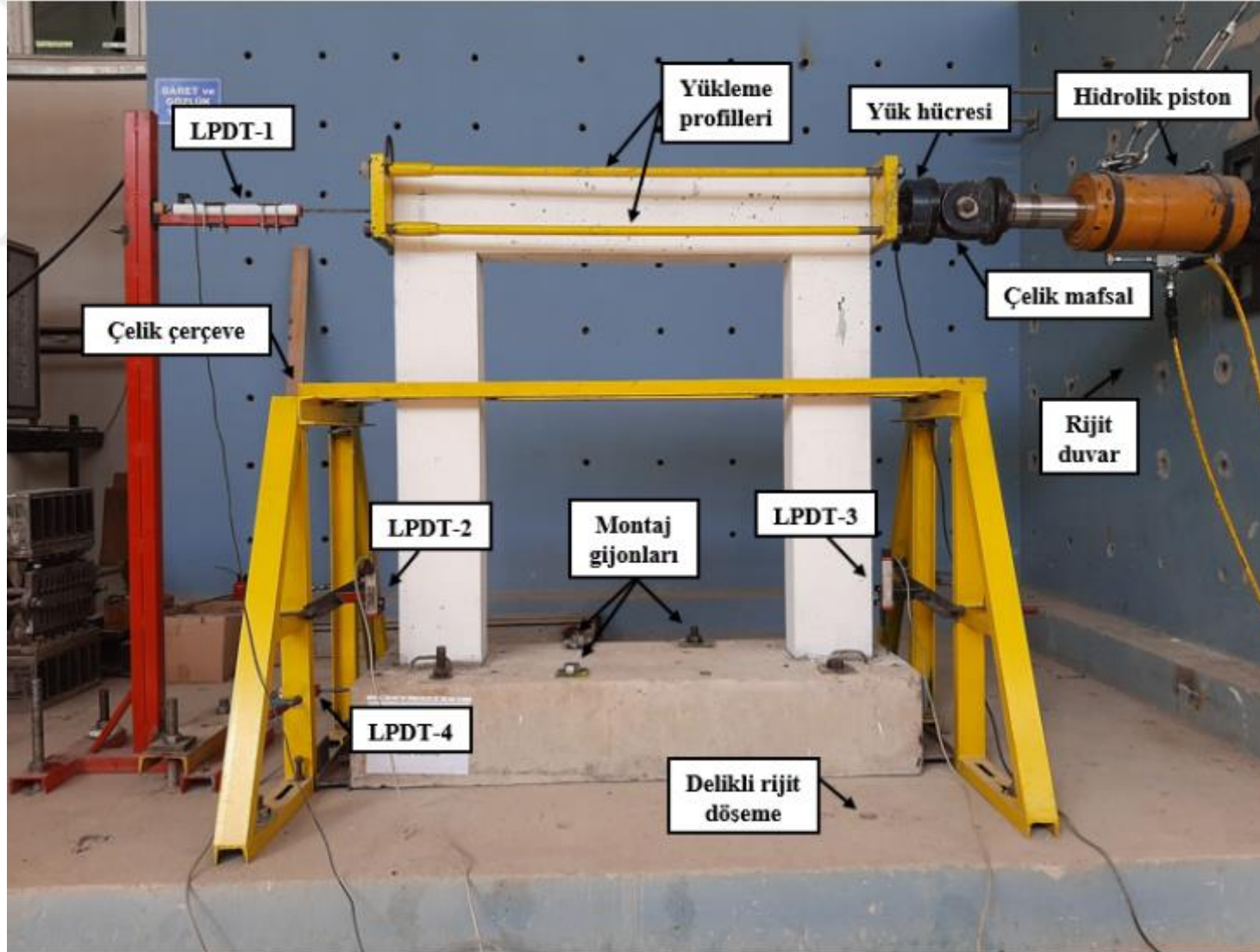
Şekil 18. Deney düzeneği ve tekrarlı yatay yükleme sisteminin üç boyutlu görünüşü

Tekrarlı yatay yükleme esnasında deney elemanının yatay yöndeki hareketini engellemek için, 38mm çapındaki 8 adet yüksek dayanımlı bulon kullanılarak deney elemanları rijit betonarme döşemeye mesnetlenmiştir.

Betonarme çerçeveye yatay yük uygulandığında düzlem dışı hareketini engellemek amacıyla UPN100 profillerinden oluşturulan iki adet çerçeve sistemi kullanılmış, bu çerçeve sistemi 4 adet 38mm çapındaki yüksek dayanımlı bulon yardımıyla rijit döşemeye mesnetlenmiştir.



Şekil 19. Deney düzeneğinin boyutlandırılması



Şekil 20. Deney düzeneği ve tekrarlı yatay yükleme sistemi elemanlarının gösterimi

Tekrarlı yatay yüklemeyi yapan bilgisayar kontrollü hidrolik pistonun uç kısmındaki yük hücresine 35 mm kalınlığında yükleme başlığının bağlantısı yapılmış, aynı kalınlık ve ölçüye sahip ikinci bir yükleme başlığı, kirişin dıştaki yüzeyine yerleştirilmiştir. Yerleştirilen iki yükleme başlığı 38mm çapındaki 4 adet yüksek dayanımlı bulon ve 4 adet yükleme profili kullanılarak birbirine bağlanmıştır (bkz. Şekil 20). Deney düzeneğine ait mesnetlenme detayları Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. Deney düzeneğinin mesnetlenme detayları

Yatay yüklemeyi yapan bilgisayar kontrollü hidrolik piston 100cm kalınlığındaki betonarme rijit yükleme duvarına 2 adet 42mm çapındaki yüksek dayanımlı bulon ile sabitlenmiştir.

Deney düzeneğinde ölçümlerin alınmasında kullanılan LPDT (Doğrusal Potansiyometrik Cetvel)'ler mengene ve cıvatalı sabitleyiciler yardımıyla çerçeve sistemindeki profillere mesnetlenmiştir.

2.6. Tekrarlı Yatay Yüklemede Ölçüm Sistemi ve Kullanılan Aletler

Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisi altındaki davranışı araştırılmıştır. Tekrarlı yatay yüklemede; yatay yük ve yatay yerdeğiştirmelerin deneysel ölçümleri alınmıştır. Şekil 20'de görüldüğü gibi 4 adet LPDT (Doğrusal Potansiyometrik Cetvel) ile yatayda ve düşeyde oluşacak yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Ayrıca bilgisayar kontrollü hidrolik piston ucuna yerleştirilen yük hücresi ile deney sırasında uygulanan yatay yük değerleri okunmuştur.

2.6.1. Hidrolik Piston

Tekrarlı yatay yükleme deneylerinde kullanılan hidrolik piston itmede ve çekmede 150mm yatay yükleme oluşturabilecek şekilde olup, elektrikli basınç güç ünitesi vasıtasıyla çekme ve itmede 1000 kN yük kapasitesine sahiptir (Şekil 22). Hidrolik pistonun her iki ucundaki mafsallı birleşimler sayesinde oluşabilecek düşey yerdeğiştirmelerin meydana getireceği ilave gerilmeler engellenmiştir.



Şekil 22. Hidrolik piston ve güç ünitesi

2.6.2. Yük Hücresi

Tekrarlı yatay yüklemeyi gerçekleştiren bilgisayar kontrollü hidrolik pistonun ucuna yerleştirilen CAS marka yk hücresi 1000 kN çekme ve basınc yükü ölçebilmekte ve bu ölçümleri veri toplama sistemine aktarabilmektedir (şekil 23).



şekil 23. Yük hücresi (Loadcell)

2.6.3. LPDT (Doğrusal Potansiyometrik Cetvel)

Tekrarlı yatay yükleme deneylerinde meydana gelen yatay ve düşey yöndeki yerdeğıştirmeleri ölçmek amacıyla 300mm ve 100mm ölçüm kapasiteli doğrusal potansiyometrik cetveller (LPDT) kullanılmıştır. Kullanılan LPDT'ler saniyede aldığı 16 ölçüm değerlerini veri toplama sistemine aktarabilmektedir (şekil 24).



şekil 24. Doğrusal potansiyometrik cetvel (LPDT)

2.6.4. Veri Toplama Sistemi

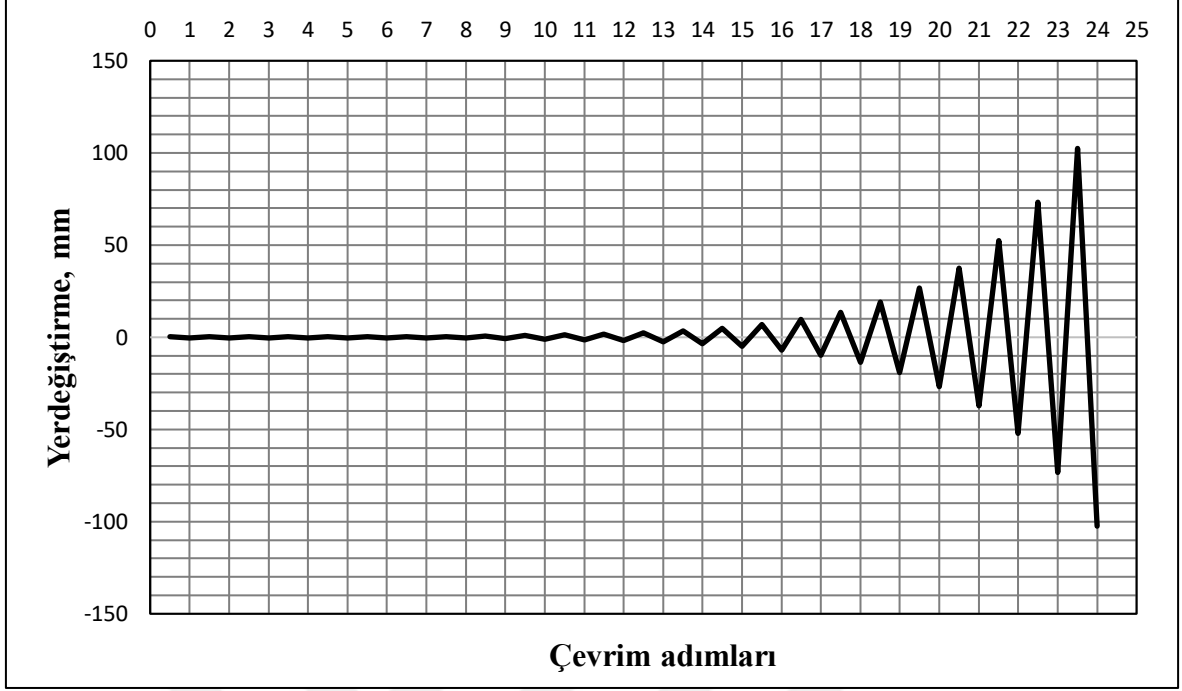
Deneyisel çalışmada, Karadeniz Teknik Üniversitesi Yapı ve Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan CODA Ai8b markalı, saniyede 16 değer kayıt edebilme özelliğine sahip, 16 kanal girişi bulunan veri toplama sistemi (data logger) kullanılmıştır (Şekil 25).



Şekil 25. Veri toplama sistemi (data logger)

2.7. Tekrarlı Yatay Yükleme Protokolü

Çalışma kapsamında yapılan tekrarlı yatay yüklemede, FEMA 461 (2007) yönetmeliğinde yarı statik olarak belirtilen yük protokolü kullanılmıştır. Bu yönetmeliğe göre, yükleme protokolüne deney elemanında ilk çatlakların oluşumundan daha küçük bir değerle başlanmalıdır. Buna göre yapılan değerlendirme sonucu yükleme protokolü 0,24mm'lik yatay yerdeğiştirme ile başlatılmıştır. FEMA 461 (2007)'de belirtilen şekilde 0,24mm yatay yerdeğiştirme ilk 6 çevrim boyunca uygulanmış olup, sonraki her çevrimde bu değer %40 oranında büyütülerek yatay yüklemeye devam edilmiştir (Şekil 26).



Şekil 26. Tekrarlı yatay yükleme protokolü

2.8. Deneysel Ölçümlerin Değerlendirilmesi

Bu çalışmada, 13 adet betonarme çerçeve deney elemanı üzerinde yüksek sıcaklık etkisinin uygulanmasından sonra, FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde yapılan tekrarlı yatay yükleme deneyleri sonrasında kayıt altında alınan ölçümler işlenerek değerlendirilmiştir.

2.8.1. Yatay Yük – Yatay Yerdeğiştirme Eğrilerinin Oluşturulması

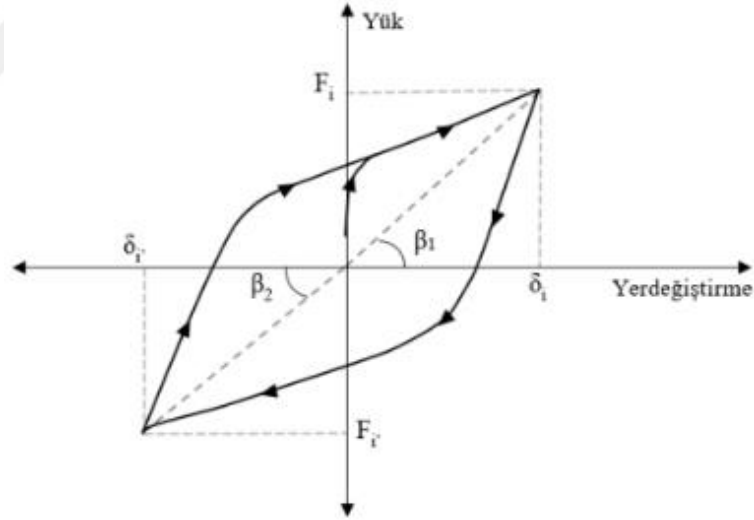
Deneysel çalışmada, FEMA 461 (2007)'ye uygun şekilde hazırlanan yükleme protokolü, betonarme çerçeve deney elemanlarına uygulanmış, yük hücresi tarafından ölçülen yük değerleri veri toplama sistemine aktarılmıştır. Ayrıca betonarme çerçeve deney elemanlarının kiriş dış yüzeyinden ölçülen yerdeğiştirme değerleri LPDT-4 vasıtasıyla deney süresince kayıt edilmiştir. Elde edilen veriler işlenerek 13 adet deney elemanı için ayrı ayrı yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri tüm çevrimler için elde edilmiştir.

2.8.2. Dayanım Zarfı Eğrilerinin Oluşturulması

Dayanım zarfı eğrisi, 13 adet betonarme çerçeve deney elemanı için ayrı ayrı olacak şekilde her çevrimde mutlak değerce en büyük kuvvet değerine karşılık gelen yerdeğiştirme değeri alınarak belirlenmiştir.

2.8.3. Etkili Rijitlik Değerlerinin Hesaplanması

Tekrarlı yatay yüklemde her çevrimde yerdeğiştirme değeri %40 oranında büyüdüğünden deney elemanlarında hasar oluşumları ile birlikte rijitlik değerlerinde azalma meydana gelmektedir. Rijitlik değerleri belirlenirken her çevrim için, yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi hesaplanmıştır (Şekil 27). Tüm çevrimlerde itme ve çekme durumları için rijitlik değerleri bağıntı 2 ve 3 yardımıyla hesaplanmıştır. Her çevrim için hesaplanan rijitlik değerleri düşey eksende, yatay yerdeğiştirme değerleri ise yatay eksende olacak şekilde 13 adet deney elemanı için ayrı ayrı rijitlik azalma eğrileri elde edilmiştir.



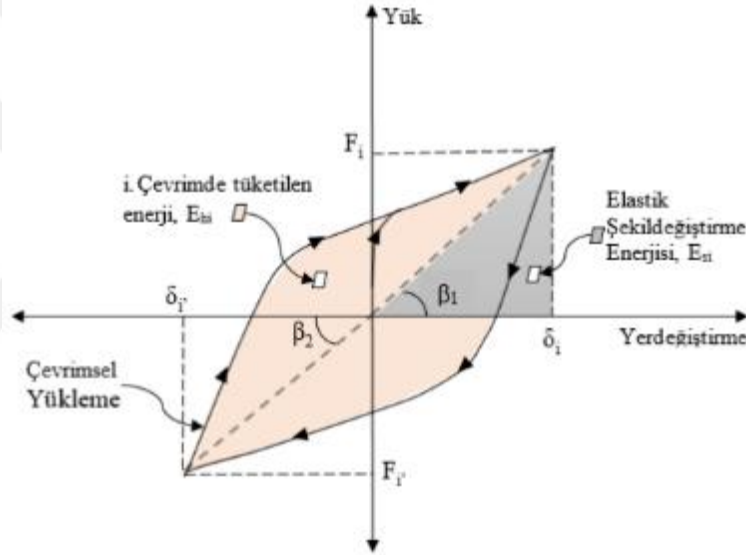
Şekil 27. Tekrarlı yatay yüklemde her bir çevrim için rijitlik değerlerinin hesaplanması (Chopra, 2007)

$$k_{e(itme)} = \tan(\beta_1) = \frac{F_i}{\delta_i} \quad (2)$$

$$k_{e(çekme)} = \tan(\beta_2) = \frac{F_i'}{\delta_i'} \quad (3)$$

2.8.4. Enerji Tüketme Kapasitelerinin Hesaplanması

Bir yapının elastik olmayan şekildeğiştirme yeteneği o yapının tükettiği enerji ile orantılıdır. Bu çalışmada, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan 13 adet betonarme çerçeve deney elemanının tekrarlı yatay yükleme etkileri altında enerji tüketme kapasiteleri hesaplanmıştır. Bu amaçla tekrarlı yatay yükleme deneyinde her çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin altında kalan alan hesaplanmış ve hesaplanan alanlar kümülatif olarak toplanarak deney elemanının tükettiği enerji miktarı belirlenmiştir. Her bir eleman için hesaplanan enerji tüketme kapasiteleri; yatay eksende yatay yerdeğiştirme, düşey eksende kümülatif enerji tüketimi olacak şekilde grafikler oluşturulmuştur (Şekil 28).



Şekil 28. i. çevrimde tüketilen enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi (Chopra, 2007)

2.9. Sayısal Çalışmalar

Bu çalışma kapsamında incelenen 13 adet betonarme çerçeve deney elemanının yüksek sıcaklık etkisi sonrasındaki tekrarlı yatay yük davranışları sonlu eleman metodu kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla ısı – yapısal sıralı iki çözümleme yapılmıştır. Çözümlemeler ABAQUS/CAE v.6.13 (2017) paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.9.1. Yüksek Sıcaklık Etkisinin Uygulanması ile İlgili Sayısal Çalışmalar

Betonarme çerçeve deney elemanlarının yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalması durumunun ABAQUS programında sayısal olarak incelenmesinde yüksek sıcaklığın beton malzeme üzerindeki etkilerinin yaratacağı sonuçları en iyi şekilde verebilen 8 düğüm noktalı sürekli ısı transfer eleman (DC3D8) tipi seçilmiştir. Bu eleman ısı transferi analizlerinde kullanılan üç boyutlu katı bir elemandır.

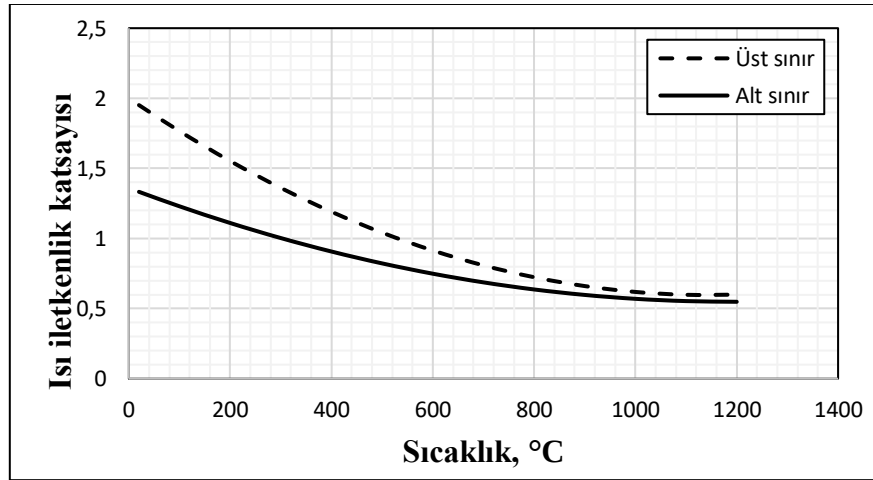
Betonarme çerçeve deney elemanlarında enine ve boyuna donatıların sayısal olarak modellenmesinde ise 2 düğüm noktalı, ısı transfer eleman (DC1D2) tipi kullanılmıştır.

ABAQUS programında betonun termal analiz modeli üç temel ısı özellik ile tanımlanmıştır. Bunlar ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı olarak nitelendirilmektedir. Bu üç temel ısı özellik TS EN 1992-1-2 de belirtilen şekilde hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 29, Şekil 30 ve Şekil 31’de gösterilmiştir.

Betonun ısı iletkenlik katsayısı (λ_c) sırasıyla üst sınır ve alt sınır için Bağntı 4 ve Bağntı 5’de belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta/100) + 0,0107(\theta/100)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\lambda_c = 1.36 - 0,136(\theta/100) + 0,0057(\theta/100)^2 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (5)$$



Şekil 29. Betonun ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi

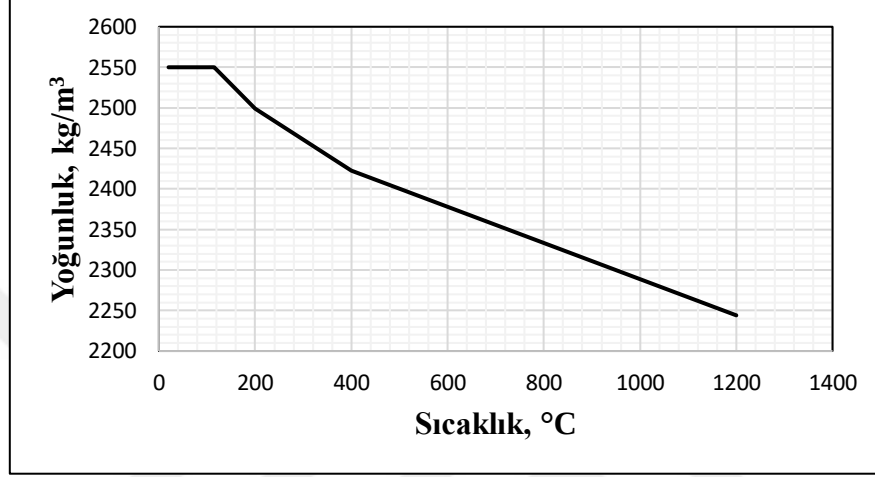
Beton yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi Bağntı 6, Bağntı 7, Bağntı 8 ve Bağntı 9’da belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$p(\theta) = p(20^\circ\text{C}) \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 115 \quad (6)$$

$$p(\theta) = p(20^{\circ}\text{C})(1 - 0,02(\theta - 115)/85) \quad 115^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200 \quad (7)$$

$$p(\theta) = p(20^{\circ}\text{C})(0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) \quad 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400 \quad (8)$$

$$p(\theta) = p(20^{\circ}\text{C})(0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) \quad 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200 \quad (9)$$



Şekil 30. Beton yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

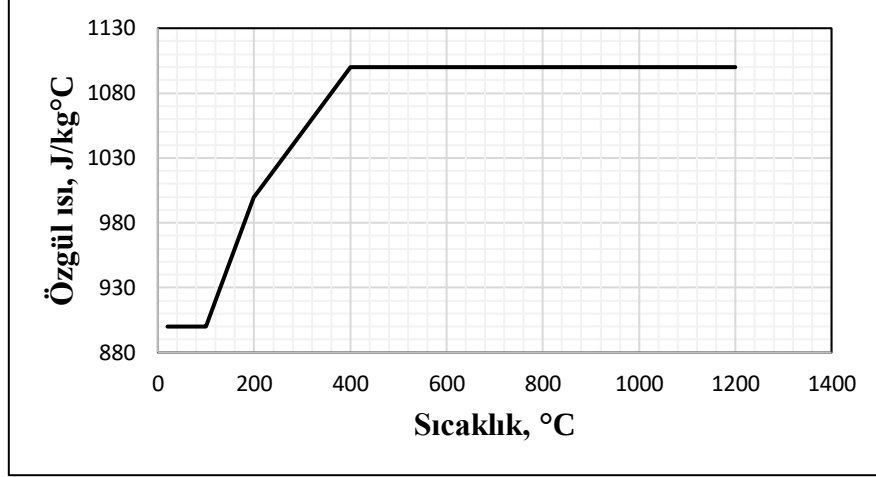
Beton özgül ısısının sıcaklıkla değişimi Bağintı 10, Bağintı 11, Bağintı 12 ve Bağintı 13'de belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$C_p(\theta) = 900 \quad 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

$$C_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \quad 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

$$C_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \quad 200^{\circ}\text{C} < \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad (12)$$

$$C_p(\theta) = 1100 \quad 400^{\circ}\text{C} < \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad (13)$$



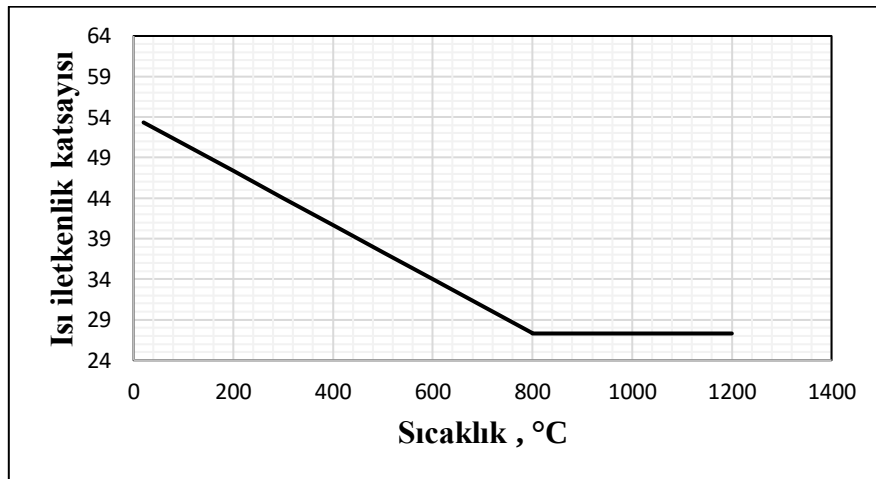
Şekil 31. Beton özgül ısısının sıcaklıkla değişimi

ABAQUS programında çeliğin termal analiz modeli üç temel ısı özellik ile tanımlanmıştır. Bunlar ısı iletkenlik katsayısı, yoğunluk ve özgül ısı olarak nitelendirilmektedir. Bu üç temel ısı özellik TS EN 1993-1-2 de belirtilen şekilde hesaplanmış ve sırasıyla Şekil 32, Şekil 33 ve Şekil 34’de gösterilmiştir.

Çeliğin ısı iletkenlik katsayısı (λ_a) Bağlantı 14 ve Bağlantı 15’de belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

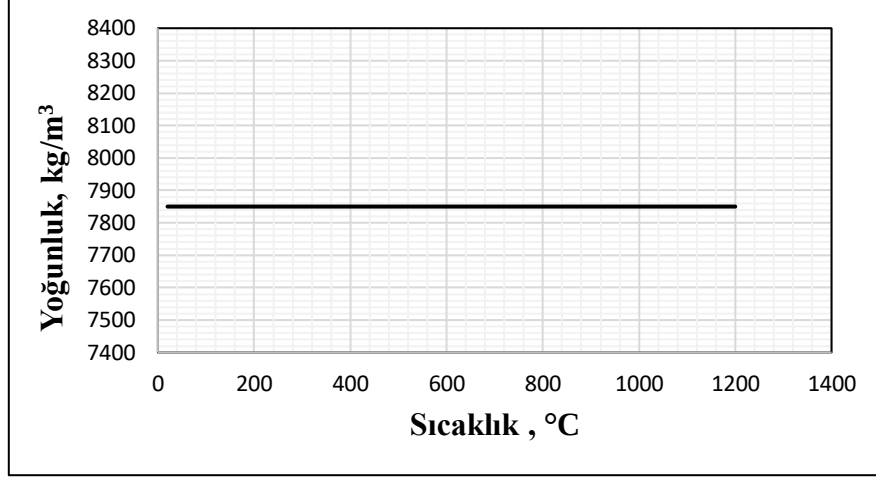
$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 800^\circ\text{C} \quad (14)$$

$$\lambda_c = 27,3 \quad 800^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (15)$$



Şekil 32. Çeliğin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklıkla değişimi

Çelik yoğunluğu sıcaklıktan bağımsız olup genellikle $p_a = 7850 \text{ kg/m}^3$ alınabilir.



Şekil 33. Çelik yoğunluğunun sıcaklıkla değişimi

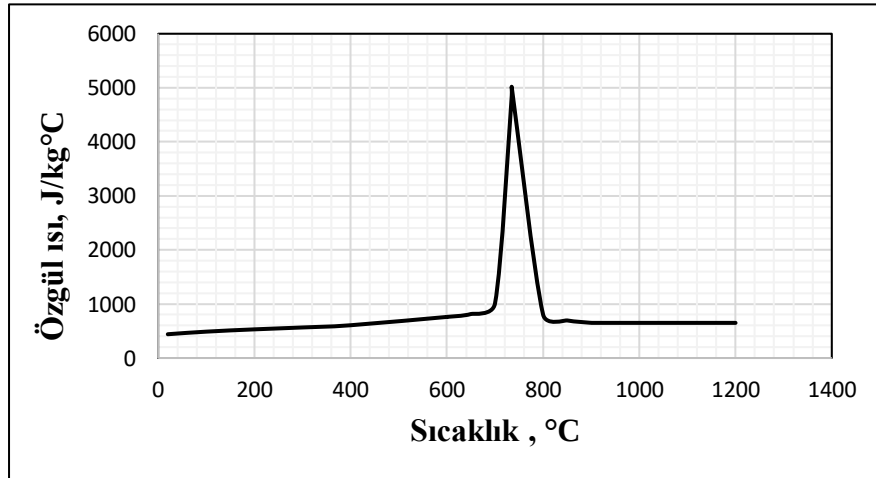
Çeliğin özgül ısısının sıcaklıkla değişimi Bağntı 16, Bağntı 17, Bağntı 18 ve Bağntı 19'da belirtilen şekilde hesaplanmıştır.

$$C_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta < 600^\circ\text{C} \quad (16)$$

$$C_a = 666 + 13002/(738 - \theta_a) \quad 600^\circ\text{C} \leq \theta < 735^\circ\text{C} \quad (17)$$

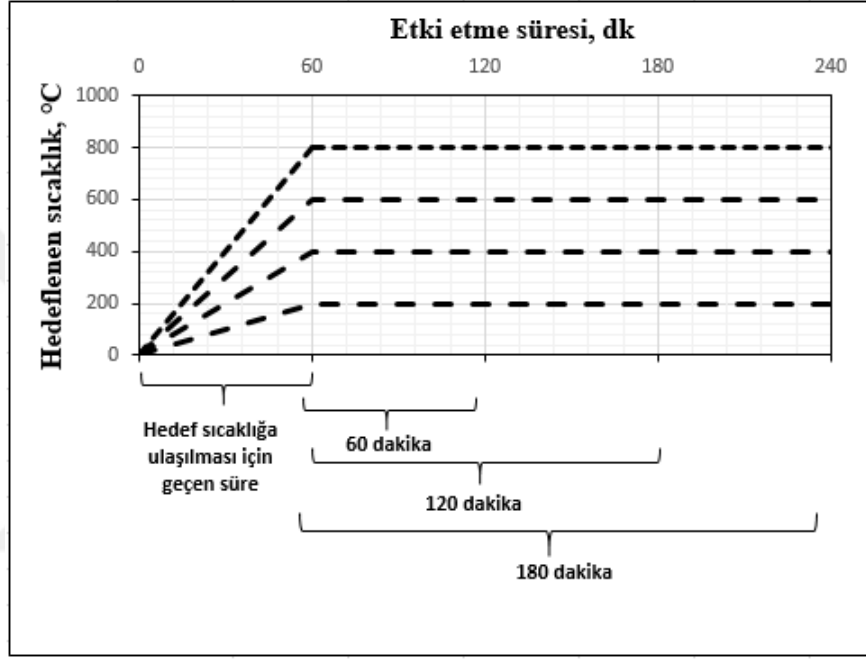
$$C_a = 545 + 17820/(\theta_a - 731) \quad 735^\circ\text{C} \leq \theta < 900^\circ\text{C} \quad (18)$$

$$C_a = 650 \quad 900^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (19)$$



Şekil 34. Çelik özgül ısısının sıcaklıkla değişimi

Sayısal çalışmada betonarme çerçevelere yüksek sıcaklık etkisinin uygulanmasının deneysel çalışmada yürütülen yöntemlerle benzerlik oluşturması açısından betonarme çerçeve elemanlara Şekil 35’de belirtilen şekilde 200, 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklıklar 60, 120 ve 180 dakika süresince uygulanmıştır. Sonlu eleman modeli yapılan betonarme çerçevelerde ilk bir saat içerisinde hedef sıcaklıklara ulaşılmış, sonrasında bu hedef sıcaklıklar 60, 120 ve 180 dakika sürelerinde etki ettirilmiştir (Şekil 35).



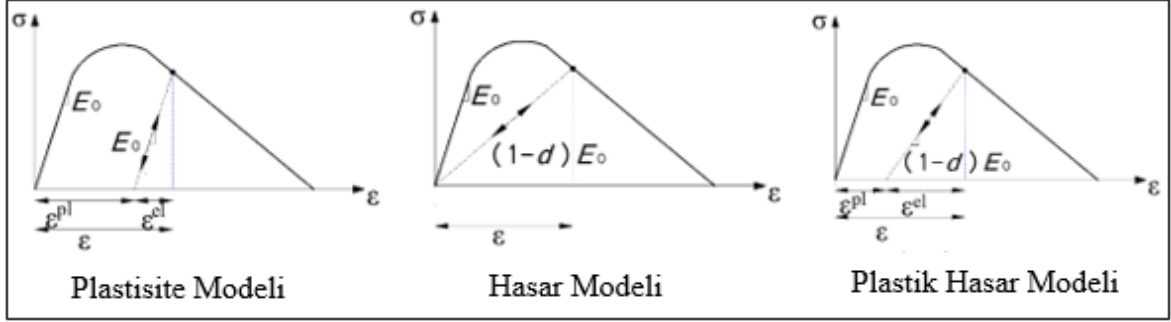
Şekil 35. Yüksek sıcaklık etkisinin termal analizde uygulanması

2.9.2. Tekrarlı Yatay Yük Etkisinin Uygulanması ile İlgili Sayısal Çalışmalar

RCF_13_Referans deney elemanı hariç olmak üzere betonarme çerçeve deney elemanlarının ısı analiz sonrasında yapısal analizleri yapılmıştır. Betonarme çerçevenin yapısal analizinde aşağıda belirtilen hususlara dikkat edilmiştir.

Sonlu eleman metodunun kullanılmasıyla gerçekleştirilen sayısal çalışmalarda, deneysel sonuçlara yaklaşmak için malzeme modellerinin doğru seçilmesi son derece önemlidir. Sayısal çalışmalarda beton ve betonarme çeliği gibi birçok malzemenin gerçek özelliklerinin idealleştirilmiş durumlarını yansıtan malzeme modellerinin kullanılması gerekmektedir. ABAQUS paket programı beton malzeme ile ilgili olarak 3 farklı malzeme modelinin tanımlanmasına imkân sağlamaktadır. Bu malzeme modelleri; beton hasar plastisite (concrete damaged plasticity), beton yayılı çatlak (concrete smeared cracking) ve

beton kırılğan çatlak (cracking model for concrete) modelleridir. Betonarme çerçeve deney elemanı tekrarlı yatay yükleme sırasında hem basınç hem de çekme etkilerine maruz kalmaktadır. Basınç etkilerinden oluşan ezilme ve çekme etkilerinden oluşan çatlama davranışı Abaqus paket programında CDP (Concrete Damage Plasticity Model) malzeme modeli kullanılarak modellenmiştir (Şekil 36 Alfarah, 2017).



Şekil 36. Hasar ve plastisite arasındaki ilişki

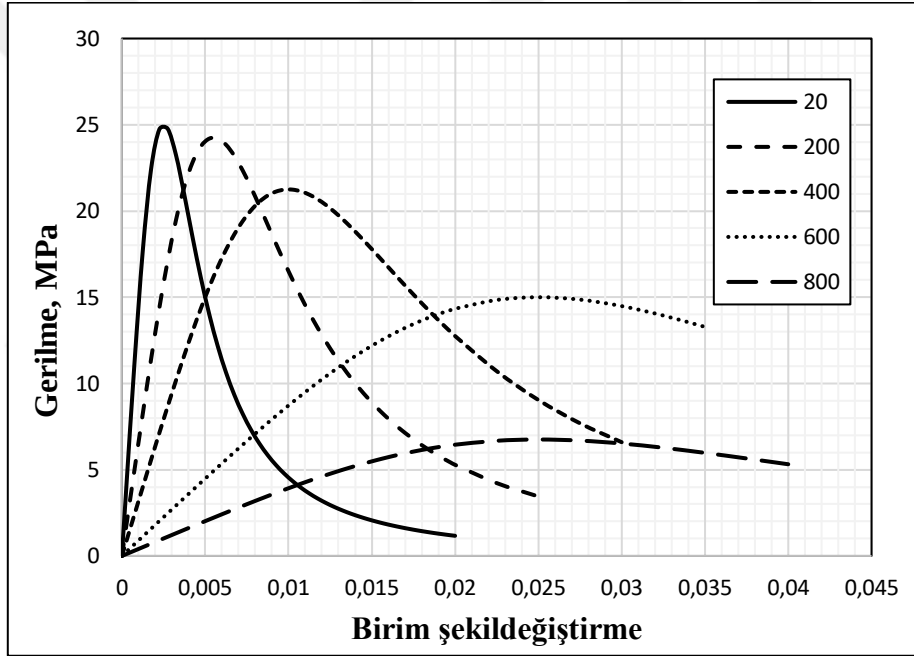
CDP malzeme modeli oluşturulurken basınç etkileri TS EN 1992-1-2'ya uygun olarak Bağıntı 20'de belirtilen şekilde hesaplanmış, Şekil 37 ve Şekil 38'de verilen gerilme – birim şekildeğiştirme eğrileri kullanılarak tanımlanmıştır.

$$\sigma_{\theta} = \frac{3\varepsilon f_{c\theta}}{\varepsilon_{c1\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1\theta}} \right)^3 \right)} \quad (20)$$

Burada $\varepsilon_{c1\theta}$ betonun farklı sıcaklıklara bağlı termal birim şekildeğiştirmesi, $f_{c\theta}$ ise betonun farklı sıcaklıklardaki basınç dayanımını ifade etmekte olup, bu değerler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Yüksek sıcaklık etkisindeki betonun gerilme – birim şekildeğiştirme ilişkisinin belirlenmesi (TS EN 1992 – 1 – 2)

$f_{c\theta}/f_{ck}$	$\epsilon_{c1\theta}$	$\epsilon_{cu1\theta}$	θ °C
1,00	0,0025	0,020	20
1,00	0,004	0,0225	100
0,97	0,0055	0,0250	200
0,91	0,0070	0,0275	300
0,85	0,0100	0,0300	400
0,74	0,0150	0,0325	500
0,60	0,0250	0,0350	600
0,43	0,0250	0,0375	700
0,27	0,0250	0,0400	800



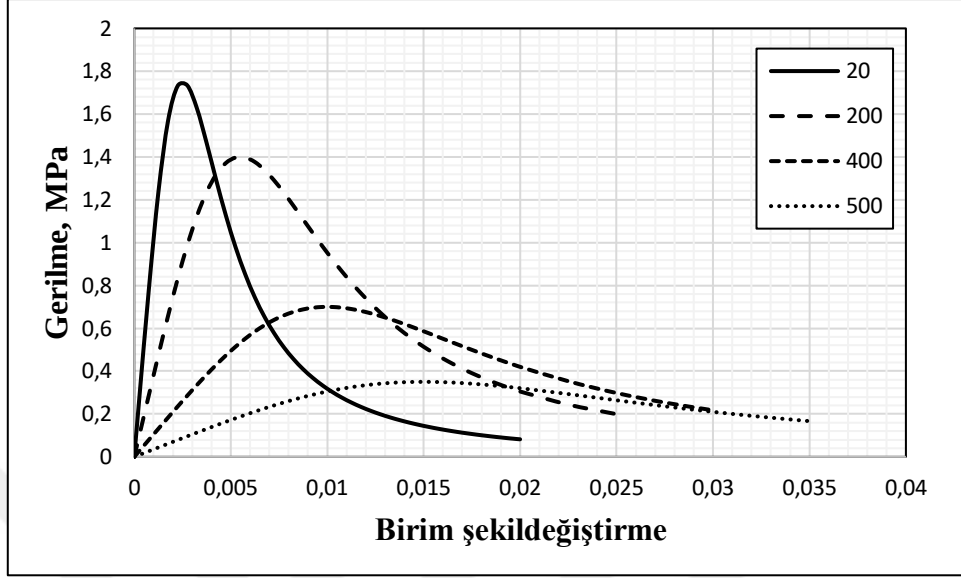
Şekil 37. Betonun idealleştirilmiş gerilme - birim şekildeğiştirme eğrisi (eksenel basınç)

CDP malzeme modeli oluşturulurken çekme etkileri TS EN 1992-1-2'ye uygun şekilde betonun karakteristik çekme dayanımının (f_{ckt}) Bağntı 21 kullanılarak azaltılması şeklinde uygulanmıştır. Burada $k_{ct}(\theta)$, azaltma katsayısının sıcaklıkla değişimi olup Bağntı 22 ve Bağntı 23 kullanılarak belirlenmiştir.

$$f_{ckt}(\theta) = k_{ct}(\theta)f_{ckt} \quad (21)$$

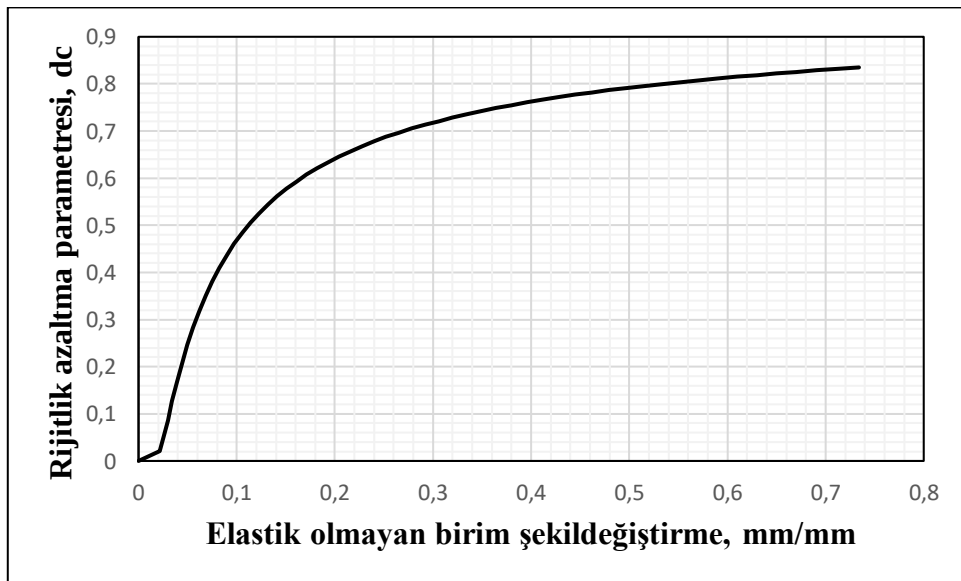
$$k_{ct}(\theta) = 1.0 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad (22)$$

$$k_{ct}(\theta) = 1.0 - 1.0 (\theta - 100)/100 \quad 100^\circ\text{C} < \theta \leq 600^\circ\text{C} \quad (23)$$

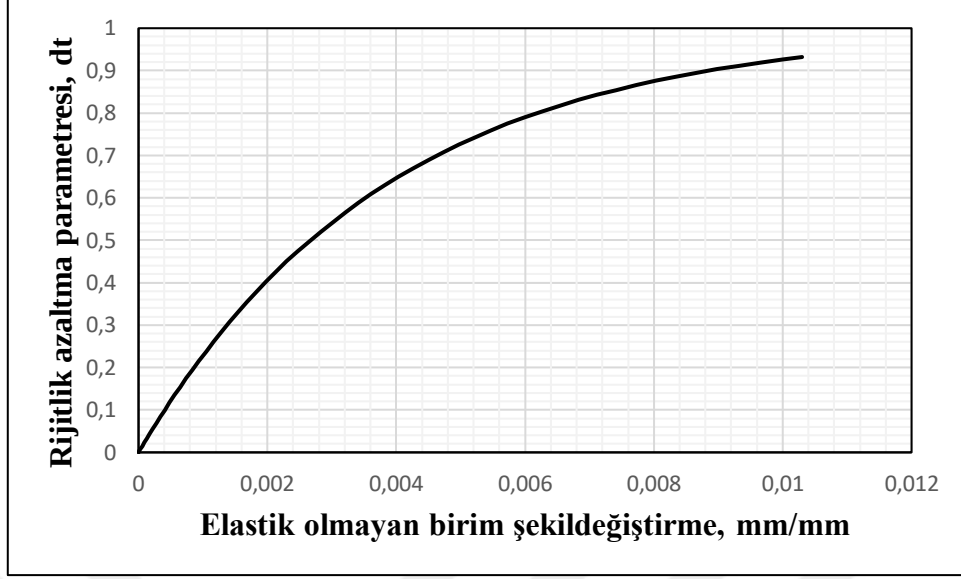


Şekil 38. Betonun idealleştirilmiş gerilme – birim şekil değiştirme eğrisi (eksenel çekme)

Betonarme çerçeve deney elemanında tekrarlı yatay yük etkisi altında betonda meydana gelen çatlaklara bağlı olarak rijitlik kayıpları meydana gelmektedir. Betonun rijitliğindeki azalmayı temsil etmek amacıyla basınç için “dc”, çekme için “dt” rijitlik azaltma parametreleri tanımlanmıştır. Rijitlik azaltma parametrelerinin elastik olmayan şekil değiştirmeye bağlı olarak değişimi Şekil 39 ve Şekil 40’da gösterilmiştir.



Şekil 39. Rijitlik azaltma parametresinin elastik olmayan şekil değiştirmeye bağlı değişimi (basınç için)



Şekil 40. Rijitlik azaltma parametresinin elastik olmayan şekil değiştirmeye bağlı değişimi (çekme için)

Sayısal çalışmalar doğrultusunda kullanılan CDP malzeme modeli için dilasyon açısı (ψ), dışmerkezlik (e), vizkozite (μ), iki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesine oranı f_{bo}/f_{co} olarak tanımlanmış parametrelerin ABAQUS paket programına girilmesi gerekmektedir.

Dilasyon açısı (ψ), kayma gerilmesi veya kayma şekil değiştirmesi altında malzemedeki hacimsel değişimin sayısal olarak ifade edilmesidir. Dilasyon açısının değişimi, aynı şekil değiştirmeler altında daha rijit ya da daha elastik bir malzeme davranışı ortaya çıkarabilir. Literatürdeki birçok çalışmada [Ali vd., 2013, Zhou vd., 2016, Hamunzala ve Teklemariam, 2016, Sümer ve Aktaş, 2015] dilasyon açısının 5° ile 45° arasında seçilerek deneysel çalışmalarla uyum sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışmada dilasyon açısının farklı değerleri ile çok sayıda parametrik çalışma yapılmış, deneysel çalışmaya en yakın değerler dilasyon açısının 32° olduğu durumda elde edilmiştir.

Dışmerkezlik (e), Hiperbolik akma potansiyelinin asimptotuna yaklaşma hızını tanımlayan küçük bir pozitif sayıdır [Abaqus, 2018]. Eksantrisite sıfıra yaklaştıkça akış potansiyeli düz bir çizgi haline gelmektedir. Literatürde [Molina vd., 2015, Ren vd., 2015, Zhao vd., 2016] ve bu tez çalışmasında kullanılan ve varsayılan eksantrisite 0,1 olarak alınmıştır.

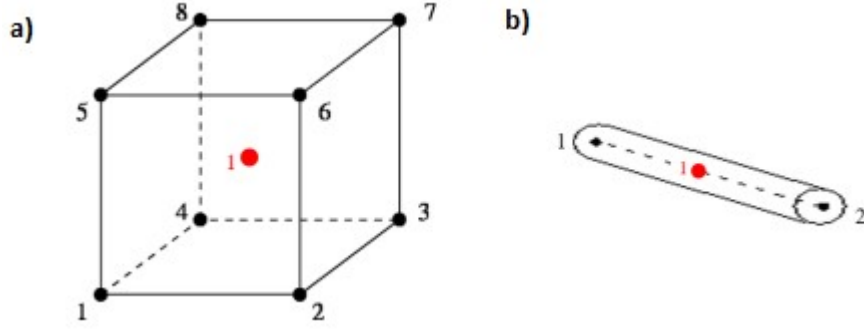
İki eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesinin, tek eksenli yükleme durumundaki akma gerilmesine oranı olarak tanımlanan f_{bo}/f_{co} oranı literatürde [Michal ve Andrzej, 2015, Flippo, 2016] ve bu tez çalışmasında 1,16 olarak alınmıştır.

Viskozite (μ), sayısal analizlerde beton malzeme denklemlerinin vizko – plastik olarak düzenlenmesini sağlayan parametredir. Malzeme modellerinde, kesitlerde meydana gelen yumuşama ve rijitlik kayıpları, analizlerde yakınsama problemlerini oluşturmakta, viskozite parametresi bu tür problemlerin en aza indirgenmesini sağlamaktadır. ABAQUS paket programı tarafından varsayılan viskozite değeri 0 olup, literatürdeki çalışmalarda [Shahryari ve Esfandiari, 2015, Dere ve Köroğlu, 2017, Michal ve Andrzej, 2015, Ren vd., 2015, Labibzadeh vd., 2017] viskozite değeri 1×10^{-7} ile 667×10^{-3} arasında seçilmiştir. Bu çalışmada viskozitenin farklı değerleri ile çok sayıda parametrik çalışma yapılmış, deneysel çalışmaya en yakın değerler viskozitenin 1×10^{-4} olduğu durumda elde edilmiştir.

Literatürdeki birçok çalışmada [Hamunzala ve Teklemariam, 2016, Risan vd., 2017, Sümer ve Aktaş, 2015, Sinaei vd., 2012], betonarme çeliğinin sonlu eleman modelinde elastoplastik malzeme kullanımının yaygın olduğu görülmektedir. Bu tez çalışmasında da çelik elemanlar için elastoplastik malzeme modeli kullanılmıştır. Bu modelde çelik malzeme akma gerilmesine ulaştıktan sonra gerilme artışı meydana gelmeden plastik birim şekildeğiştirmeler yapar. Çeliğe ait elastisite modülü (E_s), poisson oranı (ν), akma gerilmesi (f_y) ve plastik birim şekildeğiştirme (ε^{pl}) parametrelerinin ABAQUS programına girilmesiyle çelik malzeme modeli tanımlanabilir.

Betonarme çerçeve deney elemanlarına tekrarlı yatay yükün uygulanması durumunun ABAQUS programında sayısal olarak incelenmesinde yük, yerdeğiştirme, plastik şekildeğiştirme, betonda meydana gelen çatlama ve ezilme şekillerine ait sonuçları en iyi şekilde verebilen 3 boyutlu ve 8 düğüm noktalı sürekli katı eleman (C3D8R) tipi seçilmiştir (Şekil 41a).

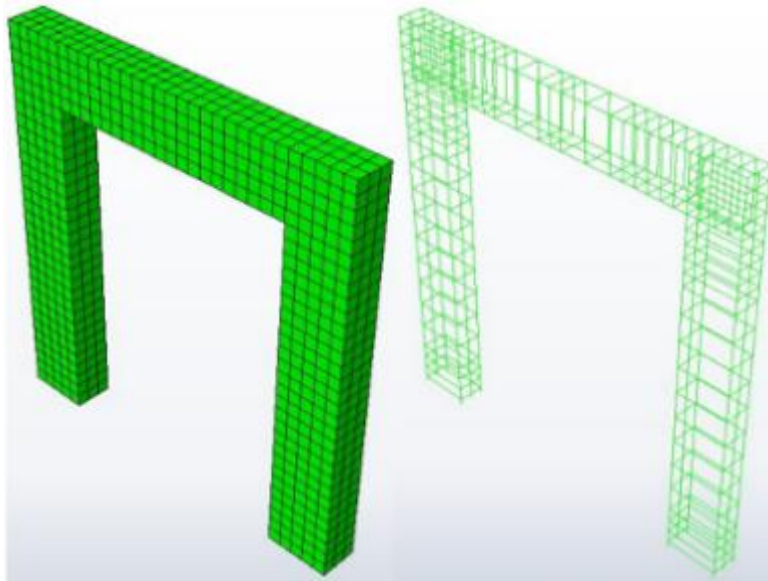
Betonarme çerçeve deney elemanlarında enine ve boyuna donatıların sayısal olarak modellenmesinde ise 2 düğüm noktalı, 3 boyutlu çubuk eleman (T3D2) tipi kullanılmıştır (Şekil 41b).



Şekil 41. a) C3D8R elemanı b) T3D2 elemanı

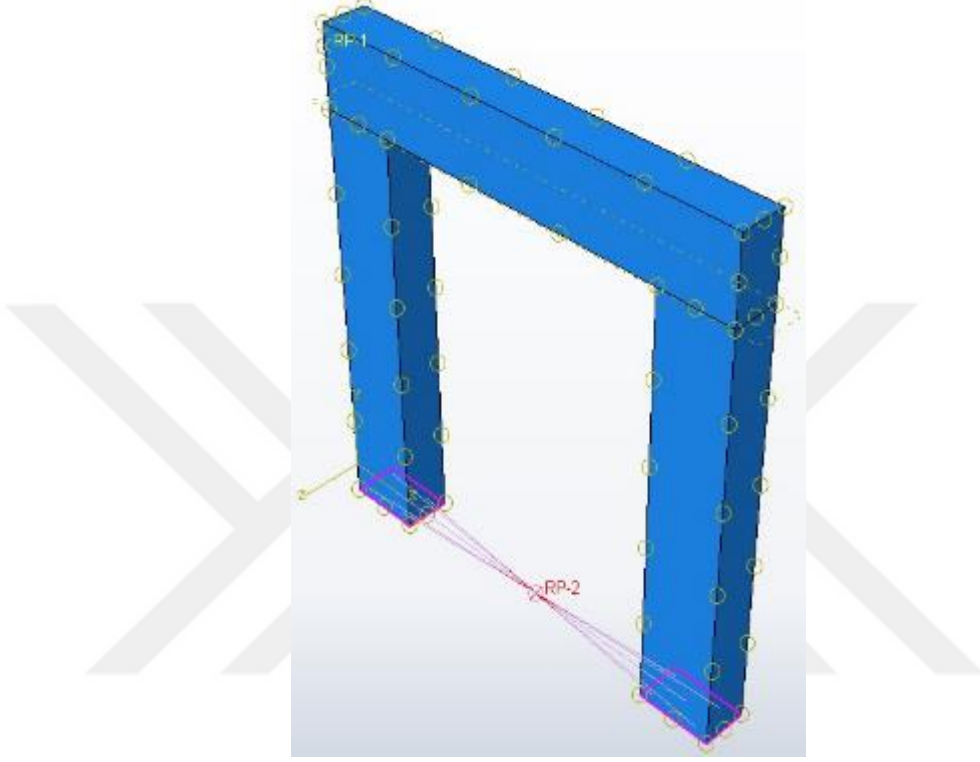
Sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılan sayısal analizlerde eleman boyutunun küçültülmesi analizlerin sonuca ulaşması açısından son derece önemlidir. Sonlu eleman boyutunun küçülmesi eleman sayısının artmasına neden olacağından, analiz süresinin uzamasına ve günlerce sürmesine sebep olmaktadır. Öte yandan eleman boyutunun büyümesi ise analiz süresini kısaltırken, yakınsama hatalarının artmasına ve analizin tamamlanamamasına neden olmaktadır.

Betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinin hazırlanmasında analiz sürelerinin kısa olması ve betonda meydana gelecek ezilme ve çatlamları gözlemleyebilmek amacıyla en uygun sonlu eleman ağının (mesh) belirlenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, betonarme elemanda sonlu eleman ağı 50mmx50mm olarak belirlenmiştir. Şekil 42’de betonarme çerçeve deney elemanının sonlu eleman ağına ayrılmış modelleri gösterilmiştir.



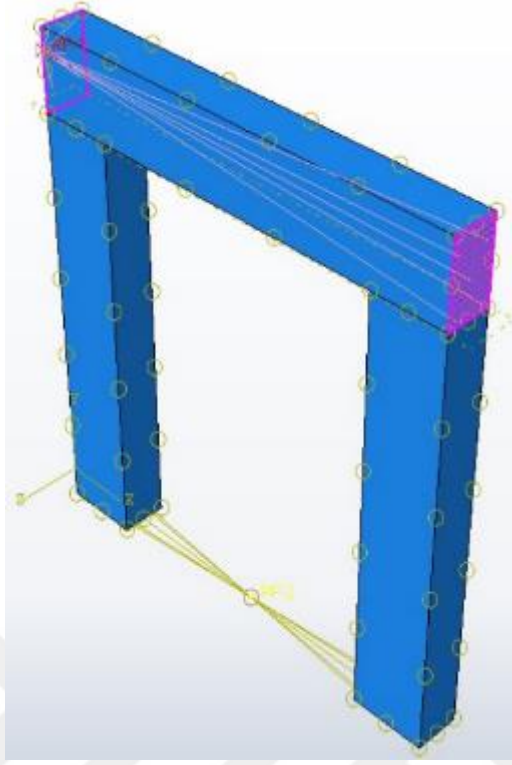
Şekil 42. Betonarme çerçeve deney elemanlarının sonlu eleman modeli

Şekil 42’de görüldüğü gibi, betonarme çerçevenin sonlu eleman modelinde sonlu eleman sayısının artmaması ve analiz sürelerinin kısaltılması amacıyla betonarme çerçevenin temel kısmı modellenmemiştir. Bunu yerine her iki kolon alt uçlarından ankastre olarak zemine mesnetlenmiştir (Şekil 43).



Şekil 43. Betonarme çerçevenin zemine mesnetlenmesi

Betonarme çerçeve deney elemanlarına tekrarlı yatay yükün uygulanmasında deneysel çalışmada hazırlanan deney düzeneğinin, sayısal çalışmada da benzerlik göstermesi son derece önemlidir. Bu kapsamda deneysel çalışmada olduğu gibi sayısal çalışmada da yatay yükün kiriş her iki uç bölgesine eşit bir şekilde dağıtılması sağlanmıştır. Bu amaçla kiriş her iki uç bölgelerindeki düğüm noktaları, kiriş eksenindeki bir referans noktasında birleştirilerek bu referans noktasına tekrarlı yatay yük uygulanmıştır (Şekil 44).



Şekil 44. Betonarme çerçevenin yatay yükün uygulanması

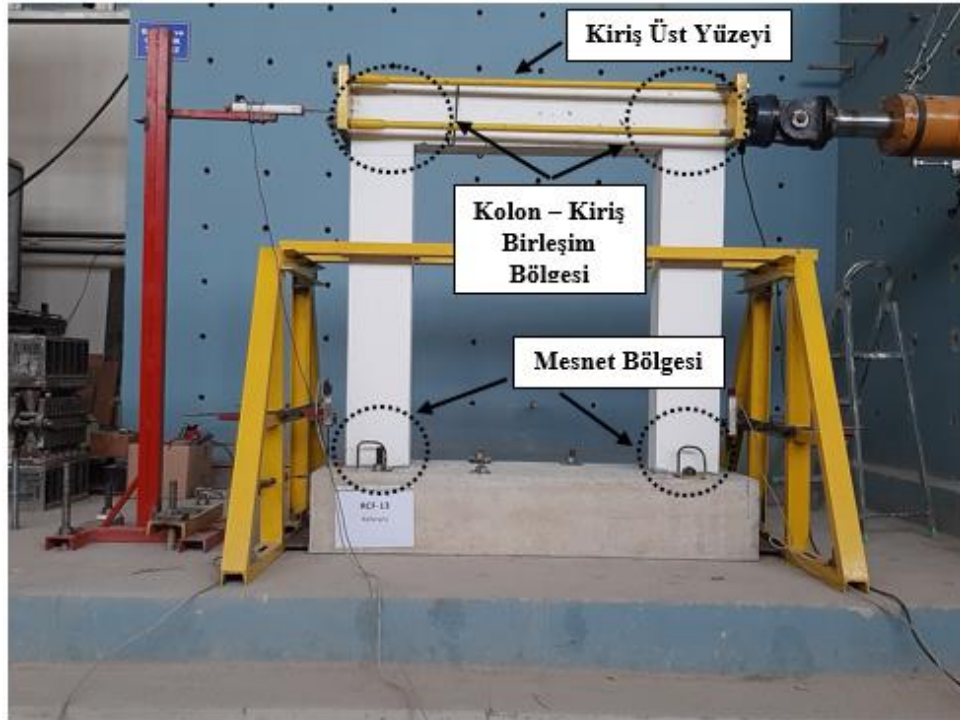
3. BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Giriş

Çalışma doğrultusunda üretilen betonarme çerçeve deney elemanları yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme etkisinde deneylere tabi tutulmuştur. Bu bölümde her bir deney elemanı için elde edilen yatay yük – yatay yerdeğiştirme, rijitlik – yatay yerdeğiştirme, kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme ve dayanım zarfı eğrileri tek tek verilmekte, devamında ise deneysel bulgular karşılaştırılmalı olarak ele alınmaktadır.

Tekrarlı yatay yükleme deneylerinden elde edilen tüm eğrilerde (+) itmeyi, (-) ise çekme yüklemesini temsil etmektedir. Yüklemenin son altı çevrimi tek tek grafik halinde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin altında gösterilmiştir.

Bu bölümde, betonarme çerçeve deney elemanında oluşan hasarın tanımlanmasında kullanılan ifadelerde karışıklık yaşanmaması açısından Şekil 45'deki gösterim hazırlanmıştır.



Şekil 45. Deney elemanında hasarın tanımlanması

3.2. Yüksek Sıcaklık Etkisine Maruz Kalan Deney Elemanlarının Tekrarlı Yatay Yükleme Altındaki Davranışı

3.2.1. RCF_13_Referans Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF-13 referans deney elamanına ait genel görünüm Şekil 46’da verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_13_Referans deney elemanındaki hasar durumları Şekil 47’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 48’de gösterilmiştir.



Şekil 46. RCF_13_Referans deney elemanının genel görünümü

Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 3,97 kN, çekmede 2,61 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 3,99 kN, çekmede 3,41 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 3,81 kN, çekmede 2,58 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 3,57 kN, çekmede 2,42 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 4,09 kN, çekmede 2,40 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 3,95 kN, çekmede 2,63 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,58 kN, çekmede 3,13 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemenin sekizinci çevriminde

0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,76 kN, çekmede ise 4,94 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 7,38 kN, çekmede 6,16 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemenin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 9,57 kN, çekmede 7,99 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 11,87 kN, çekmede 10,27 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 15,27 kN, çekmede ise 12,95 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 18,99 kN, çekmede 16,29 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon kiriş birleşim bölgesinde kılcal çatlaklar oluşmaya başlamıştır.

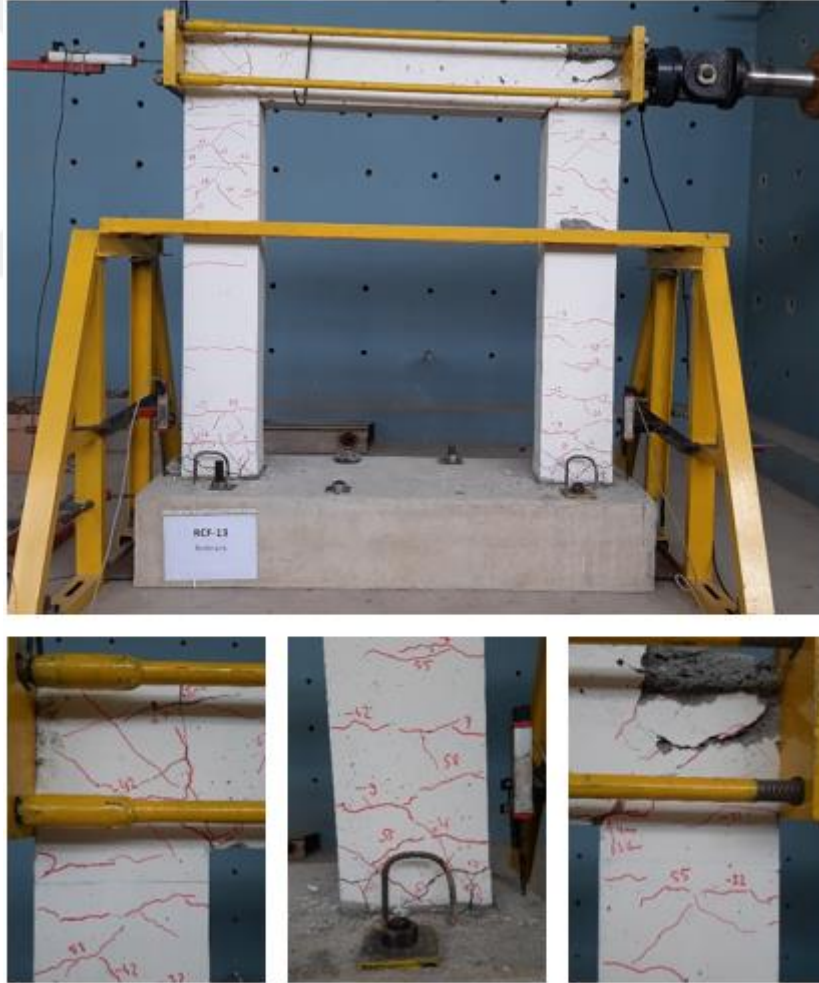
Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 23,48 kN, çekmede 20,05 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının mesnete yakın bölgelerinde gözle görölür şekilde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 29,37 kN, çekmede ise 25,83 kN yük değerine ulaşılmış olup, deney elemanının kolon-kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşmeye başlamıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 37,18 kN, çekmede 33,21 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 47,50 kN, çekmede 43,17 kN yük değerine ulaşılmış olup, mesnet bölgesinde çatlak oluşumları devam etmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 58,47 kN, çekmede 52,90 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon-kiriş birleşim bölgesinde çatlak oluşmuştur.

Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 65,83 kN, çekmede 56,76 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 70,57 kN, çekmede 59,45 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,8 mm'ye ulaşmıştır. Ayrıca deney elemanının mesnet bölgesinde açılma başlamıştır.

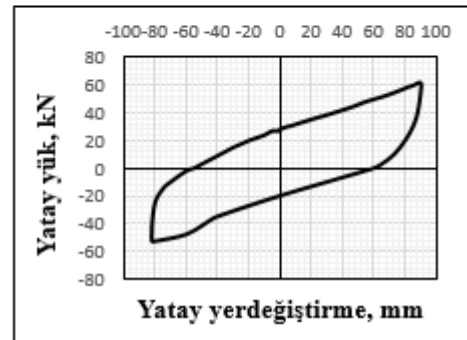
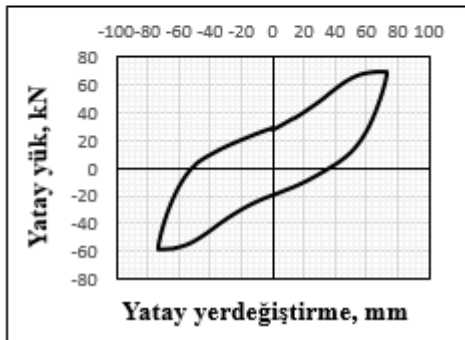
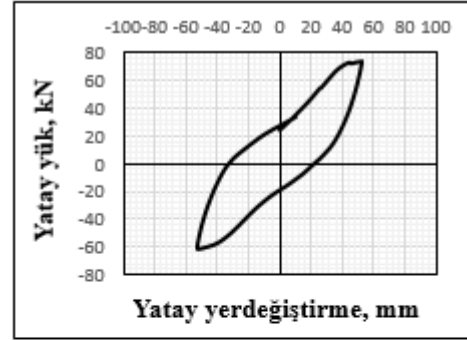
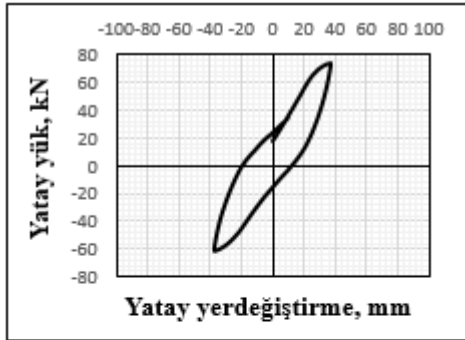
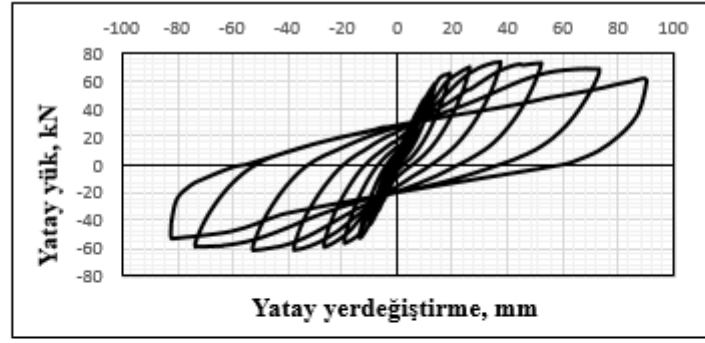
Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 74,15 kN, çekmede 61,76 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnette mafsallaşma başlamıştır. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık,

itmede 73,49 kN, çekmede 61,85 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde betonda dökülmeler oluşmuş, mesnette 4 mm açılma ve mafsallaşmaya bağlı olarak 3 mm çatlak genişliğine ulaşılmıştır.

Yükleme protokolünün son yükleme çevrimi olan yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 69,04 kN, çekmede ise 59,27 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlak kiriş üst seviyesine doğru düşeyde ilerleyerek 4 mm genişliğe ulaşmıştır (Şekil 47). Kolon – kiriş birleşim bölgesindeki betonda ezilmeler gözlemlenmiştir. Ayrıca, deney elemanının mesnet bölgesinde 5 mm açılma meydana gelmiş, kolon boyuna ve enine donatısı görünür hale gelerek, boyuna donatılarda burkulma gözlemlenmiştir (Şekil 47). Bu çevrim ile birlikte deneye son verilmiştir.



Şekil 47. Deney sonu RCF_13_Referans deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 48. RCF_13_Referans deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.2. RCF_1_200_60 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_1_200_60 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 49’da verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_1_200_60 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 50’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 51’de gösterilmiştir.



Şekil 49. RCF_1_200_60 deney elemanının genel görünümü

Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 2,59 kN, çekmede 1,98 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,52 kN, çekmede 2,02 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,42 kN, çekmede 2,28 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,47 kN, çekmede 1,97 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,33 kN, çekmede 1,86 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 3,12 kN, çekmede 1,93 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir.

Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,99 kN, çekmede 2,79 kN yük değeri okunmuştur. Yükleminin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,96 kN, çekmede ise 3,73 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,82 kN, çekmede 5,07 kN yük değeri okunmuştur. Yükleminin

onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,96 kN, çekmede 6,23 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 12,06 kN, çekmede 8,32 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 15,79 kN, çekmede ise 10,69 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 20,94 kN, çekmede 13,49 kN yük değeri okunmuştur.

Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 27,02 kN, çekmede 16,68 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 34,54 kN, çekmede ise 21,01 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanında ilk çatlaklar kolon kiriş birleşim bölgesinde oluşmaya başlamıştır.

Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 44,14 kN, çekmede 27,52 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlaklar gözle görülür şekilde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 55,49 kN, çekmede 35,65 kN yük değerine ulaşılmış olup, mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlak oluşumları devam etmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 62,53 kN, çekmede 45,03 kN yük değeri okunmuştur.

Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 65,66 kN, çekmede 48,90 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Ayrıca bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 68,44 kN, çekmede 51,11 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,0 mm'ye ulaşmış ve kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde ilerlemeye başlamıştır. Ayrıca deney elemanının mesnet bölgesindeki açılma 3,0 mm olarak ölçülmüştür.

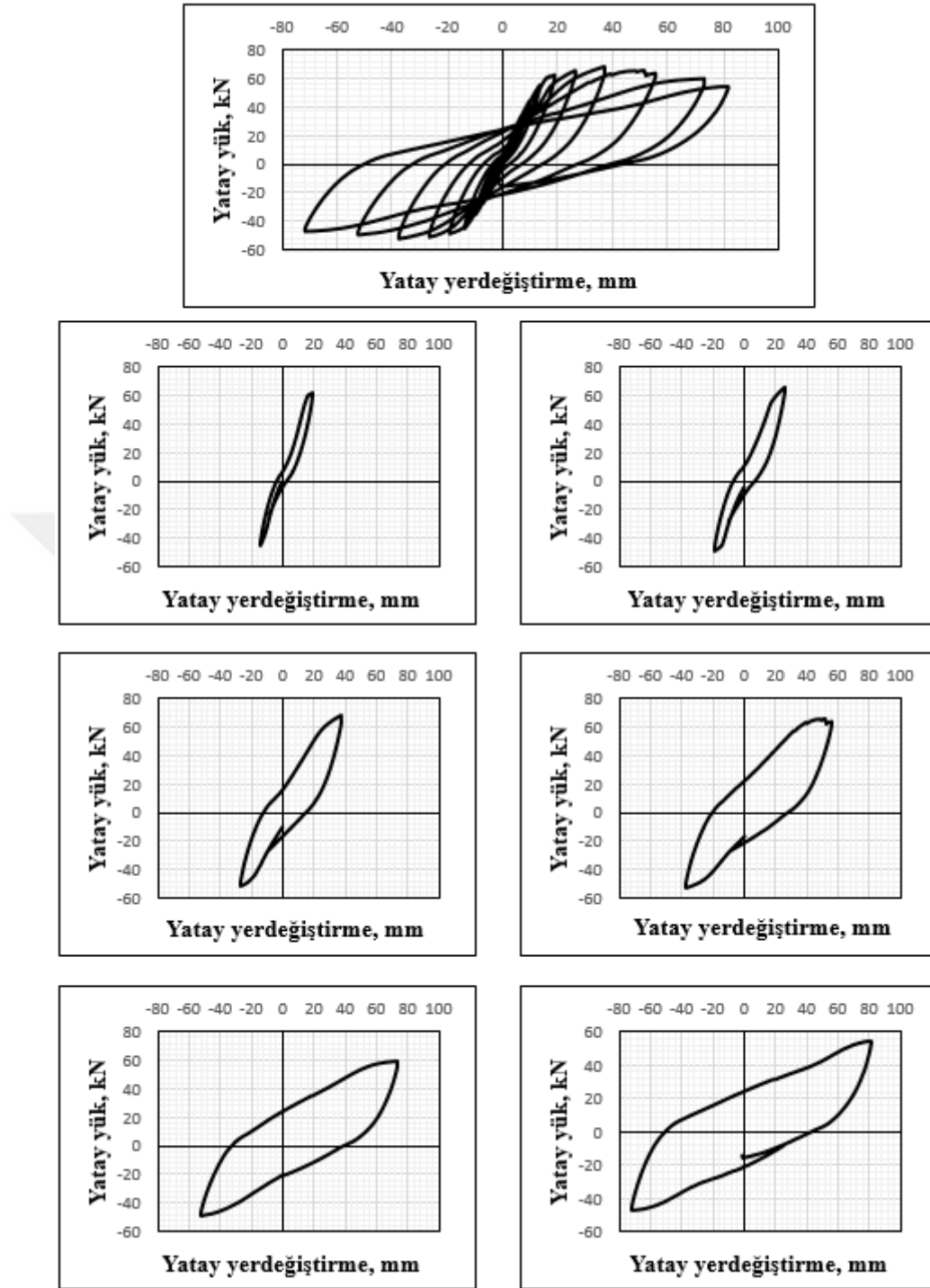
Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 65,42 kN, çekmede 52,38 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnette mafsallaşma başlamış, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4 mm ye

ulaşmıştır. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 59,64 kN, çekmede 49,63 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde betonda dökülmeler oluşmuş, mesnette ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5 mm açılma ve mafsallaşmaya bağlı olarak 3 mm çatlak genişliğine ulaşılmıştır. Ayrıca kiriş elemanın üst kısmındaki boyuna donatının doğrultusunda 6 mm genişliğinde çatlak oluşmuştur.

Yüklemeye protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 54,43 kN, çekmede ise 47,21 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlak 5 mm ye ulaşmış, mesnetteki açılma ise 6 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmında paspayı tabakasında kabuk atması meydana gelmiştir.



Şekil 50. Deney sonu RCF_1_200_60 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 51. RCF_1_200_60 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.3. RCF_4_400_60 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_4_400_60 deney elemanına ait genel görünüm Şekil 52’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_4_400_60 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 53’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 54’de gösterilmiştir.



Şekil 52. RCF_4_400_60 deney elemanının genel görünümü

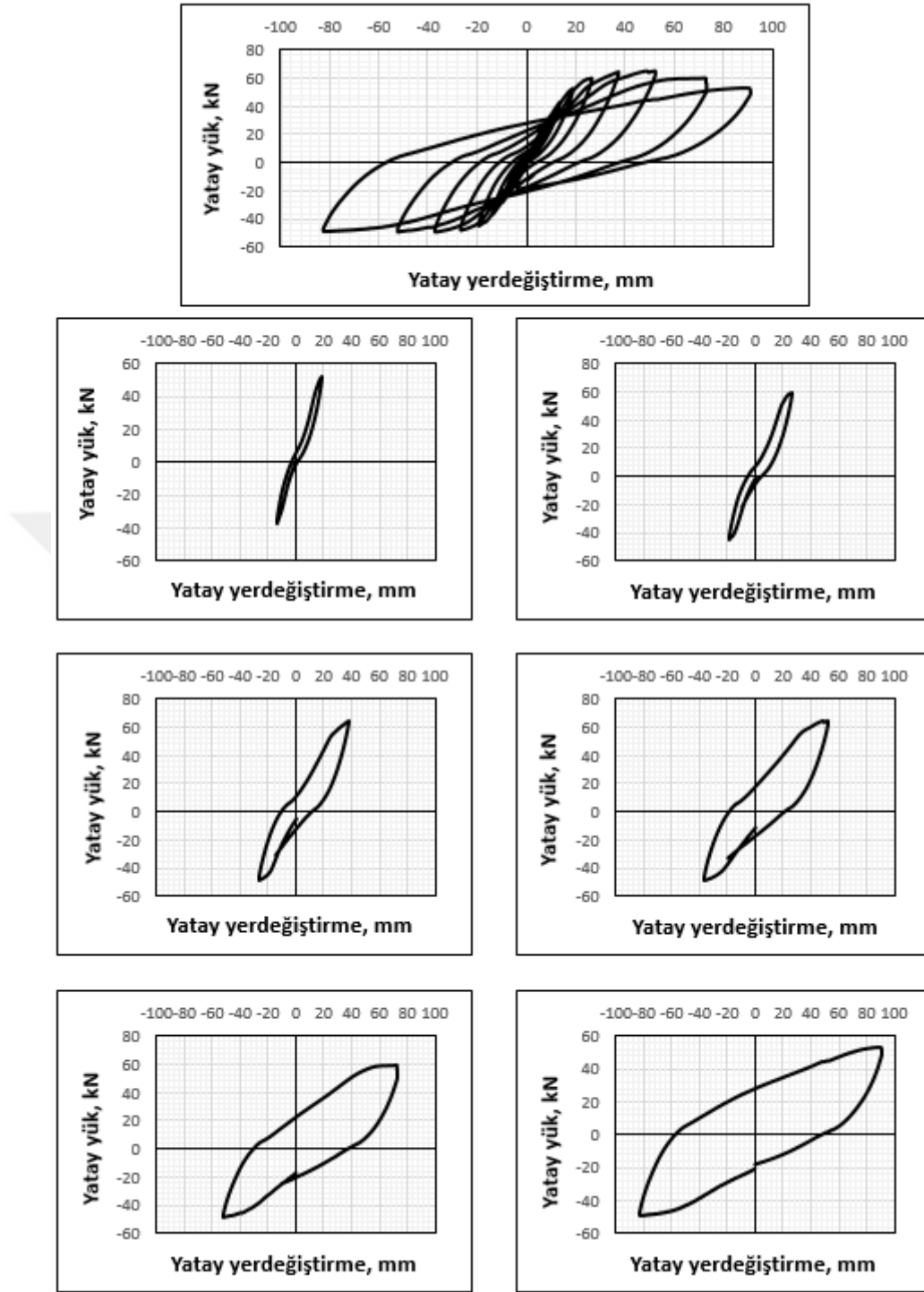
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 1,67 kN, çekmede 1,25 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 1,72 kN, çekmede 2,85 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 1,83 kN, çekmede 2,42 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 1,83 kN, çekmede 2,26 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 1,71 kN, çekmede 2,23 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 1,78 kN, çekmede 2,44 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,33 kN, çekmede 2,33 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemenin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,26 kN, çekmede ise 3,06 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 3,90 kN, çekmede 3,41 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemenin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,05 kN, çekmede 4,20 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,70 kN, çekmede 5,07 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,79 kN, çekmede ise 6,21 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 11,58 kN, çekmede 7,92 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 15,09 kN, çekmede 10,01 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanında ilk çatlaklar kolon kiriş birleşim bölgesinde oluşmaya başlamıştır. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 19,91 kN, çekmede ise 13,00 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 25,68 kN, çekmede 16,52 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde gözle görölür şekilde çatlaklar oluşmaya başlamıştır. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 33,23 kN, çekmede 21,92 kN yük değeri ulaşılmış olup, mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlak oluşumları devam etmiştir. Ayrıca kiriş – kolon birleşim bölgesinde kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 42,91 kN, çekmede 28,41 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 52,55 kN, çekmede 36,89 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnet bölgesindeki çatlaklar derinleşerek mesnette 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 59,88 kN, çekmede 45,10 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,6 mm'ye ulaşmış ve kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde ilerlemeye başlamıştır. Ayrıca deney elemanının mesnet bölgesindeki açılma 2,0 mm olarak ölçölmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 64,30 kN, çekmede 48,27 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4 mm ye ulaşmıştır. Mesnette 2,5 mm açılma ölçölmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmındaki boyuna donatıların doğrultusunda çatlak oluşumları gözlenmiştir. Bu çevrimde kiriş elemanın sağ uç bölgesinde 3 mm genişliğinde diyagonal çatlak oluşmuştur. Yirmi ikinci çevrimde 52,28

mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 64,96 kN, çekmede 49,44 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde betonda dökülmeler oluşmuş, kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5 mm açılma oluşmuştur. Ayrıca kiriş elemanın üst kısmındaki boyuna donatının doğrultusunda 5 mm genişliğinde çatlak oluşmuştur. Kiriş elemanın sağ uç bölgesindeki diyagonal çatlak 6,5 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 59,93 kN, çekmede ise 49,40 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlak 5,5 mm ye ulaşmış, mesnetteki açılma ise 6 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmında paspayı tabakasında kabuk atması meydana gelmiştir. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 52,95 kN, çekmede 49,07 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş üst kısmındaki paspayı tabakası tamamen ayrılmıştır.



Şekil 53. Deney sonu RCF_4_400_60 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 54. RCF_4_400_60 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.4. RCF_7_600_60 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_7_600_60 deney elemanına ait genel görünüm Şekil 55’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_7_600_60 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 56’da, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 57’de gösterilmiştir.



Şekil 55. RCF_7_600_60 deney elemanının genel görünümü

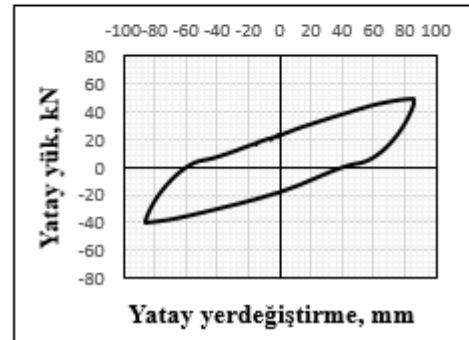
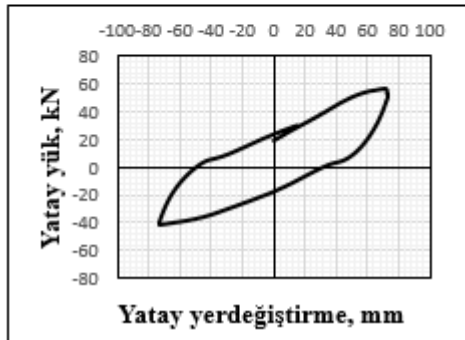
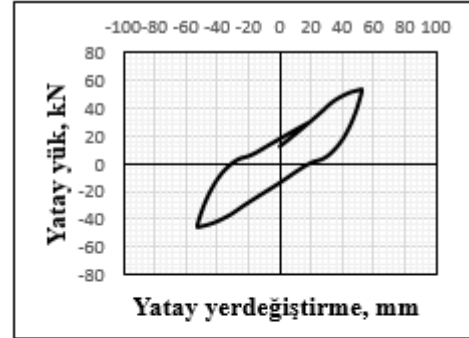
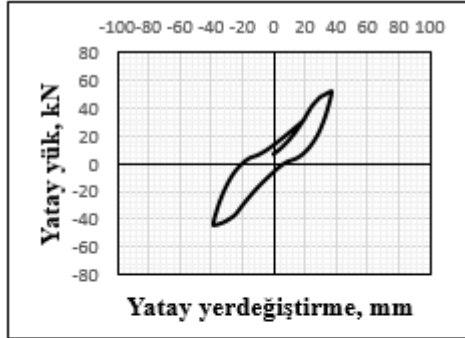
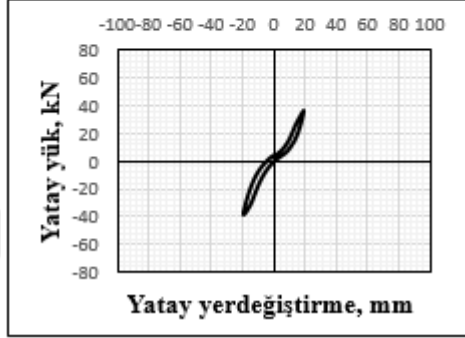
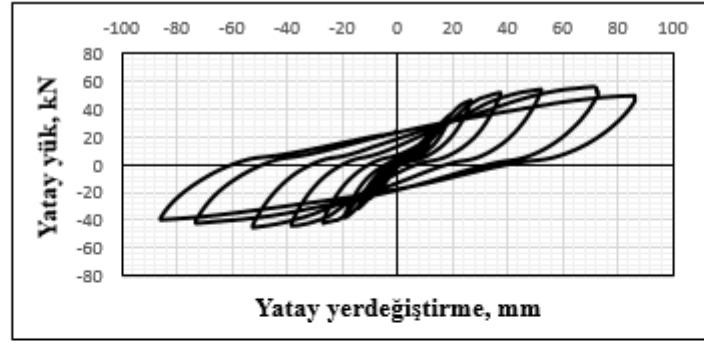
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 0,24 kN, çekmede 2,23 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 0,23 kN, çekmede 1,98 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 0,30 kN, çekmede 2,18 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 0,14 kN, çekmede 2,14 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 0,21 kN, çekmede 2,04 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 0,42 kN, çekmede 1,69 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 0,38 kN, çekmede 2,14 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 0,75 kN, çekmede ise 2,80 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 1,15 kN, çekmede 3,15 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay

yerdeğiştirmeye karşılık itmede 1,65 kN, çekmede 4,04 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 2,37 kN, çekmede 4,89 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,41 kN, çekmede ise 6,11 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,58 kN, çekmede 8,01 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 6,53 kN, çekmede 11,26 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanında ilk çatlaklar kolon kiriş birleşim bölgesinde oluşmaya başlamıştır. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,81 kN, çekmede ise 15,02 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının mesnet bölgesinde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 12,43 kN, çekmede 19,20 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlaklar gözle görölür şekilde oluşmaya başlamıştır. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 17,9 kN, çekmede 24,53 kN yük değerine ulaşılmış olup, mesnet bölgesinde ve kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlak oluşumları devam etmiştir. Ayrıca kiriş – kolon birleşim bölgesinde kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 25,64 kN, çekmede 31,42 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,4 mm açılma meydana gelmiştir. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 36,08 kN, çekmede 38,24 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek mesnette 3,5 mm açılma meydana gelmiştir. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 46,49 kN, çekmede 42,26 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,0 mm'ye ulaşmıştır. Ayrıca deney elemanının mesnet bölgesindeki açılma 1,2 mm olarak ölçölmüştür. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 51,99 kN, çekmede 44,18 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 5 mm ye ulaşmıştır. Mesnette 4,0 mm açılma ölçölmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 54,40 kN, çekmede

45,33 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde betonda dökülmeler oluşmuş, kolon – kiriş birleşim bölgesinde 6,0 mm açılma oluşmuştur. Ayrıca kiriş elemanın üst kısmındaki boyuna donatının doğrultusunda derin çatlaklar oluşmuş, betonda dökülmeler başlamıştır. Kiriş elemanın sol uç bölgesindeki 5,0 mm diyagonal çatlak oluşmuştur. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 56,05 kN, çekmede ise 42,21 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş elemanın sol uç bölgesindeki diyagonal çatlak 1,5 cm ye ulaşmış, mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 5,5 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmında paspayı tabakasında kabuk atması meydana gelmiştir. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 85,0 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 49,80 kN, çekmede 39,71 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki derin çatlaklar nedeniyle yoğun mafsallaşma oluşmuş, kiriş üst kısmındaki paspayı tabakası tamamen ayrılmıştır.



Şekil 56. Deney sonu RCF_7_600_60 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 57. RCF_7_600_60 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.5. RCF_10_800_60 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_10_800_60 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 58’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_10_800_60 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 59’da, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 60’da gösterilmiştir.



Şekil 58. RCF_10_800_60 deney elemanının genel görünümü

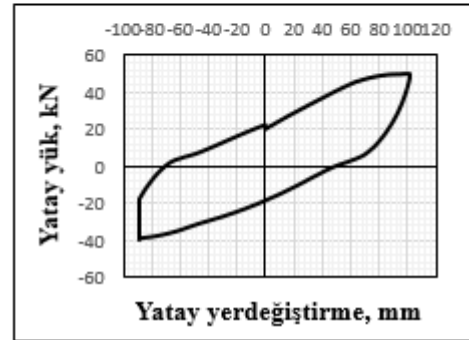
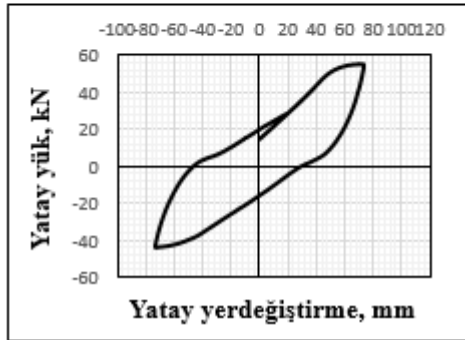
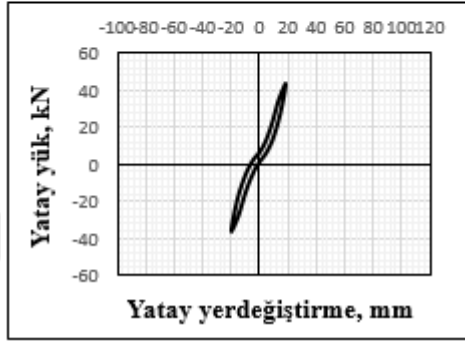
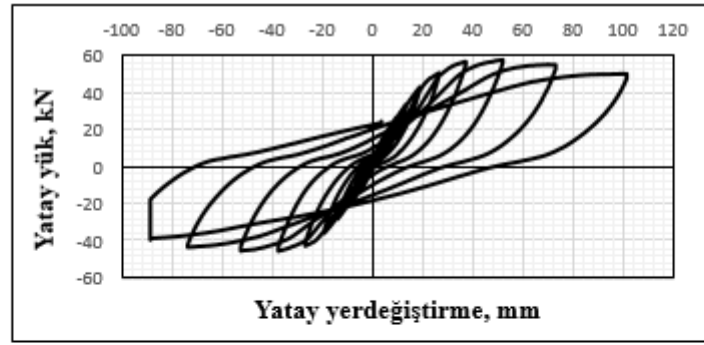
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 3,48 kN, çekmede 2,12 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 3,36 kN, çekmede 2,37 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 3,31 kN, çekmede 2,12 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 3,24 kN, çekmede 2,07 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 3,29 kN, çekmede 2,12 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 3,41 kN, çekmede 2,11 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,83 kN, çekmede 2,16 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,51 kN, çekmede ise 2,18 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 5,34 kN, çekmede 2,11 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 6,06 kN, çekmede 2,87 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 7,45 kN, çekmede 4,63 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,90 kN, çekmede ise 6,55 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanında ilk çatlaklar kolon kiriş birleşim bölgesinde oluşmaya başlamıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 10,86 kN, çekmede 8,46 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 13,54 kN, çekmede 10,79 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 17,08 kN, çekmede ise 13,58 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 21,31 kN, çekmede 17,18 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlaklar gözle görölür şekilde oluşmaya başlamış mesnet bölgesinde ise henüz çatlak oluşumu gözlenmemiştir. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 26,81 kN, çekmede 21,69 kN yük değeri ulaşılmıştır. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 33,79 kN, çekmede 28,09 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Ayrıca kiriş – kolon birleşim bölgesinde kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 43,01 kN, çekmede 35,95 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnette açılma başlamıştır. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 50,65 kN, çekmede 42,89 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,5 mm'ye ulaşmış olup, kiriş üst kısmındaki boyuna donatıların doğrultusunda çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca deney elemanının mesnet bölgesindeki açılma 1,2 mm olarak ölçölmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 56,80 kN, çekmede 45,69 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,5 mm ye ulaşmıştır. Mesnette 2,5 mm açılma ölçölmüştür. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 2,5 mm ye ulaşmış, kiriş üst kısmındaki boyuna donatıların doğrultusundaki çatlaklar büyüyerek 4,5 mm ölçölmüştür. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede

57,76 kN, çekmede 45,59 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 5,0 mm açılma oluşmuştur. Kolon – kiriş birleşim bölgesinde kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde oluşan çatlak derinleşerek 5 mm ye ulaşmıştır. Mesnette 3,5 mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca kiriş elemanın her iki uç bölgesinde yoğun şekilde diyagonal çatlak oluşumları gözlenmiştir. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 55,41 kN, çekmede ise 43,54 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş elemanın her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar genişleyerek betonda parçalanma oluşmuş, kiriş – kolon birleşim bölgesindeki çatlaklar 5,5 mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde mesnetteki açılma ise 5 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst yüzeyine doğru oluşan düşey çatlaklar 1 cm olarak ölçülmüştür. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 50,24 kN, çekmede 39,57 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki beton tamamen parçalanmıştır. Mesnetteki açılma 6,5 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 59. Deney sonu RCF_10_800_60 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 60. RCF_10_800_60 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.6. RCF_2_200_120 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_2_200_120 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 61’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_2_200_120 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 62’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 63’de gösterilmiştir.



Şekil 61. RCF_2_200_120 deney elemanının genel görünümü

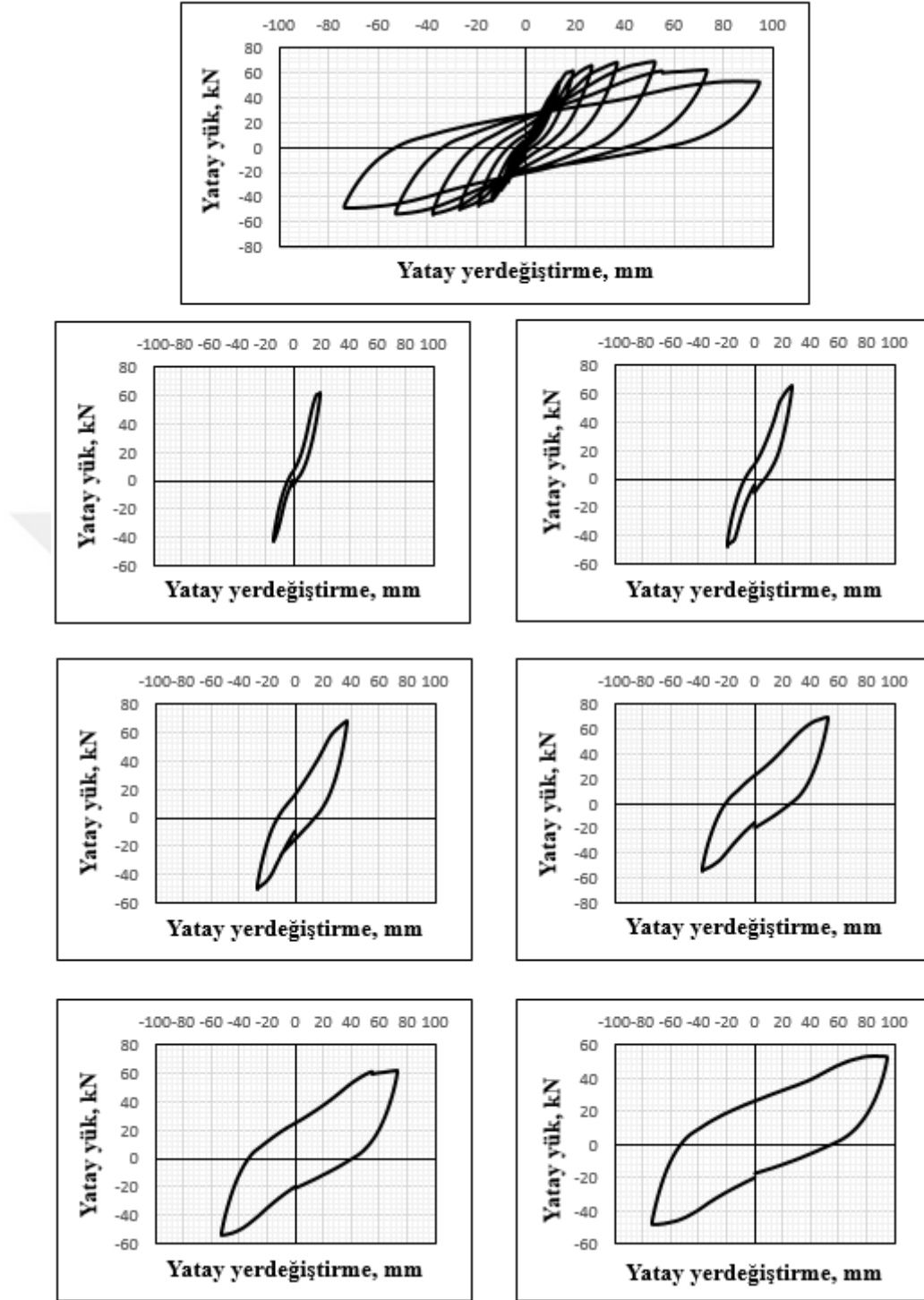
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 2,04 kN, çekmede 2,37 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,9 kN, çekmede 2,37 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,12 kN, çekmede 2,35 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 1,95 kN, çekmede 2,99 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,07 kN, çekmede 2,58 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,05 kN, çekmede 2,59 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,59 kN, çekmede 2,59 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,05 kN, çekmede ise 3,05 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 3,97 kN, çekmede 3,86 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,31 kN, çekmede 4,98 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 7,22 kN, çekmede 7,49 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 9,83 kN, çekmede ise 9,45 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 13,35 kN, çekmede 11,54 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 17,88 kN, çekmede 13,56 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 23,87 kN, çekmede ise 16,08 kN yük değerine ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 30,69 kN, çekmede 20,77 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,0mm açılma meydana gelmiştir. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 40,72 kN, çekmede 27,92 kN yük değerine ulaşılmış olup, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2mm açılma meydana gelmiştir. Ayrıca, kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 53,13 kN, çekmede 33,72 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,0mm açılma ölçülmüştür. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 61,78 kN, çekmede 42,98 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 2,5mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 66,02 kN, çekmede 47,38 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,0mm'ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak 1,0mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette açılma başlamıştır. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 68,50 kN, çekmede 50,32 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,5mm ye ulaşmış, kiriş sol uç bölgesindeki üst paspayı tabakasında açılma gözlenmiştir. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal şekilde çatlaklar oluşmuş, 1,8mm açılma ölçülmüştür. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 69,04 kN, çekmede 54,43 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim

bölgesinde 5,0mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma 3,0mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 2,0 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 61,55 kN, çekmede ise 53,68 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 5,0 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kolon – kiriş birleşim bölgesinde 6,0mm açılma ölçülmüştür. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 53,16 kN, çekmede 48,86 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, sağ uç bölgesindeki beton parçalanmış ve dökülmüştür.



Şekil 62. Deney sonu RCF_2_200_120 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 63. RCF_2_200_120 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.7. RCF_5_400_120 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_5_400_120 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 64’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_5_400_120 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 65’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 66’da gösterilmiştir.



Şekil 64. RCF_5_400_120 deney elemanının genel görünümü

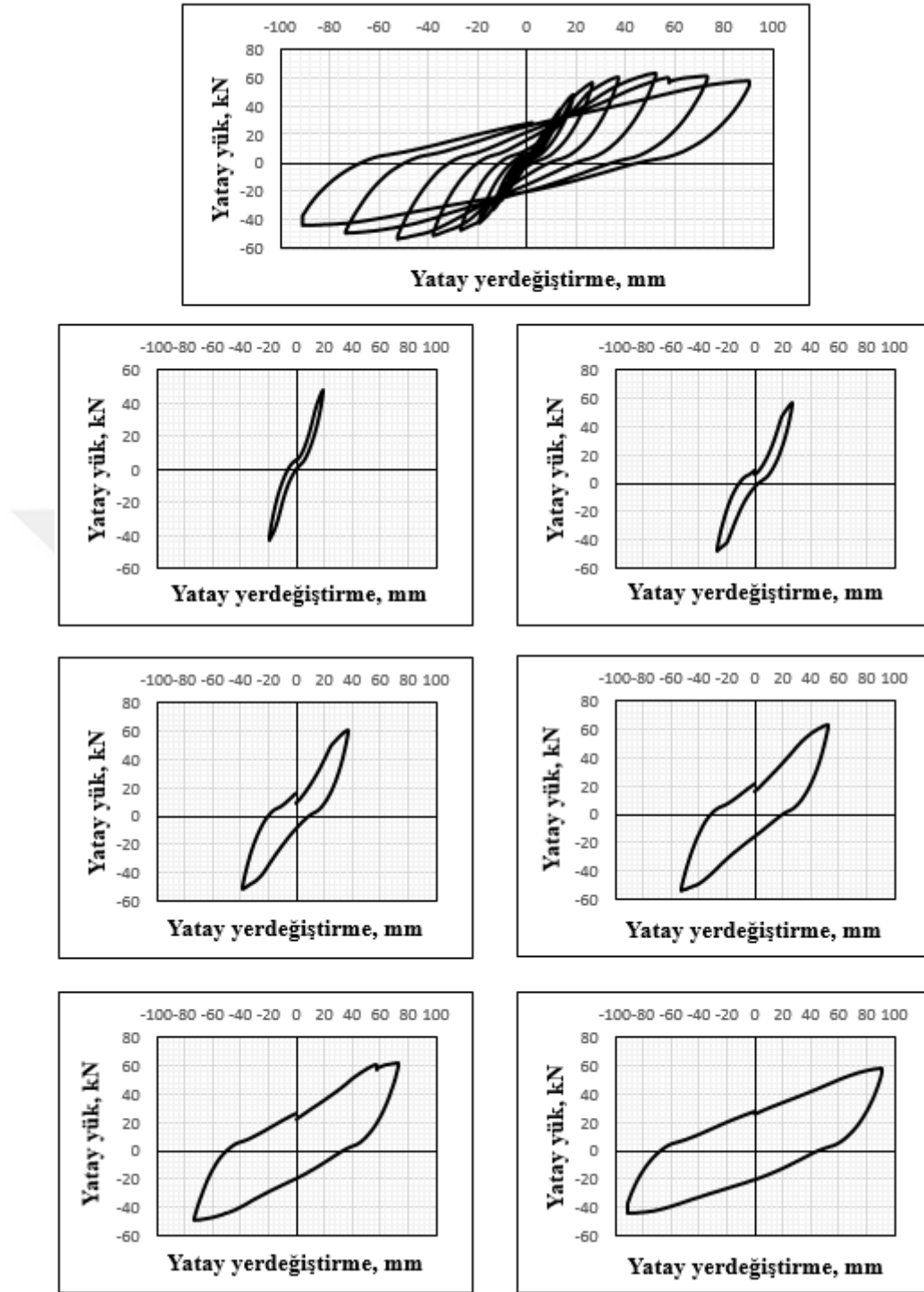
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 1,65 kN, çekmede 1,43 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 1,43 kN, çekmede 1,24 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 1,65 kN, çekmede 1,29 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 1,76 kN, çekmede 1,38 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 1,62 kN, çekmede 1,22 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 1,83 kN, çekmede 1,15 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elamanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,33 kN, çekmede 1,74 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,73 kN, çekmede ise 2,02 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 3,60 kN, çekmede 2,45 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,37 kN, çekmede 3,13 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 5,64 kN, çekmede 4,53 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 7,15 kN, çekmede ise 6,49 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,86 kN, çekmede 8,02 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 11,82 kN, çekmede 10,30 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 15,88 kN, çekmede ise 14,13 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 21,29 kN, çekmede 18,61 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 28,56 kN, çekmede 26,13 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,0mm açılma meydana gelmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 38,05 kN, çekmede 33,18 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,6mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu başlamıştır. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 48,37 kN, çekmede 41,81 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesinde 2,5mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çevrimde kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 1,2mm açılma ölçülmüştür. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 56,90 kN, çekmede 47,64 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,0mm'ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak 1,6mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette diyagonal yönde çatlak oluşumları gözlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 60,73 kN, çekmede 51,37 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,5mm ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 2,5mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal şekilde çatlaklar derinleşmiş, 2,0mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 63,47 kN, çekmede 53,91 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu

çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma 4,0mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 3,0 mm ye ulaşmış, kiriş üst bölgesindeki paspayı tabakasında derin çatlaklar oluşmuştur. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 60,35 kN, çekmede ise 49,52 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 6,0 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kolon – kiriş birleşim bölgesinde 5,5mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş üst bölgesindeki paspayı tabakasındaki ayrılmaya bağlı olarak yatay yükte ani düşüş oluşmuştur. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 58,04 kN, çekmede 43,88 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, kiriş – kolon birleşim bölgesindeki açılma 8 mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 65. Deney sonu RCF_5_400_120 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 66. RCF_5_400_120 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.8. RCF_8_600_120 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_8_600_120 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 67’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_8_600_120 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 68’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 69’da gösterilmiştir.



Şekil 67. RCF_8_600_120 deney elemanının genel görünümü

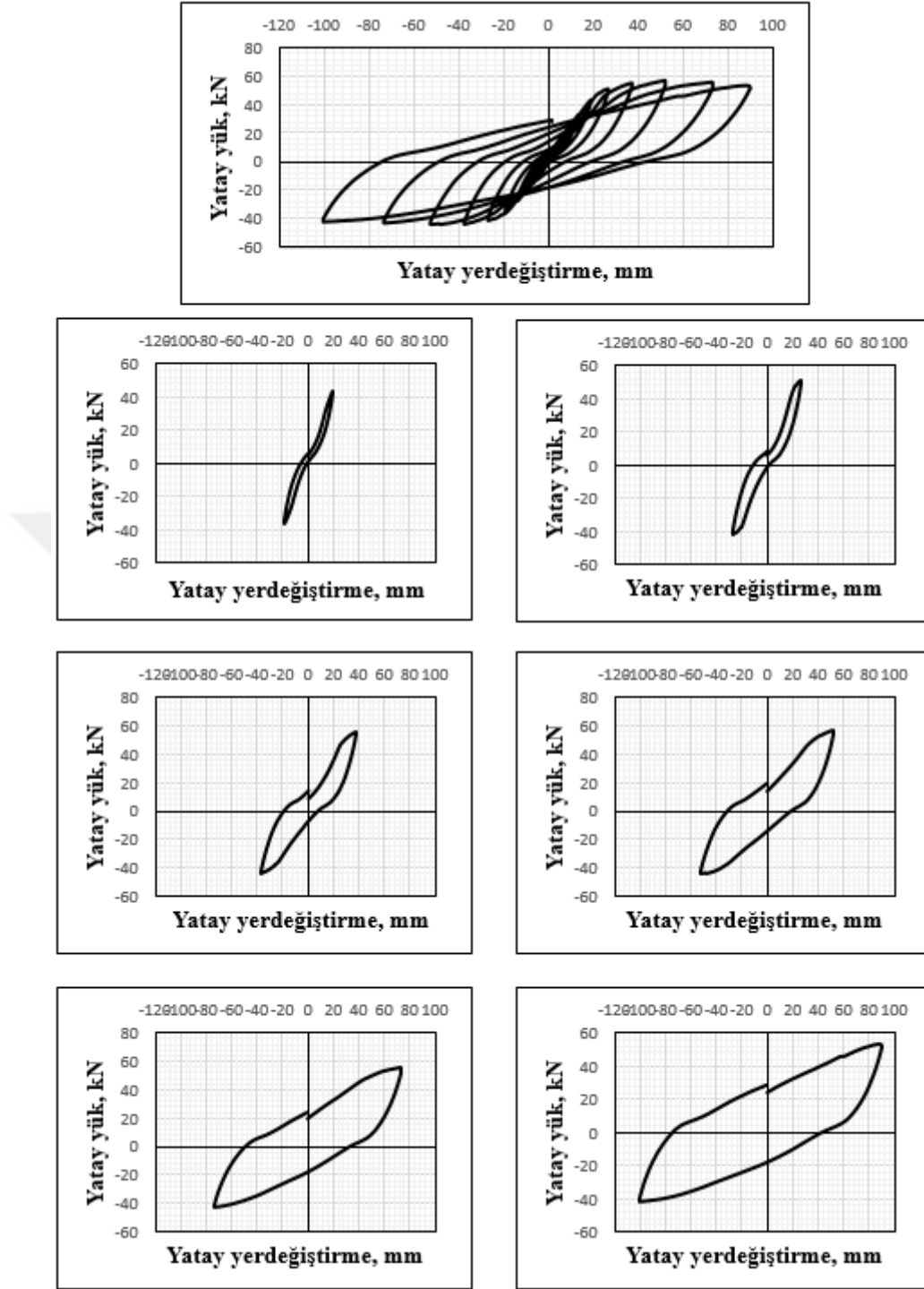
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 2,07 kN, çekmede 1,48 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,14 kN, çekmede 1,39 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,07 kN, çekmede 1,50 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,16 kN, çekmede 1,50 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,12 kN, çekmede 1,55 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,14 kN, çekmede 0,94 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,68 kN, çekmede 1,91 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,15 kN, çekmede ise 2,45 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 3,73 kN, çekmede 2,92 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,79 kN, çekmede 3,39 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,32 kN, çekmede 4,37 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,08 kN, çekmede ise 5,47 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 10,29 kN, çekmede 7,19 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 12,31 kN, çekmede 9,07 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 15,47 kN, çekmede ise 12,92 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6.94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 19,53 kN, çekmede 15,86 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 25,21 kN, çekmede 21,08 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu başlamıştır. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 33,33 kN, çekmede 27,64 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,4mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde ilk çatlak oluşumu gözlenmiştir. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 43,54 kN, çekmede 36,42 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 1,8mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Bu çevrimde kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 1,0mm açılma ölçülmüştür. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 51,23 kN, çekmede 41,48 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,5mm'ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak 1,8mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette açılma başlamıştır. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 55,32 kN, çekmede 44,14 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,0mm ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 2,5mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal şekilde çatlaklar derinleşmiş, 2,5mm açılma ölçülmüştür. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 57,22 kN, çekmede 44,18 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu

çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma 3,5mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 3,0 mm ye ulaşmış, kiriş üst bölgesindeki paspayı tabakasında derin çatlaklar oluşmuştur. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 55,96 kN, çekmede ise 43,24 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 6,0 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kolon – kiriş birleşim bölgesinde 6,0mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş üst bölgesindeki paspayı tabakasındaki ayrılma gözlenmiştir. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 53,65 kN, çekmede 42,42 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, kiriş her iki uç bölgesindeki beton parçalanmış ve dökülmüştür.



Şekil 68. Deney sonu RCF_8_600_120 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 69. RCF_8_600_120 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.9. RCF_11_800_120 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_11_800_120 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 70’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_11_800_120 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 71’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 72’de gösterilmiştir.



Şekil 70. RCF_11_800_120 deney elemanının genel görünümü

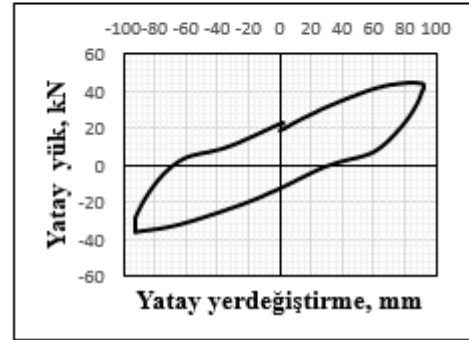
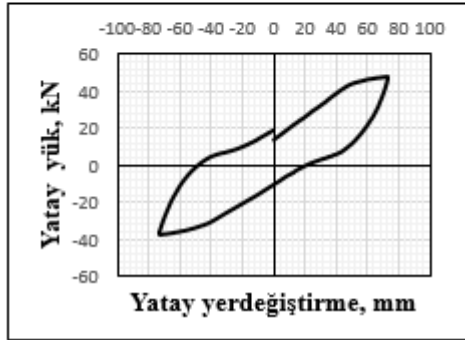
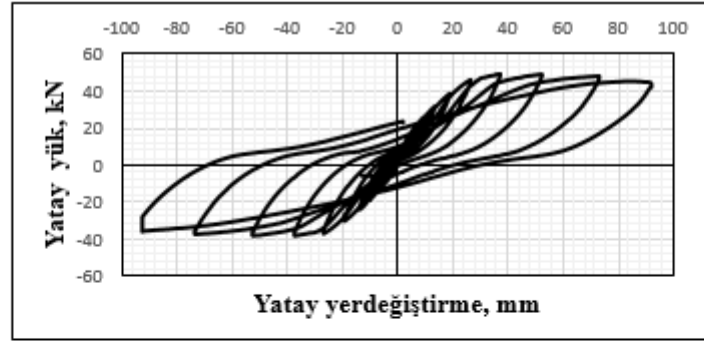
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 1,93 kN, çekmede 1,08 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,09 kN, çekmede 1,11 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,04 kN, çekmede 1,13 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,25 kN, çekmede 0,91 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,18 kN, çekmede 1,06 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 1,97 kN, çekmede 1,41 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elamanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,61 kN, çekmede 1,86 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,13 kN, çekmede ise 1,98 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 4,11 kN, çekmede 2,44 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,94 kN, çekmede 3,10 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,63 kN, çekmede 4,00 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,55 kN, çekmede ise 5,10 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 11,04 kN, çekmede 6,75 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 14,08 kN, çekmede 9,14 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 17,53 kN, çekmede ise 11,11 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 21,25 kN, çekmede 14,33 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 25,92 kN, çekmede 19,23 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon - kiriş birleşim bölgesinde 1,0mm çatlak ölçülmüştür. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 31,63 kN, çekmede 24,32 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu başlamıştır. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 38,43 kN, çekmede 30,55 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 1,8mm açılma ölçülmüştür. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 45,88 kN, çekmede 37,34 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,5mm'ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak 1,6mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette ilk çatlaklar oluşmaya başlamıştır. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 48,97 kN, çekmede 38,50 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,0mm ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 3,0mm olarak ölçülmüştür. Kiriş sağ uç bölgesinde betonda dökülmeler oluşmuştur. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal şekilde çatlaklar derinleşmiş, 2,5mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 48,84 kN, çekmede 38,42 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 5,0mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma

5,0mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde kiriş sağ uç bölgesinde paspayı tabakasında betonda parçalanma oluşmuştur. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 47,89 kN, çekmede ise 37,63 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 6,0 mm olarak ölçülmüştür. Bu çevrimde kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak derinleşerek 1,5cm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 45,05 kN, çekmede 36,21 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, kiriş sağ uç bölgesindeki beton parçalanmış ve dökülmüştür.



Şekil 71. Deney sonu RCF_11_800_120 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 72. RCF_11_800_120 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.10. RCF_3_200_180 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_3_200_180 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 73’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_3_200_180 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 74’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 75’de gösterilmiştir.



Şekil 73. RCF_3_200_180 deney elemanının genel görünümü

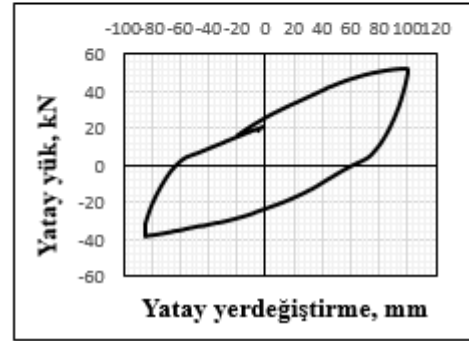
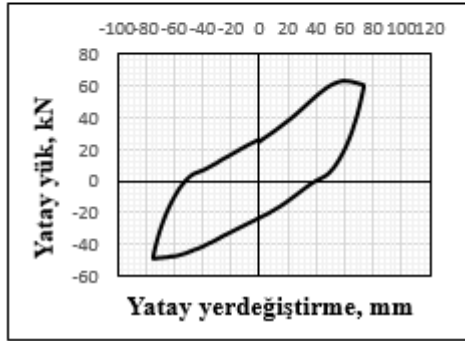
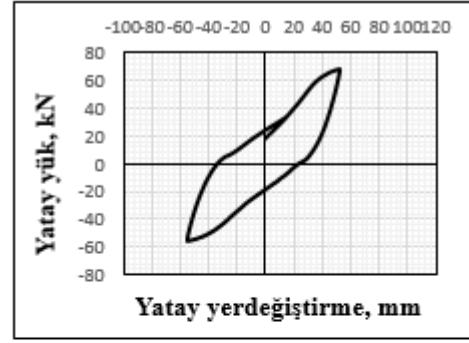
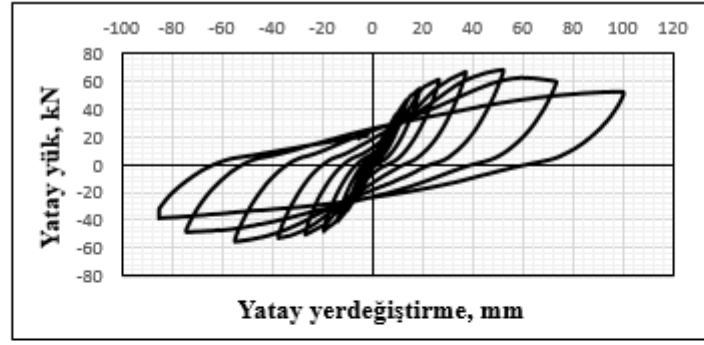
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 1,97 kN, çekmede 2,40 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 1,98 kN, çekmede 2,09 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 1,95 kN, çekmede 1,85 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 1,97 kN, çekmede 2,04 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,02 kN, çekmede 2,07 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,11 kN, çekmede 1,90 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elamanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,35 kN, çekmede 2,32 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,03 kN, çekmede ise 3,27 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 4,44 kN, çekmede 4,80 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,67 kN, çekmede 6,28 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 7,47 kN, çekmede 7,38 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 10,13 kN, çekmede ise 9,57 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 13,07 kN, çekmede 12,67 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanında ilk çatlaklar kolon - kiriş birleşim bölgesinde oluşmaya başlamıştır. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 17,15 kN, çekmede 15,32 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 22,16 kN, çekmede ise 20,02 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 28,30 kN, çekmede 25,45 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesinde çatlaklar gözle görölür şekilde oluşmaya başlamış, mesnet bölgesinde de ilk çatlak oluşumu gözlemiştir. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 36,47 kN, çekmede 32,92 kN yük değeri ulaşılmış olup, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Ayrıca kiriş – kolon birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde çatlak oluşumları gözlenmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 46,49 kN, çekmede 40,92 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 54,95 kN, çekmede 48,17 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnet bölgesinde açılma başlamıştır. Ayrıca deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 2mm olarak ölçölmüştür. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 61,38 kN, çekmede 50,46 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,5mm'ye ulaşmış olup, mesnet bölgesindeki açılma 1,2 mm olarak ölçölmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 66,96 kN, çekmede 53,32 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,0 mm ye ulaşmış, betonda dökölmeler gözlenmiştir. Mesnette 2,5 mm açılma ölçölmüştür. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 1,2 mm ye ulaşmıştır. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 68,44 kN, çekmede 52,66 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu

çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 5,0 mm, mesnette 3,5 mm açılma ölçülmüştür. Ayrıca kiriş elemanın her iki uç bölgesinde yoğun şekilde diyagonal çatlak oluşumları gözlenmiştir. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 62,77 kN, çekmede ise 48,77 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş elemanın her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar genişleyerek betonda parçalanma oluşmuş, kiriş – kolon birleşim bölgesindeki çatlaklar 1,0 cm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 6 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmındaki boyuna donatıların doğrultusunda paspayı tabakasında 6mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 3,5 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 52,52 kN, çekmede 38,90 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde paspayı tabakasında 1,0cm, mesnetteki açılma 8,0mm olarak ölçülmüştür.



Şekil 74. Deney sonu RCF_3_200_180 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 75. RCF_3_200_180 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.11. RCF_6_400_180 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_6_400_180 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 76’da verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_6_400_180 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 77’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 78’de gösterilmiştir.



Şekil 76. RCF_6_400_180 deney elemanının genel görünümü

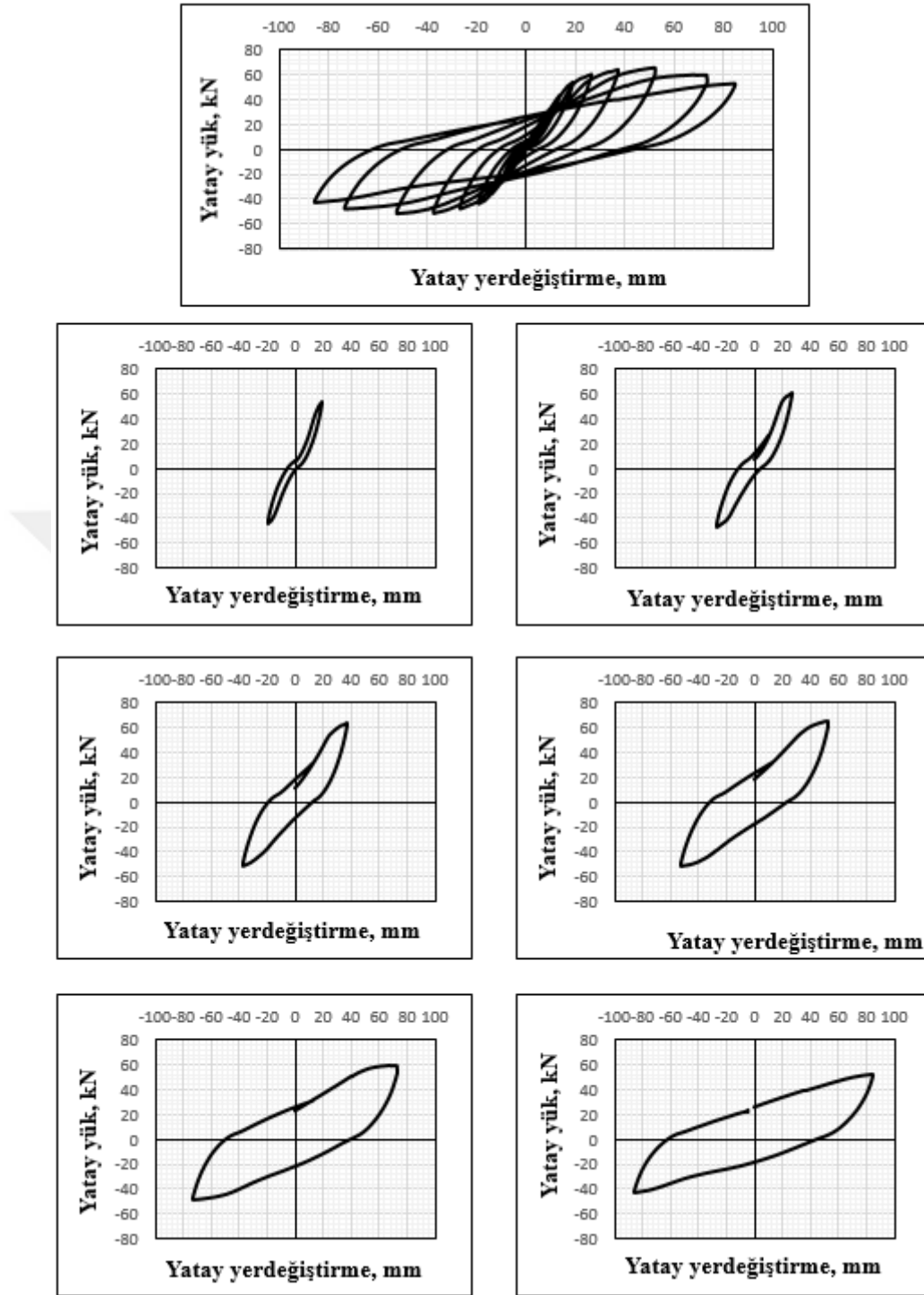
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 1,69 kN, çekmede 1,34 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 1,97 kN, çekmede 1,18 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 1,98 kN, çekmede 1,41 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,07 kN, çekmede 1,36 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,11 kN, çekmede 0,94 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,14 kN, çekmede 0,82 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elamanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 2,54 kN, çekmede 1,48 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,10 kN, çekmede ise 1,91 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 3,85 kN, çekmede 2,68 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,01 kN, çekmede 3,52 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,58 kN, çekmede 4,54 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,67 kN, çekmede ise 6,16 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 11,26 kN, çekmede 8,27 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 14,53 kN, çekmede 11,12 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 18,99 kN, çekmede ise 15,46 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde mesnet bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 24,51 kN, çekmede 20,56 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 32,62 kN, çekmede 26,88 kN yük değeri ulaşılmış olup, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2 mm açılma meydana gelmiştir. Ayrıca kiriş – kolon birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde çatlak oluşumları gözlenmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 43,52 kN, çekmede 36,03 kN yük değeri okunmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 54,00 kN, çekmede 44,02 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnette açılma başlamıştır. Ayrıca deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 1,8mm olarak ölçölmüş olup, kiriş üst yüzeyine doğru düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 1,2mm ye ulaşmıştır. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 60,25 kN, çekmede 48,01 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,5mm'ye ulaşmış olup, mesnet bölgesindeki açılma 1,2 mm olarak ölçölmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 64,18 kN, çekmede 51,72 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,0 mm ye ulaşmış, betonda dökölmeler gözlenmiştir. Mesnette 2,5 mm açılma ölçölmüştür. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 65,54 kN, çekmede 51,89 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5mm mesnette 6,0mm açılma ölçölmüştür. Ayrıca kiriş elemanın her iki uç bölgesinde yoğun şekilde diyagonal çatlak oluşumları gözlenmiştir. Bu çevrimde

kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 2,0 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 59,86 kN, çekmede ise 48,10 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş - kolon birleşim bölgesinde diyagonal çatlakların artmasıyla, kiriş uç bölgesinde betonda kabarma gözlenmiş, kiriş – kolon birleşim bölgesindeki çatlaklar 5,0mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde mesnetteki açılma ise 1,0 cm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan düşey yöndeki çatlaklar derinleşerek 5,0mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 52,80 kN, çekmede 42,91 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan düşey yöndeki çatlaklar derinleşerek 1,0cm ye ulaşmış, kolon – kiriş birleşim bölgesinde 6mm açılma ölçülmüştür.



Şekil 77. Deney sonu RCF_6_400_180 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 78. RCF_6_400_180 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.12. RCF_9_600_180 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_9_600_180 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 79’da verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_9_600_180 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 80’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 81’de gösterilmiştir.



Şekil 79. RCF_9_600_180 deney elemanının genel görünümü

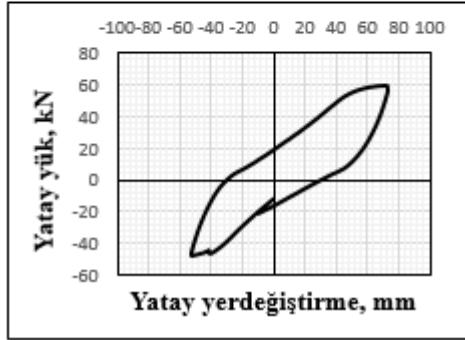
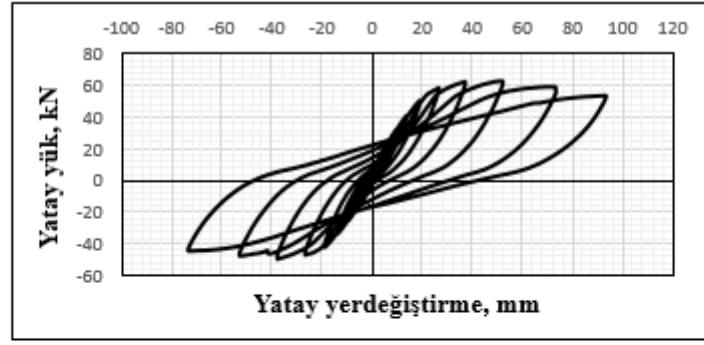
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 2,84 kN, çekmede 1,67 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,84 kN, çekmede 1,67 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,80 kN, çekmede 1,57 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,82 kN, çekmede 1,93 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,96 kN, çekmede 1,83 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,96 kN, çekmede 1,69 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elamanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,85 kN, çekmede 2,02 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 4,23 kN, çekmede ise 2,75 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 5,59 kN, çekmede 2,87 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 6,72 kN, çekmede 4,13 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 8,39 kN, çekmede 4,68 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 10,36 kN, çekmede ise 6,44 kN yük değeri ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 13,19 kN, çekmede 7,89 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 16,40 kN, çekmede 9,89 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 20,78 kN, çekmede ise 12,71 kN yük değeri ulaşılmıştır. Yüklemenin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 25,83 kN, çekmede 15,82 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 32,43 kN, çekmede 20,12 kN yük değeri ulaşılmış olup, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,0mm açılma meydana gelmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 40,89 kN, çekmede 25,66 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,4mm açılma ölçülmüş, kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Ayrıca mesnet bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 50,46 kN, çekmede 33,40 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 1,8mm olarak ölçülmüştür. Yüklemenin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 58,38 kN, çekmede 42,14 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 2,5mm'ye ulaşmıştır. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yüklemenin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 62,32 kN, çekmede 47,02 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,5mm ye ulaşmış, kiriş üst kısımandan düşey yönde oluşan çatlaklar 2,0mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette 2,5 mm açılma ölçülmüştür. Yirmi ikinci çevrimde 52.28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 62,72 kN, çekmede 49,56 kN yük değeri ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 5,0mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma 3,5mm ye ulaşmıştır. Ayrıca kiriş elemanın sol uç bölgesinde üst paspayı tabakasında kabarma gözlenmiştir. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar

derinleşerek 3,0 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 59,15 kN, çekmede ise 49,56 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş – kolon birleşim bölgesindeki çatlaklar 6,0mm ye ulaşmıştır. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 6,0 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan düşey yöndeki çatlaklar derinleşerek 5,5mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 59,15 kN, çekmede 46,30 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, uç bölgesindeki beton parçalanmıştır. Bu çevrimde mesnetteki açılma 1 cm olarak ölçülmüştür.



Şekil 80. Deney sonu RCF_9_600_180 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 81. RCF_9_600_180 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.2.13. RCF_12_800_180 Deney Elemanı

FEMA 461 yükleme protokolüne uygun şekilde tekrarlı yatay yükleme deneyine tabi tutulan RCF_12_800_180 deney elamanına ait genel görünüm Şekil 82’de verilmiştir. Deneyin sonunda RCF_12_800_180 deney elemanındaki hasar durumları Şekil 83’de, elde edilen yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrisi ile tekrarlı yatay yüklemenin son altı çevrimine ait yatay yük - yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 84’de gösterilmiştir.



Şekil 82. RCF_12_800_180 deney elemanının genel görünümü

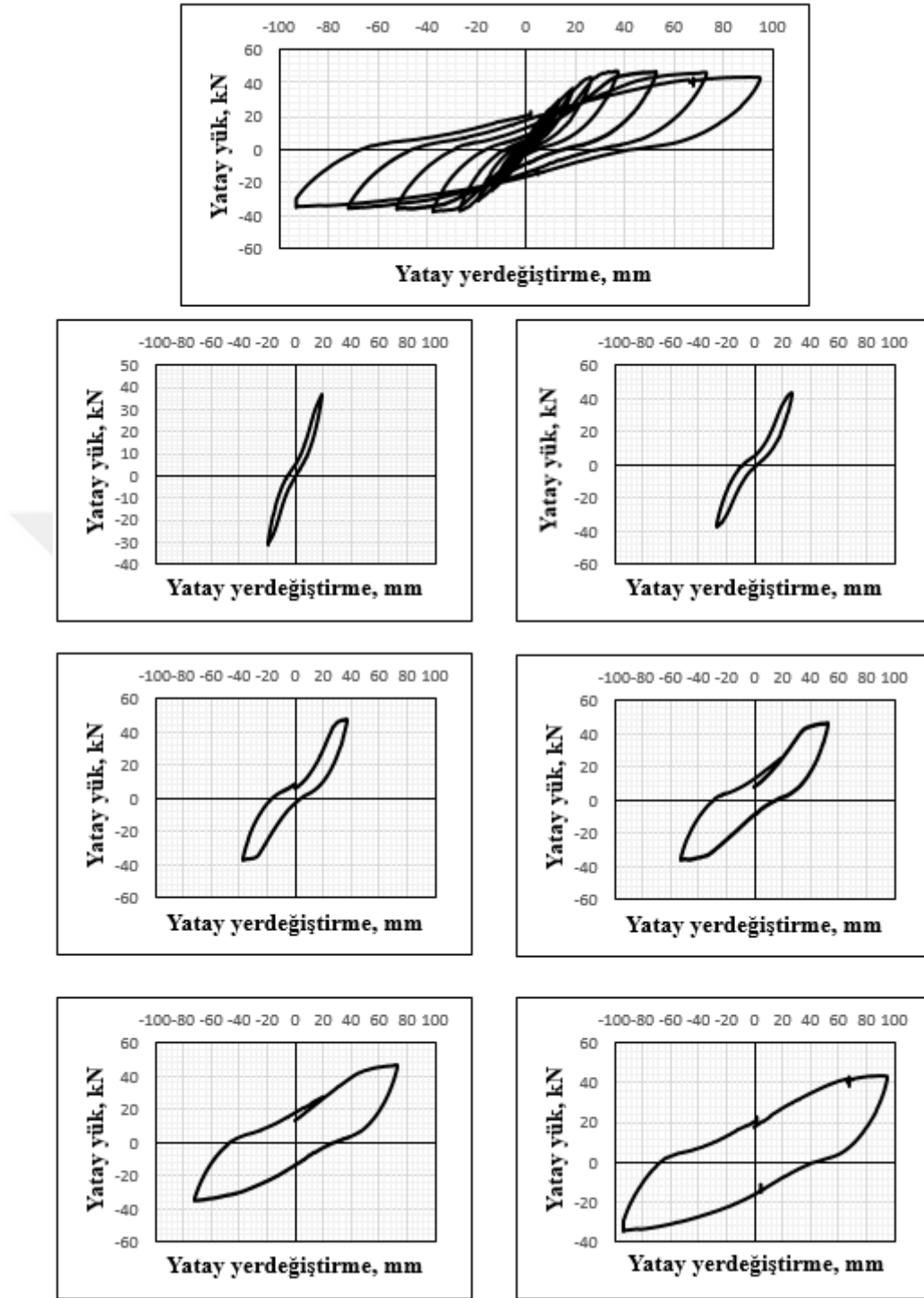
Tekrarlı yatay yüklemenin ilk altı çevriminde 0,24 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, birinci çevrimde itmede 2,42 kN, çekmede 1,62 kN yük değeri, ikinci çevrimde itmede 2,49 kN, çekmede 1,44 kN yük değeri, üçüncü çevrimde itmede 2,35 kN, çekmede 1,38 kN yük değeri, dördüncü çevrimde itmede 2,82 kN, çekmede 1,35 kN yük değeri, beşinci çevrimde itmede 2,79 kN, çekmede 1,35 kN yük değeri, altıncı çevrimde ise itmede 2,89 kN, çekmede 1,53 kN yük değeri okunmuştur. İlk altı çevrim içerisinde deney elemanında herhangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Tekrarlı yüklemenin yedinci çevriminde 0,34 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,13 kN, çekmede 1,36 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin sekizinci çevriminde 0,47 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 3,34 kN, çekmede ise 2,47 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin dokuzuncu çevriminde 0,66 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 4,79 kN, çekmede 2,89 kN yük değeri okunmuştur. Yüklemin onuncu çevriminde 0,92 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 5,94 kN, çekmede 3,95 kN yük değerine ulaşılmıştır.

Tekrarlı yüklemenin on birinci çevriminde 1,29 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 6,95 kN, çekmede 4,91 kN yük değeri okunmuştur. On ikinci çevrimde 1,81 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 8,93 kN, çekmede ise 6,32 kN yük değerine ulaşılmıştır. Tekrarlı yüklemenin on üçüncü çevriminde 2,53 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 10,98 kN, çekmede 7,68 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde ilk çatlaklar oluşmuştur. Tekrarlı yatay yüklemenin on dördüncü çevriminde 3,54 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 13,59 kN, çekmede 10,04 kN yük değeri okunmuştur. On beşinci çevrimde 4,96 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 16,28 kN, çekmede ise 12,41 kN yük değerine ulaşılmıştır. Yüklemin on altıncı çevriminde 6,94 kN yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 29,88 kN, çekmede 15,74 kN yük değeri okunmuştur. On yedinci çevrimde 9,72 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 24,25 kN, çekmede 19,95 kN yük değerine ulaşılmış olup, kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,0mm açılma meydana gelmiştir. On sekizinci çevrimde 13,61 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 29,99 kN, çekmede 25,24 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 1,2mm açılma ölçülmüş, kiriş üst kısmından düşey yönde çatlak oluşumu gözlenmiştir. Tekrarlı yatay yüklemenin on dokuzuncu çevriminde 19,05 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 36,75 kN, çekmede 31,25 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar genişleyerek 1,6mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş üst kısmında düşey yönde oluşan çatlaklar derinleşerek 1,2mm olarak ölçülmüştür. Yüklemin yirminci çevriminde 26,67 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 43,52 kN, çekmede 37,44 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde deney elemanının kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 3,0mm'ye ulaşmış, kiriş üst kısmından düşey yönde oluşan çatlak 2,0mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnette açılma başlamıştır. Yüklemin yirmi birinci çevriminde 37,34 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup, itmede 47,28 kN, çekmede 37,96 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesindeki çatlaklar derinleşerek 4,0mm ye ulaşmış, kiriş üst kısımdan düşey yönde oluşan çatlaklar 4,0mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca mesnet bölgesinde diyagonal şekilde çatlaklar oluşmuş, 2,0mm açılma ölçülmüştür. Bu çevrimde yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisinin eğimi azalmaya başlamış olup, elastik bölgeden plastik bölgeye geçişin başladığı belirlenmiştir. Yirmi ikinci çevrimde 52,28 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık, itmede 47,07 kN, çekmede 36,21 kN yük değerine ulaşılmıştır. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinde 4,5mm açılma oluşmuştur. Mesnette açılma

3.0mm ye ulaşmıştır. Ayrıca kiriş elemanın her iki uç bölgesinde üst paspayı tabakasında kabarma gözlenmiştir. Bu çevrimde kolon – kiriş birleşim bölgesinden kiriş üst yüzeyine doğru oluşan çatlaklar derinleşerek 4,5 mm ye ulaşmıştır. Yükleme protokolünün yirmi üçüncü çevriminde 73,19 mm yatay yerdeğiştirmeye karşılık itmede 46,35 kN, çekmede ise 35,95 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde mesnetteki mafsallaşmaya bağlı olarak açılma ise 4,5 mm olarak ölçülmüştür. Ayrıca kiriş her iki uç bölgesindeki aşırı çatlak oluşumu nedeniyle kiriş uç bölgelerinde betonda dağılmalar gözlenmiştir. Yükleme protokolünün son çevrimi olan yirmi dördüncü çevriminde 102,45 mm yatay yerdeğiştirme uygulanmış olup itmede 43,07 kN, çekmede 34,95 kN yük değeri okunmuştur. Bu çevrimde kiriş her iki uç bölgesindeki diyagonal çatlaklar derinleşmiş, uç bölgesindeki beton parçalanmış ve dökülmüştür.



Şekil 83. Deney sonu RCF_12_800_180 deney elemanında oluşan hasar durumları



Şekil 84. RCF_12_800_180 deney elemanına ait yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri

3.3. Deneysel Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yükleme deneyleri sonrasında yüksek sıcaklığın beton basınç dayanımına etkisinin ortaya konulabilmesi için

her bir deney elemanından üçer adet karot numunesi alınmıştır (Şekil 85). 800 °C sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_12_800_180 deney elemanından karot alınamamış, işlem sırasında karot numunesi parçalanmıştır.



Şekil 85. Deney elemanlarından karot numunesi alma işlemi

Betonarme çerçeve deney elemanlarından alınan 70mm x 105mm ölçülerindeki karot numunelerine kükürt başlık yapıldıktan sonra basınç dayanımı deneyi yapılarak betonun basınç dayanımının sıcaklık etkisi ile değişimi incelenmiştir (Şekil 86).

Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonarme çerçevelerin tekrarlı yükleme deneyleri sonrasında alınan beton karot numunelerinin basınç ve çekme dayanımları Tablo 6'da verilmiş olup, basınç ve çekme dayanımının sıcaklık ile değişimi sırasıyla Şekil 87 ve Şekil 88'de gösterilmiştir. Burada, beton dayanımının sıcaklıkla değişiminin incelenmesi nedeniyle karot dayanımında kesme etkisi, boyut etkisi vb. için düzeltme yapılmamıştır.



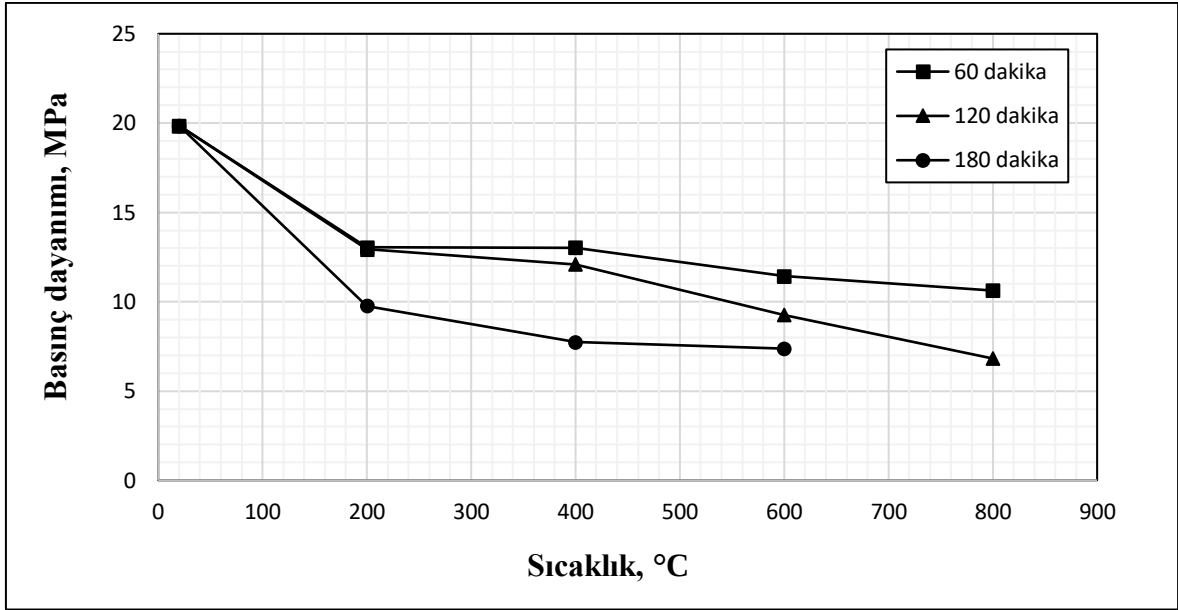
Şekil 86. Beton karot numunelerinin basınç dayanımının belirlenmesi

Basınç dayanımları belirlenen karot numunelerinin çekme dayanımları ise Bağıntı 24’de verilen şekilde hesaplanmıştır.

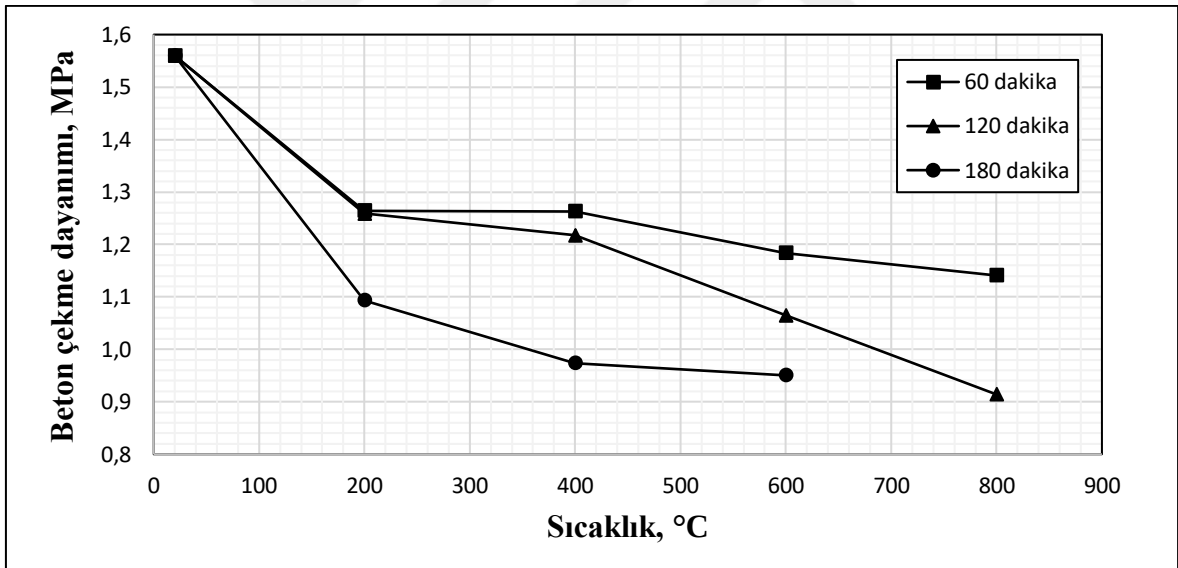
$$f_{ctk} = 0,35\sqrt{f_{ck}} \quad (24)$$

Tablo 6. Beton karot numunelerinin basınç ve çekme dayanımları

Grup no	Numune adı	Basınç dayanımı	Çekme dayanımı
1	RCF_1_200_60	13,050	1,264
	RCF_4_400_60	13,020	1,263
	RCF_7_600_60	11,435	1,184
	RCF_10_800_60	10,623	1,141
2	RCF_2_200_120	12,930	1,259
	RCF_5_400_120	12,095	1,217
	RCF_8_600_120	9,260	1,065
	RCF_11_800_120	6,820	0,914
3	RCF_3_200_180	9,765	1,094
	RCF_6_400_180	7,745	0,974
	RCF_9_600_180	7,373	0,950
	RCF_12_800_180	-	-
4	RCF_13_Referans	19,860	1,560



Şekil 87. Betonarme çerçeve deney elemanlarının beton basınç dayanımının sıcaklık ile değişimi



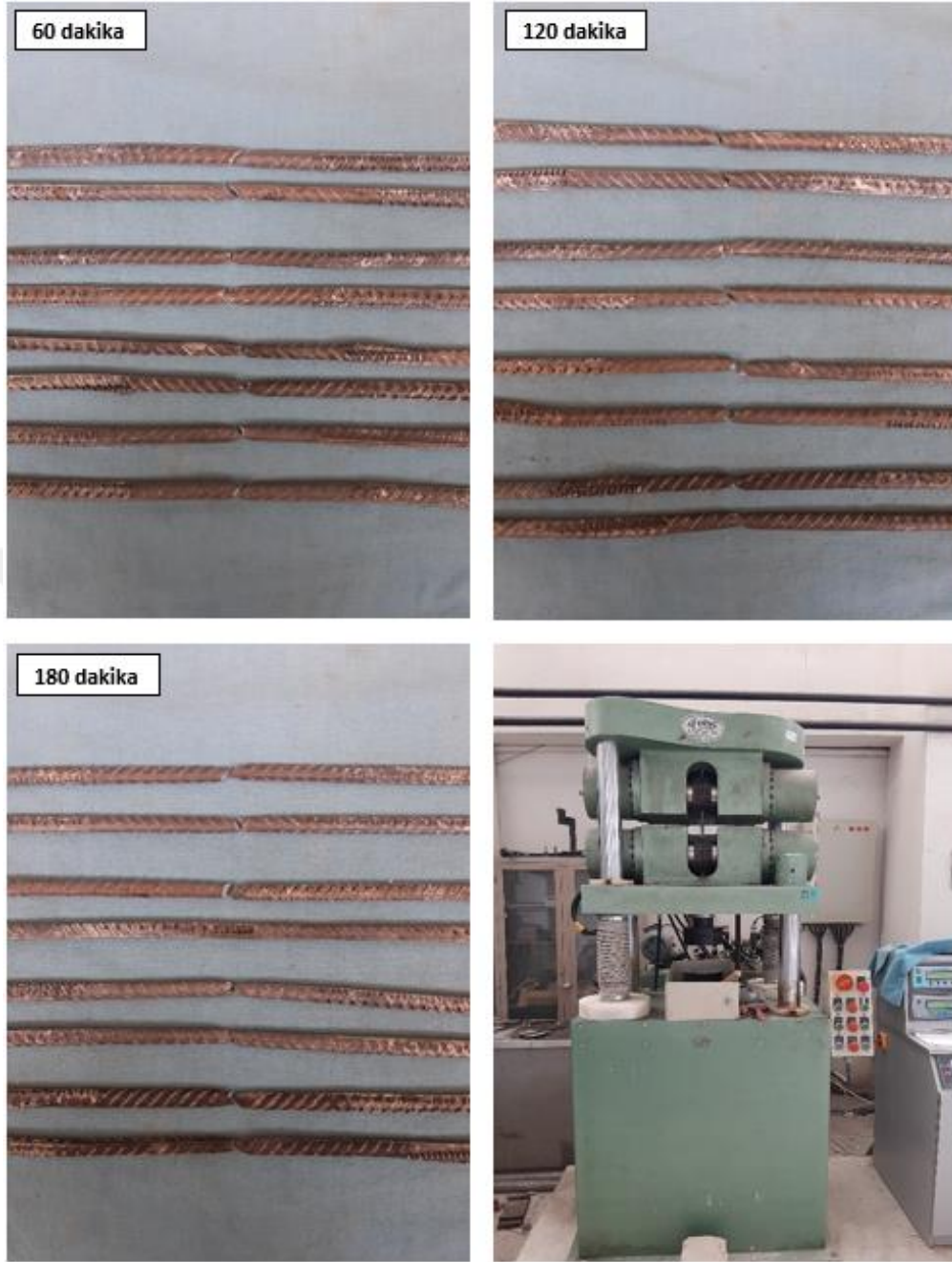
Şekil 88. Betonarme çerçeve deney elemanlarının beton çekme dayanımının sıcaklık ile değişimi

Yüksek sıcaklık etkisi sonrasında deney elemanlarının basınç ve çekme dayanımındaki azalma Tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. Beton karot numunelerinin basınç ve çekme dayanımlarındaki azalma oranları

Grup no	Numune adı	Basınç dayanımı % azalma	Çekme dayanımı % azalma
1	RCF_1_200_60	34,29	18,94
	RCF_4_400_60	34,44	19,03
	RCF_7_600_60	42,42	24,12
	RCF_10_800_60	46,51	26,86
2	RCF_2_200_120	34,89	19,31
	RCF_5_400_120	39,10	21,96
	RCF_8_600_120	53,37	31,72
	RCF_11_800_120	65,66	41,40
3	RCF_3_200_180	50,83	29,88
	RCF_6_400_180	61,00	37,55
	RCF_9_600_180	62,87	39,07
	RCF_12_800_180	-	-

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yükleme deneyleri sonrasında her bir deney elemanından, elemanın hasar görmeyen bölgeleri seçilerek ikişer adet çelik donatı numunesi alınmış, çelik donatı numunelerine çekme deneyi yapılarak çelik donatının akma ve çekme dayanımları ile kopma uzamasının sıcaklık etkisi ile değişimi incelenmiştir (Şekil 89).

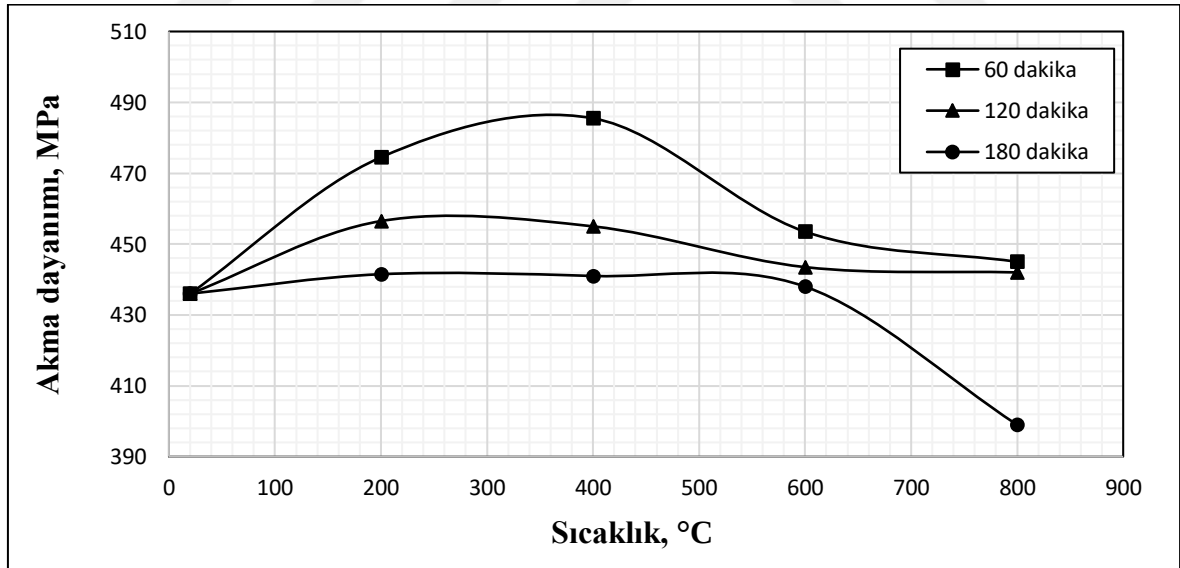


Şekil 89. Çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımının belirlenmesi

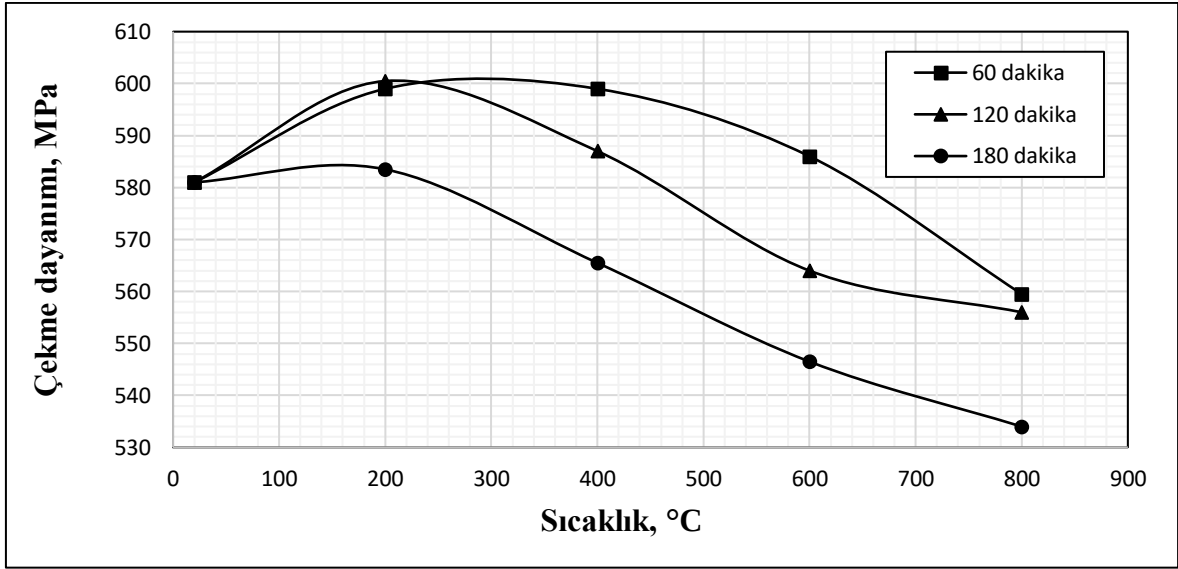
Yüksek sıcaklığa maruz kalmış betonarme çerçevelerin tekrarlı yükleme deneyleri sonrasında alınan çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımları ile kopma uzaması Tablo 8’de verilmiş olup, akma ve çekme dayanımlarının sıcaklık ile değişimi sırasıyla Şekil 90 ve Şekil 91’de gösterilmiştir.

Tablo 8. Çelik donatı numunelerinin bazı mekanik özellikleri

Grup No	Numune Adı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
1	RCF_1_200_60	474,5	599	22,25
	RCF_4_400_60	485,5	599	19,8
	RCF_7_600_60	453,5	586	19,85
	RCF_10_800_60	445	559,5	20,45
2	RCF_2_200_120	456,5	600,5	19,4
	RCF_5_400_120	455	587	20,6
	RCF_8_600_120	443,5	564	25,1
	RCF_11_800_120	442	556	19,7
3	RCF_3_200_180	441,5	583,5	21,65
	RCF_6_400_180	441	565,5	16
	RCF_9_600_180	438	546,5	21,7
	RCF_12_800_180	399	534	23,7
4	RCF_13_Referans	436	581	20,45



Şekil 90. Çelik donatı numunelerinin akma dayanımının sıcaklıkla değişimi



Şekil 91. Çelik donatı numunelerinin çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi

Betonarme çerçeve deney elemanlarından alınan çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımlarındaki değişim Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Çelik donatı numunelerinin akma ve çekme dayanımındaki değişim oranı

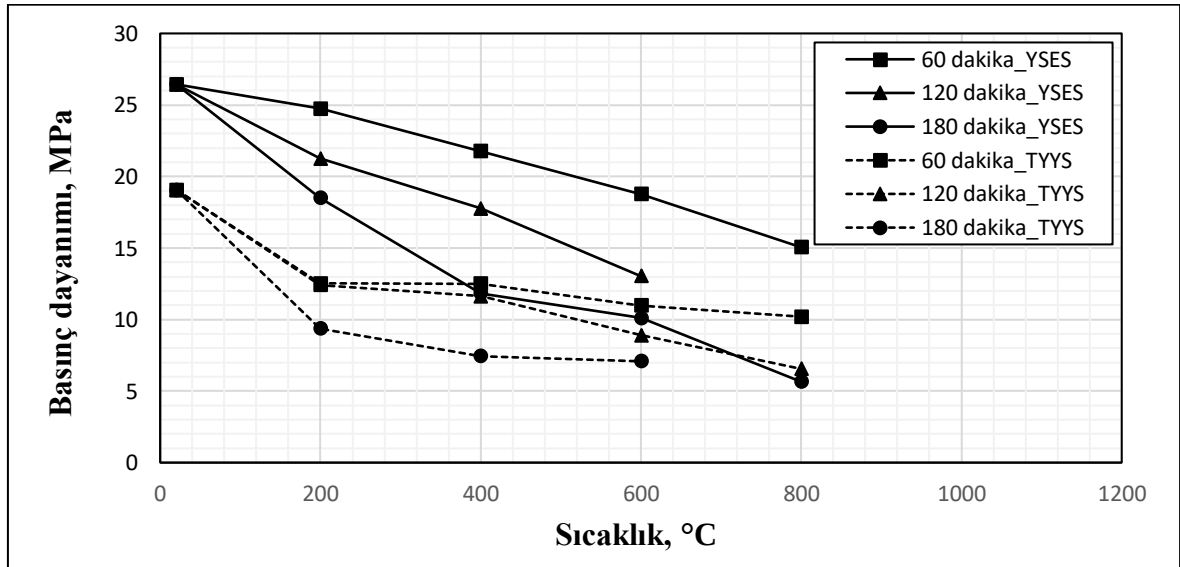
Grup No	Numune Adı	Akma Dayanımı % değişim	Çekme Dayanımı % değişim
1	RCF_1_200_60	% 8,8 artış	% 3,1 artış
	RCF_4_400_60	% 11,4 artış	% 3,1 artış
	RCF_7_600_60	% 4 artış	% 0,9 artış
	RCF_10_800_60	% 2,1 artış	% 3,7 azalma
2	RCF_2_200_120	% 4,7 artış	% 3,4 artış
	RCF_5_400_120	% 4,4 artış	% 1,0 artış
	RCF_8_600_120	% 1,7 artış	% 2,9 azalma
	RCF_11_800_120	% 1,4 artış	% 4,3 azalma
3	RCF_3_200_180	% 1,3 artış	% 0,4 artış
	RCF_6_400_180	% 1,1 artış	% 2,7 azalma
	RCF_9_600_180	% 0,5 artış	% 5,9 azalma
	RCF_12_800_180	% 8,5 azalma	% 8,1 azalma

Betonarme çerçeve deney elemanlarının üretilmesi sırasında alınan silindir beton numunelerinin yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakıldıktan sonra yapılan tek eksenli basınç deneyleri ile yüksek sıcaklık etkisi sonrasında tekrarlı yatay yükleme deneylerine tabi tutulan betonarme çerçeve deney elemanlarından alınan silindir beton karot numunelerinin tek

eksenli basınç deneylerinden elde edilen bulgular Tablo 10'da verilmiştir. Tablo 10'daki YSES; deney elemanlarının üretiminde alınan silindir beton numunelerinin yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldıktan sonraki basınç dayanımını ve TYYS; yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan deney elemanlarından, tekrarlı yatay yükleme deneyleri sonrasında alınan silindir beton karot numunelerinin basınç dayanımını ifade etmektedir. Tablo 10'da, beton karot numunelerinin basınç dayanımları ASTM C42'de belirtilen boyut etkisi düzeltme faktörü 0,96 ile çarpılarak düzenlenmiştir (Şekil 92).

Tablo 10. Beton basınç dayanımlarının karşılaştırılması

Grup no	Numune adı	Basınç dayanımı (MPa)			
		YSES	% azalma	TYYS	% azalma
1	RCF_1_200_60	24,74	6,43	12,53	34,29
	RCF_4_400_60	21,76	17,70	12,50	34,44
	RCF_7_600_60	18,76	29,04	10,98	42,42
	RCF_10_800_60	15,05	43,08	10,20	46,51
2	RCF_2_200_120	21,26	19,59	12,41	34,89
	RCF_5_400_120	17,76	32,83	11,62	39,10
	RCF_8_600_120	13,03	50,72	8,89	53,37
	RCF_11_800_120	-	-	6,55	65,65
3	RCF_3_200_180	18,49	30,07	9,38	50,83
	RCF_6_400_180	11,83	55,26	7,44	61,00
	RCF_9_600_180	10,12	61,72	7,08	62,87
	RCF_12_800_180	5,65	78,63	-	-
4	RCF_13_Referans	26,44		19,07	



Şekil 92. Beton basınç dayanımlarının sıcaklıkla değişiminin karşılaştırılması

Şekil 92'ye göre betonarme çerçeve deney elemanlarının üretimi sırasında alınan silindir beton numunelerinin 60, 120 ve 180 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kaldığı tüm gruplarda beton basınç dayanımlarında azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu azalma, 800 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_12_800_180 deney elemanında %78,63 olarak belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve deney elemanlarından tekrarlı yatay yükleme deneyleri sonrasında alınan silindir beton karot numunelerinin basınç dayanımlarında tüm gruplarda azalma meydana geldiği belirlenmiştir. Bu azalma, 600 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika maruz kalan RCF_9_600_180 deney elemanında %65,65 olarak belirlenmiştir.

Şekil 92'de de görüldüğü gibi, silindir beton karot numunelerinin basınç dayanımındaki azalma, silindir beton numunelerinin basınç dayanımındaki azalmadan daha fazladır. Bu durumun karot numunede kesme etkisi, yük geçmişi vb. nedenlerle meydana geldiği düşünülmektedir. Bununla birlikte, tekrarlı yatay yükleme deneyleri sonrasında betonarme çerçeve deney elemanlarının hasar almayan bölgelerinden karot alma işlemi yapılmış olsa bile, çerçeveye uygulanan yatay yük sonucunda betonda oluşan mikro çatlakların, karot numuneleri üzerindeki etkisi, yükleme, sıcaklık derecesi ve süresine bağlı olarak, farklılık göstermektedir.

3.3.1. Deney Elemanlarının Yatay Yük Taşıma Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

Çalışma doğrultusunda incelenen 13 adet betonarme çerçeve deney elemanının tekrarlı yatay yük etkisinde gerçekleştirilen deneylerinden elde edilen dayanım zarfı eğrileri Şekil 93, Şekil 94 ve Şekil 95'de gösterilmiştir. Deney elemanlarının tamamının tekrarlı yatay yükleme deneylerine ait sayısal verileri Tablo 11'de verilmiştir.

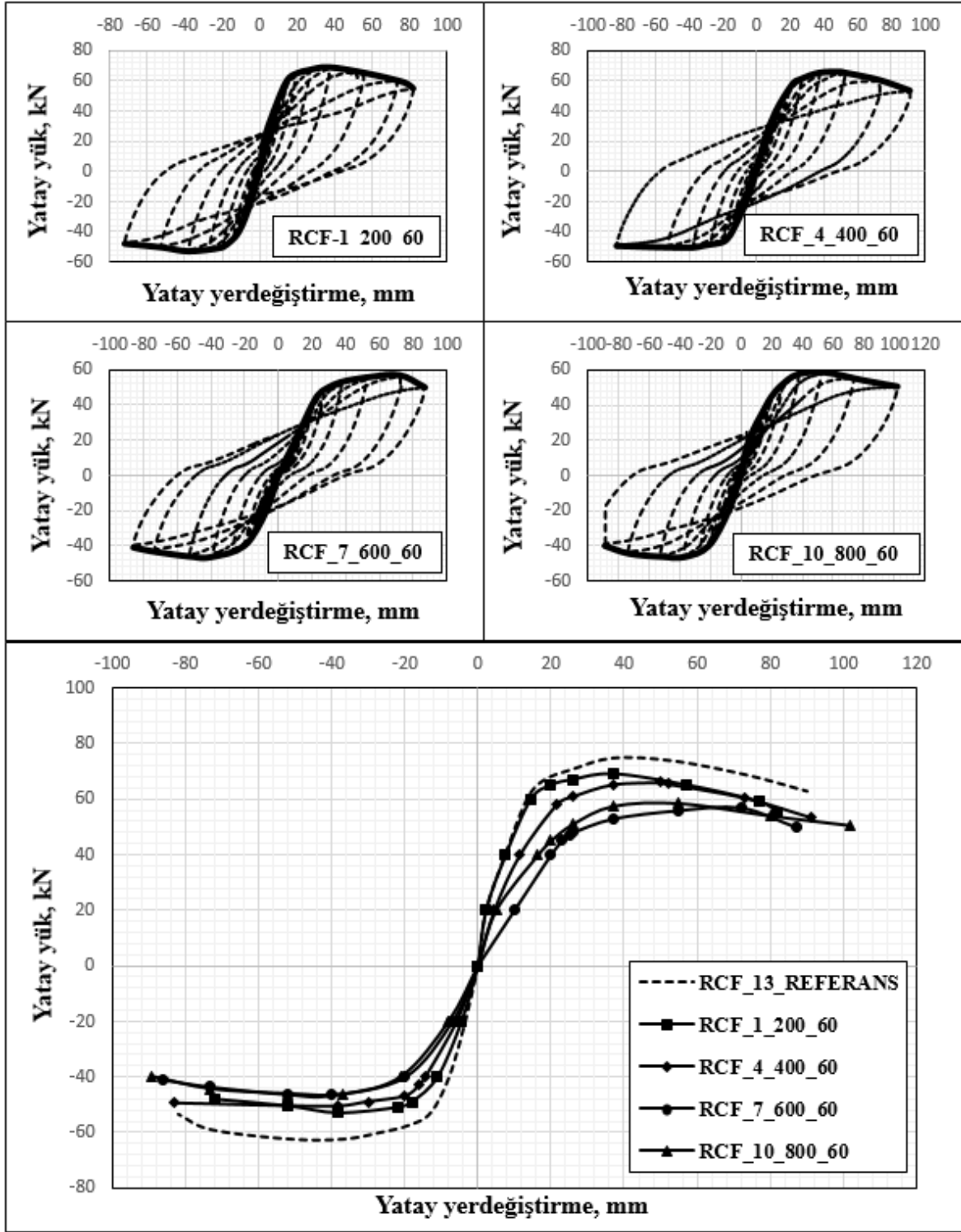
Tablo 11. Etki etme süresi – maksimum yatay yük – maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (deneysel)

Yüksek Sıcaklık Derecesi °C	Etki Süresi											
	60 dakika				120 dakika				180 dakika			
	Maksimum yük (kN) – Maksimum yerdeğiştirme (mm)											
	İtme (+)		Çekme (-)		İtme (+)		Çekme (-)		İtme (+)		Çekme (-)	
	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ
200	69	82	53	72	70	95	55	74	68,5	100	56	85
400	66	91	50,6	83	64,5	90	54	91	63,5	85	53	85
600	57	87	46,5	86	56	90	45,5	100	54,2	93	51	74
800	56,1	102	46,4	89	50	93	39	92	48	95	38,3	93
	İtme (+)						Çekme (-)					
RCF_13	75						62,5					

Dayanım zarfı eğriler incelendiğinde, yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_ Referans deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 75 kN, çekmede 62,5 kN ile en yüksek olduğu belirlenmiştir.

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 60 dakika süresince 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800°C sıcaklık etkilerine maruz bırakılan sırasıyla RCF_1_200_60, RCF_4_400_60, RCF_7_600_60 ve RCF_10_800_60 betonarme çerçeve deney elemanları üzerinde yapılan tekrarlı yatay yük deneylerine göre RCF_1_200_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 69 kN, çekmede 53 kN ile en yüksek olduğu, RCF_10_800_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 56,1 kN, çekmede 46,4 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 93). Buna göre deney elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C'den 800 °C' ye çıkartılması halinde 60 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 18,69 çekmede % 12,45 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_ Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_1_200_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 8, çekmede % 15,2 azalma, RCF_4_400_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 12, çekmede % 19,04 azalma, RCF_7_600_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 24, çekmede % 25,6 azalma ve RCF_10_800_60 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 25,20, çekmede % 25,76 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 93).

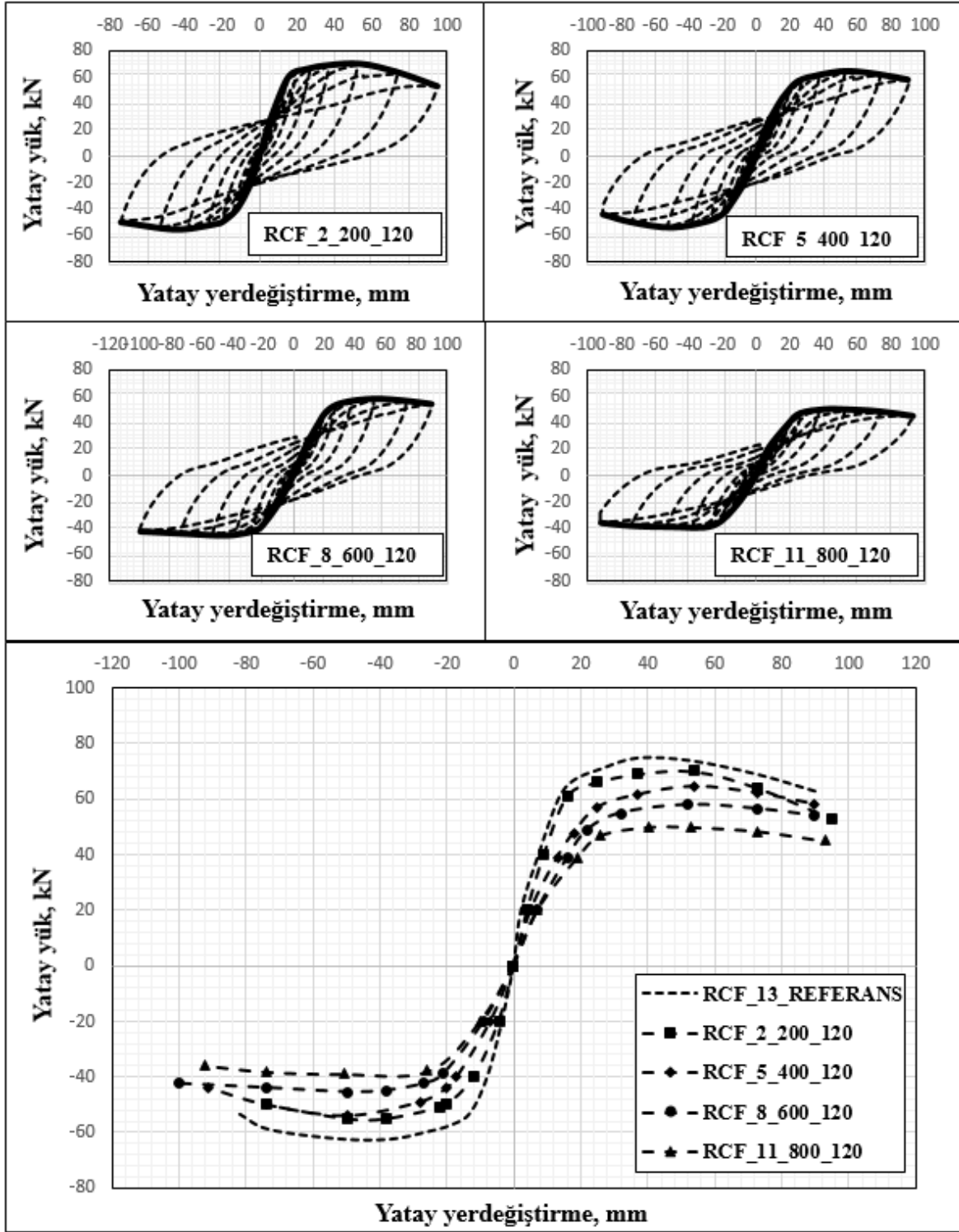


Şekil 93. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (60 dakika)

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 120 dakika süresince 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800°C sıcaklık etkilerine maruz bırakılan sırasıyla RCF_2_200_120, RCF_5_400_120, RCF_8_600_120 ve RCF_11_800_120 betonarme çerçeve deney elemanları üzerinde

yapılan tekrarlı yatay yük deneylerine göre RCF_2_200_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 70 kN, çekmede 55 kN ile en yüksek olduğu, RCF_11_800_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 50 kN, çekmede 39 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 94). Buna göre deney elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C'den 800 °C' ye çıkartılma halinde 120 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 28,57 çekmede % 29,09 oranında azaldığı belirlenmiştir.

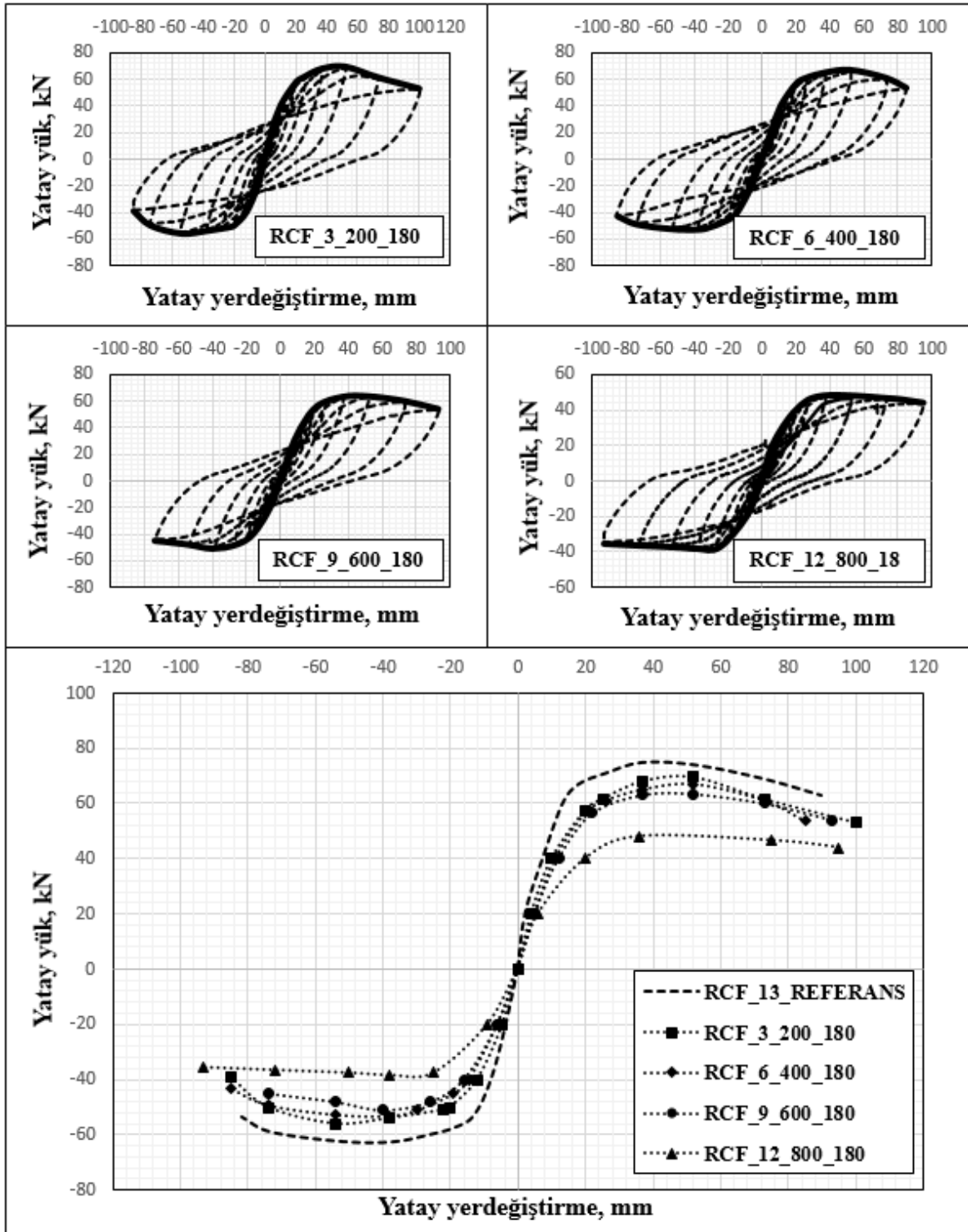
Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_ Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_2_200_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 6,67, çekmede % 12 azalma, RCF_5_400_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 14, çekmede % 13,6 azalma, RCF_8_600_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 25,33 çekmede % 27,2 azalma ve RCF_11_800_120 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 33,33, çekmede % 37,6 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 94).



Şekil 94. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (120 dakika)

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 180 dakika süresince 200 °C, 400 °C, 600 °C ve 800°C sıcaklık etkilerine maruz bırakılan sırasıyla RCF_3_200_180, RCF_6_400_180, RCF_9_600_180 ve RCF_12_800_180 betonarme çerçeve deney elemanları üzerinde yapılan tekrarlı yatay yük deneylerine göre RCF_3_200_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 68,5 kN, çekmede 56 kN ile en yüksek olduğu, RCF_12_800_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 48 kN, çekmede 38,3 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (Şekil 95). Buna göre deney elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C'den 800 °C' ye çıkartılma halinde 180 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 29,93 çekmede % 31,61 oranında azaldığı belirlenmiştir.

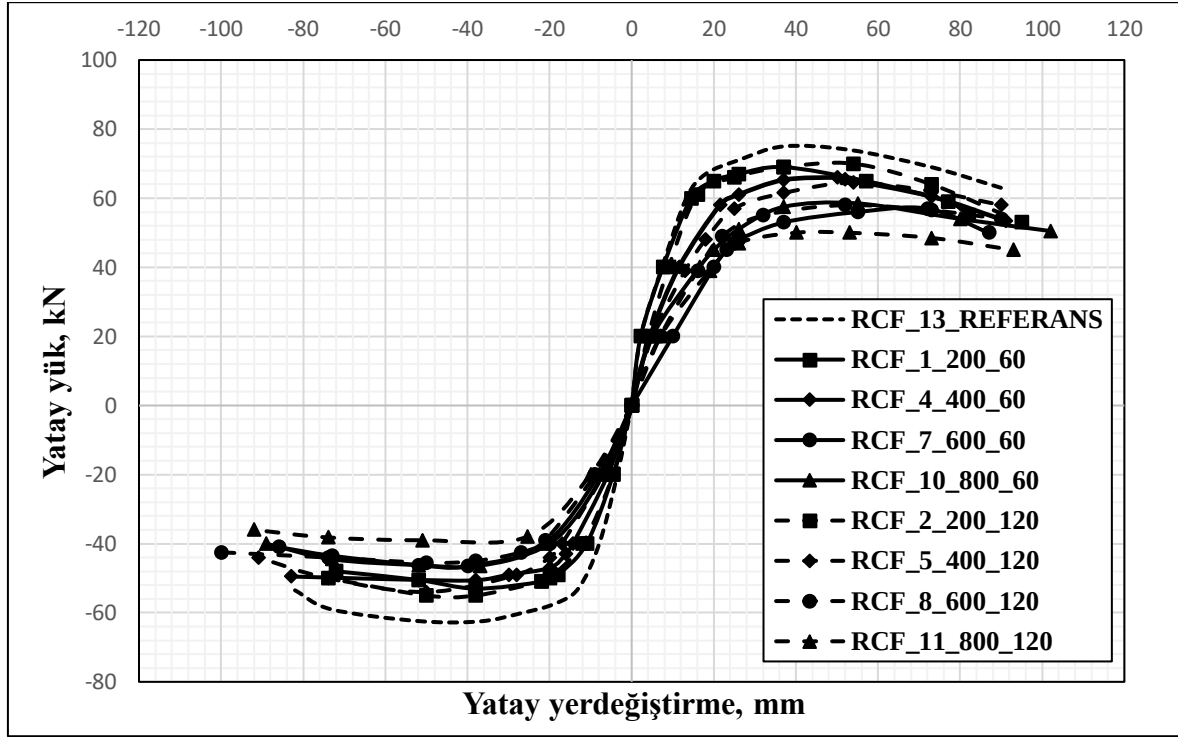
Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_3_200_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 8,67 çekmede % 10,4 azalma, RCF_6_400_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 15,33 çekmede % 15,2 azalma, RCF_9_600_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 27,73 çekmede % 18,4 azalma ve RCF_12_800_180 deney elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 36, çekmede % 38,72 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 95).



Şekil 95. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrileri (180 dakika)

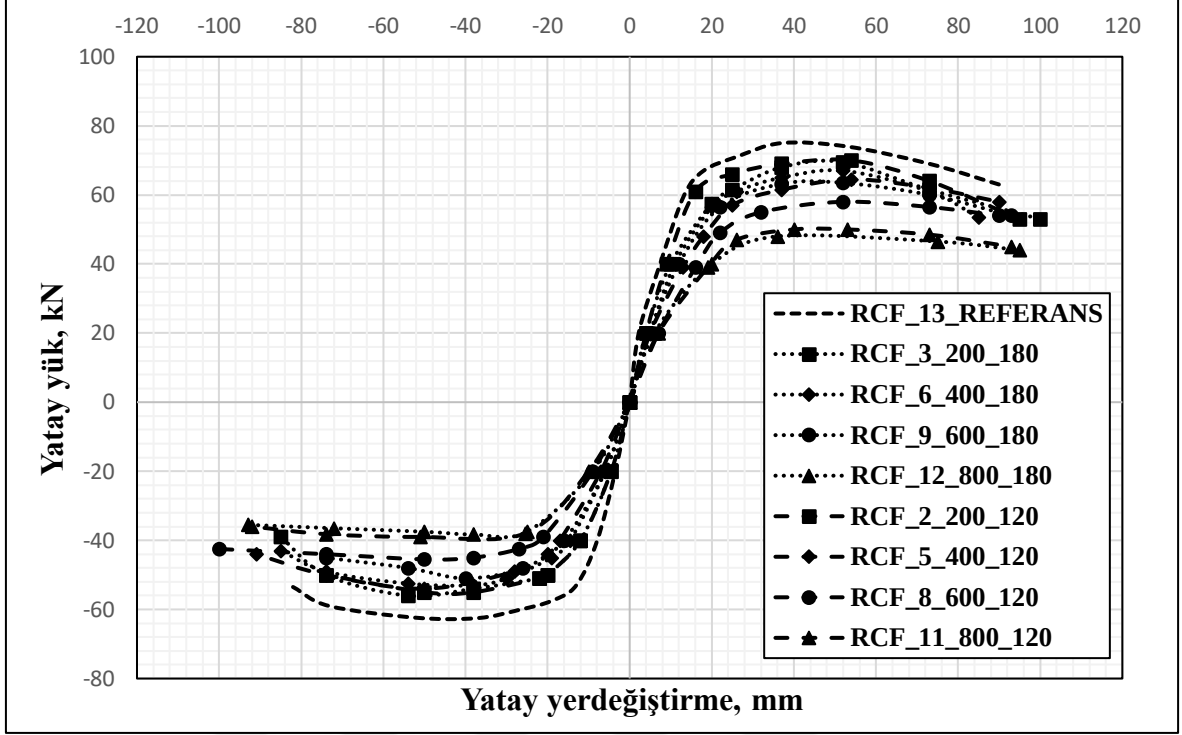
Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 60 dakikadan 120 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 1,42 çekmede % 3,64 arttığı, 400°C

yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 2,27 azaldığı, çekmede % 6,30 attığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 1,75 çekmede % 2,15 azaldığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 10,87 çekmede % 15,95 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 96).



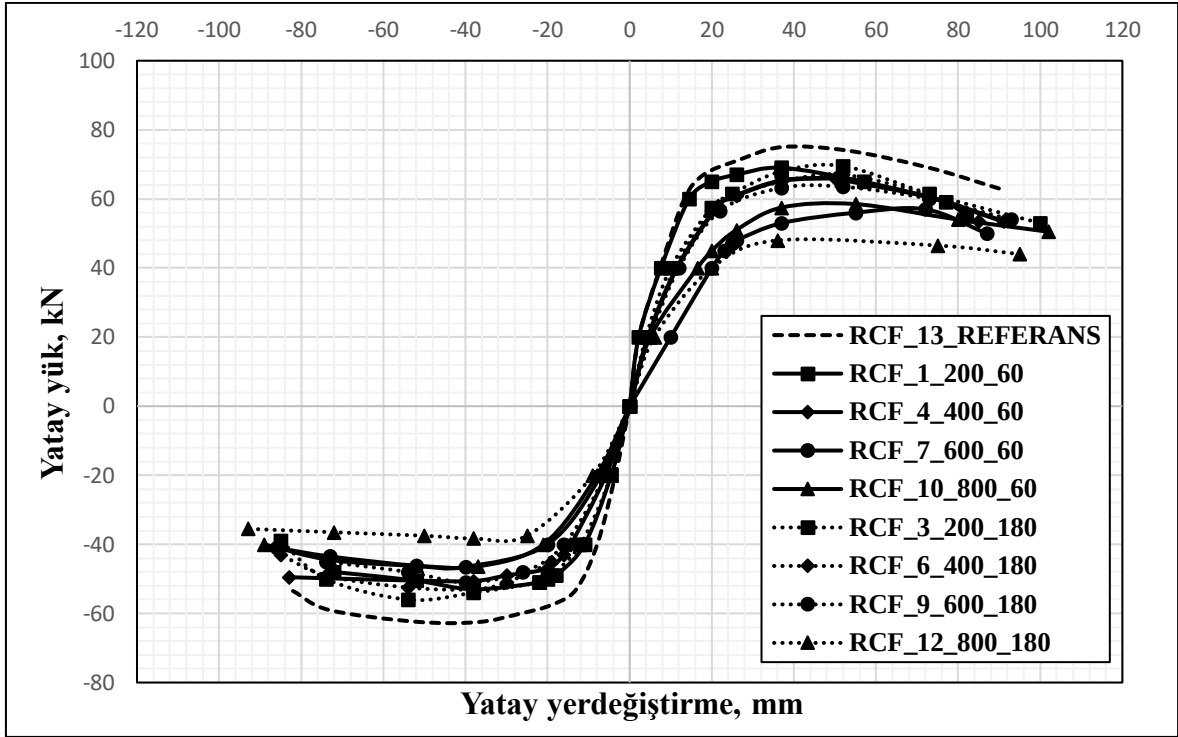
Şekil 96. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 – 120 dk)

Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 120 dakikadan 180 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 2,14 azaldığı, çekmede % 1,79 arttığı, 400°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 1,55 çekmede % 1,85 azaldığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 3,21 azaldığı, çekmede % 10,78 arttığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 4,00 çekmede % 1,79 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 97).



Şekil 97. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 – 180 dk)

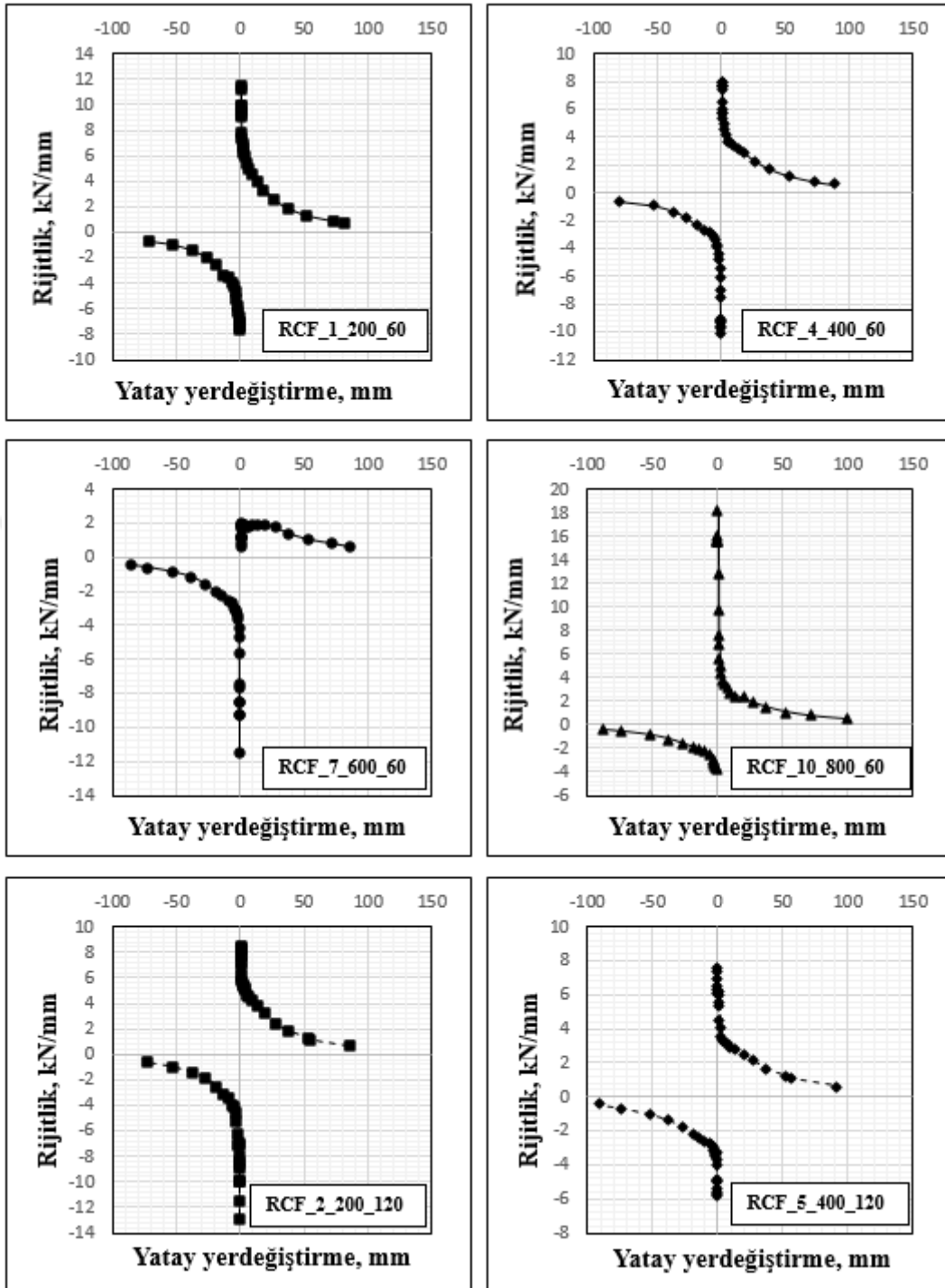
Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 60 dakikadan 180 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 0,72 çekmede % 5,36 arttığı, 400°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 3,79 azaldığı, çekmede % 4,53 attığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 4,91 azaldığı, çekmede % 8,82 arttığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan deney elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 14,44 çekmede % 17,46 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 98).

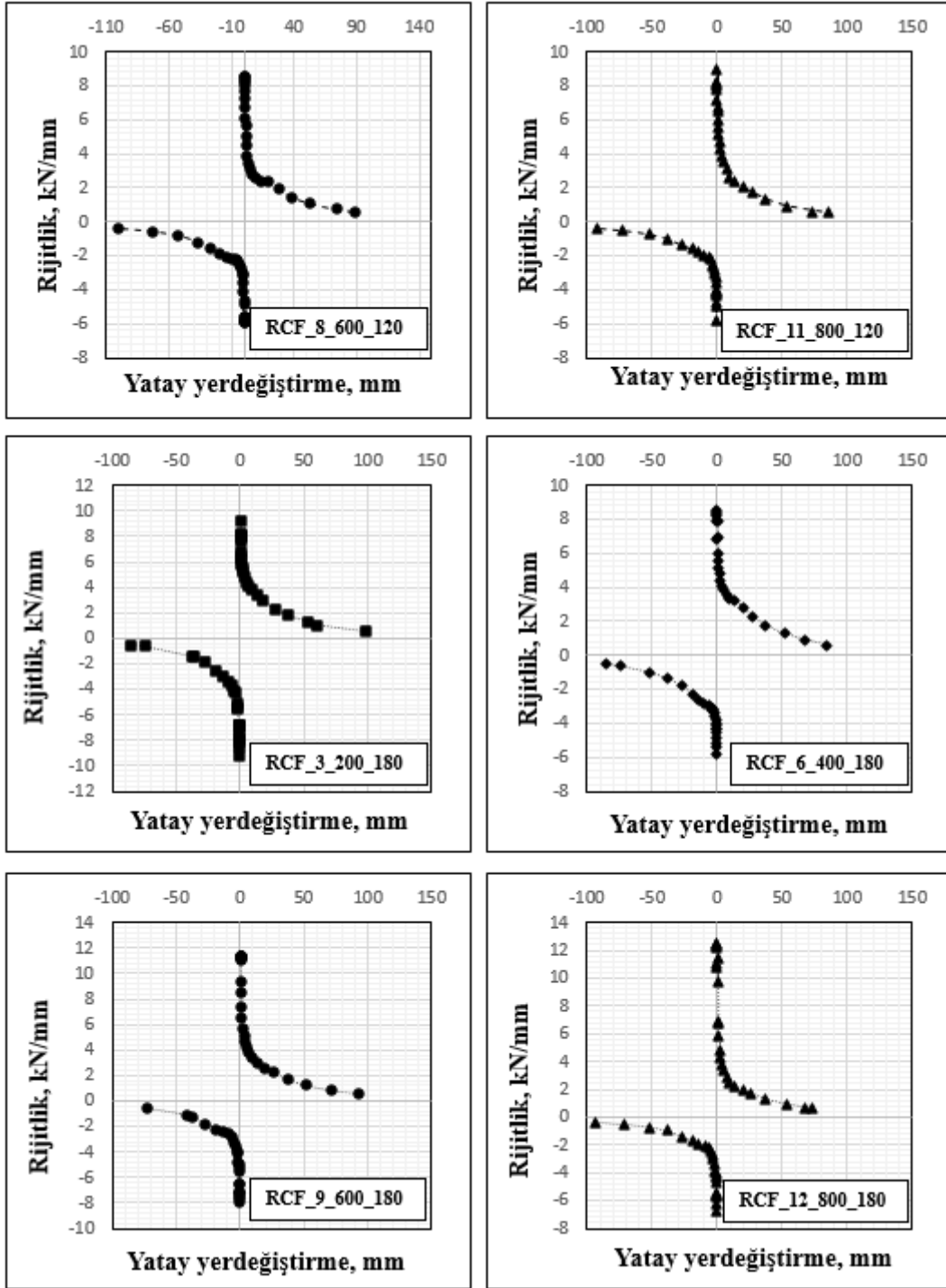


Şekil 98. Deney elemanlarının dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 – 180 dk)

3.3.2. Deney Elemanlarının Rijitliklerinin Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve deney elemanlarının kendi halinde soğuduktan sonra tekrarlı yatay yük etkisi altındaki rijitlik değişimlerinin değerlendirilmesi amacıyla 13 adet betonarme çerçeve deney elemanının her biri için rijitlik – yatay yerdeğiştirme eğrileri elde edilerek Şekil 99’da gösterilmiştir.





Şekil 99. Deney elemanlarının rijitlik – yatay yerdeğistirme eğrileri

RCF_13_Referans deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 16,5417 kN/mm, çekmede 8,7 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6889 kN/mm, çekmede 0,6463 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_13_Referans deney elemanı rijitliğini itmede % 95,84 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 92,57 olarak belirlenmiştir.

RCF_1_200_60 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 11,5238 kN/mm, çekmede 7,6154 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6648 kN/mm, çekmede 0,6596 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_1_200_60 deney elemanı rijitliğini itmede % 94,23 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 91,34 olarak belirlenmiştir.

RCF_4_400_60 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 7,9565 kN/mm, çekmede 10,0833 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5987 kN/mm, çekmede 0,6089 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_4_400_60 deney elemanı rijitliğini itmede % 92,48 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 93,96 olarak belirlenmiştir.

RCF_7_600_60 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 5,0793 kN/mm, çekmede 9,3044 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5987 kN/mm, çekmede 0,6089 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_7_600_60 deney elemanı rijitliğini itmede % 92,48 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 93,96 olarak belirlenmiştir.

RCF_10_800_60 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 16,0455 kN/mm, çekmede 3,7083 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5093 kN/mm, çekmede 0,4472 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_10_800_60 deney elemanı rijitliğini itmede % 96,83 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 87,94 olarak belirlenmiştir.

RCF_2_200_120 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 8,16 kN/mm, çekmede 9,875 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6262 kN/mm, çekmede 0,6657 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_2_200_120 deney elemanı rijitliğini itmede % 92,33 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 93,26 olarak belirlenmiştir.

RCF_5_400_120 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 7,5263 kN/mm, çekmede 5,72 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6419 kN/mm, çekmede 0,4826 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_5_400_120 deney elemanı rijitliğini itmede % 91,47 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 91,56 olarak belirlenmiştir.

RCF_8_600_120 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 8,2307 kN/mm, çekmede 5,92 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6067 kN/mm, çekmede 0,4232 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_8_600_120 deney elemanı rijitliğini itmede % 92,63 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 92,85 olarak belirlenmiştir.

RCF_11_800_120 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 8,2083 kN/mm, çekmede 5,875 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5302 kN/mm, çekmede 0,3915 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_11_800_120 deney elemanı rijitliğini itmede % 93,54 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 93,34 olarak belirlenmiştir.

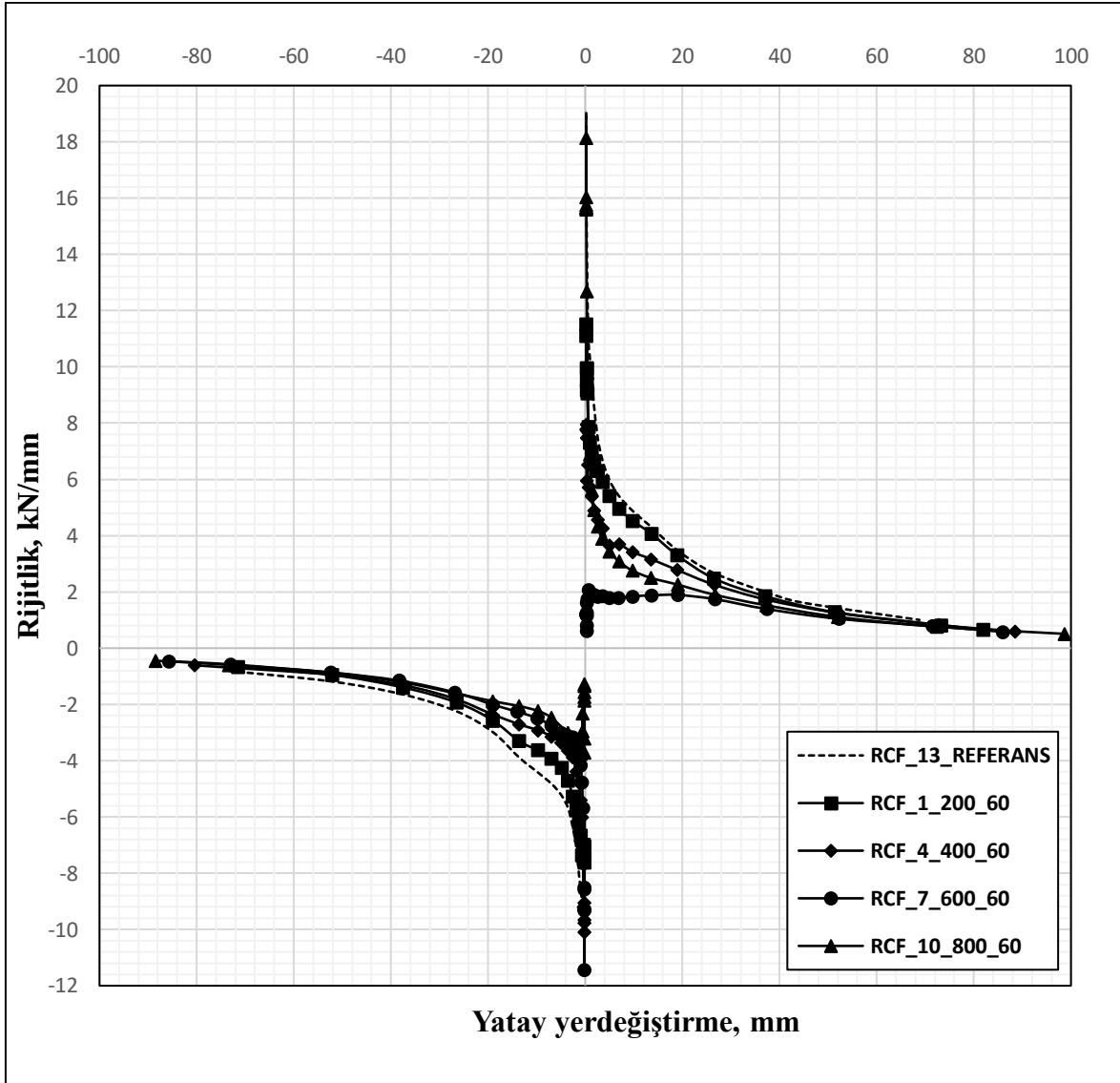
RCF_3_200_180 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 8,2083 kN/mm, çekmede 9,2308 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5360 kN/mm, çekmede 0,4575 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_3_200_180 deney elemanı rijitliğini itmede % 93,47 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 95,04 olarak belirlenmiştir.

RCF_6_400_180 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 8,28 kN/mm, çekmede 5,8261 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6246 kN/mm, çekmede 0,5022 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_6_400_180 deney elemanı rijitliğini itmede % 92,46 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 91,38 olarak belirlenmiştir.

RCF_9_600_180 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 11,36 kN/mm, çekmede 7,26 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,5743 kN/mm, çekmede 0,6107 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_9_600_180 deney elemanı rijitliğini itmede % 94,94 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 91,59 olarak belirlenmiştir.

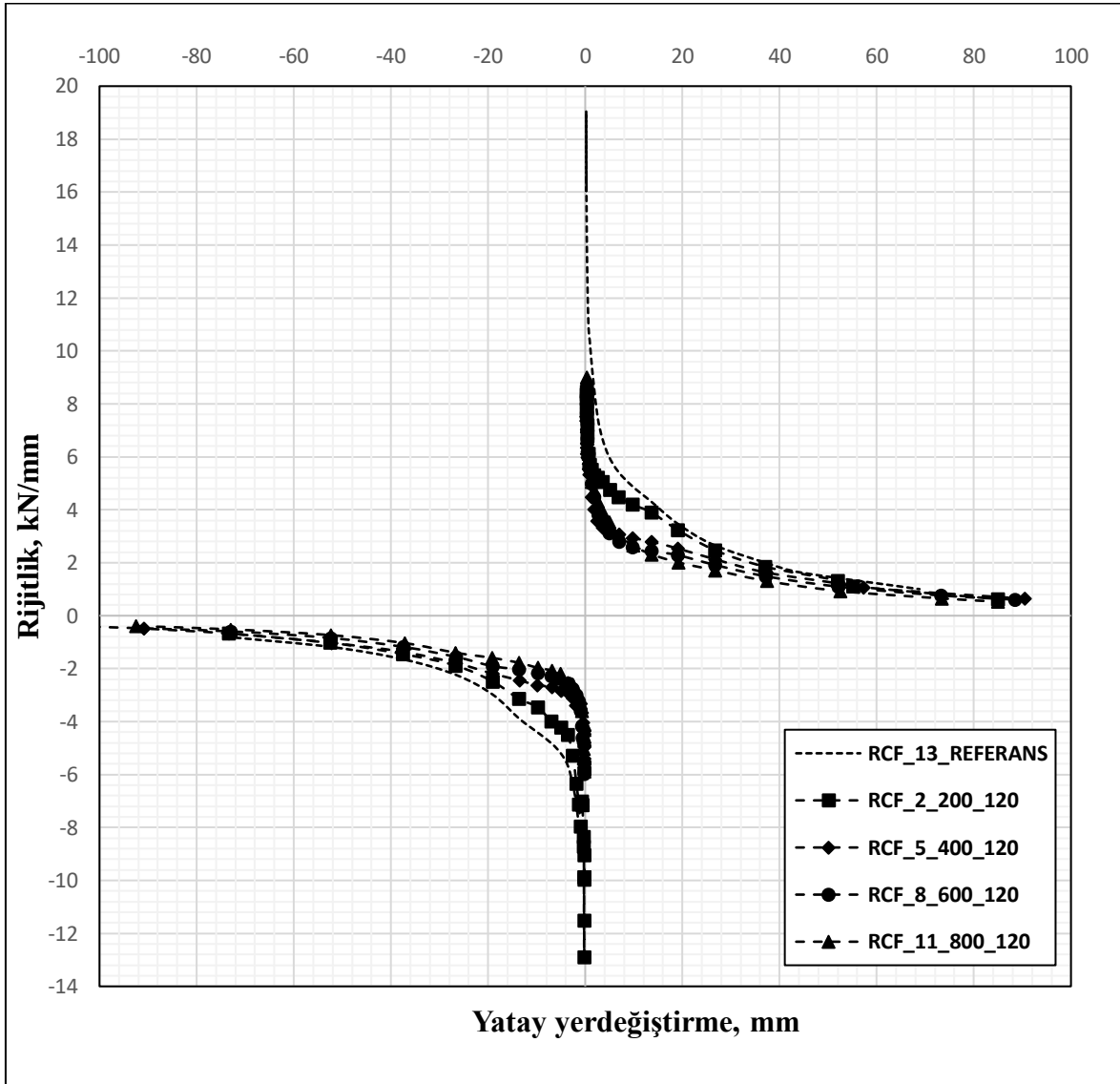
RCF_12_800_180 deney elemanının başlangıç rijitliği, itmede 12,3684 kN/mm, çekmede 6,75 kN/mm ve deney sonu rijitliği itmede 0,6349 kN/mm, çekmede 0,3758 kN/mm olarak belirlenmiştir. Buna göre RCF_12_800_180 deney elemanı rijitliğini itmede % 94,87 oranında kaybederken, çekmede bu oran % 94,43 olarak belirlenmiştir.

Yüksek sıcaklık etkilerine 60, 120 ve 180 dakika maruz bırakılan deney elemanlarının rijitlik – yatay yerdeğiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 100, Şekil 101 ve Şekil 102’de karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Tekrarlı yatay yükleme deneylerinde uygulanan yatay yük etkisi altında, betonarme çerçeve deney elemanlarında meydana gelen çatlak oluşumları nedeniyle rijitlik değerlerinin sürekli azalma eğiliminde olduğu belirlenmiştir (Şekil 100, Şekil 101 ve Şekil 102).



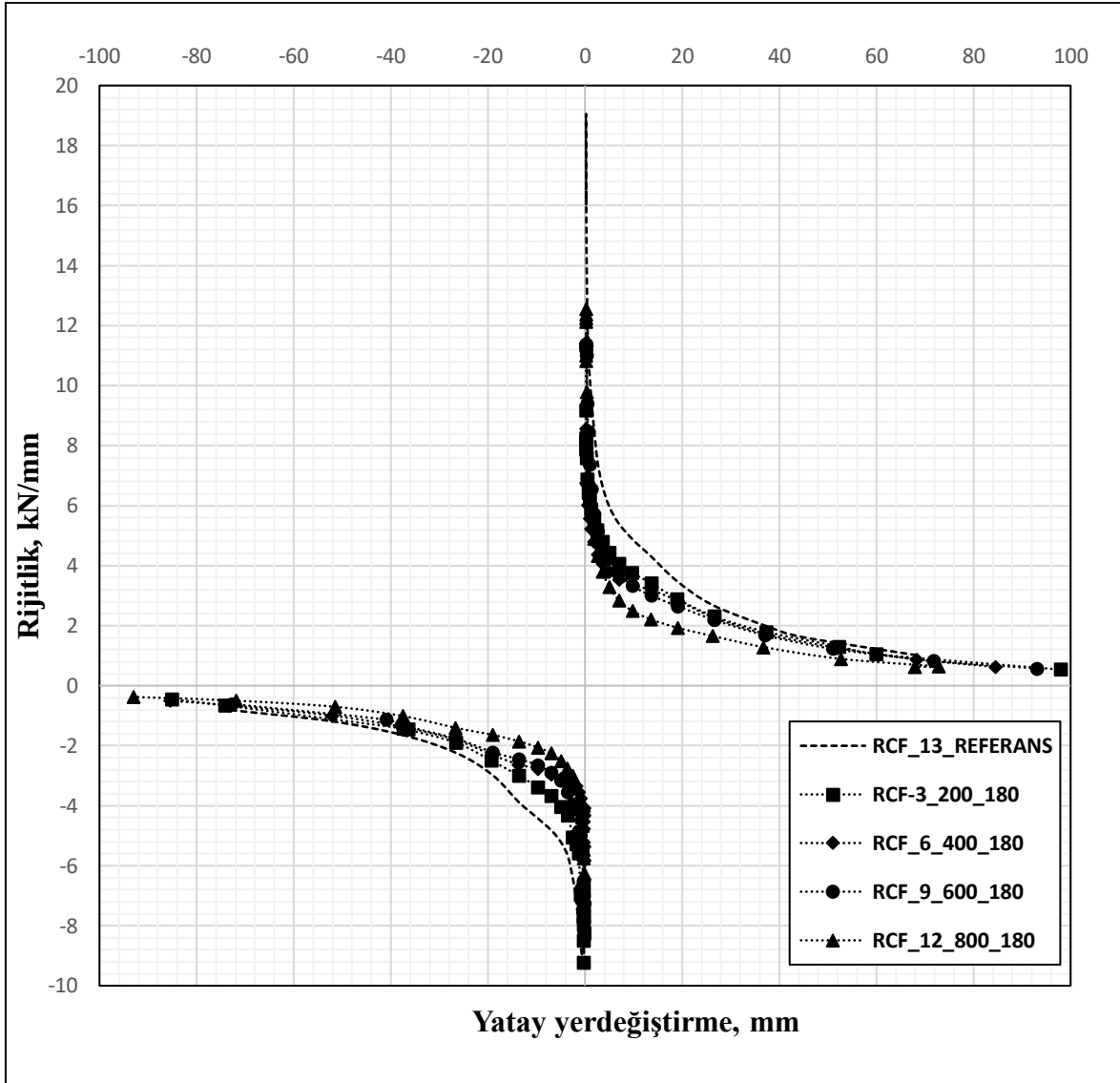
Şekil 100. Deney elemanlarının rijitlik – yatay yerdeğiştirme eğrileri (60 dakika)

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans deney elemanının başlangıç rijitliği ile kıyaslandığında 60 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_1_200_60 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 30,33 çekmede %12,47 azalma, RCF_4_400_60 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 51,90 azalma, çekmede % 13,72 artma, RCF_10_800_60 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 3, çekmede %57,38 azalma belirlenmiştir.



Şekil 101. Deney elemanlarının rijitlik – yatay yerdeğiştirme eğrileri (120 dakika)

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans deney elemanının başlangıç rijitliği ile kıyaslandığında 120 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_2_200_120 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 50,67 azalma, çekmede % 11,90 artma, RCF_5_400_120 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 54,50 çekmede % 34,25 azalma, RCF_8_600_120 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 50,24 çekmede % 31,95 azalma, RCF_11_800_120 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 50,38 çekmede % 32,47 azalma belirlenmiştir.

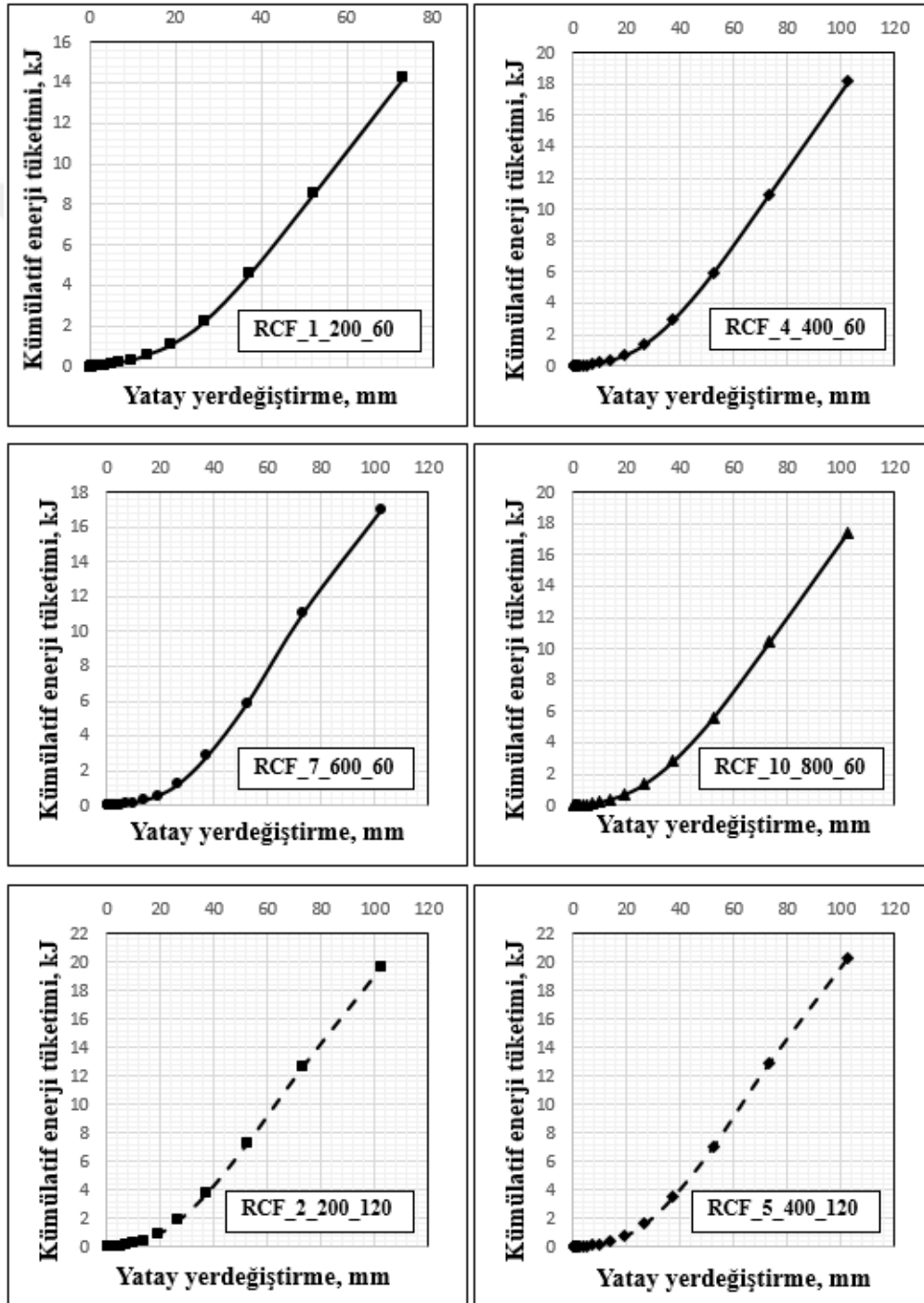


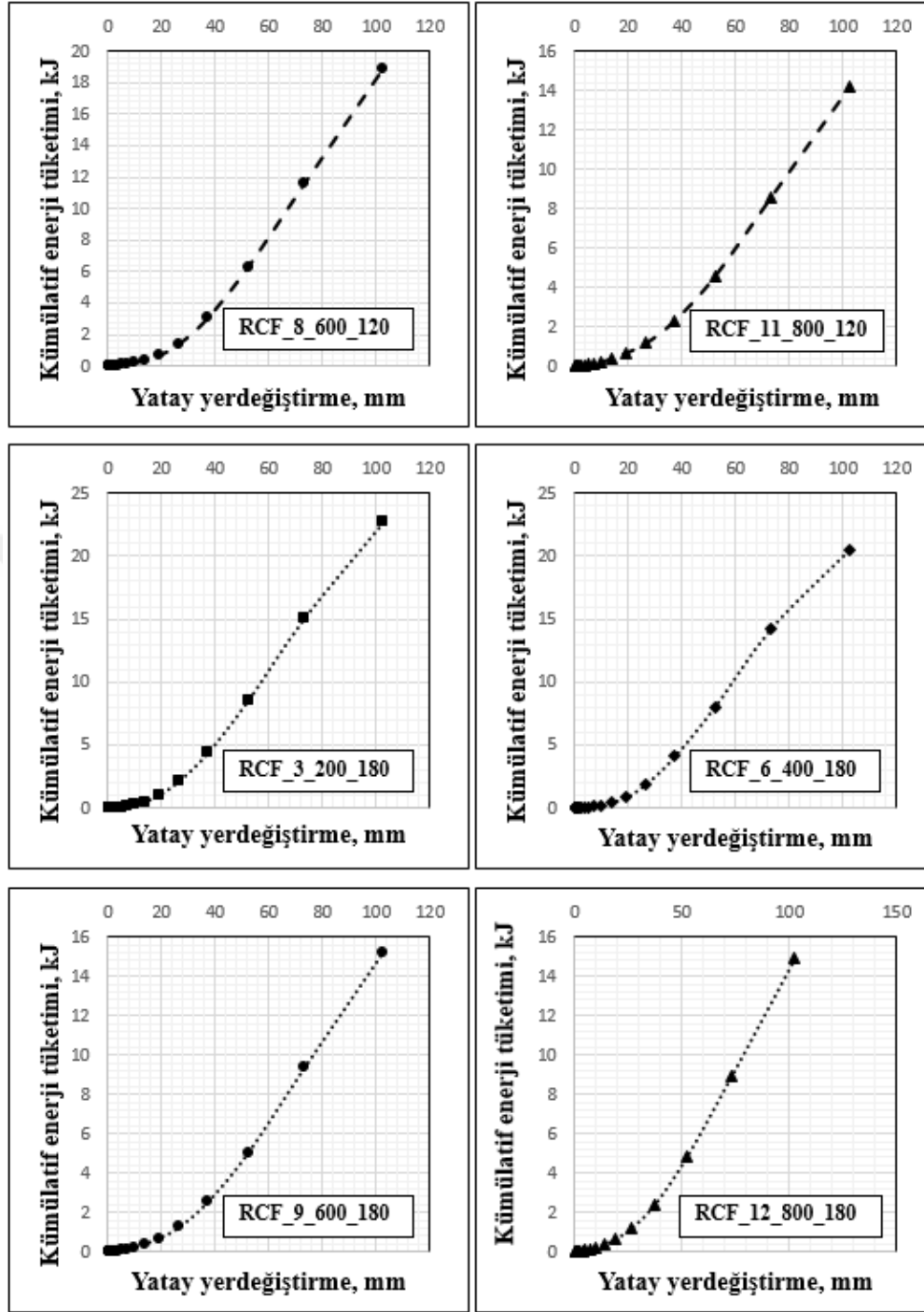
Şekil 102. Deney elemanlarının rijitlik – yatay yerdeğiştirme eğrileri (180 dakika)

Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans deney elemanının başlangıç rijitliği ile kıyaslandığında 180 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_3_200_180 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 50,38 azalma, çekmede % 5,75 artma, RCF_6_400_180 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 49,94 çekmede % 33,03 azalma, RCF_9_600_180 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 31,33 çekmede % 16,55 azalma, RCF_12_800_180 deney elemanının başlangıç rijitliğinde itmede % 25,23 çekmede % 22,41 azalma belirlenmiştir.

3.3.3. Deney Elemanlarının Enerji Tüketim Kapasitelerinin Değerlendirilmesi

Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve deney elemanlarının tekrarlı yatay yük etkisi altındaki enerji tüketme kapasiteleri elde edilirken, her bir çevrim için alan hesabı yapılmış, hesaplanan alanlar kümülatif olarak toplanarak deney elemanlarının nihai enerji tüketme kapasiteleri belirlenmiştir. Şekil 103’de deney elemanları için elde edilen kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrileri gösterilmiştir.

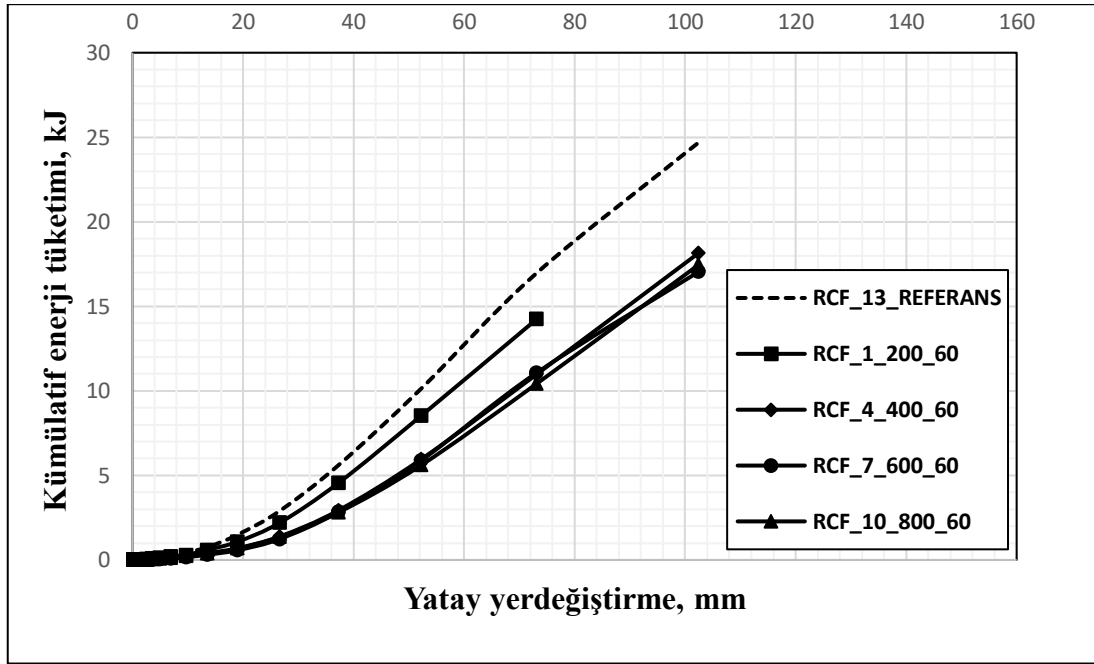




Şekil 103. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrileri

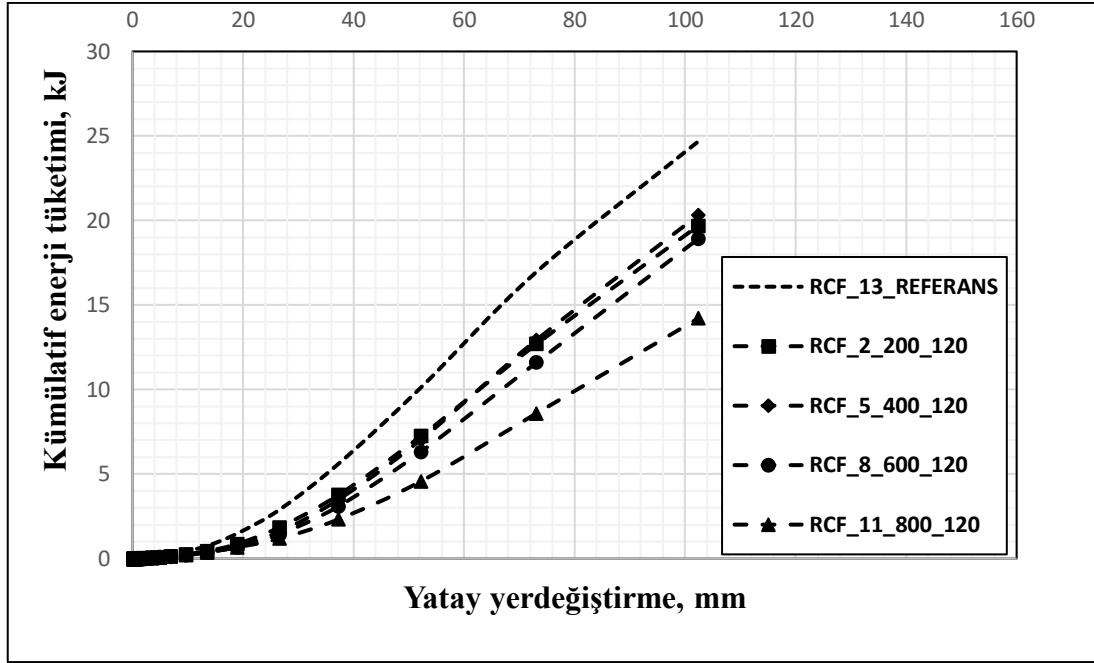
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmayan RCF_13_Referans deney elemanı deney süresince 24,69 kJ enerji tüketmiştir. 60 dakika boyunca 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_1_200_60 deney elemanı 14,25 kJ, 400 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_4_400_60 deney elemanı 18,15 kJ, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan

RCF_7_600_60 deney elemanı 17,04 kJ ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_10_800_60 deney elemanı 16,76 kJ enerji tüketmiştir. Buna göre, RCF_13_Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_1_200_60 deney elemanı % 42,28 RCF_4_400_60 deney elemanı % 26,49 RCF_7_600_60 deney elemanı % 30,98 ve RCF_10_800_60 elemanı % 32,10 oranında daha düşük enerji tüketmiştir (Şekil 104).



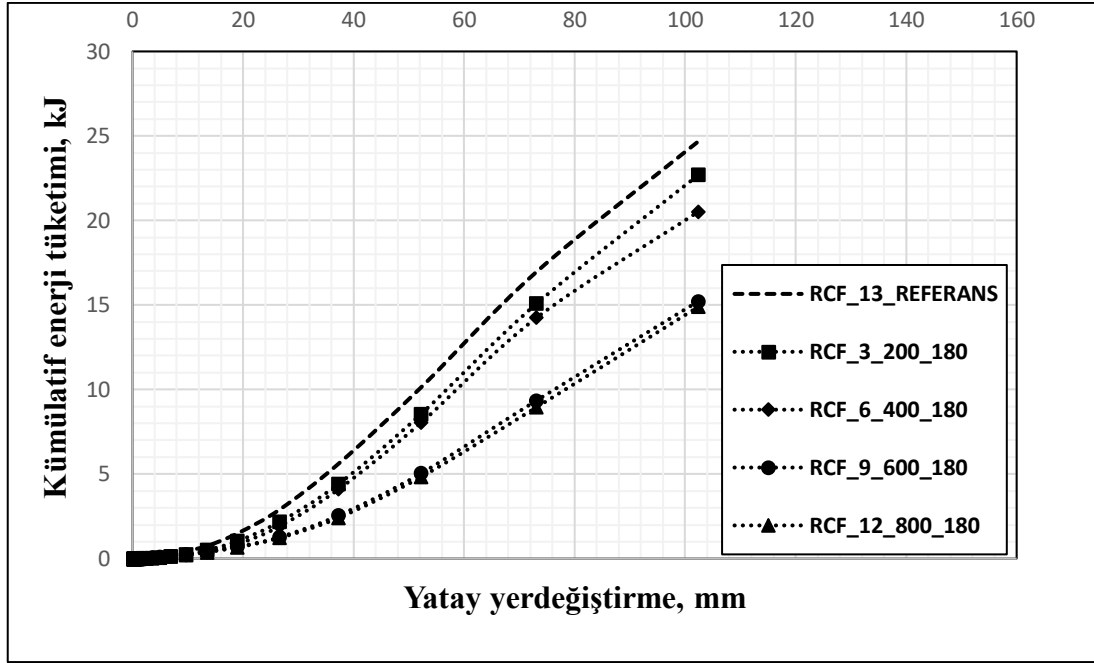
Şekil 104. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (60 dakika)

120 dakika boyunca 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_2_200_120 deney elemanı 19,70 kJ, 400 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_5_400_120 deney elemanı 20,33 kJ, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_8_600_120 deney elemanı 18,93 kJ ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_11_800_120 deney elemanı 14,22 kJ enerji tüketmiştir. Buna göre, RCF_13_Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_2_200_120 deney elemanı % 20,21 RCF_5_400_120 deney elemanı % 17,66 RCF_8_600_120 deney elemanı % 23,33 ve RCF_11_800_120 elemanı % 42,41 oranında daha düşük enerji tüketmiştir (Şekil 105).



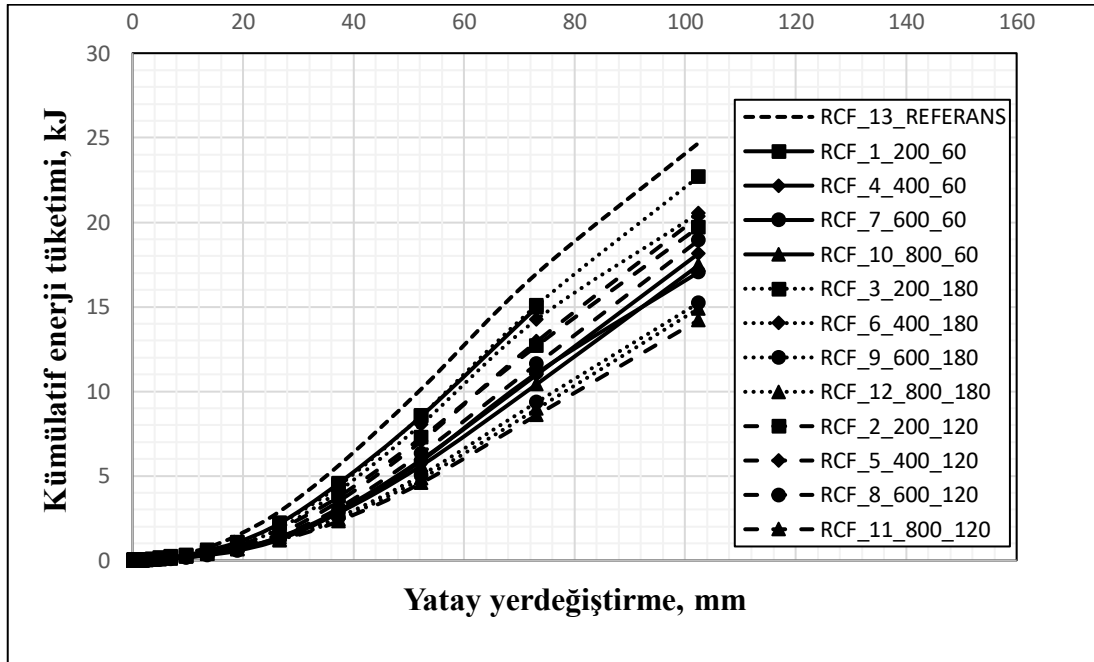
Şekil 105. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (120 dakika)

180 dakika boyunca 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_3_200_180 deney elemanı 22,70 kJ, 400 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_6_400_180 deney elemanı 20,53 kJ, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_9_600_180 deney elemanı 15,23 kJ ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_12_800_180 deney elemanı 14,08 kJ enerji tüketmiştir. Buna göre, RCF_13_Referans deney elemanı ile kıyaslandığında RCF_3_200_180 deney elemanı % 8,06 RCF_6_400_180 deney elemanı % 16,85 RCF_9_600_180 deney elemanı % 38,32 ve RCF_12_800_180 elemanı % 42,97 oranında daha düşük enerji tüketmiştir (Şekil 106).



Şekil 106. Deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması (180 dakika)

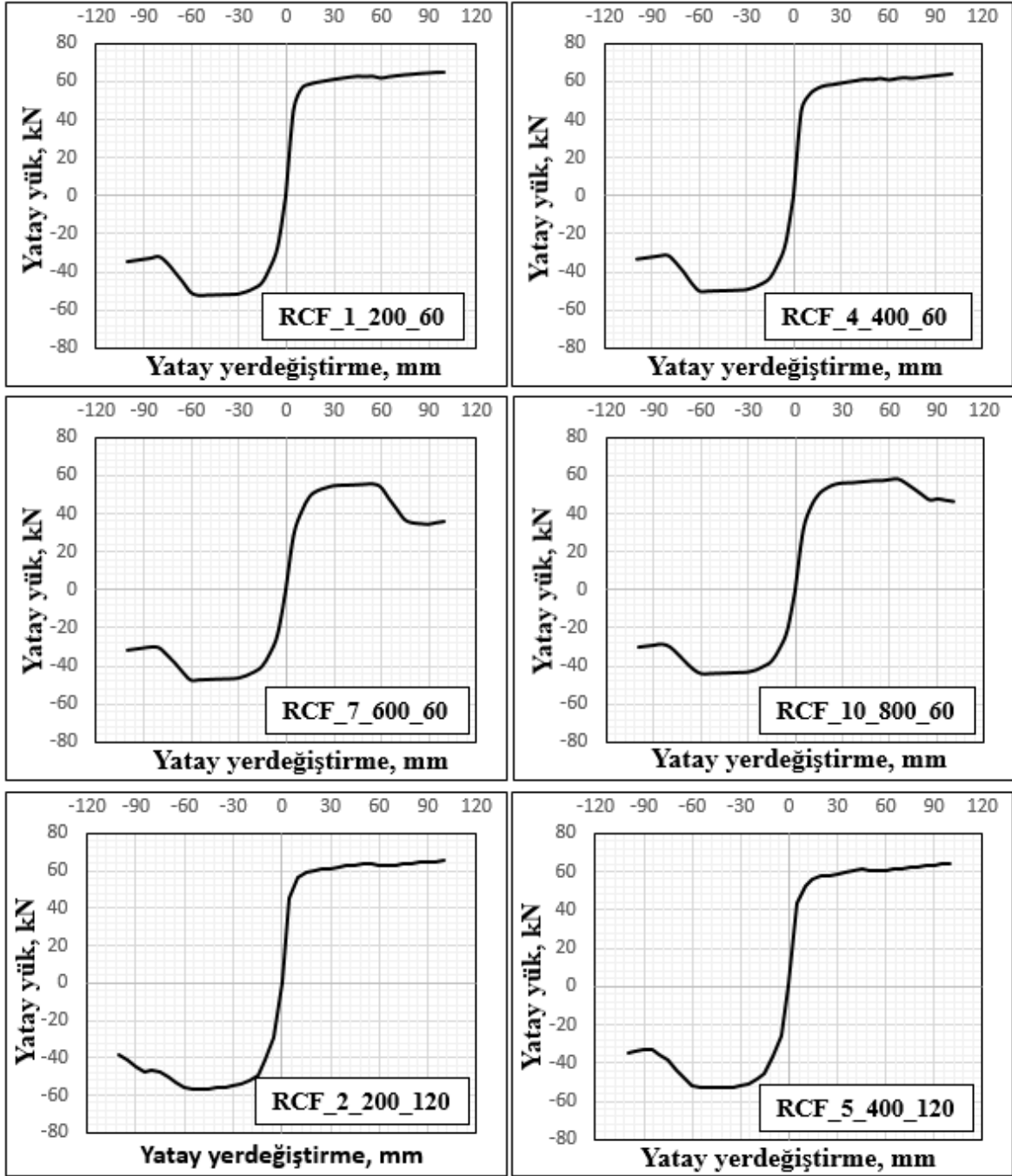
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan tüm deney elemanlarının kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 107'de gösterilmiştir.

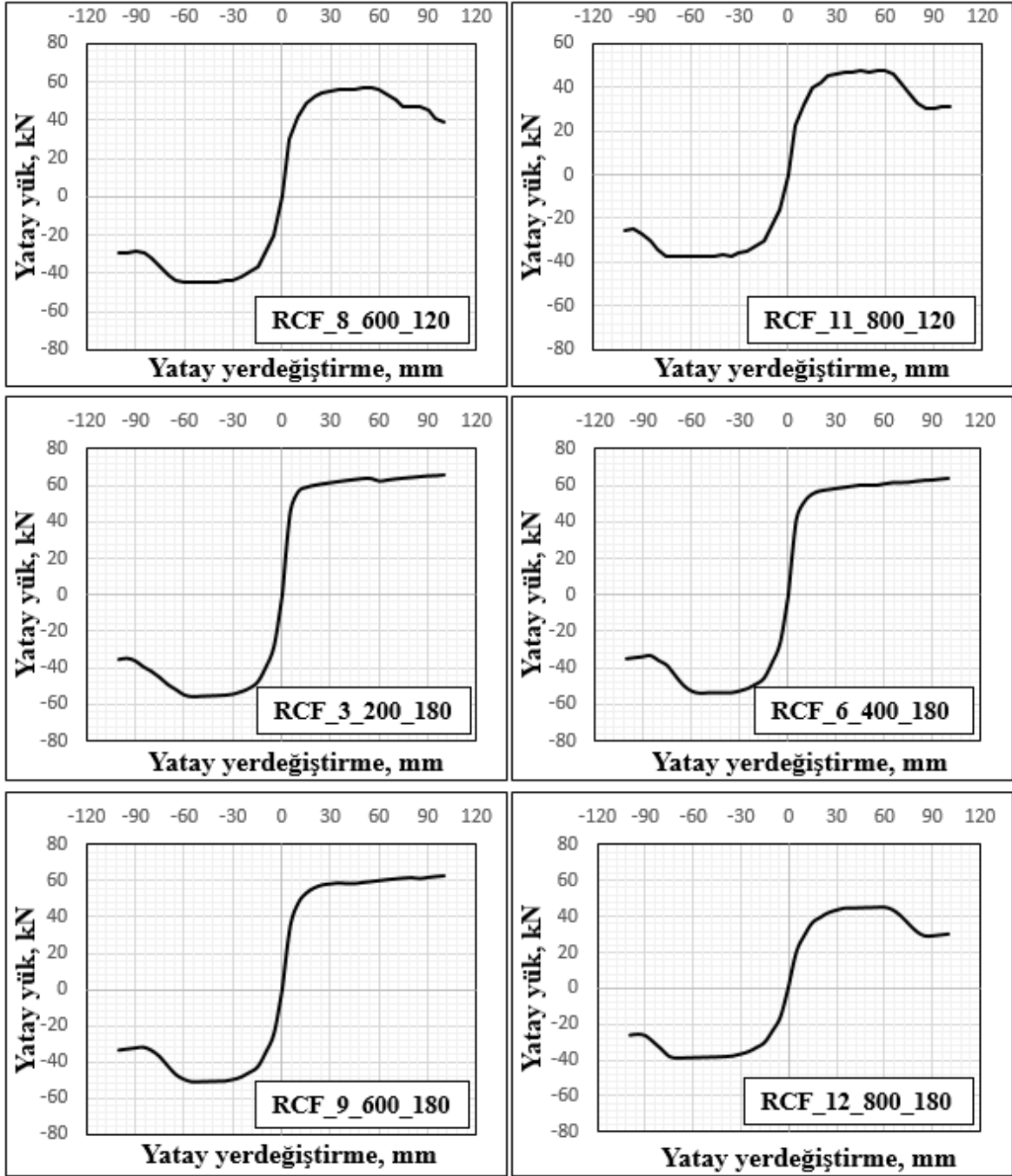


Şekil 107. Deney elemanlarının tümünün kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin karşılaştırılması

3.4. Sayısal Verilerin Karşılaştırılması ve Değerlendirilmesi

Çalışma doğrultusunda incelenen 13 adet betonarme çerçevenin ısıl - yapısal sıralı sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrileri Şekil 108’de gösterilmiştir.





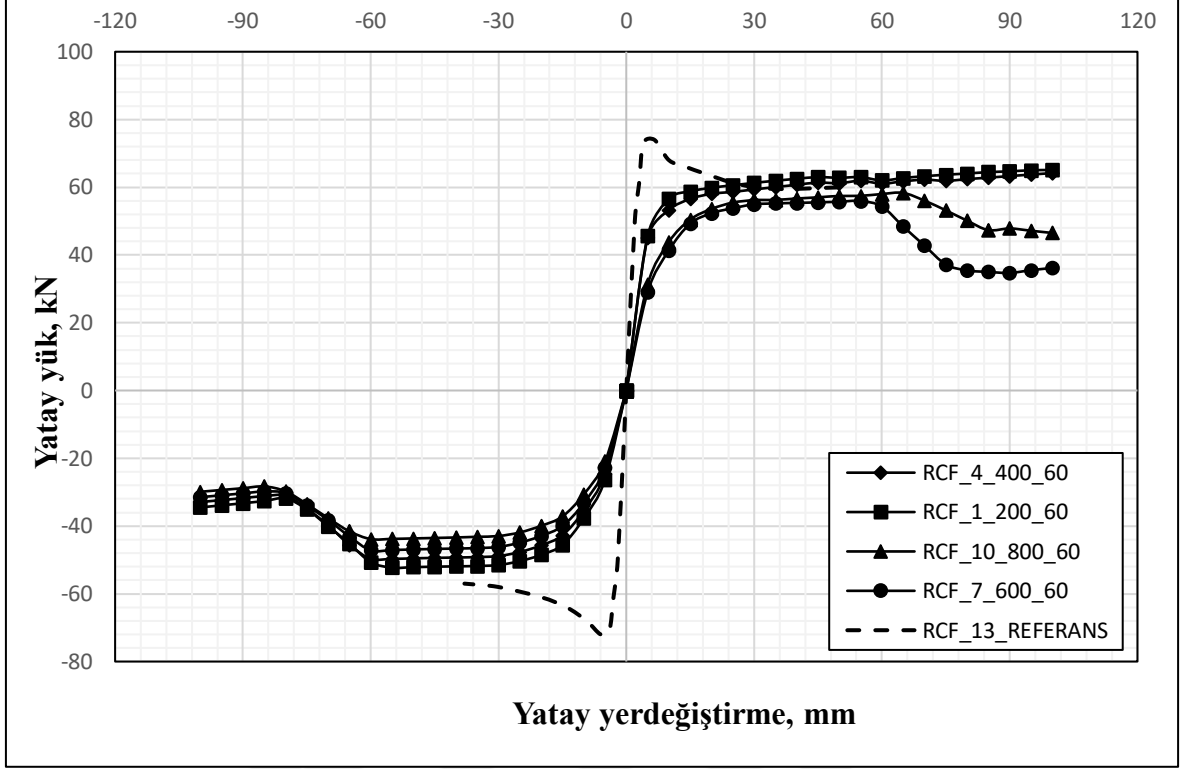
Şekil 108. Isıl – yapısal sonlu eleman analizlerinden elde edilen dayanım zarfı eğrileri

Betonarme çerçevelerin tamamının ısıl – yapısal sonlu eleman analizleri sonucunda elde edilen sayısal bulgular Tablo 12’de verilmiştir.

Tablo 12. Etki etme süresi – maksimum yatay yük – maksimum yerdeğiştirme ilişkisi (sayısal)

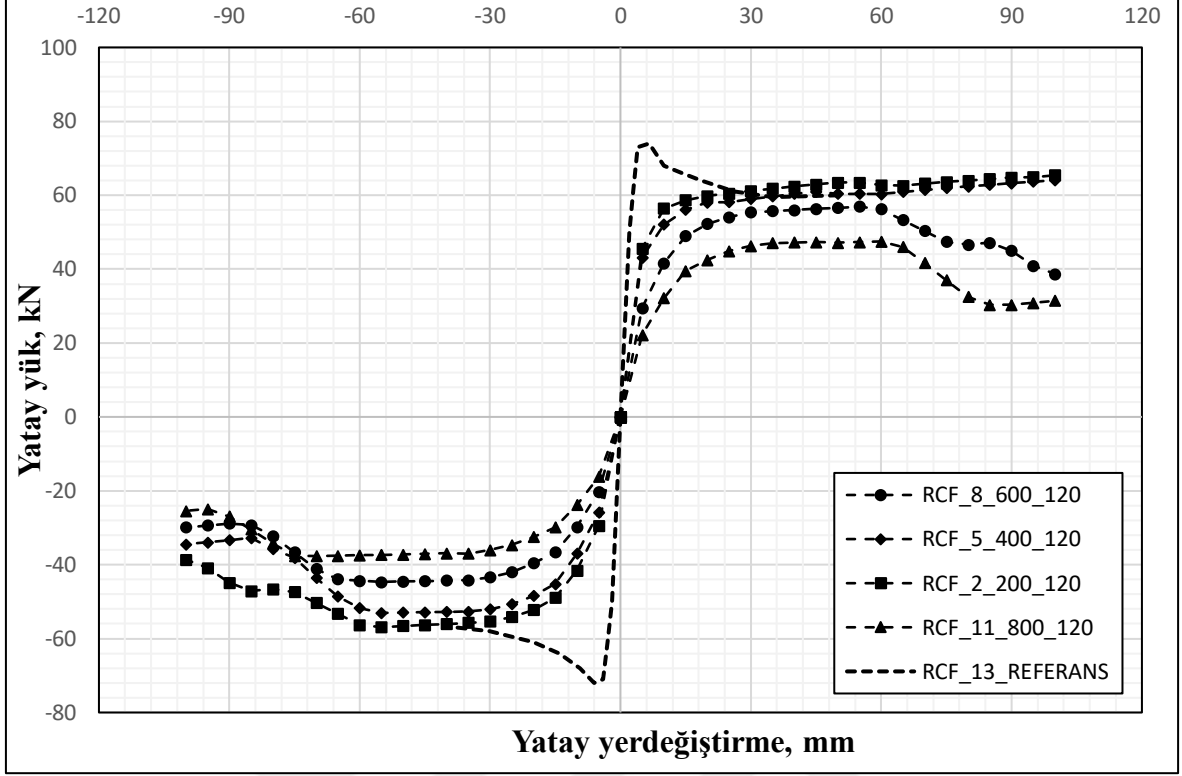
Yüksek Sıcaklık Derecesi °C	Etki Süresi											
	60 dakika				120 dakika				180 dakika			
	Maksimum yük (kN) – Maksimum yerdeğiştirme (mm)											
	İtme (+)		Çekme (-)		İtme (+)		Çekme (-)		İtme (+)		Çekme (-)	
	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ	P	Δ
200	65,1	100	52,3	100	65,4	100	52,2	100	65,3	100	52	100
400	64,2	100	49,7	100	63,2	100	49	100	63,1	100	48,6	100
600	55,9	100	47,2	100	54,5	100	44,7	100	53,1	100	42,1	100
800	53,3	100	43,9	100	47,5	100	39	100	45,4	100	38,5	100
	İtme (+)						Çekme (-)					
RCF_13	74						72					

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 60 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_1_200_60, RCF_4_400_60, RCF_7_600_60 ve RCF_10_800_60 elemanlarının ısı – yapısal sonlu eleman analizlerine göre RCF_1_200_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 65,09 kN, çekmede 52,29 kN ile en yüksek olduğu, RCF_10_600_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 53,29 kN, çekmede ise 43,85 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 108). Buna göre betonarme çerçeve elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C’den 800 °C’ ye çıkartılması halinde 60 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 18,13 çekmede % 16,06 oranında azaldığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13 Referans elemanı ile kıyaslandığında RCF_1_200_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 12,04 çekmede % 27,38 azalma, RCF_4_400_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 13,27 çekmede % 31,01 azalma, RCF_7_600_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 24,41 çekmede % 34,46 azalma ve RCF_10_800_60 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 28,04, çekmede % 39,10 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 109).



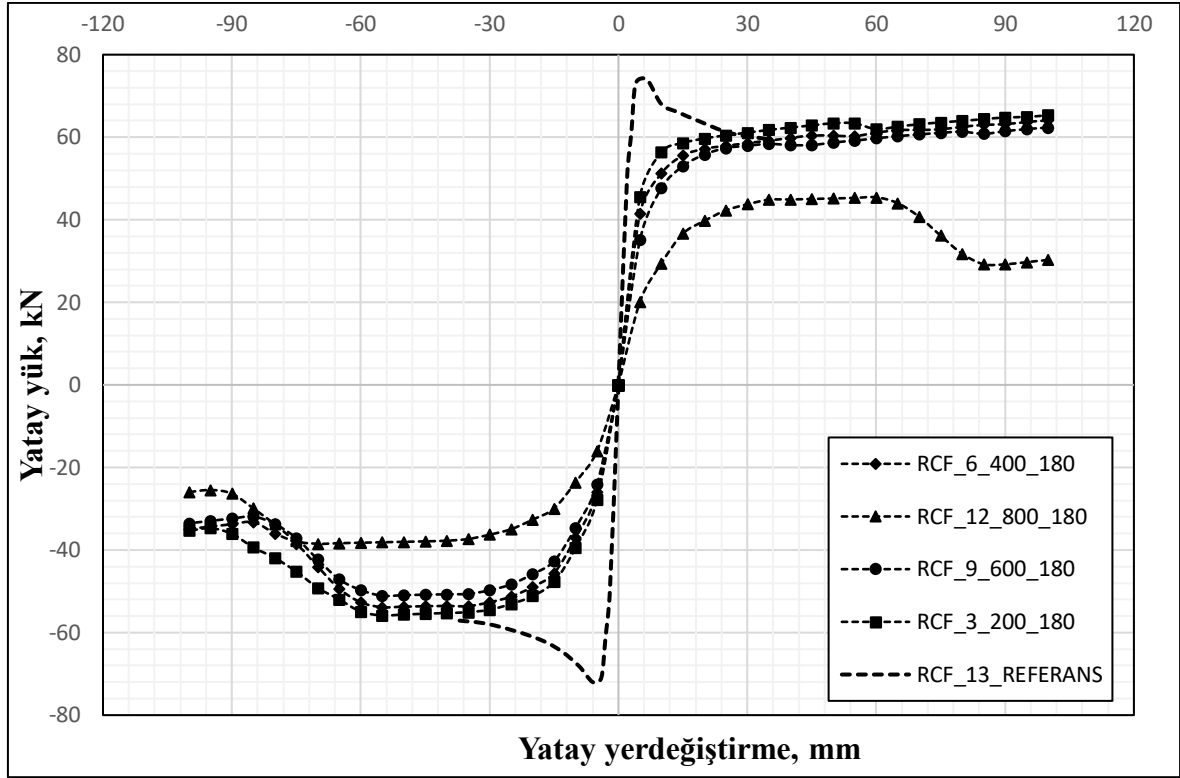
Şekil 109. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 dakika)

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 120 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_2_200_120, RCF_5_400_120, RCF_8_600_120 ve RCF_11_800_120 elemanlarının ısıl – yapısal sonlu eleman analizlerine göre RCF_2_200_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 65,4 kN, çekmede 52,18 kN ile en yüksek olduğu, RCF_11_800_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 47,49 kN çekmede 39 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 108). Buna göre betonarme çerçeve elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C’den 800 °C’ ye çıkartılması halinde 120 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 27,37 çekmede % 25,29 oranında azaldığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans elemanı ile kıyaslandığında RCF_2_200_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 11,62 çekmede % 27,53 azalma, RCF_5_400_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 14,58 çekmede % 31,99 azalma, RCF_8_600_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 26,42 çekmede % 37,97 azalma ve RCF_11_800_120 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 35,82 çekmede % 45,83 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 110).



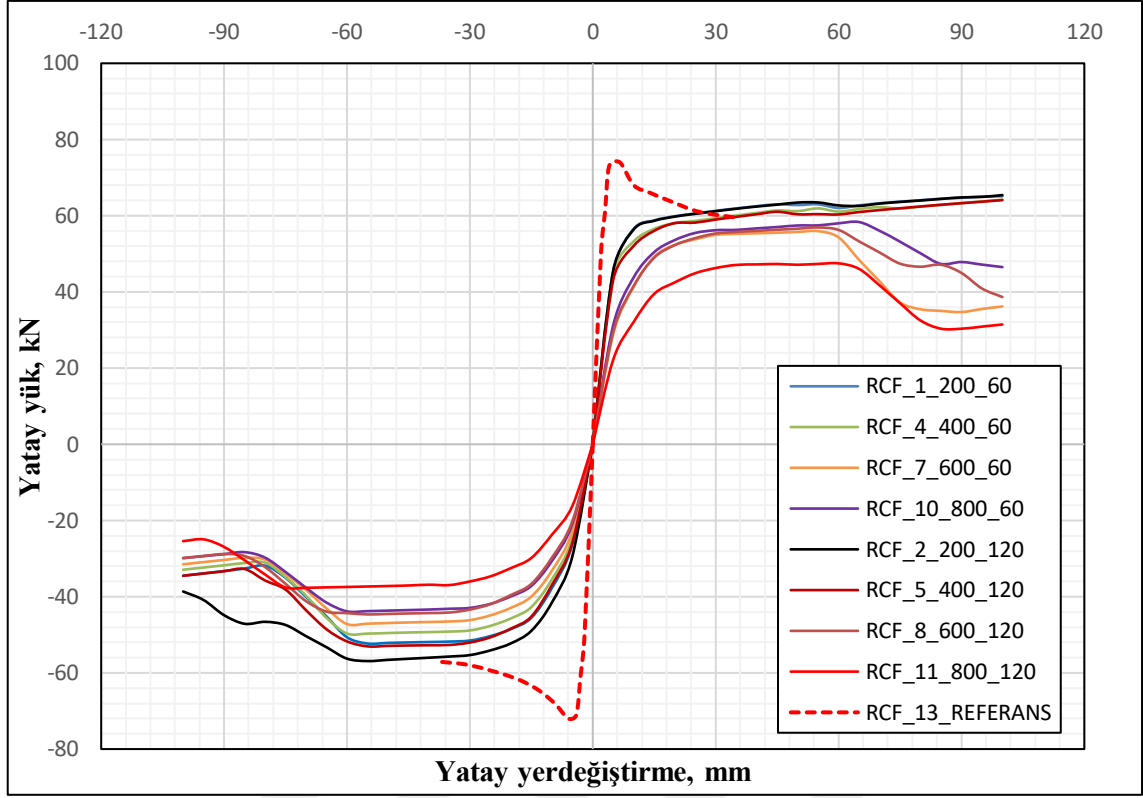
Şekil 110. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 dakika)

Dayanım zarfı eğrileri incelendiğinde, 180 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan RCF_3_200_180, RCF_6_400_180, RCF_9_600_180 ve RCF_12_800_180 elemanlarının ısıl – yapısal sonlu eleman analizlerine göre RCF_3_200_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 65,33 kN, çekmede 52,02 kN ile en yüksek olduğu, RCF_12_800_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinin itmede 45.44 kN, çekmede 38.47 kN ile en düşük olduğu belirlenmiştir (bkz. Şekil 108). Buna göre betonarme çerçeve elemanlarına uygulanan yüksek sıcaklık etkisinin 200 °C’den 800 °C’ ye çıkartılma halinde 180 dakika süresince yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 30,45 çekmede % 26,05 oranında azaldığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılmayan RCF_13_Referans elemanı ile kıyaslandığında RCF_3_200_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 11,72 çekmede % 27,75 azalma, RCF_6_400_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 14,70 çekmede % 32,47 azalma, RCF_9_600_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 28,23 çekmede % 41,47 azalma ve RCF_12_800_180 elemanının yatay yük taşıma kapasitesinde itmede % 38,59 çekmede % 46,57 azalma olduğu belirlenmiştir (Şekil 111).



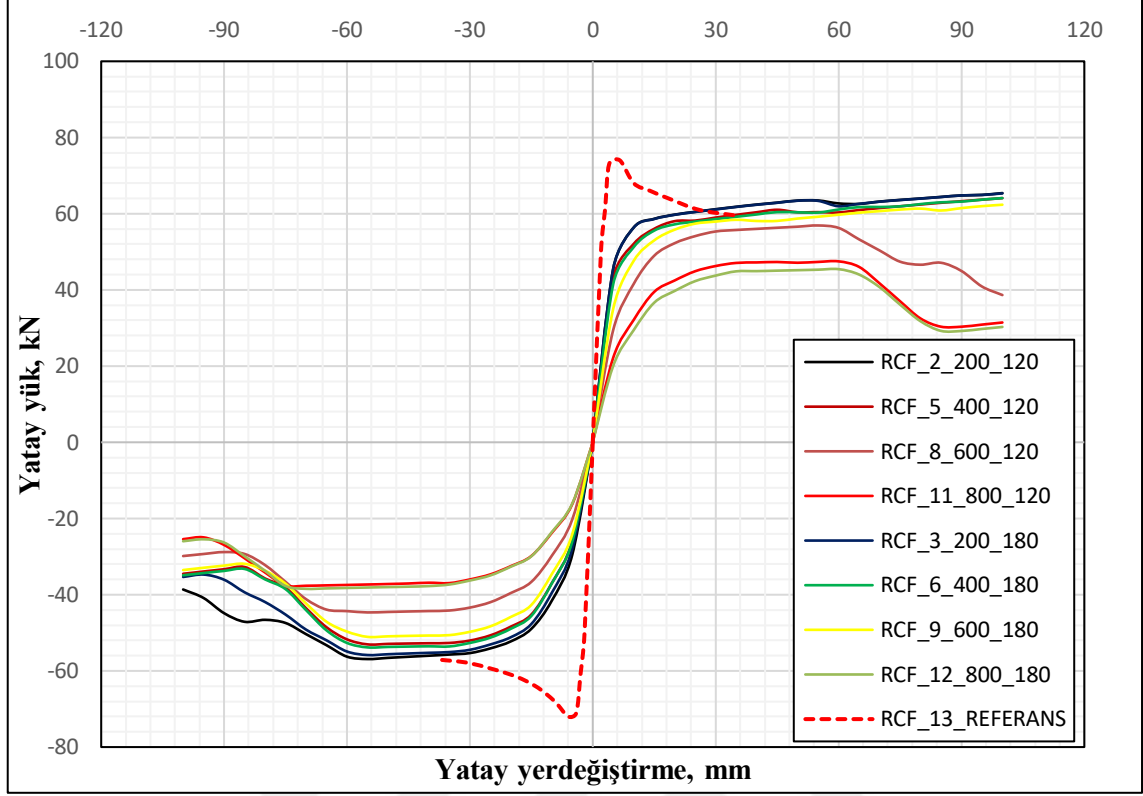
Şekil 111. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (180 dakika)

Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 60 dakikadan 120 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçeve elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 0,47 arttığı, çekmede % 0,21 azaldığı, 400°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 1,51 çekmede % 1,41 azaldığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 2,66 çekmede % 5,36 azaldığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 10,82 çekmede % 20,16 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 112).



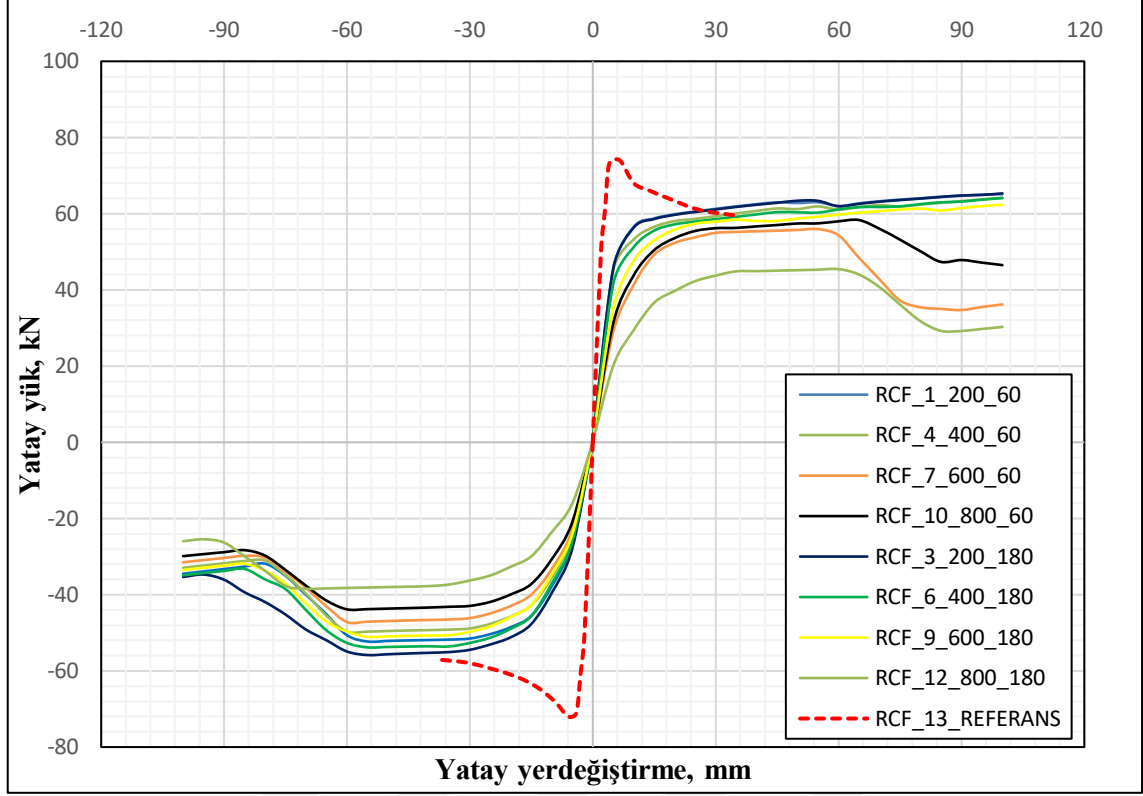
Şekil 112. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 – 120 dk)

Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 120 dakikadan 180 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçeve elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 0,11 çekmede % 0,31 azaldığı, 400°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 0,14 çekmede % 0,71 azaldığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 2,46 çekmede % 5,64 azaldığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 4,32 çekmede % 1,36 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 113).



Şekil 113. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (120 –180 dk)

Dayanım zarfı eğrilerine göre, yüksek sıcaklığın etki etme süresinin 60 dakikadan 180 dakikaya çıkartılması halinde, 200 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonarme çerçeve elemanlarında yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 0,37 arttığı, çekmede % 0,52 azaldığı, 400°C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 1,65 çekmede % 2,11 azaldığı, 600 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 5,06 çekmede % 10,70 azaldığı ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan elemanlarda yatay yük taşıma kapasitesinin itmede % 14,67 çekmede % 12,27 oranında azaldığı belirlenmiştir (Şekil 114).



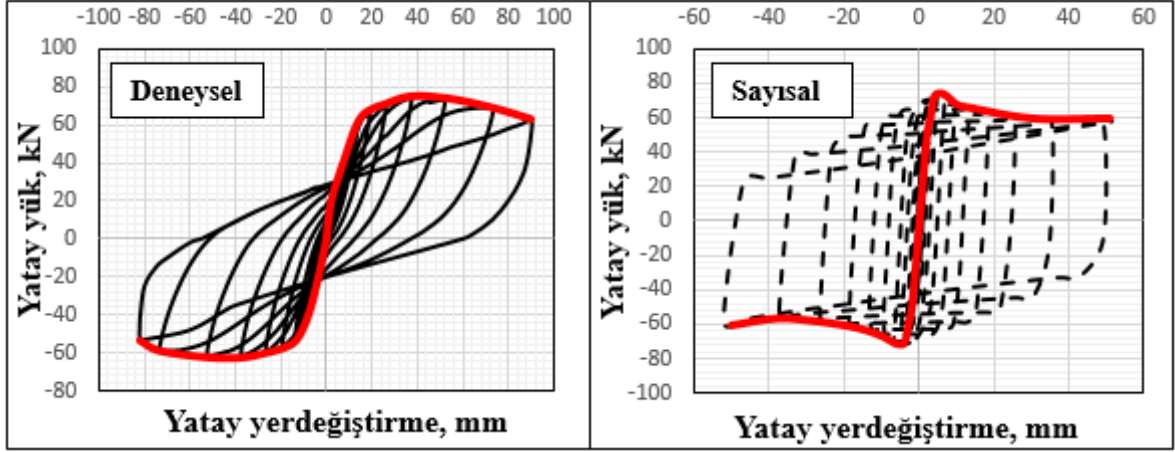
Şekil 114. Betonarme çerçevelerin dayanım zarfı eğrilerinin karşılaştırılması (60 – 180 dk)

3.5. Deneysel ve Sayısal Verilerin Karşılaştırılması ve İrdelenmesi

Çalışma kapsamında incelenen on üç adet betonarme çerçeve elemanın ABAQUS paket programı kullanılarak yapılan sonlu eleman analizi sonuçları ile deneysel çalışma sonuçlarının karşılaştırılması bu bölümde verilmiştir. Karşılaştırma sürecinde temel iki parametre göz önünde bulundurulmuş olup bunlar; betonarme çerçeve elemanlarının yatay yük taşıma kapasiteleri ile maksimum yatay yük değerine karşılık gelen yatay yerdeğiştirme seviyesidir.

3.5.1. RCF_13_Referans Deney Elemanı

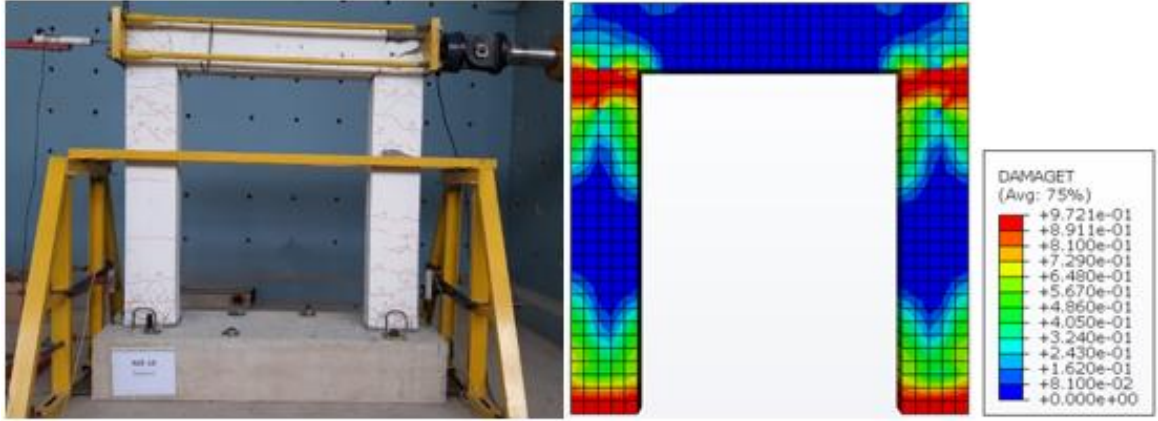
Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalmayan RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modeli oluşturularak, deneysel çalışmada belirtilen yükleme protokolüne uygun şekilde doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrisi ile dayanım zarfı eğrisi elde edilmiş, bu eğriler deneysel çalışmadan elde edilen eğriler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 115).



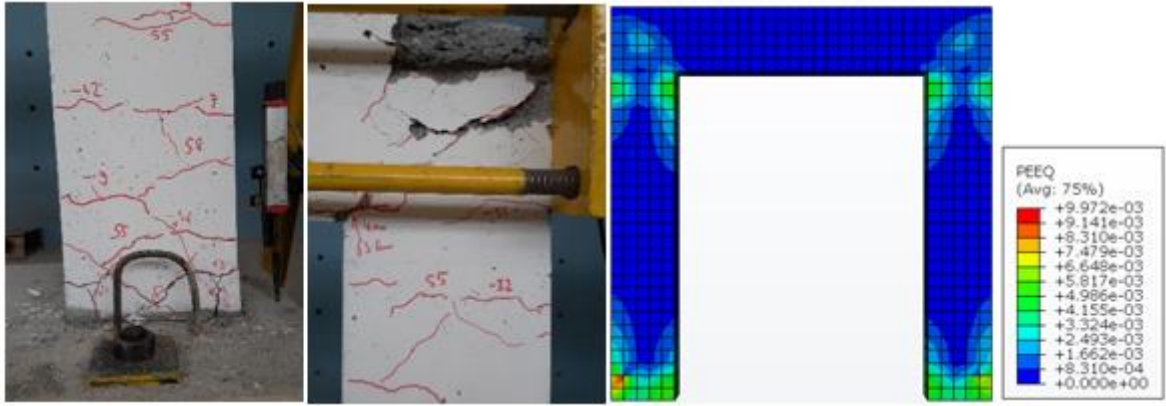
Şekil 115. RCF_13_Referans deney elemanının deneysel ve sayısal yatay yük – yatay yerdeğiştirme eğrileri ile dayanım zarfı eğrileri

Sayısal çalışmada RCF_13_Referans elemanı maksimum yük taşıma kapasitesine, yüklemenin on altıncı çevriminde 6,536mm yatay yerdeğiştirmede ulaşmıştır. Bu çevrimde yatay yük seviyesi itmede 74 kN, çekmede 72 kN olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmada ise maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşıldığı anda yatay yük seviyesi itmede 75 kN, çekmede 62,5 kN olarak bulunmuştur. Deneysel ve sayısal sonuçlar karşılaştırıldığında itmede % 1,33 çekmede % 13,19 oranında fark olduğu belirlenmiştir. Sayısal çalışmada, doğrusal olmayan analizlerde model üzerinde çok fazla detayın olduğu düşünüldüğünde, oluşan bu farkın kabul edilebilir düzeyde kaldığı söylenebilir. Maksimum yatay yerdeğiştirmede sayısal ve deneysel yatay yük değerlerindeki fark itmede % 17,11 çekmede ise % 22,46 olarak belirlenmiştir.

RCF_13_Referans deney elemanının doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonucunda oluşan çatlakların dağılımı deneysel çalışma ile benzerlik göstermiştir. Şekil 116’da görüldüğü üzere çatlaklar kolon – kiriş birleşim bölgeleri ile mesnet ve mesnete yakın bölgelerde yoğunlaşmıştır. Sonlu eleman analizi sonucunda RCF_13_Referans deney elemanında meydana gelen plastik şekildeğiştirmeler Şekil 117’de gösterilmiştir.

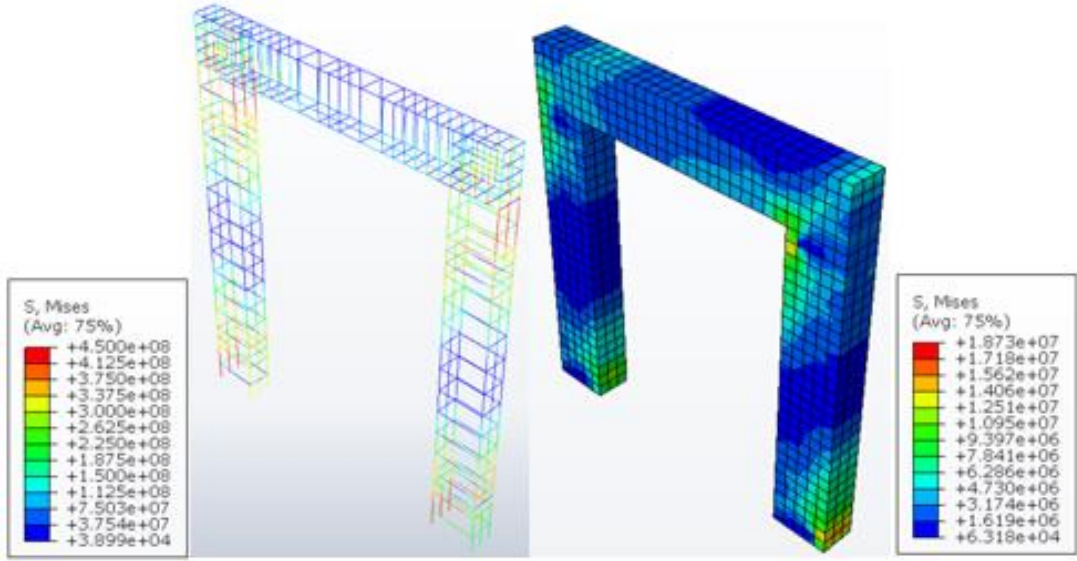


Şekil 116. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan çatlaklar



Şekil 117. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan plastik şekil değiştirmeler

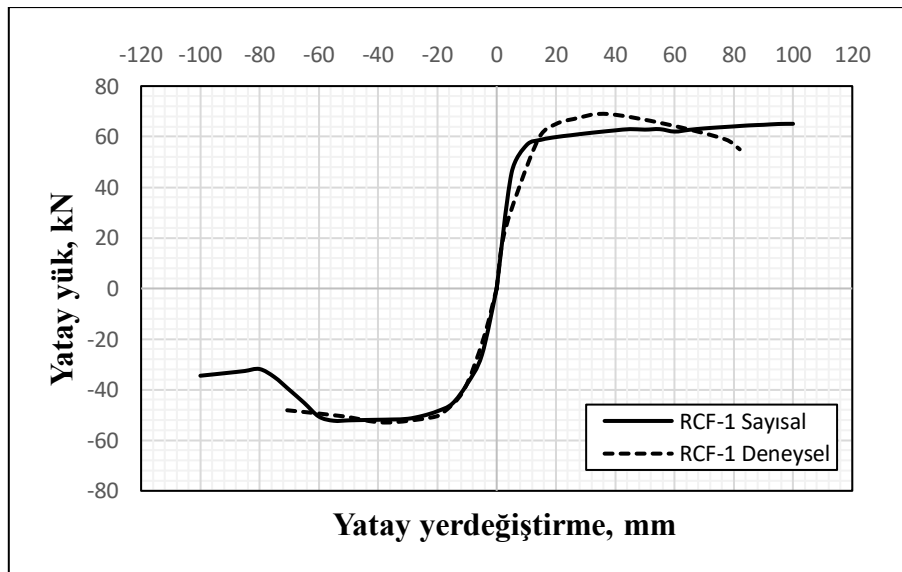
RCF_13 _Referans deney elemanının tekrarlı yatay yükleme deneylerinde oluşan gerilme dağılımları ölçülemedi. Buna rağmen sayısal çalışmalarda RCF_13_Referans deney elemanında meydana gelen gerilme dağılımları Şekil 118’de verilmiştir. Buna göre referans deney elemanında maksimum gerilme 18,7 MPa değerinde olup, kolon – kiriş birleşim bölgesinde ve mesnetlerde oluşmuştur.



Şekil 118. RCF_13_Referans deney elemanının sonlu eleman modelinde oluşan gerilme dağılımı (N/m²)

3.5.2. RCF_1_200_60 Deney Elemanı

200 °C yüksek sıcaklığa 60 dakika süresince maruz kalan RCF_1_200_60 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısı – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 119’da karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 13’de verilmiştir.



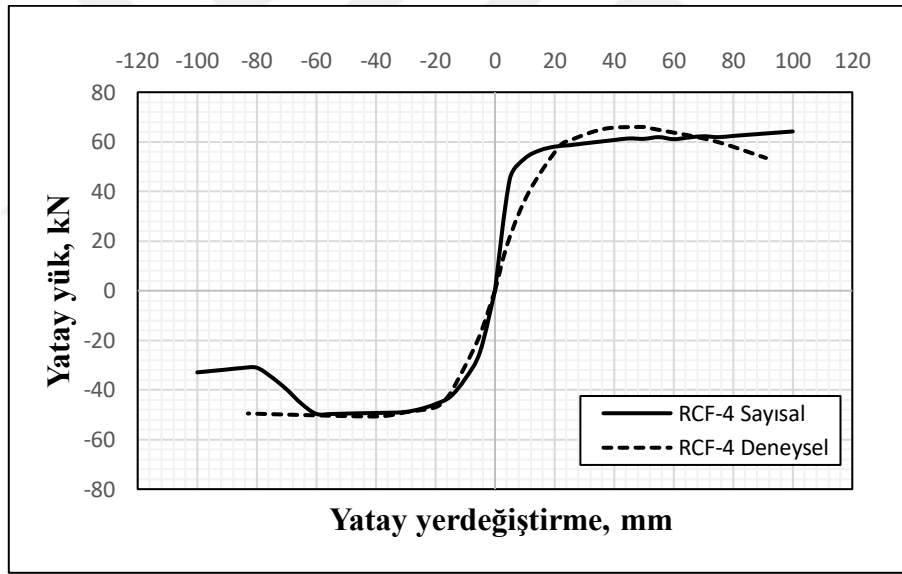
Şekil 119. RCF_1_200_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 13. RCF_1_200_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_1_200_60	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	69	37	63	45	1,1	0,82
Çekme	53	38	52,3	55	1,01	0,69

3.5.3. RCF_4_400_60 Deney Elemanı

400 °C yüksek sıcaklığa 60 dakika süresince maruz kalan RCF_4_400_60 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 120’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 14’de verilmiştir.



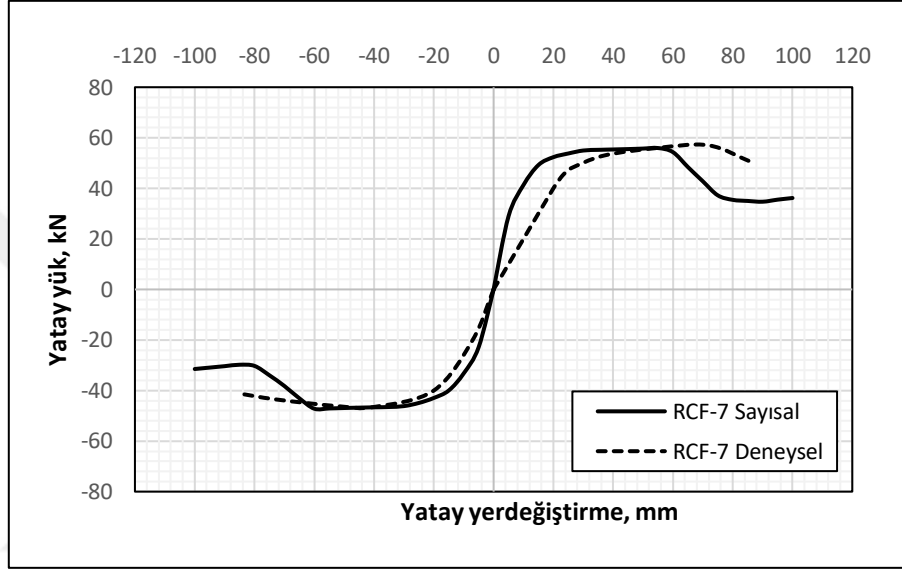
Şekil 120. RCF_4_400_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 14. RCF_4_400_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_4_400_60	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	66	50	61,9	55	1,07	0,91
Çekme	50,6	38	49,67	60	1,02	0,63

3.5.4. RCF_7_600_60 Deney Elemanı

600 °C yüksek sıcaklığa 60 dakika süresince maruz kalan RCF_7_600_60 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 121’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 15’de verilmiştir.



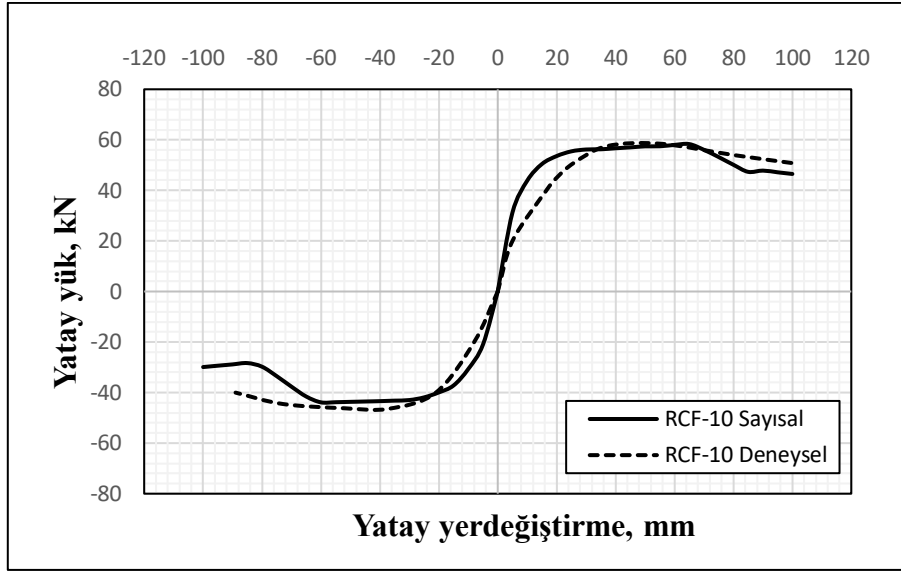
Şekil 121. RCF_7_600_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 15. RCF_7_600_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_7_600_60	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	57	72	55,94	55	1,02	1,31
Çekme	46,5	40	47,19	60	0,99	0,67

3.5.5. RCF_10_800_60 Deney Elemanı

800 °C yüksek sıcaklığa 60 dakika süresince maruz kalan RCF_10_800_60 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 122’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 16’da verilmiştir.



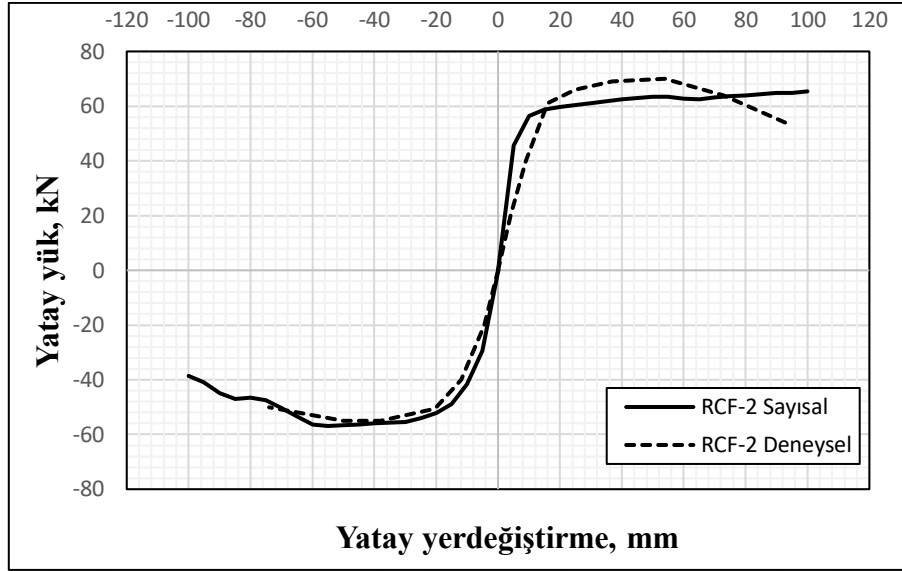
Şekil 122. RCF_10_800_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 16. RCF_10_800_60 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_10_800_60	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	58,5	55	58,33	65	1,0	0,85
Çekme	46,4	37	43,85	60	1,06	0,62

3.5.6. RCF_2_200_120 Deney Elemanı

200 °C yüksek sıcaklığa 120 dakika süresince maruz kalan RCF_2_200_120 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 123’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 17’de verilmiştir.



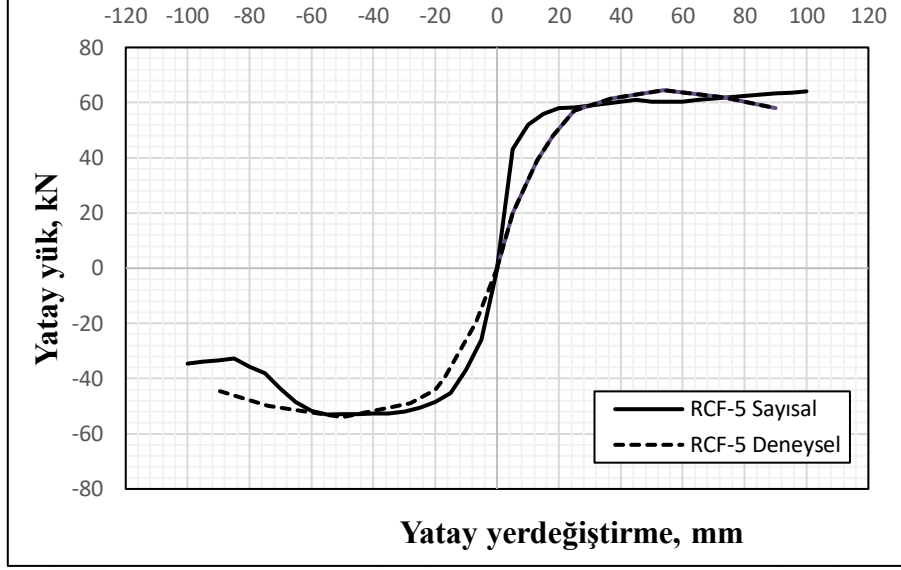
Şekil 123. RCF_2_200_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 17. RCF_2_200_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_2_200_120	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	70	54	63,47	55	1,10	0,98
Çekme	55	50	56,90	55	0,97	0,91

3.5.7. RCF_5_400_120 Deney Elemanı

400 °C yüksek sıcaklığa 120 dakika süresince maruz kalan RCF_5_400_120 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısı – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 124’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 18’de verilmiştir.



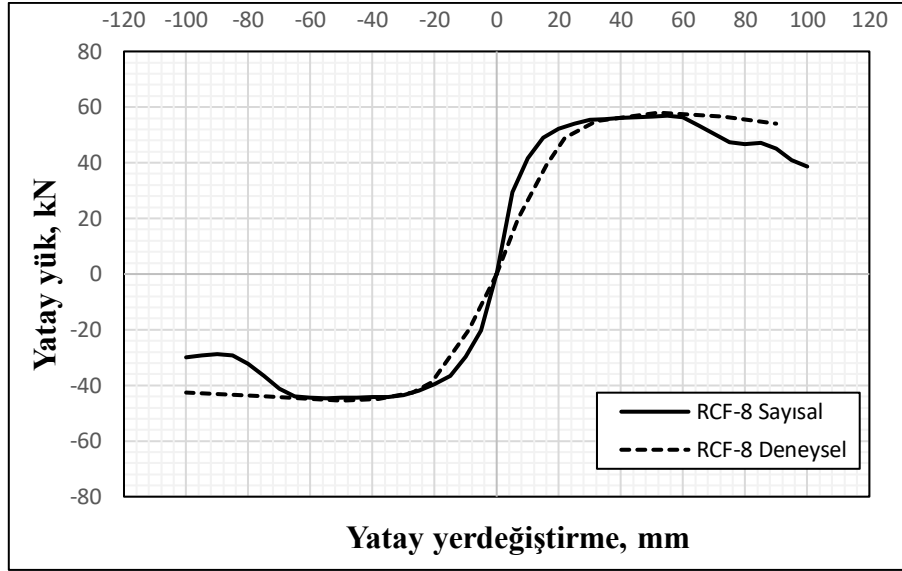
Şekil 124. RCF_5_400_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 18. RCF_5_400_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_5_400_120	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	64,5	54	61,03	45	1,06	1,2
Çekme	54	50	53,05	55	1,02	0,91

3.5.8. RCF_8_600_120 Deney Elemanı

600 °C yüksek sıcaklığa 120 dakika süresince maruz kalan RCF_8_600_120 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 125’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 19’da verilmiştir.



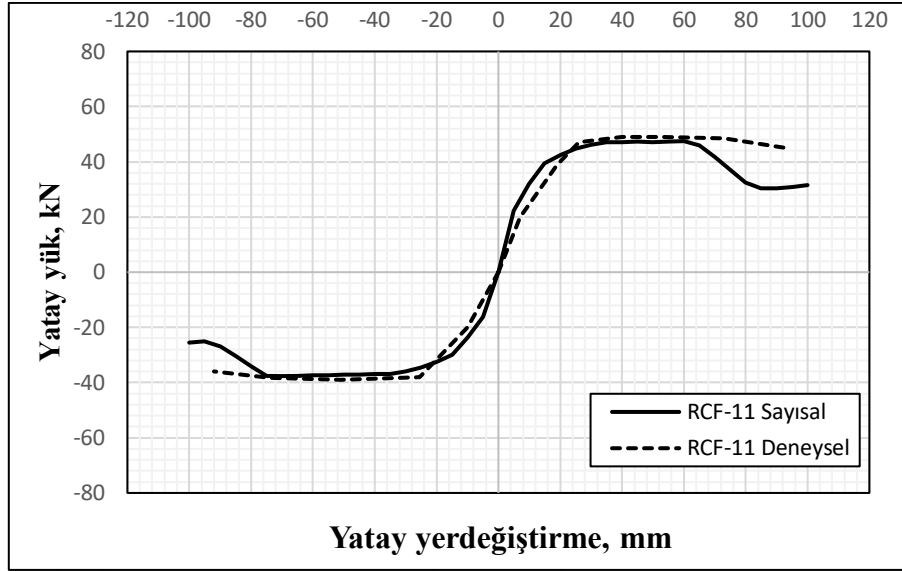
Şekil 125. RCF_8_600_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 19. RCF_8_600_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_8_600_120	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	58	52	56,9	55	1,02	0,95
Çekme	45,5	50	44,66	55	1,02	0,91

3.5.9. RCF_11_800_120 Deney Elemanı

800 °C yüksek sıcaklığa 120 dakika süresince maruz kalan RCF_11_800_120 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 126’da karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 20’de verilmiştir.



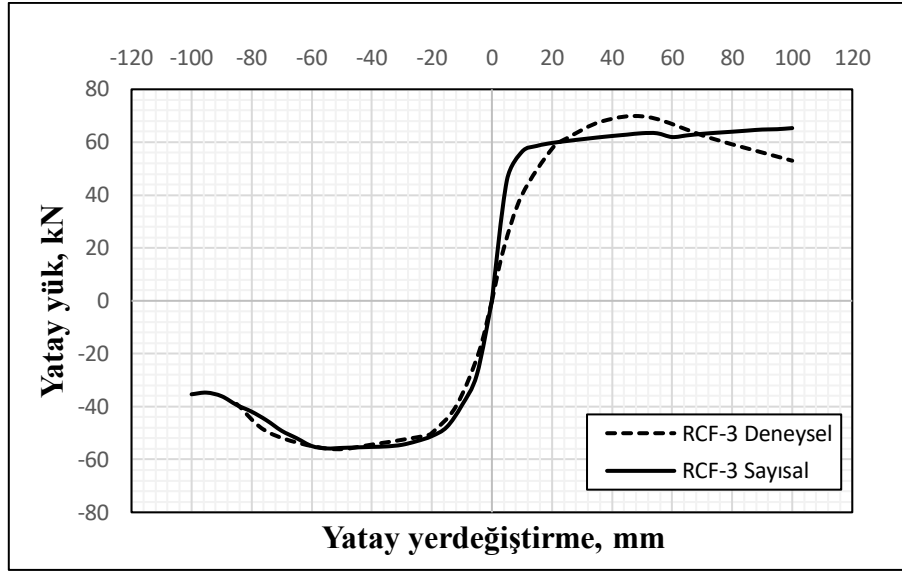
Şekil 126. RCF_11_800_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 20. RCF_11_800_120 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_11_800_120	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	49	53	47,49	60	1,03	0,88
Çekme	39	51	37,66	70	1,04	0,73

3.5.10. RCF_3_200_180 Deney Elemanı

200 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_3_200_180 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısı – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 127’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 21’de verilmiştir.



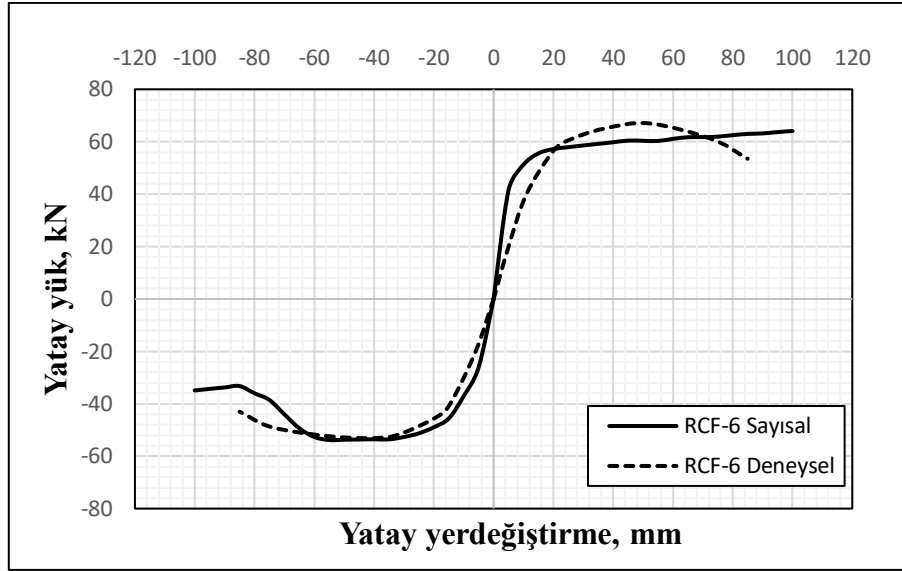
Şekil 127. RCF_3_200_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 21. RCF_3_200_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_3_200_180	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	69,5	52	63,37	55	1,09	0,95
Çekme	56	54	55,84	55	1,00	0,98

3.5.11. RCF_6_400_180 Deney Elemanı

400 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_6_400_180 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısı – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 128’de karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 22’de verilmiştir.



Şekil 128. RCF_6_400_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 22. RCF_6_400_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_6_400_180	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	67	52	61,76	70	1,08	0,74
Çekme	53	38	53,84	55	0,98	0,69

3.5.12. RCF_9_600_180 Deney Elemanı

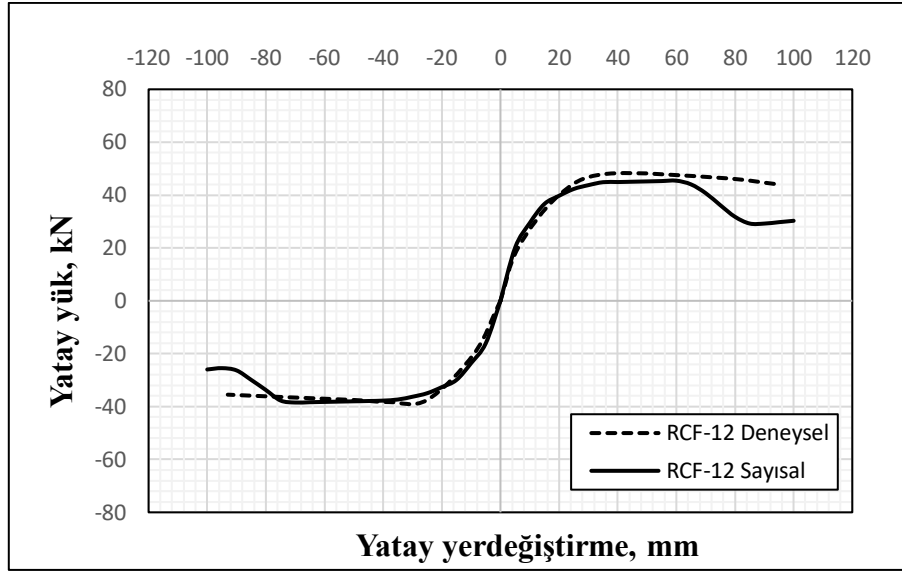
600 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_9_600_180 deney elemanının sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizlerinin sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 129’da karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 23’de verilmiştir.

Tablo 23. RCF_9_600_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

CF_9_600_180	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	63,5	52	59,20	55	1,07	0,9
Çekme	51	40	51,07	55	1,00	0,9

3.5.13. RCF_12_800_180 Deney Elemanı

800 °C yüksek sıcaklığa 180 dakika süresince maruz kalan RCF_12_800_180 numunesinin sonlu eleman metodu kullanılarak yapılan ısıl – yapısal sıralı analizinde elde edilen dayanım zarfı eğrisi, deneysel çalışma sonucunda elde edilen dayanım zarfı eğrisi ile Şekil 130’da karşılaştırılmış ve elde edilen bulgular Tablo 24’de verilmiştir.



Şekil 130. RCF_12_800_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması

Tablo 24. RCF_12_800_180 elemanı deneysel ve sayısal sonuçlar

RCF_12_800_180	Deneysel		Sayısal		Deneysel/Sayısal	
	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)	P (kN)	Δ (mm)
İtme	48	36	45,44	60	1,06	0,60
Çekme	38,3	38	38,46	70	0,99	0,54

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Bu amaçla on üç adet betonarme çerçeve deney elemanı üretilmiş, üretilen deney elemanları 200, 400, 600 ve 800 °C yüksek sıcaklık etkisine 60, 120 ve 180 dakika süresince maruz bırakılmıştır. Çalışmada, farklı derece ve sürelerde yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı çevrimsel yükleme altında, yatay yük – yatay yerdeğiştirme, rijitlik – yatay yerdeğiştirme, kümülatif enerji tüketimi – yatay yerdeğiştirme eğrilerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan betonun basınç dayanımı sıcaklığın derecesi ve etki süresindeki artışa bağlı olarak azalır. Basınç dayanımındaki azalma %78,63 seviyesine kadar çıkmıştır.
- Yüksek sıcaklık sonrasında tekrarlı yatay yük etkisine maruz kalan betonun basınç ve çekme dayanımındaki azalma, sadece yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonlara göre daha yüksektir.
- Çalışmada beton basınç dayanımının sıcaklık derecesi ve etki etme süresine bağlı olarak değişimleri hem yüksek sıcaklık etkisi sonrasında, hem de yüksek sıcaklık etkisi ardından meydana gelecek tekrarlı yatay yük etkisi sonrasında değerlendirilmiştir. Beton basınç dayanımındaki azalmada yatay yük etkisinin çok daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Bu durumda, deprem sonrası hasar alan yapıların değerlendirilmesi için alınan beton karot basınç dayanımlarına göre, beton dayanım sınıfının belirlenmesine itiyatla yaklaşmak gerekmektedir.
- Yüksek sıcaklığın etki süresinin 60, 120 ve 180 dakika olduğu çelik donatı numunelerinin çekme dayanımları sırasıyla 600, 400 ve 200 °C'ye kadar artış gösterir. Bu sıcaklık derecelerinden sonra ise çekme dayanımları azalır.
- 60 ve 120 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan tüm çelik donatı numunelerinin akma dayanımlarında artış meydana gelir. 180 dakika süresince yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan çelik donatı numunelerinin akma dayanımları 600 °C'den sonra azalır.

- Yüksek sıcaklık etkisine 60, 120 ve 180 dakika maruz kalan betonarme çerçeve deney elemanlarının yatay yük taşıma kapasiteleri, ısıtılmamış betonarme çerçeveye göre daha azdır.
- 60, 120 ve 180 dakika yüksek sıcaklık etkisine maruz bırakılan test elemanlarının enerji tüketme kapasiteleri referans test elemanına göre daha azdır.
- Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeveler ısıtılmamış çerçevelere göre daha düşük bir rijitliğe sahiptir. Ancak itme ve çekme durumlarında sıcaklık derecesi ve etki süresine bağlı olarak rijitlik değişimlerindeki tutarsızlıkların, yüksek sıcaklığın uygulanması sırasında çatlakların açılıp kapanmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan betonarme çerçeve deney elemanlarında beton yüzeylerinde değişimler olduğu gözlemlenmiştir. Bu değişimlere yüksek sıcaklık sonrasında test fırınından çıkan deney elemanlarının atmosferik ortam ile temasında $\text{CaO} - \text{CaCO}_3$ dönüşümünün neden olduğu düşünülmektedir.
- Sayısal çalışmalardan elde edilen betonarme çerçevelerin maksimum yatay yük taşıma kapasiteleri, deneysel çalışmalardan elde edilenlere oldukça yakındır.
- Betonarme çerçevelerin ısı – yapısal sonlu eleman analizleri sonrasında elde edilen yatay yük taşıma kapasiteleri etki etme süresinin 60, 120 ve 180 dakika olduğu tüm gruplarda artan yüksek sıcaklık ile birlikte azalır.
- Hem hasar hem de plastik davranışa dayanan CDP (Beton Hasarlı Plastisite Modeli) malzeme modeli, çevrimsel yatay yükleme altında termal etkilere maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışını doğru bir şekilde simüle eder.
- Betondaki C-S-H jelinin 550 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ayrışarak beton dayanımının düşmesi ve betonarme çerçevelerde yatay yük taşıma kapasitesinde %15'in üzerindeki azalmanın göçme durumu oluşturması nedeniyle 600 °C ve üzerindeki sıcaklıklara 60, 120 ve 180 dakika maruz kalan çerçevelerin güçlendirilmeden kullanılmaması gerektiği düşünülmektedir. Ayrıca 400 °C ve altındaki sıcaklıklara 60, 120 ve 180 dakika maruz kalan betonarme çerçevelerin yatay yük taşıma kapasitesindeki azalmanın %15'in altında olması ve C-S-H jeli yapısının 550 °C'de ayrışması nedeniyle güçlendirme yapılmadan kullanılabileceği düşünülmektedir.

Özet olarak, farklı yüksek sıcaklıklara farklı sürelerde maruz kalan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisi altında yük taşıma kapasitesi, rijitlikleri ve enerji sönümleme kapasitesinde, sıcaklık derecesinin ve etki süresinin artışına bağlı olarak önemli oranlarda azalma meydana geldiği belirlenmiştir. 600 ve 800 °C sıcaklıklara 60,120 ve 180 dakika maruz kalan betonarme çerçevelerin beton basınç dayanımları ile yatay yük taşıma kapasitesindeki azalmanın göçme durumu oluşturabilecek düzeyde olduğu ancak 400 °C ve altındaki sıcaklıklara 60, 120 ve 180 dakika maruz kalan betonarme çerçevelerde benzer riskin oluşmadığı görülmektedir.



5. ÖNERİLER

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada, farklı yüksek sıcaklık derecelerine farklı sürelerde maruz bırakılan betonarme çerçevelerin tekrarlı yatay yük etkisindeki davranışı araştırılmıştır. Yangın vb. olaylar nedeniyle yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan yapı elemanlarının yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik kapasitesi ve enerji sönümleme kapasitesinde meydana gelen değişimlerin değerlendirildiği bu çalışmada araştırmacılara ve uygulayıcılara iletmek istenen öneriler ile geliştirilmeye açık olan noktalar aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Bu tezde yüksek sıcaklık etkisinin uygulandığı betonarme çerçeveler kendi halinde soğumaya bırakılmış ve oda sıcaklığına ulaştıklarında test fırınından çıkartılarak yatay yükleme deneyleri uygulanmıştır. Çalışma su sıkılarak soğutulan betonarme çerçeveler için uyarlanarak geliştirilebilir.
- Bu tezde üretilen betonarme çerçeve elemanlarının boyut ve enkesit özelliklerinin belirlenmesinde, mevcut test fırınının kapasitesi belirleyici olmuştur. Bu doğrultuda yüksek sıcaklık etkisine maruz kalan farklı boyut ve enkesit özelliklerine sahip çerçevelerin yatay yük etkisindeki davranışları incelenebilir.
- Bu çalışmada yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada gerçekleştirilen deneyler gerçek yangın ortamına uyarlanarak davranıştaki değişim incelenebilir.
- Bu tez çalışmasında yüksek sıcaklığın derecesi ve etki süresinin betonarme çerçeve davranışına etkisi araştırılmıştır. Beton ve çelik donatı arasındaki bağ kuvvetinin yüksek sıcaklık derecesi ve etki süresi ile değişimi deneysel olarak incelenerek çalışma geliştirilebilir.
- Bu tez çalışmasında betonarme çerçevenin yüksek sıcaklık sonrası tekrarlı yatay yük etkisi altındaki davranışı beton dayanımı, yatay yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi açısından değerlendirilmiştir. Ancak beton petrografisi ile çalışma geliştirilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Abaqus/CAE V6.12. (2017). Programme, Dassault Systemes Simulia Corp. Providence, RI, USA.
- Akman, M.S. (2000). *Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri*. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- Alfarah, B. (2017). Advanced Computationally Efficient Modeling of RC Structures Nonlinear Cyclic Behavior. UPC, Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental, Tesi doctoral.
- Ali, A., Kim, D. & Cho, S.G. (2013). Modeling of Nonlinear Cyclic Load Behavior of I-shaped Composite Steel-concrete Shear Walls of Nuclear Power Plants. *Nuclear Engineering and Technology*, 45(1), 89–98.
- Alonso, C., Andrade, C. & Khoury, G.A. (2003a). Porosity&Microcracking, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine, Italy.
- Altunışık, A.C., Günaydın, M., Okur, F.Y. & Genç, A.F. (2018). İnşaat Mühendisliğinde ANSYS Uygulamaları, Dynamic Academy, Trabzon.
- Açıkel, H. (2017). Betonarme Kısa Kolonların Yangın Dayanımlarının Çeşitli Parametreler Açısından İrdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, Türkiye.
- Alcaino, P., Santa-Maria, H., Verdugo, C. & Lopez, L. (2020). Experimental Fast-Assessment of Post-fire Residual Strength of Reinforced Concrete Frame Buildings Based on Non-Destructive Tests. *Construction and Building Materials*, 234, 1-10.
- Alcaino, P., Santa-María, H., Cortés, M. & Alfaro, J. (2018). Fast Assessment of Post-fire Residual Strength of Reinforced Concrete Frame Buildings Based on Non-destructive Tests. 18th International Conference on Experimental Mechanics (ICEM18), Brussels, Belgium, Bildiriler Kitabı: 1-6.
- Altunışık, A.C., Akbulut, Y.E., Varol, H. & Başağa, H.B. (2018). Mühendislik Yapılarının Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Dinamik Karakteristik Değişimlerinin Deneysel Modal Analiz Yöntemiyle İncelenmesi, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, 2018-2019.
- ASTM C42/C 42M (2002): “Standard Test Method of Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete”, Annual Book of ASTM Standards, PA, USA.
- Baradan, B., Yazıcı, H. & Ün, H. (2002). *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir.

- Balaji, A., Luquman, K.M., Nagarajan, P. & Pillai, T.M.M. (2015). Prediction of Response of Reinforced Concrete Frames Exposed To Fire. *Advanced in Computational Design*, 1, 105-117.
- Castillo, C. & Duranni, A.J. (1990). Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete. *ACI Materials Journal*, 87, 47–53.
- CEB, Bulletin D'Information, (1991). *Fire Design of Concrete Structures*. Lausanne.
- Chaudhary, K., Roy, T. & Matsagar, V. (2020). Framework for Fragility Assessment of Reinforced Concrete Portal Frame Subjected to Elevated Temperature. *Structures*, 28, 2785-2800.
- Chopra, A.K. (2007). *Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics, Pearson/Prentice Hall.
- Dere, Y. & Koroglu, M.A. (2017). Nonlinear FE Modeling of Reinforced Concrete. *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 6(1), 71–74
- El-Fitiany, S.F. & Youssef, M.A. (2017). Fire Performance of Reinforced Concrete Frames Using Sectional Analysis. *Engineering Structures*, 142, 165-181.
- El Tayeb, E.H., El Metwally, S.E., Askar, H.S. & Yousef, A.M. (2017). Thermal Analysis of Reinforced Concrete Beams and Frames. *HBRC Journal*, 13, 8-24.
- Elshorbagy, M. & Abdel-Mooty, M. (2020). The Coupled Thermal-structural Response of RC Beams During Fire Events Based on Nonlinear Numerical Simulation. *Engineering Failure Analysis*, 109, 104297.
- Erdem, H. (2010). Yüksek Sıcaklığa Maruz T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Eğilme Taşıma Gücü. *Teknik Dergi*, 328, 5023-5036.
- FEMA 461 (2007). Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristic of Structural and Nonstructural Compotents, Federal Emergency Management Agency.
- Filippo, M.D. (2016). Non-linear Static and Dynamic Finite Element Analyses of Reinforced Concrete Structures, Aalborg University.
- Hacıemiroğlu, M. (2014). Yangın Geçirmiş Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Haddad, R.H. & Shannis, L. (2004). Post-fire Behavior of Bond Between High Strenth Pozzolan concrete and Reinforcing Steel. *Construction and Building Materials*, 18, 425-435.
- Hamunzala, B. & Teklemariam, D. (2016). Design of Thick Concrete Beams: Using Non-Linear FEM, KTH Royal Institute of Tecnology, Master Thesis.

- Hüsem, M. (2006). The Effects of High Temperature on Compressive and Flexural Strengths of Ordinary and High-Performance Concrete. *Fire Safety Journal*, 41, 155-163.
- ISO 834 (2014). Fire Resistance Tests Elements of Building Construction, Geneva, International Organization for Standardization (ISO).
- Kada, A. & Lamri, B. (2018). Numerical Analysis of Non-restrained Long-span Steel Beams at High Temperatures Due to Fire. *Asian Journal of Civil Engineering*, Springer Nature Switzerland AG.
- Kamath, P., Sharma, U.K., Kumar, V., Bhargava, P., Usmani, A., Singh, B., Singh, Y., Torero, J., Gillie, M. & Pankaj, P. (2015). Full-scale Fire Test on an Earthquake-Damaged Reinforced Concrete Frame. *Fire Safety Journal*, 73, 1-19.
- Khoury, G.A. (1992). Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment. *Magazine of Concrete Research*, 44, 291-309.
- Kodur, V.K.R. & Agrawal, A. (2016). An Approach for Evaluating The Residual Capacity of Reinforced Concrete Beams Exposed to Fire. *Journal of Engineering Structures*, 110, 293-306.
- Kumar, P. & Srivastana, G. (2017). Numerical Modeling of Structural Frames with Infills Subjected to Thermal Exposure. *Journal of Structural Fire Engineering*, 8(3), 218-237.
- Labibzadeh, M., Zakeri, M. & Adel Shoaib, A. (2017). A New Method for CDP Input Parameter Identification of the ABAQUS Software Guaranteeing Uniqueness and Precision, *International Journal of Structural Integrity*, 8(2), 264–284.
- Li, X., Xu, Z., Bao, Y. & Cong, Z. (2019). Post-fire Seismic Behavior of Two-bay Two-story Frames With High Performance Fiber-reinforced Cementitious Composite Joints, *Engineering Structures*, 183, 150-159.
- Li, M., Qian, C. & Sun, W. (2004). Mechanical Properties of High-Strength Concrete After Fire. *Cement and Concrete Research*, 34, 1001-1005.
- Maréchal, J.C. (1972). Variations in the Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio with Temperature, Int. Seminar on Concrete for Nuclear Reactors. ACI SP-34, 1, Detroit, Michigan, *Bildiriler Kitabı*: 495–503.
- Michał, S. & Andrzej, W. (2015). Calibration of the CDP Model Parameters in Abaqus, The 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM2015), Incheon, Korea.
- Molina, L., Ruiz, M.A., Montes, E. & Alonso, M.C. (2015). Bond Strength of Galvanized Steel: Experimental and Numerical Study Based on Pull-out Tests. 3rd International Conference on Mechanical Models in Structural Engineering, 143–158.
- Najafgholipour, M.A., Dehghan, S.M., Dooshabi, A. & Niroomandi, A. (2017). Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Beam-column Connections with

- Governing Joint Shear Failure Mode. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 14(7), 1200–1225.
- Neville, A.M. (2000). *Properties of Concrete*, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York, USA.
- Ozbolt, J., Bosnjak, J., Periskic, G. & Sharma, A. (2013). 3D Numerical Analysis Of Reinforced Concrete Beams Exposed To Elevated Temperature. *Engineering Structures*, 58.
- Parthasarathi, N. & Satyanarayanan, K.S. (2021). Progressive Collapse Behavior of Reinforced Concrete Frame Exposed to High Temperature. *Journal of Structural Fire Engineering*, 12(1), 110-124.
- Perkins, P.H. (1986). *Repair, Protection and Waterproofing of Concrete Structures*, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- Pires, D., Barros, R.C., Silveira, R.A.M., Lemes, Í.J.M. & Rocha, P.A.S. (2019). Thermo-Structural Analysis of Reinforced Concrete Beams. *Fire Research*, 3(74), 25-31.
- Raouffard, M.M. & Nishiyama, M. (2016). Residual Load Bearing Capacity of Reinforced Concrete Frames after Fire. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14, 625-633.
- Ren, W., Sneed, L.H., Yang, Y. & He, R. (2015). Numerical Simulation of Prestressed Precast Concrete Bridge Deck Panels Using Damage Plasticity Model. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 9(1), 45–54.
- Risan, H.K., Harba, I.S.I. & Abdulridha, A.J. (2017). Numerical Analysis of RC Wall with Opening Strengthened by CFRP Subjected to Eccentric Loads. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 69(7), 573–580.
- Ryu, E., Shin Y. & Kim H. (2018). Effect of Loading and Beam Size on the Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Under and After Fire. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12(54), 1-10.
- Selamet, S. (2017). Türkiye’de Yangın Mühendisliği. *TÜYAK Yangın Mühendisliği Dergisi*, 2, 62-63.
- Salman, B. (2017). Yangın Güvenliği Yangın Çıkmasıyla Başlamaz. *Elektrik Mühendisliği Dergisi*, 462, 35-37.
- Shah, A.H., Sharma, U.K. & Bhargava, P. (2017). Outcomes of a Major Research on Full Scale Testing of RC Frames in Post Earthquake Fire. *Construction and Building Materials*, 155, 1224-1241.
- Shahryari, L. & Esfandiari, M. (2015). Comparison of Plasticity and Stiffness of Steel Shear Walls with Composite Steel Plate Shear Wall. *Journal of Structural Engineering and Geo-Techniques*, 5(3), 21–26.
- Shoaib, M.M., Ahmed, S.A. & Balaha M.M. (2001). Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars. *Cement and Concrete Research*, 31, 1533-1538.

- Sinaei, H., Shariati, M., Abna, A.H., Aghaei, M. & Shariati, A. (2012). Evaluation of Reinforced Concrete Beam Behaviour Using Finite Element Analysis by ABAQUS. *Scientific Research and Essays*, 7(21), 2002–2009.
- Sümer, Y. & Aktaş, M. (2015). Defining Parameters for Concrete Damage Plasticity Model. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 1(3), 149–155.
- TBDY (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Ankara, Afad ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Thomas, P.H. & Heselden, A.J.M. (1972). Fully-developed Fires in Single Compartments, A Co-operative Research Programme of the Conseil International Du Bâtiment, Building Research Establishment, Fire Research Station, England.
- TS EN 1991 - 1 - 2 (2002). Eurocode 1: Actions on Structures, Part 1.2: General Actions – Actions on Structures Exposed to Fire.
- TS EN 1992 – 1 – 2 (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1 – 2: General rules – Structural fire design.
- TS EN 1993 – 1 – 2 (2005). Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1 – 2: General rules – Structural fire design.
- Türkay, A., & Altun, F. (2022). Experimental Study of Seismic Torsional Behavior of Reinforced Concrete Walls. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 4213–4235.
- Vitorino, H., Rodrigues, H. & Couto, C. (2020). Evaluation of Post-earthquake Fire Capacity of a Reinforced Concrete One Bay Plane Frame Under ISO Fire Exposure. *Structures*, 23, 602-611.
- Zhao, G., Zhang, M., Li, Y., & Li, D. (2016). The Hysteresis Performance and Restoring Force Model for Corroded Reinforced Concrete Frame Columns. *Journal of Engineering*, 1–19.
- Zhou, D., Liu, L., & Zhu, L. (2016). Lateral Load-carrying Capacity Analyses of Composite Shear Walls with Double Steel Plates and Filled Concrete with Binding Bars. *Journal of Central South University*, 23(8), 2083–2091.
- Wang, Y., Tiangui, X., Ziqing, L., Guoqiang, L. & Jiang, J. (2021). Seismic Behavior of Steel Reinforced Concrete Cross-Shaped Columns after Exposure to High Temperatures. *Engineering Structures*, 230, 1-17.

ÖZGEÇMİŞ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU, ilköğrenimini 24 Şubat İlköğretim Okulu'nda orta öğrenimini Cumhuriyet Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini Tefvık Serdar Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Fakülte Birincisi derecesi ile mezun oldu. ÇOLAKOĞLU, aynı yıl Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına kabul edildi. 2014 – 2017 yılları arasında Limak İnşaat bünyesindeki Yusufeli Barajı ve Hes İnşaatı yapım işinde saha ve proje mühendisi olarak çalıştı. 2017 yılında Giresun Üniversitesi'nde öğretim görevlisi kadrosuna atandı. 2019 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda doktora programına kabul edildi. 2020 yılından itibaren Giresun Üniversitesi Keşap Meslek Yüksekokulu Müdür Yardımcılığı ve İnşaat Bölüm Başkanlığı görevlerini yürüten evli ve bir erkek çocuk babası ÇOLAKOĞLU'nun bugüne kadar yapmış olduğu akademik çalışmalara ait yayın listesi aşağıda sunulmaktadır.

Çolakoğlu H.E., (2019). U şekilli betonarme perdelerin farklı yatay yük etkileri altında doğrusal olmayan davranışı. *Teknik Dergi*, Cilt 30, 8887–8912.

Çolakoğlu H.E., (2020). Betonarme kolonların deprem performansında enine donatı aralığı etkisinin sayısal olarak incelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 7, Sayı 12, 1-13.

Öztemel M., Turan M.T., Çolakoğlu H.E. (2022). Mevcut az katlı betonarme bir binada perde kullanımı ve yerleşiminin yapısal davranışa etkisinin incelenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. Sayı 34, 153-159.

Çolakoğlu H.E., Hüsem M., Demir S., Akbulut Y.E., Yılmaz Y. (2024). The behavior of reinforced concrete frames exposed to high temperature under cyclic load effect. *Structures*. Volume 63. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106446>.