İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖVDESİ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK- BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞLERİN YANGIN DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Pınar SUNAR BÜKÜLMEZ

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

MAYIS 2019

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK- BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞLERİN YANGIN DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Pınar SUNAR BÜKÜLMEZ
(502102016)

Mimarlık Anabilim Dalı

Yapı Bilimleri Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

MAYIS 2019

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 502102016 numaralı Doktora Öğrencisi Pınar SUNAR BÜKÜLMEZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "GÖVDESİ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞLERİN YANGIN DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr.Oğuz Cem ÇELİK** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Ercan YÜKSEL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Mustafa ÖZGÜNLER** Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Nuri SERTESER** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Dr. Öğr. Üyesi Selim ÖKTEN** Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : **10 Nisan 2019**
Savunma Tarihi : **06 Mayıs 2019**

Kızım Ayşe Nil'e,

ÖNSÖZ

Büyük açıklıklar geçebilen, mimari ve davranış olarak diğer türden kirişlere göre üstünlükleri olan dairesel gövde boşluklu kirişlerin olumlu yapısal özelliklerine karşın yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinde önemli ölçüde azalmalar olduğu bilinmektedir. Yüksek sıcaklıklara karşı yalıtım malzemeleri ile korumanın, bina maliyetlerinde artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu çalışma, gövde boşluklu ve dolu yalıtımlı/yalıtımsız kirişlerde yapılacak olan deneysel çalışma ile farklı yalıtım durumlarındaki kirişlerin yüksek sıcaklıklardaki performanslarının belirlenmesine ve yangın karşısında alınması gereken pasif güvenlik önlemlerinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Maksimum dairesel gövde boşluk oranlarındaki çelik-betonarme kompozit I-kirişlerin servis yükleri ve yüksek sıcaklıklar altında yangın korumalı ve korumasız durumlarda davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Deneylerde numunelerden elde edilen sıcaklık ve yerdeğiştirme eğrilerine bağlı olarak kirişlerin yalıtımlı/yalıtımsız ve gövdesinin dolu/boşluklu olması durumunda yüksek sıcaklıklar altında gösterecekleri davranışlar karşılaştırılmıştır. Numunelere yerleştirilen ısıl çiftler ve yerdeğiştirme ölçerler bu eğrilerin en doğru şekilde elde edilmesini sağlamıştır. Laboratuvarda fırını izleyecek bir konumda yerleştirilecek kamera ile sıcaklık etkisi ile betonarme döşemede meydana gelecek sorunlar, yangın deney fırını içerisine yerleştirilmiş olan iki termal kamera ise yüksek sıcaklıklarda kirişin göstereceği davranışları zamana bağlı olarak gözlemlemiş ve kayıt etmiştir. Yangın sonrası malzeme deneyleri gerçekleştirilerek deney öncesi ve sonrası karşılaştırma yapılmıştır. Deneyden elde edilen sonuçlar sayısal analiz programı sonuçları ile de karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında yeni tasarlanacak kompozit yapılarda gövdesi boşluklu kirişlerin tasarım, boyutlandırma, üretim aşamalarında yangına karşı alınacak önlemlerin belirlenmesinde ve geliştirilmesinde bu çalışmanın yol gösterici olması en temel hedeflerdendir. Uluslararası düzeyde halen önemli eksiklerden biri olan tam ölçekli yapısal yangın deneylerine katkı sağlanması ve Türkiye'de ise ilk kez yapılan bu çalışma ile yapısal yangın deneylerinin gerçekleştirilmesi ile deney düzeneklerinin oluşturulmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Elde edilen sonuçlar bu konuda çalışacak araştırmacılar için mevcut veritabanına bir ek veri sağlayacaktır.

Bu tez çalışması 315M285 numaralı proje kapsamında TÜBİTAK-1002- Hızlı Destek Programı tarafından desteklenmiştir. Çalışma, ITU-BAP 3802 no'lu proje kapsamında da kısmen desteklenmiştir.

Yangın testleri Efectis Era Avrasya'da gerçekleştirilmiştir. Malzeme testlerinin bir bölümü İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Galpan-Ularte tarafından çelik kirişlerin üretimi ve lojistik destek sağlanmıştır. Kirişlere yalıtım malzemesi tedariği ve uygulaması Sherwin-Williams sponsorluğunda yapılmıştır.

Başta ana destekleyiciler TÜBİTAK-MAG ve İTÜ-BAP olmak üzere, değişik aşamalarda malzeme, lojistik ve işçilik desteği veren Efectis Era Avrasya, Galpan

Ularte, Nuh Beton ve Sherwin-Williams firmalarına, deneylerin yönlendirilmesinde katkıları olan Yük.İnş. Müh.Tolga Aydöner'e, Öğr.Gör. Ahmet Bal'a, Yük.İnş. Müh. Ergün Binbir'e ve İnş. Müh. Hakkı Türer'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın her aşamasında bilgisini, tecrübesini ve değerli zamanını esirgemeyerek bana her fırsatta yardımcı olan değerli hocam Prof.Dr. Oğuz Cem Çelik'e çok teşekkür ederim.

Öğrenciyken başlayan arkadaşlığımızı, dostukla pekiştirdiğimiz, doktora sürecinde birbirimize destek olduğumuz Sinem Kültür'e, çalışma süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan başta sevgili annem olmak üzere aileme, eşime ve moral kaynağım kızıma ayrıca teşekkür etmek isterim.

Nisan 2019

Pınar Sunar Bükülmez
(Yüksek İç Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxvii**
SUMMARY ..... **xxxi**
1. GİRİŞ …….. 1
1.1 Motivasyon 1
1.2 Konu ve Kapsam 2
1.3 Gövdesi Boşluklu Kompozit I-Kirişlerle Oluşturulmuş Yapı Örnekleri 3
1.4 Literatür Araştırması 7
1.5 İçerik 8
2. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞ NUMUNELERİNİN YANGINA DAYANIMI 11
2.1 Gövdesi Boşluklu Çelik I- Kirişlerin Yangın Dayanımı Tasarımı 11
2.1.1 Çeliğin Kritik Sıcaklık Hesaplaması 12
2.1.2 Yüksek Sıcaklıklarda Çeliğin Moment ve Kayma Dayanım 13
2.2 Gövdesi Boşluklu Çelik-Betonarme I- Kirişlerin Yüksek Sıcaklıktaki Davranışları 15
2.2.1 Gövde Burkulması 17
2.2.2 Vierendeel Göçme 19
2.3 Gövdesi Boşluklu Çelik- Betonarme Kompozit I- Kirişlerde Yangın Yalıtım 20
2.4 Gövdesi Boşluklu Çelik- Betonarme Kompozit I- Kirişlerle İlgili Gerçekleştirilen Yangın Deneyleri 26
3. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞ NUMUNELERİNİN YANGINA DAYANIM DENEYLERİ 35
3.1 Çelik Kiriş Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çekme Deneyler 35
3.1.1 Deneyler 37
3.1.2 Deney sonuçları ve gözlemleri 39
3.2 Beton Basınç Deneyleri 41
3.2.1 Deneyler 41
3.2.2 Deney sonuçları ve gözlemleri 44
3.3 Deney Numunelerinin Tasarım ve Üretimi 45
3.4 Yangın deneyi düzeneği ve numunelerin düzeneğe yerleşimi 53
3.5 Yükleme 59
3.6 Yangın Eğrisi 59
3.7 Yalıtım 60

3.8 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Aletleri 62
3.8.1 Isıl çift sıcaklık ölçerler (Thermocouples) 63
3.8.2 Tek eksenli şekildeğiştirme ölçerler (Strain Gauges) 65
3.8.3 Yerdeğiştirme ölçerler (LDTs) 67
3.3.8.4 Veri toplama cihazı (Data Logger) 67
4. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT DAİRESEL BOŞLUKLU I-KİRİŞLERİN YANGINA DAYANIKLILIK DENEYLERİNDEN GÖZLEMLER 69
4.1 GBK-YS Numunesi 69
4.1.1 Sıcaklık eğrileri 75
4.1.2 Yerdeğiştirme eğrileri 77
4.2 DK-R numunesi 80
4.2.1 Sıcaklık eğrileri 85
4.2.2 Yerdeğiştirme eğrileri 86
4.3 GBK-YP numunesi 88
4.3.1 Sıcaklık eğrileri 93
4.3.2 Yerdeğiştirme eğrileri 94
4.4 GBK-YN numunesi 97
4.4.1 Sıcaklık eğrileri 102
4.4.2 Yerdeğiştirme eğrileri 103
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI 107
5.1 Yangın Deneyi Sonrası Malzeme Özellikleri 107
5.2 Kiriş Davranış Eğrilerinin Karşılaştırılması 112
5.2.1 Yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin karşılaştırılması 112
5.2.2 Gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin karşılaştırılması 114
5.2.3 Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin karşılaştırılması 117
5.2.4 Tüm numunelerin karşılaştırılması 119
6. DENEY NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ 125
6.1 DK-R numunesinin kritik sıcaklığının ve sıcaklık değişimlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması 126
6.2 GBK-YS numunesinin kritik sıcaklığının ve sıcaklık değişimlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması 130
6.3 GBK-YP numunesinin sıcaklık değişimlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması 131
6.4 GBK-YN numunesinin sıcaklık değişimlerinin hesaplanması ve karşılaştırılması 134
7. SONUÇLAR 137
7.1 Sonuçlar 137
7.2 İleride Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler 141
KAYNAKLAR 142
EKLER 148
ÖZGEÇMİŞ 173

KISALTMALAR

WTC : World Trade Center
EN : European Norm
TS : Türk Standartları
BYKHY : Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik
ISO : International Organization for Standardization
BS : British Standard
İTÜ : İstanbul Teknik Üniversitesi
Hz : Hertz
Maks : Maksimum
MPa : Megapascal
kW : Kilowatt
ASFP : Association for Specialist Fire Protection
FIÇ : Fırın içi ısıl çiftl
kW : Kilowatt
GBK-YS : Gövdesi boşluklu yalıtımsız numune
DK-R : Dolu gövdeli referans numunesi
GBK-YP : Gövdesi boşluklu solvent esaslı yalıtımlı numune
GBK-YN : Gövdesi boşluklu su esaslı yalıtımlı numune

SEMBOLLER

A : Yangına maruz kalan yüzey alanı

ca : Çeliğin özısısı

h : Numunenin yüksekliği

h_f : Galvanizli kompozit döşeme sacının yüksekliği

$h_{net,c}$:Konveksiyon yolu ile ısı yayılımı

$h_{net,d}$: Birim alandaki net ısı akısı

$h_{net,r}$: Radyasyon yolu ile ısı yayılımı

Hp : Yangın etkisinde kalan yüzey uzunluğu

k_{sh} : Gölge faktörü

K_u : Malzemenin toplam uzama miktarı

$k_{y,\theta web}$: θ_{web}'e bağlı olarak akma mukavemeti için belirlenmiş azaltma faktörünü

L : Kirişin geçtiği açıklık

l_e : Yüksek sıcaklıklarda gövde boşlukları arasında kalan etkin uzunluk

L_i : Numunenin ilk boyu

L_s : Deney sonunda kopan parçaları bir araya getirilerek bulunan son boy

$M_{fi,t,Ed}$: Yangın sırasındaki eğilme moment değeri

$M_{fi,t,Rd}$: Yangın sırasında eğilme momentinin tasarım değeri

M_R : Moment dayanımı

M_{Rd} : Normal sıcaklıklar altında çelik kiriş için belirlenmiş olan tasarım moment dayanımını

$M_{Rd,fi}$: Üst ve alt T elemanlarında oluşan yerel eğilme dayanımını

$M_{vc,fi}$: Üst eleman kesiti ile betonarme döşeme arasında zincir eğrisi etkisi sonucu oluşan eğilme dayanımı

n : Boşluk sayısı

$N_{Ed,fi}$: Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen momente bağlı olarak oluşan eksenel basınç ya da çekme kuvveti

$N_{fi,t,Ed}$: Yangın sırasındaki eksenel kuvvet değeri

$N_{fi,t,Rd}$: Yangın sırasındaki eksenel kuvvetin tasarım değeri

$N_{Rd,fi}$: Üst ve alt T elemanların eksenel dayanımı

ϕ : Geometrik konfigürasyon faktörü

P : Yapıya etkiyen toplam yük

P_a : En yüksek akma değeri

P_K : Kopmaya denk gelen en yüksek yük miktarı

$P_{maks.}$: En yüksek yük değeri

R : Kirişin dönme kapasitesi

R_e : Akma dayanımı

$R_{fi, d, t}$: Yangın sırasında etki eden iç kuvvetler

R_m : Çekme dayanımı

S : Dairesel boşlukların merkezleri arasındaki uzunluk

S_0 : Minimum gövde genişliği

t : Sınıf 1 için gövde kalınlığını, Sınıf 2 ve Sınıf 3 için de başlık kalınlığı

tb : Kirişlerin başlık kalınlığı

$t_{fi, d}$: Yangın dayanımı için belirlenen tasarım zaman değeri

$t_{fi, req.}$: Yangın dayanımı için gerekli olan zaman değeri

t_w : Kirişin gövde kalınlığı

V : Hacim

V_{ED} : Gövde boşlukları arasındaki mesafenin orta noktasından mesnet noktasına kadar etki eden kesme kuvveti

V_{Rd} : Normal sıcaklıklar altındaki tasarım kesme/kayma dayanım değeri

V_t : Gövde boşlukları arasındaki uzunluk boyunca etki eden düşey basınç kuvveti

w : Dairesel boşluklar arasında tanımlanan dolu uzunluk

$\gamma_{M, fi}$: Yangın tasarımı için belirlenmiş olan kısmi güvenlik faktör katsayısı

γ_{M0} : Çeliğin enkesit sınıflandırılmasına bakılmaksızın belirlenmiş olan kısmi güvenlik faktör değeri

$\delta_{göçme}$: Göçme anındaki yerdeğiştirme

δ_{maks} : Maksimum yerdeğiştirme

$\theta_{a, cr}$: Kritik sıcaklık

$\theta_{a, t}$: Zaman aralığında (t) çeliğin sıcaklığı

$\theta_{cr, d}$: Yükleme altındaki kirişin kritik sıcaklığı

θ_d : Kirişin tasarım sıcaklık değeri

$\theta_{g, t}$: Fırının (t) zaman aralığında gaz sıcaklığı

θ_{web} : Kesit gövdesindeki ortalama sıcaklık değeri

λ_p : Yalıtım malzemesinin ısı iletkenliği

$\lambda_{p,t}$: Yalıtım malzemesinin t zaman aralığındaki ısı iletkenliği

ρ_a : Çeliğin özkütlesi

ρ_p : Yalıtım malzemesinin birim ağırlığını

$\sigma_Ç$: Çekme dayanımı

σ_K : Kopma gerilmesi

χ_{fi} : Yangın tasarımı durumunda burkulma davranışı için azaltma faktörü

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Çelik sıcaklığı ile azaltma faktörü ilişkisi. **13**
Çizelge 2.2 : Çeliğin enkesit sınıflandırılması. **14**
Çizelge 2.3 : Yalıtımlı ve yalıtımsız kirişlerin kesit faktörlerinin hesaplanması. **21**
Çizelge 3.1 : Çekme deneylerinde kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri. **36**
Çizelge 3.2 : A-B-C-D kupon numunelerin çekme deney sonuçları **41**
Çizelge 3.3 : TS EN 10025-1 standardı gereği S 275JR çelik kalitesi için belirtilen mekanik özellikleri. **41**
Çizelge 3.4 : C25 Beton karışımı **44**
Çizelge 3.5 : Beton numunelerin 7 ve 28 günlük karakteristik basınç dayanımları **45**
Çizelge 3.6 : Deney numunelerinin metraj listesi **48**
Çizelge 3.7 : Deney numunelerinin tasarım oranları (design ratio) **51**
Çizelge 3.8: Deney programı ve programda yer alan kompozit kiriş-döşeme sisteminin özellikleri. **55**
Çizelge 3.9 : Trapez sac levhaların yangından koruma yöntemleri.Hata! Yer işareti tanımlanmamış. **62**
Çizelge 3.10 : Isıl çift ölçerlerin özellikleri. **63**
Çizelge 3.11: Şekildeğiştirme ölçerlerin özellikleri. **65**
Çizelge 5.1 : Deney sonrası çekme numunelerinin mekanik özellikleri. **107**
Çizelge 5.2 : Deney öncesi ve sonrası numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. **109**
Çizelge 5.3 : Beton basınç dayanım deneyi sonuçları. **110**
Çizelge 5.4 : Deney öncesi ve sonrası numunelerin beton basınç dayanım deney sonuçları. **111**
Çizelge 6.1 : DK-R numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması. **129**
Çizelge 6.2 : GBK-YS numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması. **130**
Çizelge 6.3 : Sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayıları. **132**
Çizelge 6.4 : GBK-YP numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması. **133**
Çizelge 6.5 : GBK-YN numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi. **134**
Çizelge A.1 : Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti **150**
Çizelge A.1 (devam) : Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti **151**
Çizelge A.1 (devam) : Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti **152**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çelik kirişte dairesel boşluk oluşturmanın adımları: (a) Dairesel boşluklar için kiriş kesimi, (b) Dairesel parçaların kaydırılıp üst üste kaynaklanması. **3**
Şekil 1.2 : Gövdesi dairesel boşluklu I-kirişler: (a) İTÜ Mimarlık Fakültesi Taşkışla'da çatı katında yer alan gövdesi dairesel boşluklu I-kirişler, Londra'da çok katlı bir yapıda kullanılan gövdesi dairesel boşluklu kirişler. **4**
Şekil 1.3 : Dairesel gövde boşluklu çelik-betonarme asimetrik kiriş: (a) Asimetrik kirişin enkesiti, (b) Asimetrik kirişin görünümü. **5**
Şekil 1.4 : Gövdesi boşluklu kirişlerin otoparklarda kullanımı. **6**
Şekil 1.5 : Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerin değişik boyutlarda ve biçimlerde kullanımı **6**
Şekil 1.6 : B2net Stadyumu, Chesterfield, İngiltere. **7**
Şekil 2.1 : Çeliğin yüksek sıcaklıklar altında gösterdiği davranışlar: (a) Yüksek sıcaklıklarda çeliğin gerilme- şekildeğiştirme eğrisi, (b) Enkesit boyunca düzgün olmayan sıcaklık dağılımı. **12**
Şekil 2.2 : Gövdesi boşluklu kirişlerde eğilme. **16**
Şekil 2.3 : Göçme modları: (a) Gövdenin kaynak noktalarında, (b) Boşluk üstü ve altı T kesit elemanlarında yırtılmalar. **16**
Şekil 2.4 : Gövde burkulması deney ve sayısal analiz sonuçları: (a) Deney sırasında oluşan gövde burkulmalarının görünümü, (b) Gövde burkulmalarının sonlu analiz programı ile modellenmesi. **18**
Şekil 2.5 : Gövde boşlukları arasına etkiyen basınç ve kesme kuvvetleri: (a) Kiriş kesitine etkiyen basınç ve kesme kuvvetleri, (b) Yüksek sıcaklıklarda gövde boşlukları arasında kalan etkin uzunluğun (le) hesaplanması. **18**
Şekil 2.6 : Gövdesi boşluklu kirişlerde yüksek sıcaklıklarda: Vierendeel etkisi:(a) Gövde boşluğu etrafında plastik mafsal oluşumu, (b) Gövde boşlukları ve etrafına etkiyen moment ve kesme kuvvetleri. **19**
Şekil 2.7 : Farklı kesit oranlarına sahip elemanların yangın dayanımları. **20**
Şekil 2.8 : Gölge etki faktörü: (a) I profile etkiyen gölge etkisi, (b) Kutu profillerde gölge etki faktörünün etkisi bulunmamaktadır. **22**
Şekil 2.9 : ISO 834 yangın eğrisi altındaki yalıtımlı elemanlarda sıcaklığın zamana bağlı değişimi. **24**
Şekil 2.10 : Kabaran (şişen) boya (intumescent coatings) sıcaklık karşısındaki davranışları. **25**
Şekil 2.11 : Deney sonunda kirişte oluşan deformasyonlar: (a) Kirişte deney sonunda meydana gelen eğilme ve gövde burkulma göçme modlar, (b) Boşluklar arası gövde burkulmalarının görünümü. **27**

Şekil 2.12 : Wald ve Kallerova (2010) deney veri ve sonuçları: (a) Plan düzleminde döşemede LVDT'lerin konumları, (b) Boşluklu kirişlerin üzerinde yer alan kompozit döşemede meydana gelen yerdeğiştirmeler. **29**
Şekil 2.13 : Najdai ve diğ. (2011) deney sonuçları: (a) Kiriş ve döşemelerde ölçülen yerdeğiştirmeler, (b) 4. Kirişte göçme durumu **30**
Şekil 2.14 : Sanghoon ve diğ. (2012) deney sonuçları: (a) Eğilme, (b)Gövde burkulması, (c)Vierendeel göçme biçimi, (d) Gövde burkulması, (e)gövde burkulması, (f)Vierendeel göçme biçimi. **31**
Şekil 2.15 : Bihina ve diğ. (2012) deney sonuçları: (a) Deneyden elde edilen sıcaklık ve yerdeğiştirme eğrileri, (b) Yalıtımsız kirişlerin göçme modları. **32**
Şekil 2.16 : Deney sonrası kompozit kirişlerde meydana gelen göçme durumları: (a) Gövde burkulması, (b) Üst T kesit elemanında yırtılmalar, (c) Vierendeel eğilme, (d) Alt T kesit elemanında yırtılmalar. **33**
Şekil 3.1 : İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan 20 tonluk çekme cihazı: (a) Cihazın görünümü, (b) Çekme deneyi için cihaza numunenin yerleştirilmesi. **35**
Şekil 3.2 : TS EN ISO 6892-1'e göre kupon numune boyutları. **36**
Şekil 3.3 : Kupon numuneleri. **36**
Şekil 3.4 : IPE 140 çelik profil için çekme numunelerinin üzerine şekildeğiştirme ölçerlerin (strain gauge) yerleştirilmesi. **37**
Şekil 3.5 : Çekme deneyi sonunda son boy (Ls) hesaplaması. **38**
Şekil 3.6: A1-A2-A3 numunelerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri: (a) A1 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, (b) A2 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. **39**
Şekil 3.6 (devam): A1-A2-A3 numunelerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri: (a) A1 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, (c) A3 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi. **40**
Şekil 3.7 : Çökme (slump) deneyi: (a) Beton karıştırımının yapılması, (b) Taze beton karışımının sıcaklığının ölçülmesi, (c) Çökme hunisi üç eşit kademede doldurulması, (d) Şişleme çubuğu çökme hunisi üzerine konarak çöken betonun üst seviyesinden çubuğun altına kadar olan taze beton çökme değeri olan uzunluğunun ölçülmesi. **42**
Şekil 3.8 : Beton numunelerinin hazırlık aşamaları: (a) Beton numuneleri küpşeklindeki kalıplara yerleştirilmesi, (b) Betonun 2. Kademesinin dökülmesi (c) Beton kalıpların titreşim masasına yerleştirilmesi. **43**
Şekil 3.9 : Beton numune: (a)Beton numunelerin etiketlenmesi, (b)Kür havuzuna yerleştirilmesi. **43**
Şekil 3.10 : Beton numunelerin basınç deneyleri. **45**
Şekil 3.11: Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerin kesim yöntemi ve kesit parametreleri: (a) Gövde boşluklarının oluşturulması, (b) Üst başlık vegövde kalınlığı, (c) Gövde boşluklu kirişin kaynak öncesi yüksekliği, (d) Gövde boşluklu kirişin kaynak sonrası yüksekliği. **46**
Şekil 3.12 : Kiriş yüksekliğinin açıklığa göre değişimi. **46**
Şekil 3.13 : Gövdesi boşluklu kirişlerin tasarımında dairesel boşlukların yerleşimi, sayısı ve birbirleri arasındaki uzunluk. **47**
Şekil 3.14 : Gövdesi boşluklu numunelerin üretim çizimleri: (a) Gövdesi boşluklu numunenin boşluk detayları, (b) Gövdesi boşluklu numunenin ön görünüşü, A-A ve B-B kesiti. **49**

Şekil 3.15 : Dolu gövdeli numunenin üretim çizimleri: (a) Dolu gövdeli numunenin kaynak öncesi ön görünüşü ve A-A kesiti, (b) Dolu gövdeli numuneninkaynak sonrası ön görünüşü. **50**
Şekil 3.16 : Beton dökümü ve mastarlama işlemleri: (a) Beton karışımının hazırlanan döşeme kalıplarına dökülmesi, (b) Kalıplara dökülen betonun eşit bir şekilde yüzeye dağıtılması, (c) Mastarlama ve mala perdahı işlemleri, (d) Beton dökümü sonrası numunelerin görünümü. **52**
Şekil 3.17 : Deney fırının dıştan ve içten görünümleri: (a) Deney fırının yandan görünümü, (b) Deney fırının önden görünümü, (c) Deney fırının içgörünümü, (d) Fırın içerisindeki 7 adet brülörlerün görünümleri. **53**
Şekil 3.18 : Deney numunelerinin fırına yerleşimi: (a) Plan, (b) A-A kesiti. **54**
Şekil 3.19 : Kirişin maksimum yerdeğiştirme sınırının modellemesi. **56**
Şekil 3.20 : Deney numunelerinin HEB 200'lük profile ve fırına mesnetleme detayları: (a) A-A kesiti, (b) B-B Kesiti, (c) C-C Kesiti. **56**
Şekil 3.20 (devam) : Deney numunelerinin HEB 200'lük profile ve fırına mesnetleme detayları: (c) C-C Kesiti. **57**
Şekil 3.21 : GBK-YS numunesinin deney öncesi fotoğrafı. **57**
Şekil 3.22 : DK-R numunesinin deney öncesi fotoğrafı. **58**
Şekil 3.23 : GBK-YP numunesinin deney öncesi fotoğrafı. **58**
Şekil 3.24 : GBK-YN numunesinin deney öncesi fotoğrafı. **58**
Şekil 3.25 : Kiriş-döşeme sistemi üzerinde düşey yüklerin dağılımı. **59**
Şekil 3.26 : ISO 834 standart yangın eğrisi. **60**
Şekil 3.27 : Kabaran (şişen) boya uygulama aşamaları: (a) Kiriş gövdelerine astar boya uygulanması, (b) Kabaran (şişen) boya uygulanması. **61**
Şekil 3.28 : Isılçiftlerin deney numuneleri üzerinde yerleşimi: (a) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde mesnete yakın bölgedeki ısıl çiftlerin yerleşimi, (b) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde kiriş orta noktasında ısıl çiftlerin yerleşimi. **63**
Şekil 3.28 (devam): Isılçiftlerin deney numuneleri üzerinde yerleşimi: (c) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde mesnete yakın bölgeye yerleştirilen ısıl çiftlerin görünümü, (d) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde kiriş orta noktasına yerleştirilen ısıl çiftlerin görünümü, (e) Dolu gövdeli kirişte mesnete yakın bölgedeki ısıl çiftlerin yerleşimi, (f) Dolu gövdeli kirişte kiriş orta noktasında ısıl çiftlerin yerleşimi. **64**
Şekil 3.29 : Isıl çiftlerin kirişe yerleştirilmesi. **64**
Şekil 3.30 : Donatı ve başlıklı saplama elemanlarına şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması: (a) Donatı yüzeyinin temizlenmesi, (b) Donatılara şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması, (c) Kiriş açıklığının ortasına denk gelen bölgede donatı üzerine şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması, (d) Başlıklı saplama elemanlarına şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması. **66**
Şekil 3.31 : Beton dökümü öncesi şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiş numuneler: (a) GBK-YS numunesine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler, (b) GBK-YP numunesine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler. **66**
Şekil 3.32 : Deneylerde kullanılan yerdeğiştirme ölçerler: (a) Yerdeğiştirme ölçerlerin görünümü, (b) Lineer cetvellerin magnetic okuyucu sensor bölümleri. **67**

Şekil 3.33 : Veri toplama ve değerlendirme merkezi: (a) Veri toplayıcı, (b) Kontrol merkezi. **67**
Şekil 3.34 : Yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki yerleşimleri: (a) Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi (ön görünüş), (b) Şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşimi (plan). **68**
Şekil 4.1 : GBK-YS numunesinin için yerdeğiştirmenin-zamana bağlı değişim. **70**
Şekil 4.2 : Fırın içerisindeki basıncın zamana bağlı değişimi. **70**
Şekil 4.3 : GBK-YS numunesi deney sonuçları: (a) Deney sonrası kirişin genel görünümü, (b) Deney sonrası LC 1, 2 ve 3'ün konumlandığı bölgeden görünümü, deformasyonlar, gövde burkulması ve Viereendel göçme. **71**
Şekil 4.3 (devam) : GBK-YS numunesi deney sonuçları: (c) LC4 bölgesinin görünümü, (d) Lineer cetvel 6 ve 7 bölgesinin görünümü, (e), (f) LC6 ve 7'de meydana gelen deformasyonlar, gövde burkulması ve Viereendel göçme. **72**
Şekil 4.4 : GBK-YS numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlakharitası (plan), (b) A ve B çatlaklarının görünümü (plan), (c) C çatlağının görünümü (plan), (d) E çatlağının görünümü (kesit), (e) C çatlağı (plak kalınlığı boyunca). **74**
Şekil 4.5 : Fırın içerisindeki brülörlerin konumu. **75**
Şekil 4.6 : GBK-YS numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi. **75**
Şekil 4.7 : GBK-YS numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi. **76**
Şekil 4.8 : GBK-YS numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi. **77**
Şekil 4.9 : GBK-YS numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi. **78**
Şekil 4.10 : GBK-YS numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-1 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi. **79**
Şekil 4.11 : DK-R numunesinin deney sonuçları: (a) Deney esnasında numunede meydana gelen göçme. **80**
Şekil 4.11 (devam): DK-R numunesinin deney sonuçları: (b) fırın içerisine düşen numunenin görünümü, (c) deney sonrası numunenin görünümü, (d) yanal burulmalı burkulma göçme modu, (e) deney sonrası kirişin mesnet bölgesinin görünümü. **81**
Şekil 4.11 (devam) : DK-R numunesinin deney sonuçları: (b) fırın içerisine düşen numunenin görünümü, (e) deney sonrası kirişin mesnet bölgesinin görünümü. **82**
Şekil 4.12 : DK-R numunesinde deney sonrası görünümü: (a) Deney sonrası bulon deliklerinin görünümü, (b) LC5 bölgesinde sac ile beton arasındaki ayrılmalar, (c) Deney sonrası saplamaların görünümü. **83**
Şekil 4.13 : DK-R numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlak haritası (plan), (b) Kesme çatlakları A', B', C', D' görünümü, (c) G' çatlağının görünümü, (d) A çatlağının görünümü, (e) Kesme çatlakları H', I', J'görünümü. **84**
Şekil 4.14 : DK-R numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi. **85**
Şekil 4.15 : DK-R numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi. **86**
Şekil 4.16 : DK-R numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi. **87**
Şekil 4.17 : DK-R numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi. **87**
Şekil 4.18 : GBK-YS numunesinin sonuçları: (a) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinde alt başlıkda oluşan dalgalanmalar. **88**

Şekil 4.18 (devam) : GBK-YS numunesinin sonuçları: (b) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde alt başlıkda oluşan dalgalanmalar, (c) Deney sonrası kiriş açıklığının orta bölgesinin görünümü, (d) Daireden elips forma dönen daire çapları; 13cm ve 15cm. **89**
Şekil 4.18 (devam): GBK-YS numunesinin sonuçları: (e) Deney sonrası alt başlıkta meydana gelen dalgalanmalar, (f) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesi mesnet birleşimi; bulon ve bulon deliklerinin görünümü, (g) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde bölgesi mesnet birleşimi; bulon ve bulon deliklerinin görünümü, (h) ve (ı) Deney sonrası mesnet noktalarında çelik trapez sac ve döşeme ayrılması. **90**
Şekil 4.19 : GBK-YP numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a)Beton çatlak haritası (plan), (b) Ave B çatlaklarının görünümü (plan), (c) C çatlağının görünümü (plan), (d) D çatlağının görünümü (plan), (e) E çatlağının görünümü (kesit)..... **92**
Şekil 4.20 : GBK-YP numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi..... **93**
Şekil 4.21 : GBK-YP numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi. **94**
Şekil 4.22 : GBK-YP numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi. **95**
Şekil 4.23 : GBK-YP numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi. **95**
Şekil 4.24 : GBK-YP numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-LC1 göreli yerdeğiştirme-zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-LC6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi. **96**
Şekil 4.25 : GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (a) Deney sonrası GBK-YN numunesinin görünümü, (b) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinde 1., 2.ve 3. daire boşluklarında meydana gelen deformasyonlar. **97**
Şekil 4.25 (devam): GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (c) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde 21., 22. ve 23. daire boşluklarında meydana gelen deformasyonlar, (d) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinin görünümü. **98**
Şekil 4.25 (devam): GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (e)-(f) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde daireden elipse forma dönen daire çapları; 13cm ve 15cm, (g) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde bölgesi. **99**
Şekil 4.26 : GBK-YN numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlak haritası (plan), (b) A ve C çatlaklarının görünümü, (c) B, C, D, E çatlaklarının görünümü, (d) F çatlağının görünümü..... **101**
Şekil 4.27 : GBK-YN numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi. **102**
Şekil 4.28 : GBK-YN numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi..... **103**
Şekil 4.29 : GBK-YN numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi. **104**
Şekil 4.30 : GBK-YN numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi. **104**
Şekil 4.31 : GBK-YN numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-LC1 göreli yerdeğiştirme-zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-LC6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi. **105**
Şekil 5.1 : Yangın deneyleri sonrası çekme deneyleri: (a) Gövdesi boşluklu kirişten kupon numune alımı, (b) Dolu gövdeli kirişten kupon numune alımı, (c) Çekme presi, (d) Çekme numunelerinin son boylarının hesaplaması. **108**

Şekil 5.2 : Yangın deneyleri sonrası beton basınç deneyleri: (a) Döşeme üzerinde karot numune alınacak alanların belirlenmesi, (b) GBK-YS numune döşemesinden alınan karot numune, (c) Döşemeden karot numune alınan alanlar, (d) Basınç dayanım deneyi. **110**
Şekil 5.3 : Yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi. **112**
Şekil 5.4 : Yalıtımlı-yalıtımsız numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Mesnet bölgesi yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (b) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrileri. **113**
Şekil 5.4 (devam): Yalıtımlı-yalıtımsız numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (b) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrileri. **114**
Şekil 5.5 : Gövdesi boşluklu ve boşluksuz yalıtımsız numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi. **115**
Şekil 5.6 : Yalıtımsız gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Mesnet bölgesi gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (b) Gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrileri. **116**
Şekil 5.7 : Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi. **117**
Şekil 5.8 : Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması:(a) Su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin mesnet bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (b) Su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi. **118**
Şekil 5.8 (devam): Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrisi. **119**
Şekil 5.9 : Tüm numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi. **121**
Şekil 5.10 : Tüm numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Tüm numunelerin mesnet bölgesinde ölçülen üst başlık, alt başlık ve gövde sıcaklıklarının zamana bağlı değişim eğrileri, (b) Tüm numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrileri, (c) Tüm numunelerin kiriş ortası (LC4) yerdeğiştirme-zaman eğrileri, (d) Tüm numunelerin (LC2-LC1)/s0 göreli yerdeğiştirme oranının zamana bağlı değişim eğrileri. **122**
Şekil 5.10 (devam) : Tüm numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (c) Tüm numunelerin kiriş ortası (LC4) yerdeğiştirme-zaman eğrileri, (d) Tüm numunelerin (LC2-LC1)/s0 göreli yerdeğiştirme oranının zamana bağlı değişim eğrileri. **123**

Şekil 5.11 : Kirişlerin zamana ve sıcaklığa bağlı yerdeğiştirme ve sıcaklık verileri: (a) Kirişlerin belirli zaman ve sıcaklık aralıklarındaki yerdeğiştirme durumları, (b) Kirişlerin belirli zamana aralıklarındaki sıcaklık dağılımları. **124**
Şekil 6.1 : Elefir-EN programının algoritması. **126**
Şekil 6.2 : Elefir-EN sayısal analiz programı çıktıları: (a) Profilin sıcaklık verilerinin çıktı görünümü, (b) Profil ve ortam sıcaklık verilerinin grafik olarak çıktı görünümleri. **128**
Şekil 6.3 : DK-R numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi. **129**
Şekil 6.4 : GBK-YS numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi. **131**
Şekil 6.5 : Farklı 10 test numunesinin ısıl iletkenlikleri ve ortalama değer eğrileri **132**
Şekil 6.6 : GBK-YP numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi. **133**
Şekil 6.7 : GBK-YN numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi. **135**
Şekil B.1 : B, C, D numunelerinin çekme deneyi sonuç grafikleri. **155**
Şekil D.1 : Fırın içerisindeki basıncın zamana bağlı değişimi: (a) DK-R numunesi için basınç-zaman eğrisi, (b) GBK-YP numunesi için basınç-zaman eğrisi, (c) GBK-YN numunesi için basınç-zaman eğrisi. **165**
Şekil E.1 : Numunelerin döşemesinin yangın sonrası durumlarının 3D boyutlu modelleri: (a) GBK-YS numunesinin döşeme modellemesi, (b) GBK-YP numunesi döşeme modellemesi, (c) GBK-YN numunesi döşeme modellemesi. **166**
Şekil F.1: GBK-YS numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 15. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 24.5. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 27.5 dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü. **167**
Şekil F.2 : DK-R numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b)Deneyin 15. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 25. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 35. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 40. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 40.3. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü..... **168**
Şekil F.3 : GBK-YP numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 40. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 50. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 60.2. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 61.8. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü. **169**

Şekil F.4 : GBK-YN numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b) Deneyin 10. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 30. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 41. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 41.8. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü. **170**

Şekil G.1 : GBK-YS numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 15. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 24.5. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 27.5 dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü. **171**

Şekil G.2 : DK-R numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 15. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 25. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 35. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 40. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 40.3. dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü. **172**

Şekil G.3 : GBK-YP numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 40. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 50. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 60.2. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 61.8. dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü. **173**

Şekil G.4 : GBK-YN numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 30. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 41. Dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 41.8. dakikasında kamera (deney sonu) görüntüsü. **174**

GÖVDESİ DAİRESEL BOŞLUKLU ÇELİK- BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞLERİN YANGIN DAVRANIŞLARININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ

ÖZET

Çok katlı çelik iskeletli yapılarda gövde boşluklu kompozit kirişler, kesit geometrisinin değişkenliğinden sağlanan esneklik (daire çapları, daire boşlukları arasındaki uzaklık, son yükseklik) ve ekonomik üstünlükleri nedeni ile sıkça kullanılmaktadır. Çelik kirişlerin üzerine yerleştirilen profillendirilmiş çelik sacın içine beton dökülmekte, döşeme ve kiriş sisteminin kompozitliği başlıklı kayma bağlantılarının kirişin üst başlığına kaynaklanması ile sağlanmaktadır. Düşey yük etkisi altındaki döşemede çeliğin çekme kuvveti ve betonun basınç kuvveti ile kompozit kiriş daha büyük rijitliğe sahip olduğu gibi daha büyük yükleri de taşıyabilmektedir. Büyük açıklıklar geçebilen mimari ve davranış olarak diğer boşluklu kirişlere göre daha avantajlı olan dairesel gövde boşluklu kirişlerin üstün yapısal özelliklerine karşın yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinde önemli ölçüde azalmalar olduğu bilinmektedir. Bu tür kirişlerin yangın karşısında davranışlarının tam olarak bilinmemesi, alınacak pasif ve aktif önlemlerin bazen gereğinden fazla bazen de yetersiz olmasına yol açmaktadır. 2001'de Amerika'da meydana gelen WTC ikiz kulelerdeki göçmeler sonrasında çelik yapıların yüksek sıcaklıklar karşısındaki yapısal davranışlarının incelenmesi daha da önem kazanmış, bu kapsamda özellikle Amerika ve Avrupa'da yapılan deneyler artmıştır.

Çelik-betonarme kompozit döşeme-kiriş sistemlerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Çalışmalar farklı ölçeklerde olmalarının yanısıra, döşeme kirişlerinin dolu ve boşluklu olarak seçilmesine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Konu ile ilgili olarak geçmişten günümüze kadar yürütülmüş olan deneyler incelendiğinde gövdesi boşluklu kirişler üzerine yapılan yangın korumalı ve korumasız çalışmaların azlığı özellikle dikkat çekmektedir. Tezin amacı, maksimum gövde boşluk oranlarına ve düzenlemelerine sahip yalıtımlı ve yalıtımsız kirişlerin yüksek sıcaklıklar altındaki davranışlarını deneysel olarak incelemektir. Yeni tasarlanacak kompozit yapılarda gövdesi boşluklu kirişlerin tasarım, boyutlandırma, üretim aşamalarında yangına karşı alınacak önlemlerin belirlenmesinde ve geliştirilmesinde bu çalışmanın yol gösterici olması beklenmektedir.

Deneyler için 1 adet dolu gövdeli referans numunesi (DK-R), 1 adet yalıtımsız boşluklu gövdeli (GBK-YS) ve 2 adet yalıtım malzemelerinin kullanılacağı boşluklu gövdeli kompozit kirişler (GBK-YP, GBK-YN) olmak üzere toplam 4 adet kompozit IPE 140 S275 JR çelik kalitesinde kiriş tasarlanmıştır. Deneyler esnasında göçme durumlarının daha iyi izlenebilmesi için gövde boşluk oranı maksimuma yakın (H/D_0 = 0.7) ve boşluklar arası mesafe ise IPE 140 (w_{min} = 50 mm) minimum seçilmiştir.

Kirişlerin üzerinde 38/151 tipinde, hadve sayısı n= 6, kalınlığı t=0.7 mm galvanizli kompozit döşeme sacı ve hf= 7.8 cm kalınlığında, beff= 1m genişliğinde, C25 kalitesinde beton ve Q188/188 hasır çelik donatı kullanılarak oluşturulan kompozit döşeme sistemi kullanılmıştır.

Numuneler akredite yangın deney laboratuvarı olan EFFECTIS ERA' da TS EN 1365-3 (Yangına dayanıklılık deneyleri- Yük taşıyıcı elemanlar- Bölüm 3: Kirişler) standardına bağlı olarak deneysel olarak incelenmiştir. Gövdesi boşluklu ve dolu referans numunesi olan çelik kirişlerin üretiminin yapıldığı çelik malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme deney numunesi öngörülen standarda (TS EN ISO 6892-1) göre hazırlanmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplar tekrar revize edilmiş ve numuneler üretilmiştir.

Yangın deneyleri için üretilen kirişlerde sıcaklık, şekil ve yerdeğiştirme eğrilerinin elde edilmesi hedeflenmiştir. Böylece gövdesi boşluklu kompozit döşemeli yalıtımlı ve yalıtımsız I-kirişlerin yüksek sıcaklıklar altındaki davranışları karşılaştırılmıştır. Deneyler sonunda gövdesi boşluklu yangın yalıtımlı kiriş numunelerinde göçme modları gövde burkulması ve Vierendeel göçme biçimi /mekanizması olarak belirlenmiştir. Korumasız boşluklu kirişlerde elde edilen büyük yerdeğiştirmelere bağlı olarak gövdede S şeklinde gövde burkulmaları izlenmiştir. Sıcaklık ve yerdeğiştirme zaman grafikleri incelendiğinde yangın korumasız kirişlerde (GBK-YS ve DK-R), korumalı kirişlere göre kritik sıcaklık değerlerinin ve yerdeğiştirmelerin daha yüksek olduğu ve bu değerlere daha hızlı ulaşıldığı görülmektedir. Korumasız kirişlerde (GBK-YS ve DK-R) korumalı kirişlere (GBK-YP ve GBK-YN) göre daha büyük göreli ve toplam yerdeğiştirmeler/deformasyonlar elde edildiği tespit edilmiştir. Yangın yalıtımlı (60 dk.) kirişlerde trapez sac boşluklarının yalıtılmaması, kirişin moment kapasitesine etkisi düşük olduğu için, göçmeye ya da kirişte üst başlıkta herhangi bir aşırı deformasyona neden olmamıştır.

Numunelerin betonarme döşemesindeki çatlak haritaları incelendiğinde, bütün döşemelerde iki türden (boyuna ve enine) çatlak belirlenmiştir. Kiriş eksenine dik çatlakların mesnete yakın bölgelerde kesme kuvvetinin yüksek olmasına bağlı olarak Vierendeel etkisi ile birlikte gövdede yerel burkulmaların artmasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin deney sonrası mekanik özelliklerinde meydana gelen olası değişimleri belirleyebilmek amacıyla çelik profillerden alınan kupon numunelere çekme deneyi yapılmıştır. Çelik kirişler için TS EN ISO 6892-1 (Metalik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu) standardına göre çekme numunesi boyutları belirlenerek, üretimleri yapılmıştır. Malzeme çekme deneyleri (kupon testler) ABM Mühendislik Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 60ton kapasiteye sahip ABM-M-05 çekme presi kullanılmıştır. Kopma uzamasındaki en büyük azalma yangın koruması olmadığı için %65'lik bir azalma ile GBK-YS numunesinde elde edilmiştir.

Yangına dayanıklılık deneyleri sonucunda betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek için betonarme döşemeden TS EN 12504-1, 2010 (Beton- yapıda beton deneyleri-Bölüm 1: Karot Numuneler- Karot Alma, Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini) standardına göre karot numuneleri alınarak basınç deneyleri yapılmıştır. Döşeme betonunun yangın öncesi ve sonrası basınç dayanımlarına bakıldığında en fazla düşüşün %34 ile yangın dayanımı en düşük olan GBK-YS numunesinde olduğu görülmüştür.

Deneylerden elde edilen sonuçlar ile Elefir-EN tahmine yönelik sayısal analiz programı ile sıcaklık değişimleri hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları deney sonuçları ile daha önceki çalışmalarda da bulunanlar uyumludur. Su ve solvent bazlı numunelerin sayısal analizinde Eurocode 3 kullanılarak yapılan hesaplamalar deney sonuçları ile iyi bir korelasyon sağlamasına karşın, kuramsal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu çıkabilmesi için Eurocode 3'ün gövdesi boşluklu kirişlerin sıcaklık dağılımına yönelik bağıntısının revize edilmesi gerekmektedir.

Sonuç olarak, Türkiye'de ilk kez dairesel gövdesi boşluklu kirişlerin yangın performanslarının tahminine yönelik olarak geliştirilen bu deney modeli ve tam ölçeğe yakın deneyler ve sonuçları yangın sektöründe, eksiklik ve gereksinimlerden biri olan yapısal yangın deneylerinin yapılmasına ve deney düzeneklerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır. Türkiye'de de kullanımı giderek artan ince film kabaran (şişen) (intumescent) boya yalıtım malzemelerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarının, gövdesi boşluklu kompozit kirişlerin yangın performansı üzerindeki etkileri ve kullanılan malzemenin performans sonuçları, üretim yapan Türk firmalara gelecek için yol gösterecektir.

INVESTIGATING EXPERIMENTAL FIRE BEHAVIOR OF STEEL-CONCRETE COMPOSITE CELLULAR I-BEAMS

SUMMARY

Steel-concrete composite beams with equally or unequally spaced openings of any shape are frequently used in multi-story steel framed structures for increased strength and stiffness, thereby leading to cost-effective solutions. Profiled steel sheeting is placed on the steel beams and concrete is poured. System's composite behaviour is provided with shear studs which are attached to the upper flange of the steel beam. Steel (under tension forces) and concrete (under compression forces) components are structurally tied together with studs, provide more rigidity and this system can resist larger vertical loads. Such beams with circular web openings (namely, cellular beams) are of significant importance in practice owing to their architectural flexibilities and automated manufacturing process (double cutting, separation of web parts, and re-welding). It is known that web cutouts may lead to a significant decrease in the behavioral properties (strength, stiffness, and ductility) of cellular beams at elevated temperatures. In the case of large web opening diameter to beam height ratios, a loss of mechanical values of the beam may be more dramatic. For the slab system, a composite effect between the concrete and steel sheet (formed steel or metal deck) is formed with a wide variety of cross sections of the cold-formed steel members. For example, various types of trapezoidal sections have been widely used for various economic reasons in Turkey.

These type of beams' fire behaviour is not exactly known and this results in taking inadequate or unnecessary passive and active fire safety precautions in design. In view of large fires in steel tall buildings, such as World Trade Center (U.S.A) in 2001, fire behaviour of structures has gained importance under various fire scenarios. In this scope, fire tests increased significantly especially in U.S.A and Europe. Studies have been conducted to investigate fire behavior of cellular composite steel beams at elevated temperatures by assuming various experimental scales and beams types (plain, hexagonal, circular opening). Limited number of current full-scale tests and research draw attention especially on the behavior of protected and unprotected composite steel cellular beams under fire.

Although intumescent coatings have been used in different areas, in recent years, they have been frequently proposed for use in the USA and UK particularly for the protection of cellular beams against fire. It is known that intumescent coatings begin to react at temperatures of around 200–250 °C. Thin film coatings are suitable for use in cellulosic fires and are considered to be water and solvent based because of the chemical compounds they contain. Water- and solvent-based thin film coatings are preferred for use in indoor and outdoor applications, respectively. The required thickness and behavior of the different types of intumescent coatings used on cellular beams are issues that continue to be debated

Previous studies have been conducted to investigate the fire behavior of cellular composite steel beams at elevated temperatures by assuming various experimental scales and beam types. The full-scale fire testing of steel-concrete composite cellular beams with trapezoidal steel decking and closely spaced holes with a large diameter has been limited.

The main objective of this study is to experimentally examine the behavior of steel-concrete composite cellular I-beams under service loads for protected and unprotected conditions and subjected to ISO 834 fire conditions. A reference specimen having a solid web as opposed to a cell configuration was also tested to explore the behavioral differences. Within the scope of this study, intumescent coatings are used as fire protection materials, and have become widespread in the protection of composite cellular beams in Turkey. This study could be a guide for specifying and developing of precautions against fire in designing, dimensioning and manufacturing processes of the cellular beams for newly designed composite structures. One of the unique aspects of the study is that, to the best knowledge of the authors, full-scale four tests for composite beams with web openings were conducted for the first time in Turkey. These tests would make a significant contribution for performing structural fire experiments and setting up the new test arrangements.

The composite cellular beams used in this work are designed to allow an examination of deflected shapes, temperature changes in the steel members, and potential failure modes of the beams and concrete slab at high temperatures. Beams to be produced were tested according to TS EN 1365-3 (Fire resistance tests for loadbearing elements-Part 3: Beams) standard in EFFECTIS ERA which is an accredited fire testing laboratory. A total of 4 cellular composite beams, 1 reference specimen with solid webbed beam (DK-R), 1 cellular beam without insulation (GBK-YS) and 2 cellular beams with water and solvent-based insulation materials (GBK-YP, GBK-YN) were designed. To observe failure modes more clearly during fire testing and account for the most unfavorable case, a large cell diameter ($H/D_0 = 0.7$) and closely spaced cell configurations with small intermediate web post values ($w_{min} = 50$ mm) are selected in this work.

The concrete class selected for the slab/topping is C25/30. The slab has dimensions of 4700 mm (length) x 1000 mm (width) x 78 mm (thickness) and was concreted on a trapezoidal steel sheeting deck in a permanent form and as the principal reinforcement for the slab. A widely used S235 steel grade metal deck type with a depth of 38 mm, cell spacing of 151 mm, and thickness of $t = 0.7$ mm was selected. A welded wire mesh (Q188/188) with a diameter of 6.0 mm and a 150 mm x 150 mm nominal wire pitch was used as a secondary (nonstructural) reinforcement to control (rather than prevent) cracks in the concrete slab. To provide the composite action between the beam and slab, headed shear studs of 19 mm in diameter and 75 mm in height were used.

Material coupon tests were carried out based on TS EN ISO 6892-1 (Metallic materials - Tensile testing - Part 1: Method of test at room temperature). To determine the material properties precisely, 12 coupons were taken from specimens having a steel grade of S275 JR and made with IPE 140 for the four beams used in the fire test. All coupon tests were conducted using a calibrated device at the ITU Civil Engineering Faculty, Construction Materials Laboratory. The calculations were revised, and the specimens' production were started depending on the results of the material coupon tests.

Four full-scale tests were performed on protected and unprotected beams. A total of four beams (namely, Beams DK-R, GBK-YS, GBK-YP and GBK-YN) were designed: unprotected, solid webbed welded built-up composite beam; DK-R, unprotected composite cellular beam; GBK-YS, solvent-based protected composite cellular beam; GBK-YP and GBK-YN, water-based protected composite cellular beam. In both the protected and unprotected cellular beams, the failure mechanisms were identified as web-post buckling and Vierendeel bending.

Deflections in an unprotected beam are more critical than in a protected beam. Web-post buckling failure caused a distinctly S-shaped deformation in the web of the unprotected beam.

Although the temperatures obtained in the fire-protected beam are higher, when the temperature-time graph is examined, it can be seen that the critical temperature values were reached within a shorter time than in the unprotected beam. In addition, higher deflection data were recorded for the unprotected beams than for the protected beams.

Experiments showed that unprotected trapezoid deck voids did not have a decisive influence on the behavior of the beam for up to 60 min of fire testing.

For all specimens, two main types of crack patterns were determined after examining the composite slabs with trapezoidal steel decking, a welded reinforcing mesh, and cast-in-situ concrete. Both longitudinal (along the beam axis) and transversal cracks were formed on the top surface of each specimen. Owing to the stiffness of the regions near the support points, the shear force reaches the highest value, and the web buckling and secondary bending effects (i.e., the Vierendeel effect) in the nearest cells cause concrete slab cracking in the transverse direction.

At the end of the fire tests, tensile tests were conducted on the coupon samples taken from the steel profiles to determine the changes in the mechanical properties of the samples exposed to high temperatures. For the coupon tests, seven pieces were taken from each of the specimens in areas with less deformation. The tensile specimen dimensions were determined and produced according to the TS EN ISO 6892-1 (Metallic Materials - Tensile Test - Part 1: Ambient Temperature Test Method) standards for steel beams. Coupon tests were carried out in the ABM Engineering Building Materials Laboratory, which is an accredited laboratory close to the fire testing laboratory. Depending on the results from the pre-and post-experiment mechanical properties of the coupon samples, the greatest reduction in strain failure was obtained in GBK-YS with a 65% reduction, which had no fire protection. This indicates that the reductions in the mechanical properties of the steel material in the protected beams are much less when compared to those of the unprotected beam.

Possible changes in the characteristic compressive strength (f_{ck}) of concrete after the fire tests are of significance and were determined by taking core samples from the reinforced concrete slabs according to TS EN 12504-1, 2010 (Testing Concrete in Structures- Part 1: Cored Specimens- Taking, Examining, and Testing in Compression) standard. No core sample was taken from Beam 2 because the concrete was severely damaged. The compressive tests were carried out using a calibrated machine at the ABM Engineering Building Materials Laboratory. Comparing the pre- and post-test (or post-cooling) compressive strength results, it was found that the post strength/pre-strength ratios were 34% for GBK-YS, 20% for GBK-YP, and 33% for GBK-YN. For the protected specimens, the slabs were exposed to higher temperatures, and the compressive strength of concrete after testing was lower than that of the unprotected beam slabs.

Temperature changes in experiments results were calculated by the numerical analysis program Elefir-EN. The results of the calculations are in good correlation with experiment results and the previous studies. Although numerical analysis of water and solvent based specimens is in accordance with the experimental results using Eurocode 3 with Elefir-EN, it is necessary to revise Eurocode 3's relation to the temperature distribution of cellular composite beams in order to make the theoretical results more compatible with the experimental results.

As a result, this experimental model and the experiments which are developed for the first time in Turkey will contribute one of the significant deficiencies and requirements in the fire sector and the development of the structural fire experimental set ups. The use of thin film intumescent coatings in Turkey is increasing. For this reason, the effects of the intumescent coating on the fire performance of cellular composite beams will be a guide for the Turkish companies which are working in this field.

1. GİRİŞ

1.1 Motivasyon

Çok katlı çelik iskeletli yapılarda gövdesi boşluklu kompozit kirişler, kesit geometrisinin değişkenliğinden sağlanan esneklik (daire çapları, daire boşlukları arasındaki uzaklık, toplam yükseklik gibi) ve ekonomik üstünlükleri nedeni ile sıkça kullanılmaktadır. Çelik kirişlerin üzerine yerleştirilen profillendirilmiş çelik sacın içine beton dökülmekte, döşeme ve kiriş sisteminin kompozitliği çoğunlukla başlıklı kayma bağlantılarının (stud) çelik sac üzerinden ya da sacda açılan delikler yardımıyla kirişin üst başlığına kaynaklanması ile sağlanmaktadır. Düşey yük etkisi altındaki döşemede çeliğin çekme kuvveti ve betonun basınç kuvveti ile kompozit kiriş daha büyük rijitliğe sahip olduğu gibi daha büyük yükleri de taşıyabilmektedir. Bu tür kirişlerin yangın karşısında davranışlarının tam olarak bilinmemesi, alınacak pasif ve aktif önlemlerin bazen gereğinden fazla, bazen de yetersiz olmasına yol açmaktadır. 2001'de Amerika'da meydana gelen WTC İkiz Kuleler'deki göçmeler sonrasında çelik yapıların yüksek sıcaklıklar karşısındaki yapısal davranışlarının incelenmesi daha da önem kazanmış, bu kapsamda özellikle Amerika ve Avrupa'da yapılan deneyler artmıştır. Daha güncel olarak, 14 Haziran 2017'de Londra'da Grenfell Tower yangını ve doğurduğu sonuçlar özellikle çok katlı binalardaki yangın güvenliği konusunu her düzeyde tekrar gündeme getirmiştir. Çelik-betonarme kompozit döşeme-kiriş sistemlerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Bailey, 2004), (Bihina ve diğ., 2012), (Bihina ve diğ., 2013). Çalışmalar farklı ölçeklerde olmalarının yanısıra, döşeme kirişlerinin dolu ve boşluklu olarak seçilmesine bağlı olarak değişiklikler göstermektedir. Konu ile ilgili olarak geçmişten günümüze kadar yürütülmüş olan deneyler incelendiğinde, gövdesi boşluklu kirişler üzerine yapılan yangın korumalı ve korumasız çalışmaların ve gerçek ölçülerdeki deneylerin azlığı özellikle dikkat çekmektedir.

1.2 Konu ve Kapsam

Çelik-betonarme kompozit döşeme sistemleri sağladıkları mimari ve yapısal üstünlüklerin yanısıra, mevcut döşemenin kirişin üst başlığının üst yüzünü koruması nedeni ile yangın dayanımını da arttırdığından özellikle yüksek yapılarda tercih edilmektedir. Gövdesi boşluklu kirişler, dolu gövdeli kirişlere göre yerel koşullara bağlı olarak %30~%40'lara varan oranlarda yapı maliyetini azaltabilmekte, kiriş ağırlığını sabit tutarak gövde yüksekliğinin arttırılmasına olanak vermekte ve servis/donanım boşlukları oluşturarak tesisat geçişini sağlamaktadır (Singer, 2005). Büyük açıklıklar geçebilen, mimari ve davranış olarak diğer boşluklu kirişlere göre üstünlükleri daha fazla olan dairesel gövde boşluklu kirişlerin üstün yapısal özelliklerine karşın yüksek sıcaklıklarda mekanik özelliklerinde önemli ölçüde azalmalar olduğu bilinmektedir (Ward, 1990), (Vassart, 2010), (Naili, 2011). Yangın nedeniyle oluşan yüksek sıcaklıklara karşı yalıtım malzemeleri (örneğin; kabaran (şişen) boyalar, alçı kaplama v.b.) ile korumanın, bina maliyetlerinde %30~35 civarlarında artışa neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, konunun ekonomik yönü de önem kazanmaktadır (Zhao, Shen, 1999).

Gövde boşluklu ve dolu, yalıtımlı/yalıtımsız kirişlerde yapılacak olan bu deneysel çalışma ile farklı yalıtım durumlarındaki kirişlerin yüksek sıcaklıklardaki performanslarının belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Çalışmada kullanılan gövde boşluklu kompozit I-kirişler yüksek sıcaklıklarda farklı özellikteki kirişlerin göçme durumlarının incelenmesine olanak sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Yükleme değerleri de bu göçme durumlarının izlenmesine olanak sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Numunelerin tasarımında ölçek faktörü oluşturulmamaya, diğer bir deyişle olabildiğince gerçek boyutlara gidilmeye çalışılmıştır. Çelik taşıyıcıların yangına karşı yalıtılmasında püskürtme (vermikülit-magnezyum mikası ya da mineral fiber esaslı malzemeler), plakalar ile kaplama, kutuya alma, beton-tuğla ile blok koruma yöntemlerinin yanısıra günümüzde kabaran (şişen) (intumescent) boyalar yoğun bir biçimde kullanılmaktadır.

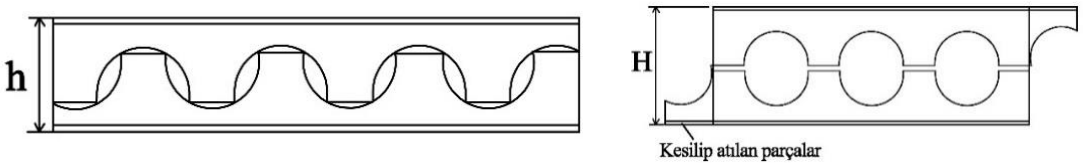
Türkiye'de de kullanımı yaygınlaşmaya başlayan yalıtım malzemelerinden kabaran (şişen) (intumescent) boyalar bu tez kapsamında kullanılmış, dört numuneden ikisi

yalıtımlı olarak test edilmiştir. Numunelerden biri solvent, diğeri de su bazlı ince film kabaran (şişen) boyalar ile 60 dakika yangın dayanımı sağlayacak şekilde yalıtılmıştır.

Gövdesi boşluklu kiriş numunelerinde sıcaklık artışı, kesit faktörüne [A/V] ya da [Hp/A'ya] bağlı olarak değişmektedir. Burada A, yangın etkisinde kalacak yüzey alanı, V hacim, Hp yangına maruz kalan yüzey uzunluğudur. Kesit faktörü, kirişin yangına maruz kalan yüzey uzunluğunun kesit alanına olan oranı olarak ifade edilmektedir; kesit faktörünün düşük değerleri gerekli koruma kalınlığının daha az olması, yüksek değerleri ise gerekli koruma kalınlığının daha fazla olması anlamına gelmektedir. Yukarıda da açıklandığı üzere numunelerde 60 dakikalık su ve solvent bazlı ince film kabaran (şişen) boyaların kullanılmasına karar verilmiş, buna bağlı olarak yalıtım kalınlığı değerleri belirlenmiştir. Deneyler kapsamında yalıtım malzemesinin performansları da değerlendirilmiştir. Gövde ve başlık kalınlıkları, boşluk sayısı, yük ve açıklık değerleri sabit olup gövdenin dolu/boş olması ve yalıtım durumları değişkenliği deneylerin ana parametrelerini oluşturmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlar ile sayısal analiz programında tahmine yönelik olarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

1.3 Gövdesi Boşluklu Kompozit I- Kirişlerle Oluşturulmuş Yapı Örnekleri

Gövdesi boşluklu kirişler Avrupa ve Amerika'da 1900'lerden beri kullanılmaktadır. Bu kirişler sıcak haddelenmiş H ya da I tipi profillerin gövdeleri boyunca zig-zag'lı ya da dairesel olarak kesilmesi (Şekil 1.a) ile elde edilen iki parçanın ayrılması ve bu parçaların ortada boşluk bıracak şekilde kaynakla yeniden birleştirilerek üretilmektedir (Şekil 1.b). Bu şekilde kirişin son yüksekliği ilk yüksekliğinin yaklaşık 1.3~1.6 katına kadar çıkabilmektedir. Kiriş gövdesinde dairesel boşluk oluşturma işlemi programlanmış laser plazma kesimi ile gerçekleştirilmektedir.



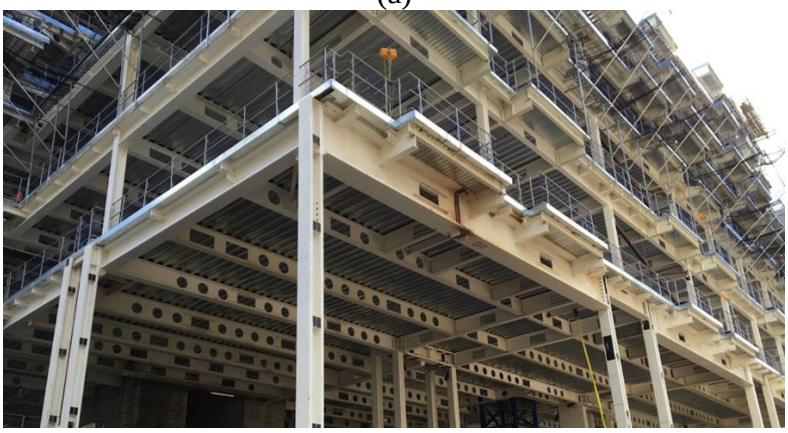
(a) (b)

Şekil 1.1: Çelik kirişte dairesel boşluk oluşturmanın adımları: (a) Dairesel boşluklar için kiriş kesimi, (b) Dairesel parçaların kaydırılıp üst üste kaynaklanması (Url-1).

Gövde boşluklu kirişler eğilmeye çalıştığı için büyük kesme kuvvetlerinin olduğu, mesnetlere yakın bölgelerdeki boşluklar levha ile kaynaklanarak kapatılmakta ya da üretimde bu bölgeler dolu olarak bırakılmaktadır. Bir başka çözüm ise ilk boşlukların çevresindeki levhadan çevresine bir güçlendirme halkası oluşturarak, kesme etkileri ve bunların yol açacağı ikincil (sekonder) eğilmelerin etkisinin en aza indirilmesidir. Örneğin Castella tipi kirişlerde kesme kuvvetlerinin yüksek olduğu mesnete yakın, noktasal yük altındaki ve tali kiriş birleşim bölgelerindeki boşlukların doldurulması önerilmektedir. Dairesel boşluklu kirişlerde ise büyük kesme kuvvetlerine karşı boşluk çapları ve boşluklar arasındaki mesafeler değiştirilerek kapatılacak boşluk sayısı minimuma indirilebilmektedir (Çelik, 1996).



(a)



(b)

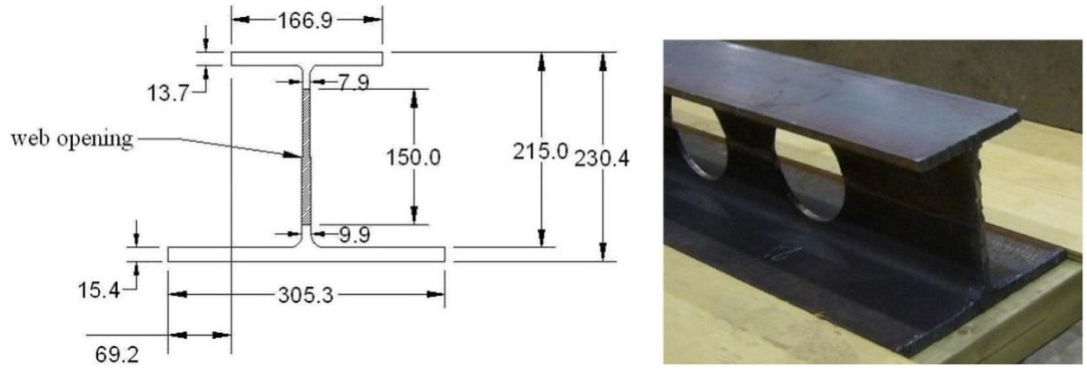
Şekil 1.2: Gövdesi dairesel boşluklu I-kirişler: (a) İTÜ Mimarlık Fakültesi Taşkışla'da çatı katında yer alan gövdesi dairesel boşluklu I-kirişler, (b) Londra'da çok katlı bir yapıda kullanılan gövdesi dairesel boşluklu kirişler (Çelik, 2015).

Gövde dairesel boşluklu kirişler, büyük açıklık geçebilme kapasitesine sahip olmaları, ilave çelik kullanımı gerektirmeden kiriş yüksekliğinin arttırılarak dayanımın/rijitliğinin arttırılabilmesine olanak sağlamaları ve kirişin kesit

geometrisinin değişkenliğinden sağlanan esneklik (daire çapları, daire boşlukları arasındaki uzaklık, son yükseklik) nedeniyle çokça tercih edilmektedir (Şekil 1.2a). Kiriş gövdesinde oluşturulan boşluklar, kirişin yüksekliğini %50'ye ve moment kapasitesini yaklaşık %40'a kadar arttırmaktadır (Erdal, 2011).

Dairesel gövde boşluklu kirişler mimari açıdan daha yüksek dayanıma sahip olup daha az kolon kullanımı gerektirdiği için daha geniş mekanların elde edilmesine ve gövde boşluklarından tesisat geçişine izin vermektedir (Şekil 1.2b). Tesisat geçişinde dairesel boşluklar, kastella tipi kirişlerdeki altıgen boşluklar ile karşılaştırıldığında ortalama %30 daha fazla kullanabilir alan yaratmaktadır.

Gövdesi dairesel boşluklu çelik-betonarme kompozit kirişler diğer kirişlere göre asimetrik (alt ve üst T elemanları farklı boyutlarda) olarak da üretilebilmektedir (Şekil 1.3a). Bu şekilde özellikle kompozit kirişlerde alt T bölgesi üst T bölgesinden daha güçlü hale getirilebilmekte ve kirişin yangın dayanımı arttırılabilmektedir (Şekil 1.3b) (Huo, Mello, 2017).



(a) (b)

Şekil 1.3: Dairesel gövde boşluklu çelik-betonarme asimetrik kiriş:(a) Asimetrik kirişin enkesiti, (b) Asimetrik kirişin görünümü (Huo, Mello, 2017).

Gövde boşluklu kirişler ana ve tali döşeme kirişleri olarak kullanıldığı gibi çatı kirişleri olarak da etkin bir biçimde kullanılabilmektedir. Otoparklar, stadyumlar, ofisler, alışveriş merkezleri, kütüphaneler ve hastaneler gibi yapılarda kullanımı yoğun olarak tercih edilmektedir. Otoparklarda az sayıda kolon kullanımı ile geniş açıklıkların geçilmesine olanak sağlamaktadır. Güvenlik faktörü bu tip mekânlarda önemli görülmektedir. Bu nedenle, gövde boşluklu kirişler, kolon gereksinimini azaltıp görüş mesafesinin kesintisiz olmasını sağlamaktadır (Şekil 1.4).



Şekil 1.4: Gövdesi boşluklu kirişlerin otoparklarda kullanımı (Url-2).

Dairesel gövde boşluklu kirişler geniş açıklıklara sahip stadyum ya da alışveriş merkezlerinin çatılarında strüktürel dayanıklılığının/rijitliğinin yanında hafif ve ekonomik olduğu için de tercih edilebilmektedir. Kirişin gövde ve uç formuna bağlı olarak gövde boşlukları farklı çaplarda da tasarlanabilmektedir. İç ya da dış bükey biçimli, kemerli ve konsol çalışabilen gövde boşluklu kirişler ek maliyet gerektirmeksizin üretilebilmektedir (Şekil 1.5, Şekil 1.6).



Şekil 1.5: Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerin değişik boyutlarda ve biçimlerde kullanımı (Url-2).



Şekil 1.6: B2net Stadyumu, Chesterfield, İngiltere (Url-2).

1.4 Literatür Araştırması

Çelik-betonarme kompozit yapıların yangın karşısındaki davranışlarının deneysel olarak incelenmesi 1980'lerin başında Amerika'da başlamış olup bunu izleyen on yıl içerisinde Almanya (Stuttgart- Vaihingen, 1985), Avustralya (BHP William, 1992 ve Collins Street, 1994) ve İngiltere'de yoğun olarak yapılan deneyler takip etmiştir (Bisby ve diğ, 2013).

2001'de Amerika'da meydana gelen WTC İkiz kulelerdeki göçmeler sonrasında çelik yapıların yüksek sıcaklıklar karşısındaki yapısal davranışlarının incelenmesi daha da önem kazanmış, bu kapsamda özellikle Amerika ve Avrupa'da yapılan deneyler artmıştır. Çelik kompozit döşeme sistemlerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışları üzerine birçok çalışma yapılmıştır (Li, Guo, 2008), (Kallerova, Wald, 2009), (Lawson, Hicks, 2011), (Sanghoon ve diğ, 2012). Çalışmalar tam ölçekli deney düzeneği (Kallerova, Wald, 2009), (Nadjai ve diğ, 2011), portatif deney düzenekleri (Nadjai ve diğ, 2007), (Sanghoon ve diğ, 2012) ve tekil eleman (Bailey, 2004) deneyleri olmak üzere farklı ölçeklerde olmalarının yanısıra, döşeme kirişlerinin dolu ya da boşluklu, yalıtımlı ya da yalıtımsız olarak seçilmesine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir.

Tekil eleman deneylerinde, elemanlar gerçek boyutlarında kullanılmadığı gibi bir sistem içerisinde değil, tek başına denenmektedirler. Bu deneylerde mekanik yükleme yapıldığı gibi, yapılmadığı durumlar da vardır. Deneylerde genellikle yönetmeliklerce belirlenmiş standart yangın eğrileri kullanılmaktadır.

Portatif deney düzenekleri tekil eleman deneylerinden daha gelişmiş deneyleri kapsamaktadır. Deneylerde eleman ya da elemanlar yapıda kullanıldığı gibi gerçek ölçülerinde olup bir sistem içerisinde yer alabildiği gibi tekil olarak da denenebilir. Bu deneylerde mekanik yükleme yapılmaktadır. Sıcaklık- zaman eğrisi yönetmeliklere bağlı kalındığı gibi bir senaryo çerçevesinde, kullanıcı tarafından da oluşturulabilmektedir.

Tam ölçekli kompartman deneyleri ise en gelişmiş ve kapsamlı olan deneyleri kapsamaktadır. Bu düzenekler yapının belirli bir bölümü inşa edilerek ya da kullanımda olmayan bir yapıda oluşturulan deneylerdir. Yapının taşıyıcı sistemi içerisinde yer alan tüm elemanların birlikte (kolonlar, kirişler, kolon-kiriş birleşim noktaları ve döşeme) denendiği düzeneklerdir. Tam ölçekli deneyler, yanıcı yük miktarı ve yapının fonksiyonu (ofis, konut, otel, vb.) göz önüne alınarak kurgulanmış sıcaklık-zaman grafiği kullanılarak ya da gerçek yangın koşulları altında gerçekleştirilebilmektedir.

EK-A'da gövdeleri boşluklu çelik- betonarme kompozit kirişlerde ve diğer yapısal elemanlarda bugüne kadar yapılan deneysel çalışmalar çok kapsamlı bir biçimde verilmiştir.

1.5 İçerik

Çalışmanın ana bölümlerinin içeriği aşağıda verilmiştir:

- Tezin ilk bölümünde konu ve kapsamdan söz edilmiş ve bu konuda yapılan literatür çalışması tablolar ile özetlenmiştir.
- İkinci bölümde, gövdesi boşluklu çelik-betonarme kompozit I-kirişlerin yüksek sıcaklıkta gösterdiği davranışlar, alınacak önlemler ve Amerika ve Avrupa'da gerçekleştirilen yangın deneyleri açıklanmıştır.
- Çelik kiriş numuneleri için yapılmış olan çekme deney sonuçları Bölüm 3'de verilmiştir. Yangın deneyleri için hazırlık aşamaları, numunelerin tasarım ve boyutlandırılması, yükleme değerleri, deneyde kullanılan yangın eğrisi, yalıtım uygulaması ve numuneler üzerine yerleştirilecek olan ölçüm aletlerinin kodları ve yerleri açıklanmıştır. 1 adet dolu gövdeli referans numunesi (DK-R), 1 adet yalıtımsız boşluklu gövdeli (GBK-YS) ve 2 adet yalıtım malzemelerinin kullanıldığı boşluklu gövdeli kompozit kirişler (GBK-YP, GBK-YN) olmak

üzere toplam 4 adet kompozit kirişte yapılan yangın deneyleri üçüncü bölümde incelenmiştir.

- Bölüm 4 gövdesi dolu/boşluklu kirişlerin deney sonuçlarının değerlendirilmesine ayrılmış, elde edilen sıcaklık ve yerdeğiştirme eğrileri kapsamlı olarak sunulmuştur. Betonarme döşemede meydana gelen hasarlar belirlenmiştir. Gövde ve başlık kalınlıkları, boşluk sayısı, yük ve açıklık değerleri sabit olan gövdenin dolu/boş olması ve yalıtım durumları farklılık gösteren numunelerin deney sonuçları karşılaştırılmıştır.
- Yangın deneyleri sonrası çelik ve beton malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimi açıklamaya yönelik yapılan malzeme deneyleri ile deney sonuçlarının karşılaştırılması (yalıtımlı-yalıtımsız, gövdenin boşluklu-dolu, yalıtım türü su-solvent) beşinci bölümde ele alınmıştır.
- Altıncı bölümde deney verileri ile sayısal analiz programından elde edilen veriler karşılaştırılmıştır.
- Son bölümde çıkan sonuçlar değerlendirilerek sonraki araştırmacılar için önerilerde bulunulmuştur.

2. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞLERİN NUMUNELERİNİN YANGIN DAYANIMI

2.1 Gövdesi Boşluklu Çelik I-Kirişlerin Yangın Dayanımı Tasarımı

Eurocode 3 (2004)'de yangın dayanımının hesaplanması üç ana etken olan zaman, yük ve sıcaklık değerlerinden birinin esas olarak alınmasına bağlı olarak çözümlenmektedir.

Zamana bağlı olarak,

$$t_{fi,d} \geq t_{fi,req} \tag{2.1}$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada $t_{fi,d}$ yangın dayanımı için belirlenen tasarım zaman değerini ifade ederken $t_{fi,req.}$ ile yangın dayanımı için gerekli olan zaman belirtilmektedir. Strüktürel elemanların yangın tasarımında, elemanların yönetmeliklerce belirtilmiş olan yangın dayanım süresine kadar göçmemesinin sağlanması en önemli tasarım ilkesi ya da performans kriteridir.

Çelik yapı elemanlarının yangın koşulları altında t zamanında yük taşıyıcı fonksiyonunu kaybettiği göz önüne alınarak,

$$E_{fi,d} = R_{fi,d,t} \tag{2.2}$$

bağıntısı kullanılmaktadır. $R_{fi,d,t}$ yangın sırasında etki eden iç kuvvetler olan $M_{fi,t,Rd}$ (yangın sırasında eğilme momentinin tasarım değeri), $N_{fi,t,Rd}$ (yangın sırasındaki eksenel kuvvetin tasarım değeri) ve bu kuvvetlerin tek başlarına ya da birlikte farklı kuvvetlerle olan kombinasyonunu ifade etmektedir. $E_{fi,d}$ ise yangın koşullarında "t" zaman dilimi içerisindeki yangın dayanımı tasarım değerleri olan $M_{fi,t,Ed}$ (yangın sırasındaki eğilme momenti) ya da $N_{fi,t,Ed}$ (yangın sırasındaki eksenel kuvvet) değerleri olarak belirtilmektedir.

Sıcaklığa bağlı olarak yapılan hesaplamalarda,

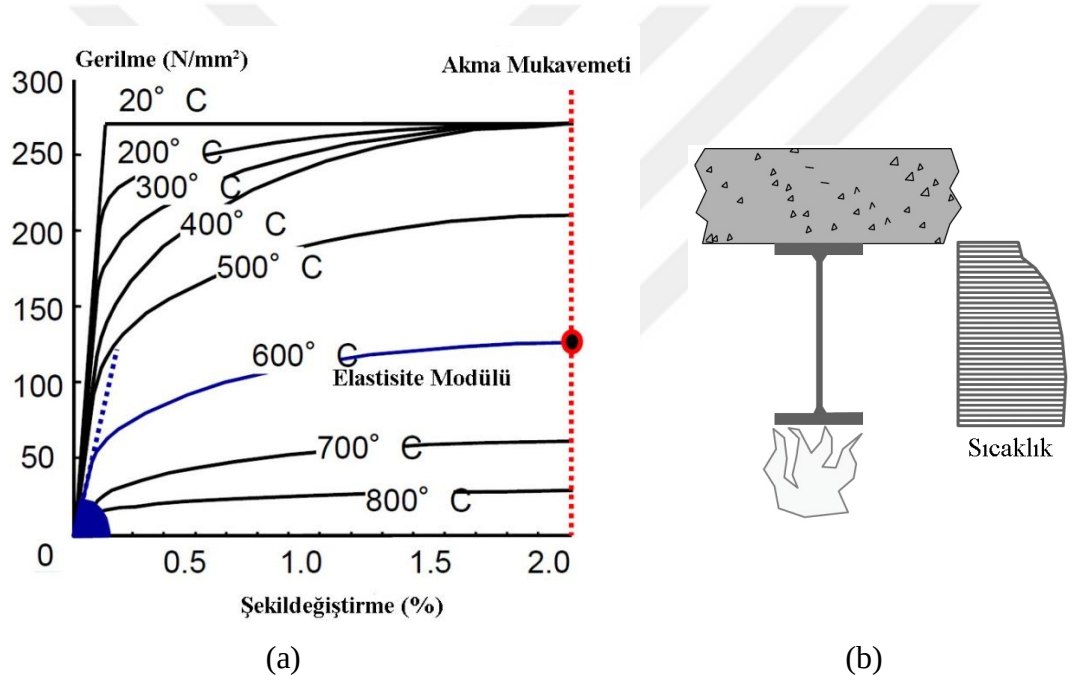
$$\theta_{cr,d} \geq \theta_d \tag{2.3}$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada yükleme altındaki kirişin kritik sıcaklığı ($\theta_{cr,d}$) belirlenen tasarım sıcaklık değerine (θ_d) eşit ya da büyük olması öngörülerek hesaplamalar yapılmaktadır.

Standart yangın deneylerinde ve Eurocode 3 tarafından da sıkça kullanılan en yaygın yöntem kritik sıcaklığın esas alındığı hesaplamalara dayanmaktadır.

2.1.1. Çeliğin Kritik Sıcaklığının Hesaplaması

Çelik yüksek sıcaklıklara çıktığında elastisite modülü ve akma mukavemeti için dayanım/rijitlik indirgeme faktörü tüm şekildeğiştirmenin %2'sini oluşturmaktadır (Şekil 2.1a). Sıcaklık 600 C° ve üstüne çıkıldığında elastisite modülü %70'lere, akma mukavemmeti ise % 50'lere varan bir düşüş göstermektedir (Şekil 2.1b).



(a) (b)

Şekil 2.1: Çeliğin yüksek sıcaklıklar altında gösterdiği davranışlar: (a) Yüksek sıcaklıklarda çeliğin gerilme- şekildeğiştirme eğrisi (Real, 2014), (b) Enkesit boyunca düzgün olmayan sıcaklık dağılımı (Franssen, Real, 2010).

Çeliğin kritik sıcaklığı esas alınarak yapılan hesaplamalarda belirli bir sıcaklıktaki azaltma faktörü akma mukavemeti ya da elastisite modülü değeri ile olan ilişkisi göz önüne alınarak Çizelge 2.1 ile 2.4 ve 2.5 bağıntıları kullanılarak hesaplanmaktadır. Çeliğin kritik sıcaklığının hesaplanmasına yönelik detaylı bilgi ve hesaplamalar Bölüm 6'da verilmektedir.

Eurocode 3 (EN 1993-1,2004)'e göre,

$$\Theta_{a,cr}=39,19 +482 \ \ln\left\{\frac{1}{0,9647\mu^{3,833}}-1\right\}+482 \quad (2.4)$$

$$M_0=\frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}}=k_{y,\theta} \quad (2.5)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada μ_0 dayanım faktörü, $k_{y,\theta}$ çeliğin θa sıcaklığındaki t zamanda ulaştığı akma mukavemeti için belirlenmiş azaltma faktörünü, Efi,d yangın koşullarında "t" zaman dilimi içerisindeki yangın dayanımı tasarım değerlerini (yangın sırasındaki eğilme momentini ve yangın sırasındaki eksenel kuvvetleri) ve $R_{fi,d,0}$ yangın sırasında etki eden iç kuvvetler olarak tanımlanmaktadır.

Çizelge 2.1: Çelik sıcaklığı ile azaltma faktörü ilişkisi (EN 1993-1, 2004).

Çeliğin Sıcaklığı (θa)	Azaltma faktörü (akma mukavemeti fy ile ilişkili olarak) ky,θ= fy,θ/ fy
20 C°	1.000
100 C°	1.000
200 C°	1.000
300 C°	1.000
400 C°	1.000
500 C°	0.780
600 C°	0.470
700 C°	0.230
800 C°	0.110
900 C°	0.060
1000 C°	0.040
1100 C°	0.020
1200 C°	0.000

2.1.2. Yüksek Sıcaklıklarda Çeliğin Moment ve Kayma Dayanımı

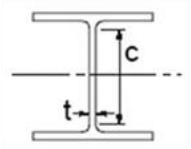
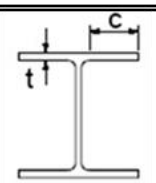
Çeliğin mekanik davranışlarının tahmin edilebilmesi için enkesit özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Moment dayanımı yüksek sıcaklıklarda basınç etkisi altındaki bölümlerin (başlık, gövde) lokal/yerel burkulmaları nedeniyle sınırlanmaktadır. Çeliğin başlık ve gövde bölümlerinin narinlik değerlerine (c/t) bağlı olarak enkesit elastik ya da plastik özellikler göstermektedir. Burada c: Sınıf 1 için başlıklar arasında kalan etkin uzunluk, Sınıf 2 ve Sınıf 3 için başlığın gövde kalınlığına kadar olan etkin uzunluk, t: Sınıf 1 için gövde kalınlığını, Sınıf 2 ve Sınıf 3 için de başlık kalınlığı olarak ifade edilmektedir.

TS EN 1993-1 (2004) (Eurocode 3)'de farklı moment dayanımı (M_R) ve dönme kapasitelerine (R) göre dört enkesit olarak sınıflandırılmıştır (Çizelge 2.2).

$$E=0.85\sqrt{\frac{235}{f_y}} \tag{2.6}$$

2.6'da yüksek sıcaklıklarda 0.85 değeri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.2: Çeliğin enkesit sınıflandırılması (EN 1993-1, 2004).

			
	Sınıf 1	Sınıf 2	Sınıf 3
Basınç	c/t=9 Ɛ	c/t=10 Ɛ	c/t=14 Ɛ
Basınç altındaki gövde	c/t=33 Ɛ	c/t=38 Ɛ	c/t=42 Ɛ
Gerilme altındaki gövde	c/t=72 Ɛ	c/t=83 Ɛ	c/t=124 Ɛ

Deney numunelerinde, gövdesi dairesel boşluklu kirişlerin üstünde kompozit bir döşeme yer aldığı için, yüksek sıcaklıklarda sıcaklık dağılımı alt başlıkta üst başlığa göre daha hızlı gerçekleşmektedir. Başka bir deyişle, deney boyunca sıcaklık dağılımı çelik enkesiti boyunca düzgün bir artış göstermemektedir.

Bu tip kesitlerde eğilme momenti dayanımı hesaplanırken,

$$M_{fi,\theta,Rd}= M_{Rd}k_{y,\theta}\left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}\right)\ \frac{1}{K_1\,K_2} \tag{2.7}$$

bağıntısından yararlanılmaktadır.

Burada, M_{Rd} normal sıcaklıklar altında çelik kiriş için belirlenmiş olan tasarım moment dayanımını ve $k_{y,\theta}$ ise çeliğin θ_a sıcaklığındaki t zamanda ulaştığı akma mukavemeti için belirlenmiş azaltma faktörünü ifade etmektedir. Çeliğin enkesit sınıflandırılmasına bakılmaksızın belirlenmiş olan kısmi güvenlik faktör değeri γ_{M0}, yangın tasarımı için belirlenmiş olan kısmi güvenlik faktör katsayısı $\gamma_{M,fi}$ ile ifade edilmektedir.

EN 1993-1, 2004 yönetmeliği tarafından γ_{M0} ve $\gamma_{M,fi}$ değerleri için belirlenmiş olan güvenlik katsayısı 1.0 olarak belirlenmiştir. Farklı durumlar için yönetmelik tarafından belirlenmiş değerler kullanılmaktadır.

(2.7) bağıntısında K_1, kiriş enkesiti boyunca sıcaklık artışı düzgün olmaması durumunda kullanılan adaptasyon faktörü olarak belirtilmektedir. Bu faktör dört taraftan sıcaklığa maruz kirişlerde 1.00, üç taraftan sıcaklığa maruz kalan yangın korumasız kirişlerde 0.70, üç taraftan sıcaklığa maruz kalan yalıtımlı elemanlarda ise 0.85 değerini almaktadır.

K_2 faktörü kiriş uzunluğu boyunca sıcaklık artışı düzgün olmaması durumunda kullanılmaktadır. Bu değer mesnet noktalarında 0.85, diğer noktalarda 1.00 olarak alınmaktadır.

Çelikte yangın sırasında oluşan kayma dayanımı hesaplanırken,

$$V_{fi,t,Rd} = V_{Rd} k_{y,\theta web} \left(\frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M,fi}}\right) \frac{1}{K_1 K_2} \qquad (2.8)$$

bağıntısından yararlanılmaktadır. TS EN 1993-1-1 (Eurocode 3) tarafından belirlenmiş normal sıcaklıklar altındaki tasarım kesme/kayma dayanım değeri (V_{Rd}) ile sembolize edilmiştir. θ_{web} kesit gövdesindeki ortalama sıcaklık değerini ve $k_{y,\theta web}$ θ_{web}'e bağlı olarak akma mukavemeti için belirlenmiş azaltma faktörünü ifade etmektedir.

2.2 Gövdesi Boşluklu Çelik-Betonarme Kompozit I-Kirişlerin Yüksek Sıcaklıktaki Davranışları

Tez kapsamında yapılan detaylı literatür çalışması sonucunda elde edilen verilere bağlı olarak gövdesi boşluklu kirişlerde deneyler sırasında meydana gelmesi beklenen göçme modları gövde burkulması, Vierendeel göçmesi, eğilme, kirişin gövdesindeki kaynak bölgelerinde ve boşluk üstü ve altı T kesit elemanlarında meydana gelen yırtılmalar ve yanal burulmalı burkulma olarak sıralanmaktadır.

Gövdesi boşluklu kirişlerde eğilme kritik göçme modlarından biri olarak kabul edilmemektedir (Şekil 2.2). Kirişlerin eğilme kapasitesi gövde boşluklarının merkezinden hesaplanmakta ve kiriş enkesit özelliklerine bağlı olarak belirlenmektedir.

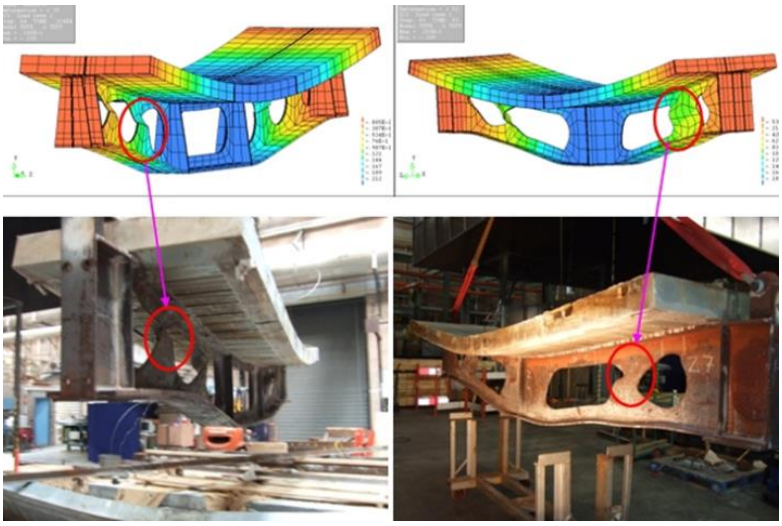
Kompozit kirişlerin alt T bölgesinde oluşan çekme kuvvetine ve üstte betonda meydana gelen basınç kuvvetine bağlı olarak sabit bir kesit alanı için büyük gövde boşluklarına sahip kirişler eğilmeye karşı daha dayanıklı olmaktadır (Simms, 2007).



Şekil 2.2: Gövdesi boşluklu kirişlerde eğilme (Najdai ve diğ, 2007).

Gövdesi boşluklu kirişlerde gövdenin kaynak noktalarında ve kirişin üst ve alt T kesit elemanlarında yüksek sıcaklıklarda yırtılmalar meydana gelebilmektedir. Gövde kalınlığının az olması ya da gövdede dairesel boşluklar arasında kalan kaynak uzunluğunun kısa olmasına bağlı olarak yüksek sıcaklıklarda yatay kesme kuvvetleri akma dayanımını aştığı durumlarda bu noktalarda yırtılmalar gözlenmiştir.

Dört tam ölçekli deney, farklı dairesel geometrilere sahip simetrik ve asimetrik boşluklu kompozit kirişlerin yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerinde asimetrik kirişlerden üst gövde ve alt gövde kalınlık oranın fazla olduğu kirişte, yüksek sıcaklıklarda yatay kesme kuvvetlerinin etkisiyle boşluk üstü ve altı T kesit elemanlarında yırtılmalar oluştuğu görülmüştür (Bihina ve diğ, 2013) (Şekil 2.3a,b).



(a) (b)

Şekil 2.3: Göçme modları: (a) Gövdenin kaynak noktalarında, (b) Boşluk üstü ve altı T kesit elemanlarında yırtılmalar (Bihina ve diğ, 2013).

Yanal burulmalı burkulma, kiriş kesitinin hem dönmesi hem de yanal deplasman yapması olarak açıklanmaktadır.

Kompozit olmayan kirişlerde, üst başlıkta betonarme döşemeden kaynaklanan basınç olmadığından, bu göçme modu kompozit kirişlere göre daha fazla gerçekleşmektedir.

Yüksek sıcaklıklarda sıcaklık artışına bağlı olarak elastisite modülünün akma dayanımından daha hızlı bir düşüş göstermesi ve bunun sonucunda gerilme ve birim uzama ilişkisinin değişimine bağlı olarak bu tür bir davranış gözlenebilmektedir. Sıcaklık arttıkça, kirişin narinlik oranı azaldıkça dönme kapasitesinde artış beklenmektedir.

Bunun sonucu olarak, her iki mesnet noktasından tutulu olan kirişlerde yanal mesnetler dönme kapasitesini arttırmaktadır. Yanal burulmalı burkulma narin kirişlerde özellikle 600 C°'nin üzerine çıkıldığında gözlenmekte ve burkulmayı etkileyen faktörler yükün tipi ve yerleşimi, enkesit geometrisi, mesnet ve malzeme özellikleri olarak sıralanmaktadır (Kankanamge, 2010).

Gövde burkulması ve Vierendeel göçme gövdesi boşluklu kirişlerde yangın sırasında en sık görülen ve kritik göçme modları olarak tanımlanmakta olduğundan bunlar aşağıda daha kapsamlı olarak ele alınmıştır.

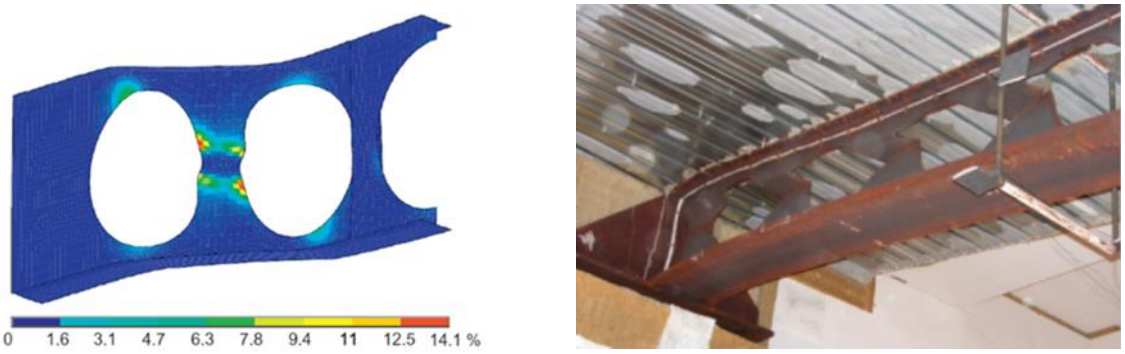
2.2.1 Gövde Burkulması

Gövde burkulması, gövdesi boşluklu kirişlerde yangın sırasında en sık görülen göçme modu olarak tanımlanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda kiriş gövdesinin kayma dayanımı eğilme dayanımından daha hızlı bir düşüş göstermektedir (Wong ve diğ. 2010). Bunun sonucu olarak, yük altındaki kirişin gövde boşlukları arasında kalan dolu bölgelerde düşey kesme kuvvetlerine bağlı olarak düzlem dışına doğru burkulmalar meydana gelmektedir (Şekil 2.4a, b). Burkulma, gövdenin kalınlığına, açıklık oranına ve boşluk çapına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Lawson, Hicks, 2011).

Yangın sırasında gövdenin burkulma kapasitesi;

$$V_{h,buck,fi} = \chi_{fi} f_{y,fi} S_0 t_w \qquad (2.9)$$

Bağıntısı ile ifade edilmektedir. Burada, yangın tasarımı durumunda burkulma davranışı için azaltma faktörü (χ_{fi}), yüksek sıcaklıklarda gövde boşluklu kesitin akma mukavemeti ($f_{y,fi}$), minimum gövde genişliği (S_0) ve gövde kalınlığı (t_w)'dir.



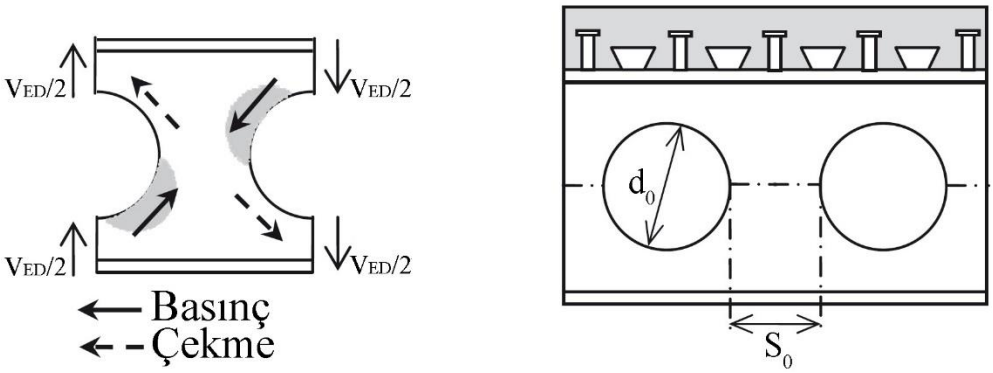
(a) (b)

Şekil 2.4 Gövde burkulması deney ve sayısal analiz sonuçları: (a) Deney sırasında oluşan gövde burkulmalarının görünümü, (b) Gövde burkulmalarının sonlu analiz programı ile modellenmesi (Najdai ve diğ, 2007).

Yüksek sıcaklıklarda gövde boşlukları arasında kalan etkin uzunluk (l_e) hesaplanırken,

$$L_e = 0.5\sqrt{S_0^{\,2} + d_0^{\,2}} \qquad (2.10)$$

bağıntısı kullanılmaktadır. Burada d_0 boşluk çapını göstermektedir. Gövde boşlukları arasındaki uzunluk boyunca etki eden düşey basınç kuvveti (V_t), gövde boşlukları arasındaki mesafenin orta noktasından mesnet noktasına kadar etki eden kesme kuvvetinin (V_{ED}) yarısı ($V_{ED}/2$) olarak ifade edilmektedir (Şekil 2.5a, b).



(a) (b)

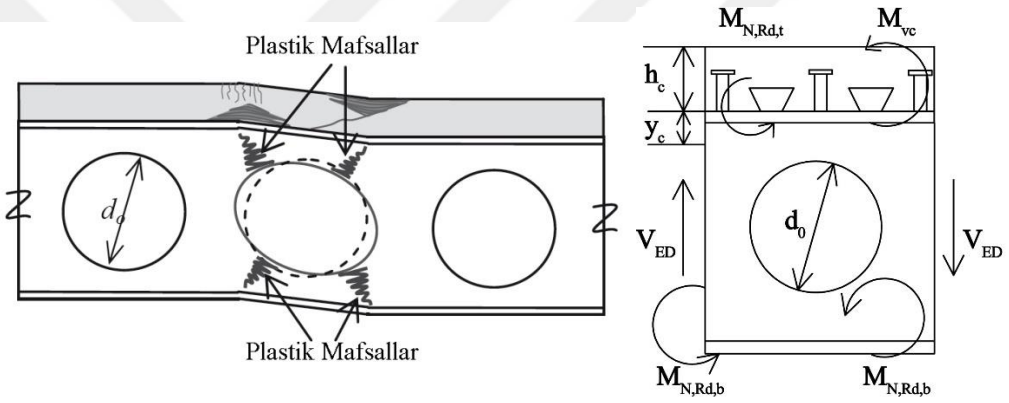
Şekil 2.5: Gövde boşlukları arasına etkiyen basınç ve kesme kuvvetleri: (a) Kiriş kesitine etkiyen basınç ve kesme kuvvetleri, (b) Yüksek sıcaklıklarda gövde boşlukları arasında kalan etkin uzunluğun (le) hesaplanması (Wong ve diğ. 2009).

2.2.2 Vierendeel Göçme

Gövde boşluklarının üst ve altındaki T elemanlarda plastik mafsal oluşumları ile Vierendeel göçme mekanizması olasıdır. Kesme kuvvetlerinin gövde boşlukları boyunca aktarılması T elemanlarında sekonder eğilme momentlerinin oluşumuna neden olmaktadır.

Sekonder momentler, eğilme momentleri ve kirişte eğilmeler sonucu meydana gelen eksenel kuvvetler ile birlikte gövde boşluklarının üst ve alt T bölgelerinde plastik mafsal oluşumlarını tetiklemektedir (Şekil 2.6a) (Wong ve diğ. 2009).

Kompozit kirişlerde, yüksek sıcaklıklarda kirişin üst T elemanı ve betonarme döşeme arasında meydana gelen zincir eğrisi etkisi boşluklar etrafında oluşan bazı plastik mafsalların Vierendeel eğilme kapasitesini arttırabilmektedir (Şekil 2.6b).



(a) (b)

Şekil 2.6: Gövdesi boşluklu kirişlerde yüksek sıcaklıklarda Vierendeel etkisi: (a) Gövde boşluğu etrafında plastik mafsal oluşumu, (b) Gövde boşlukları ve etrafına etkiyen moment ve kesme kuvvetleri (Wong ve diğ. 2009).

Yangın sırasında kirişin Vierendeel eğilme kapasitesi, gövde boşluklarının dört köşesinde oluşan yerel eğilme kapasiteleri ile hesaplanmaktadır.

Gövde boşluklu kirişlerde üst ve alt T elemanlarında oluşan plastik eğilme dayanımları $M_{N,Rd,t,fi}$ ve $M_{N,Rd,b,fi}$ ile ifade edilmektedir.

$$M_{N,Rd,fi}=M_{Rd,fi}\left[1-\left(\frac{N_{Ed,fi}}{N_{Rd,fi}}\right)^2\right] \qquad (2.11)$$

(2.11)'de $M_{Rd,fi}$ üst ve alt T elemanlarında oluşan yerel eğilme dayanımını belirtmektedir. Plastik dayanım için çelik enkesit sınıflandırılması 1 ve 2 olanlar, elastik dayanım için 3 ve 4 olanlar tercih edilmektedir.

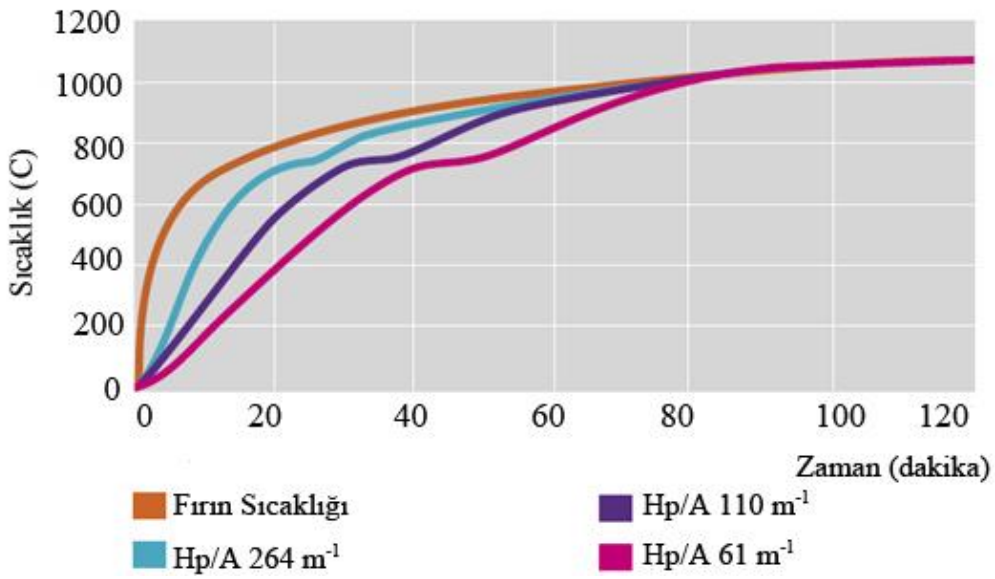
Yüksek sıcaklıklarda meydana gelen momente bağlı olarak oluşan eksenel basınç ya da çekme kuvveti $N_{Ed,fi}$ ile üst ve alt T elemanların eksenel dayanımı $N_{Rd,fi}$ ile gösterilmektedir. Üst eleman kesiti ile betonarme döşeme arasında zincir eğrisi etkisi sonucu oluşan eğilme dayanımı $M_{vc,fi}$ ile belirtilmektedir.

Gövde boşluklarında meydana gelen Vierendeel moment V_{Ed} ($0.5d_0$), destek noktasından tüm uzunluk boyunca etki eden kesme kuvveti $V_{Ed,}$ $0.5d_0$ olarak hesaplanmaktadır (Wong ve diğ. 2010).

2.3 Çelik-Betonarme Kompozit Kirişlerde Yangın Yalıtımı

Gövdesi boşluklu kompozit kirişlerde sıcaklık dağılımları incelendiğinde, kompozit kirişlerde üst başlığın döşeme tarafından korunmasından dolayı alt başlığa göre sıcaklık artışı çok daha yavaş olmaktadır.

Yangın sırasında gövdesi boşluklu çelik kirişlerde sıcaklık artışı kesit faktörüne [A/V] ya da [Hp/A'ya] bağlı olarak değişmektedir. Burada, A yangına maruz kalan yüzey alanı, V hacim ve Hp yangın etkisinde kalan yüzey uzunluğudur.



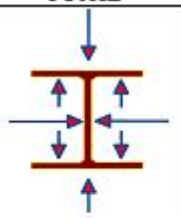
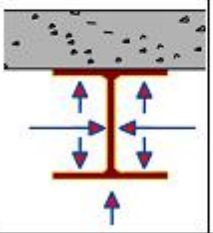
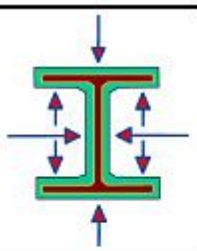
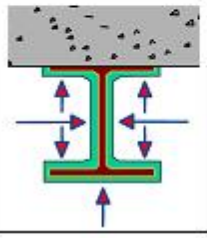
Şekil 2.7: Farklı kesit oranlarına sahip elemanların yangın dayanımları (Url-3).

Kesit faktörü, kirişin yangına maruz kalan yüzey uzunluğunun kesit alanına olan oranı olarak ifade edilmektedir. A/V oranı büyüdükçe çelik profilin içindeki sıcaklık hızlı bir artış göstermekte ve dayanım kaybı daha kısa bir sürede gerçekleşmektedir (Şekil 2.7).

Yangın korumasız kirişlerde kesit faktörü, yangına maruz kalan yüzey sayısına bağlı olarak değişkenlik gösterirken, korumalı kirişlerde yüzey sayısına ve kullanılan yalıtım tipine bağlı olarak farklılıklar ortaya çıkmaktadır (Çizelge 2.3). Korumasız çelik kirişlerde yangın sırasındaki sıcaklık artışı Eurocode 3 (EN 1993-1-2, 2004)'de formüle edilmiştir. Bu bağıntı ile kesit boyunca sıcaklık dağılımının eşit olduğu düşünülerek hesaplar yapılabilmektedir:

$$\Delta\theta_{A,T}=k_{sh}\,\frac{\frac{A_m}{V}}{c_a\rho_a}\,h_{net,d}\,\Delta t\ [C°] \qquad (2.12)$$

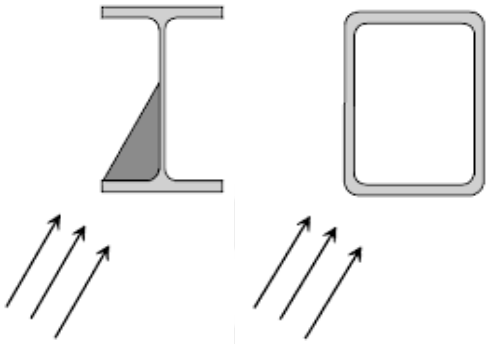
Çizelge 2.3: Yalıtımlı ve yalıtımsız kirişlerin kesit faktörlerinin hesaplanması (Franssen, Real, 2010).

	I Profil	Açıklama	Kesit Faktörü A/V - Hp/A
Yalıtımsız		Dört taraftan ısıya maruz kalan çelik kiriş	Çeliğin çevre uzunluğu / Çeliğin en kesit alanı
Yalıtımsız		Üç taraftan ısıya maruz kalan çelik kiriş	**Alevlere maruz kalan çeliğin çevresi / Çeliğin enkesit alanı**
Yalıtımlı		**Dört** taraftan ısıya maruz kalan yalıtımlı çelik kiriş	Çeliğin çevre uzunluğu – b / Çeliğin en kesit alanı
Yalıtımlı		**Üç** taraftan ısıya maruz kalan yalıtımlı çelik kiriş	**Alevlere maruz kalan çeliğin çevresi / Çeliğin enkesit alanı**

Bağıntıda k_{sh} gölge faktörü olarak isimlendirilmektedir. I ve H gibi açık kesitli profiller yangına maruz kaldığında çelik kesitte ısı iletimi sırasında kısmi olarak gölgelenmekte (Şekil 2.8a), bir başka deyişle, kutu profillerde olduğu gibi profilin çevresinden ısı iletimi gerçekleşmektedir (Virdi, Wickstörm, 2013) (Şekil 2.8b).

Gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için gölge faktörünün yangın korumasız açık kesitlerde hesaplamaya katılması gerekmektedir.

Hesaplamaya katılmaması durumunda bu faktör $k_{sh}=1$ alınabilmektedir. Virdi ve Wickström tarafından yapılan sayısal analiz çalışmasında gölge etki faktörü göz önüne alınan kirişlerde, gölge etki hesaplamaya katılmayan kirişlere göre, sıcaklık artışının daha düşük olduğu ve buna bağlı olarak göçme süresinin uzadığı belirtilmektedir (Virdi, Wickstörm, 2013).



Şekil 2.8: Gölge etki faktörü: (a) I profile etkiyen gölge etkisi, (b) Kutu profillerde gölge etki faktörünün etkisi bulunmamaktadır (Franssen, Real, 2010).

I kesitlerde gölge etki faktörü,

$$K_{sh}=0.9\frac{\left[\frac{A_m}{V}\right]_b}{\left[\frac{A_m}{V}\right]} \qquad (2.13)$$

ile hesaplanmaktadır. $[A_m/V]_b$ kesit faktörü hesaplanırken kutu profil olarak hesaplanmış olan değer dikkate alınmaktadır (2.13). Yalıtımsız çelik eleman için kesit faktörü tüm kesitler için $[A_m/V] \geq 10$'un altında olmalıdır. Birim uzunlukta yangına maruz kalan yüzey alanı A_m, birim uzunluktaki hacim (V), çeliğin özısısı (ca), birim alandaki net ısı akısı ($h_{net,d}$), zaman aralığı (Δt) $\leq$ 5 (sn.)'dir (Franssen, Real, 2010).

Taşıyıcı sistemin yangına karşı korunmasında yangın dayanım süreleri; 30, 60, 90, 120 dakika olarak belirlenmiştir. Bu süreler bina kullanım sınıfı, bina yüksekliği ve binada aktif yangın koruma sistemi olan yağmurlama (sprinkler) kullanılmasına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (BYKHY, 2015). Çelik kirişlerin kullanılacağı yapının sınıfı, yangın dayanım süresi ve kesit faktörü göz önüne alınarak yalıtım türüne ve kalınlığına karar verilmektedir.

Yalıtımlı çelik kirişlerde sıcaklık dağılımı EN 1993-1-2 (2004) tarafından aşağıdaki gibi verilmektedir:

$$\Delta\theta a,t = \frac{\lambda p \cdot \frac{Ap}{V}}{dp\ ca\ \rho a} \frac{(\theta g,t-\theta a,t)}{1+\frac{\emptyset}{3}} \Delta t - \left(e^{\frac{\theta}{10}} - 1\right)\Delta\theta g,t \qquad (2.14)$$

$$\Delta\theta_{a,\,t} \geq 0,\ \Delta\theta_{g,t} > 0$$

Burada ø hesaplanırken,

$$ø = \frac{cp.\rho p}{ca.\rho a}\ dp\frac{Ap}{V} \qquad (2.15)$$

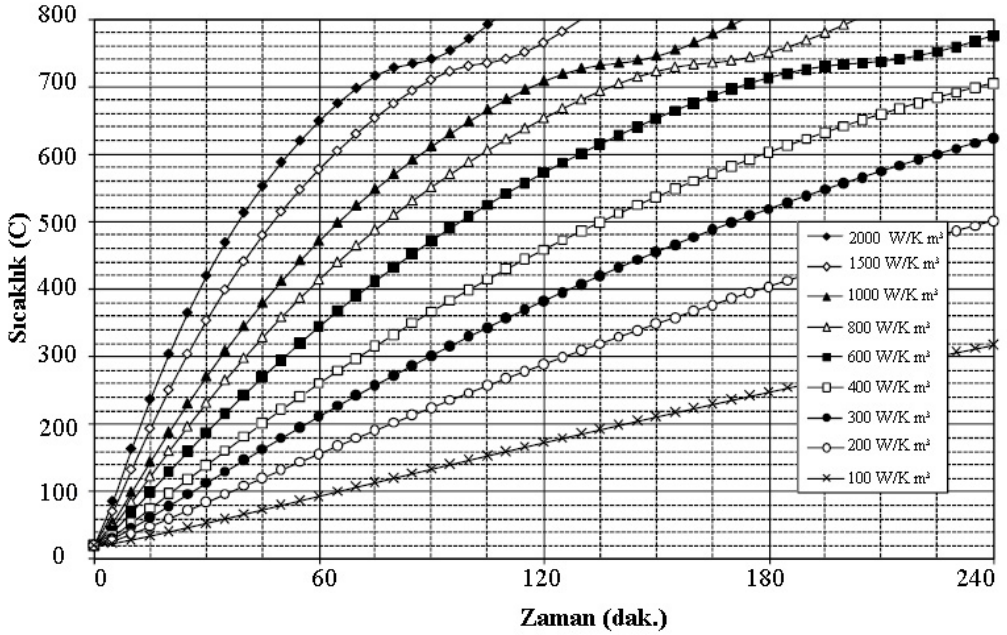
bağıntısı kullanılmaktadır.

Burada A_p/V yangın yalıtımlı çelik kirişin kesit faktörü, c_p birim uzunlukta (A_p) yalıtım malzemesinin ısısını, d_p yalıtım malzemesinin kalınlığını, $\theta g,t$ zaman aralığındaki (t) gaz sıcaklığını, $\Delta\theta_{g,t}$ gaz sıcaklığının belirli zaman aralığındaki (Δt) artışını, $\theta_{a,t}$ t zaman aralığındaki çeliğin sıcaklığı, λ_p yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini, ρ_p yalıtım malzemesinin birim ağırlığını ve $\Delta t \leq 30$ saniye olmak üzere zaman aralığını göstermektedir (2.14), (2.15).

ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisinin kullanıldığı yalıtımlı kirişlerde, sıcaklık dağılımı yalıtım malzemesinin barındırdığı nem miktarına bağlı olarak hapsolan ısı miktarı göz önüne alınmadan hesaplanabilmektedir (2.16).

$$\frac{Ap}{V} \cdot \frac{\lambda p}{dp} \qquad (2.16)$$

Bu bağıntı ISO 834 yangın eğrisine göre düzenlenmiştir. (2.16) ile sıcaklığa ve zaman değişkenlerine bağlı olarak oluşturulan grafikler yardımı ile bağıntı kullanılmadan hesaplama yapılabilmektedir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9 ISO 834 yangın eğrisi altındaki yalıtımlı elemanlarda sıcaklığın zamana bağlı değişimi (Franssen, Real, 2010).

Çelik kirişlerin yangına karşı yalıtılmasında püskürtme (vermikülit-magnezyum mikası ya da mineral fiber esaslı malzemeler), plakalar ile kaplama (kutuya alma), beton-tuğla ile blok koruma yöntemlerinin yanısıra günümüzde kabaran (şişen) (intumescent) boyalar da sıkça kullanılmaktadır.

Püskürtme yönteminde çimento esaslı karışımlar ya da mineral esaslı lifli malzemeler çelik yüzeyine doğrudan uygulanmaktadır. Bu koruma yönteminde kullanılan koruyucu malzeme karışımı, çelik elemanların yüzeylerine tabancalarla püskürtülerek çelik elemanların çevresi sarılmaktadır. Hızlı ve ekonomik bir yöntem olduğu için tercih edilmektedir (Tama, 2012).

Çelik kirişler alçıtaşı, taş yünü, perlit ve vermükulit içeren yanmaz sınıfı bileşenlerden oluşan plakalar ile de kaplanabilmektedir. Bu yöntem kutuya alma ya da çerçeveleme sistemler olarak da adlandırılmaktadır. Plakalar çelik kiriş yüzeyine profiller yardımı ile yerleştirilebileceği gibi yapıştırılarak da uygulanabilmektedir (Demirel, Özkan, 2003).

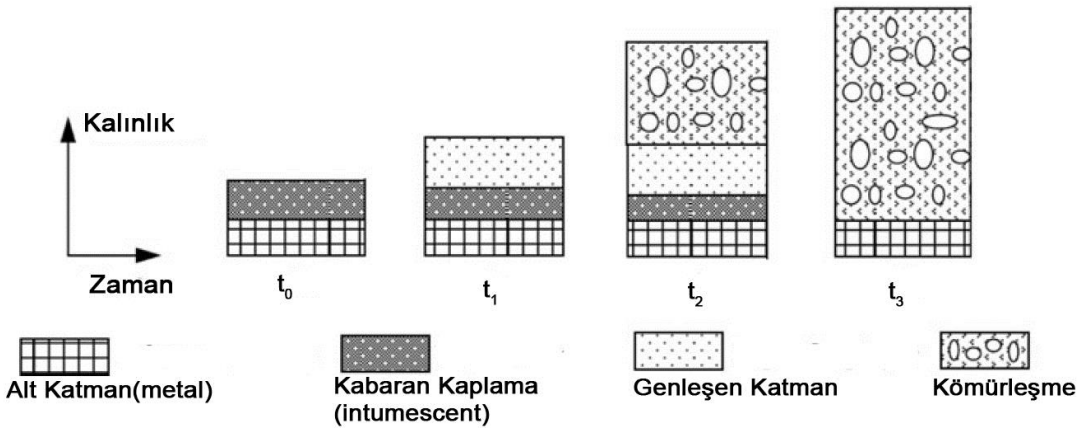
Yangına dayanıklı olan tuğla, taş ya da beton bloklar ile de yalıtım sağlanabilmektedir. Bu yöntem yapıya getirdiği ek yükler nedeni ile günümüzde çok fazla tercih edilmemektedir. Beton kaplama çelik yapıların yalıtılmasında 1970'lerin sonuna kadar yaygın bir biçimde kullanılmıştır.

Püskürtme, plakalar ile kaplama ve kabaran (şişen) boyaların kullanılması gibi yeni yöntem ve malzemelerin geliştirilmesiyle, günümüzde çok az kullanılan bir yöntem haline gelmiştir.

Beton kaplama yönteminde yangın dayanım süresi, betonda kullanılan agregaların tipine ve karışım oranlarına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Tama, 2012).

Kabaran (şişen) (intumescent) boyalar 15, 30, 45, 60, 90 ve 120 dakikaya kadar yangın dayanımı sağlayabilmekte, ince ve kalın filmli kaplamalar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İnce film kaplamalar selülozik yangınlarda kullanılmaya uygun olup içerdiği bileşikler nedeniyle su ve solvent bazlı olarak adlandırılmaktadır. Su bazlı ince film kaplamalar kapalı alanlarda, solvent bazlı kaplamalar ise açık hava koşullarındaki uygulamalarda tercih edilmektedir. Kalın film boyalar genellikle epoksi esaslı olup hidrokarbon yangın riski olan endüstriyel tesislerde ve açık hava uygulamalarında kullanılmaktadır.

Kabaran (şişen) boyalar200~ 250 C°'de reaksiyona başlamaktadır. Çeliğin dış yüzüne ince bir tabaka halinde uygulanan kaplama, ısı ve alev etkisi ile genleşerek özgün kalınlığının 50 katına kadar ulaşabilmekte ve çelik malzeme yüzeyinde kömürleşmiş bir yalıtım katmanı oluşturabilmektedir (Şekil 2.10) (Li ve diğ. 2012).



Şekil 2.10: Kabaran (şişen) boyaların (intumescent coatings) sıcaklık karşısındaki davranışları (Li, Lou, Zhang, Wang, 2012).

Bu tez kapsamında iki adet numune su ve solvent esaslı 60 dakika yangına korunumlu ince film kabaran (şişen) boyalar ile kaplanmıştır. İki numune ise yangın korumasız bırakılmıştır.

Gövdesi boşluklu kirişlerde yangın yalıtımı yapılırken kirişin gövde ve alt başlık elemanlarının kesit faktörü hesaplanarak yalıtım kalınlığına karar verilmiştir (Bölüm 3.7).

2.4 Gövdesi Boşluklu Çelik- Betonarme Kompozit Kirişler ile İlgili Gerçekleştirilen Yangın Deneyleri

İngiltere'de 1995-1996 yılları arasında Cardington araştırma programı kapsamında, tam ölçekli, sekiz katlı çelik taşıyıcı sistemli çelik-betonarme kompozit döşemeli bir yapıda altı deney yapılmıştır (Newman, Simms, 1999). Bu deney ile yüksek sıcaklıklarda çelik kirişlerde meydana gelen göçme modları, alt başlıklarda burkulmalar, sıcaklık etkisinde eğilmeler ve döşemede meydana gelen ikincil yük taşıma (membran etkisi) durumu incelenmiştir. İlk kez standart küçük ölçekli fırın deneylerinden sonra yapılan tam ölçekli gerçek bir deney olması nedeni ile literatürde önemli bir yere sahip olup çelik yapılarda yürütülen deneylerin öncüsü olarak kabul edilmektedir.

Liu ve diğ. (2002) Manchester Üniversitesi'nde gerçekleştirilen deneylerde çelik kirişlerin yangın karşısında strüktürel davranışları ve göçme durumlarını incelemiştir. Çokça kullanılan kolon- kiriş bağlantı tipleri olan gövde ve alın plakalarının yüksek sıcaklıklardaki davranışları araştırılmıştır.

Üç farklı yükleme seviyesi ile gerçekleştirilen deneylerde, kirişte göçme yerdeğiştirmelerinin BS 476-20'de (1987) belirtildiği gibi kiriş açıklığının L/20'sine ulaştığında (bu değer deneylerde 100 mm ölçülmüştür) gerçekleştiği varsayılmıştır.

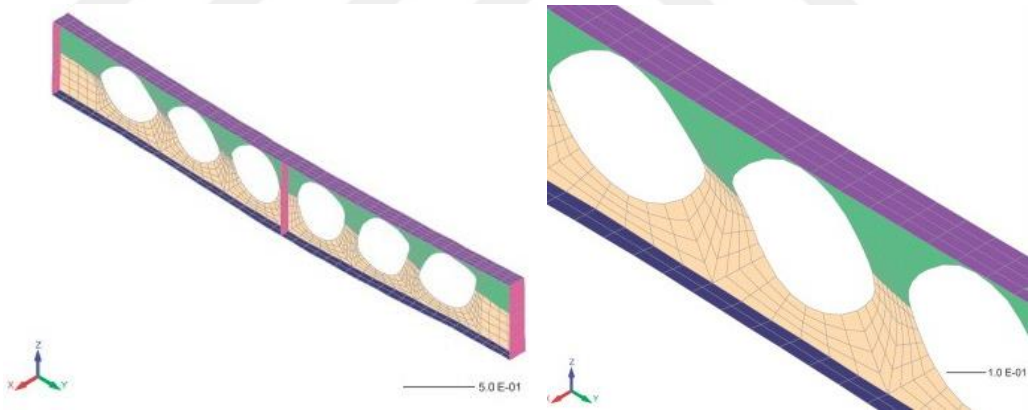
Yangın korumalı ve korumasız gövde boşluklu kirişlerin yangın performanslarıyla ile ilgili ilk çalışmalar Bailey (2004) tarafından yapılmış olup çalışma tekil eleman düzeyinde, yangın korumalı ve korumasız gövdesi boşluklu ve boşluksuz çelik kirişlerde ulaşılan sıcaklıklar üzerine yoğunlaşmıştır. 1,5m³'lük bir deney fırınında yükleme yapılmadan gerçekleştirilen deneylerde gövdesi boşluklu ve dolu kirişlerde kullanılan yangın koruma malzemesinin türüne (su ve solvent bazlı kabaran (şişen) boyalar) ve kalınlığına (0.8 ve 2.1 mm) bağlı olarak alt başlıklarda, gövdenin boş ve dolu bölümlerinde meydana gelen sıcaklık farkları analiz edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda yangın korumalı boşluklu kirişlerin gövde boşluklarında yüksek sıcaklık elde edilmesinin nedeni olarak "pull back" olarak adlandırılan "geri çekilme" olayı gösterilmektedir. Bu olay kirişlerin boşluklarında kömürleşen malzemenin geri itilmesi ile dairesel boşluğun iç çevresinin korumasız duruma gelmesi şeklinde açıklanmaktadır. Gövdesi boşluklu kirişlerde alt başlık ve gövde boşluklarında elde edilen sıcaklık farklarının "pull back" etkisinden kaynaklandığı ve bunun kullanılan

yalıtım malzemesinin türü ve kalınlığından kaynaklandığı öngörülmektedir (Bailey, 2004).

Najdai ve diğ. (2007) tarafından yürütülen çalışmanın amacı, portatif bir test düzeneği içinde gövdesi boşluklu kirişlerin gövde burkulma sıcaklıkları ve yerdeğiştirmeleri hakkında ısınma ve soğuma fazında veri sağlamak olarak açıklanmıştır. Çalışma, deneysel ve sayısal analizleri içermektedir (Şekil 2.11a). Bu kapsamda simetrik ve asimetrik kirişlerde dört adet tam ölçekli deney yapılmıştır. Kiriş açıklığı 4.5m olup yükleme tek ve iki noktadan hidrolik krikolar ile yapılmıştır. BS 5950-1'e (2000) göre yükleme yapılmış, bir kirişte meydana gelecek maksimum yerdeğiştirme olarak L (açıklık)/20 alınmıştır.

Deneylerde elde edilen maksimum yerdeğiştirme göçme meydana gelmeden hemen önce 10mm olarak ölçülmüştür; bu değer İngiliz standartlarına uyum sağlamaktadır.

Kirişlerde gövde burkulması meydana geldikten sonra ise gövde boşluklarının etrafında meydana gelen plastik şekildeğiştirmeler ile gövdede S şeklinde burkulmalar gözlenmiştir (Şekil 2.11b).



(a) (b)

Şekil 2.11: Deney sonunda kirişte oluşan deformasyonlar: (a) Kirişte deney sonunda meydana gelen eğilme ve gövde burkulma göçme modları, (b) Boşluklar arası gövde burkulmalarının görünümü (Najdai ve diğ, 2007).

Li ve Guo (2008) basit mesnetli çelik kirişlerin yangın koşulları altındaki davranışlarını ve oluşan zincir eğrisi etkisini incelenmişlerdir. Isınma fazında genleşmeye bağlı olarak eksenel basınç kuvveti oluşmaktadır.

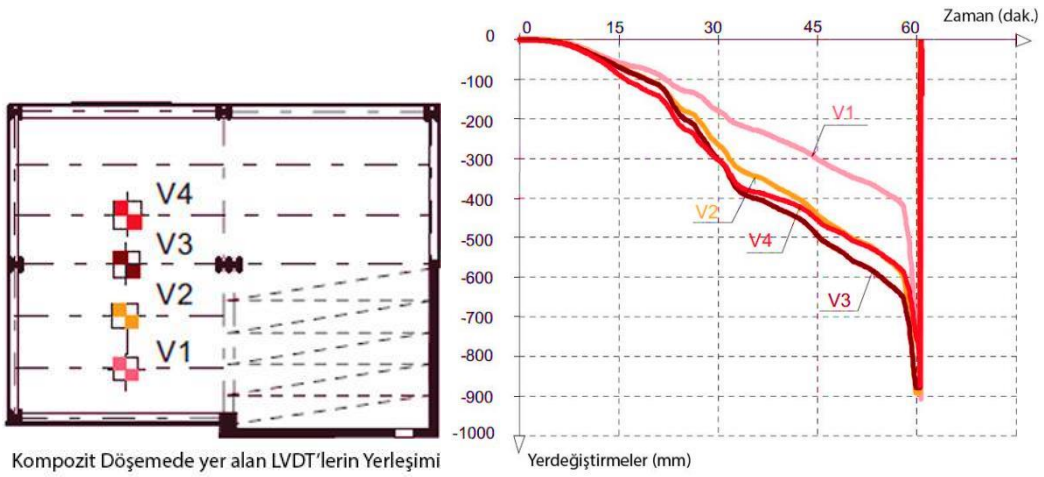
Kirişteki yerdeğiştirmelerin etkisine bağlı olarak zincir eğrisi etkisi ile kirişlerde eksenel kuvvet basınçtan çekmeye doğru değişmektedir.

Kirişte büyük oranda yerdeğiştirmeler ölçülmüştür. Yerel burkulmalar basit mesnetli kirişin mesnet noktalarına yakın alt başlık bölgesinde gözlenmiştir.

Dong ve Prasad (2009) tam ölçekli çelik iskelet üzerinde ve farklı ısıtma koşulları altında deneyler gerçekleştirmişlerdir. Yapılan deneyler ile kompozit kirişlere ve çelik kolonlara yerleştirilen ısıl çiftlerden ve yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen veri ile sayısal modellerin geçerliliğinin sağlanması hedeflenmektedir. Kompozit kirişlerin yangına dayanımı kolonlar ile karşılaştırıldığında daha fazla çıkmıştır. Tipik bir çelik yapı taşıyıcı sisteminde kolonların yüksek sıcaklıklarda gösterdikleri eğilme davranışının engellenmesi için mutlaka yangına korunumlu hale getirilmesi öngörülmüştür. Kompozit kirişlerde, kolonlar ile karşılaştırıldığında, yangın yalıtımı az olabileceği ya da hiç yapılmayabileceği belirtilmiştir.

Wald ve Kallerova (2010) Mokrsko'da (Çek Cumhuriyeti) tam ölçekli 12x18x4m boyutlarında bir kompartman deneyi ile çelik kompozit sistemin davranışını incelemişlerdir. Gövde boşlukları altıgen ve sinüs geometrisi şeklinde olan kirişlerin kullanılmasının yanısıra, oluklu dolu gövdeli I-kirişler de incelenmiştir (Şekil 2.12a). Yapılan deneyde kolonlar, ana ve köşe kirişler iki saat yangın dayanımı sağlayacak şekilde alçı plakalar ile yalıtılırken, tali kirişler korumasız olarak bırakılmıştır. Sistemin yüklenmesi yayılı yük olarak düşünülmüş ve bu plastik torbalara doldurulan işlenmemiş çelik ile sağlanmıştır.

Korunmamış altıgen boşluklu kirişlerin orta açıklığında alt başlıklarda 23. dakikada 450 C°'de elde edilen yerdeğiştirme 135 mm, 33. dakikada sıcaklık 800 C°'ye çıktığında yerdeğiştirmeler 368 mm'ye ulaşılmıştır. 58. dakikada sinüs boşluklu kirişlerin üzerinde yer alan betonarme tablada düşey yerdeğiştirmeler hızlı bir artış göstermiştir. Betonarme döşemede ilk hasar 62. dakikada deney soğuma fazına geçtiğinde görülmüştür (Şekil 2.12b). Bu sırada tali kirişlerin orta noktasında alt başlıklarda sıcaklık 900 C°'ye ulaşılmıştır. Gövdesi dolu ve oluklu kirişlerin gövdesinde elde edilen maksimum yerdeğiştirme 780 C°'de 256 mm, oluklu kirişlerin üzerinde yer alan betonarmede ölçülen yerdeğiştirme ise 250 mm'dir.



(a) (b)

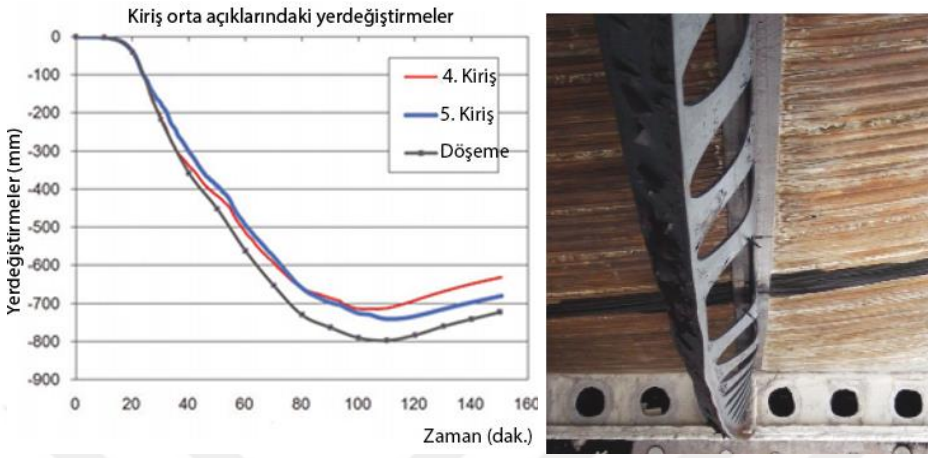
Şekil 2.12: Wald ve Kallerova (2010) deney veri ve sonuçları: (a) Plan düzleminde döşemede LVDT'lerin konumları, (b) Boşluklu kirişlerin üzerinde yer alan kompozit döşemede meydana gelen yerdeğiştirmeler (Wald, Kallerova, 2010).

Najdai ve diğ. (2011)'nin yaptıkları çalışmada amaç L=15m açıklık geçen dairesel gövde boşluklu kompozit kirişlerin tam ölçekli kompartman deneyi ile yüksek sıcaklıklarda davranışlarının analiz edilmesidir. Bu kapsamda 9.6m x 15.6m x 2.88m boyutlarında bir kompozit çelik kompartman inşa edilmiştir.

Betonarme döşeme kalınlığı h_f=120mm olan sistemde yükleme yapının bir ofis binası olduğu varsayılarak yapılmıştır. Sıcaklık artışı parametrik yangın eğrisi EN 1991-1-2 (2003)'de belirtildiği üzere düzenlenmiştir.

Deney düzeneği Bailey'nin geliştirmiş olduğu Fracof ya da Bailey olarak adlandırılan yönteme göre düzenlenmiştir. Bu yöntemde kolonlar ve ana kirişler 2 saat yangın dayanımı sağlayacak şekilde kabaran (şişen) boyalar ile kaplanmakta, tali kirişler ise tamamen korumasız bırakılmaktadır. Böylece, betonarme döşemede yüksek sıcaklıklarda oluşan zincir eğrisi etkisi ile sistemde göçme olmamaktadır. Deney sırasında korumasız tali kirişlerin orta açıklığında ölçülen maksimum sıcaklık 1053 C°'dir. Elde edilen maksimum yerdeğiştirme 783mm 112 dakikadan sonra betonarme döşemede deney soğuma fazına girdiğinde elde edilmiştir (Şekil 2.13a). Deney sonucunda gerçek yangın koşulları altında büyük açıklıklı gövdesi boşluklu kompozit kirişlerde yüksek sıcaklıklarda yanal burkulma gözlenmektedir (Şekil 2.13b). Gövde burkulması ve Vierendeel göçme mekanizmalarının küçük ölçekli deneylerde meydana geldiği belirlenmiştir.

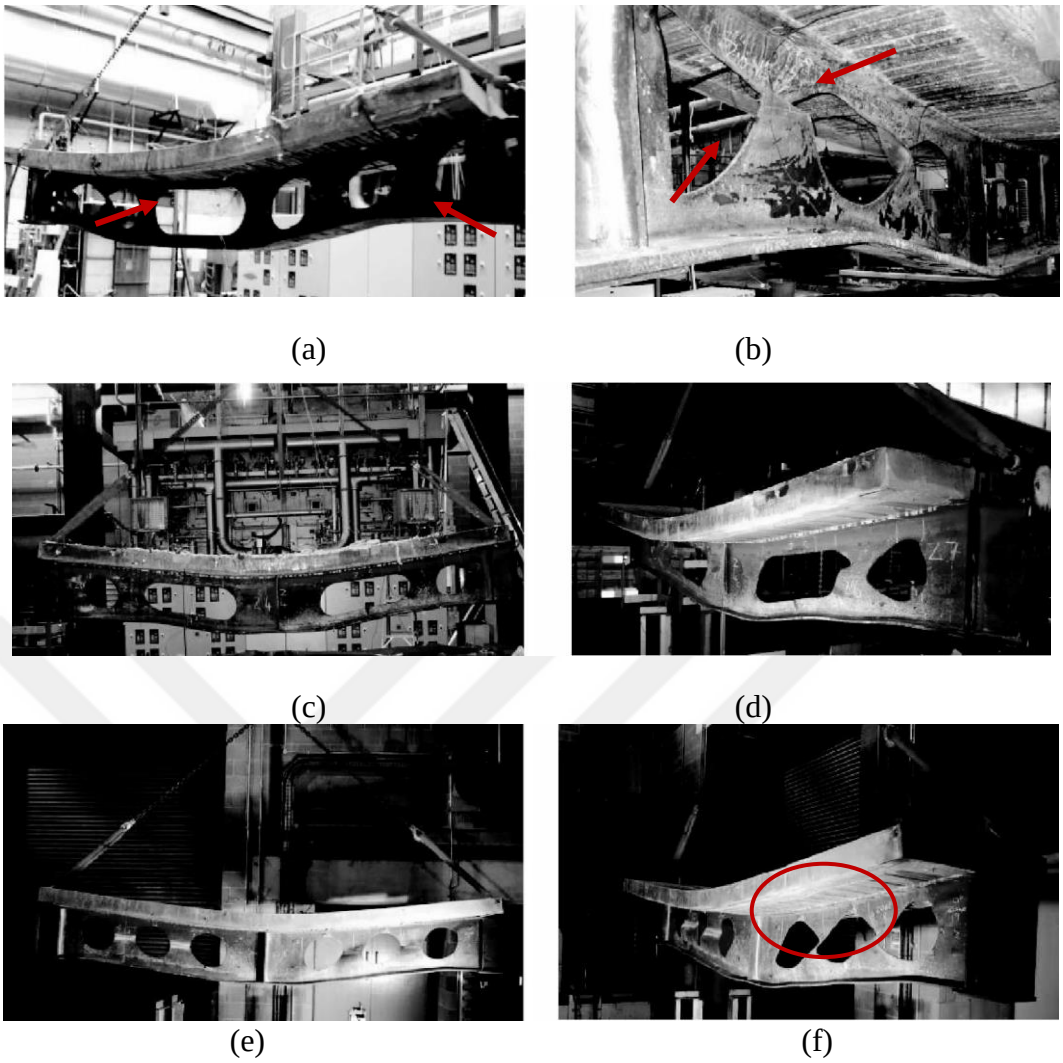
Burkulma davranışı meydana geldiğinde kirişin yalnızca boşluk üstü T- kesitli elemanın zincir eğrisine katkıda bulunduğu ve deneyin Bailey yöntemini geçerli kıldığı üzerinde durulmuştur.



(a) (b)

Şekil 2.13: Najdai ve diğ. (2011) deney sonuçları: (a) Kiriş ve döşemelerde ölçülen yerdeğiştirmeler, (b) 4. Kirişte göçme durumu (Najdai ve diğ., 2011).

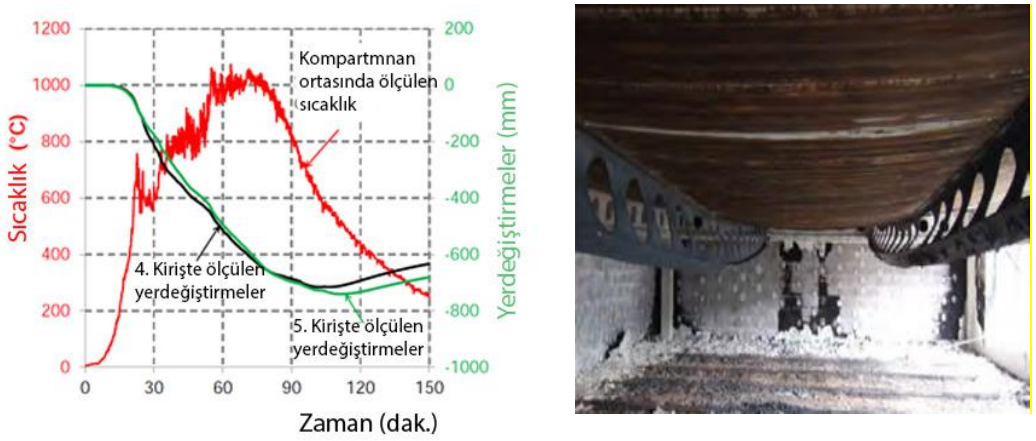
Sanghoon ve diğ. (2012) yürütülen deneylerde korumalı ve korumasız farklı boşluk boyutları olan boşluklu kirişlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemişlerdir. Üç adet tam ölçekli deney düzeneği oluşturularak korumalı ve korumasız 4.5 m açıklık geçen üç farklı geometriye sahip kiriş üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Birinci kiriş iki noktadan, diğer ikisi ise tek noktadan yüklenmiştir. Deneyden elde edilen maksimum sıcaklıklar kirişlerin alt gövde bölgelerinde, en düşük sıcaklıklar ise betonarme döşemeden dolayı üst başlıklarda gözlenmiştir. Beklendiği üzere, göçme anında, korunmuş kirişlerde elde edilen sıcaklıklar ve yerdeğiştirmeler korunmayanlara göre daha fazladır. Birinci kirişte göçme 49. dakikada meydan gelmiş olup sıcaklık 920 C°'ye çıkmıştır; ölçülen yerdeğiştirme 254 mm'dir. İkinci ve üçüncü kirişlerde 870 C° sıcaklıkta yerdeğiştirmeler sırasıyla 249 mm ve 253 mm'dir. Bütün kiriş kesitlerinde sıcaklığa bağlı olarak dayanım ve taşıma gücünde azalmalar görülmüştür. Gövde burkulmaları çeliğin sıcaklığı 600 C°'ye çıktığında izlenmiştir. Bu noktada, çelik dayanımının yarısını kaybetmiş ve elastisite modülü oda sıcaklığındaki değerin %20'sine kadar azalmıştır. Ortam sıcaklığı 750 C°'ye çıktığında çelik kirişlerde meydana gelen göçmeye bağlı olarak elastisite modülünde çeliğin dayanım tasarım limitinden çok daha hızlı bir azalma olmuştur (Şekil 2.14a, b, c, d, e, f).



Şekil 2.14: Sanghoon ve diğ. (2012) deney sonuçları: (a) Eğilme, (b)Gövde burkulması, (c)Vierendeel göçme biçimi, (d) Gövde burkulması, (e) Gövde burkulması, (f)Vierendeel göçme biçimi (Sanghoon ve diğ, 2012).

Bihina ve diğ. (2012) doğal yangın koşulları altında korunmamış kompozit gövde boşluklu kirişlerin sıcaklık dağılımlarını, yerdeğiştirme ve şekildeğiştirmelerini deneysel olarak incelemişlerdir. Kompartman boyutları 15m x 9m x 3m olup betonarme döşeme kalınlığı h_f= 120mm'dir. Yükleme, yapının bir ofis binası olduğu düşünülerek yapılmıştır. Maksimum yerdeğiştirme 750 mm elde edilmiş, bu değer izin verilen sınır değerin altındadır (L/20) (Şekil 2.15a). Korunmamış kirişlerde göçme modu yanal gövde burkulmaları şeklindedir (Şekil 2.15b). Maksimum düşey kesme kuvvetleri her iki tarafından tutulu olan korumasız kirişin uç boşluk noktalarında gövde burkulmasına neden olmuştur. Kirişin merkezinde ise döşeme dönüşüne bağlı olarak dışa doğru eğilmeler ve yanal burulmalar gözlenmiştir. Döşemede meydana gelen göçme, döşemede yer alan çelik hasır donatının hatalı olarak yerleşiminden

kaynaklanmakta olup betonarme döşeme boyunca geniş ve derin çatlaklar meydana getirmiştir (Bihina ve diğ, 2012).



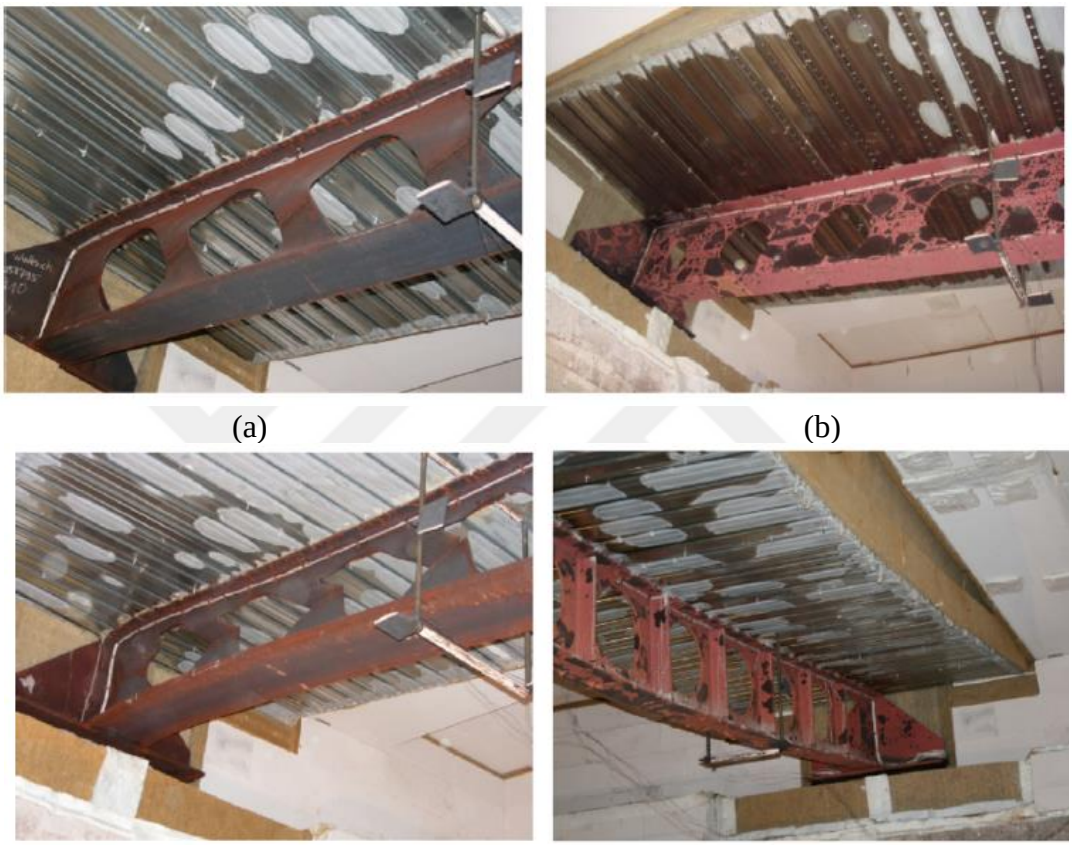
(a) (b)

Şekil 2.15: Bihina ve diğ. (2012) deney sonuçları: (a) Deneyden elde edilen sıcaklık ve yerdeğiştirme eğrileri, (b) Yalıtımsız kirişlerin göçme modları (Bihina, Zhao, Bouchair 2012).

Nyugen ve Tan (2012) çelik betonarme kompozit bir sistemde yüksek sıcaklıklar karşısında betonarme döşemenin ve korumalı ana çerçeve kirişleri ile korumasız tali kirişlerin kompozit döşeme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir; deney ¼ oranında ölçeklendirilmiş elemanlar ile gerçekleştirilmiştir. Yangın korumalı kirişler 400C°'ye kadar çok yavaş oranda eğilme ve yerdeğiştirmeler göstermiş, kiriş alt başlıklarında sıcaklık 500 C°'ye çıktığında ise burkulmalar gözlenmiştir. Bu noktadan sonrada kirişlerin taşıma gücü önemli ölçüde azalmaya başlamıştır. Sonuç olarak, çalışmada tali kirişlerin varlığının döşeme ve köşe kirişler arasındaki yük dağılımını etkilediği, bu etkinin de yüksek sıcaklıklarda betonarme döşemede meydan gelen çatlakların gelişiminde rol oynadığı tespit edilmiştir. Bu çalışma, ölçeklendirilmiş olduğundan dolayı sistemin gerçek davranışının belirlenmesi bakımından kısıtlamalar içermektedir.

Bihina ve diğ. (2013) tarafından yapılan dört tam ölçekli deney, farklı dairesel geometrilere sahip simetrik ve asimetrik kompozit boşluklu kirişlerin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını ölçmek amacıyla gerçekleştirilmiştir; deneyde yükleme iki noktadan yapılmıştır. Çalışmada maksimum yerdeğiştirmeler standart yangın deneylerinde belirtilen L/20 ya da L/30 değerlerinin arasında kalmıştır. Üç kirişte düşey yerdeğiştirmeler sıcaklık 500 C°'ye ulaştığında, 4. kirişte ise 400 C°'ye ulaştığında devamlı artış göstermektedir. Sıcaklık üç kirişte 700~750 C°, 4. kirişte ise

550~ 600 C°'lere çıktığında hızlı bir yükseliş göstermiştir. Birinci ve üçüncü kirişlerde göçme, gövde burkulması olarak mesnet noktalarına yakın bölgelerde gözlenmiştir. Üçüncü kirişin boşluk üstü ve altı T kesit elemanlarında yırtılmalar meydana gelmiştir. Birinci ve dördüncü kirişte göçme modu gövde burkulması ve eğilme olarak saptanmıştır. İkinci kirişte ise dairesel boşlukların çapı diğer kirişlere göre daha fazla olup bu kirişte gövde burkulması meydana gelmemiş, göçmesi eğilme olarak izlenmiştir (Şekil 2.16a, b, c, d) (Bihina, Zhao, Bouchair, 2013).



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 2.16: Deney sonrası kompozit kirişlerde meydana gelen göçme durumları: (a) Gövde burkulması, (b) Üst T kesit elemanında yırtılmalar, (c) Vierendeel eğilme, (d) Alt T kesit elemanında yırtılmalar (Bihina, Zhao, Bouchair, 2013).

Bu doktora tez çalışmasının yukarıda açıklanan konuyla ilgili çalışmalardan ana farkları:

- Kiriş numunelerinin yüksek sıcaklıklarda gövdelerinin dolu/boşluklu ve yalıtımlı/ yalıtımsız farklı durumlarda incelenmesine olanak sağlaması,
- Gövde boşluklu numunelerde geniş daire çapları seçilerek narinlik oranı yüksek gövde kesitleri denenmiştir. Yapılan literatür taramasında bu geometrik özelliklere sahip kirişlerle yapılan tam ölçekli deneylerin çok sınırlı olması,

- Deney kapsamında içerikleri farklı yalıtım malzemelerinin (su ve solvent) kullanılmış olması ve bu yalıtım malzemelerinin yüksek sıcaklıklardaki performanslarının değerlendirilmesinr olanak sağlaması,
- Deneyler sırasında numunelerin döşemesinde bulunan trapez sac ile kiriş üst başlığı arasında yalıtım yapılmamış ve bu etkinin kirişin yüksek sıcaklıklarda gösterdiği davranışa etkisinin incelenmesi,
- Deneyler sırasında kompozit döşemede yüksek sıcaklıklarda meydana gelen değişimler de gözlenmiş ve deney sonrası malzeme deneyleri yapılmış olması,

olup bu açılardan özgünlük göstermektedir.

3. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT I-KİRİŞ NUMUNELERİNİN YANGINA DAYANIM DENEYLERİ

3.1 Malzeme Deneyleri

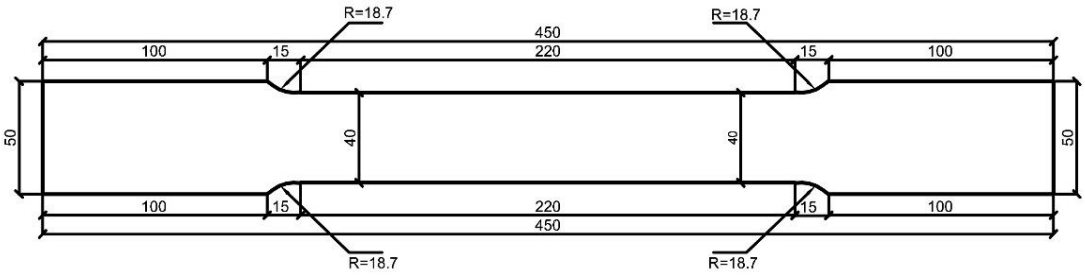
Çekme kupon deneylerinin amacı yangın deneylerinde kullanılacak olan çelik profillerin mekanik özelliklerini belirleyebilmektir. Numunelerin akma ve kopma dayanımlarını tam olarak belirleyebilmek ve gerilme-şekildeğiştirme eğrilerini elde edebilmek için yangın deneylerinde kullanılan 4 kiriş için IPE 140'lık, çelik kalitesi S 275 JR olan hadde profilleri olmak üzere toplam 12 adet çekme numunesi için malzeme deneyleri yapılmış, gerilme-şekildeğiştirme eğrileri elde edilmiştir. Malzeme çekme deneyleri İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde bir hidrolik piston ve silindirden oluşan 20ton çekme kapasitesine sahip J. AMSLER-LAFFON& SOHN marka üniversal test cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.1a, b).



(a) (b)

Şekil 3.1: İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarında bulunan 20 tonluk çekme cihazı: (a) Cihazın görünümü, (b) Çekme deneyi için cihaza numunenin yerleştirilmesi.

Çelik kirişler için TS EN ISO 6892-1 (Metalik Malzemeler-Çekme Deneyi-Bölüm 1:Ortam Sıcaklığında Deney Metodu) standardına göre çekme numunesi boyutları belirlenmiştir.



Şekil 3.2: TS EN ISO 6892-1'e göre kupon numune boyutları.

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de TS EN ISO 6892-1'e göre belirlenen çelik profil için çekme numunelerinin boyutları ve plakalardan soğuk freze kesimi ile çıkarılan numuneler gösterilmektedir.



Şekil 3.3: Kupon numuneleri.

Şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde numune üzerine ekstansometre ve yaprak tipinde TML-YFLA-10-3L akma sonrası okumalar da yapabilen şekildeğiştirme ölçerler (strain gauges) yerleştirilmiştir. Çekme deneylerinde kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri Çizelge 3.1'de verilmektedir.

Çizelge 3.1: Çekme deneylerinde kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri.

TML-YFLA-10-3L				
Gauge Boyu	Genişliği	Direnci	Uygulama Yüzeyi	Gauge Faktörü
10 mm	2.6 mm	120 Ohm	Çelik	2.1

Şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılacağı metal yüzeylerin pas ve kirden temizlenmiş olması gerektiğinden laboratuvarda zımpara ile yüzey temizliği yapılmıştır. İkinci aşamada strain gauge yapıştırmadan önce metal yüzeyi kalıntı bırakmayacak aseton gibi eritici bir malzeme kullanılarak temizlenmiştir.

Metal yüzeye yapıştırmak için tek bileşenli yapıştırıcılar kullanılmıştır. Ölçüm yapılacak yere yapıştırıcı ince bir tabaka halinde sürüldükten sonra straingauge yapıştırıcı tabaka üzerine dikkatlice yerleştirilmektedir. Akım devresinin düzgün çalışıp çalışmadığı dijital ölçüm cihazı ile kontrol edilerek 120 Ohm'luk direnç tüm çekme numunelerinde sağlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4: IPE 140 çelik profil için çekme numunelerinin üzerine şekildeğiştirme ölçerlerin (strain gauge) yerleştirilmesi.

3.1.1 Deneyler

Deneyler sırasında yük ve uzama değerleri şekildeğiştirme ölçerler ile kopmaya kadar kaydedilmiş, ektansometre ile akma noktasına kadar olan değerler okunmuştur ve elde edilen değerler karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Numunelerin çekme dayanımları (MPa), akma ve kopma gerilmeleri (MPa) belirlenerek gerilme şekildeğiştirme diyagramları oluşturulmuştur. Diyagramlardaki elastik deformasyon bölgesinin eğiminden elastisite modülleri (MPa) hesaplanmıştır. Deneyler sonunda numunelerin kopan parçaları biraraya getirilerekde son boyları L_s hesaplanmış ve toplam uzama miktarları da yüzde (%) cinsinden bulunmuştur. Çekme deneylerinin sonuçları hesaplanırken kullanılan bağıntılar aşağıda açıklanmaktadır.

Çekme dayanımı, numunenin yük- uzama eğrisinde kopma anına kadar olan en yüksek değeri olarak ifade edilmektedir. Çekme dayanımı, $P_{maks.}$ en yüksek yük değerinin, A_0 ise numunenin orijinal kesit alanına bölünmesiyle elde edilmektedir (3.1).

$$\sigma_{Ç}=\frac{P_{maks.}}{A_0} \quad (3.1)$$

Çekme kuvvetinin sabit kalmasına karşın, plastik şekildeğiştirmenin artış gösterdiği noktaya denk gelen en yüksek gerilme değeri akma gerilmesi olarak adlandırılmaktadır. Akma gerilmesi hesaplanırken; P_a en yüksek akma değerinin, A_0 numunenin ilk baştaki kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmaktadır (3.2).

$$\sigma_a=\frac{P_a}{A_0} \quad (3.2)$$

Kopma gerilmesi, numunenin koptuğu andaki gerilme değeri olarak adlandırılmaktadır. Kopma gerilmesi kopmaya denk gelen en yüksek yük miktarının A_0'a bölünmesi ile bulunmaktadır (3.3).

$$\sigma_k=\frac{P_k}{A_0} \quad (3.3)$$

Malzemenin toplam uzama miktarı ya da kopma uzaması (K_u) % değerinden çekme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek plastik uzama oranı olarak adlandırılmaktadır. Bu oran, numunenin çekme deneyi sonunda kopan parçaları bir araya getirilerek L_s son boy ölçülmekte (Şekil 3.5) ve L_i numunenin ilk boyu ile arasında farkın ilk boya olan oranın yüzde değeri olarak ifade edilmektedir (3.4). Elde edilen kopma uzama miktarı malzemenin sünekliği hakkında bilgi vermektedir (3.5).

$$\Delta L=L_s-L_i \ (3.3) \quad (3.4)$$

$$K_u\ (\%)=\frac{\Delta L}{L_i}\times 100 \quad (3.5)$$

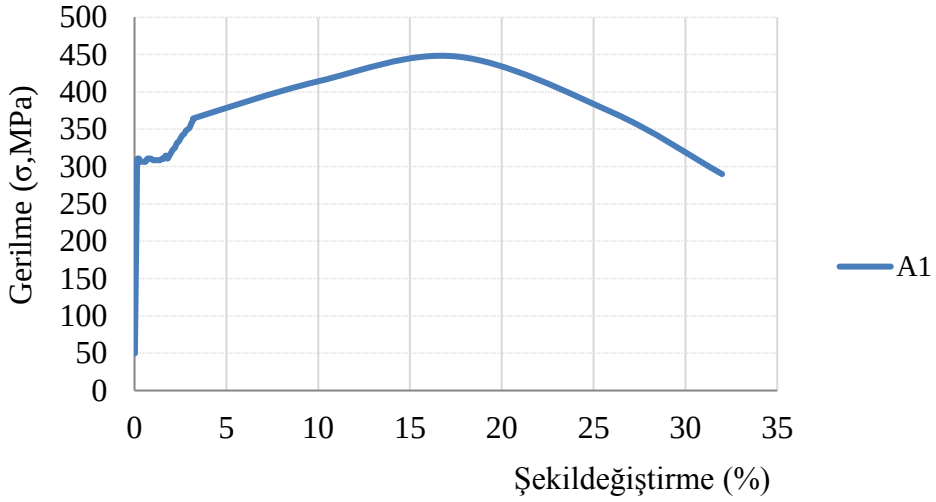


Şekil 3.5: Çekme deneyi sonunda son boy (Ls) hesaplaması

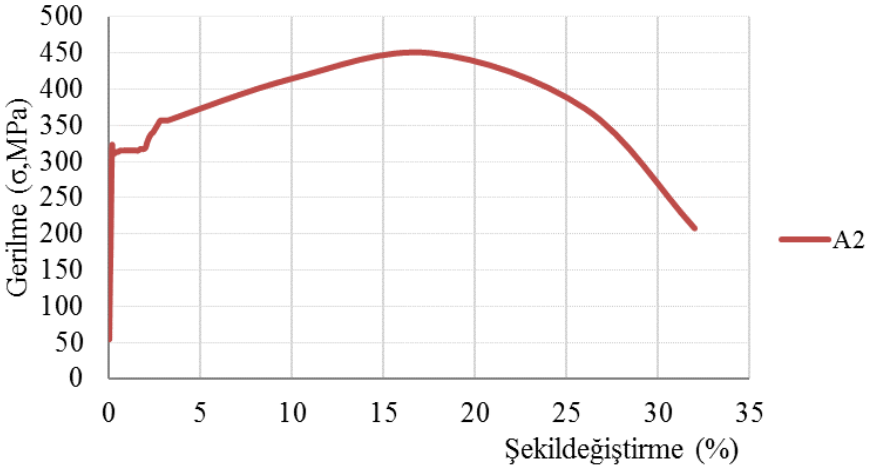
3.1.2 Deney sonuçları ve gözlemler

IPE 140 S275 JR çelik kalitesinde profillerden elde edilen A, B, C ve D tipi numunelerin çekme deneyi sonuçları açıklanmıştır (Çizelge 3.2).

A tipi 3 (A1, A2, A3) numunenin çekme deney sonuçlarından elde edilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri Şekil 3.6'da verilmiştir. Çekme deneyleri sonucunda A1-A2-A3 numunelerinden elde edilen akma gerilmesi ortalaması σ_A= 314 MPa, çekme dayanımı ortalaması $\sigma_Ç$= 450 MPa, kopma gerilmesi ortalaması σ_K= 210 MPa ve numunelerin toplam uzama miktarı ortalama % 31.1 olarak belirlenmiştir.

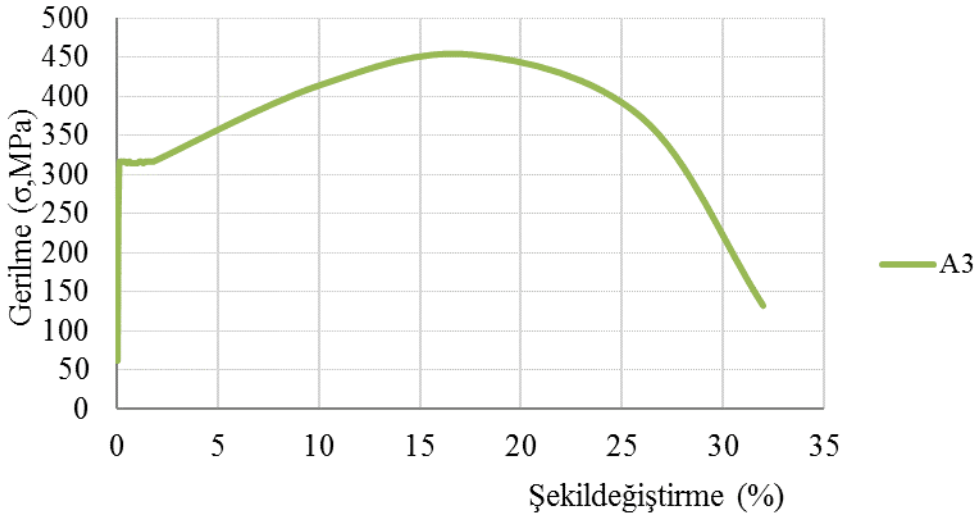


(a)



(b)

Şekil 3.6: A1-A2-A3 numunelerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri: (a) A1 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi, (b) A2 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.



(c)

Şekil 3.6 (devam): (c) A3 numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

B numunelerinden (B1, B2, B3) için çekme deneyi sonrası B numunelerinin ortalama akma gerilme değeri σ_A= 313 MPa, ortalama çekme dayanımı $\sigma_Ç$=448 MPa, ortalama kopma gerilmesi σ_K=300 MPa ve toplam uzama miktarı ortalama % 32.7 olarak bulunmuştur. B numunelerinin çekme grafikleri EK-B'de yer almaktadır.

C numunelerinin (C1-C2-C3) çekme deney sonuçlarına göre C numunelerinin akma gerilmelerinin ortalaması σ_A=309.5 MPa, ortalama çekme dayanımları $\sigma_Ç$= 446 MPa, ortalama kopma gerilmeleri σ_K=130.5 MPa ve toplam uzama miktarı ortalama % 31.6 bulunmuştur. C numunelerinin çekme grafikleri EK-B'de yer almaktadır.

D tipi 3 numunenin (D1, D2, D3) numunelerinin çekme deneyleri sonucunda numunelerden elde edilen akma gerilmesi ortalama olarak σ_A=311.6 MPa, ortalama çekme dayanımı $\sigma_Ç$=438.3 MPa, ortalama kopma gerilmesi σ_K=269 MPa ve numunelerin toplam uzama miktarı ortalama % 38.1 olarak belirlenmiştir. D numunelerinin çekme grafikleri EK-B'de yer almaktadır.

IPE 140 S275 JR'dan elde edilen A-B-C-D numunelerinin çekme deney sonuçları TS EN 10025-1 (Sıcak Haddelenmiş Yapı Çelikleri- Bölüm 1: Genel Teknik Teslim Şartları) standardı ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar TS EN 10025-1'de S275 JR çelik kalitesi için belirtilen değerler ile uyumlu çıkmış ve istenilen amaca ulaşmak için yeterli olduğu görülmüştür (Çizelge 3.3). Bu doğrultuda gerçek numunelerin üretimine başlanılmıştır.

Çizelge 3.2: A-B-C-D kupon numunelerin çekme deney sonuçları

Numune Adı	Genişlik (mm)	Kalınlık (mm)	Alan (mm²)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Gerilmesi (MPa)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)
A-1	50.4	4.7	236.88	311	447	290	30.28	205.00
A-2	50.4	4.7	236.88	315	449	207	33.24	196.71
A-3	50.4	4.7	236.88	317	453	133	29.88	*
B-1	50.4	4.7	236.88	311	449	311	36.40	188.43
B-2	50.4	4.7	236.88	315	447	290	27.68	165.65
B-3	50.4	4.7	236.88	Ektansometre kullanılmamıştır			34.06	*
C-1	50.4	4.7	236.88	306	443	83	32.78	171.87
C-2	50.4	4.7	236.88	313	449	178	30.46	183.25
C-3	50.4	4.7	236.88	Ektansometre kullanılmamıştır			30.70	*
D-1	50.4	4.7	236.88	302	435	186	39.78	209.14
D-2	50.4	4.7	236.88	327	445	248	35.88	196.71
D-3	50.4	4.7	236.88	306	435	373	38.70	164.62

* Bu numunelerde E modülü elde edilememiştir.

Çizelge 3.3: TS EN 10025-1 standardı gereği S 275JR çelik kalitesi için belirtilen mekanik özellikleri.

TS EN 10025 S 275JR Çeliğin Mekanik Özellikleri		
Akma Mukavemeti (min.) (MPa)	Çekme Mukavemeti (min.) (MPa)	Uzama değeri (min.) (%)
275	430	16

3.2 Beton Döşeme Basınç Deneyleri

3.2.1 Deneyler

Beton dökümü ve numune alımı işlemleri TS EN 12350-1 "Taze Beton Deneyleri-Bölüm 1: Numune Alma" standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. C25 kalitesindeki betona önce çökme (slump) deneyi yapılmıştır (Şekil 3.7a). Çökme hunisi üç eşit kademede doldurulmuş (Şekil 3.7c), her kademede usulüne uygun biçimde şişleme çubuğuyla şişlenmiştir. Huni tamamen doldurulduktan sonra üst yüzeyi mala ile düzenlenmiş ve huni yavaşça kaldırılarak taze betonun kendi ağırlığıyla çökmesi beklenmiştir. Şişleme çubuğu çökme hunisi üzerine konarak çöken betonun üst seviyesinden çubuğun altına kadar olan taze beton çökme değeri olan uzunluk 110 mm olup betonun kıvam sınıfı S3 (100~160 mm) olarak bulunmuştur (Şekil 3.d). Taze beton sıcaklığı 24.8 C° olarak kaydedilmiştir (Şekil 3.7b).



Şekil 3.7: Çökme (slump) deneyi: (a) Beton karıştırımının yapılması, (b) Taze beton karışımının sıcaklığının ölçülmesi, (c) Çökme hunisi üç eşit kademede doldurulması, (d) Şişleme çubuğu çökme hunisi üzerine konarak çöken betonun üst seviyesinden çubuğun altına kadar olan taze beton çökme değeri olan uzunluğunun ölçülmesi.

Betonun 7 ve 28 günlük karakteristik basınç dayanımını kontrol etmek amacıyla 150mm*150mm küp kalıplara 7 adet numune alınmıştır (Şekil 3.8a). Bu numunelerden 3'ü 7. günde, diğer 3'ü 28. günde kırılmıştır. 1 adet numune yangın deneyi gününde betonun nem değerini belirlemek amacıyla ayrılmıştır. Beton numuneleri, küp şeklindeki kalıplara yüksekliği 10 cm'yi geçmeyen, eşit 2 tabaka halinde doldurulmuştur (Şekil 3.8b) ve titreşim masasına yerleştirilerek betonun kalıp içine sıkıştırılması sağlanmıştır (Şekil 3.8c). Her bir numune etiketlenerek numunenin kayıtları tutulmuştur (alındığı gün, saat, beton dayanım sınıfı, şantiye kodu, üretici şirket ve tesisin adı, transmikser plakası, irsaliye numarası) (Şekil 3.9a). Numuneler, laboratuvarda kalıp içerisinde yeterli sertliğe ulaşıncaya kadar 20±2 C° sıcaklıktaki kür odasında 16 saat~3 gün arasında bekletilmiştir.

Bu sürenin sonunda kalıptan çıkarılarak deney süresine kadar, 20±2 C° sıcaklıktaki kirece doygun su içeren kür havuzunda bekletilmiştir (Şekil 3.9b). Deneylerde kullanılan C25 betonun karışım oranları Çizelge 3.4'de yer almaktadır.



(a) (b) (c)

Şekil 3.8: Beton numunelerinin hazırlık aşamaları: (a) Beton numuneleri küp şeklindeki kalıplara yerleştirilmesi, (b) Betonun 2. kademesinin dökülmesi (c) Beton kalıpların titreşim masasına yerleştirilmesi.



(a)



(b)

Şekil. 3.9: Beton numune: (a)Beton numunelerin etiketlenmesi, (b)Kür havuzuna yerleştirilmesi.

Çizelge 3.4: C25 Beton karışımı.

C25 Beton Karışımı						
Malzeme	1 m³'e giren karışım oranları (m^3)	4 m³'e giren karışım oranları (m^3)	Reel (m^3)	Kuru R. (m^3)	Teori (m^3)	Fark
Kırma Kum	1.12	4.50	4.60	4.54	4.50	36
İnce Çakıl	356	1.42	1.40	1.41	1.42	-9
İri Çakıl	394	1.57	1.55	1.55	1.57	-17
Su	180	720	650	713	710	3
Çimento (CEM142.5)	255	1.02	1.01	1.01	1.02	-1
Activa	1.02	4.08	4.08	4.08	4.08	-
DL1129	2.55	10.2	10.33	10.33	10.2	-13
TOPLAM	2.31	9.25	9.25	9.26	9.24	12

3.2.2 Deney sonuçları ve gözlemler

Deneyler TS EN 12390-3 "Beton-Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3 Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini" standardına uygun olarak akredite bir laboratuvarda gerçekleştirilmiştir.

Numuneler, yükleme çerçevesine (yüksekliği ayarlanabilir üst tabla ile hareketli alt tabla arasına) yük uygulama doğrultusu beton döküm doğrultusuna dik olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 3.10). Basınç dayanımı f_c (MPa-N/mm^2)

$$f_c = \frac{F}{A_c} \tag{3.6}$$

bağıntısı ile hesaplanmakta, kırılma anındaki en büyük yük (F) değerinin numunenin üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanına (mm^2) bölünmesi ile elde edilmektedir.

Beton numuneler yükleme çerçevesinde kırılıncaya kadar yüklenmiş ve numunenin taşıyabildiği en büyük yük belirlenerek beton basınç dayanımı hesabı yapılmıştır. 7. günde kırımı yapılan beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı ortalama değeri f_{ck} (7) = 27.3 MPa, 28 günlük basınç dayanımı ortalama değeri f_{ck} (28)= 39.4 MPa olarak bulunmuştur.

TS 500 (2013) Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları standardının C25 Beton sınıfı için standartta öngörülen 28 günlük eşdeğer küp (150 mm) basınç dayanımı f_{ck} (28) = 30 MPa olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar beklenen değerlerin bir miktar üzerinde olsa da ulaşılması beklenen minimum dayanımlar bakımından standard ile uyumlu çıkmıştır (Çizelge 3.5).



Şekil 3.10: Beton numunelerin basınç deneyleri.

Çizelge 3.5: Beton numunelerin 7 ve 28 günlük karakteristik basınç dayanımları.

No	Deney Sonuçları			
	7 Günlük		28 Günlük	
	Basınç Dayanımı (MPa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)	Basınç Dayanımı (MPa)	Birim Ağırlık (gr/cm³)
1	27.2	2.36	39.4	2.39
2	27.4	2.39	39.5	2.38
3	27.3	2.36	39.2	2.23
Ortalama	27.3		39.4	

3.3 Deney Numunelerinin Tasarım ve Üretimi

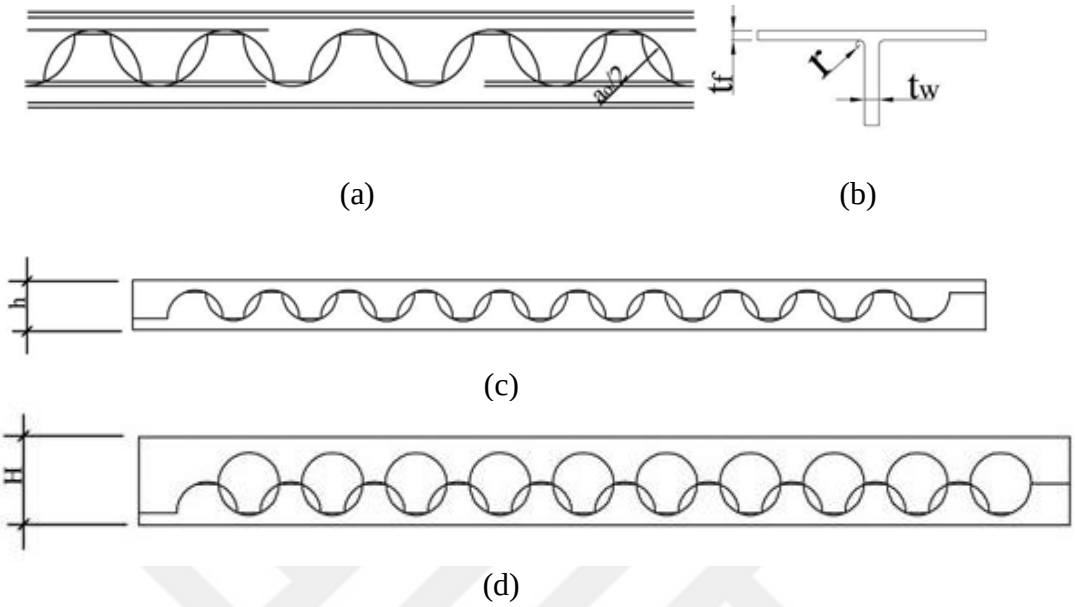
Numunelerin boyutlandırılması EN 1993-1 ve EN 1994-1 Eurocode 3 ve Eurocode 4 (2004) yönetmelikleri esas alınarak sayısal analiz programı olan OASYS 8.3 (2012) kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.11a, b). Eurocode 3 ve 4 esas alınarak yapılan hesaplamalarda yükseklik (h) (Şekil 3.11c), son yükseklik (H) (Şekil 3.11d), dairesel boşlukların merkezleri arasındaki uzunluk (S), daire boşluk çapları (a_0), boşluk sayısı (n), gövde boşlukları arasında kalan dolu uzunluk (w) arasındaki bağıntılar kullanılmıştır.

Kiriş tasarımında son yükseklik belirlenirken dikkat edilen değerler:

- Kirişin geçtiği açıklık (L),
- Kirişe etki eden yük miktarı (Yapının fonksiyonu),
- Kirişin ana kiriş ya da tali kiriş olması,

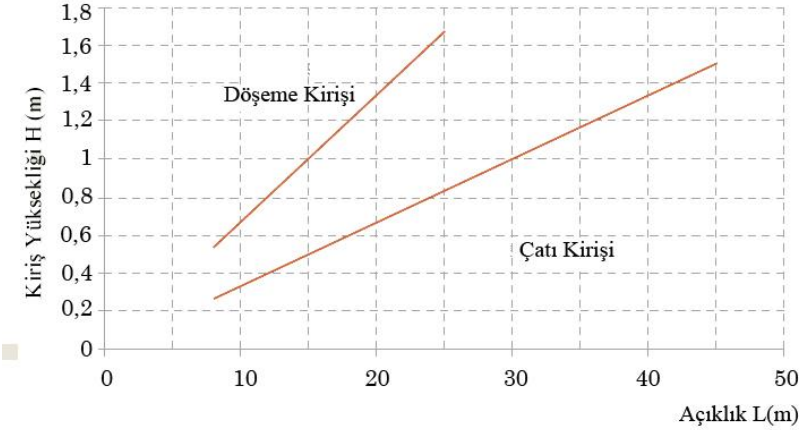
- Kirişin nerede kullanılacağı (döşeme, çatı, otopark döşemeleri, v.b.),
- Kirişin yerdeğiştirme sınırı

olarak sıralanmaktadır.



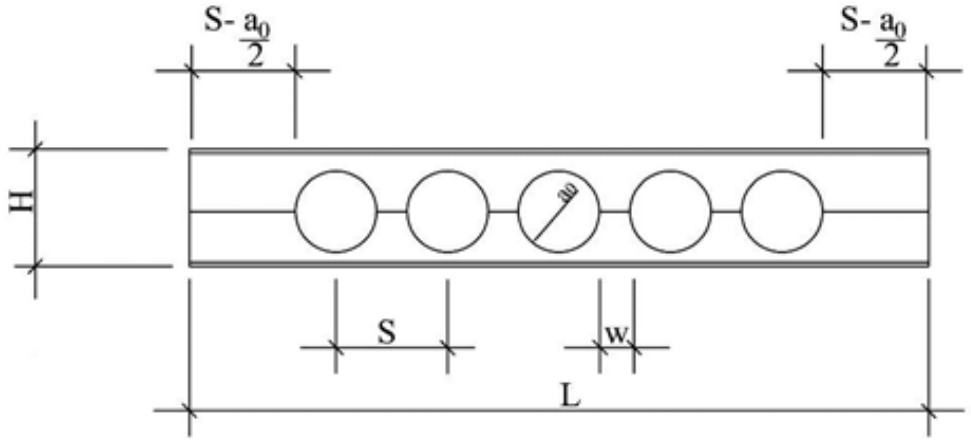
Şekil 3.11: Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerin kesim yöntemi ve kesit parametreleri: (a) Gövde boşluklarının oluşturulması, (b) Üst başlık ve gövde kalınlığı, (c) Gövde boşluklu kirişin kaynak öncesi yüksekliği, (d) Gövde boşluklu kirişin kaynak sonrası yüksekliği (EN 1993-1, 2004).

Kiriş yüksekliği belirlendikten sonra kirişin geçtiği açıklığa da bağlı olarak narinlik oranı (L/H) hesaplanmaktadır. Normal işletme yükleri altında bir döşeme kirişi için bu değer 10~25 arasında değişiklik göstermektedir. Kiriş üretiminde göz önüne alınan diğer bir ölçüt ise kiriş gövdesindeki dairesel boşlukların yerleşimi, sayısı ve birbirleri arasındaki uzaklıkların belirlenmesidir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Kiriş yüksekliğinin açıklığa göre değişimi (http://sections.arcelormittal.com, 2015).

Dairesel boşluklar arasında tanımlanan dolu uzunluğun (w) hesaplanmasında 3.7, 3.8, 3.9 ve 3.10'da verilen bağıntılar kullanılmış olup kiriş tasarımında olası zayıf noktalar engellenmiştir (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: Gövdesi boşluklu kirişlerin tasarımında dairesel boşlukların yerleşimi, sayısı ve birbirleri arasındaki uzunluk (EN 1993-1-2, 2005).

$$S = L + a_0 / n+1 \quad (3.7)$$

$$w_{min} \geq a_0/12 \quad (3.8)$$

$$w_{min} \geq 50 \text{ mm} \quad (3.9)$$

$$w_{max} \leq a_0/1.25 \quad (3.10)$$

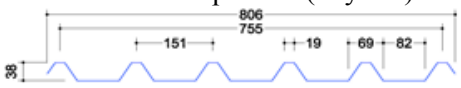
Deney düzeneğinde getirdiği rahatlıklar nedeniyle, pek çok çalışmada da olduğu gibi (Nyugen, Tan, 2012), (Bihina ve diğ. 2013), deneyde kullanılacak kirişlerin tali kiriş olarak alınmasına karar verilmiştir. Kiriş açıklığı, fırın boyutları (4150mm x 5155mm x 3620mm) göz önüne alınarak belirlenmiştir.

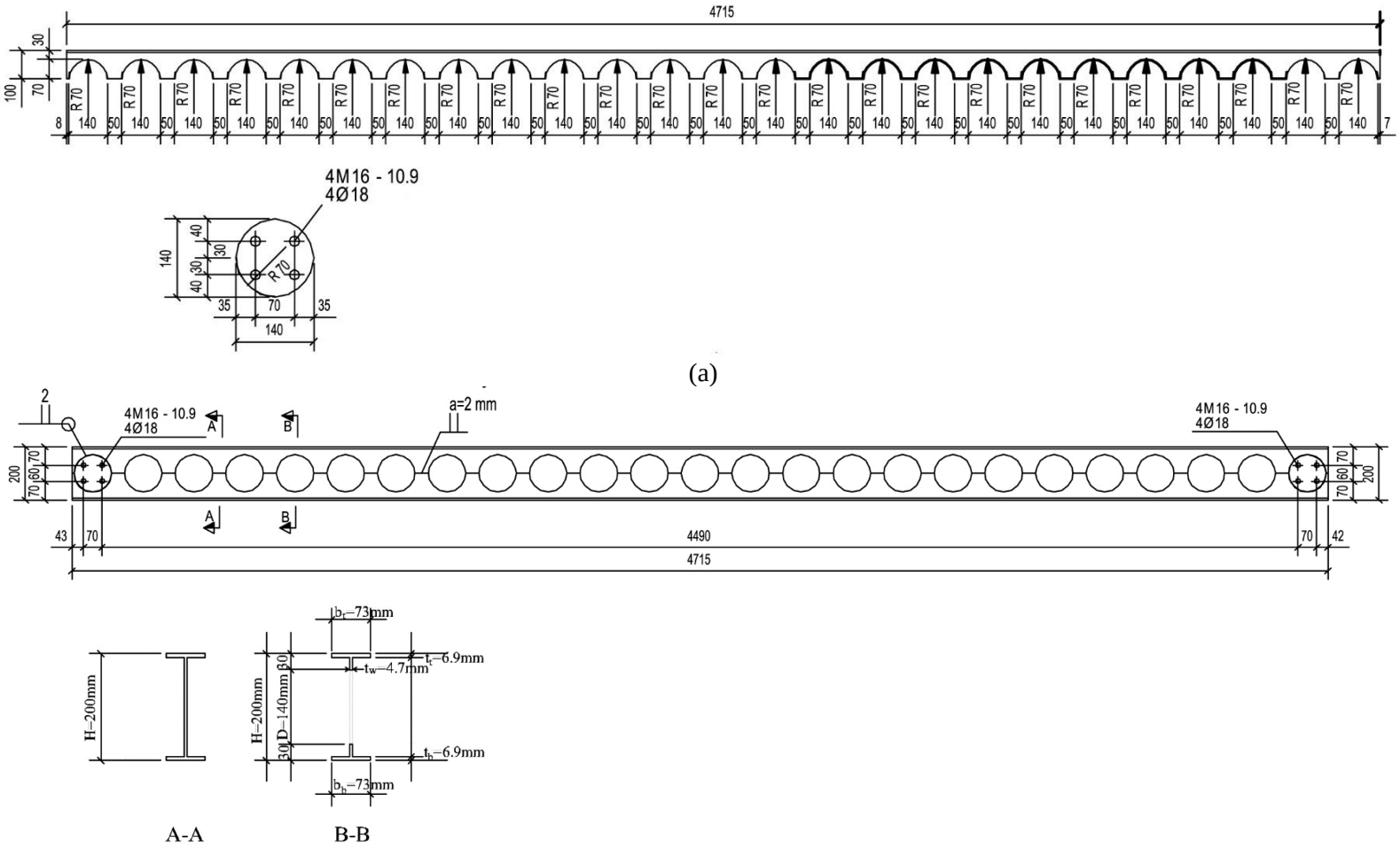
Önceki bölümlerde belirtildiği gibi yüksek sıcaklıklarda değişik durumlar için yerdeğiştirmelerin ve göçme durumlarının izlenmesi/ belirlenmesi hedeflenmektedir.

Deney için seçilen profil L= 4.715 m açıklık geçen IPE140 çelik hadde profili olup çelik kalitesi S275JR olarak belirlenmiştir (Şekil 3.14). Tasarımda kirişler bir kütüphane yapısının olduğu göz önüne alınarak yapıya etkiyen toplam yük P=650 kg/m^2 olarak alınmıştır. 1 adet dolu gövdeli referans numunesi (DK-R) diğer gövde boşluklu numuneler ile aynı koşullarda denenmesi amacıyla 2 adet IPE 140'ın kesilip kaynaklanması ile aynı yüksekliğe getirilmiştir. Bunun yanında 1 adet yalıtımsız gövde boşluklu (GBK-YS) ve 2 adet numunede ise su ve solvent bazlı yalıtım malzemelerinin kullanıldığı gövde boşluklu kompozit kirişler (GBK-YP), (GBK-YN)

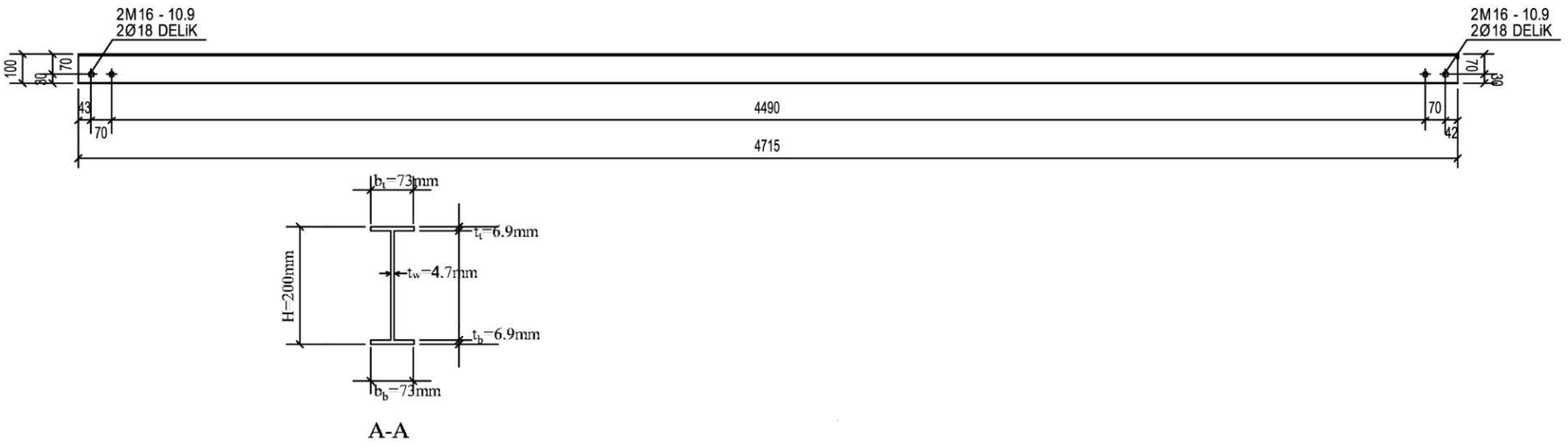
olmak üzere toplam 4 adet kompozit kiriş tasarlanmıştır (Şekil 3.14, Şekil 3.15). Çekme deneyi sonuçlarına göre başlangıçta yapılan tüm hesaplar revize edilerek imalatçı firmaya iletilmiş ve üretime başlanmıştır (Çizelge 3.6). Numunelerin tasarım oranları Çizelge 3.7' de yer almaktadır.

Çizelge 3.6: Deney numunelerinin metraj listesi.

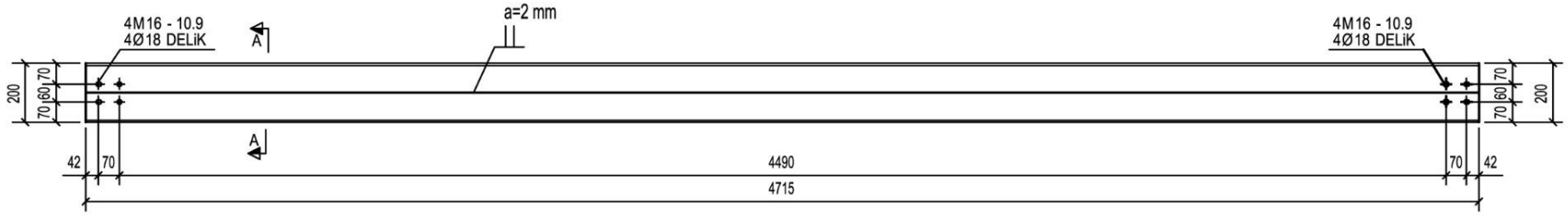
Boyutlar ve Tip	Açıklama	Kalite	Miktar
IPE 140	Hadde Profil	S275 JR	4 Adet 12m uzunlukta 620 kg
38/151 tipinde Hadve sayısı: 6 t=0.7mm	Galvanizli trapez sac (boyasız) 	S235 JR	15 Adet 4m uzunlukta 345 kg
Ø19 çapında h=75mm	Nelson marka stud	EN13918-SD1	150 Adet
Q188/188	Hasır çelik donatı	S500	2 Adet 2.15mx 5m boyutlarında
C25	Hazır beton	C25	1.5 m³



Şekil 3.14: Gövdesi boşluklu numunelerin üretim çizimleri: (a) Gövdesi boşluklu numunenin boşluk detayları, (b) Gövdesi boşluklu numunenin ön görünüşü, A-A ve B-B kesiti.



(a)



(b)

Şekil 3.15: Dolu gövdeli numunenin üretim çizimleri: (a) Dolu gövdeli numunenin kaynak öncesi ön görünüşü ve A-A kesiti, (b) Dolu gövdeli numunenin kaynak sonrası ön görünüşü.

Çizelge 3.7: Deney numunelerinin tasarım oranları (design ratio)

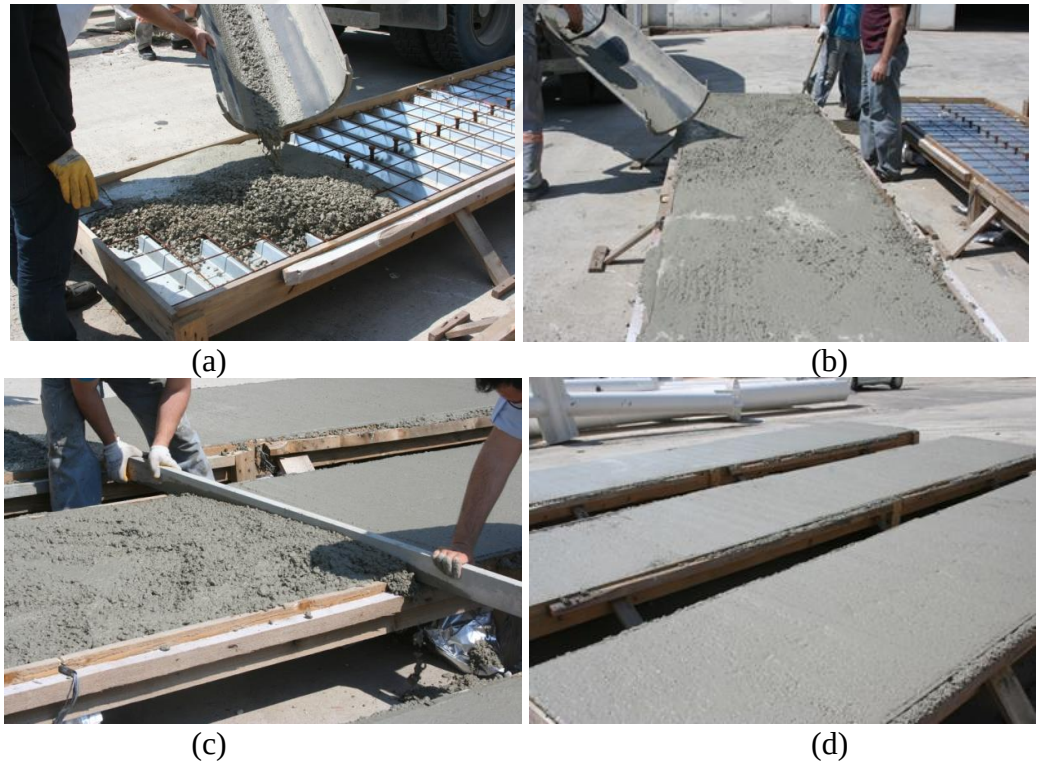
Profil	Moment (M) ve Kesme Kuvveti (τ)					Döşeme Enine Kesme Kuvveti (%)	Titreşim Frekansı (Hz)	Gövde Boşluk Oranı maks. *
	Son Aşama			İnşaat Aşaması				
	Eğilme Momenti (%)	Kesme Kuvveti (%)	Gerilme (%)	Eğilme Momenti (%)	Kesme Kuvveti (%)			
IPE 140 Gövde Boşluklu Çelik Kiriş	41.63	16.70	71.06	31.17	6.08	30.82	11.51	45.10
IPE 140 Dolu Gövdeli Çelik Kiriş	41.63	16.70	60.86	31.17	6.08	30.82	12.02	0.0

* Maksimum boşluk alanının tüm kirişin alanına olan oranın yüzde değerinden ifadesidir.

* Hesap çıktıları EK-C bölümünde yer almaktadır.

Kirişlerin üzerinde 38/151 tipinde, hadve sayısı n= 6, kalınlığı t=0.7 mm galvanizli kompozit pürüzsüz (daha yaygın kullanımı olmasından ve olumsuz durumu temsil etmek amacıyla) döşeme sacı ve h_f= 7.8 cm kalınlığında, b_{eff}= 1m genişliğinde, C25 kalitesinde beton ve Q188/188 hasır çelik donatı kullanılarak oluşturulan kompozit döşeme sistemi kullanılmıştır. Kompozit sistemde kayma bağlantısı olarak Ø19/75 mm ölçülerinde başlıklı saplama (shear stud) kullanılmıştır. Beton dökümü için hazırlanan kalıpların yüzeyleri, taşıyıcıları ve dikmeleri ahşaptır (Şekil 3.16a). Kalıba dökülen betonun mastarlanarak homojen bir şekilde dağılması ve arasında boşluk olmaması sağlanmıştır (Şekil 3.16b). Mastarlama işlemi sonrasında mala perdahı yapılmıştır (Şekil 3.16c). En son olarak bütün numunelerin üzeri dış hava koşullarından etkilenmemesi için branda ile kapatılmıştır.

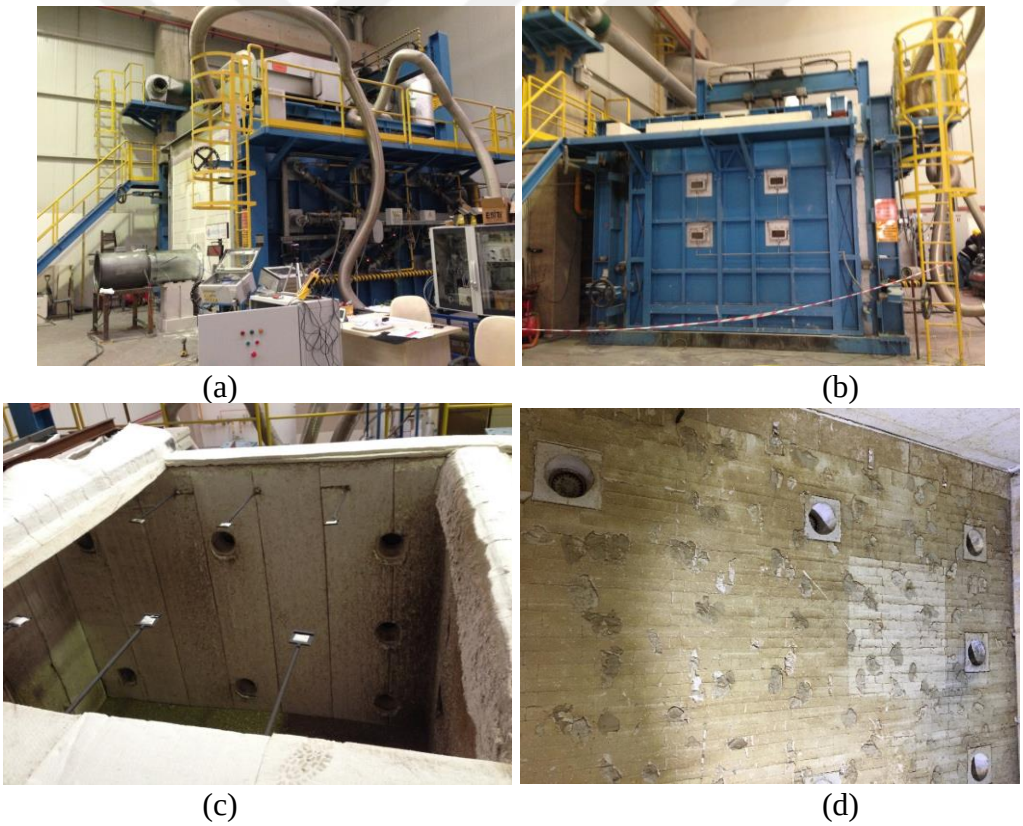
TS EN 1363-1 (Yangına Dayanıklılık Deneyleri-Bölüm1: Genel Kurallar) standardı uyarınca betonarme elemanlar ya da beton içeren yangın deneylerinde betonun deneye girmeden önce kuruma süresi en az 3 ay (90 gün) olarak belirtilmiştir. Bu kurala uyulmuş, numuneler deney gününe kadar uygun koşullarda kurumaya bırakılmıştır (Şekil 3.16d).



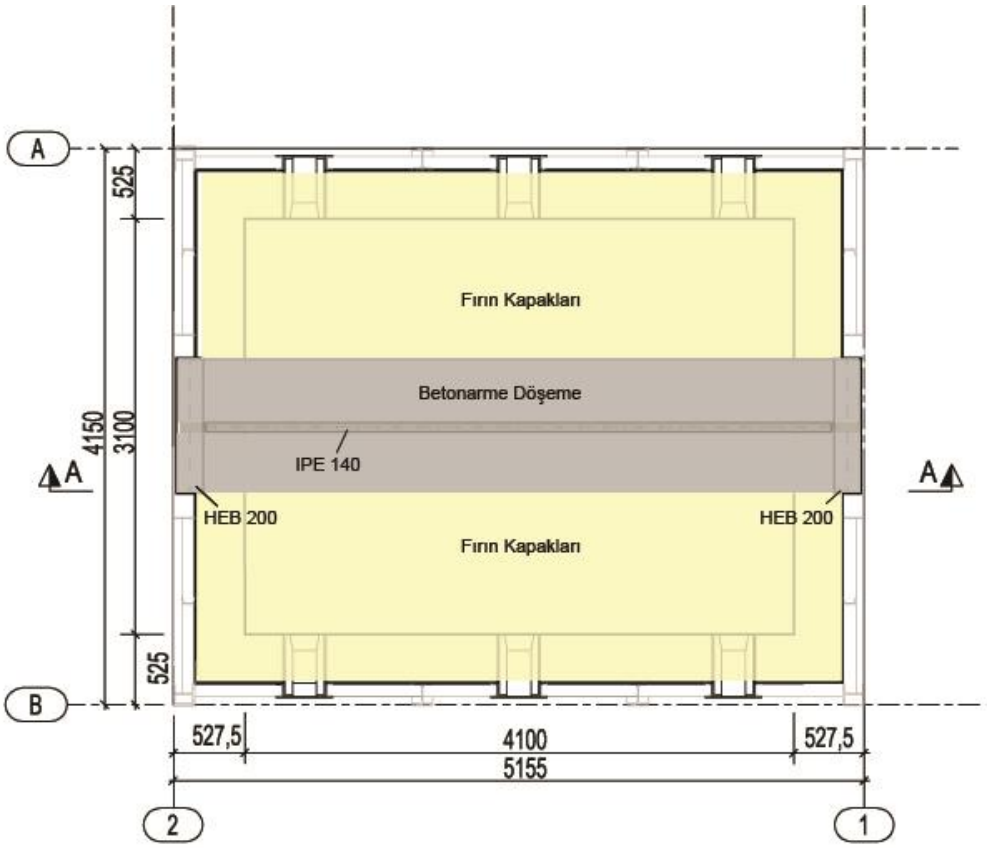
Şekil 3.16: Beton dökümü ve mastarlama işlemleri: (a) Beton karışımının hazırlanan döşeme kalıplarına dökülmesi, (b) Kalıplara dökülen betonun eşit bir şekilde yüzeye dağıtılması, (c) Mastarlama ve mala perdahı işlemleri, (d) Beton dökümü sonrası numunelerin görünümü.

3.4 Deney Düzeneği ve Numunelerin Düzeneğe Yerleştirilmesi

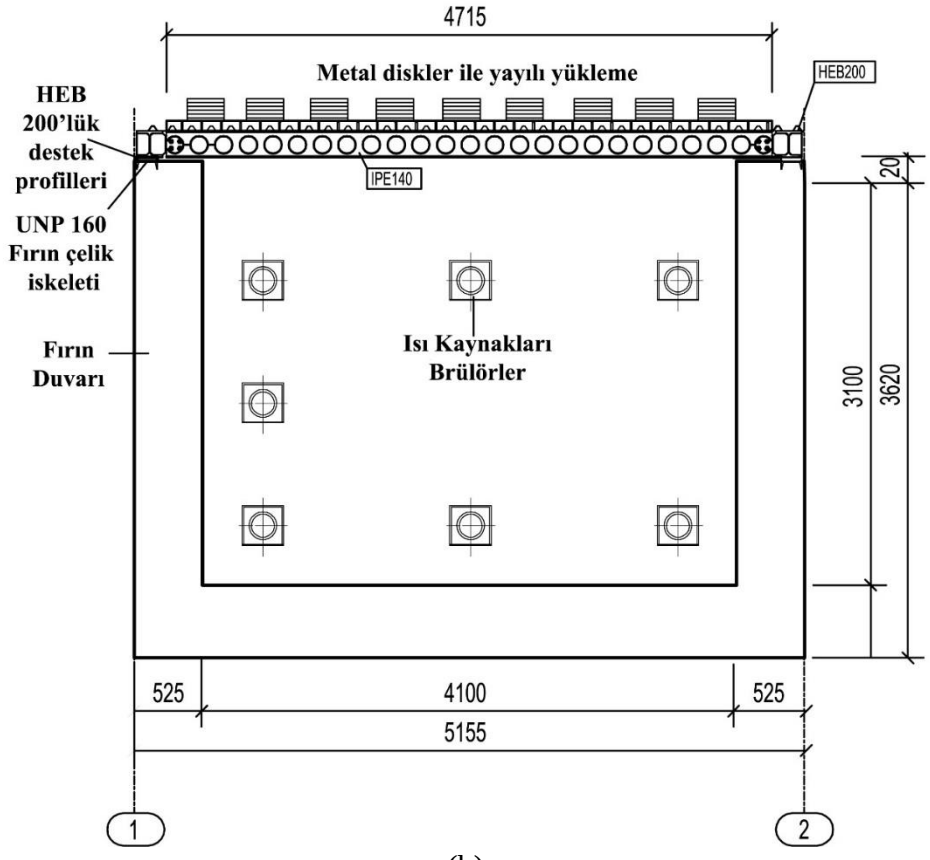
Deneylerin Türkiye'nin ilk akredite yangın deney laboratuvarı olan ve Kocaeli'nde yer alan Efectis Era Avrasya (http://www.efectis.com) firmasının yangın fırını kullanılarak yapılması kararlaştırılmıştır (Şekil 3.17a). Fırın boyutları 4150 mmx 5155 mmx 3620 mm'dir (Şekil 3.17b). Fırın tasarımı EN 1363-1'e (Yangına dayanıklılık deneyleri) esas alınarak tasarlanmıştır (Şekil 3.17c). Fırın içerisinde her iki yan duvarda 7 adet olmak üzere toplam 14 brülör yer almaktadır (Şekil 3.17d). Brülörlerin güçleri 500 kW olup doğalgaz ile çalışmaktadır. Fırın duvarları taşıyıcı çelik iskelet ve yalıtımlı ateş tuğlası duvarlardan meydana gelmekte olup toplam kalınlığı 56 cm'dir. Numuneler fırın içerisine yatay olarak yerleştirilmiş, ısı kaybını önlemek amacıyla numune etrafında seramik yünü kullanılmıştır. Her bir numune ayrı ayrı denenmiş (Şekil 3.18a, b), diğer bir deyişle fırın dört kez kullanılmıştır. Deney programı ve numune özellikleri Çizelge 3.8'de özetlenmiştir.



Şekil 3.17: Deney fırının dıştan ve içten görünümleri: (a) Deney fırının yandan görünümü, (b) Deney fırının önden görünümü, (c) Deney fırının iç görünümü, (d) Fırın içerisindeki 7 adet brülörlerün görünümleri.



(a)

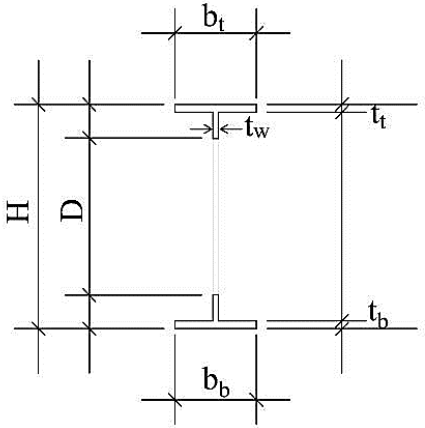


(b)

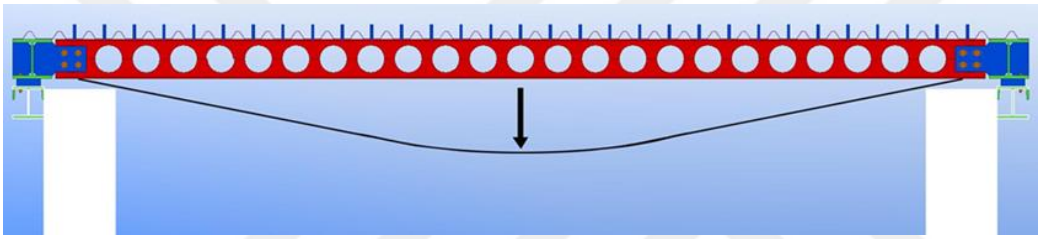
Şekil 3.18: Deney numunelerinin fırına yerleşimi: (a) Plan, (b) A-A kesiti.

Çizelge 3.8: Deney programı ve programda yer alan kompozit kiriş-döşeme sisteminin özellikleri.

Deney Programı			Numune Özellikleri		
Deney	Yalıtım Durumu	Yalıtım Malzemesi	Profil	Açıklık	IPE Profillerin Geometrik Özellikleri (mm)
GBK-YS	Yalıtımsız	-	IPE 140 Gövde Boşluklu	4.715	H=200 b_t= 73 t_w= 4.7 $t_{b=}$ 6.9
DK-R	Yalıtımsız	-	IPE 140 Dolu Gövdeli (Referans Numunesi)	4.715	H=200 b_t= 73 t_w= 4.7 $t_{b=}$ 6.9
GBK-YP	Yalıtımlı	Kabaran (Şişen)Boya (intumescent) solvent esaslı	IPE 140 Gövde Boşluklu	4.715	H=200 b_t= 73 t_w= 4.7 $t_{b=}$ 6.9
GBK-YN	Yalıtımlı	Kabaran (Şişen) Boya (intumescent) su esaslı	IPE 140 Gövde Boşluklu	4.715	H=200 b_t= 73 t_w= 4.7 $t_{b=}$ 6.9

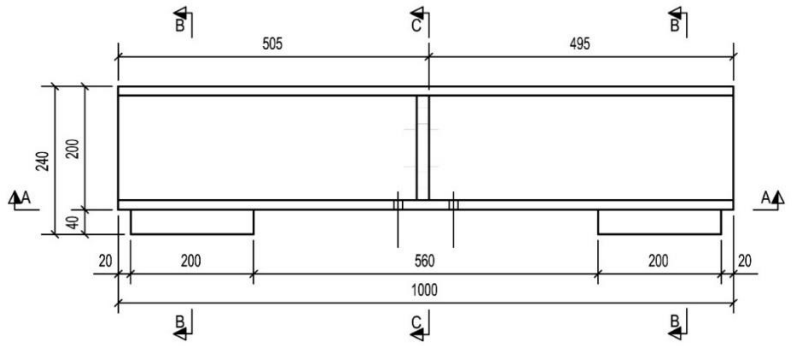


Numuneleri, fırına mesnetlemek ve rijitliğini sağlamak amacıyla fırının çelik iskeletinde 4150 mm uzunluğundaki duvarda yer alan UNP 160'lık çelik profillere, deney esnasında kirişlerde meydana gelecek sehim düşünülerek HEB 200'lük profiller yerleştirilerek fırın duvarlarından yükseltme yapmak için, alt bölümüne 40 mm kalınlıkta plaka şeklinde iki parça yerleştirilmiştir (Şekil 3.20a). Bu parça kalınlığı hesaplanırken yangın koşullarında standartlarda belirlenmiş olan göçme sınırı L/20 dikkate alınmıştır. Bu nedenle yapılan modellemelerde sehim değeri kiriş açıklığının orta noktasında 35 cm'e kadar olan düşey yerdeğiştirmeyi fırın duvarlarına çarpmadan güvenli bir şekilde yapabilecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.19). Deney öncesi fırın içerisinden çekilen numune fotoğrafları Şekil 3.21, Şekil 3.22, Şekil 3.23, Şekil 3.24'de verilmektedir.



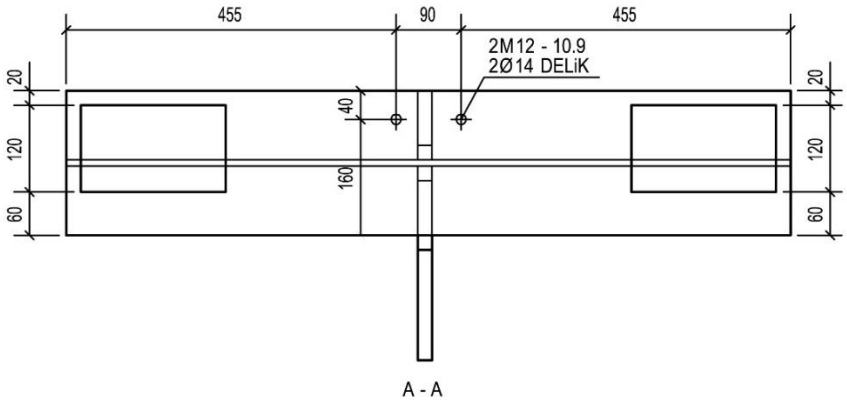
Şekil 3.19: Kirişin maksimum yerdeğiştirme sınırının modellemesi.

Plakaların mevcut duvar konstrüksiyonu UNP 160'lık profillerin üzerine çevresel köşe kaynağı ile yerinde monte edilmiştir. Fırının çelik iskeletine mesnetlenen HEB 200'lük profillerin üzerine yerleştirilecek olan 1m genişliğinde ve S275JR çelik kalitesinde HEB 200'lük ikinci destek profillerinden çıkan bayrak levhalarına IPE 140 kirişlerde slot şeklinde açılan deliklere, yüksek sıcaklıklarda uzamaya izin verecek şekilde bulonlanmış ve fırına yatay olarak yerleştirilmiştir (Şekil 3.20b, c).

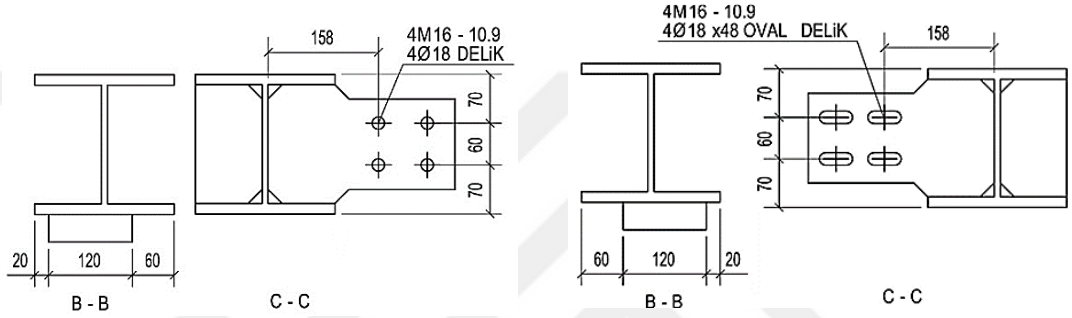


(a)

Şekil 3.20: Deney numunelerinin HEB 200'lük profile ve fırına mesnetleme detayları: (a) A-A kesiti.

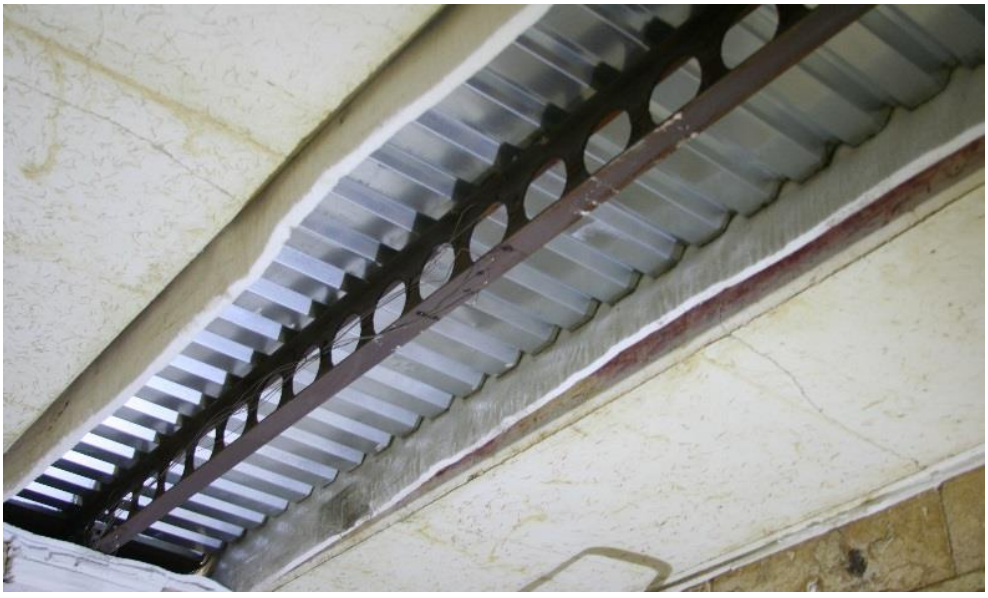


(b)



(c)

Şekil 3.20 (devam): Deney numunelerinin HEB 200'lük profile ve fırına mesnetleme detayları: (b) B-B Kesiti, (c) C-C Kesiti.



Şekil 3.21: GBK-YS numunesinin deney öncesi fotoğrafı.



Şekil 3.22: DK-R numunesinin deney öncesi fotoğrafı.



Şekil 3.23: GBK-YP numunesinin deney öncesi fotoğrafı.



Şekil 3.24: GBK-YN numunesinin deney öncesi fotoğrafı.

3.5 Yükleme

Deney senaryosunda denenecek kirişlerin bir kütüphane binasının döşeme kirişleri olduğu kabul edilmiştir. TS 498 (1997) standardında belirtildiği üzere kütüphane yapısı için yapıya etkiyen yük (kompozit döşeme ve kiriş sisteminin ağırlığına ek olarak), hareketli yükler q=500kg/m² ve mimari yük seçilen döşeme katmanlarına bağlı olarak yaklaşık g= 150kg/m² 'dir. Böylece bir kirişe etkiyen toplam yük p= 650 kg/m², diğer bir deyişle toplam 3.06 ton olarak hesaplanmıştır. Laboratuvar ortamında yükleme hidrolik krikolar ile olabildiği gibi metal diskler kullanılarak da yapılabilmektedir. Bu çalışmada, görsel durumu daha iyi yansıtabilmek amacıyla ve daha yayılı bir yükleme yapabilmek için yatay yerleştirilmiş olan kiriş-döşeme sisteminde yayılı yük metal diskler kullanılarak sağlanmıştır. Metal disk bloklarının her birinde 20 adet disk olup 200 kg yük sağlanabilmektedir. Bu disklerden 15 adet kullanılarak gerekli yayılı yük elde edilmiştir. Yükleme protokolü TS EN 1363-1 (2013) standardında belirtildiği üzere yapılmıştır. Yükleme, döşeme üzerinde mümkün olduğunca yerdeğiştirmeyi ölçen lineer cetvellerin konumları dikkate alınarak simetrik yapılmış ve deneyler başlamadan genel olarak yaklaşık 1 saat önce tamamlanmıştır (Şekil 3.25). Bu zaman dilimi içerisinde kirişte meydana gelen sehimler ölçülmüştür.



Şekil 3.25: Kiriş-döşeme sistemi üzerinde düşey yüklerin dağılımı.

3.6 Yangın Eğrisi

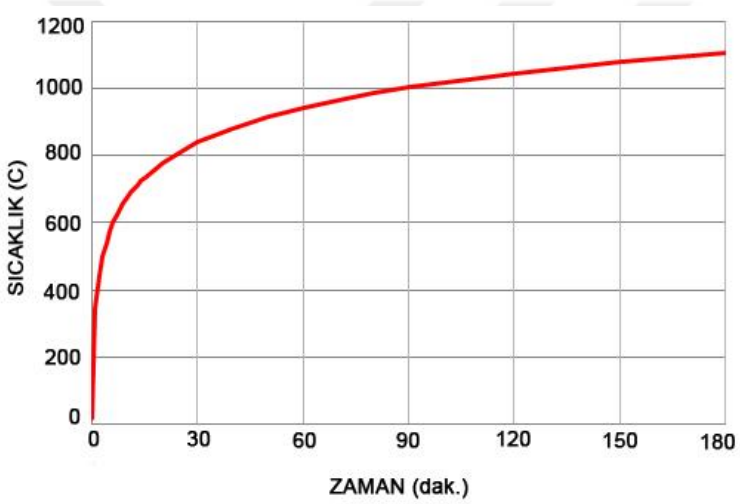
Gövdesi boşluklu kompozit kirişlerin sıcaklık ve buna bağlı yerdeğiştirmeler belirleneceği için önerilen çalışmada literatürde bu tip deneylerde olduğu gibi, standart yangın eğrilerinden olan selülozik standart yangın eğrisi (ISO 834) kullanılmıştır.

Standart yangın eğrileri birçok yangın deneyinde kullanılmış olup yapı elemanlarının yangın etkisindeki davranışlarını analiz etmeye yönelik olan yangın eğrileridir. Seçilen yangın fırınında da ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisi kullanılabilmektedir. Deneyler sırasında ISO 834'e göre izlenecek sıcaklık-zaman ilişkisi ve grafiği Şekil 3.26'da yer almaktadır. Deneyler sırasında bu eğriye standartlarda izin verilen yaklaşıklıkta (± 50 C°) uyulmuştur.

Selülozik standart yangın eğrisi (ISO 834) sıcaklık- zaman ilişkisi

$$T= 20+ 345 \log10 (8t+1)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada, T, fırın/kompartman içerisindeki gaz sıcaklığını, t ise zamanı göstermektedir (ISO 834-1, 2012).



Şekil 3.26: ISO 834 standart yangın eğrisi.

3.7 Yalıtım

Deneyler kapsamında, daha önce de belirtildiği üzere toplam dört numuneden ikisi yalıtımlı olarak test edilmiştir. Yapı bir kütüphane yapısı olduğu için yangın potansiyeli ve yükü fazladır.

Bu numunelerden (GBK-YP) ve (GBK-YN) Türkiye'de de kullanımı yeni başlayan ince film kabaran (şişen) boyalar ile 60 dakika yangın dayanımı (R) sağlayacak şekilde yalıtılmıştır. Gövdesi boşluklu kiriş numunelerinin sıcaklık artışı kesit faktörüne (A/V) ya da (Hp/A'ya) bağlı olarak değişmektedir. Kesit faktörü gövde boşluklu numuneler için yalıtım firması tarafından kirişin geometrik özellikleri göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Hesaplama yapılırken EN 13881-4 (2002) ve BS EN 13881-8 (2013)

standartlarında belirtildiği gibi numunenin gövde ve alt başlığa bağlı olarak verilen iki farklı bağıntıya uygun olarak kesit faktörleri hesaplanmıştır. A/V, gövde özelliklerine bağlı olarak

$$A/V = \frac{2D-4t_f}{(D-2_{tf})t_w} \quad (3.12)$$

ile hesaplanmaktadır. Buna göre IPE 140 geometrik özellikleri göz önüne alınarak daha önce Bölüm 2.3'de açıklanan hesaplamaya göre yapılarak sonuç 285 m^{-1} bulunmuştur.

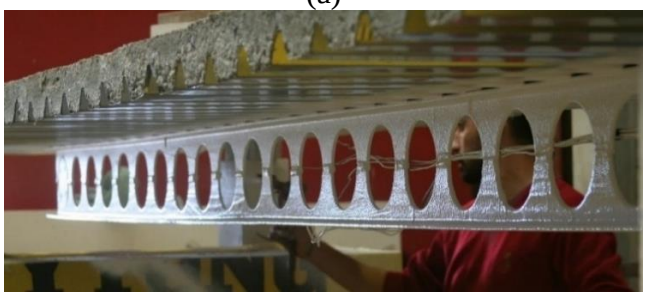
Alt başlığa bağlı olarak ise

$$A/V=\frac{(2B+2t_f)-t_w}{B.\ t_f} \quad (3.13)$$

ile hesaplanmaktadır. Buna göre yapılan hesaplama sonucu 307 m^{-1} bulunmuştur. Hesaplanan kesit faktörlerinden en düşük olan 285 m^{-1} seçilerek, bu değere bağlı olarak su ve solvent bazlı yalıtım kalınlıklarına, yalıtım firmasının tablolarından kirişler için kritik sıcaklık olan 620 C°'ye karşılık gelen ve 60 dakika yangın dayanımı koşulunu sağlayan yalıtım kalınlıkları seçilmiş ve uygulanmıştır. Buna göre, su bazlı olarak numunede kuru film kalınlığı 384 µm (mikron)dft, solvent bazlı numunede 770 µm (mikron) dft olarak belirlenmiştir. Bir başka deyişle, su bazlı yalıtımın kalınlığı 0.38 mm ve solvent bazlı numunenin yalıtım kalınlığı ise 0.77 mm olarak belirlenmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3.27: Kabaran (şişen) boya uygulama aşamaları: (a) Kiriş gövdelerine astar boya uygulanması, (b) Kabaran (şişen) boya uygulanması.

Numunelerde kullanılacak olan kabaran (şişen) boya uygulamasından önce usullerine uygun olarak yüzey hazırlığı yapılmış ve astarlama işlemi uygulanmıştır (Şekil 3.27a).

Uygulama püskürtme sistem ile yapılmıştır (Şekil 3.27b). Deneylerden önce her iki numunenin kuruması için en az 24 saat beklenmiştir.

Betonarme döşemede yer alan trapez sac boşluklara yangın koruması uygulanmaması durumunda yangın dayanım süresini sağlamak için önerilen yöntemler Çizelge 3.9'da verilmektedir. Newman (1991) tarafından yazılan teknik rapor test sonuçlarına göre, 60 dakika yangın dayanımı sağlanmış kiriş ile trapez sac arasında bulunan boşlukların yalıtılmamasının kirişin moment kapasitesine etkisinin düşük olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle ve deneyler sırasında gövde boşluğunun etkisini tam olarak anlayabilmek amacıyla trapez boşluklar bu çalışmada yalıtımsız bırakılmış, bir başka deyişle tavsiye edilen yalıtım kalınlığında bir değişikliğe gidilmemiştir.

Çizelge 3.9: Trapez sac levhaların yangından koruma yöntemleri (ASFP Yellow book, 2014).

Trapez Boşluklu Sac Levha				
Kiriş Tipi	Kirişe Uygulanan Koruma	Yangın Dayanımı (dk.)		
Kompozit	Pasif (reaktif olmayan) ve reaktif malzeme	60'a kadar Yalıtım kalınlığını %20 yada A/V oranını kullanarak kalınlığı %30 arttır*	90 Yalıtım kalınlığını %30 arttır ya da A/V oranını kullanarak kalınlığı %50 arttır*	90 üstü Boşlukları doldur
Kompozit Olmayan *En zahmetsiz yöntem seçilebilir				Boşlukları doldur

3.8 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Cihazları

Deney fırını içerisindeki gazın ve gövdesi boşluklu çelik kirişlerin zamana bağlı sıcaklık değişimleri ısıl çiftler (thermocouples) kullanılarak ölçülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda kirişlerde meydana gelen değişimler yerdeğiştirme ölçerler (lineer cetveller) ile belirlenmiştir.

Deneylerde kullanılan ısılçiftler ve yerdeğiştirme ölçüm cihazları ile ilgili bilgiler ve yerleşim detayları bu bölümde açıklanmaktadır.

3.8.1 Isıl çift sıcaklık ölçerler (Termokupl)

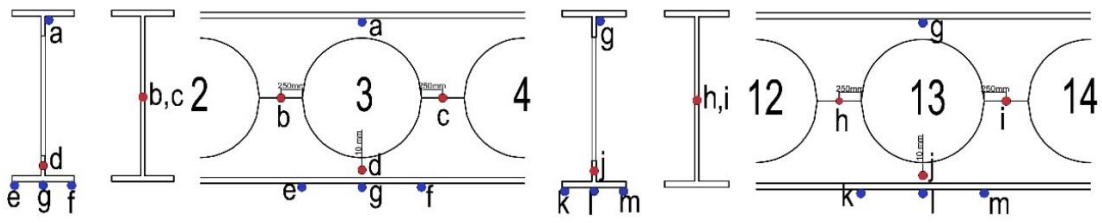
Deney fırını içerisindeki gazın ölçümü TS EN 1365-3 (2003) belirtildiği gibi fırın tabanına ve duvarlarına yerleştirilmiş olan plaka ısıl çiftler tarafından izlenmiştir. Gövdesi boşluklu çelik kirişlerin zamana bağlı sıcaklık değişimleri ise 1200 C°'ye kadar dayanıklı mineral izoleli K tipi ısıl çiftler kullanılarak izlenmiştir.

Mineral izoleli termokupllar çaplarının küçük olması ve fırın içerisinde bükülebilir olması ve kablo gibi dolaştırılabilme özelliği nedeniyle yangın deneylerinde sıkça kullanılmaktadır. Her deneyde ölçümleri doğru yapabilmesi için, bunlar inconel yalıtımlı, yalıtım sonrası teflon kaplı olarak seçilmiştir. Isıl çift sıcaklık ölçerlerin yerleşimleri daha iyi bir karşılaştırma yapabilmek için bütün deney düzeneklerinde aynıdır (Şekil 3.28) ve özellikleri Çizelge 3.10'da yer almaktadır.

Çizelge 3.10: Isıl çift ölçerlerin özellikleri.

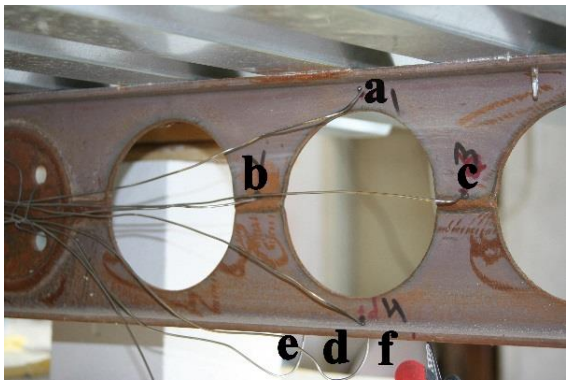
TM04-K120-500-2K							
Tip	Eleman	Çap	İç Tellerin Çapı	Toplam Uzunluk	Inconel Yalıtım Uzunluğu	Inconel Üstü Kaplama	Uç Kısım
Mineral İzoleli	1xK (NiCr-Ni)	1.5 mm	0.5 mm	7m	5m	Teflon	Topraksız ve Yalıtımlı

Isıl çift sıcaklık ölçerler her kirişin mesnete yakın olan ve kiriş açıklığının orta noktasına denk gelen üst, alt başlık ve gövde kısımlarında kritik noktalara yerleştirilmiştir. Her bir kirişte 14 adet olmak üzere toplam 56 ısıl çift kullanılmıştır (Şekil 3.28 a, b, c, d, e, f). Termokupllar yerleştirilmeden önce selülozik tiner ile yüzey temizliği yapılarak kiriş üzerinde belirlenen noktalar 0.5 mm delinerek ısılçift uçları bu bölgelere kaynaklanarak sabitlenmiştir (Şekil 3.29).

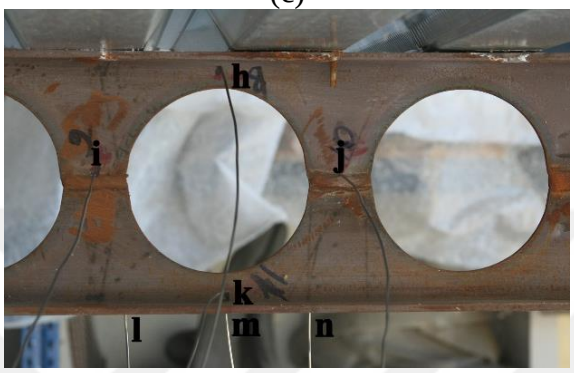


(a) (b)

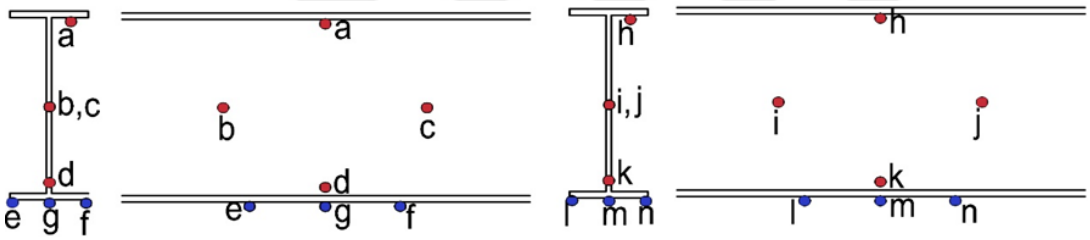
Şekil 3.28: Isılçiftlerin deney numuneleri üzerinde yerleşimi**:** (a) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde mesnete yakın bölgedeki ısıl çiftlerin yerleşimi, (b) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde kiriş orta noktasında ısıl çiftlerin yerleşimi.



(c)



(d)



(e) (f)

Şekil 3.28 (devam): Isılçiftlerin deney numuneleri üzerinde yerleşimi**:** (c) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde mesnete yakın bölgeye yerleştirilen ısıl çiftlerin görünümü, (d) Gövdesi dairesel boşluklu kirişlerde kiriş orta noktasına yerleştirilen ısıl çiftlerin görünümü, (e) Dolu gövdeli kirişte mesnete yakın bölgedeki ısıl çiftlerin yerleşimi, (f) Dolu gövdeli kirişte kiriş orta noktasında ısıl çiftlerin yerleşimi.



Şekil 3.29: Isıl çiftlerin kirişe yerleştirilmesi.

3.8.2 Tek eksenli şekildeğiştirme ölçerler (Strain Gauges)

Şekildeğiştirme ölçerler kirişler üzerinde yer alan döşemenin donatılarına ve başlıklı saplamaların (studlar) yüksek sıcaklıklarda meydana gelen birim şekildeğiştirmelerin en yüksek olabileceği mesnete en yakın bölgelere ve kiriş ortasına denk gelen alanlara yerleştirilmiştir (Şekil 3.30 c, d). Donatılar ve başlıklı saplamaların yüzeyi elektrikli taşlama makinası ile pastan arındırılmıştır (Şekil 3.30a). Daha sonra yüzeyde herhangi bir kalıntı kalmayacak şekilde temizlenmiş ve siyanoakrilatlı bileşikli yapıştırıcı kullanılarak yüzeye tespit edilmiştir (Şekil 3.30b). Kullanılan şekildeğiştirme ölçerler beton içerisinde gömülü olacağı için yüksek sıcaklıklara dayanıklı tercih edilmemiştir. Beton dökülürken doğrudan cihazların üzerine doğrudan gelmeyecek ve zarar görmeyecekleri şekilde döküm yapılmıştır. Deneyde kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin özellikleri Çizelge 3.11'de verilmiştir.

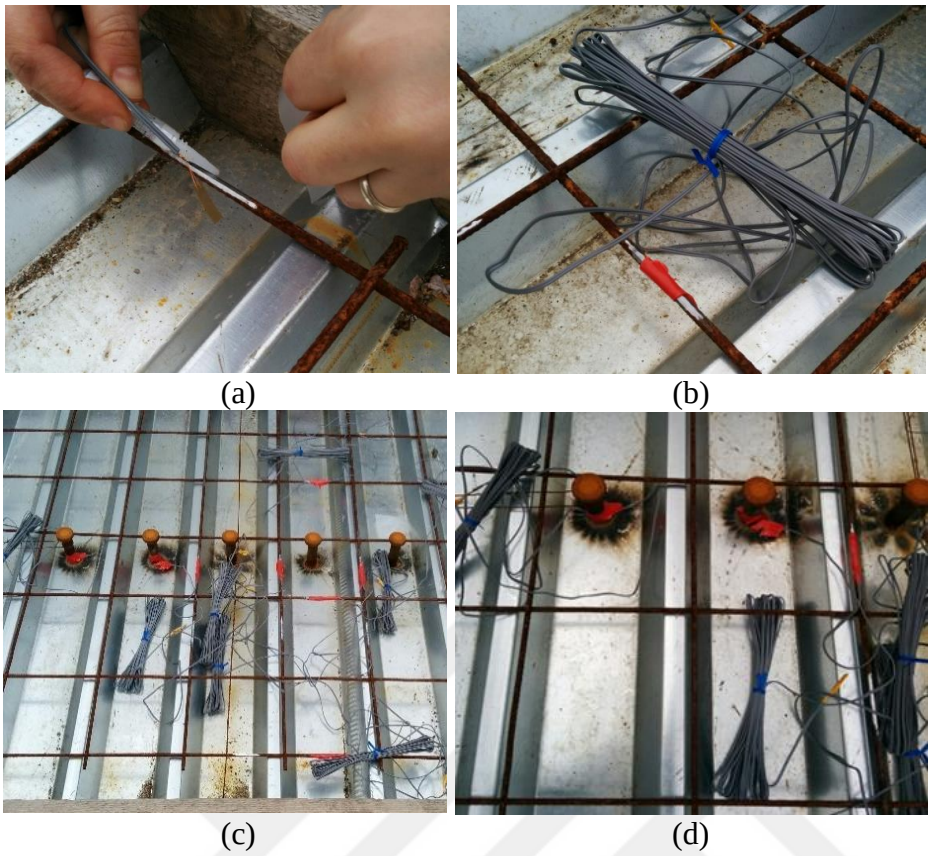
Çizelge 3.11: Şekildeğiştirme ölçerlerin özellikleri.

TML-YFLA-10-8L				
Gauge Boyu	Genişliği	Direnci	Uygulama Yüzeyi	Gauge Faktörü
10 mm	2.6 mm	120 Ohm	Çelik	2.1

Döşeme betonu dökülmeden önce donatılara 14 ve saplamalara 3 adet yerleştirilmiş olan 17 adet şekildeğiştirme ölçer etiketlenerek gruplandırılmış olup numune üzerinde yerleşim şeması Şekil 3.34b' de gösterilmektedir. Her bir deney numunesinde 17 adet olmak üzere toplamda 68 adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır (Şekil 3.31a, b).

Numuneler üzerine yerleştirilen tüm başlıklı saplamaların voltmetre ile 120~121 Ohm direncinde olduğu kontrol edilmiştir.

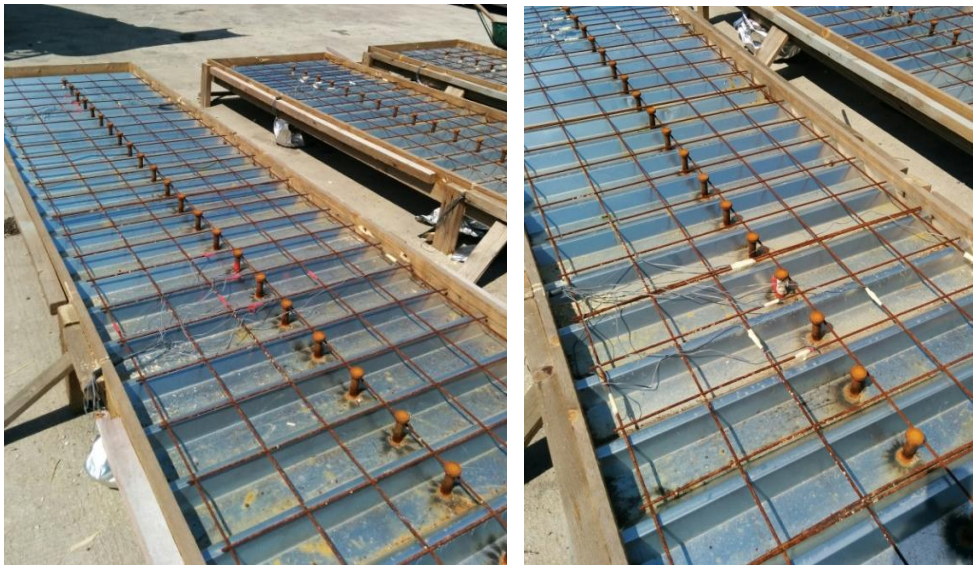
Strain gaugelerin okuma yapacak olan yüzeylerinin korunması amacıyla bant kapatılmış olup kabloların korunması amacıyla da sert plastikten yapılmış kablo koruyucuların içine yerleştirilmiştir.



(a) (b)

(c) (d)

Şekil 3.30: Donatı ve başlıklı saplama elemanlarına şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması: (a) Donatı yüzeyinin temizlenmesi, (b) Donatılara şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması, (c) Kiriş açıklığının ortasına denk gelen bölgede donatı üzerine şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması, (d) Başlıklı saplama elemanlarına şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılması.



(a) (b)

Şekil 3.31: Beton dökümü öncesi şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmiş numuneler: (a) GBK-YS numunesine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler, (b) GBK-YP numunesine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler.

3.8.3 Yerdeğiştirme ölçerler (Lineer Cetveller)

Yüksek sıcaklıklarda meydana gelecek yerdeğiştirmeler ani ve önemli değerlere vardığından, deneyde kullanılan yerdeğiştirme ölçerler bu değerleri ve hızı belirleyebilmek amacıyla kullanılmıştır. Düşey yerdeğiştirmeler laboratuvar ortamında lineer cetvel ile ölçülmektedir (Şekil 3.32). Novotechnik TLM serisi magnetostriftik prensiple çalışmakta ve içerisinde bulunan magnetik okuyucu sensör tarafından düşey yerdeğiştirmeler kaydedilmektedir Her deneyde ölçümleri doğru yapabilmesi amacıyla hassaslıkla yerleştirilmiş 7 adet lineer cetvel kullanılmıştır (Şekil 3.34a).

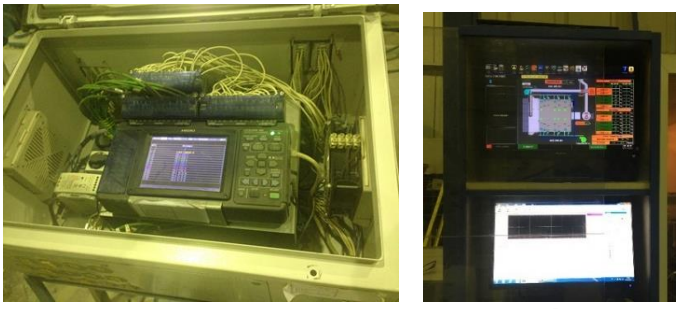


(a) (b)

Şekil 3.32: Deneylerde kullanılan yerdeğiştirme ölçerler: (a) Yerdeğiştirme ölçerlerin görünümü, (b) Lineer cetvellerin magnetic okuyucu sensor bölümleri.

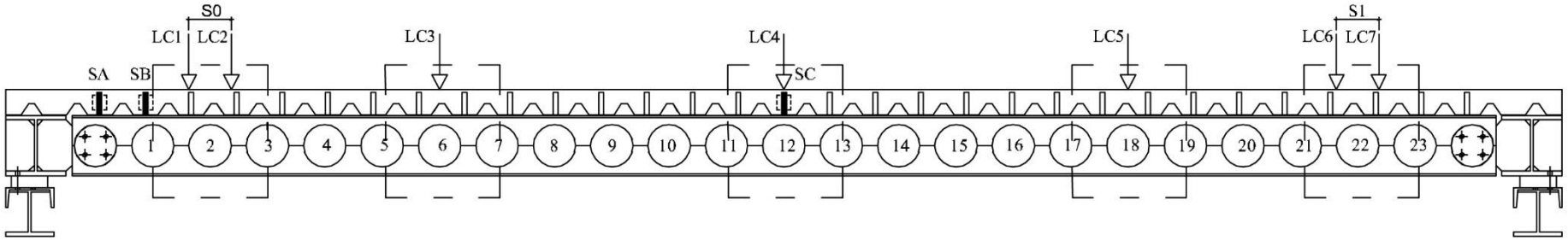
3.8.4 Veri Toplama Cihazı (Data Logger)

Numuneler üzerine yerleştirilen ısıl çift sıcaklık ölçer, şekildeğiştirme ölçer ve yerdeğiştirme ölçerlerden sıcaklık-zaman eğrisine bağlı olarak elde edilen elektriksel bilgi veri toplayıcı tarafından fiziksel büyüklüğe çevirerek 10sn aralıklar ile kaydedilmiştir (Şekil 3.33a). Veri toplayıcı olarak 60 kanallı olan HIOKI LR 8400-20 kullanılmış ve buna bağlı yazılım programı 100 BASE-TX sayesinde elde edilen elektriksel bilgi grafik ve text dosyası olarak deney boyunca kaydedilmiş, bilgi akışı ve grafikler monitörlerden izlenmiştir (Şekil 3.33b).

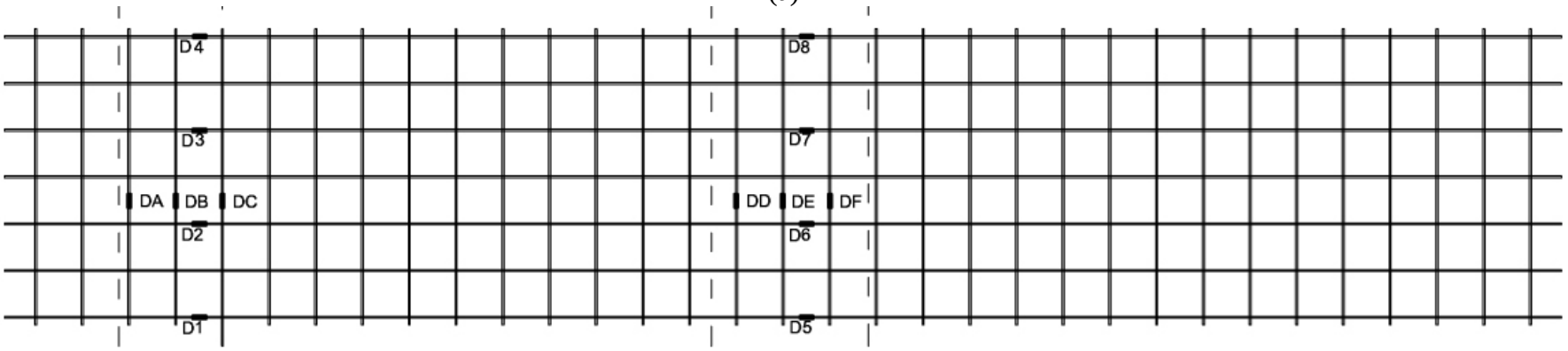


(a) (b)

Şekil 3.33: Veri toplama ve değerlendirme merkezi: (a) Veri toplayıcı, (b) Kontrol merkezi.



(a)



LC: Lineer Cetvel
SA, B, C: Kayma bağlantılarına (studlara) yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler
D 1, 2, 3…/A, B, C..: Donatılara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler

(b)

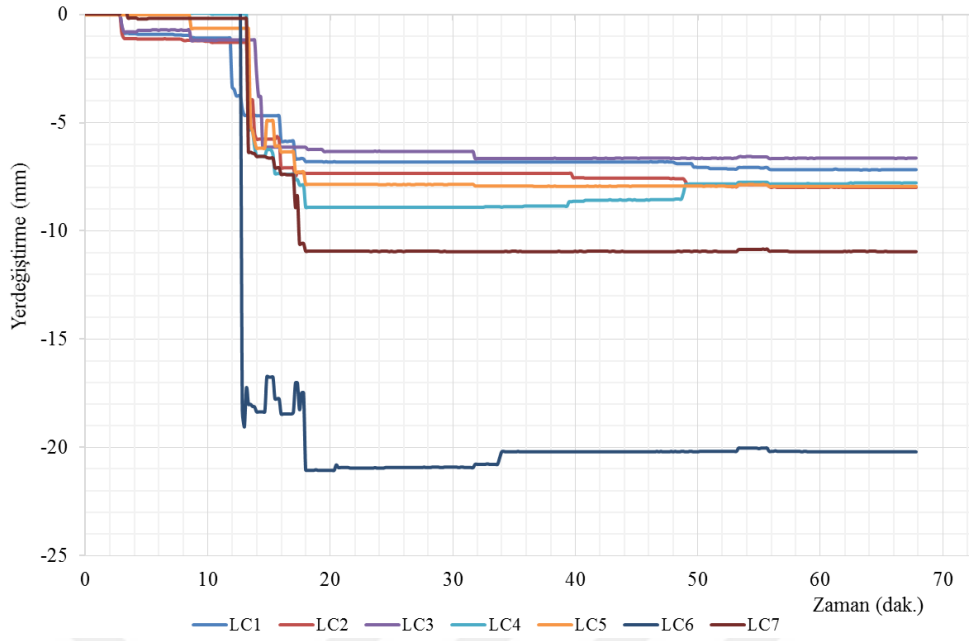
Şekil 3.34: Yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme ölçerlerin numuneler üzerindeki yerleşimleri: (a) Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi (ön görünüş), (b) Şekildeğiştirme ölçerlerin yerleşimi (plan).

4. GÖVDESİ BOŞLUKLU ÇELİK-BETONARME KOMPOZİT DAİRESEL BOŞLUKLU I-KİRİŞLERİN YANGINA DAYANIM DENEYLERİNDEN GÖZLEMLER

Ynagına dayanım deneyleri gerçek ölçeklerdeki numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde maksimuma yakın dairesel gövde boşluk oranlarındaki çelik-betonarme kompozit I-kirişlerin ISO 834 yangın eğrisi altındaki gösterdiği davranışlar incelenmiştir. Kirişin yalıtımlı-yalıtımsız, gövdesinin boşluklu ve dolu olması durumlardaki yüksek sıcaklıklardaki davranış farklarının irdelenmesi, kompozit olmasından dolayı yüksek sıcaklıklarda betonarme döşemede meydana gelecek davranışlar ve bu davranışların kirişlere olan etkileri ve numunelerden elde edilecek sıcaklık ve yerdeğiştirme eğrilerine bağlı olarak kirişlerin yalıtımlı/yalıtımsız ve gövdesinin dolu/boşluklu olması durumunda yüksek sıcaklıklar altında gösterecekleri davranışlar karşılaştırılmıştır. Numunelere yerleştirilmiş olan ısıl çiftler ve yerdeğiştirme ölçerler, bu eğrilerin en doğru şekilde elde edilmesini sağlamıştır; şekildeğiştirme ölçerlerden laboratuvar çıkışlarından kaynaklanan bir sorun nedeniyle sağlıklı veri alınamamıştır. Deneyler sırasında numunelerin davranışları fırın dışına kurulan dijital kamera sistemi ile deney boyunca kaydedilmiştir. Fırın içerisinde ise numunelerin takibi yüksek sıcaklıklara dayanıklı CESYCO HTO-38 termal kamera ile gerçekleştirilmiş ve görüntüler deney boyunca kameraya bağlı bir monitör aracılığıyla izlenmiştir. Termal kamera ve kamera görüntüleri EK-F ve EK-G'de dijital olarak yer almaktadır.

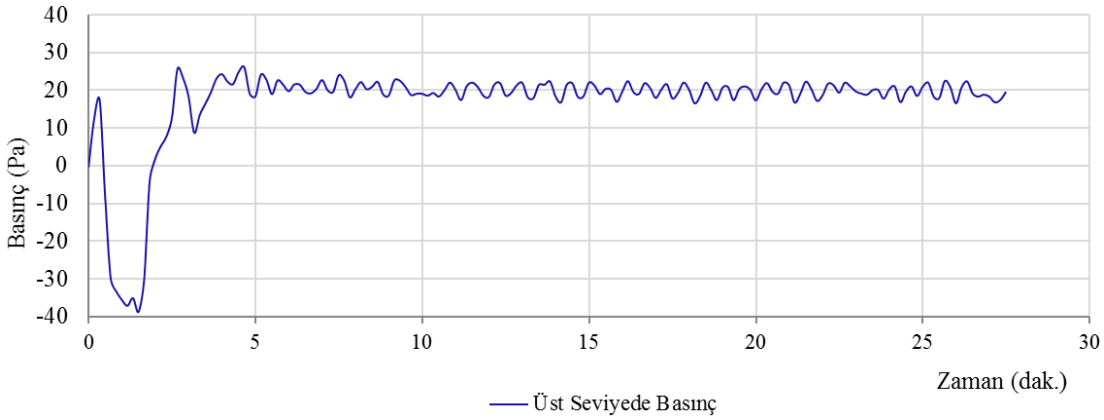
4.1 GBK-YS Numunesi

Deneysel etiketi GBK-YS olan yalıtımsız gövde boşluklu kompozit kiriş numunesinin düşey yüklemesi deneye başlamadan önce tamamlanmış olup yaklaşık t=68 dakika civarında meydana gelen yerdeğiştirmeler kaydedilmiştir. Kirişin tasarım yükü altında, yangın etkisi olmadan en çok 20 mm civarında bir düşey yerdeğiştirme yaptığı anlaşılmıştır (Şekil 4.1).



Şekil 4.1: GBK-YS numunesinin için yerdeğiştirmenin-zamana bağlı değişimi.

Fırın içerisindeki basınç dağılımı TS EN 1363-1 (2013) standardı gereği fırın yüksekliği boyunca gazların hidrostatik basınç ilkesinden etkilenmektedir. Fırın içi basınç kontrolü nötr basınç düzlemi üzerinden hesaplanmakta olup deney numunesinin üstünde 20 Pascal üzerine çıkmaması gerektiği vurgulanmaktadır. Deney boyunca fırın içerisindeki basınç değişimi Şekil 4.2'de verilmektedir. Basınç-zaman grafiğinde görüldüğü üzere, fırın içerisindeki basınç deney süresince standard değeri olan 20 Pascal'ı sağlamıştır. Tüm numune deneyleri için fırın içerisindeki basınç-zaman grafikleri EK-D'de yer almaktadır.

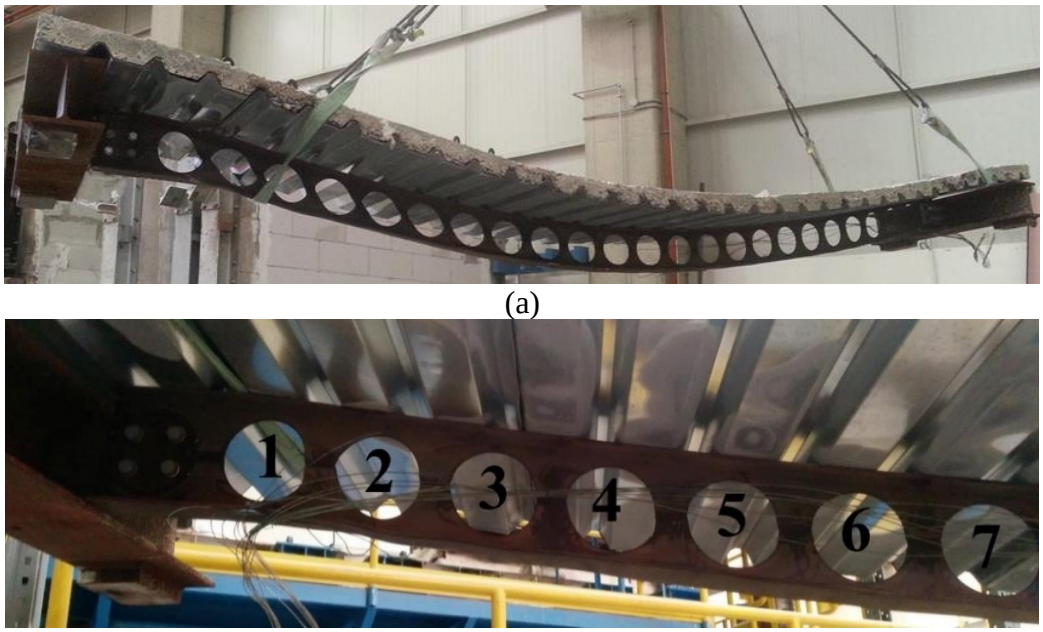


Şekil 4.2: Fırın içerisindeki basıncın zamana bağlı değişimi.

Deney sonrasında GBK-YS numunesi incelendiğinde (Şekil 4.3a), çelik kirişin her iki mesnet noktasına yakın olan bölgelerdeki gövde boşluklarının arasında kalan bölümlerde yerel burkulmalar meydana geldiği görülmüştür.

Kirişin mesnet noktalarından lineer cetvel 6 ve 7 (LC6 ve LC7) bölgesine denk gelen bölümde 19'dan 23. gövde boşluğuna kadar belirgin düzlem dışına doğru burkulmalar saptanmış olup aynı bölgede alt başlıkta da deformasyonlar olduğu belirlenmiştir (Şekil 4.3d). Buna karşın LC6 ve LC7 bölgesinde trapez çelik levha ile beton arasında ayrılmalar olmadığı tespit edilmiştir. Bu da başlıklı saplamaların kompozit davranışı deneyin sonuna dek desteklediğini göstermektedir (Şekil 4.3e, f). Diğer mesnete yakın uçta LC1, LC2 ve LC3'ün konumlandığı bölgede mesnetten itibaren 2'den ve 9. boşluğa kadar yerel burkulmalar, bunlardan 2. 3. ve 4. boşluklarda gövde burkulmaları görülmüştür (Şekil 4.3b). Mesnete yakın iki uçta da dairesel boşluklarda Vierendeel göçme mekanizmasına bağlı olarak daireden elipse doğru şekil değişikliği saptanmıştır. Daire boşluklarında deformasyona bağlı olarak en belirgin çap değişikliği 22. boşlukta gelişmiş olup kısa ve uzun çaplar sırasıyla D_1=11cm ve D_2=17 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.3e).

Kiriş açıklığının orta bölgesi LC4'de deplasman değeri yüksek ve kalıcı olmasına karşın, mesnet noktalarındaki gözlenen belirgin gövde burkulmaları, alt başlıklarda deformasyon ve daire boşluklarında Vierendeel etkisine bağlı şekil değişikliği beklendiği üzere bu bölgede gözlenmemiştir (Şekil 4.3c). Şekil 4.3'de GBK-YS numunesinin deney sonrası fotoğrafları yer almaktadır.



(a)

(b)

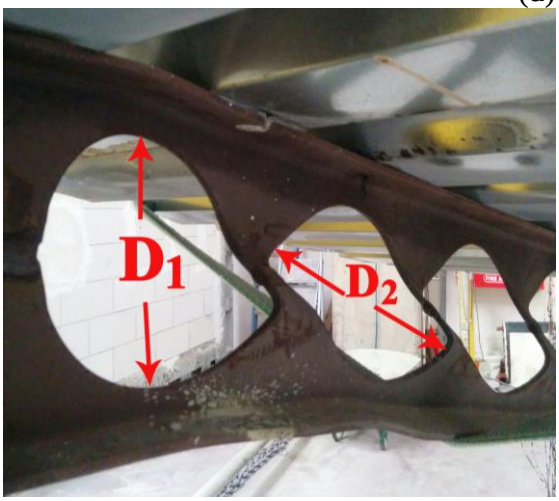
Şekil 4.3: GBK-YS numunesi deney sonuçları: (a) Deney sonrası kirişin genel görünümü, (b) Deney sonrası LC 1, 2 ve 3'ün konumlandığı bölgeden görünümü.



(c)



(d)



(e)

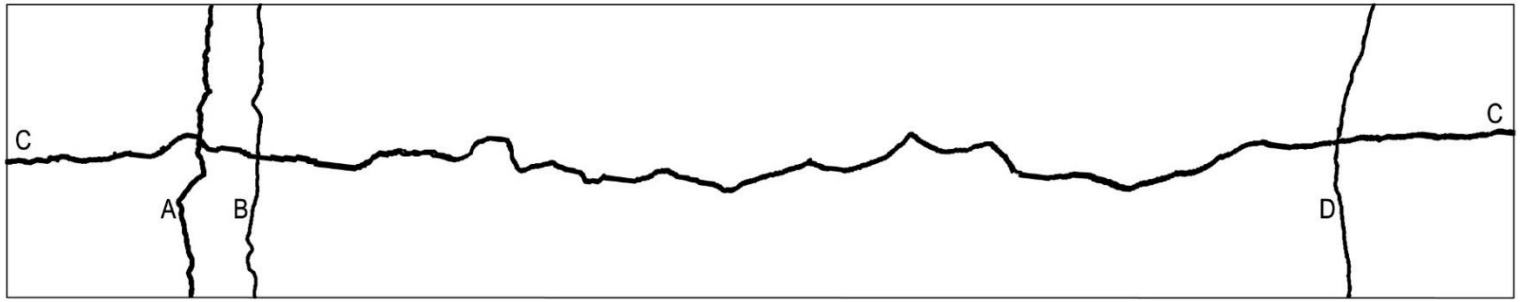


(f)

Şekil 4.3 (devam): GBK-YS numunesi deney sonuçları: (c) LC4 bölgesinin görünümü, (d) Lineer cetvel 6 ve 7 bölgesinin görünümü, (e), (f) LC6 ve 7'de meydana gelen gövde burkulması ve Viereendel göçme.

Betonarme döşemede meydana gelen hasarlar incelendiğinde 5 adet çatlak belirlenmiş ve bunlar A, B, C, D ve E olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.4a). Bu çatlaklar iki tiptir. Birincisi kirişin üzerinde açıklık boyunca (kiriş ekseni üzerindeki başlıklı saplamaları izleyen), ikincisi kiriş eksenine dik olarak devam etmekte olan çatlaklardır. C çatlağı kirişe paralel olarak üzerinde ilerleyen çatlakdır ve bu çatlak 0.3~0.4 mm genişlikte olup plak kalınlığı boyunca devam ederek çelik saca kadar indiği görülmektedir (Şekil 4.4c, e). B çatlağı mesnete 60 cm mesafede gerçekleşmiş olup genişliği 0.2~0.3 mm olarak ölçülmüştür. A ve D çatlakları mesnete en yakın bölgelerdeki ve kiriş eksenine dik olan çatlaklardır (Şekil 4.4b). Bu çatlaklardan A çatlağı 2. ve 3., D çatlağı da 22. ve 23. Boşluklar üzerine denk gelmektedir. Mesnet noktalarına en yakın bu bölgede kesme kuvvetinin en yüksek değere ulaşması ile en yakın boşluklarda meydana gelen yerel burkulmalar Vierendeel etkisi ile eğilmesi nedeniyle üst katmandaki betonu çatlatarak A ve D çatlaklarının oluşmasına yol açmıştır. A çatlağı en büyük çatlak olup B çatlağının 15 cm mesnet tarafında yaklaşık olarak 3~4 mm genişliğe sahiptir. Kiriş eksenine dik olan D çatlağı çelik saca kadar inerek E çatlağını oluşturmuştur (Şekil 4.4d).

Deney sonucunda bazı noktalarda (özellikle iki yan yüzeyde) çelik sac ile döşeme arasında ayrılmalar görülmüştür. Bu ayrılmalar aderans kaybını göstermektedir. Beton ve çelik arasındaki ayrılmalar çeliğin pürüzsüz olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrılmaların mesnet bölgelerinde daha fazla olduğu, kiriş açıklığının ortasına doğru gidildikçe azaldığı görülmektedir. Çatlak genişlikleri mesnet bölgelerinde bir kaç cm, orta bölgelerde birkaç mm olarak ölçülmüştür.



(a)



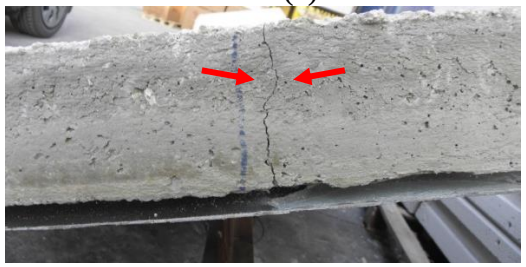
(b)



(c)



(d)

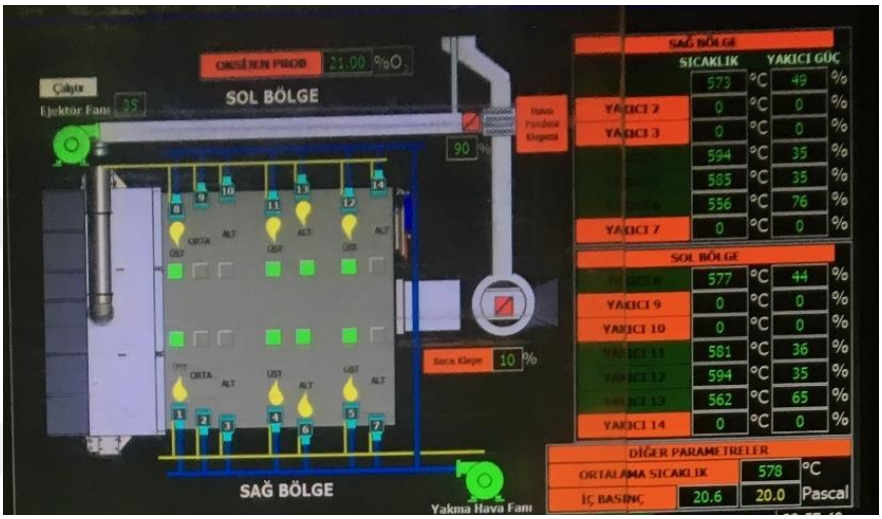


(e)

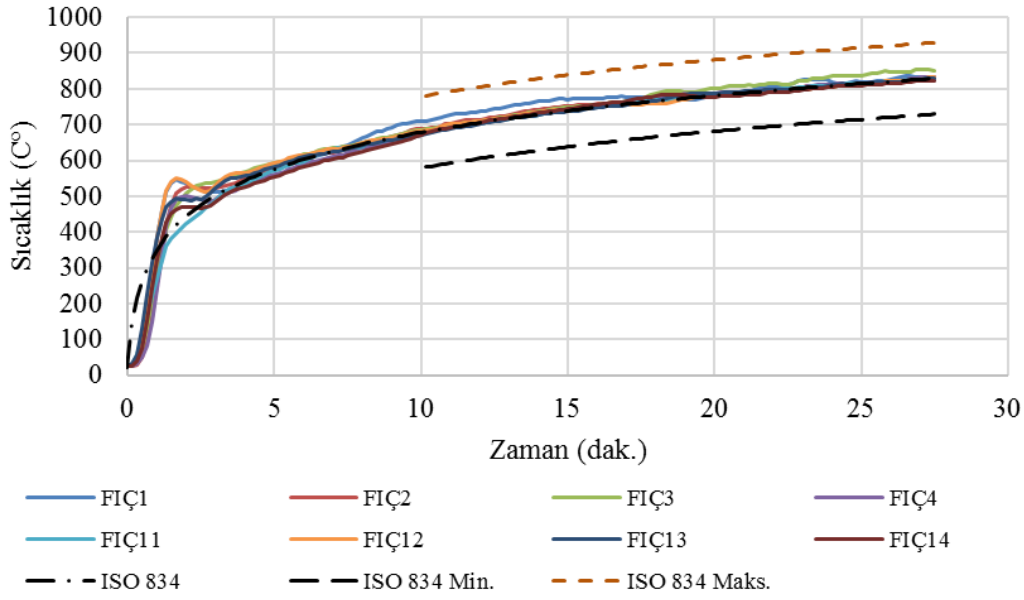
Şekil 4.4: GBK-YS numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlak haritası (plan), (b) A ve B çatlaklarının görünümü (plan), (c) C çatlağının görünümü (plan), (d) E çatlağının görünümü (kesit), (e) C çatlağı (plak kalınlığı boyunca).

4.1.1 Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Fırın içerisindeki sıcaklık eğrisinin ISO 834 yangın eğrisi değerlerine ulaşması amacıyla 8 adet brülör aktif hale getirilmiş ve deneyler boyunca fırın içerisindeki gaz sıcaklığı 8 adet plaka tipi ısıl çift (FIÇ1, 2, 3, 4, 11, 12, 13, 14) tarafından izlenmiştir (Şekil 4.5). Isıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerlerinin ISO 834 yangın eğrisi ile karşılaştırılması Şekil 4.6'da verilmektedir. Deneyin ilk 5 dakikası içerisinde veriler dalgalanma göstermekte, 5. dakikadan itibaren ISO 834 yangın eğrisi sıcaklık-zaman eğrisine ulaşmakta ve deney süresi boyunca uyumlu olarak devam etmektedir.



Şekil 4.5: Fırın içerisindeki brülörlerin konumu.

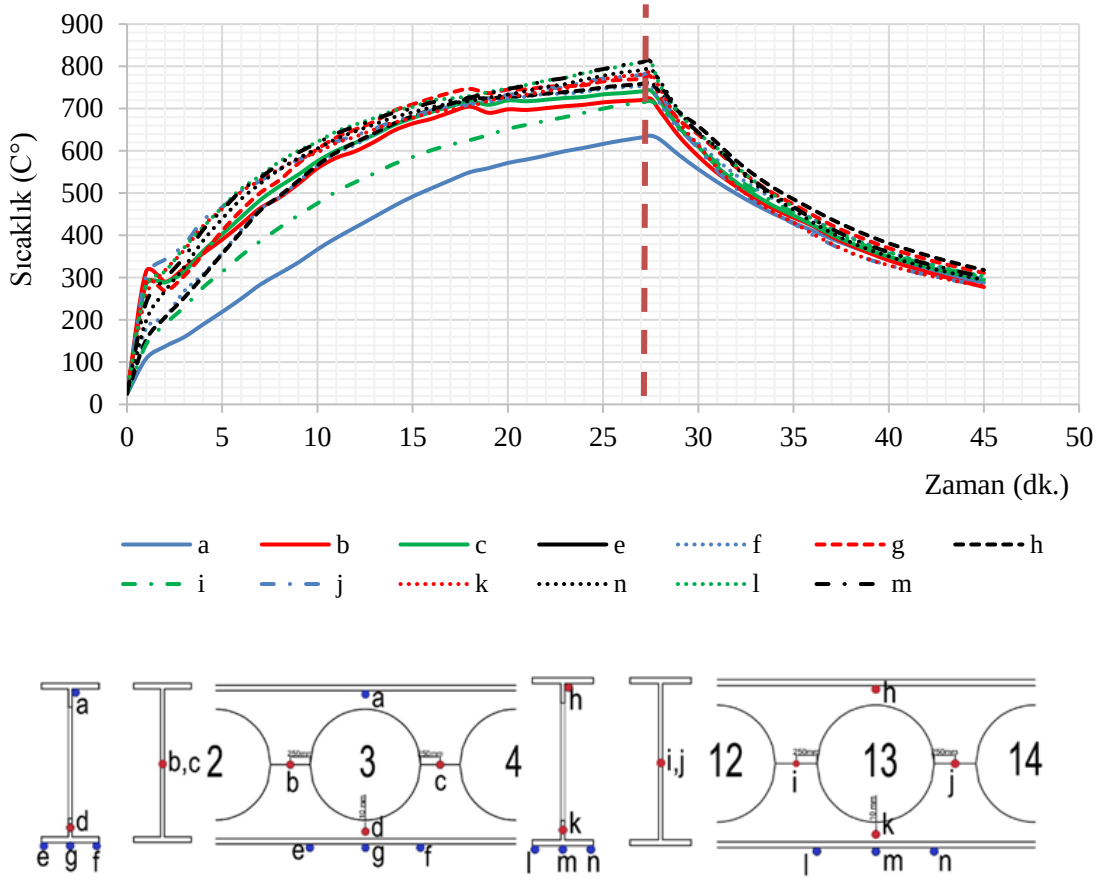


Şekil 4.6: GBK-YS numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi.

Kiriş yüzeyine yerleştirilmiş olan 14 adet ısıl çift bulunmaktadır. D noktasına yerleştirilmiş olan ısıl çift bu deney sırasında bozulduğu için veri alınamamıştır.

Isıl çiftlerden elde edilen veriler Şekil 4.7'de yer almaktadır. Şekil 4.7'de düşeyde kırmızı kesik çizgi ile deney bitiş süresi olan 27.5 dakika gösterilmiştir.

Göçme, t=24.5 dakikada maksimum düşey yerdeğiştirmenin standartlar tarafından belirtilmiş olan kiriş açıklığının L/20'sine ulaştığı değerde gerçekleşmiştir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde en düşük sıcaklıklara LC1-LC2 ve LC6-LC7 bölgesinde üst başlığa yakın bölge a (635.9 C°) h (717.4 C°) ile LC1-2 bölgesi gövde ortasında b (723.4 C°) noktasında, en yüksek sıcaklığa kiriş açıklığının ortasında alt başlığa yerleştirilmiş olan m (808.1 C°), l (811.1 C°) ve n (811.2 C°) noktalarında ulaşıldığı görülmektedir. Betonarme döşemenin varlığı beklendiği üzere, üst başlıkta elde edilen sıcaklık verilerinin alt başlığa göre daha düşük düzeylerde kalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.7: GBK-YS numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi.

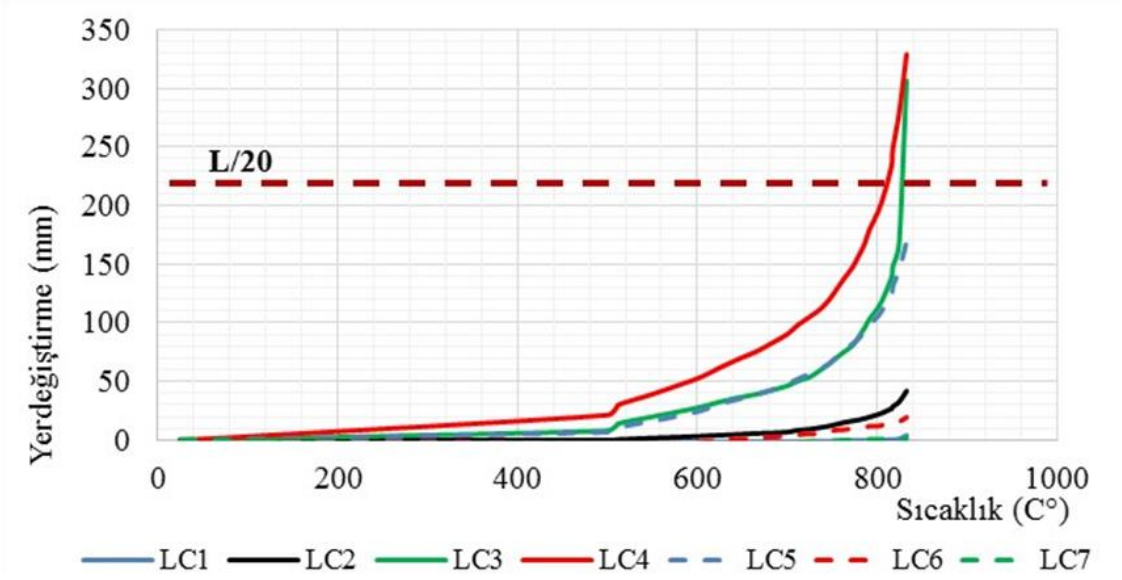
4.1.2 Yerdeğiştirme Eğrileri

Lineer cetvellerden elde edilen yerdeğiştirmeler, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmektedir. Yerdeğiştirmelerde 500 Cº sıcaklığa ulaşıldığında belirgin bir artış görülmektedir.

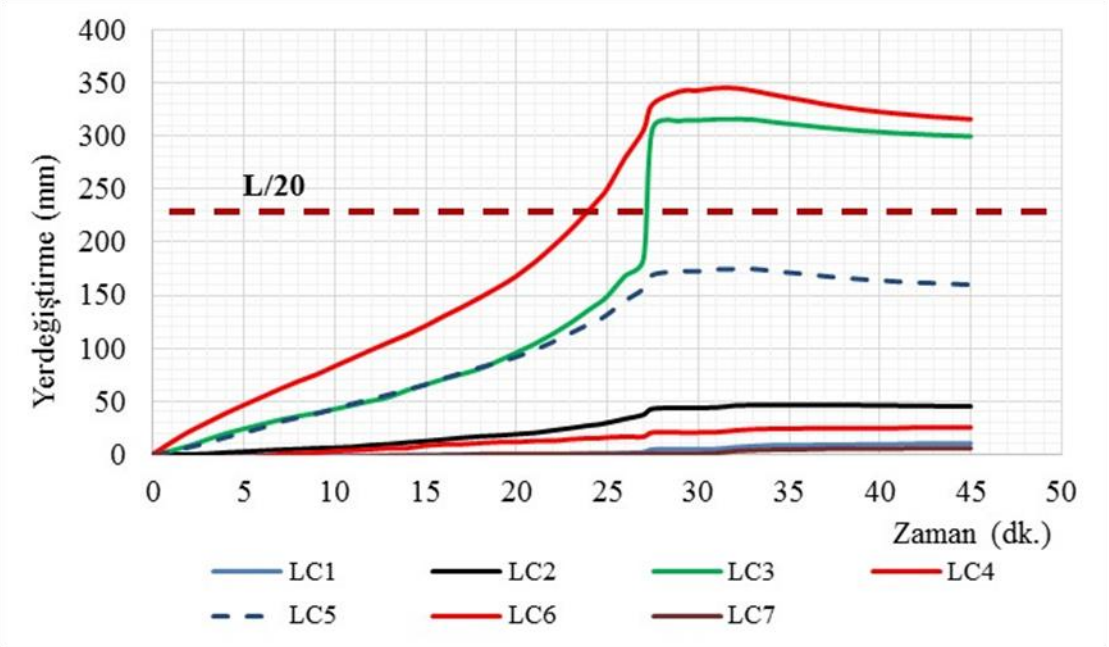
En yüksek yerdeğiştirme kiriş açıklığının orta noktasında LC4'de ölçülmüştür. Bu noktada göçme değerine (L/20) karşı gelen sıcaklık 816 Cº 24.5. dakikada gerçekleşmiş ve göçme 239.2 mm'de oluşmuştur.

Deney, 832 Cº ve 27.5. dakikada sonlandırıldığında en büyük yerdeğiştirme verisi LC4 bölgesinde 329.3 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş açıklığında, dörtte birinde simetrik olarak yerleştirilen LC 3 ve LC5'de ölçülen yerdeğiştirmeler sırasıyla 307.1 mm ve 169 mm olarak LC4'den sonra en yüksek değerlerdir. LC2 ve LC6'da okunan değerler ise sırasıyla 42.3 mm ve 19.9 mm'dir.

Mesnet noktalarına en yakın ve birbirlerine simetrik olarak konumlandırılan LC1 ve LC7'de deney sonunda en düşük değerler olan 4.57 mm ve 0.7 mm'ye ulaşılmıştır. Yerdeğiştirme verileri incelendiğinde, kiriş açıklığının orta noktasından mesnet noktalarına doğru gidildikçe yerdeğiştirme değerlerinde azalma olduğu görülmektedir.

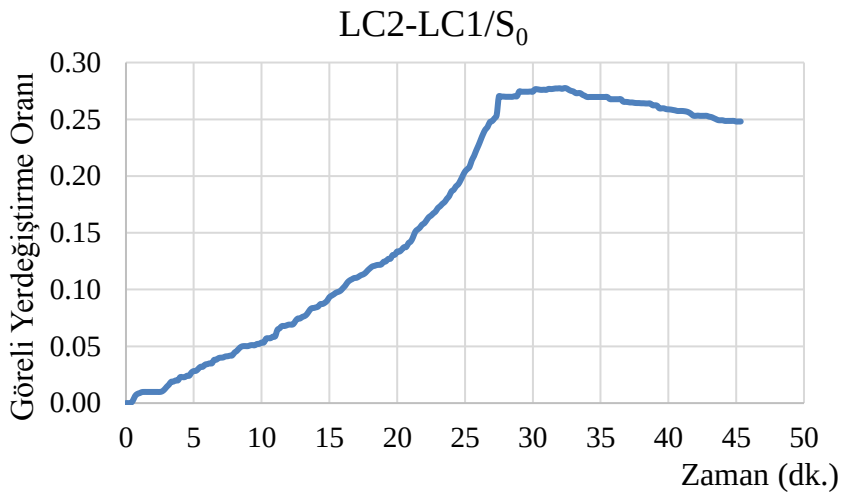


Şekil 4.8: GBK-YS numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi.

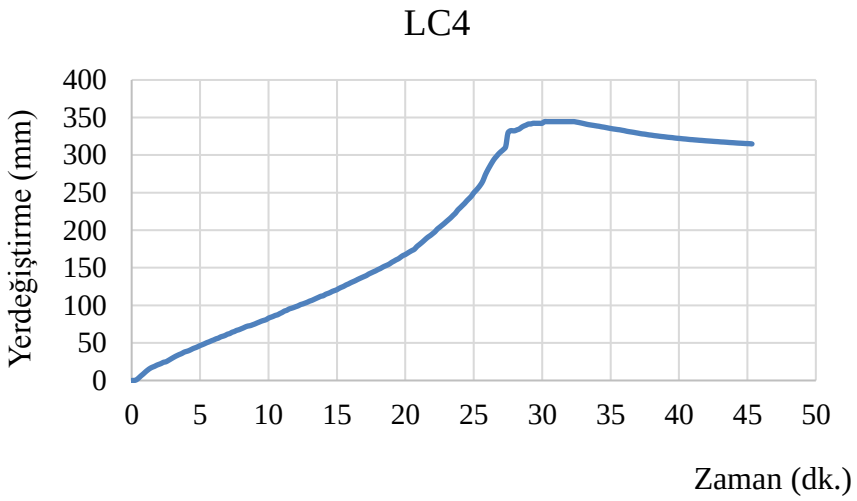


Şekil 4.9: GBK-YS numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi.

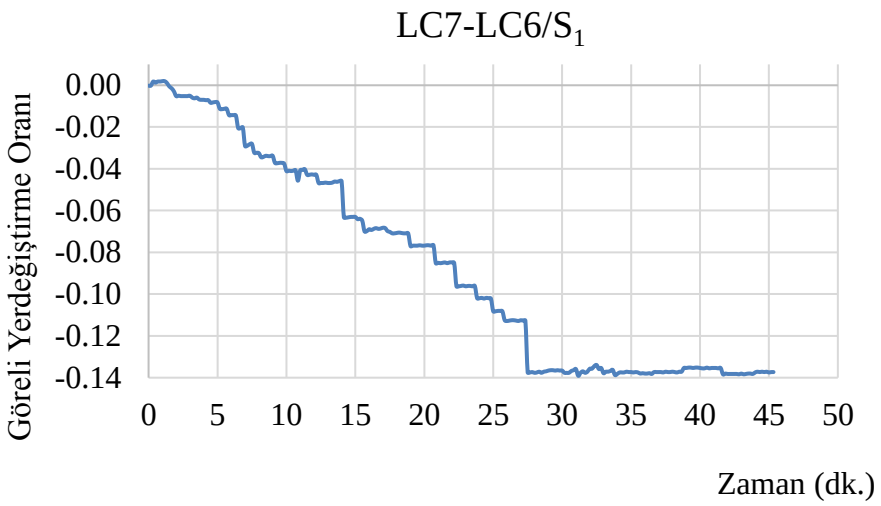
Boşluklu kirişlerde açıklık ortasındaki toplam düşey yerdeğiştirmelerin yanısıra kesme kuvvetlerinin en yüksek olduğu mesnet bölgesine yakın boşluklarda, ardışık boşluklar arasındaki göreli düşey yerdeğiştirmeler Vierendeel etkisi (sekonder/ikincil eğilmeler) nedeniyle daha da önem kazanabilmekte, kirişin tümsel davranışını yönetebilmektedir. Bu nedenle bu değerlerden kritik olanlar özellikle her iki mesnet noktasına yakın olan bölgelerde olan boşluklar için (LC2-LCl ve LC7-LC6) hesaplanmıştır. Vierendeel etkisi bakımından en olumsuz durumun LC2-LC1 bölgesindeki boşlukta göçme anında (24.5 dk.) 0.19, deney bitiminde (27.5 dk.) 0.27 oranında olduğu görülmektedir. LC7-LC6 bölgesinde göreli yerdeğiştirme oranı incelendiğinde ters yönde bir değişim olduğu, göçme anında bu oranın -0.10 iken deney sonlandırıldığında -0.13'lere ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.10a, b, c).



(a)



(b)



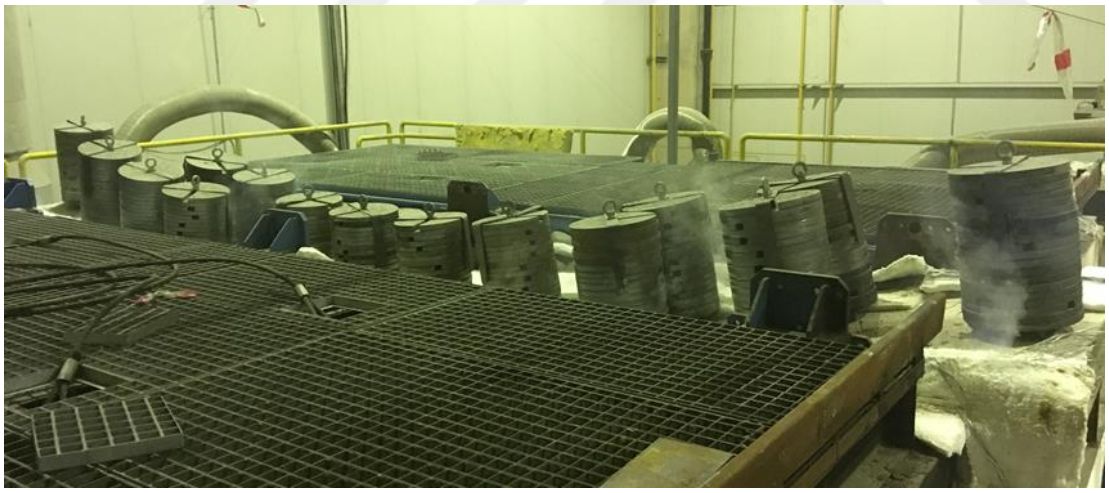
(c)

Şekil 4.10: GBK-YS numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-LC1 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-LC6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi.

4.2. DK-R Numunesi

Deneysel etiketi DK-R olan dolu gövdeli kompozit kiriş referans numunesinin düşey yüklemesi deneye başlamadan önce tamamlanmış olup yaklaşık t=37 dakikaya kadar meydana gelen yerdeğiştirmeler kaydedilmiştir. Yerdeğiştirmeler stabil duruma geldiğinden/sabitleştiğinden 1 saat sonuna dek beklenmemiştir. Yangın deneyi öncesi en büyük yerdeğiştirmenin 1 mm civarında olduğu görülmüştür

Deney sonrası IPE 140'lık 2 profilin kaynaklanması ile oluşturulan dolu gövdeli referans numunesi incelendiğinde, deforme olmasına karşın, iki profili birleştiren kaynak noktası boyunca göçme, gövde burkulması ya da üst ve alt T elemanlarında yırtılmalar gözlenmemiştir. Kiriş, açıklığının orta noktasından (LC4 bölgesinden) düzlem dışına doğru burkularak, bir başka deyişle burulmalı bir deformasyonla göçmüştür (Şekil 4.11 c, d, e). Bu göçme biçiminin, L/20'ye ulaşılması sonrasında sıcaklığın artışına bağlı olarak kirişin aşırı yerdeğiştirme sonrasında yükün ortaya yığılması sonucu kirişin yanal burulmalı burkulma yaparak mesnetlerinden ayrılması ile gerçekleştiği izlenmiştir (Şekil 4.11a, b). Şekil 4.11'de DK-R numunesinin deney fotoğrafı yer almaktadır.



(a)

Şekil 4.11: DK-R numunesinin deney sonuçları: (a) Deney esnasında numunede meydana gelen göçme.



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.11 (devam): DK-R numunesinin deney sonuçları: (b) fırın içerisine düşen numunenin görünümü, (c) deney sonrası numunenin görünümü, (d) yanal burulmalı burkulma göçme modu.



(e)

Şekil 4.11 (devam): DK-R numunesinin deney sonuçları: (e) deney sonrası kirişin mesnet bölgesinin görünümü.

Kirişin mesnet noktalarında yer alan bulon deliklerinde ve bulonlarda göçme tespit edilmemiştir (Şekil 4.12a). Kayma bağlantılarında herhangi bir ayrılma gözlenmemiştir. Betonarme döşeme ile trapez sac arasında tüm kiriş boyunca ve özellikle LC4 bölgesinde artan açılmalar izlenmiştir.

Çelik sacın kirişe mesnetlendiği noktalarda, özellikle mesnet bölgelerinde çukurlaşmalara rastlanması, bu bölgelerde mesnetlerin ezildiğini göstermektedir (Şekil 4.12a, b). Bu numunede gözlemlenen en önemli göçme modları olarak mesnet bölgelerinde betonarme döşeme ile trapez sac arasındaki ayrılmalar ve kirişde meydana gelen yanal burulmalı burkulma verilebilir.

Betonarme döşemede 3 tip çatlak belirlenmiştir (Şekil 4.13a): Birincisi kiriş üzerinde döşeme boyunca kirişin ekseni üzerindeki başlıklı saplamaları izleyerek devam eden A çatlağı, diğeri kirişin enine doğrultusunda LC6 ve 7 bölgesinde yer alan B çatlağı ve sonuncusu kesme kuvvetinden kaynaklanan, beton kalınlığı boyunca ilerleyen eğimli çatlaklardır. A çatlağı lineer olarak kiriş boyunca devam etmekte olup genişliği 0.2~0.3 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.13d). B çatlağı mesnete en yakın bölgelerden biri olan LC 7 bölgesinde kesme kuvvetinin yüksek değerlere ulaşması ile oluşmuştur. Bu çatlak kiriş eksenine dik ve çatlak genişliği 2~3 mm civarında olup numunenin fırın içerisine düşmesi sonucu çatlak genişliklerinde artmalar olduğu tespit edilmiştir. Kirişde betonarme döşeme kalınlığı boyunca A', B', C', D', E', F', G', H', I' ve J' olarak adlandırılan toplam 10 adet trapez sac'a kadar ilerleyen kesme çatlağı da tespit edilmiştir (Şekil 4.13b, c, e).

Bu çatlaklar sırasıyla 2.ve 3. oluklar arasında başlamış, 10, 11'e kadar devam etmiş, bu noktada kesilerek 26.ve 27. oluklarda G' çatlağı ile tekrar başlayarak sacdaki son oluk olan 34. oluğa kadar ilerlemiştir.



(a)

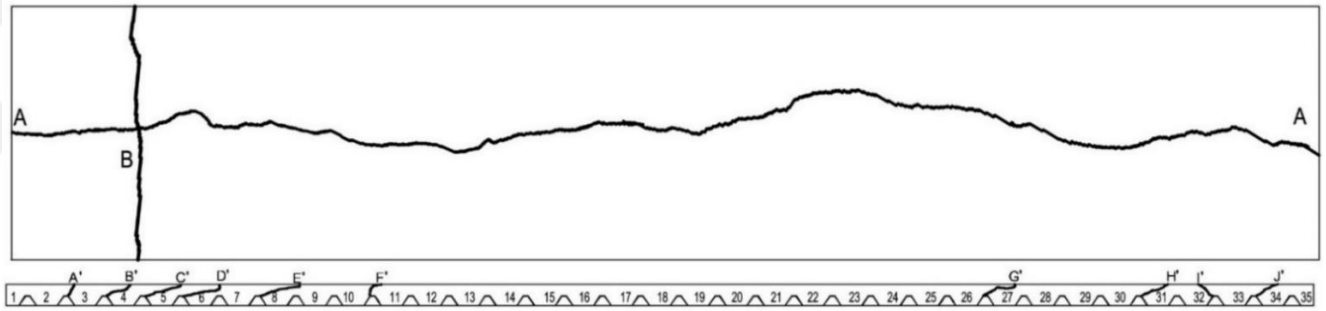


(b)

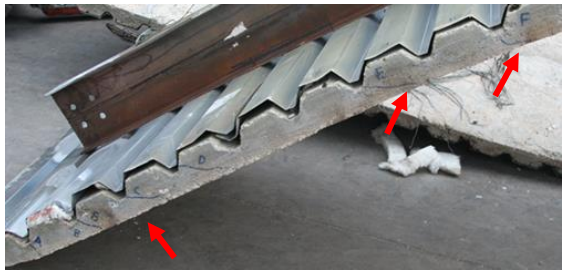


(c)

Şekil 4.12: DK-R numunesinde deney sonrası görünümü: (a) Deney sonrası bulon deliklerinin görünümü, (b) LC5 bölgesinde sac ile beton arasındaki ayrılmalar, (c) Deney sonrası saplamaların görünümü.



(a)



(b)



(c)



(d)

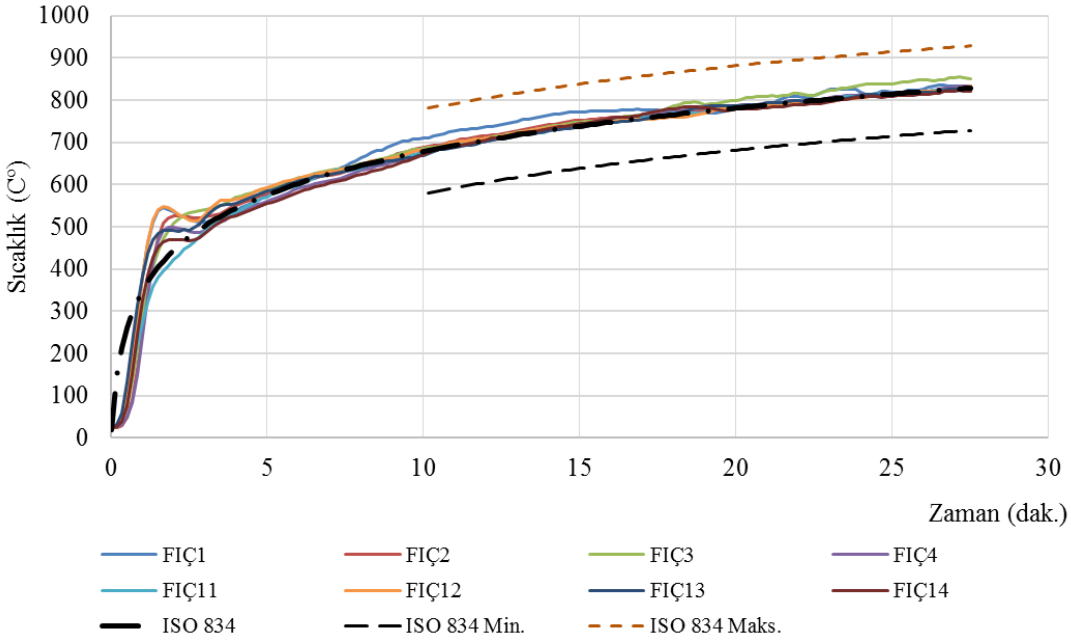


(e)

Şekil 4.13: DK-R numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlak haritası (plan), (b) Kesme çatlakları A', B', C', D' görünümü, (c) G' çatlağının görünümü, (d) A çatlağının görünümü, (e) Kesme çatlakları H', I', J'görünümü.

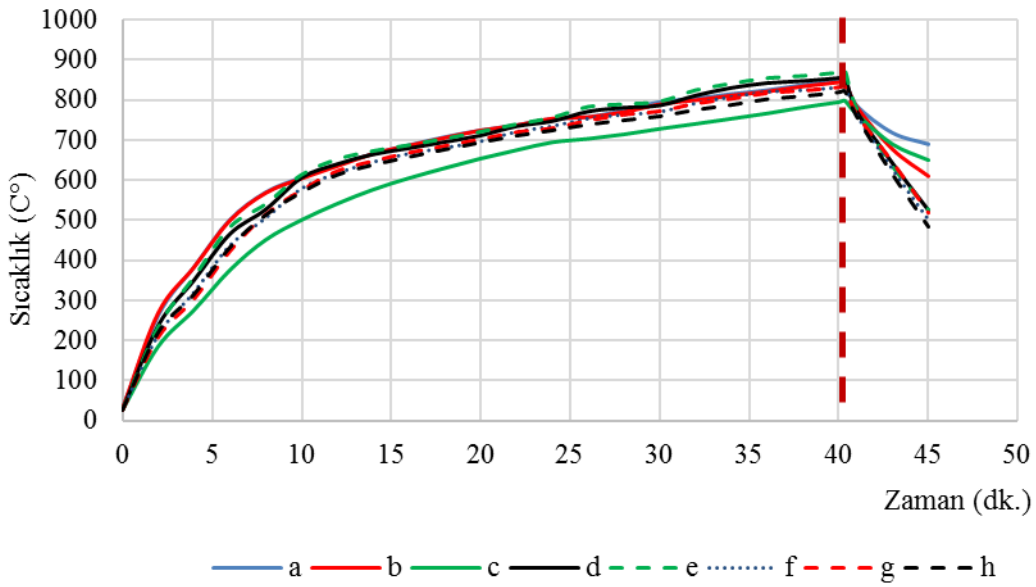
4.2.1 Sıcaklık-Zaman eğrileri

Fırın içerisindeki sıcaklığın ISO 834 eğrisi ile uyumlu gidebilmesi ve tüm numunelerin aynı koşullarda denenmesi amacıyla yine 8 brülör aktif hale getirilmiş ve plaka tipi ısıl çiftler ile deney süresince fırın sıcaklığı takip edilmiştir. Isıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerlerinin ISO 834 yangın eğrisi ile karşılaştırılması Şekil 4.14 'de verilmektedir. Fırın içerisindeki gazın sıcaklığı 3.2 dk. içerisinde ISO 834 yangın eğrisinde verilen sıcaklık değerine ulaşmış ve deney süresi boyunca düzenli bir artış ile devam etmiştir.



Şekil 4.14: DK-R numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi.

Numuneye yerleştirilmiş olan ısıl çiftlerden kiriş açıklığının orta bölgesinde gövde ve alt başlıkda yer alan i, j, k, l, m, n ısıl çiftleri deney sırasında hasar gördüğü için ölçüm alınamamıştır. Isıl çiftlerden elde edilen veriler Şekil 4.15'de yer almaktadır. Şekil 4.15'de kesik çizgi ile deney bitiş süresi olan 40.3 dk. gösterilmiştir. Kiriş açıklığının L/20'sine ulaştığı değerde t=40 dakika olarak kaydedilmiştir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde en düşük sıcaklıklara mesnete yakın bölgede, gövde yüksekliğinin orta noktası olan c (798.4 C°) ve kiriş açıklığının orta bölgesinde üst başlığa yakın olan h (821.5 C°) noktalarında ulaşılmıştır. Mesnete yakın olan bölgede kirişin arka yüzünde yer alan e (874.3 C°) ve yine aynı bölgede alt başlığa yakın olan d (858.3 C°) noktalarında en yüksek sıcaklık eğrileri elde edilmiştir (Şekil 4.15).



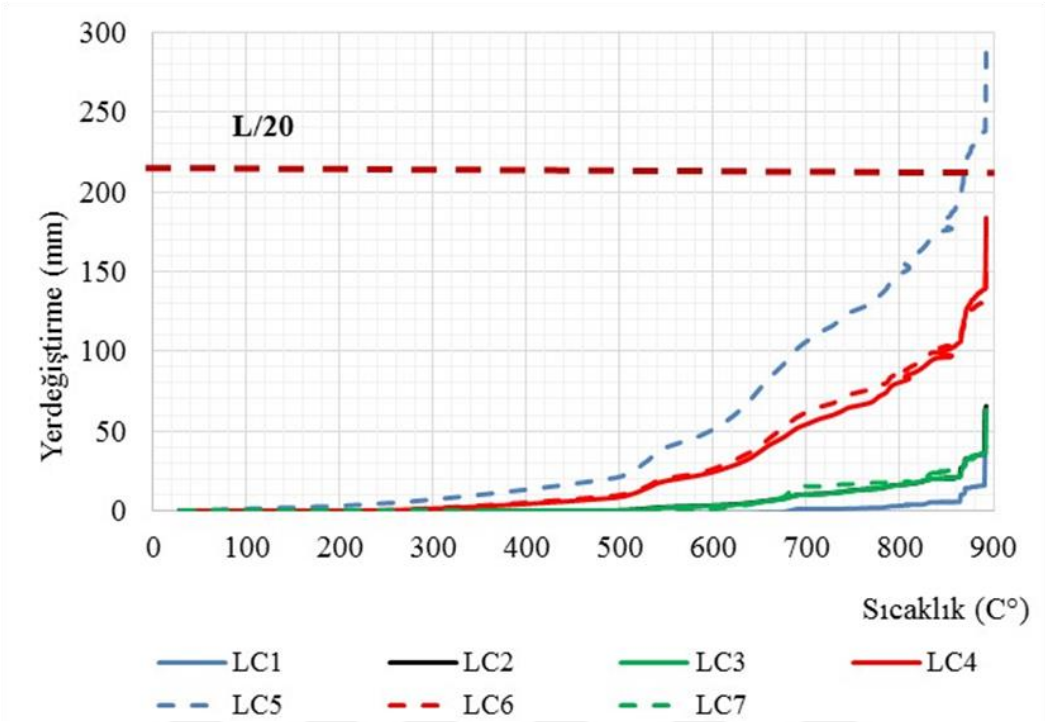
Şekil 4.15: DK-R numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi.

4.2.2 Yerdeğiştime eğrileri

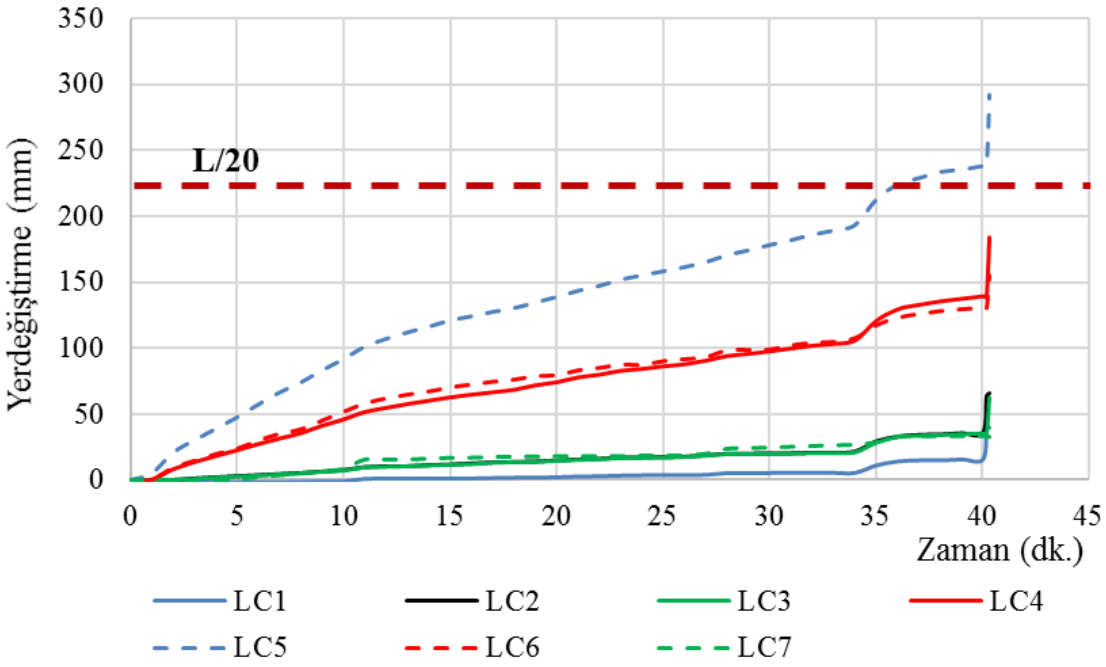
Lineer cetvellerden elde edilen yerdeğiştirmeler, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak Şekil 4.16 ve 4.17 'de verilmektedir. Deney sırasında numune mesnetlerinden kurtulup fırının içine düştüğü için deney sonrasında deformasyon ölçümü alınamamıştır.

En yüksek yerdeğiştirme kiriş açıklığının dörtte birine yerleştirilmiş olan LC5'de ölçülmüştür. Bu noktada göçme değerine (L/20) karşı gelen 890.4 Cº'de ve 40. dakikada $\delta_{göçme}$=237.7 mm'dir. Deney, 892.4 ºC ve 40.3 dakikada sonlandırıldığında en büyük yerdeğiştirme verisi LC5 bölgesinde $\delta_{maks.}$= 291.5 mm olarak kaydedilmiştir. Deney sonlandığında en düşük yerdeğiştirmeler mesnet noktalarına en yakın ve birbirlerine simetrik olarak konumlandırılan LC7 ve LC1'de sırasıyla 32.5 mm ve 39.5 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş açıklığının orta noktası olan LC4'de yerdeğiştirme 183.5 mm'dir. Aynı sıcaklıkta mesnet noktasına yakın LC2 ve LC3'de ise sırasıyla 65.6 mm ve 63.1 mm değerleri ölçülmüştür; LC 6'da okunan değer ise 155.5 mm'dir.

Yerdeğiştirme verileri incelendiğinde en yüksek değerin kiriş açıklığının orta noktasından mesnet noktasına doğru kaydığı ve yerdeğiştirmelerdeki artışların simetrik olarak yerleştirilen lineer cetvellerde düzensizlik gösterdiği görülmektedir (Şekil 4.16, Şekil 4.17). Kirişin göçme noktasına ulaştıktan sonra sıcaklığın artışına bağlı olarak yüklerin mesnet noktasına doğru yığılmasının neden olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.16: DK-R numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi.



Şekil 4.17: DK-R numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi.

4.3. GBK-YP Numunesi

Deneysel etiketi GBK-YP olan solvent bazlı yalıtımlı gövde boşluklu kompozit kiriş numunesinin düşey olarak yüklenmesi deneye başlamadan önce tamamlanmıştır.

Numune fırından çıkarıldığında kabaran (şişen) boyanın büyük bir bölümü kiriş üzerinde kalmış, bir bölümü de fırın tabanına dökülmüştür. Şekil 4.18'de yer alan numune fotoğrafları, numunenin deney sonrası durumuna değil daha iyi inceleyebilmek için, üstünden boyanın bir bölümünün kaldırılmış durumuna aittir. Deney sonrası numune incelendiğinde, sol ve sağ mesnet noktalarına yakın bölgelerde ilk 5 boşlukta simetrik bir göçme oluştuğu, dairesel formdaki boşlukların elipse dönüştüğü ve bu göçme durumunun kiriş ortasına doğru azaldığı görülmektedir. Mesnete yakın bölgede en çok deformasyona uğrayan iki dairenin çapları 14 cm'den D_2=16 cm'ye kadar genişlediği ve D_1=13 cm'ye kadar daraldığı ölçülmüştür (Şekil 4.18d). LC1 ve LC 2 bölgesinde 1., 2. ve 3. boşluklara ve LC6 ve LC7 bölgesine denk gelen 22. ve 23. boşluklar arasındaki alt başlıkda düşey doğrultuda belirgin dalgalanmalar gözlenmiştir (Şekil 4.18a, b). Bu dalgalanmalar alt başlıkda y ekseni (+) doğrultusunda 2.5~ 3 cm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.18e). LC4 bölgesinde alt başlık ve dairesel boşluklarda herhangi bir göçme gözlenmemiştir (Şekil 4.18c). Şekil 4.18'de GBK-YP numunesinin deney sonrası fotoğrafları yer almaktadır.



(a)

Şekil 4.18: GBK-YS numunesinin sonuçları: (a) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinde alt başlıkda oluşan dalgalanmalar.



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.18 (devam): GBK-YS numunesinin sonuçları: (b) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde alt başlıkda oluşan dalgalanmalar, (c) Deney sonrası kiriş açıklığının orta bölgesinin görünümü, (d) Daireden elips forma dönen daire çapları; 13cm ve 15cm.



(e)



(f) (g)



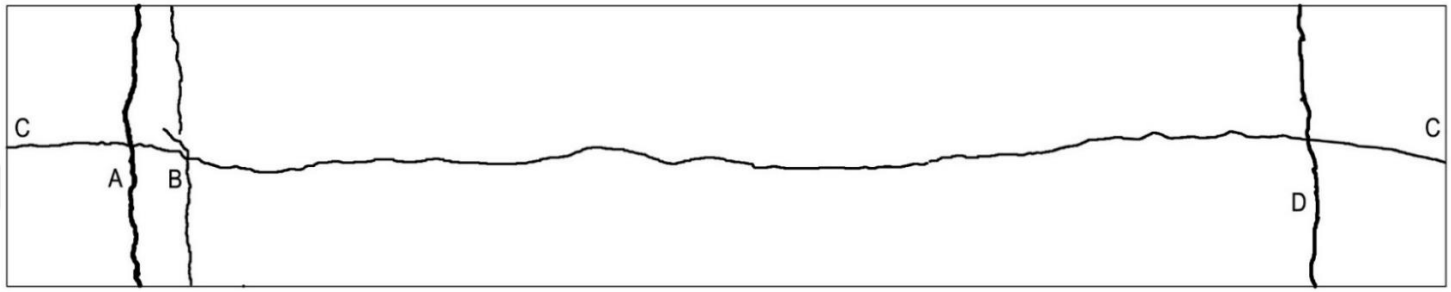
(h) (ı)

Şekil 4.18 (devam): GBK-YS numunesinin sonuçları: (e) Deney sonrası alt başlıkta meydana gelen dalgalanmalar, (f) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesi mesnet birleşimi; bulon ve bulon deliklerinin görünümü, (g) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde bölgesi mesnet birleşimi; bulon ve bulon deliklerinin görünümü, (h) ve (ı) Deney sonrası mesnet noktalarında çelik trapez sac ve döşeme ayrılması.

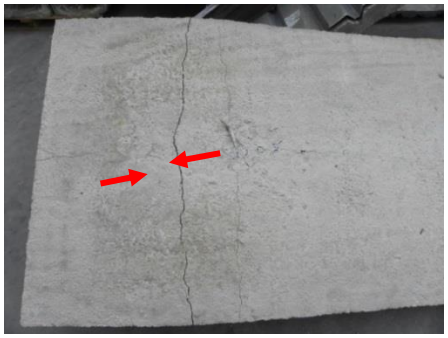
Üst başlıkda kayma bağlantılarında deformasyon gözlenmemiştir. Döşemede çelik trapez sac ile beton arasında ayrılmalar olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.18h, ı). Mesnet birleşim noktalarında boyada karbonlaşma olduğu görülmekte olup bulonlarda ve bulon deliklerinde göçme meydana gelmemiştir (Şekil 4.18f, g).

Betonarme döşeme incelendiğinde ise daha önceki numune deneylerinde izlenen hasarlara benzediği görülmektedir. Döşemede 5 adet çatlak belirlenmiş ve bunlar A, B, C, D ve E olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.19a).

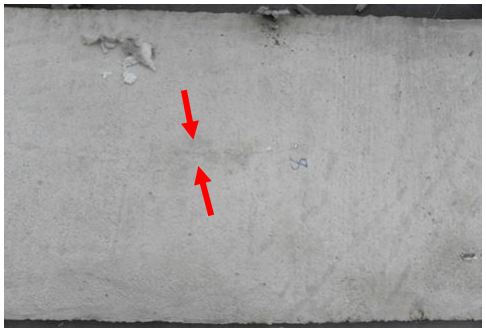
Mesnet noktalarına yakın bölgede kiriş eksenine dik olan A, B ve D çatlakları kiriş eksenine dik olan kesme kuvvetine ve Vierendeel etkisine bağlı gelişen çatlaklardır. Bu çatlaklardan A ve D en geniş olup mesnetten15~ 16 cm uzaklıkta 3~ 3.5 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 4.19b, d). Deney sonrası D çatlağında genişleme ve D çatlağına yakın olan konumda büyük bir çatlak oluşumu görülmektedir. Bu çatlakların deney bitiminde numunenin taşınırken oluştuğu gözlenmiştir. B çatlağı mesnetten 20,5~ 21 cm uzunlukta ve 0.4~ 0.5 mm genişliğindedir. Kiriş boyunca devam eden C çatlağı (Şekil 4.19c) ise 0.2~0.3 mm genişliğinde olup saca kadar inerek E çatlağını oluşturmaktadır (Şekil 4.19e).



(a)



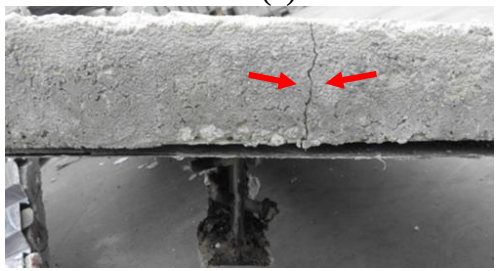
(b)



(c)



(d)

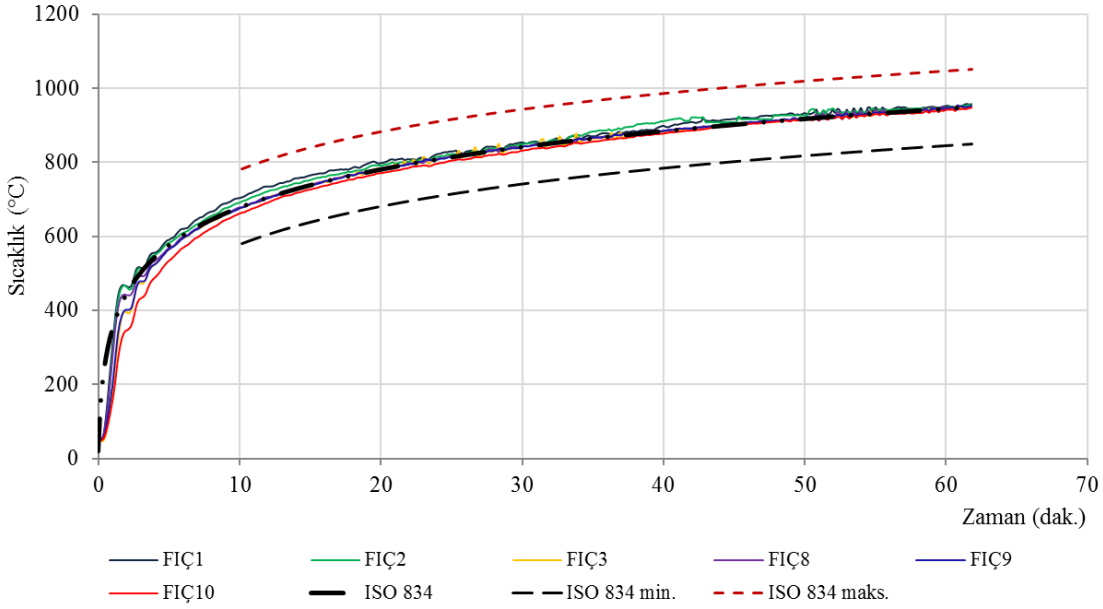


(e)

Şekil 4.19: GBK-YP numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a)Beton çatlak haritası (plan), (b) Ave B çatlaklarının görünümü (plan), (c) C çatlağının görünümü (plan), (d) D çatlağının görünümü (plan), (e) E çatlağının görünümü (kesit).

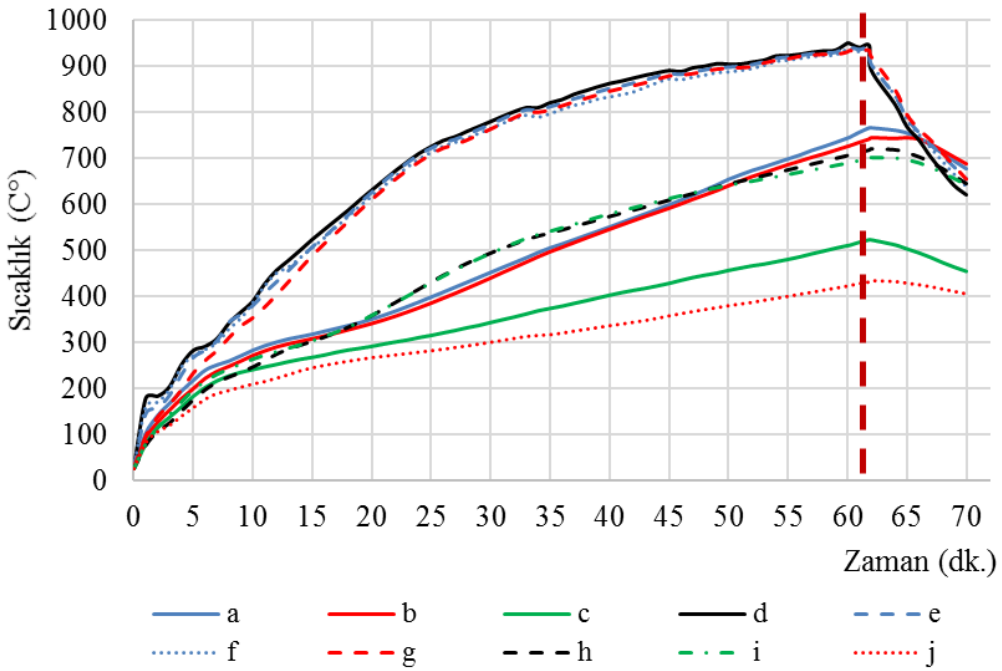
4.3.1 Sıcaklık-Zaman Eğrileri

Isıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerlerinin ISO 834 yangın eğrisi ile olan karşılaştırılması Şekil 4.20'de verilmektedir. Fırın içerisindeki gazın sıcaklığı 4.7 dk. içerisinde ISO 834 yangın eğrisinde sıcaklık değerine ulaşmış ve deney süresi boyunca ±10 C° sınırları içinde düzenli bir artış göstermiştir.



Şekil 4.20: GBK-YP numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi.

Numuneye yerleştirilmiş olan ısıl çiftlerden kiriş açıklığının orta bölgesinde gövde ve alt başlıkda yer alan k, l, m, n ısıl çiftleri deney esnasında hasar gördüğü için ölçüm alınamamıştır. Isıl çiftlerden elde edilen veriler Şekil 4.21'de yer almaktadır. Şekil 4.22'de kesik çizgi ile deney bitiş süresi olan t=61.8. dakika gösterilmiştir. Kiriş açıklığının L/20'ye ulaştığı değere t= 60.2 dakikada ulaşıldığı olarak kaydedilmiştir. Deney sırasında en yüksek sıcaklık 951.3 C° ile d noktasında, L/20'ye ulaşıldığı zamanda kaydedilmiştir. Sıcaklık değerleri incelendiğinde, en yüksek sıcaklıklara d noktasından sonra alt başlığa yerleştirilmiş olan e (939.5 C°), f (936.7 C°) ve g (934.6 C°) noktalarında ulaşılmıştır. Kiriş açıklığının ortasında ve mesnete yakın olan bölgelerde gövde ortasına yerleştirilen j (433.1 C°), c (524 C°) ve i (698.4 C°) noktalarında en düşük sıcaklıklar elde edilmiştir.



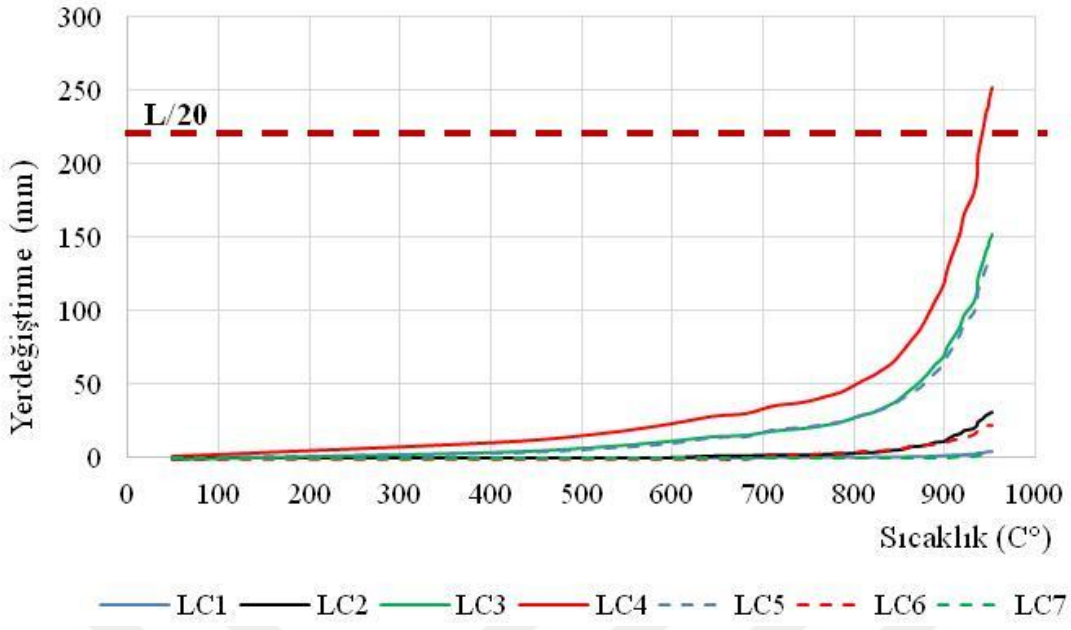
Şekil 4.21: GBK-YP numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi.

4.3.2 Yerdeğiştirme Eğrileri

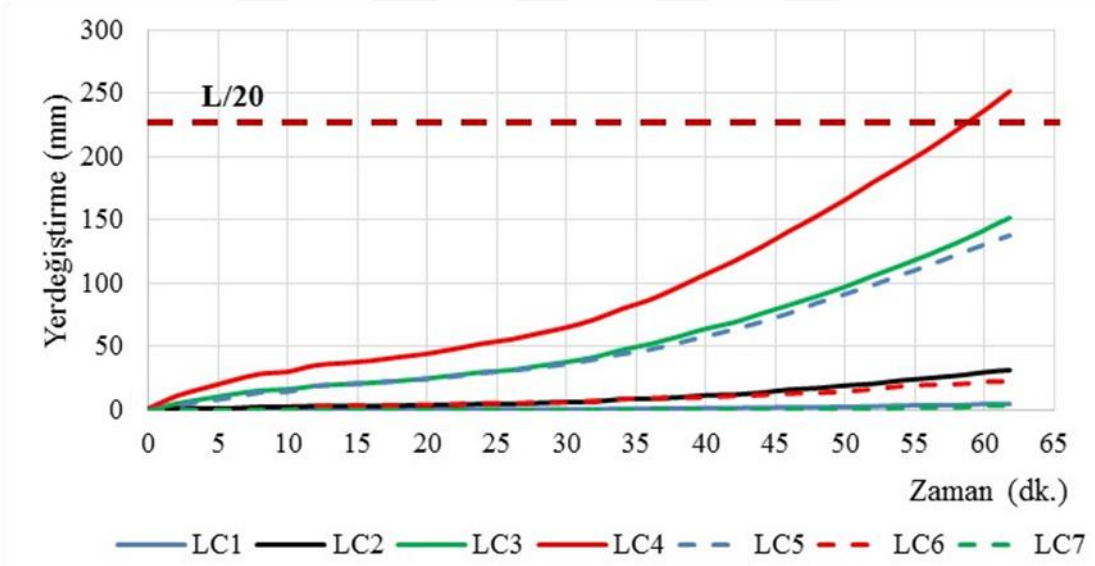
Lineer cetvellerden elde edilen yerdeğiştirmeler, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de verilmektedir. En yüksek yerdeğiştirme kiriş açıklığının orta noktasında LC4'de ölçülmüştür. Bu noktada göçme değeri (L/20'ye) karşı gelen sıcaklık 947 Cº olup 60.2. dakikada $\delta_{göçme}$=238.1 mm ile gerçekleşmektedir. Deney, 952 Cº ve 61.8. dakikada sonlandırıldığında en büyük yerdeğiştirme verisi LC4 bölgesinde $\delta_{maks.}$= 252.1 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş açıklığının dörtte birine simetrik olarak yerleştirilen LC3 ve LC5'de, L/20'ye ulaşıldığında, yerdeğiştirmeler sırasıyla 151.8 mm ve 138.1 mm olarak ölçülmüş olup bunlar LC4'den sonra en yüksek değerlerdir. LC2 ve LC 6'da okunan değerler sırasıyla ise 31.1 mm ve 22.5 mm'dir.

Mesnet noktalarına en yakın ve birbirlerine simetrik olarak konumlandırılan LC7 ve LC1'de göçme anında en düşük değerlere, sırasıyla 3.1 mm ve 4.7 mm' ye ulaşılmıştır. Yerdeğiştirme verileri incelendiğinde kiriş açıklığının orta noktasından mesnet noktalarına doğru gidildikçe yerdeğiştirme değerlerinde simetrik bir azalma olduğu görülmektedir.

Böylece bu numunenin, tasarlandığı üzere, solvent bazlı boya ile korunması durumunda R60 yangın dayanımına sahip olabileceği deneysel olarak kanıtlanmıştır.

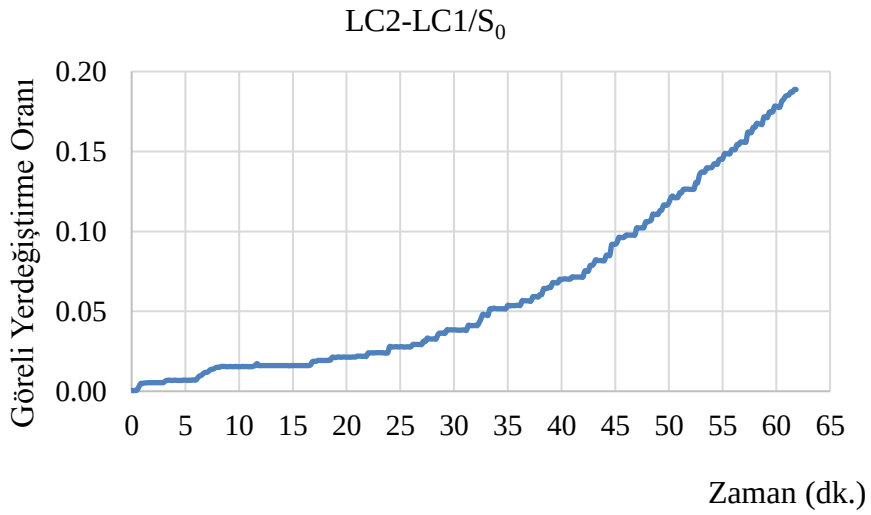


Şekil 4.22: GBK-YP numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi.

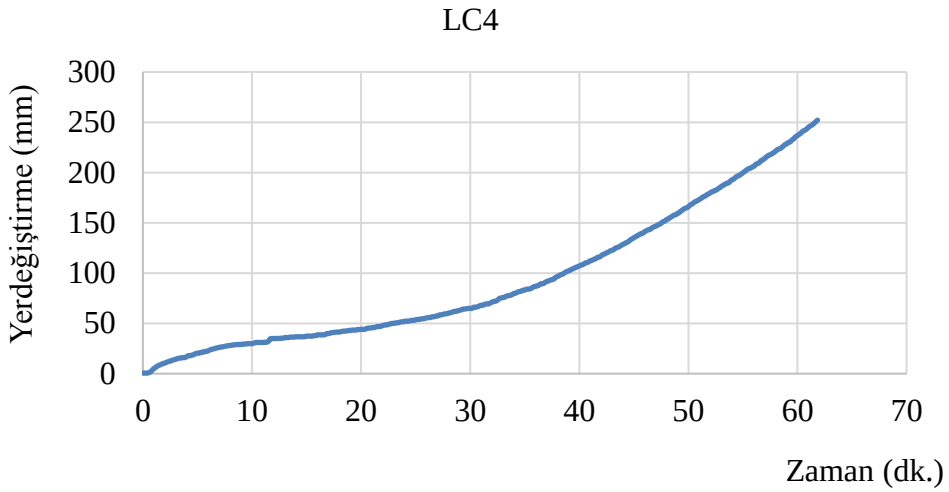


Şekil 4.23: GBK-YP numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi.

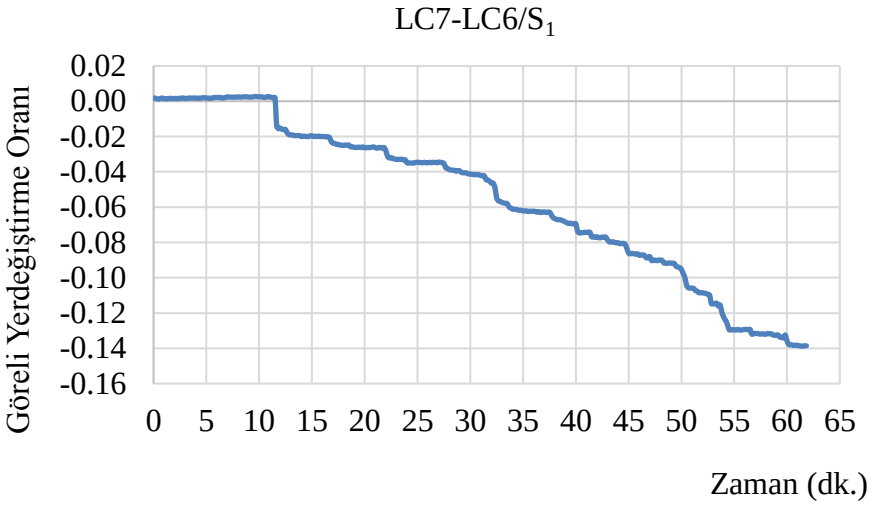
Vierendeel etkisi bakımından en olumsuz durumun LC2-LC1 bölgesindeki boşlukta göçme anında (60.2 dk.) 0.18, deney bitiminde (61.8 dk.) 0.19 oranında olduğu görülmektedir. LC7-LC6 bölgesinde göreli yerdeğiştirme oranı incelendiğinde ters yönde bir değişim olduğu, göçme anında ve deney sonlandırıldığında bu oranın -0.14 olduğu izlenmiştir (Şekil 4.24a, b, c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.24: GBK-YP numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-LC1 göreli yerdeğiştirme-zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-LC6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi.

4.4. GBK-YN Numunesi

Su bazlı yalıtımlı gövde boşluklu kompozit kiriş (GBK-YN) numunesinin düşey yüklemesi deneye başlamadan önce tamamlanmış olup t= 47 dakikada meydana gelen en büyük yerdeğiştirmeler 8mm olarak kaydedilmiştir.

Deney sonrasında numune incelendiğinde, kiriş üzerindeki boya tabakasının az bir bölümü dökülmüş olsa da büyük bir bölümünün kiriş üzerinde kendini koruduğu görülmüştür (Şekil 4.25a). Detaylı inceleme için numune üzerinden boyanın büyük bir bölümü kaldırılmıştır (Şekil 4.25b). Mesnet noktalarına yakın olan LC1- LC2 ve LC6-LC7 bölgesinde alt başlıkta düşey doğrultuda dalgalanma şeklinde deformasyonlar gözlenmiştir (Şekil 4.25d). LC1-LC2 bölgesinde 1., 2. ve 3. daire boşluklarının formlarının daireden elipse dönüştüğü, daire çaplarında 1 cm'lik artış ve aynı bölgede alt başlık bölümünde de dalgalanmalar meydana geldiği görülmüştür. Bu bölgedeki dalgalanmalar (+) y aksında 1~1.5 cm olarak ölçülmüştür. LC6- LC7 bölgesinde de 21., 22. ve 23. daire çaplarında şekil değişimleri gözlenmiş olup daire çaplarında 1 cm'lik artış ve azalış kaydedilmiştir (Şekil 4.25c). Bu bölgede 22. boşluğa denk gelen alt başlıkda (+) y yönünde 4 cm belirgin bir dalgalanma tespit edilmiştir (Şekil 4.25e). Kiriş açıklığının orta bölgesinde, beklendiği üzere, alt başlık ve daire çaplarında deformasyon olmadığı görülmüştür.



(a)



(b)

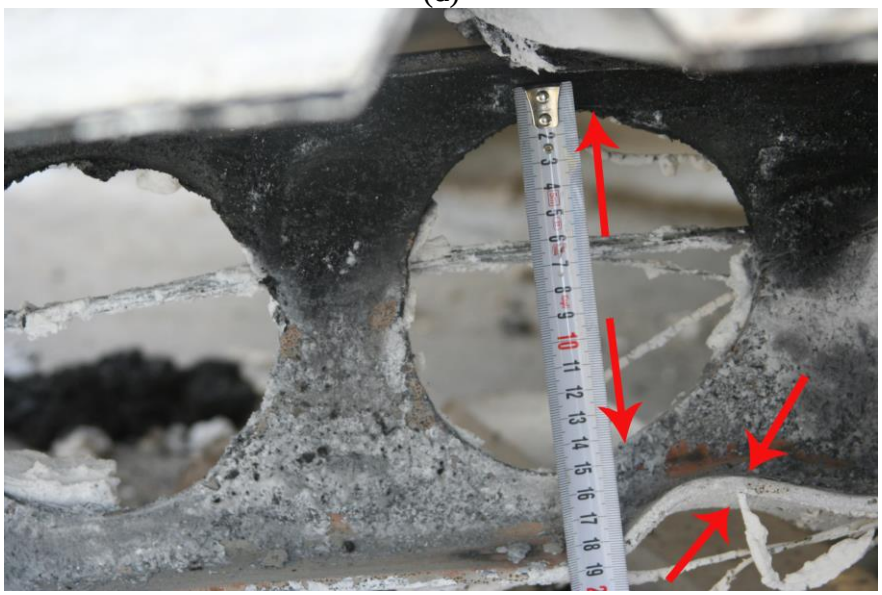
Şekil 4.25: GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (a) Deney sonrası GBK-YN numunesinin görünümü, (b) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinde 1., 2.ve 3. daire boşluklarında meydana gelen deformasyonlar.



(c)



(d)



(e)

Şekil 4.25 (devam): GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (c) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde 21., 22. ve 23. daire boşluklarında meydana gelen deformasyonlar, (d) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinin görünümü, (e) Deney sonrası LC1 ve LC2 bölgesinde alt başlıkta meydana gelen dalgalanma.



(f)



(g)

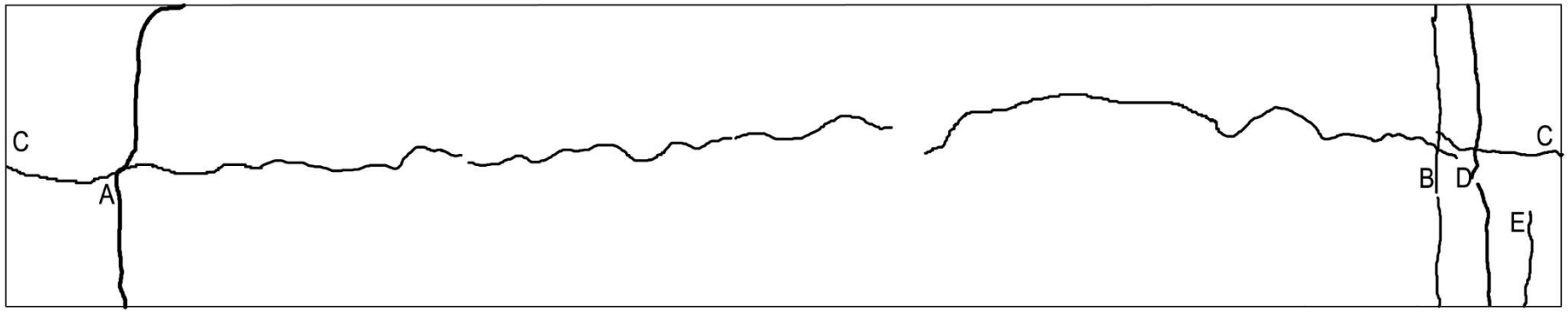
Şekil 4.25 (devam): GBK-YN numunesinin deney sonuçları: (f) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde daireden elipse forma dönen daire çapları; 13cm ve 15cm, (g) Deney sonrası LC6 ve LC7 bölgesinde bölgesi.

Deney sonucunda yapılan incelemede saplamaların trapez sac ve betonarme döşeme ile uyumlu bir davranış sergilediği anlaşılmıştır. Mesnet birleşim noktalarında, solvent bazlı kaplamada da olduğu gibi, boyada karbonlaşma oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.26f). Bulonlarda ve bulon deliklerinde herhangi bir göçme gözlemlenmemiştir.

Betonarme döşeme incelendiğinde 6 adet çatlak belirlenmiş ve bunlar A, B, C, D, E ve F olarak adlandırılmıştır (Şekil 4.26a). Kiriş eksenine dik olarak devam etmekte olan A, B, D ve E çatlakları vardır (Şekil 4.26b, c). Bu çatlaklardan B çatlağı LC1 ve LC 2 bölgesinde bulunan 1. trapez sac oluğu hizasında olup 0.3 mm çatlak genişliğindedir. Aynı bölgedeki D çatlağı 2. trapez sac oluğu üzerinde 0.7 mm genişlikte, E çatlağı 3. sac oluğu hizasında 3 mm genişlikte ölçülmüştür. En geniş

çatlak LC6 ve LC7 bölgesinde 33. trapez sac oluğu hizasında olup 5 mm genişliğe sahip olan A çatlağıdır.

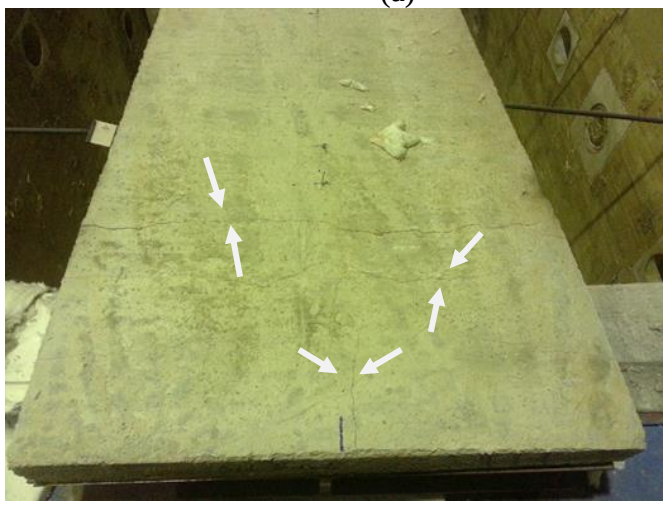
Diğer numunelerde olduğu gibi, enine çatlakların genellikle mesnet bölgesi bitiminde mesnet noktalarının rijitliğine bağlı olarak oluşan kesme kuvvetinden ve Vierendeel etkisinden kaynaklanmaktadır. Bazı numunelerde bu ana çatlağa bağlı ikincil çatlak (D, E) oluşumlarının da varlığı dikkati çekmiştir. Kiriş boyunca ve başlıklı saplamaların olduğu eksene denk gelecek şekilde paralel ilerleyen C çatlağında kalınlık değişkenlik göstermiş olsa da ortalama değeri 0.3 mm olarak ölçülmüştür. C çatlağı saca kadar inerek F çatlağını oluşturmuştur (Şekil 4.26d).



(a)



(b)



(c)

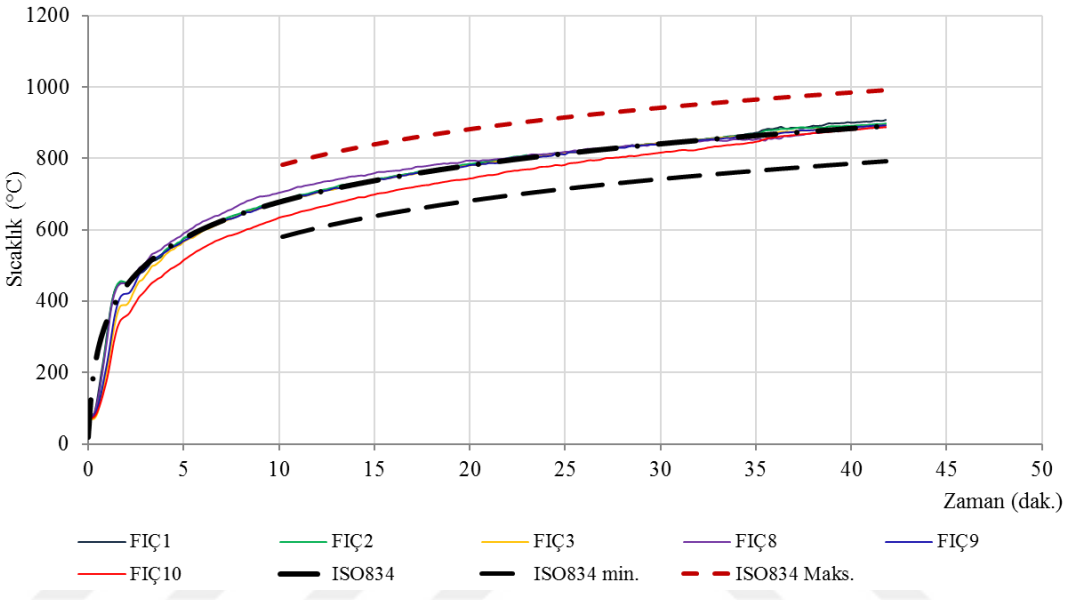


(d)

Şekil 4.26: GBK-YN numunesinin deney sonrası betonarme döşemesi: (a) Beton çatlak haritası (plan), (b) A ve C çatlaklarının görünümü, (c) B, C, D, E çatlaklarının görünümü, (d) F çatlağının görünümü.

4.4.1. Sıcaklık- Zaman Eğrileri

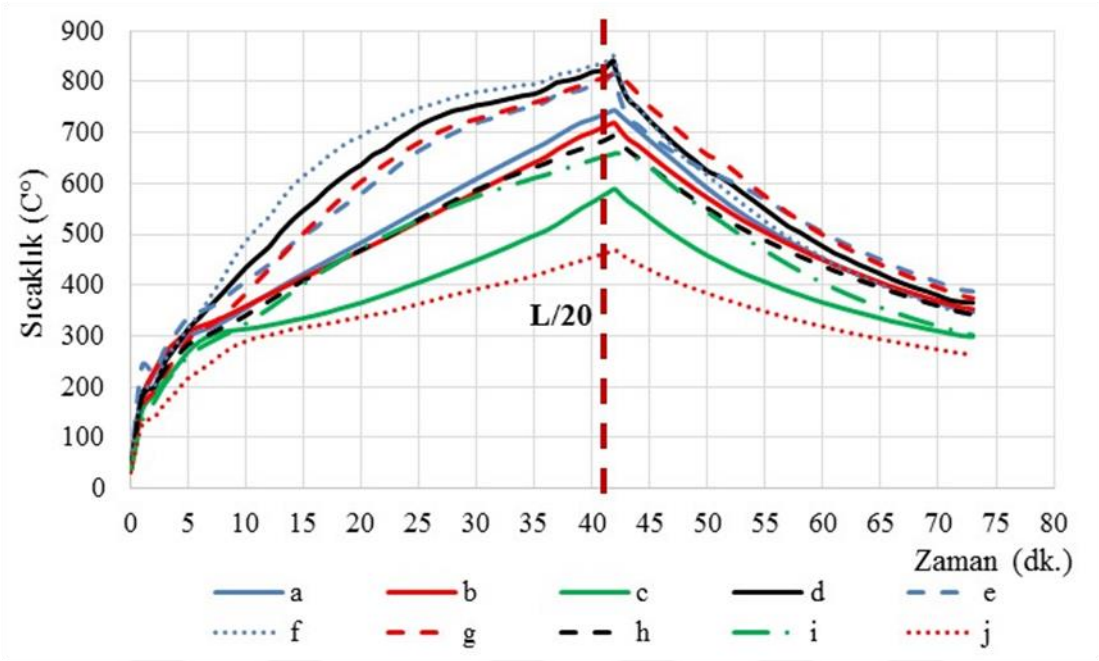
Diğer numunelerde olduğu gibi bu numune için de ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık değerlerinin ISO 834 yangın eğrisi ile karşılaştırılması Şekil 4.27' de verilmektedir. Fırın içerisindeki gazın sıcaklığı 2.7 dk. içerisinde ISO 834 yangın eğrisinde sıcaklık değerine ulaşmış ve deney süresi boyunca ±10 C° sınırları içinde düzenli bir artış göstermiştir.



Şekil 4.27: GBK-YN numunesi için fırın içi sıcaklık-zaman eğrisi.

Numuneye yerleştirilmiş olan ısıl çiftlerden, kiriş açıklığının orta bölgesinde gövde ve alt başlıkda yer alan k, l, m, n ısıl çiftleri deney sırasında hasar gördüğü için ölçüm alınamamıştır. Isıl çiftlerden elde edilen veriler Şekil 4.28'de yer almaktadır. Deney 41.8 dakika sürmüştür. Kiriş, açıklığının L/20'ye vardığı yerdeğiştirme değerine t=41. dakikada ulaşmıştır.

Ölçerlerin sıcaklık değerleri incelendiğinde, en düşük sıcaklıklara gövde yüksekliğinin orta noktası olan j, c ve i (sırasıyla 466.5 C°, 586.8 C°, 657.5 C°) ve kiriş açıklığının orta bölgesinde üst başlıkda yer alan h noktasında (694.7 C°) ulaşılmıştır. Mesnete yakın olan bölgede kirişin alt başlığında yer alan f (852.5 C°), e (817.2 C°) ve g (815.9 C°) noktaları ile yine aynı bölgede alt başlığa yakın boşluk altına yerleştirilen d noktasında (842.3 C°) en yüksek sıcaklıklar kaydedilmiştir (Şekil 4.28). Mesnet bölgesinde üst başlığa yakın a ile gövde ortası b noktalarında 743.4 C° ve 720.2 C° sıcaklık ölçümleri elde edilmiştir (Şekil 4.28).

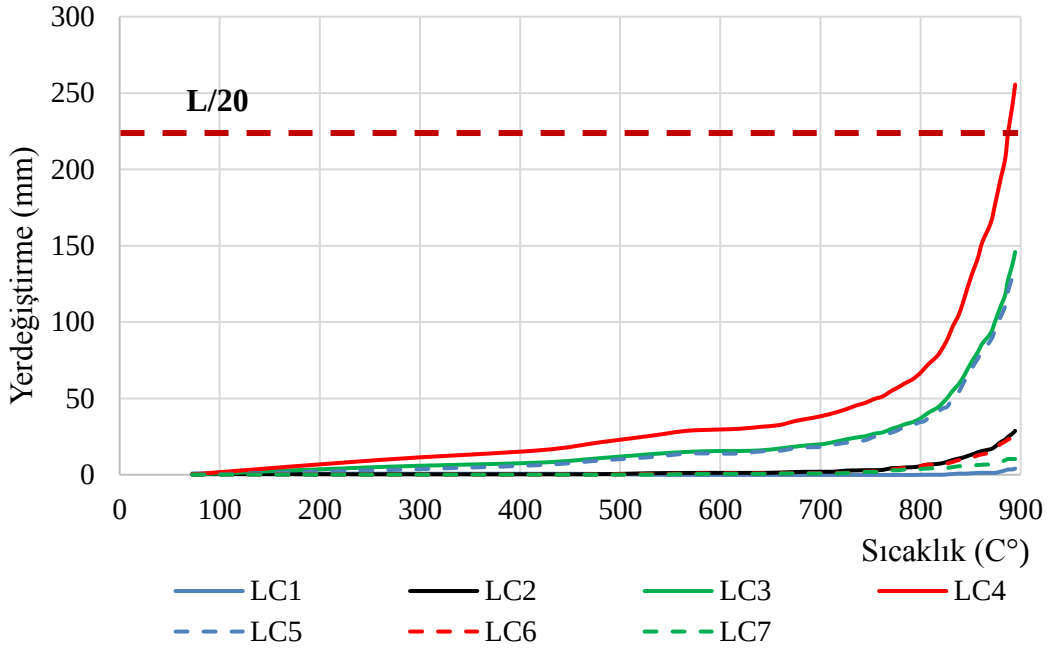


Şekil 4.28: GBK-YN numunesinin sıcaklık-zaman eğrisi.

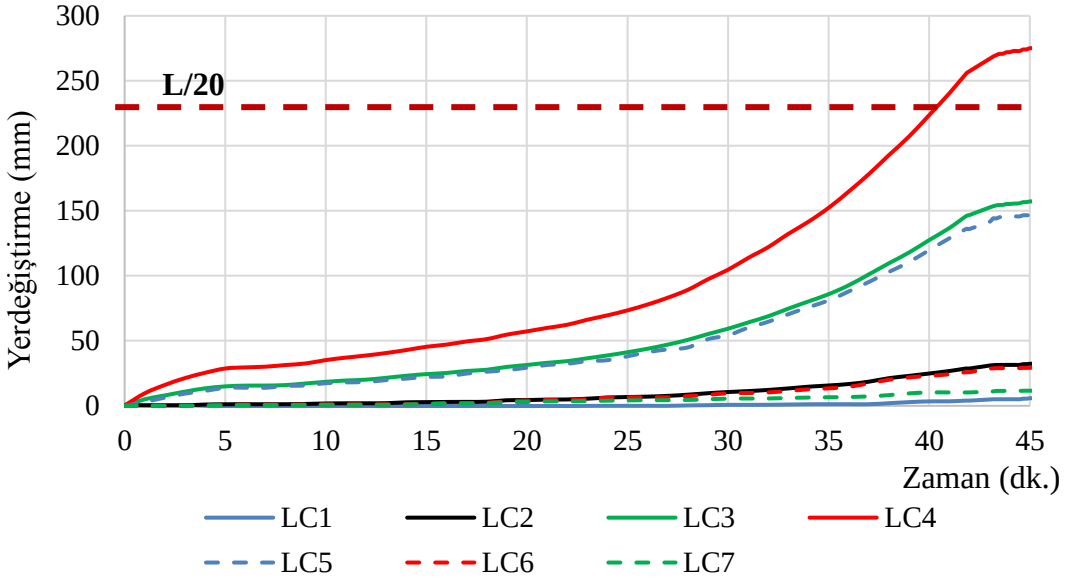
4.4.2 Yerdeğiştirme Eğrileri

Lineer cetvellerden elde edilen yerdeğiştirmeler, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'da verilmektedir. Diğer numunelerde olduğu gibi en yüksek yerdeğiştirme kiriş açıklığının orta noktasında LC4'de ölçülmüştür. Bu noktada göçme değerine (L/20) karşı gelen 891 Cº ve 41. dakikada $\delta_{göçme}$= 240.3 mm ile gerçekleşmiştir. Deney, sıcaklık 894 Cº, sıcaklık ile bu değer 41.8. dakikada sonlandırıldığında en büyük yerdeğiştirme verisi LC4 bölgesinde $\delta_{maks.}$=255.5 mm olarak kaydedilmiştir. Kiriş açıklığının dörtte birine simetrik olarak yerleştirilen LC3 ve LC5'de, L/20'ye ulaşıldığında, yerdeğiştirmeler sırasıyla 145.9 mm ve 136 mm olarak LC4'den sonra en yüksek değerleri almışlardır. LC2 ve LC 6'da okunan değerler ise sırasıyla 28.7 mm ve 25.8 mm'dir.

Mesnet noktalarına en yakın ve birbirlerine simetrik olarak konumlandırılan LC1 ve LC7'de göçme anında en düşük değerlere sırasıyla 4.00 mm ve 10.3 mm olarak ulaşılmıştır.

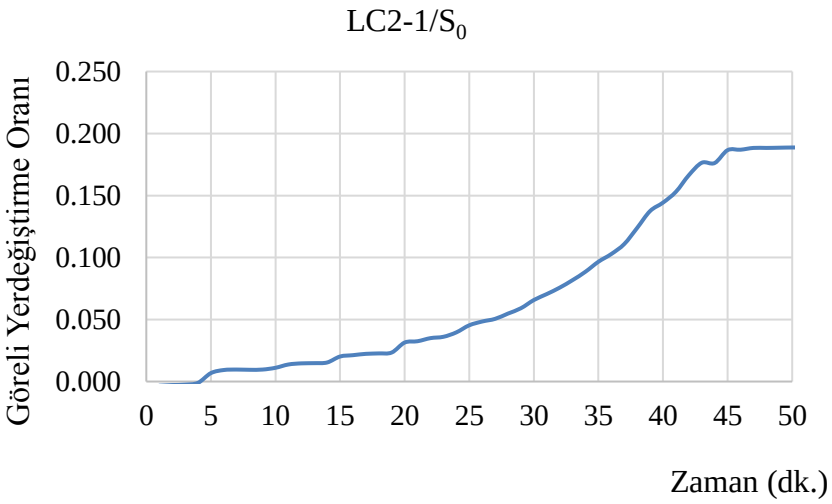


Şekil 4.29: GBK-YN numunesi yerdeğiştirme-sıcaklık eğrisi.

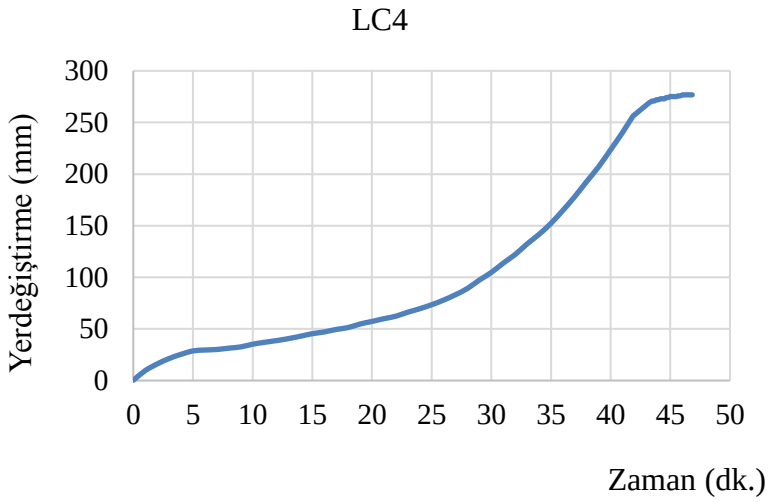


Şekil 4.30: GBK-YN numunesi yerdeğiştirme-zaman eğrisi.

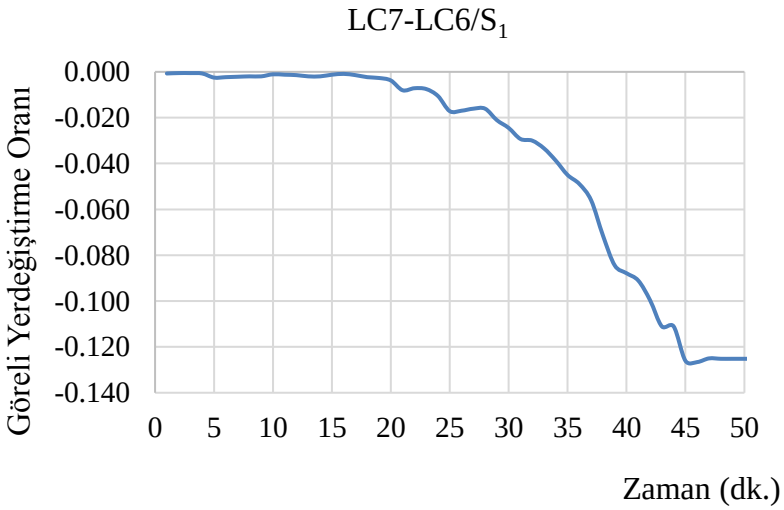
Vierendeel etkisi bakımından en olumsuz durumun LC2-LC1 bölgesindeki boşlukta göçme anında (41.dk.) 0.16, deney bitiminde (41.8 dk.) 0.17 oranında olduğu görülmektedir. LC7-LC6 bölgesinde göreli yerdeğiştirme oranı incelendiğinde ters yönde bir değişim olduğu, göçme anında bu oranın -0.10 iken deney sonlandırıldığında -0.11'e ulaştığı görülmektedir (Şekil 4.31a, b, c).



(a)



(b)



(c)

Şekil 4.31: GBK-YN numunesinin yerdeğiştirme eğrileri: (a) LC 2-LC1 göreli yerdeğiştirme-zaman eğrisi, (b) LC4 yerdeğiştirme zaman eğrisi, (c) LC7-LC6 göreli yerdeğiştirme zaman eğrisi

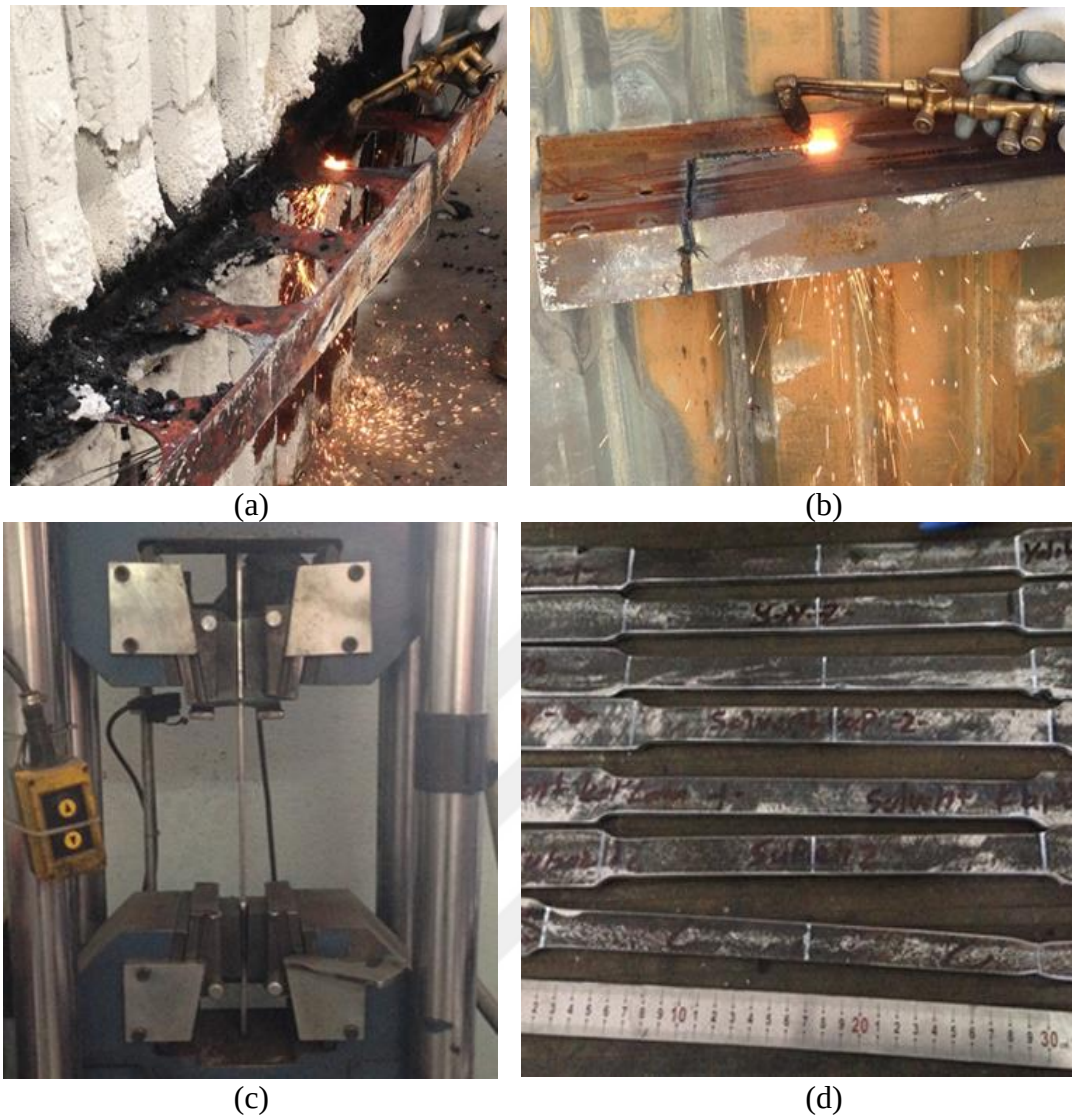
5. DENEY SONUÇLARININ TOPLUCA DEĞERLENDİRİLMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

5.1 Yangın Deneyi Sonrası Malzeme Özellikleri

Yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin deney sonrası mekanik özelliklerinde meydana gelen olası değişimleri belirleyebilmek amacıyla çelik profillerden alınan kupon numunelere çekme deneyi yapılmıştır. Çekme deneyi için profillerden oksijenli kesim yapılarak GBK-YS numunesinden 1, DK-R numunesinden 2, GBK-YP numunesinden 2 ve GBK-YN numunesinden 2 olmak üzere toplam 7 parça alınmıştır (Şekil 5.1a, b). Bu parçalar özellikle deformasyonun az olduğu bölgelerden alınarak çelik kirişler için TS EN ISO 6892-1 (Metalik Malzemeler- Çekme Deneyi- Bölüm 1: Ortam Sıcaklığında Deney Metodu) standardına göre çekme numunesi boyutları belirlenerek, üretimleri yapılmıştır. Malzeme çekme deneyleri (kupon testler) ABM Mühendislik Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 60ton kapasiteye sahip ABM-M-05 çekme presi kullanılmıştır (Şekil 5.1c). Kupon numunelerin deney sonuçları Çizelge 5.1'de verilmiştir (Şekil 5.1c).

Çizelge 5.1: Deney sonrası çekme numunelerinin mekanik özellikleri.

No	Numune	Kesit Alanı (mm^2)	Akma Dayanımı Re (N/mm^2) MPa	Çekme Dayanımı Rm (N/mm^2) MPa	Kopma Uzaması (%)
1	GBK-YS	137.87	307	416	11.4
1	DK-R	132.40	338	484	28
2	DK-R	134.46	326	474	28.2
1	GBK-YP	130.08	339	494	29.6
2	GBK-YP	132.25	318	464	22.7
1	GBK-YN	127.94	312	464	24.8
2	GBK-YN	129.05	313	462	26.4



Şekil 5.1: Yangın deneyleri sonrası çekme deneyleri: (a) Gövdesi boşluklu kirişten kupon numune alımı, (b) Dolu gövdeli kirişten kupon numune alımı, (c) Çekme presi, (d) Çekme numunelerinin son boylarının hesaplaması.

Deney öncesi ve sonrası kupon numune sonuçlarına bağlı olarak Çizelge 5.2 hazırlanmıştır. Buna göre, GBK-YS numunesinde, deney sonrası öncesine göre, akma gerilmesinde maks. %2 ve min. 0.8'lik bir azalma olduğu, çekme dayanımında % 5 ile % 7.5 arasında azalma ve kopma uzamasının da % 65 azaldığı görülmektedir. DK-R numunesinin, deney öncesi ve sonrası verileri incelendiğinde, akma gerilmesinde maks. %7 ile min. %5'lik bir artış olduğu, çekme dayanımında %6 ile % 8 arasında artış ve kopma uzamasında ise %9.6'lık bir azalma olduğu kaydedilmiştir. GBK-YP numunesi incelendiğinde akma gerilmesinde deney öncesine göre min. % 4 ve maks. % 6'lık artış, çekme dayanımında % 6 ile 8 arasında artış ve kopma gerilmesinde % 12'lik bir azalma olduğu ortaya çıkmaktadır.

GBK-YN numunesinin akma gerilmesi min. % 0.5 ve maks. % 1'lik artış, çekme dayanımında % 3 ile % 5 arasında artış ve kopma uzamasında % 13'lük bir azalma gösterdiği izlenmiştir.

Kupon numunelerinin deney öncesi ve sonrası mekanik özellikleri incelendiğinde yangına maruz kalan korumasız GBK-YS numunesi dışındaki numunelerde akma gerilmelerinde ve çekme dayanımlarında artış gözlenmiştir. Akma gerilmesinde en büyük artış DK-R numunesinde, çekme dayanımında DK-R ve GBK-YP numunelerinde elde edilmiştir. Kopma uzamasındaki en büyük azalma yangın koruması olmadığı için % 65'lik bir azalma ile GBK-YS numunesinde elde edilmiştir. Bu sınırlı deneysel çalışmada, yangın sonrasında çeliğin akma ve çekme dayanımında çok büyük değişikliğe neden olmadığı, buna karşın özellikle kopma uzamasında önemli azalmalara neden olabileceği sonucu çıkmaktadır.

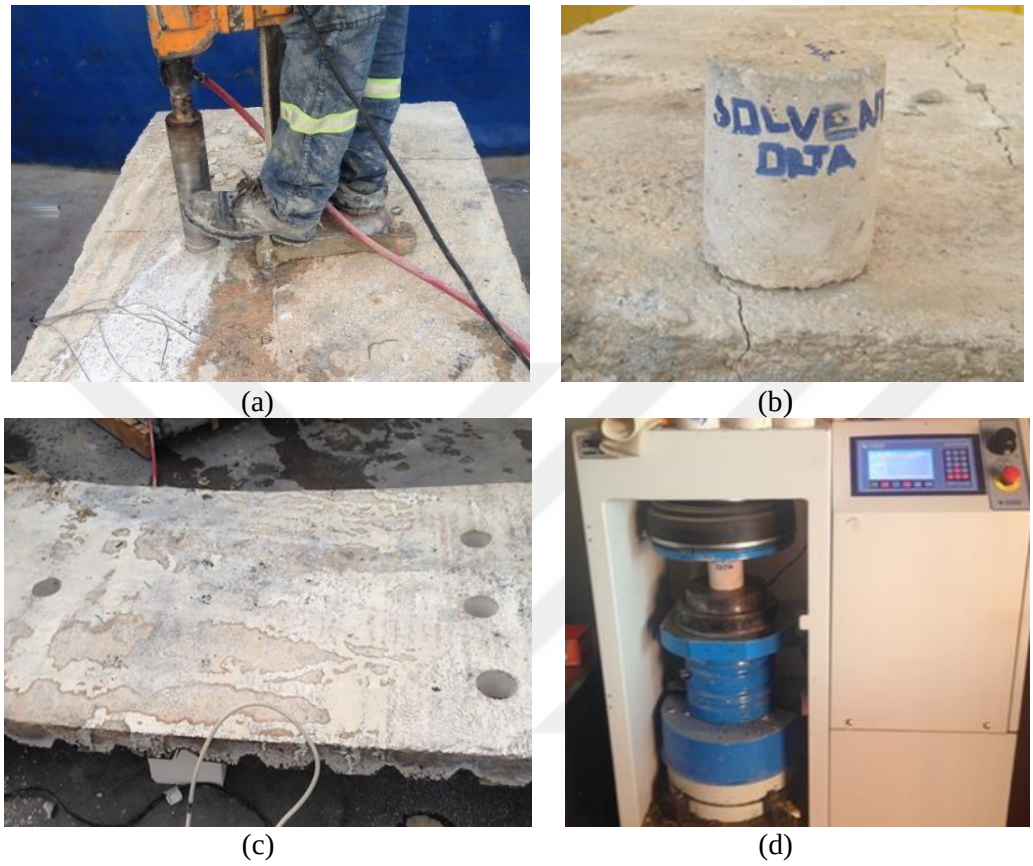
Çizelge 5.2: Deney öncesi ve sonrası numunelerin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Numune	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
	Deney Öncesi		
A	314	450	31.1
B	313	448	32.7
C	309.5	446	31.6
D	311.6	438.3	38.1
	Deney Sonrası		
GBK-YS	307	416	11.4
DK-R	332	479	28.1
GBK-YP	328.5	479	26.1
GBK-YN	312.5	463	25.6

Yangına dayanıklılık deneyleri sonucunda betonun karakteristik basınç dayanımını belirlemek için betonarme döşemeden TS EN 12504-1, 2010 (Beton- yapıda beton deneyleri-Bölüm 1: Karot Numuneler- Karot Alma, Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini) standardına göre karot numuneleri alınarak basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 5.2a, b, c). Basınç deneyleri, yine ABM Mühendislik Yapı Malzemeleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.2d).

GBK-YS numunesinden 2, GBK-YP numunesinden 2, GBK-YN numunesinden 3 olmak üzere toplam 7 adet numune özellikle daha sağlam bölgelerden alınmıştır.

DK-R numunesinden, beton çok zarar gördüğü için, numune alınamamıştır. Karot basınç deneyi sonuçları Çizelge 5.3'de verilmiştir.



Şekil 5.2: Yangın deneyleri sonrası beton basınç deneyleri: (a) Döşeme üzerinde karot numune alınacak alanların belirlenmesi, (b) GBK-YS numune döşemesinden alınan karot numune, (c) Döşemeden karot numune alınan alanlar, (d) Basınç dayanım deneyi.

Çizelge 5.3: Beton basınç dayanım deneyi sonuçları.

No	Numune Adı	Kırılma Yükü (kN)	Basınç Dayanımı (MPa)
1	GBK-YS	143.8	33.4
2	GBK-YS	80.7	18.8
1	GBK-YP	136.7	31.8
2	GBK-YP	135.6	31.5
1	GBK-YN	102.8	23.9
2	GBK-YN	107	24.9
3	GBK-YN	119.7	27.8

Deney öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları karşılaştırıldığında (Çizelge 5.4) GBK-YS numunesinin beton basınç dayanımında %34 bir düşüş olduğu saptanmıştır. GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde ise bu düşüş sırasıyla %20 ve %33'dür. Buradan, bu sınırlı deneysel çalışmada, sonrasında beton basınç dayanımlarında genel bir düşüş yaşadığı anlaşılmaktadır.

Yangın sonrası betonun mekanik özelliklerinde değişimi incelemek amacıyla bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (Felicetti ve Gambarova; 1998, 2008), (Annerel, Taerwe, 2012), (Toric ve diğ. 2014). Bu çalışmaların sonucunda kısa dönemli olarak betonun basınç dayanımı düşüş gösterirken uzun dönemde (1-2.5 yıl içerisinde) betonun basınç dayanımında düzelme olduğu görülmüştür. Beton basınç deneyleri, yangın deneylerinden sonra yaklaşık 96-120 saat içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu dönem (96-120 saat) kısa dönem kabul edildiği için bu sürede betonun basınç dayanımında azalma olağan kabul edilmektedir (Toric ve diğ. 2014).

Çizelge 5.4: Deney öncesi ve sonrası numunelerin beton basınç dayanım deney sonuçları.

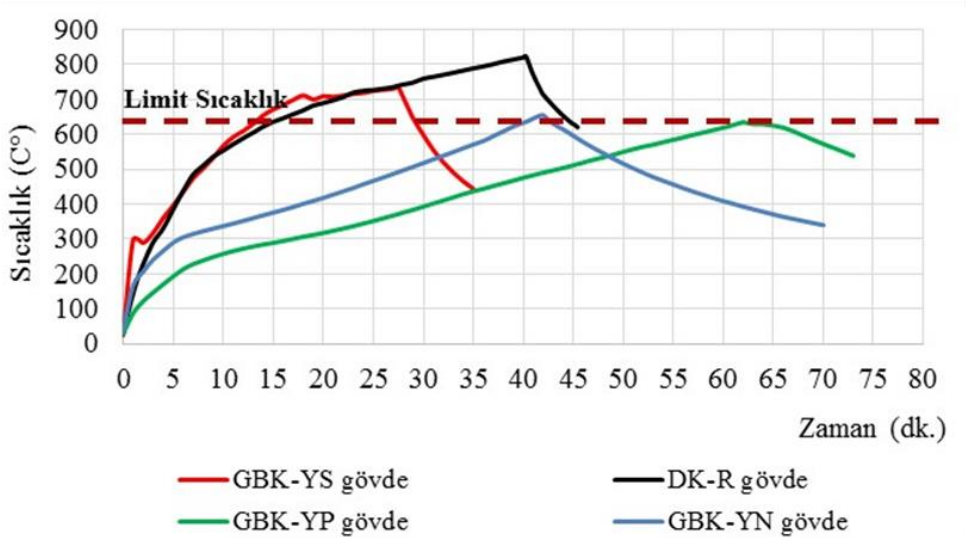
Numune	Basınç Dayanımı Ortalamaları (MPa)
Deney Öncesi	
1	39.4
2	39.5
3	39.2
Deney Sonrası	
GBK-YS	26.1
GBK-YP	31.6
GBK-YN	26.3

5.2 Kirişlerin Davranış Eğrilerinin Karşılaştırılması

Deney sonuçları ele alınırken genel olarak bir karşılaştırılmanın yanısıra numunulerin yalıtımlı- yalıtımsız olması (yalıtımsız GBK-YS, solvent bazlı GBK-YP ve su bazlı yalıtımlı GBK-YN numuneleri), gövde boşluklu ve boşluksuz olması (GBK-YS ve referans numunesi dolu kiriş DK-R) ve farklı yalıtım malzemeleri (su ve solvent kaplama) kullanılmış olması değişkenleri dikkate alınmıştır. Karşılaştırma sıcaklık ve yerdeğiştirme verileri üzerinden yapılmıştır. Kiriş ve döşeme kesitlerinde meydana gelen göçmeler grafik haline getirilmiş, elde edilen yerdeğiştirmeler ile modellenmiş (EK E) ve kiriş üzerinde sıcaklık dağılımı yapılan ek bir çalışma ile renklendirilerek gösterilmiştir.

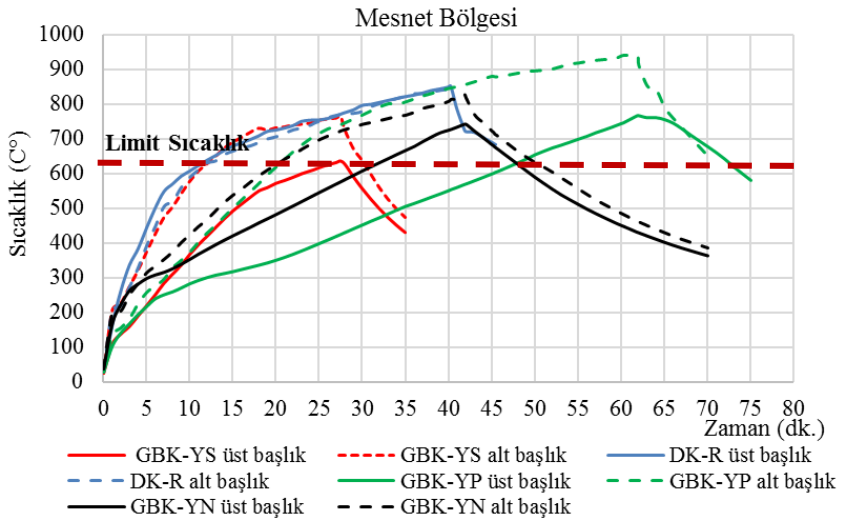
5.2.1 Yalıtımlı-Yalıtımsız Numunelerin Karşılaştırılması

GBK-YS, GBK-YP ve GBK-YN numunelerinin genel sıcaklık-zaman grafiği incelendiğinde yalıtımsız GBK-YS numunesinde sıcaklığın hızlı bir artış gösterdiği, göçme anında (24.5. dakikada) 743.9 C° deney sonunda da (27.5 dakikada) 762.1 C°'ye çıktığı görülmektedir. Solvent bazlı yalıtımlı GBK-YP numunesi diğer iki numune ile karşılaştırıldığında en yüksek derecelere en uzun zamanda ulaşan numune olmuştur. GBK-YP numunesi göçme zamanında (60.2 dk.) 757.7 C°'ye ulaşmış ve deney sonunda 764.1 C°'ye 61. dk.'da çıktığı görülmüştür. GBK-YN su esaslı yalıtımlı numune GBK-YS numunesinden sonra L/20'ye 41. dk. ve 709 C° ile ulaşmış ve deney sonunda 41.8 dakikada 719.7 C°'ye en yüksek ve en hızlı ulaşan ikinci numune olmuştur (Şekil 5.3).



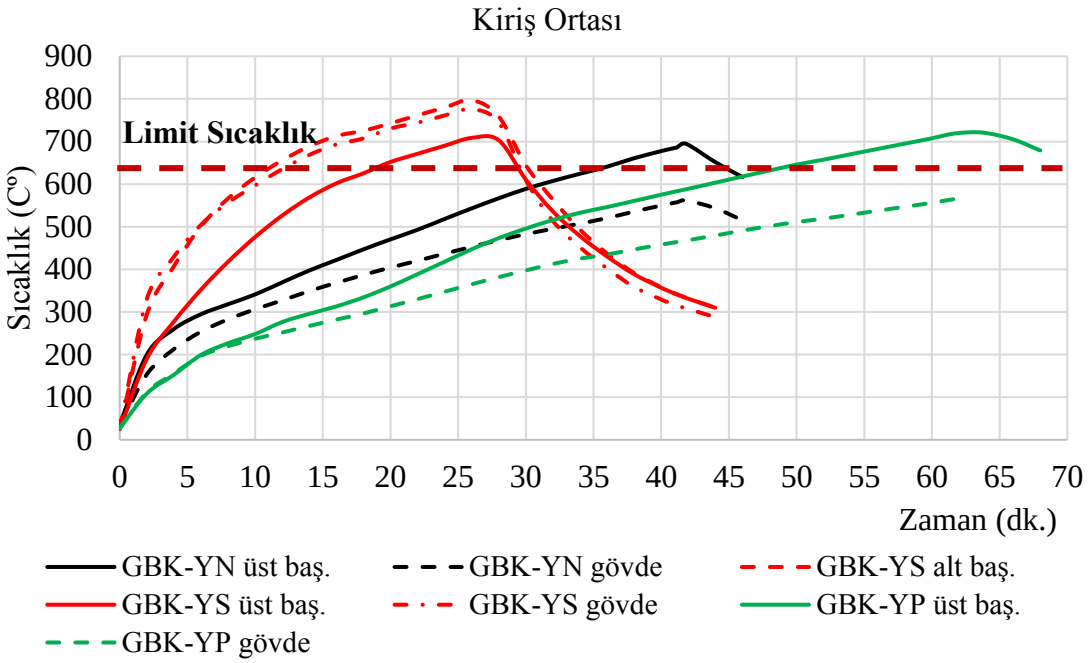
Şekil 5.3: Yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi.

Numunelerin göçme anında mesnet bölgesindeki gövde sıcaklıkları karşılaştırıldığında ise en yüksek sıcaklık, yalıtımsız olduğu için, 721.3 C° ile GBK-YS numunesinde gerçekleşmiştir. Diğer numunelerde bu bölgede ölçülen sıcaklılar GBK-YN'de 644 C° ve GBK-YP'de 620.4 C°'dir. Aynı bölgede alt ve üst başlık sıcaklıkları karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklıklara solvent bazlı yalıtımlı olan GBK-YP numunesinde sırasıyla 941.8 C° ve 745.6 C° olarak ulaşılmıştır. GBK-YN numunesinde alt ve üst başlık sıcaklıkları sırasıyla 817.2 C° ve 735.6 C°'dir. GBK-YS numunesinde alt ve üst başlık sıcaklıkları ise 750.7 C° ve 611.6 C° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.4a). Kiriş açıklığının ortasında göçme anında üst başlıktan elde edilen sıcaklıklar karşılaştırıldığında, en yüksek sıcaklıklara sırasıyla GBK-YP numunesinde (745.6 C°), GBK-YN (648.9 C°) ve GBK-YS (695.9 C°) numunelerinde ulaşılmıştır. Gövde sıcaklıkları incelendiğinde ise en yüksek sıcaklık 941.9 C° ile GBK-YP numunesinde, bunu 765.9 C° ile GBK-YS ve 556.5 C° ile GBK-YN numuneleri izlemektedir (Şekil 5.4b). Yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerde kiriş açıklığının orta bölgesinde (LC4) göçme anında elde edilen yerdeğiştirme verileri karşılaştırıldığında GBK-YN ve GBK-YS numunelerinde sırasıyla 240.4 mm ve 239.3 mm ile en yüksek değerler kaydedilmiştir. Solvent bazlı GBK-YP numunesi için bu değer 238.1 mm'dir (Şekil 5.4c). Solvent esaslı 60 dk. yangın dayanımına sahip GBK-YP numunesi 60.2 dakikada göçme sınırına ulaşarak istenilen yangın dayanımını sağlamıştır. Mekanik davranış olarak da GBK-YP en az yerdeğiştirme değeri ile en yüksek dayanım sağlayan numune olmuştur.

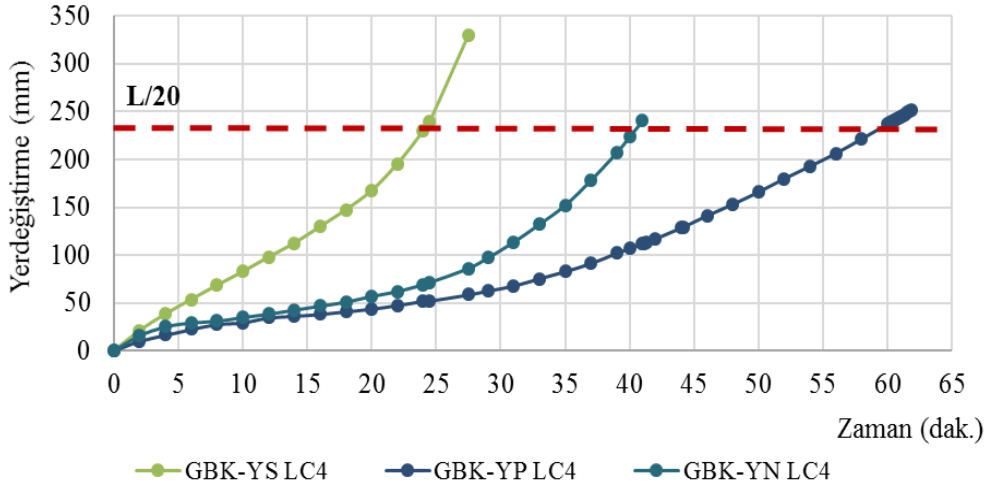


(a)

Şekil 5.4: Yalıtımlı-yalıtımsız numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Mesnet bölgesi yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi.



(b)

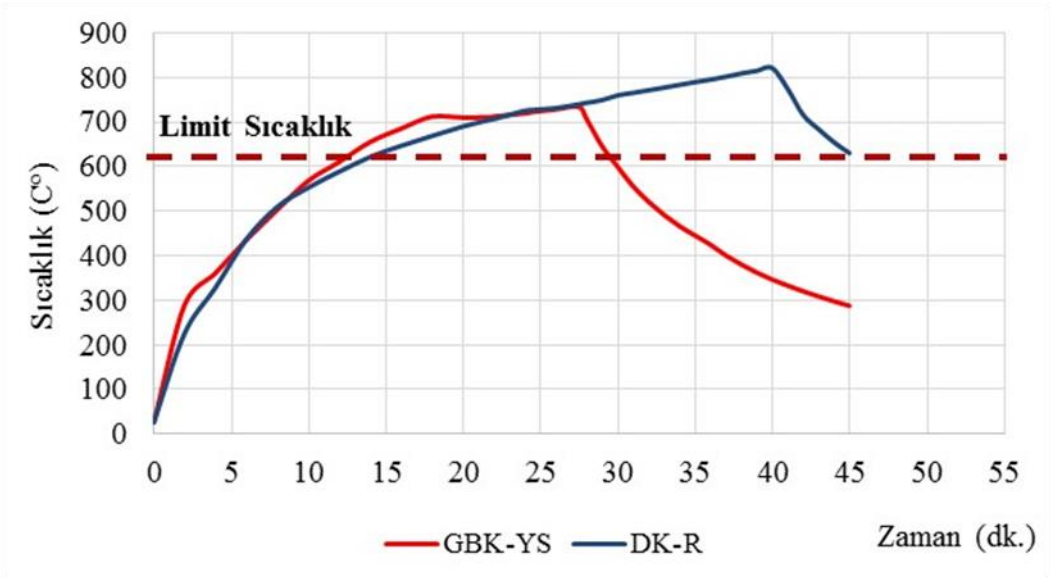


(c)

Şekil 5.4 (devam): Yalıtımlı-yalıtımsız numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (b) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) yalıtımlı ve yalıtımsız numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrileri.

5.2.2 Yalıtımsız Gövde Boşluklu ve Boşluksuz Numunelerin Karşılaştırılması

GBK-YS ve DK-R numunelerinin genel sıcaklık-zaman grafiği incelendiğinde GBK-YS numunesinin göçme anına kadar sıcaklık değerlerinde az bir fark gözlenmiştir (Şekil 5.5). GBK-YS göçme (24.5 dk.) 743.9 C°'ye, DK-R numunesi ise (40 dakikada) 836.7 C°'ye ulaşmıştır (Şekil 5.5).



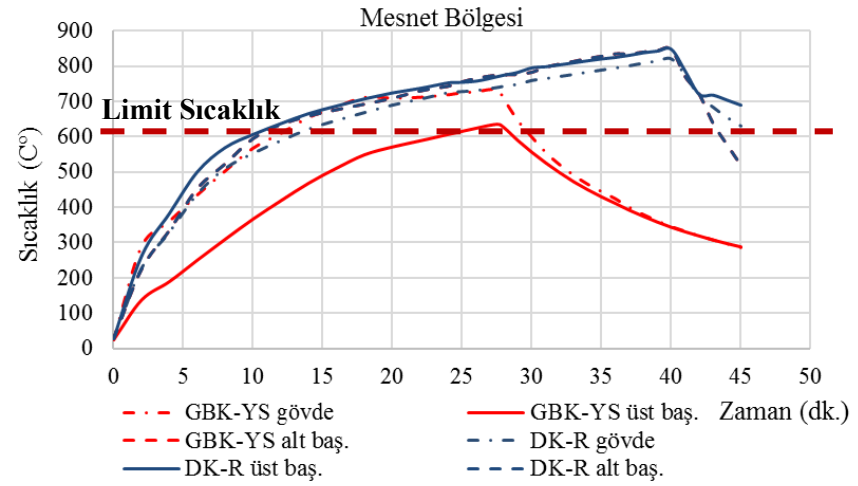
Şekil 5.5: Gövdesi boşluklu ve boşluksuz yalıtımsız numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi.

Gövde boşluklu GBK-YS ve dolu DK-R numunelerinden elde edilen sıcaklıklar karşılaştırıldığında, mesnet bölgesinde üst başlıkda göçme anında en yüksek sıcaklık dolu gövdeli DK-R numunesinde 847.6 C° olurken, gövde boşluklu numunede 611.6 C°. Gövde sıcaklıkları karşılaştırıldığında DK-R numunesinde 820.2 C° ve GBK-YS numunesinde 721.3 C° değerleri elde edilmiştir. Aynı bölgede alt başlık sıcaklıkları dolu gövdeli numunede 846.7 C° ve boşluklu gövdeli numunede ise 750.7 C°'dir (Şekil 5.6a).

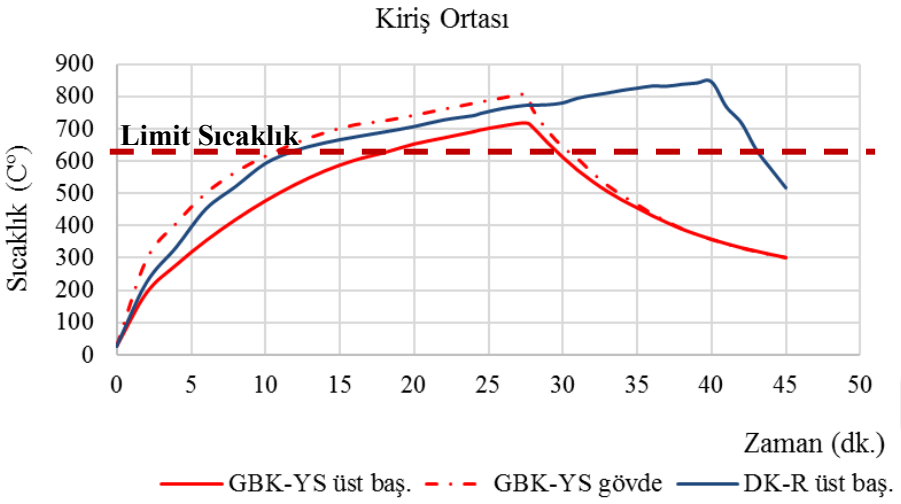
Kiriş açıklığının orta bölgesinde üst başlık sıcaklıkları DK-R numunesinde 728.8 C°, GBK-YS numunesinde 695.9 C° olarak ölçülmüştür. Bu bölgede GBK-YS numunesinde gövde sıcaklığı 765.9 C° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.6b).

Gövde boşluklu ve boşluksuz yalıtımsız numunelerde göçme sırasında meydana gelen yerdeğiştirmeler incelendiğinde ise en büyük yerdeğiştirme beklendiği üzere gövdesi boşluklu GBK-YS numunesinde 239.25 mm olarak elde edilmiştir. Dolu gövdeli DK-R numunesinde ölçülen yerdeğiştirme de 237.73 mm'dir (Şekil 5.6c).

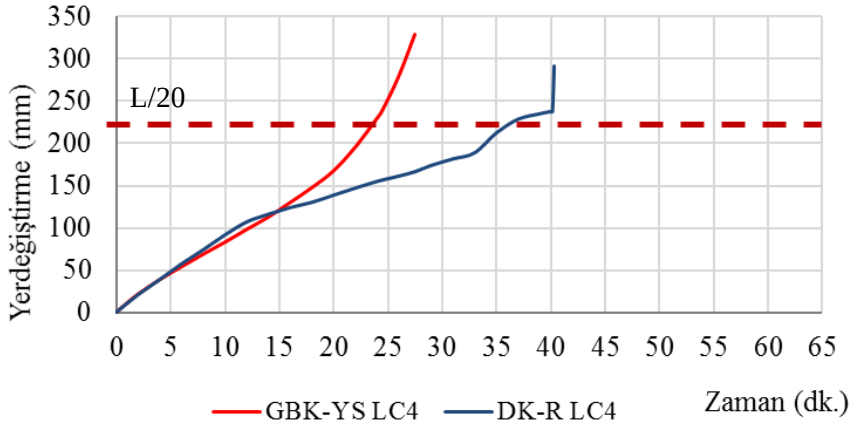
Dolu gövdeli yalıtımsız DK-R numunesi yangına, gövde boşluklu ve yalıtımsız GBK-YS numunesine göre daha uzun süre dayanım (40 dk.) göstermiştir. GBK-YS numunesi kesit özellikleri nedeniyle 24.5 dakikada göçme sınırına ulaşmıştır. En hızlı ve en yüksek yerdeğiştirme sınırına varan GBK-YS numunesi olmuştur.



(a)



(b)



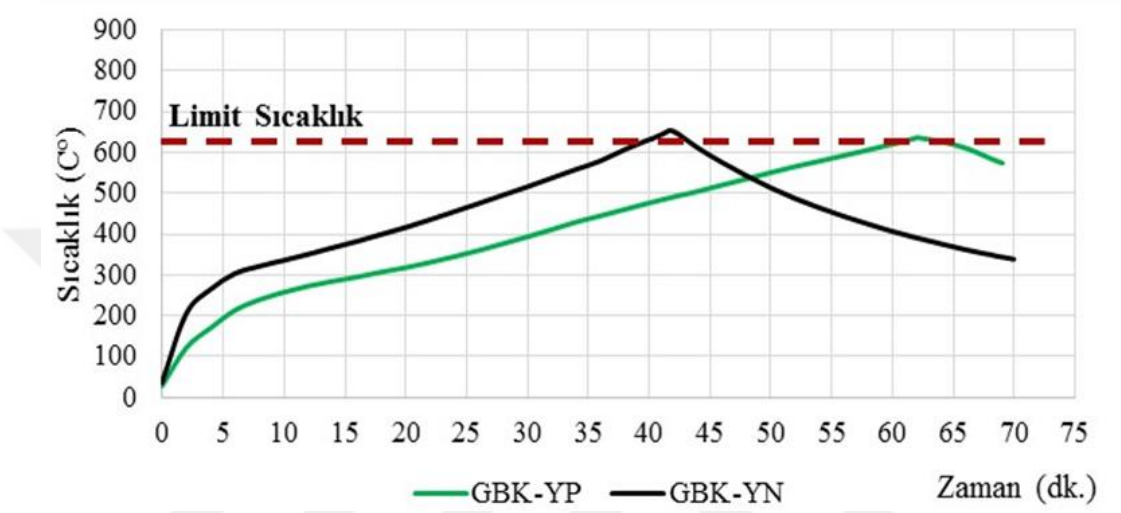
(c)

Şekil 5.6 Yalıtımsız gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Mesnet bölgesi gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi (b) Gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) gövde boşluklu ve boşluksuz numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrileri.

5.2.3 Su ve Solvent Bazlı Yangın Korumalı Numunelerin Karşılaştırılması

GBK-YP ve GBK-YN numunelerinin genel sıcaklık-zaman grafiği incelendiğinde solvent bazlı yangın korumalı GBK-YP numunesinde sıcaklığın göçme anında 757.7 C° ile GBK-YN numunesine göre daha yavaş bir artış seyrettiği görülmektedir.

Su bazlı yalıtımlı GBK-YN numunesinde göçme sırasında sıcaklığın 709 C°'ye çıktığı kaydedilmiştir (Şekil 5.7).



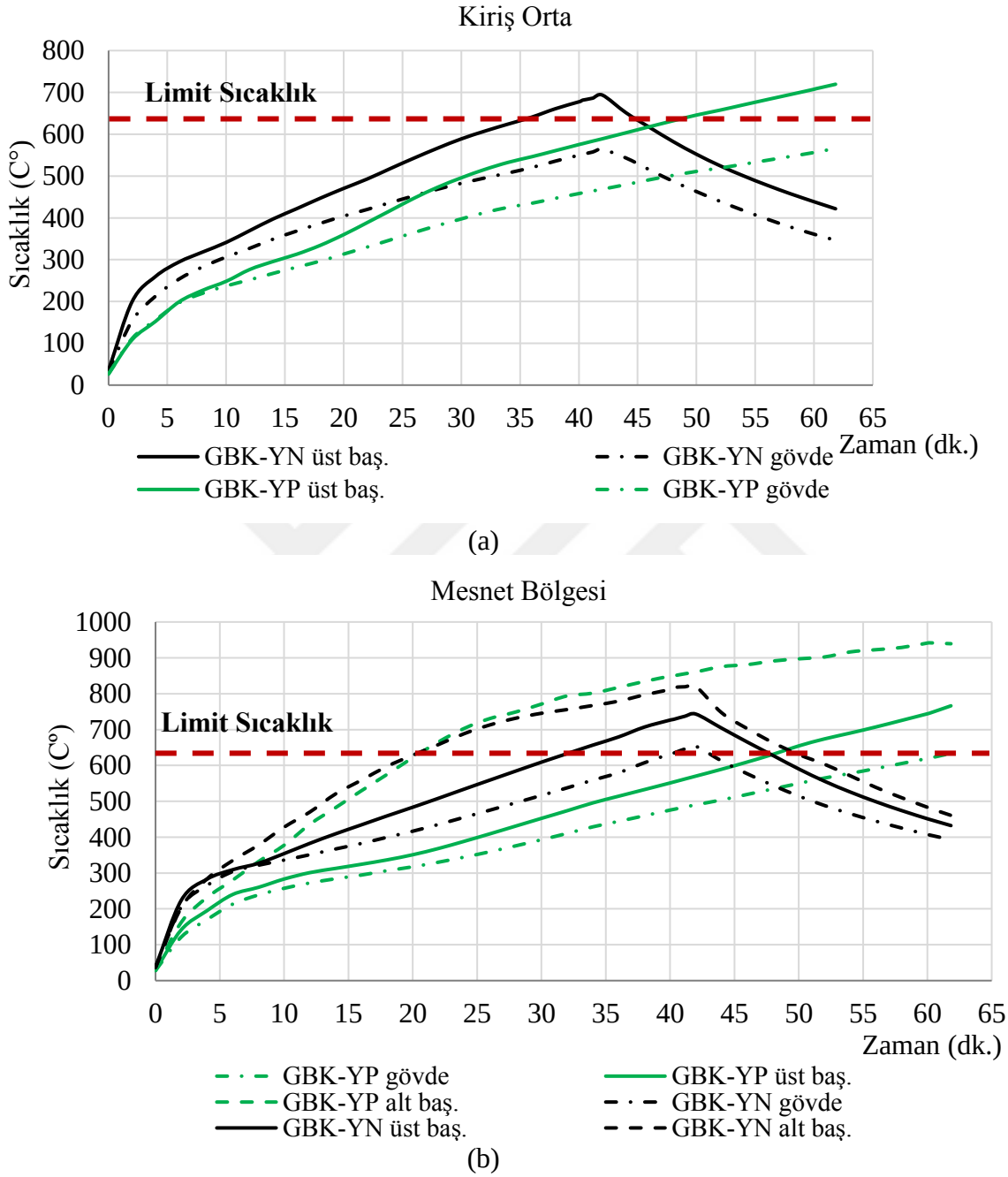
Şekil 5.7: Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi.

Numunelerin mesnet bölgesinde göçme anındaki gövde sıcaklıkları karşılaştırıldığında en yüksek sıcaklığa 644 C° ile GBK-YP numunesinde ulaşılmıştır. Mesnet bölgesindeki alt ve üst başlık sıcaklıkları karşılaştırıldığında ise sırasıyla en yüksek sıcaklıklar solvent bazlı GBK-YP numunesinde 941.9 C°, 745.6 C° ve GBK-YN numunesinde 817.2 C° ve 735.6 C°olarak belirlenmiştir. Mesnet bölgesinde elde edilen gövde sıcaklıkları su bazlı deney numunesinde 644 C° ve solvent bazlı numunede 620.4 C° olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.8a).

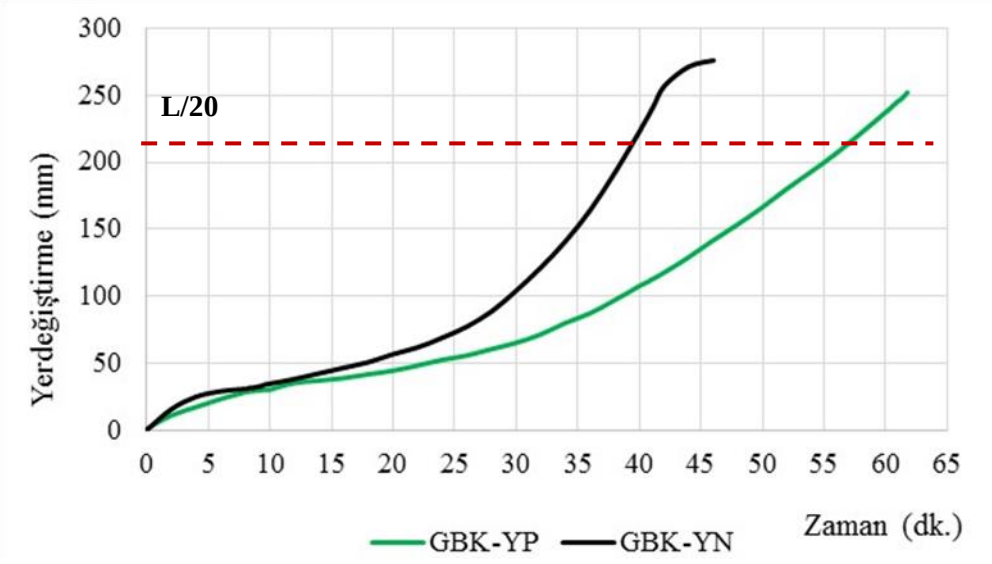
Kiriş ortasında gövde ve üst başlıkda izlenen sıcaklıklar solvent yangın korunumlu numunede daha yüksek olduğu (sırasıyla 941.9 C° ve 745.6 C°) izlenmiştir. GBK-YN numunesinde elde edilen sıcaklıklık değerleri gövdede 556.5 C°, üst başlıkda ise 684.9 C°'dir (Şekil 5.8b).

Su ve solvent esaslı yangın yalıtımlı numunelerde göçme anında meydana gelen yerdeğiştirmeler incelendiğinde en büyük yerdeğiştirme su bazlı GBK-YN numunesinde 240.3 mm değeri ile elde edilmiştir. Solvent bazlı GBK-YP numunesinde ölçülen yerdeğiştirme ile 238.1 mm olarak kaydedilmiştir (Şekil 5.8c).

Solvent bazlı GBK-YP numunesi su bazlı GBK-YN numunesine göre göçme sınırına daha uzun sürede (60.2) ulaşmış bir başka deyişle daha uzun süre yangın dayanımı sağlamıştır.



Şekil 5.8: Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin mesnet bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi, (b) Su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrisi.



(c)

Şekil 5.8 (devam): Su ve solvent bazlı yangın korumalı numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (c) Kiriş açıklığının ortasında (LC4) su ve solvent esaslı yalıtımlı numunelerin yerdeğiştirme-zaman eğrisi.

5.2.4 Tüm Numunelerin Karşılaştırılması

Bütün numunelerden alınan sıcaklık verilerine bağlı olarak oluşturulan sıcaklık-zaman eğrisi incelendiğinde (Şekil 5.9) göçme anında (L/20) en yüksek sıcaklığa yalıtımsız dolu gövdeli DK-R numunesinde 836.7 Cº ile ulaşmıştır. Yalıtımsız gövde boşluklu GBK-YS numunesinin 765.9 Cº sıcaklığa en hızlı ulaşan numune olduğu görülmektedir. Solvent bazlı GBK-YP numunesi belirlenmiş R60 yangın dayanımını sağlamıştır; en büyük gövde sıcaklığının 557.3 C° olduğu belirlenmiştir. Su bazlı yalıtımlı GBK-YN numunesinin 60 dk. yangın dayanımı sağlayamadığı ve gövde sıcaklığının 556.5 C° ulaştığı kaydedilmiştir (Şekil 5.9).

Mesnet bölgesinde meydana gelen sıcaklık verileri incelendiğinde en hızlı ve en yüksek sıcaklıklara dolu gövdeli ve yalıtımsız DK-R numunesinde ulaşıldığı görülmektedir. Bu numunede göçme anı olan 40. dakikada ulaşılan sıcaklık 820.2 C°'dir. GBK-YS numunesi göçme anında (24.5 dk.) 721.2 Cº'ye ulaşmasına karşın, yalıtımsız DK-R numunesinden daha hızlı bir sıcaklık artışı gerçekleştiği tespit edilmiştir. Yalıtımlı numunelerin bu bölgedeki sıcaklık değerleri incelendiğinde, su bazlı numunenin göçme anında 644 Cº'ya 41. dakikada, solvent esaslı numunenin ise 620.3 Cº'ye 60. dakikada ulaştığı kaydedilmiştir (Şekil 5.10a), (Şekil 5.11).

Mesnet bölgesindeki üst ve alt başlıklardan elde edilen sıcaklıklar karşılaştırıldığında, göçme anında GBK-YP numunesinde alt başlık sıcaklığının 941.9 Cº ile en yüksek

sıcaklığa ulaştığı tespit edilmiştir. GBK-YP numunesinden sonra en yüksek alt başlık sıcaklıkları sırasıyla 846.7 Cº ile DK-R, 817.2 Cº ile GBK-YN ve 750.7 Cº ile GBK-YS numunelerinde elde edilmiştir. Üst başlık sıcaklıkları bakımından da en yüksek sıcaklık L/20'ye ulaşıldığı zamanda 847.6 Cº ile DK-R numunesinde ölçülmüştür. DK-R numunesinden sonra en yüksek üst başlık sıcaklıkları sırasıyla 745.6 Cº ile GBK-YP, 735.6 Cº ile GBK-YN ve 611.6 Cº ile GBK-YS numunelerinde elde edilmiştir (Şekil 5.10b), (Şekil 5.11a).

Kiriş ortasında elde edilen gövde sıcaklıklarına bakıldığında en yüksek değerin 765.9 Cº ile yalıtımsız GBK-YS numunesinde ve daha sonra sırasıyla 557.3 Cº ve 556.5 Cº ile GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde olduğu görülmektedir (Şekil 5.10b). DK-R numunesinin ısıl çiftlerinde meydana gelen hasarlar yüzünden bu bölgeden veri alınamamıştır. Kiriş ortasında üst başlık sıcaklık verileri incelendiğinde en yüksek sıcaklık DK-R numunesinde 846.7 Cº olarak kaydedilmiştir.

DK-R numunesinden sonra en yüksek üst başlık sıcaklıkları sırasıyla 708.8 Cº ile GBK-YP, 695.9 Cº ile GBK-YS ve 684.9 Cº ile GBK-YN numunelerinde elde edilmiştir (Şekil 5.10b). Gövde ortasında alt başlıkda GBK-YS numunesinde 784.4 Cº elde edilmiştir. DK-R, GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde bu bölgedeki ısıl çiftlerde meydana gelen hasar yüzünden veri alınamamıştır.

Mesnet bölgesinde ve kiriş ortasında tüm numunelerde betonarme döşeme tarafından korunan üst başlık ile sıcaklığa daha açık durumdaki alt başlık sıcaklıklarının birbirine yakın olmasının en temel nedeni, üst başlık ile trapez sac arasındaki boşlukların yalıtılmamasına bağlı olarak bu bölgede oluşan ısı köprüsü olarak belirlenmiştir.

Kiriş ortasında LC4 yerdeğiştirme ölçerlerden elde edilen veriler incelendiğinde, en büyük yerdeğiştirme dolu gövdeli DK-R numunesinde olup 291.5 mm'dir. En küçük yerdeğiştirme GBK-YP numunesinde 238.1 mm olarak kaydedilmiştir. Bu değerler GBK-YS ve GBK-YN numunelerinde sırasıyla 239.2 mm ve 240.3 mm olarak ölçülmüştür (Şekil 5.10c), (Şekil 5.11b).

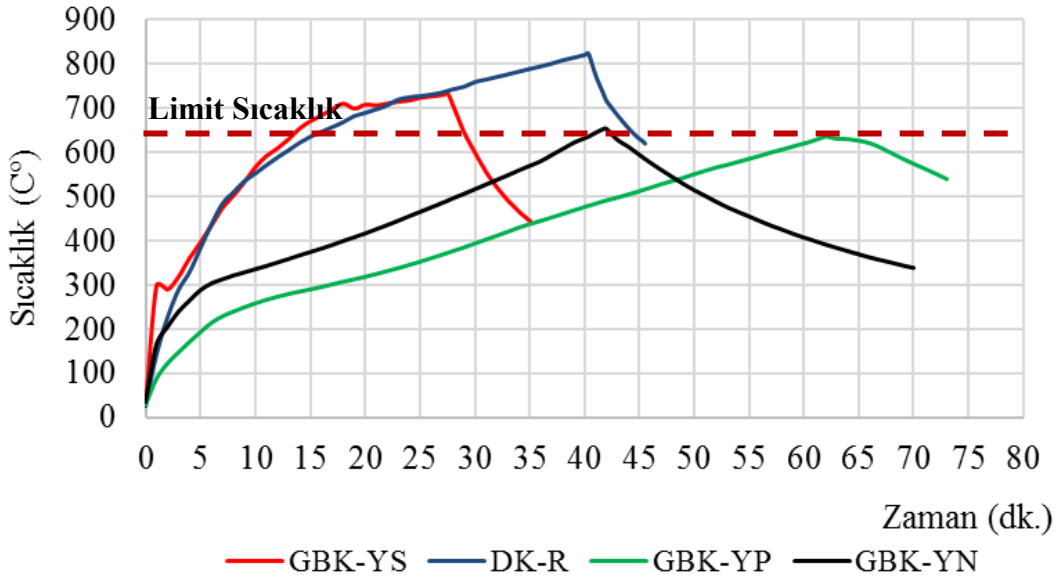
Vierendeel etkisi bakımından en olumsuz durumun GBK-YS numunesinde olduğu ve göreli yerdeğiştirme oranının $(LC2-LC1)/s_0= 0.19$ değerine ulaştığı görülmüştür. Bu oranın yüksek olmasının bir diğer nedeni de yerel gövde burkulmalarıdır.

Solvent yalıtımlı GBK-YP numunesinde düşük bir artış ile 0.18 değerine vardığı izlenmektedir. Su esaslı yalıtımlı GBK-YN numunesini ile GBK-YP numunesi

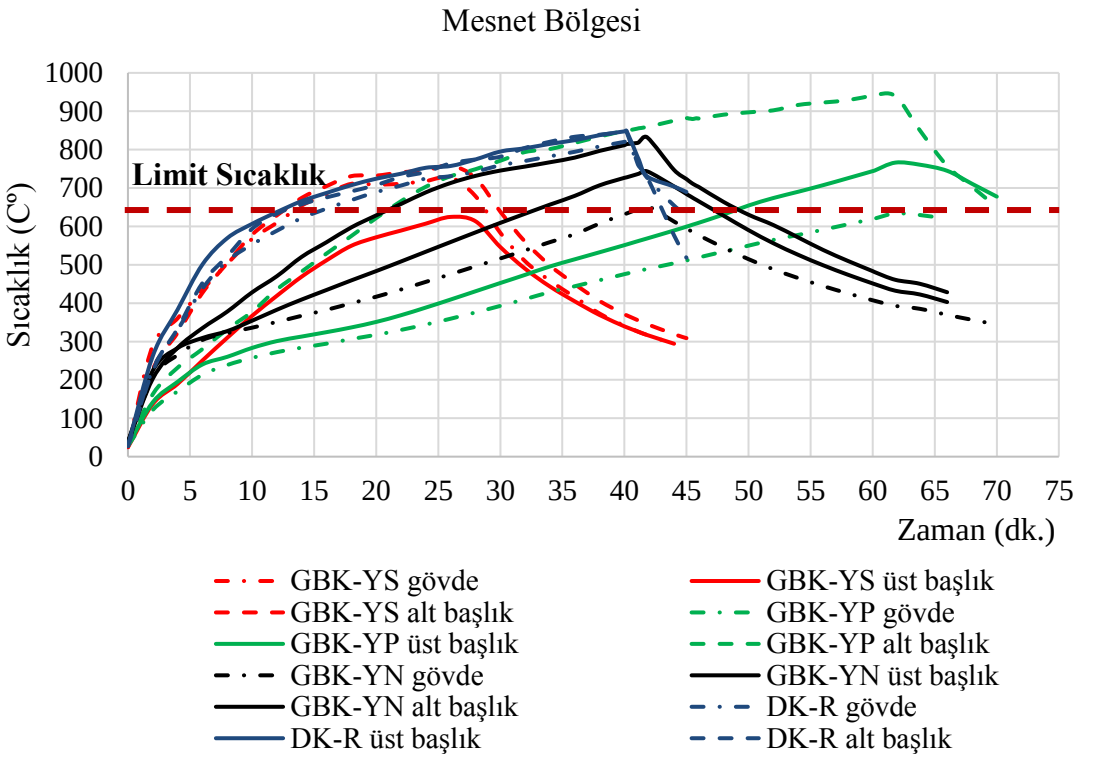
karşılaştırıldığında ise su bazlı numunede yerdeğiştirmenin daha hızlı gerçekleştiği ve göçme anında bu oranın 0.16'ya ulaştığı görülmektedir (Şekil 5.10d).

Numuneler karşılaştırıldığında en hızlı sıcaklık artışının yaşandığı numune hem yalıtımsız hem de gövde boşluklarına sahip olması nedeniyle GBK-YS'dir. Gövdesi dolu numune geometrik olarak üstünlük sağlamasına karşın, yalıtımsız olduğu için hızlı bir şekilde en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Su bazlı ve solvent içerikli kaplamalar 60 dk. yangına dayanımı sağlayacak malzeme kalınlığında kullanılmıştır. Bu numunelerin R60 yangın dayanımı sağlaması beklenmiştir.

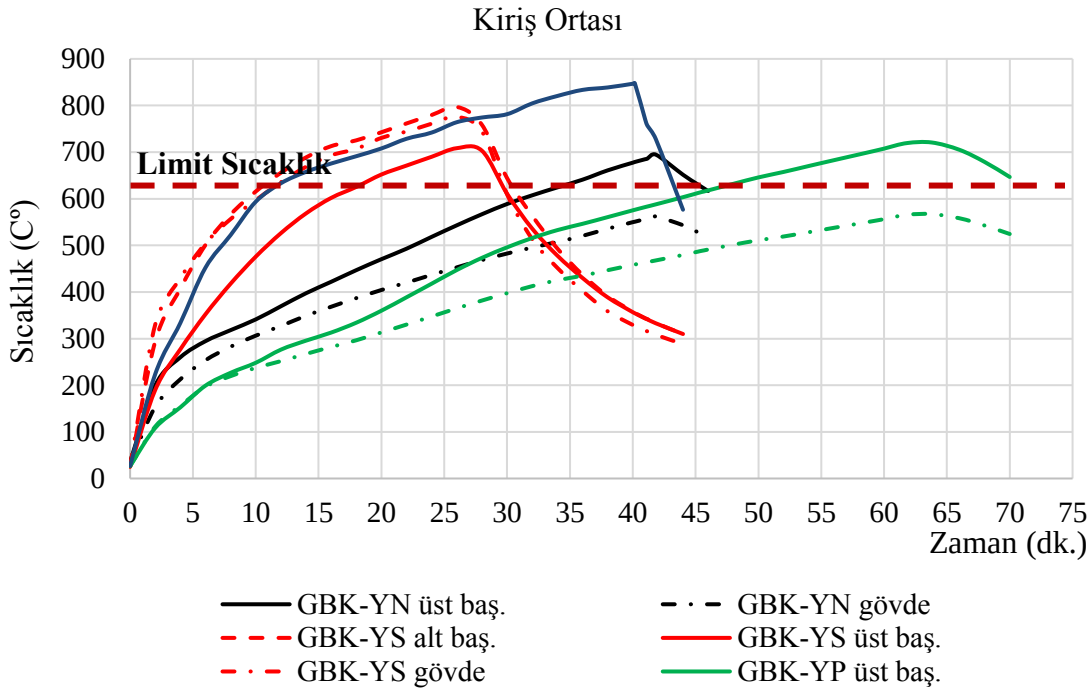
Solvent yalıtımlı numunenin göçme süresi gerekli koşulu sağlamış göçme t=60.2 dakikada kaydedilmiştir. Su bazlı yalıtımlı numune bu koşulu sağlayamamış olup bu numenin 41. dk.'da göçtüğü tespit edilmiştir. Yapılan inceleme sonucunda, bu numunenin beklenen süreye ulaşamamasının olası kuvvetli nedenlerinden birinin çelik yüzeye kaplama öncesi uygulanan astar ile aderansının solvent bazlı kadar iyi olmaması şeklinde düşünülmektedir. Diğer olası nedenler arasında uygulama hatası, kalınlık, kuruma hızı ve boşluk kısmına boyanın tam olarak uygulanamaması yer almaktadır.



Şekil 5.9: Tüm numunelerin sıcaklık-zaman eğrisi.

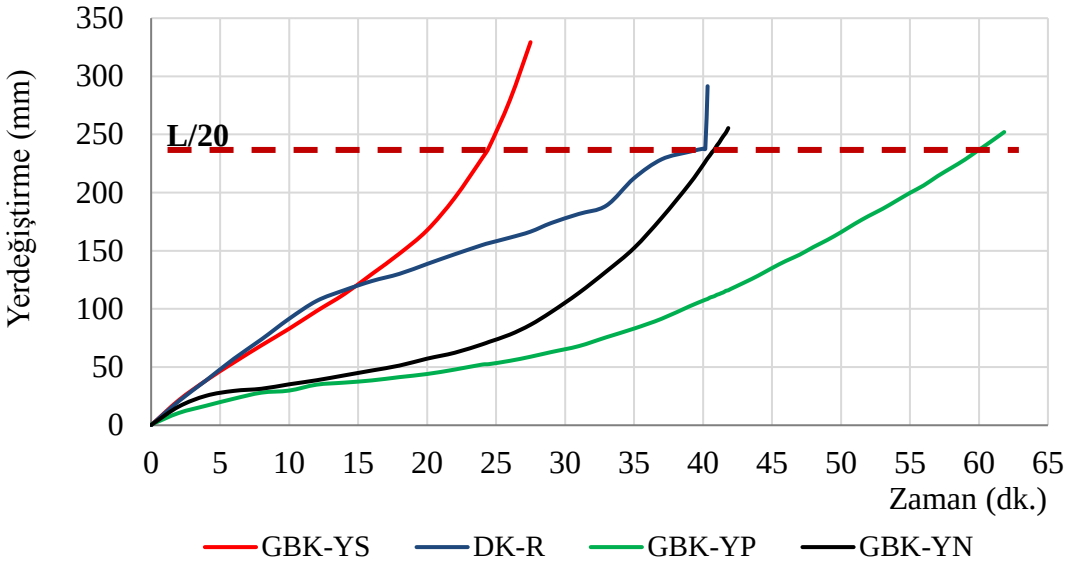


(a)

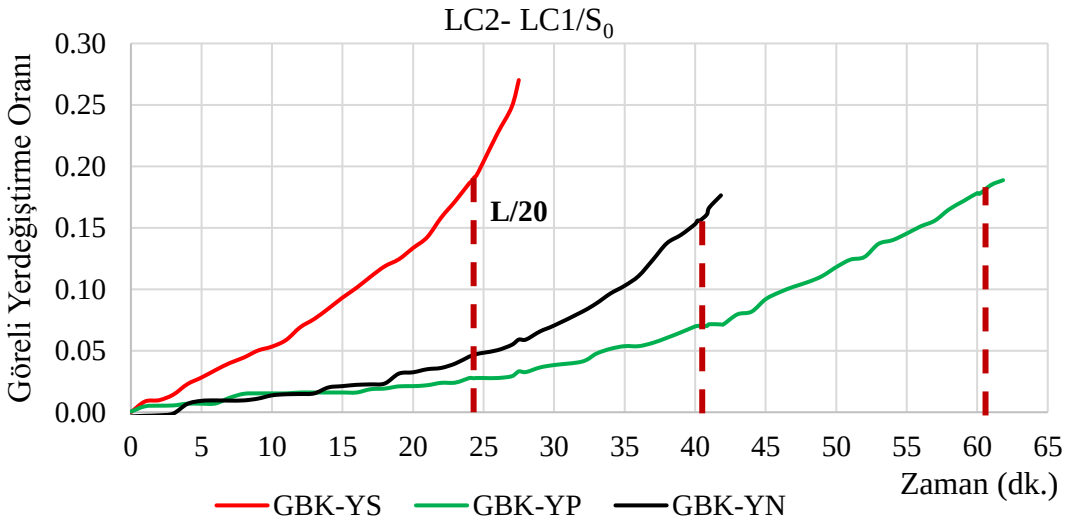


(b)

Şekil 5.10: Tüm numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (a) Tüm numunelerin mesnet bölgesinde ölçülen üst başlık, alt başlık ve gövde sıcaklıklarının zamana bağlı değişim eğrileri, (b) Tüm numunelerin kiriş ortası bölgesine ait gövde, alt ve üst başlık sıcaklık-zaman eğrileri.

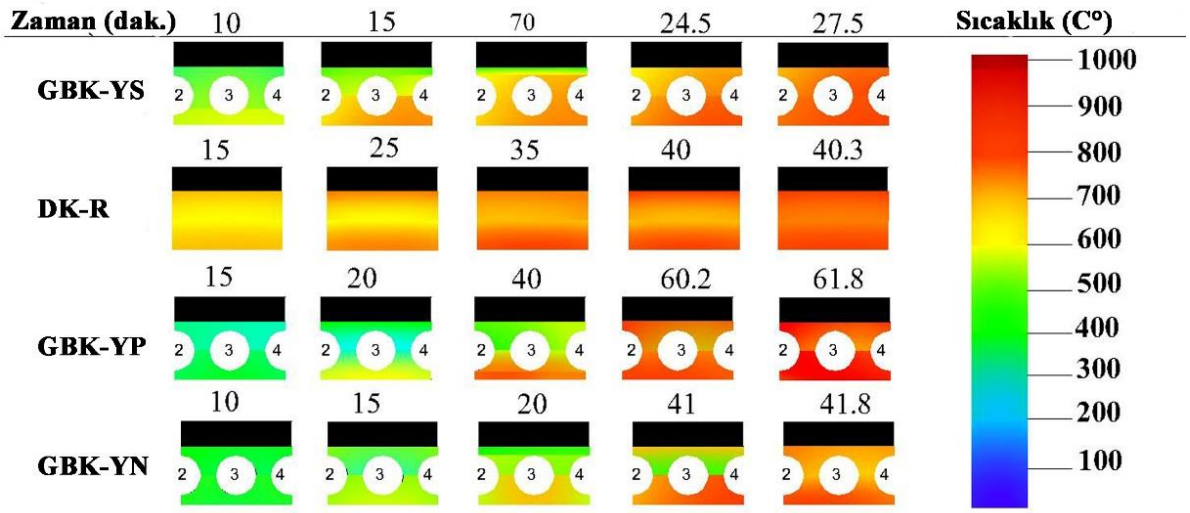


(c)

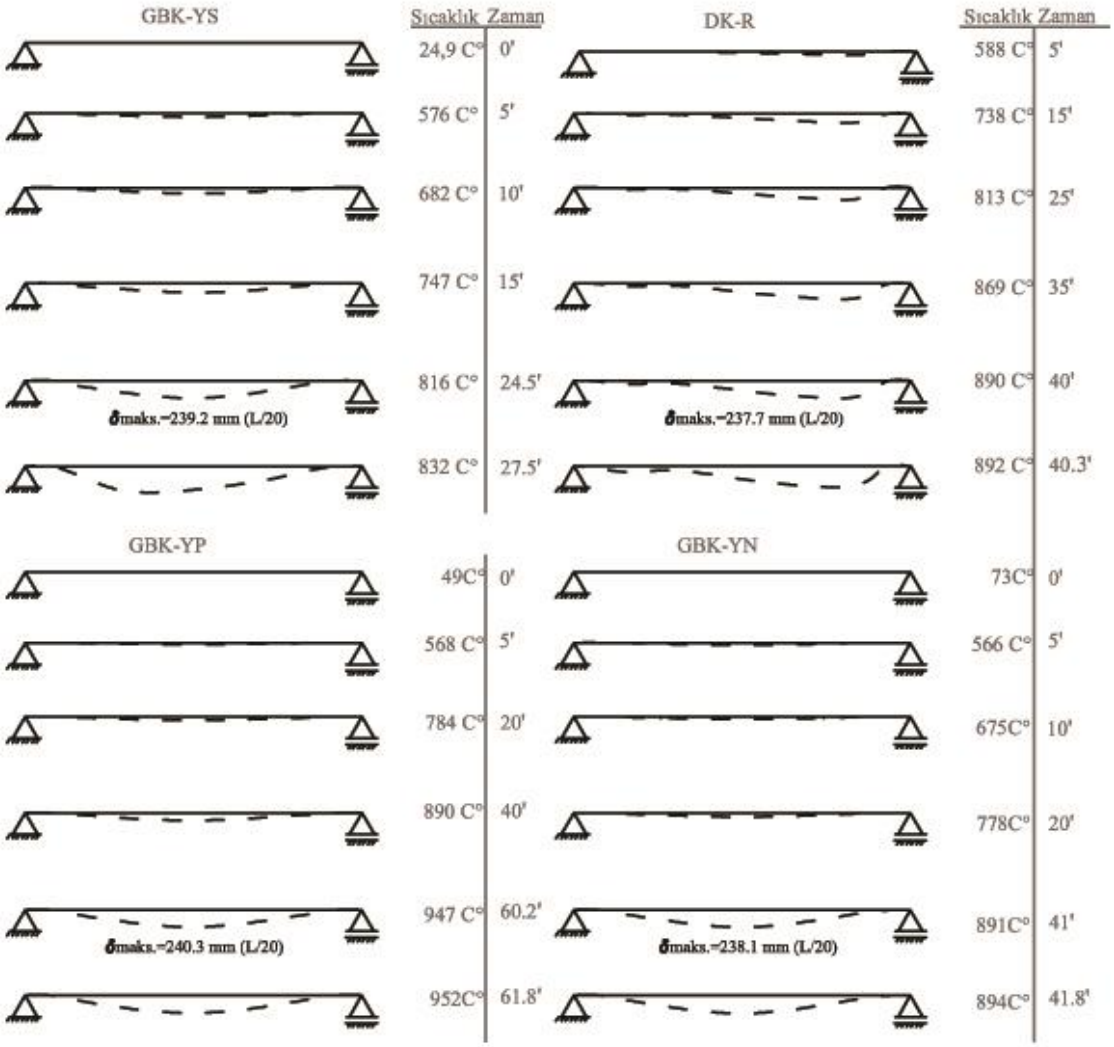


(d)

Şekil 5.10 (devam): Tüm numunelerin deney sonuçlarının karşılaştırılması: (c) Tüm numunelerin kiriş ortası (LC4) yerdeğiştirme-zaman eğrileri, (d) Tüm numunelerin (LC2-LC1)/S_0 göreli yerdeğiştirme oranının zamana bağlı değişim eğrileri.



(a)



(b)

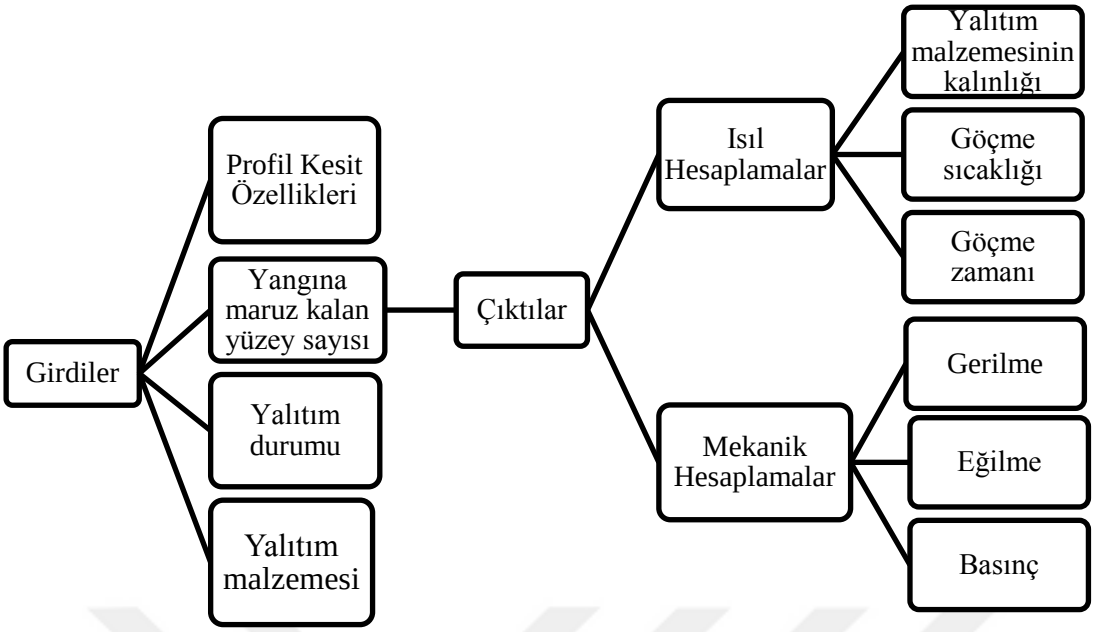
Şekil 5.11: Kirişlerin zamana ve sıcaklığa bağlı sıcaklık ve yerdeğiştirme verileri: (a) Kirişlerin belirli zamana aralıklarındaki sıcaklık dağılımları, (b) Kirişlerin belirli zaman ve sıcaklık aralıklarındaki yerdeğiştirme durumları.

6. DENEY NUMUNELERİNİN SAYISAL ANALİZİ

Deney numunelerinin sayısal analizi için Elefir-EN programı 1.5.8 (2015) versiyonu kullanılmıştır (Elefir-EN, 2015). Elefir-EN, zayıf ya da kuvvetli eksende yüklü durumdaki karbon ya da paslanmaz çelik elemanların yangın dayanımını kesit faktörlerine bağlı olarak EN1991-1-2 ve EN 1993-1-2 standartlarına göre değerlendiren bir yazılımdır. Bu program Liege (Belçika) ve Aveiro (Portekiz) üniversiteleri tarafından geliştirilmiştir. Hesaplamalar zaman, dayanım ve sıcaklık alanları içerisinde gerçekleştirilebilmektedir.

Yazılım mekanik olarak kritik sıcaklığa ve zamana ya da belirlenen yangın dayanım sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak kirişte gerilme, basınç ve eğilme (eğilme-basınç-kesme) davranışlarını hesaplayabilmektedir.

Program ısıl olarak yangın dayanımına bağlı olarak kullanılması gereken yalıtım malzemesinin kalınlığını, göçme sıcaklığına ne kadar zamanda ulaşıldığını ve göçme süresine kaç derecede ulaşıldığını belirleyebilmektedir. Program, kullanıcının farklı profil kesitlerine, yangına maruz kalan yüzey alanlarına, yangın eğrisine, yangın yalıtım malzemelerini seçmesine ve tanımlamasına izin vermektedir. Bunun yanısıra kullanıcı güvenlik katsayıları ve gölge faktörünü tanımlayıp hesaplara katılıp katılmayacağına karar verebilmektedir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1: Elefir-EN programının algoritması.

6.1 DK-R Numunesinin Kritik Sıcaklığının ve Sıcaklık Değişimlerinin Hesaplanması

Elefir-EN programındaki yangın korumasız dolu çelik profillerde kritik sıcaklık hesaplama yöntemi EN 1993-1-2, 4.22' de verilen hesaplama kuralıdır (6.1). Bu kural tezde bölüm 2.1.1'de açıklanmıştır. Buna göre kritik sıcaklık

$$\theta_{a,cr}=39.19 \ln\left\{\frac{1}{0,9647\mu_0^{3,833}}-1\right\}+482 \quad (6.1)$$

bağıntısı ile elde edilir. Bölüm 2.2.3'de belirtildiği gibi sıcaklık artışı (Δt) ≤ 5 saniye olacak şekilde

$$\Delta\theta_{a.t}=\frac{k_{sh}}{c_a\rho_a}\frac{A_m}{V} h_{net,d} \Delta t \quad (6.2)$$

ilişkisine göre hesaplanmaktadır. Burada $h_{net,d}$ toplam net ısı akısını ifade etmektedir. Toplam ısı akısı radyasyon ($h_{net,r}$) ve konveksiyon ($h_{net,c}$) yolu ile ısı yayılımının toplamından oluşmaktadır. Bunların hesaplanmasında

$$h_{net,r}=5.67.10^{-8} \phi \varepsilon_{res}((\theta_r+273)^4-(\theta_m+273)^4) \quad (6.3)$$

$$h_{net,c}=\alpha_c (\theta_g-\theta_m) \quad (6.4)$$

$$h_{net,d}=h_{net,c}+h_{net,r} \quad (6.5)$$

kullanılmaktadır. Standart yangın durumunda (ISO 834) Eurocode 3'e göre aşağıdaki değerler kullanılmaktadır:

$$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f x\ \varepsilon_m = 0.7 \tag{6.6}$$

$$\phi = 1 \quad \alpha_c = 25 \frac{W}{m^2 K} \tag{6.7}$$

Kirişte ısı akış/iletim miktarı hesaplandıktan sonra, kesit faktörü hesaplanmaktadır. Kesit faktörü, kirişin yalıtımlı, yalıtımsız ve yangına maruz kalan yüzey sayısına bağlı olarak Bölüm 2.3, Çizelge 2.3'e göre hesaplanmaktadır.

Deney numunelerinin geometrik özellikleri Bölüm 3.2.1'de verilmektedir. Buna bağlı olarak kesit faktörü Elefir-EN programı kullanılarak (A/V) IPE 140'a göre 291 m^{-1} olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık hesaplamalarında Bölüm 2.3' de belirtildiği gibi yalıtımsız ve dolu gövdeli kirişler için hesap faktörlerinden biri de gölge etki faktörü (k_{sh})'dür. Hesaplamalarda gölge etki faktörü göz önüne alınarak yapılmıştır.

Gölge etki faktörü deneyde kullanılan yangın korumasız I profiller için standard yangınlarda,

$$k_{sh} = 0.9\ (A_m/V)_b\ /(A_m/V) \tag{6.8}$$

ile hesaplanmaktadır (Bölüm 2.3). Gölge etki faktörü deneyde kullanılan kabaran (şişen) boya ile kaplı 3 taraftan ısıya maruz kalan IPE 140 profiller için

$$A_m/V = 291.2\ m^{-1} \tag{6.9}$$

bağıntısı verilmektedir. Buna göre deney numuneleri için ön°e gölge etki faktörüne göre profilin kesit faktörü programda tekrar hesaplanmıştır.

$$(A_m/V)_b = \frac{2(b+h)}{A} = 291.2 m^{-1} \tag{7.0}$$

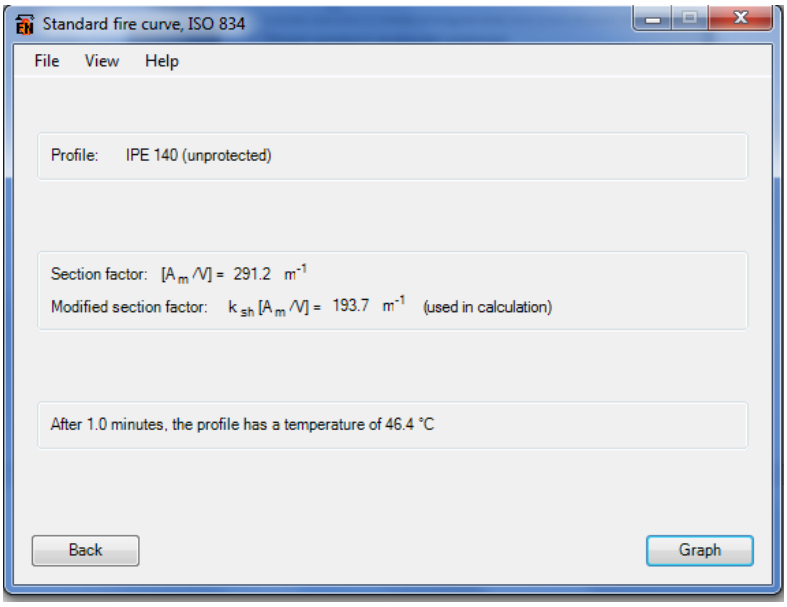
Bulunan değer $(A/V)_b$ yerine yerleştirilerek gölge etki faktörü 0.66 hesaplanmıştır.

$$k_{sh} = 0.9 \quad \left(193. \frac{7}{291.2} .2\right) = 0.66 \tag{7.1}$$

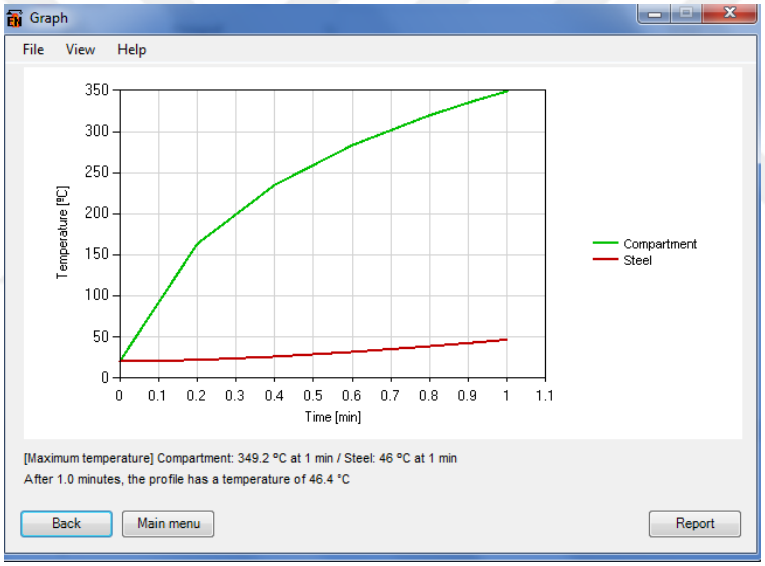
Gölge etki faktörüne bağlı olarak yeni kesit faktörünün hesaplanması gerekmektedir. Buna göre;

$$k_{sh} \left(\frac{A_m}{V}\right) = 0.66\ .\ 291.2 = 193.7\ m^{-1} \tag{7.2}$$

elde edilmiştir. Gölge etki faktörüne bağlı kesit faktörü (193.7 m^{-1}) bulunduktan sonra profilin kritik sıcaklık değeri, bir başka deyişle göçme sıcaklığı (L/20) Elefir-EN hesaplamasına bağlı olarak 864.3 C^o ve göçme zamanı 36.7 dakika olarak bulunmuştur. Profilin zamana bağlı olarak sıcaklık değişimi 1 dakikalık aralıklar ile hesaplanmıştır (Şekil 6.2a, b).



(a)



(b)

Şekil 6.2: Elefir-EN sayısal analiz programı çıktıları: (a) Profilin sıcaklık verilerinin çıktı görünümü, (b) Profil ve ortam sıcaklık verilerinin grafik olarak çıktı görünümleri.

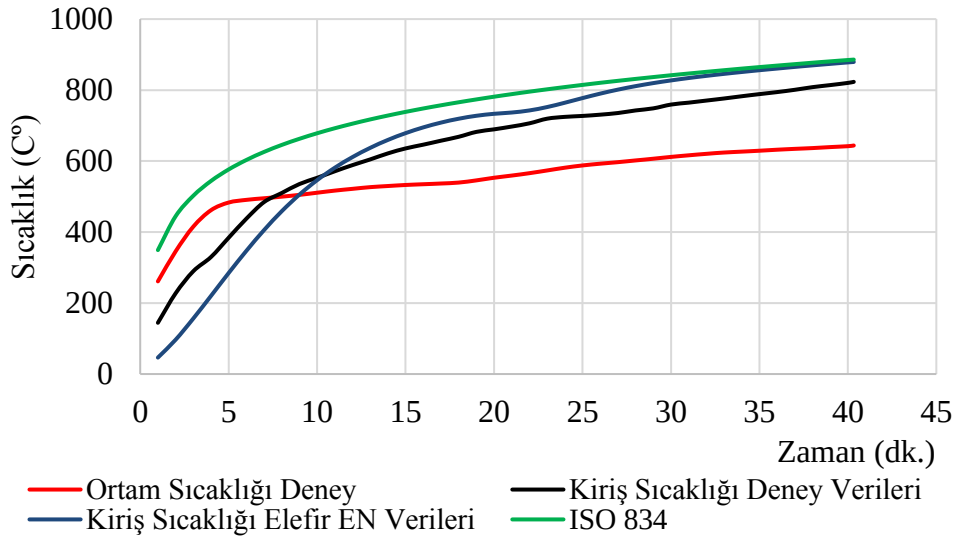
Elefir-EN ve deney sonuçları karşılaştırıldığında kritik sıcaklık sayısal analiz sonucu 864.3 Cº elde edilirken, deney sonucu kritik sıcaklık 820.2 Cº'dir.

Göçme zamanlarına bakıldığında deneyde göçme değerine 40 dakikada ulaşılırken Elefir-EN programında göçme zamanı 36.7 dakika olarak hesaplanmıştır. Yeterli yaklaşıklığın elde edildiği düşünülmektedir. Çizelge 6.1 ve Şekil 6.3'de DK-R numunesinin deney ve Elefir-EN programından elde edilen sıcaklık değişimleri ve

ortam sıcaklıkları zamana bağlı olarak karşılaştırılmalı bir şekilde verilmiştir. Deneysel ve sayısal hesaplama sonuçlarında DK-R numunesinin sıcaklık değişim verileri arasında % 6.7 değerinde, ortam sıcaklıklık verileri karşılaştırıldığında ise deney ortam sıcaklığı ile Elefir-EN programının kullanmış olduğu ISO 834 yangın eğrisi arasında da % 25.5'lik bir fark vardır. Bu değerler sonuçların birbiriyle yeterince ve kabul edilebilir düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, Elefir-EN programı standartlara (Eurocode 3, ISO 834) bağlı olarak bir değerlendirme yaptığından, deney ile sayısal analiz sonuçlarının uyumunun yanısıra, sonuçların standartlarca da uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.1: DK-R numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması.

Zaman	Ortam Sıcaklığı Deney Verileri (C°)	ISO 834 (Elefir-EN) (Cº)	DK-R Numune Sıcaklıkları Deney Verileri (Cº)	DK-R Numune Sıcaklıkları Elefir-EN Verileri (Cº)	Deney Elefir-EN oranı
5	587.6	384	384	284.6	1.34
10	674.9	678.4	552.8	546.3	1.01
15	738.1	738.6	635.6	678.7	1.06
20	785	781.4	689.4	733.2	1.06
25	812.6	814.6	727.2	777.5	1.06
30	847.5	841.8	759.2	827.2	1.08
35	869.2	864.8	788.7	856	1.08
40 (L/20)	890.4	884.7	820.2	878	1.07



Şekil 6.3: DK-R numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi.

6.2 GBK-YS Numunesinin Sıcaklık Değişimlerinin Hesaplanması

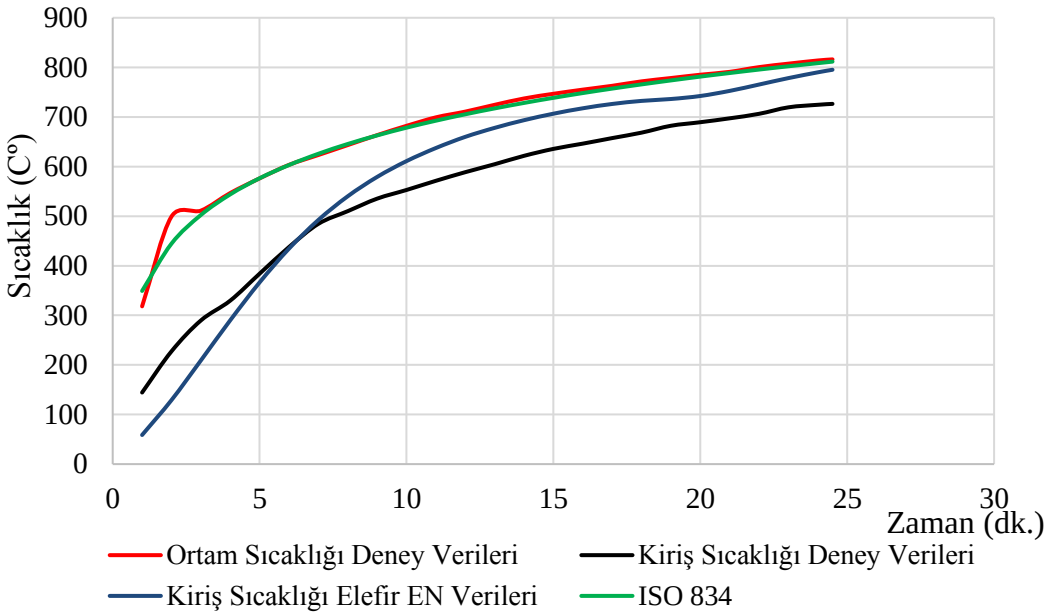
Elefir-EN programı "dolu gövdeli kirişleri" hesaplamaya yönelik bir program olsa da kesit faktöründe değişiklik yaparak gövdesi boşluklu IPE 140 profili için tahmini kiriş sıcaklıkları elde edilebilmektedir. Gövdesi boşluklu IPE 140 profilinin kesit faktörü (A/V) = 285 m^{-1} olarak hesaplanmıştır (Bölüm 3.2.6). Bu kesit faktörüne bağlı olarak zamana bağlı sıcaklık değişimleri ve deney sonuçları ile karşılaştırması Çizelge 6.2 ve Şekil 6.4'de verilmektedir.

Elefir-EN ve deney sonuçları karşılaştırıldığında, kritik sıcaklık sayısal analiz sonucu 887 Cº elde edilen deney sonucu kritik sıcaklık 726.4 Cº'dir. Göçme zamanlarına bakıldığında, deneyde göçme değerine 24.5 dakikada ulaşılırken, Elefir-EN programında göçme zamanı 42.27 dakika olarak hesaplanmıştır. Elefir-EN programı genellikle dolu gövdeli kirişleri hesaplamaya yönelik bir program olduğu için verdiği değer gövdesi boşluklu kiriş için üstünde çıkmıştır. Bu nedenle, solvent (GBK-YP) ve su (GBK-YN) yalıtımlı numunelerde kritik sıcaklık hesaplaması yapılmamıştır.

Deneysel ve sayısal hesaplama sonuçları karşılaştırıldığında GBK-YS numunesinin sıcaklık değişimlerinde % 8, ortam sıcaklıklık verileri karşılaştırıldığında % 0.55 değerinde bir fark vardır. Elde edilen bu fark GBK-YS numunesi için deney ve sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğunu göstermektedir.

Çizelge 6.2: GBK-YS numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması.

Zaman	Ortam Sıcaklığı Deney Verileri (C°)	ISO 834 (Elefir-EN) (Cº)	GBK-YS Numune Sıcaklıkları Deney Verileri (Cº)	GBK-YS Numune Sıcaklıkları Elefir-EN Verileri (Cº)	Deney / Elefir-EN oranı
5	576.2	576.4	384	366.4	1.04
10	682.1	678.4	552.8	611	1.10
15	746.7	738.6	635.6	706.6	1.11
20	785.2	781.4	689.4	742.3	1.07
24	813.9	808.5	724.5	790	1.09
24.5 (L/20)	816.1	811.6	726.4	795.2	1.09



Şekil 6.4: GBK-YS numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi.

6.3 GBK-YP Numunesinin Sıcaklık Değişimlerinin Hesaplanması

Korumalı kirişlerde sıcaklık hesabı EN 1993-1-2 (2004) tarafından verilmiş olan hesaba göre yapılmaktadır (Bölüm 2.3). İnce film kabaran (şişen) boyalar reaktif malzemeler olduğu için sıcaklık artışına bağlı olarak ısı iletkenliği de değişiklik göstermektedir. Bu nedenle kabaran (şişen) boyalarda ısıl iletkenliğin sıcaklık ile sabit bir formülü bulunmamaktadır. Yalıtımlı numunelerin sayısal hesaplaması yapılırken literatürde önemli bir yere sahip olan Dai ve diğ. (2010)'nin yaptığı ve bundan sonra bir çok çalışmada kullanılan (Nadjai ve diğ. (2016), Krishnamoorty ve diğ. (2009), Çırpıcı ve diğ. (2016)) ısıl iletkenlik değerleri bu tezde solvent ve su bazlı numunelerin hesaplarında kullanılmıştır. Dai ve diğ. (2010) yaptığı çalışmada kabaran (şişen) boyaların ısıl iletkenliğini hesaplamak için DD ENV13381-4 (2002) standartında yer alan tersine düzenlenmiş (7.3) bağıntısı 10 adet numunenin sayısal analizinde kullanmış ve deney sonuçları ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

$$\lambda_{p,t\,(t)}=\left[dp\frac{V}{A_p}\;c_a\;p_a(1+\phi/3)\;\frac{1}{(\theta_t-\theta_{a,t})\,\Delta t}\right]\left[\Delta\theta_{a,t}+\left(e^{\phi/10}-1\right)\Delta\theta t\right] \qquad (7.3)$$

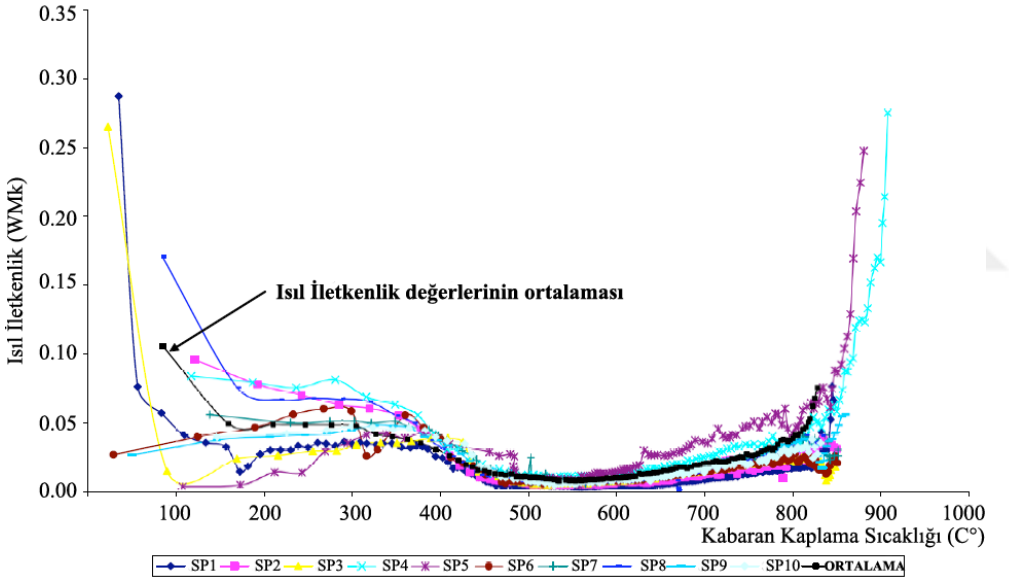
$$\Delta t\leq 0.5 \text{ dk.}$$

Bu eşitlikte $\lambda_{p,t}$ t zaman aralığındaki yalıtım malzemesinin ısı iletkenliğini, c_a,ρ_a çeliğin özgül ısısı ve çeliğin özkütlesini θ_t t zaman aralığındaki gaz sıcaklığını ifade etmektedir.

7.3 esas alınarak hesaplanmış ısıl iletkenlik katsayılarının sıcaklığa bağlı olarak değişimi Şekil 6.5'de verilmektedir. Bu çalışmaya bağlı olarak, yapılan ek bir varsayım ile su ve solvent bazlı kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak ısı iletkenliklerinin değerlerinin ortalaması alınmış ve Çizelge 6.3'de verilen katsayılar kullanılmıştır.

Çizelge 6.3: Sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik katsayıları.

Sıcaklık (C°)	Isıl İletkenlik λ (WmK)
100	0.10
200	0.05
300	0.03
400	0.01
500	0.01
600	0.01
700	0.02
800	0.04
900	0.05



Şekil 6.5: Farklı 10 test numunesinin ısıl iletkenlikleri ve ortalama değer eğrileri (Dai ve diğ. 2010).

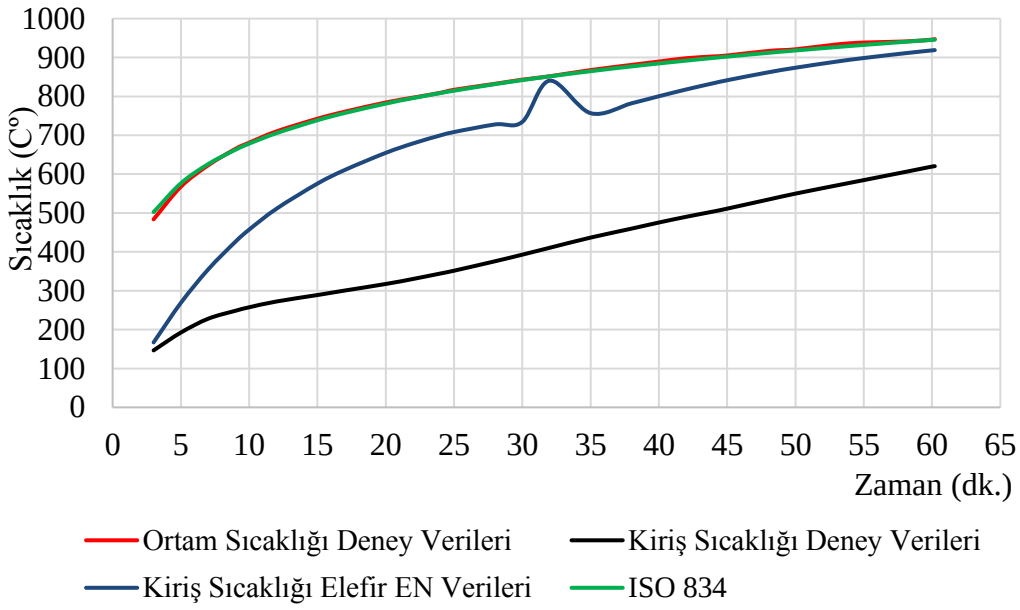
Solvent esaslı kabaran (şişen) boya hesaplarında kullanılan ürünün yoğunluğu ρ_a=1380 kg/m^3, özgül ısısı c_a =1000 J/kgK ve malzemenin nem değeri %3 alınmıştır. Bu veriler firmadan elde edilen veriler olup sayısal analiz hesaplarında kullanılmıştır.

GBK-YP numunesinin Elefir- EN sayısal hesaplama ve deney verilerinden elde edilen sıcaklık değişimleri ve ortam sıcaklıklık verileri karşılaştırıldığında, hesapla bulunan kiriş sıcaklıklarında deneyden elde edilenlerle arasında % 34.8'lik bir farkın olduğu görülmektedir.

Deney fırını içerisindeki sıcaklığın, sayısal hesaplamada kullanılan ISO 834 yangın eğrisi arasında da % 0.33'lük fark vardır. GBK-YP için elde edilen bu farkların bu konuda yapılan benzer çalışmalar ile karşılaştırıldığında Nadjai ve diğ. (2016), Nadjai ve diğ. (2007), Bihina ve diğ. (2013) belirlenen düzeyde olduğunu göstermektedir (Çizelge 6.4, Şekil 6.6).

Çizelge 6.4: GBK-YP numunesi için Elefir-EN ve deney verilerinin karşılaştırılması.

Zaman	Ortam Sıcaklığı Deney Verileri (C°)	ISO 834 (Elefir-EN) (Cº)	GBK-YP Numune Sıcaklıkları Deney Verileri (Cº)	GBK-YP Numune Sıcaklıkları Elefir-EN Verileri (Cº)	Deney Elefir-EN oranı
5	567.8	576.4	192.5	251.1	1.30
10	680.9	678.4	257.4	335.9	1.30
15	742.5	738.6	288.9	415.1	1.43
20	784.2	781.4	317.4	491	1.54
25	816.9	814.6	351.5	579.9	1.64
30	843	841.8	392.8	671.8	1.71
35	867.6	864.8	436.7	733.2	1.67
40	889.6	884.7	475.5	777.2	1.63
45	905.1	902.3	511.2	844.5	1.65
50	921.1	918.1	549.8	888.2	1.61
55	938.4	932.3	584.6	914	1.56
60	945.9	945.3	619.4	931.5	1.50
60.2 (L/20)	947.3	945.8	620.4	932.2	1.50



Şekil 6.6: GBK-YP numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi.

6.4 GBK-YN Numunesinin Sıcaklık Değişimlerinin Hesaplanması

Su bazlı kabaran (şişen) boya ile yalıtımlı GBK-YN numunesinin hesaplarında da solvent esaslı numunenin hesabında kullanılan ısı iletim katsayıları kullanılmıştır (Çizelge 6.4, Şekil 6.6).

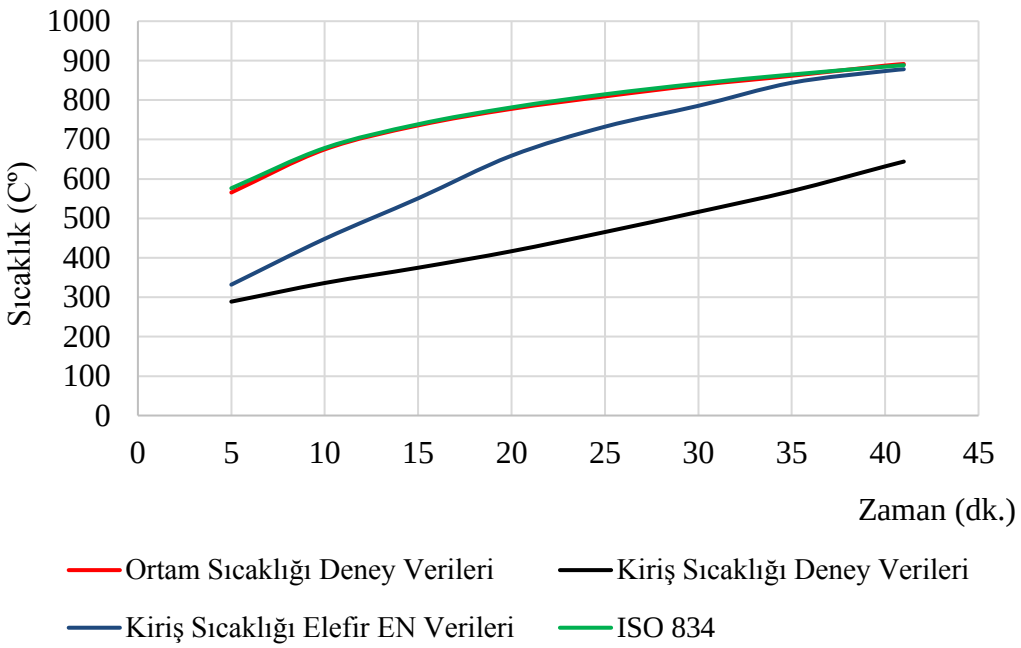
Su bazlı numune için tedarikçi firmadan elde edilen değerler yoğunluğun ρ_a=1335 kg/m^3, özgül ısısının c_a=1000 J/kgK ve ortalama nem değerinin %3 olduğu şeklindedir.

GBK-YN numunesinin Elefir- EN sayısal hesaplama ve deney verilerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 6.5 ve Şekil 6.7'de verilmektedir. Sayısal analiz ve deneyden elde edilen sıcaklık değişimleri karşılaştırıldığında aralarında % 29'luk ve ortam sıcaklıklık verileri karşılaştırıldığında % 0.58'lik bir fark elde edilmiştir. GBK-YN numunesi için de elde edilen değerlerin deneyler ile uyumlu olduğu düşünülmektedir.

Su ve solvent bazlı numunelerin sayısal analizinde Eurocode 3 (EN 1993-1-2, 2005) kullanılarak yapılan hesaplamalar deney sonuçları ile iyi bir korelasyon sağlamasına karşın, kuramsal sonuçların deney sonuçları ile daha uyumlu çıkabilmesi için Eurocode 3'ün gövdesi boşluklu kirişlerin sıcaklık dağılımına yönelik bağıntısının revize edilmesi gerekmektedir.

Çizelge 6.5: GBK-YN numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi.

Zaman	Ortam Sıcaklığı Deney Verileri (C°)	ISO 834 (Elefir-EN) (Cº)	GBK-YN Numune Sıcaklıkları Deney Verileri (Cº)	GBK-YN Numune Sıcaklıkları Elefir-EN Verileri (Cº)	Deney / Elefir-EN oranı
5	565.5	576.4	288.8	331.9	1.14
10	674.9	678.4	336.1	448.1	1.33
15	735.8	738.6	374.8	550.8	1.46
20	777.7	781.4	416.7	658.9	1.58
25	809.4	814.6	465.3	732.5	1.57
30	838.1	841.8	516.4	785.4	1.52
35	861.6	864.8	569.3	843.9	1.48
40	887.3	884.7	631.8	873.6	1.38
41 (L/20)	891.4	888.4	644	878.2	1.36



Şekil 6.7: GBK-YN numunesi için deney ve Elefir-EN'den elde edilen sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişim eğrisi.

7. SONUÇLAR

7.1 Sonuçlar

Yalıtımlı ve yalıtımsız gövdesi dolu ve dairesel boşluklu kompozit kirişlerin yangın karşısındaki davranışlarının deneysel bulgularından elde edilen başlıca sonuç ve gözlemler beş başlık altında incelenmiştir.

Gövdesi boşluklu ve dolu kiriş numunelerinin yangın performansları incelendiğinde elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Boşluklu kiriş numunelerinde göçme modları gövde burkulması ve Vierendeel göçme biçimi /mekanizması olarak belirlenmiştir. Korumasız kirişlerde (GBK-YS ve DK-R) korumalı kirişlere (GBK-YP ve GBK-YN) göre daha büyük göreli ve toplam yerdeğiştirmeler/deformasyonlar elde edildiği tespit edilmiştir. Korumasız boşluklu kirişlerde elde edilen büyük yerdeğiştirmelere bağlı olarak gövdede S şeklinde gövde burkulmaları izlenmiştir.
- DK-R numunesinde, diğer numunelerden farklı olarak, yanal burulmalı burkulma göçme modu izlenmiştir.
- Gövdesi boşluklu (GBK-YS, GBK-YP, GBK-YN) ve iki profilin kaynaklanması ile oluşturulan dolu gövdeli DK-R numunesinde deney sonrası yapılan kapsamlı incelemelerde kaynak bölgelerinde herhangi bir sorun meydana gelmediği tespit edilmiştir.
- Gövde boşluklu kirişlerde Vierendeel etkisine bağlı en belirgin çap değişiklikleri 30 mm daralma ve artış ile GBK-YS numunesinde olduğu gözlenmiştir.
- Sıcaklık verileri karşılaştırıldığında, göçme (L/20) sıcaklığına en hızlı (24.5 dk.) ulaşan numunenin gövde boşluklu ve yalıtımsız GBK-YS numunesi olduğu görülmüştür.

- Boşluklu numunelerin mesnet bölgeleri civarında göreli yerdeğiştirme oranları hesaplanmıştır. Göçme anında Vierendeel etkisi bakımından en olumsuz durumun yalıtımsız ve gövde boşluklu GBK-YS numunesinde 0.19 oranı ile olduğu görülmüştür. Bu orana ulaşmada mesnet civarındaki boşluklu gövdede bulunan dolu bölümlerin yerel olarak burkulmasının da büyük etkisi vardır.

Yalıtımlı ve yalıtımsız kiriş numunelerinin yangın performansları incelendiğinde elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde alt başlıkda mesnete yakın bölgelerde 2.5 cm'den 4 cm'e kadar düşey doğrultuda dalgalanma şeklinde deformasyonlar gözlenmiştir. Bunun nedeninin püskürtme sistemi ile uygulanan kabaran (şişen) boyanın kalınlığının bu bölgelerde yeterince homojen olamamasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.
- Yalıtımsız ve dolu gövdeli DK-R numunesinin (41 dk.) beklenildiği üzere yalıtımsız gövde boşluklu GBK-YS (24.5 dk.) numunesine göre daha uzun süreli yangın dayanımı sağlamıştır. Böylece gövde boşluklarının yangın dayanımı önemli düzeyde azalttığı anlaşılmaktadır.
- Sıcaklık ve yerdeğiştirme zaman grafikleri incelendiğinde yangın korumasız kirişlerde (GBK-YS ve DK-R), korumalı kirişlere göre kritik sıcaklık değerlerinin ve yerdeğiştirmelerin daha yüksek olduğu ve bu değerlere daha hızlı ulaşıldığı görülmektedir.
- Yangın korumalı GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde döşemede trapez sac boşlukların yalıtılmaması yalnızca üst başlıkda daha yüksek sıcaklıkların elde edilmesine neden olmuştur. Newman (1991) ve ASFP (2014)'de belirtildiği gibi 60 dk. yangın korunumlu kirişlerde trapez sac boşluklarının yalıtılmaması, kirişin moment kapasitesine etkisi düşük olduğu için, göçmeye ya da kirişte üst başlıkda herhangi bir aşırı deformasyona neden olmamıştır. Bu sonuç, bu tezin en önemli bulgularından biridir.
- Numunelerin yerdeğiştirme oranları karşılaştırıldığında, göçme anında en büyük yerdeğiştirme, yüklerin sıcaklığa bağlı olarak kirişin orta bölgesine yığılması sonucu DK-R numunesinde 291.5 mm ile gerçekleşmiştir. En

küçük yerdeğiştirme ise solvent yalıtımlı GBK-YP numunesinde 238.1 mm olarak kaydedilmiştir.

- 60 dakika yangın korumalı solvent esaslı numune GBK-YP'nin 60.2 dakika yangın dayanımı sağlayarak Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmeliğin (BYKHY, 2015) kütüphane yapıları için belirtilen yangın dayanımı süresini sağlamıştır. Bu sonuç, uygun şekilde uygulandığında bu tür bir yalıtımın etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.
- Tez kapsamında açıklanmış olan nedenlerle (çelik yüzeyle astar arasındaki aderans, uygulama hatası, kalınlık, v.b) su bazlı GBK-YN numunesinin 60 dk. yangın dayanımı koşulunu sağlayamadığı görülmüştür.
- Yangın korumalı GBK-YP ve GBK-YN numunelerinde alt, üst başlık ve gövde de sıcaklık dağılımlarında düzensizlik görülmektedir. En yüksek sıcaklıklar gövde yerine alt başlıklarda elde edilmiştir. Bu bölgelerde göçme anında GBK-YP numunesi limit sıcaklığı (620 C°) %53 ve GBK-YN numunesinin de %43 oranında aştığı tespit edilmiştir. Bu oransal farka reaktif bir kaplama olan kabaran (şişen) boyaların (intumescent coating) sıcaklık karşısında ısıl iletkenlik katsayılarının (λ) gösterdiği değişkenlik neden olmaktadır.

Yangının mekanik etkileri incelendiğinde elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Çelik kompozit kiriş numunelerinin yangın deneyi öncesi ve sonrası mekanik özellikleri incelendiğinde en fazla değişimin kopma uzamasında %65 ile yalıtımsız ve gövde boşluklu GBK-YS numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Akma ve çekme dayanımlarındaki değişim ihmal edilecek kadar azdır.
- Döşeme betonunun yangın öncesi ve sonrası basınç dayanımlarına bakıldığında en fazla düşüşün %34 ile yangın dayanımı en düşük olan GBK-YS numunesinde olduğu görülmüştür.

Betonarme döşemenin yüksek sıcaklıklar altındaki davranışlarından elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Numunelerin betonarme döşemesindeki çatlak haritaları incelendiğinde, bütün döşemelerde iki türden (boyuna ve enine) çatlak belirlenmiştir. Kiriş

eksenine dik çatlakların mesnete yakın bölgelerde kesme kuvvetinin yüksek olmasına bağlı olarak Vierendeel etkisi ile birlikte gövdede yerel burkulmaların artmasına bağlı olduğu anlaşılmaktadır.

- Çatlak boyutları incelendiğinde, kiriş eksenine dik ve paralel en büyük çatlakların sırasıyla 5 mm ve 0.7 mm ile GBK-YN numunesinde meydana geldiği görülmüştür.
- Numunelerin hiçbirinde bulon deliklerinde, bulonlarda ve üst başlık kayma bağlantı elemanlarında (studlarda) göçme gözlenmemiştir.
- Bütün numunelerde deney sonrası çelik sac ile betonarme döşeme arasında aderans kayıpları/ayrılmalar gözlenmiştir. Bunun nedeni, sacın pürüzsüz olması ve betondaki suyun sıcaklığa bağlı olarak buharlaşması sonucu iki malzemede meydana gelen ayrılmalardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bölüm 3.3 altında belirtildiği gibi deneylerde, daha yaygın kullanımı olan ve yüksek sıcaklıklarda daha olumsuz bir durumu temsil ettiği için betonarme döşemede pürüzsüz sac kullanılmıştır.

Sayısal analiz programı ile yapılan çalışma sonucunda elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır:

- Elefir-EN tahmine yönelik sayısal analiz programı ile hesaplanan sıcaklık değişim sonuçları deney sonuçları ile daha önceki çalışmalarda da bulunanlarla uyumludur.
- Eurocode tarafından reaktif malzemelerin ısıl iletkenliğini hesaplamaya yönelik olarak geliştirilen Dai ve diğ. (2010) çalışmasında kullandığı bağıntı sonucu elde edilmiş ısıl iletkenlik katsayıları ile yapılan hesaplamalar deney sonuçları ile uyumlu çıkmıştır.

Türkiye'de de kullanımı giderek artan ince film kabaran (şişen) (intumescent) boyalar yalıtım malzemelerinin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarının, gövdesi boşluklu kompozit kirişlerin yangın performansı üzerindeki etkileri ve kullanılan malzemenin performans sonuçları, üretim yapan Türk firmalara gelecek için yol gösterecektir.

Türkiye'de ilk kez dairesel gövdesi boşluklu kirişlerin yangın performanslarının tahminine yönelik olarak geliştirilen bu deney modeli ve tam ölçeğe yakın deneyler ve sonuçları yangın sektöründe, eksiklik ve gereksinimlerden biri olan yapısal yangın

deneylerinin yapılmasına ve deney düzeneklerinin oluşturulmasına katkı sağlayacaktır.

7.2 İleride Yapılacak Çalışmalar İçin Öneriler

Yalıtımlı ve yalıtımsız gövdesi dolu ve dairesel gövde boşluklu kompozit kirişlerin yangın karşısındaki davranışları üzerine yapılan deneysel çalışmadan elde edilen verilere bağlı olarak öneriler şu şekilde sıralanabilir:

- Deney kapsamında, bütçe kısıtlamaları nedeniyle gerçekleştirilemesede, çelik kirişler üzerine yüksek sıcaklıklara dayanıklı seramik korumalı şekildeğiştirme ölçerler (strain gauges) yerleştirilerek birim uzama ve kısalmaların zamana bağlı ölçülmesi sağlanabilir.
- Farklı yalıtım kalınlıkları, türleri ve kiriş geometrisi için yangın deneylerinin tekrarlanması, ileride yapılabilecek çalışmalar arasında yer alabilir.
- Gövdesi boşluklu kirişlerde yangın davranışının üç boyutlu (3D) olarak modellenmesi ve bu deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılması yapılabilir. Bu amaçla SAFIR, ABAQUS v.b programlar kullanılabilir.
- Kabaran (şişen) boyaların ısıl iletkenlik katsayılarının sıcaklığa bağlı değişimi için Eurocode tarafından geliştirilen bağıntının sadeleştirilmesi ve daha kullanılabilir olmasına yönelik sayısal çalışmaların geliştirilmesine gereksinim vardır.

KAYNAKLAR

Annerel E. & Taerwe L., (2012). Residual and post-cooling stress-strain curves for traditional and selfcompacting concrete, In M. Fontana, A. Frangi and M. Knobloch (Ed.), *Structures in Fire- Proceedings of the Seventh International Conference*, (pp. 561- 569). Switzerland: ETH Zurich, June 6-8.

ArcelorMittal. (t.y). Erişim: 05 Haziran 2016 Long Carbon Europe Sections and Merchant Bars, http://sections.arcelormittal.com.

ASFP. (2014). Fire Protection for Structural Steel in Buildings. 5th Edition *Association for Specialist Fire Protection Yellow Book*, Fire Test Study Group (FTSG). Ltd. U.K.

Bailey, C.G., (2004). Indicative Fire Tests to Investigate the Behaviour of Cellular Beams Protected with Intumescent Coatings, *Fire Safety Journal, 39*, 689-709.

Bihina G., Zhao, B. & Bouchair, A. (2013). Behaviour Of Composite Steel–Concrete Cellular Beams in Fire, *Journal of Engineering Structures*, *56*, 2217–2228.

Bihina, G., Zhao, B. & Bouchair, A., (2012). Experimental and Numerical Investigation on the Behaviour of a Composite Floor Made of Cellular Beams in a Fire Situation, *7th International Conference on Structures in Fire*, (pp. 295-304). Zurich Switzerland: ETH Zurich, June 6-8.

Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik (2015). T.*C Resmi Gazete, 26735*, Ankara19 Aralık 2007.

Bisby, L., Gales, J. & Maluk, C. (2013). A Contemporary Review of Large-Scale Non-Standard Structural Fire Testing, *Fire Science Reviews*, 2:1, 2-27.

BS 476-20. (1987). Fire tests on building materials and structures. Method for determination of the fire resistance of elements of construction (general principles). *Britisih Standards*. Retrieved from https://infostore.saiglobal.com/en-gb/standards/bs-476-20-1987-479720/

BS 5950-1. (2000). Structural Use of Steelwork in Building. Code of Practice for Design. Rolled and Welded Sections. *British Standards*. Retrieved from https://www.tatasteelbluebook.com/media/1518/p202explanatorynotes.pdf

BS EN 13881-8. (2013). Test Methods for Determining the Contribution to the Fire Resistance of Structural Members, Part 8: Applied Reactive Protection to Steel Members, *Britisih Standards*. Retrieved from https://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=000000000030256862

Celik, O. C. (1996). *Gövdesi Boşluklu Çelik I-Kirişlerinin İncelenmesi*. (Doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Cirpici, K. B., Wang, C.Y. & Rogers, B. (2016). Assessment of the Thermal Conductivity of Intumescent Coatings in Fire. *Fire Safety Journal*, *81*, 74-84.

Dai, X., Wang, Y. & Bailey, C. (2010). A Simple Method to Predict Temperatures in Steel Joints with Partial Intumescent Coating Fire Protection. *Journal of Fire Technology*, *46*, 19-35.

DD EN 13881-4. (2002). Test Methods for Determining the Contribution to the Fire Resistance of Structural Members, Part 4: Applied Protection to Steel Members, *The European Union Per Regulation*, Retrieved from https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Series?UPI=DD%20ENV%2013381.

Demirel, F. ve Özkan, E. (2003). Çelik Yapı Bileşenleri ve Yangın Güvenlik Önlemleri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, *18*, 89-107.

Dong, Y. & Prasad, K. (2009). Experimental Study on the Behavior of Full-Scale Composite Steel Frames under Furnace Loading, *Journal of Structural Engineering*, *135*, 1278-1289.

EN 1993-1-2. (2005). Eurocode 3- Design of Steel Structures, Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design, *The European Union Per Regulation*, Retrieved from http://www.gaprojekt.com/sites/default/files/legislation/Eurocode%203%20-Design%20of%20steel%20structures%20-%20Part%201-2%20-%20en.1993.1.2.2005.pdf

EN 1994-1-1. (2005). Eurocode 4- Design of Composite Steel and Concrete Structures– Part 1-2: General rules - Structural Fire Design, *The European Union Per Regulation*, Retrieved from http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1994.1.1.2004.pdf

Erdal, F. (2011). *Ultimate Load Capacity of Optimally Designed Cellular Beams*. (Doktora tezi). Middle East Technical University, Natural and Applied Sciences, Ankara.

Felicetti R. & Gambarova P. G., (1998). Effects of High Temperature on the Residual Compressive Strength of High-Strength Siliceous Concretes, *ACI-Materials Journal*, 95(4), 395-406.

Felicetti R. & Gambarova P. G., (2008). Fire Design of Concrete Structures-Structural Behaviour and Assessment, In L. Taerwe, N.P. Høj (Eds.), *Expertise and Assessment of Materials and Structures After Fire* (FIB Bulletin 46, pp.63–114). Retrieved from https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/fire-design-of-concrete-structures-structural-behaviour-and-110-detail.html.

Franssen, M. J. & Real, V. P. (2015). Fire Design of Steel Structures. Wiley-VCH 2015-11-04, Weinheim.

Goode, M. (2009). *Fire Protection of Structural Steel in High-Rise Buildings*, GCR 04-872 Technical Report, Building and Fire Research Laboratory, 2004, NIST, Gaithersburg, MDISO 834-1, 2009. "Fire-resistance Tests-Elements of Building Construction Part 1: General Requirements", International Organization for Standardization.

Huo, B.Y &D'Mello, C.A, (2017). Shear Transferring Mechanisms in a Composite Shallow Cellular Floor Beam with Web Openings, *Journal of Structures*, 9, 134-146.

ISO 834-1 (2009). Fire-resistance Tests- Elements of Building Construction Part 1: General Requirements, *International Organization for Standardization*. Retrieved from https://www.sis.se/api/document/preview/615580/

Kallerova, P. & Wald, F. (2009). *Fire Test on Experimental Building in Mokrsko*, CTU in Prague.

Kankanamge, D.N. (2010). *Structural Behaviour and Design of Cold-formed Steel Beams at Elevated Temperatures* (Doctora dissertation). Retrieved from https://eprints.qut.edu.au/33221/

Krishnamoorthy, R., R. & Bailey, C.G. (2009). Temperature distribution of intumescent coated steel framed connection at elevated temperature. *Nordic Steel Construction Conference '09*, Malmo, Sweden: September 2-4.

Lawson, R.M. & Hicks, S.J. (2011). *Design of Composite Beams with Large Web Openings: In Accordance with Eurocodes and the U.K. National Annexes Technical Report* (SCI P3559), Steel Construction Institute.

Li, Q.G. & Guo, S.X. (2008). Experiment on Restrained Steel Beams Subjected to Heating and Cooling, *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 268-274.

Li, Q.G., Lou, G.B., Zhang, C. &Wang, C.Y. (2012). Assess the Fire Resistance of Intumescent Coatings by Equivalent Constant Thermal Resistance, *Journal of Fire Technology*, 48, 529-546.

Liu, T.C.H, Fahad, M.K. & Davies, J.M. (2002). Experimental Investigation of Behaviour of Axially Restrained Steel Beams in Fire, *Journal of Constructional Steel Research*, 58, 1211-1230.

Naili E., Nadjai A. &Ali F. (2011). Experimental and numerical modelling of cellular beams with circular and elongated web openings at elevated temperatures, *Journal of Structural Fire Engineering*, 2 (4) 288–300.

Najdai, A., Bailey, C.G., Vassart, O., Han, S., Zhao, J.C., Hawes, M., Franssen, J.M. & Simms, I. (2011). Full Scale Fire Test on a Composite Floor Slab Incorporating Long Span Cellular Steel Beams, *Journal of Structural Engineering*, 89, 18- 25.

Najdai, A., Petrou, K., Han, S. & Ali, F. (2016). Performance of Unprotected and Protected Cellular Beams in Fire, *Journal of Construction and Building Materials*, 105, 579-588.

Najdai, A., Vassart, O., Ali, F., Talamona, D., Allam, A. & Hames, M. (2007). Performance of Cellular Composite Floor Beams at Elevated Temperatures, *Fire Safety Journal*, 42, 489- 497.

Newman, G., M. (1991). The Fire Resistance of Composite Floors with Steel Decking, SCI Publication 056, *The Steel Construction Institute*. Berkshire. U.K.

Nyugen, T.T & Tan, K.H. (2012). Testing of Composite Slab-Beam Systems at Elevated Temperatures, *Proceedings on the 7th International Conference on Structures in Fire*, Zurich, Switzerland, 6-8 June, 247-256.

OASYS (2012). Version 8.3, OASYS LTD, London. http://www.oasys-software.com/

Sanghoon, H., Petrou, K., Naili, E.L, Nadjai, A. & Ali, F. (2012). Behaviour of Protected Cellular Beams Having Different Opening Shapes in Fire Conditions, In M. Fontana, A. Frangi and M. Knobloch (Ed.), *7th International Conference on Structures in Fire*, (pp. 75-83) Switzerland: ETH Zurich, June 6-8.

Simms, W.I. (2007). *Guidance on the Use of Intumescent Coatings for the Fire Protection of Beams with Web Openings Technical Report* (RT 1085), Ascot, Steel Construction Institute.

Singer L. (2005). Steel Update Economical Design, Modern Steel Construction, USA.

Sunar Bükülmez, P. & Celik, O.C. (2017). Structural Fire Behaviour And Testing of Protected and Unprotected Steel-Concrete Composite Cellular Beams, Conference Proceedings of Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2017), (pp.295-305). Manchester, U.K, University of Manchester, September 7-8.

Sunar Bükülmez, P. & Celik, O.C. (2017). Yangın Korumalı ve Korumasız Gövdesi Boşluklu Kompozit I-Kirişlerin Yangın Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 26-27 Ekim, Gaziantep, Türkiye.s.115-124

Sunar Bükülmez, P. & Celik, O.C. (2015). Gövdesi Boşluklu Kompozit I-Kirişlerin Yangın Karşısındaki Davranışları Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar, *6. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 9-11 Aralık, Eskişehir, s.27-30.

Tama Y.S (2012). Çelik Yapıların Yangına Karşı Korunması. *Çelik Yapılar Dergisi*, *32*, 30-34.

Toric, N. Boko, I. Juradin, S. & Baloevic, G., (2014). Post-Fire Reduction of Concrete's Mechanical Properties and Its Impact on Residual Load Capacity, In L., Guo-Qiang, Kodur V., J. Shou-Chao, Jiang J., C. Su-We, L. Guo-Biao (Ed.), *8th International Conference on Structures in Fire*, (pp. 1171-1178). China: Tongji University, June 11-13.

TS 498. (1997). Yapı elemanlarının boyutlandırılmasında alınacak yüklerin hesap değerleri, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

TS 500. (2013). Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

TS EN 10025-1. (2006). Sıcak haddelenmiş yapı çelikleri - Bölüm 1: Genel Teknik Teslim Şartları, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 12350-1. (2010). Beton - Taze beton deneyleri - Bölüm 1: Numune alma, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 12390-3. (2013). Beton - Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara**.**

TS EN 12504-1. (2010). Beton- Yapıda Beton Deneyleri- Bölüm 1: Karot numuneler-Karot Alma, Muayene ve Basınç Dayanımının Tayini, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN 1363-1. (2013). Yangına dayanıklılık deneyleri- Bölüm 1 - Genel kurallar, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

TS EN 1365-3. (2003). Yangına dayanıklılık deneyleri-Yük taşıyıcı elemanlar-Bölüm 3: Kirişler, *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara.

TS EN ISO 6892-1. (2011). Metalik malzemeler- Çekme deneyi- Bölüm 1: Oda Sıcaklığında Deney Metodu, *Türk Standardları Enstitüsü,* Ankara.

Vassart, O., Bailey, C.G, Bihina, G., Hawes, M., Nadjai, A., Peigneux, C., Simms, W.I & Franssen J.M. (2010). Parametrical Study on The Behaviour Of Steel and Composite Cellular Beams Under Fire Conditions. V. Kodur, J.M. Franssen (Ed.), *Proceedings of the 6th International Conference on Structures in Fire (SIF'10)*, (pp. 349–357). USA: Michigan State University, June 2–4.

Vila Real, P.M.M. & Franssen, J.M. (2015). ELEFIR-EN: Software for Fire Design of Steel Structural Members. Version 1.5.8. http:// elefiren.web.ua.pt.

Virdi, K. S., & Wickström, U. (2013). Influence of Shadow Effect on The Strength of Steel Beams Exposed to Fire, *20th International Conference on Computer Methods in Mechanics,* Poznan, Poland: August 27-31.

Ward, J. K. (1990). *Design of Composite and Non-Composite Cellular Beams*. SCI Publication 100, Steel Construction Institue.

Wong, V.Y.B, Burgess, I.W. & Plank, R.J. (2009). Behaviour of composite cellular steel - concrete beams at elevated temperatures, *International Journal of Steel Structures*, 9 (1), 29-37.

Wong, V.Y.B, Burgess, I.W. & Plank, R.J. (2010). Experimental and Analytical Investigations of the Behaviour of Protected Composite Floor Beams with Web Openings in Fire, Proceedings of the 6th International Conference on Structures in Fire (SIF'10), (pp. 366–373). USA: Michigan State University, June 2-4.

Url-1 <*http://www.corusgroup.com*>, erişim tarihi 02.05.2015.

Url-2 <*http://www.newsteelconstruction.com*>, erişim tarihi 21.01.2016.

Url-3 <*http://www.steelconstruction.com*>, erişim tarihi 15.06.2014.

EKLER

Ana metin içinde atıf yapılan ekler bölümler halinde düzenlenerek ve kendi içlerinde alt bölümlere ayrılarak aşağıda verilmiştir:

EK A: Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti

EK B: Kupon numunelerin çekme deneyi sonuçları

EK C: Kirişlerin tasarımında kullanılan hesap programı OASYS 8.3 (2012) girdi ve çıktıları

EK C1: Gövdesi boşluklu kiriş tasarımı

EK C2: Gövdesi dolu kiriş tasarımı

EK D: Fırın içerisindeki basıncın zamana bağlı değişimi grafikleri

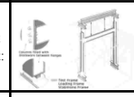
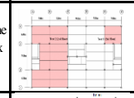
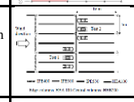
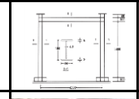
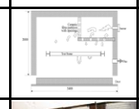
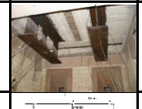
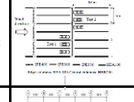
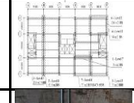
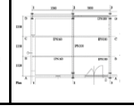
EK E: Betonarme döşemenin yangın sonrası yerdeğiştirme durumunun 3 boyutlu modellemesi

EK F: Termal kamera görüntüleri (Kritik zamanlarda)

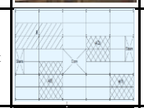
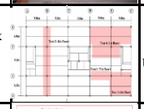
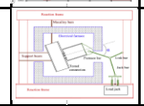
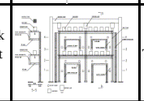
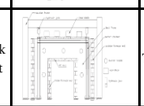
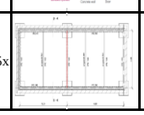
EK G: Kamera görüntüleri (Kritik zamanlarda)

EK A: Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti

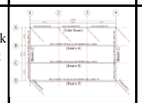
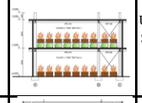
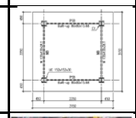
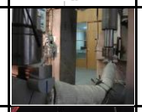
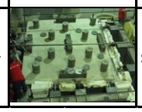
Çizelge A.1: Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti.

			Ölçümler		Eleman		Eleman		Eleman		Eleman		Ölçek	Standardizasyon	Kompartman Boyutları	Deney alanı teknik çizim veya Resim	Araştırma Programı/ Yazarlar	Yangın Yükü	Kullanılan Araçlar	Yükleme	Sayısal Analiz Programları	Kolon-Kiriş Boyutları
			Parametreler		Kolonlar		Gövdesi Dolu Kirişler		Gövdesi BoşlukluKirişler		Bağlantılar											
	Tarih	Çalışmanın Adı	Sıcaklık	Yerdeğiştirme	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız										
1	1982	Predicting Fire Endurance of Steel Structures	+	+	?		?			?	?		Tam ölçekli	Hem ASTM E119 standart testleri hem de standart olmayan testler	2 katlı (9.8m x 12.2 m) çelik betonarme kompozit yapı	-	AISI, NBS; USA; JeanesAmerican Iron and Steel Institue and National Building Standart tests	?	Termokupl ve LVDT sayısı bilinmiyor.	Su tankları	FASBUS II	?
2	1987	The Inherent Fire Resistance of a Loaded Steelframework	+	+		+	+	+			+		Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	Tek katlı çelik betonarme kompozit yapı 50 m², yükseklik: 3.9 m		BRE;Cooke ve Laatham	Yumuşak ağaçtan elde edilen 50x 50 mmx 1 m uzunluğunda	Termokupl sayısı bilinmiyor, 5 LVDT	Hidrolik krikolar	-	Kirişler:UB 406X 178 mmX 54 kg/m Kolonlar:UC 203X203 mmX52 kg/m
3	1992	Fire Tests of the 140 William Street Office Building	+	+	+		+	+			+		Tam ölçekli	Standart değil	12mx 12 m kompozit çelik yapı içerisinde 4mx 4m ofis alanı oluşturulmuştur.	-	William Street Tests,Australia, British Steel; Thomas ve diğ.	Ofis ekipmanları	Termokupl ve LVDT sayısı bilinmiyor.	Su tankları	-	?
4	1994	Real Fire Test in 380 Collins Street Office Enclosure	+					+			+		Tam ölçekli	Standart değil	8.4mx 3.6 m ofis çelik betonarme kompozit yapı	-	BHP Collins Street Test, Australia, British Steel; Proe ve diğ.	Ofis ekipmanları	Termokupl ve LVDT sayısı bilinmiyor.	Yükleme yapılmamıştır	?	?
5	1996	BRE Cardington Steel Building Tests	+	+	+	+		+			+		Tam ölçekli (7 test)	Standart değil	8 katlı çelik betonarme kompozit yapı, 21 mx 45 m		BRE Cardington Steel Building Tests, UK	Ahşap sandık, Ofis ekipmanları	Termokupl, LVDT ve şekildeğiştirme ölçer sayısı her deney için farklılık göstermektedir.	Kum torbaları	-	?
6	1998-2001	Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings	+	+		+		+				+	Tam ölçekli	Standart değil	Tek katlı,16x 32x 3m çelik betonarme kompozit yapı		Car park Fire Tests,Fransa, Hollanda;Joyeux , Kruppa, Cajot	İçi yakıt dolu arabalar	Termokupl ve LVDT sayısı bilinmiyor.	İçi yakıt dolu arabalar	SISMEF ANSYS	Kirişler: IPE 400,550 Kolonlar: HEA 180,200
7	1999	Experimental Studies of the Behaviour of Unprotected Steel Frames in Fire	+	+		+		+				+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	Tek katlı çelik yapı yükseklik: 1.4 m		Tongji University Fire Laboratory, China; Zhao ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	12 Termokupl, LVDT sayısı bilinmiyor	Hidrolik krikolar	NASFAF	?
8	1999	The Response of Industrial Portal Frames to Fires	+	+		+		+				+	1/5 Ölçekli, Portatif test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	Tek katlı çelik yapı gerçek boyutlar: h =12 m , 30m açıklık		University of Sheffield;Wang	Sıvı Heptan	16 adet Termokupl 3 adet LVDT kullanılmıştır.	Su tankları	VULCAN	Kolonlar: UB 127X76X13
9	2002	Experimental Investigation of Behaviour of Axially Restrained Steel Beams in Fire	+	+	+		+				+		Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	3.4 mx 2 mx 3m		University of Manchester; Liu ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	6 adet K tipi termokupl ortam sıcaklığını için; 40 tane K tipi termokupl	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: 178X102X19 UB Kolonlar: 152X152X30 UC
10	2004	Indicative Fire Tests to Investigate the Behaviour of Cellular Beams Protected with Intumescent Coatings	+				+	+	+	+			Tekil Eleman	BS 476 Yangın Eğrisi	Fırın: 1.5 m³		Manchester University, Bailey	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	Termokupl sayı belirtilmemiştir. Yerdeğiştirmeler,gerilmeler ölçülmemiştir.	Yükleme yapılmamıştır	-	Kirişler: 406x178x 60 mm UB
11	2006	Temperature of Connections During Fire an Steel Framed Building	+	+	+							+	Tam ölçekli	Standart değil	Tek katlı , çelik betonarme kompozit 3.8x 5.9 x 2.7 m		Ostrava Fire Tests, Czech; Chlouba	Yumuşak ağaçtan elde edilen 50x 50 mmx 1 m uzunluğunda	Termokupl ve LVDT kullanılmıştır.	Su dolu kaplar	?	Kirişler: IPN 160,IPN180,IPN300
12	2006	Experimental Behavior of a Steel Structure under Natural Fire	+	+	+			+			+		Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	Tek katlı, 11mx 7m		Cardington Laboratory of the Building Research Establishment,UK; Wald ve diğ.	Ahşap sandık	147 termokup, 27 LVDT, 47 Strain gauge, 10 video kamera, 2 termal kamera	Kum torbaları	-	Kirişler: 305X165X40 UB,356X171X51 UB Kolonlar:305X305X198 UC, 305X305X137 UC
13	2006	On Bolted Connection with Intumescent Coatings	+								+	+	Tekil Eleman	Cardington 7. Test yangın eğrisi ve ISO 834; Strüktür Tasarımı: EN 1993-1-2	-		Czech Technical University, PAVUS laboratory, Prag	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	16 adet Termokupl kullanılmıştır	Yükleme yapılmamıştır	-	Kolonlar: HEB 200
14	2007	Experimental Study of Structural Fire Behaviour of Steel Beam to Concrete Filled Tubular Column Assemblies with Different Types of Joints	+	+		+	+	+				+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	Fırın boyutları: 3000x1600x90 mm		University of Manchester; Ding, Wang	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	Termokupl ve LVDT kullanılmış fakat sayı belirtilmemiştir	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: UB 178X102X19 Kolonlar: UC 305X305X97

Çizelge A.1 (devam): Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti.

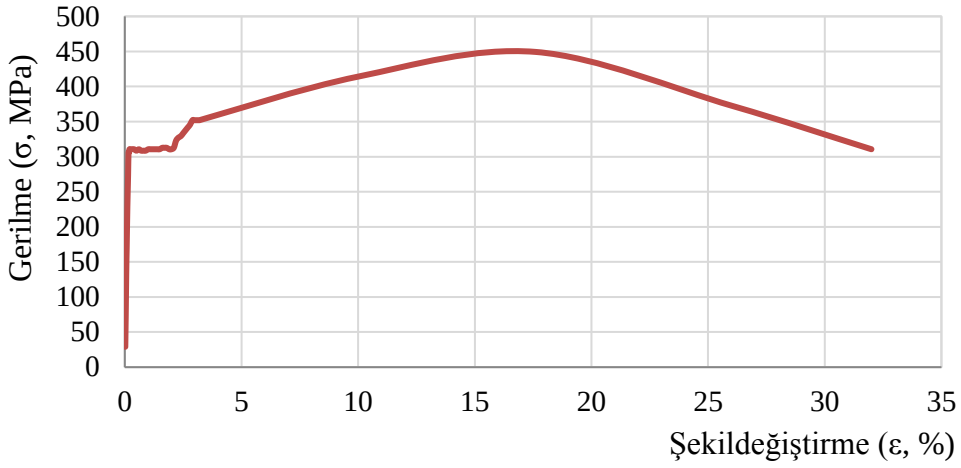
			Ölçümler		Eleman		Eleman		Eleman		Eleman		Ölçek	Standardizasyon	Kompartman Boyutları	Deney alanı teknik çizim veya Resim	Araştırma Programı/ Yazarlar	Yangın Yükü	Kullanılan Araçlar	Yükleme	Sayısal Analiz Programları	Kolon-Kiriş Boyutları
			Parametreler		Kolonlar		Gövdesi Dolu K. Kirişler		Gövdesi Boşluklu K. Kirişler		Bağlantılar											
	Tarih	Çalışmanın Adı	Sıcaklık	Yerdeğiştirmeler	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız										
15	2007	Performance of Cellular Composite Floor Beams at Elevated Temperatures	+	+						+			Tam ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	-		University of Ulster ve Arcelor Profil; Nadjai ve diğ.		Termokupl ve LVDT kullanılmış sayı belirtilmemiştir.	Hidrolik krikolar	SAFIR	Kirişler: UB 406X140X39 UB 457X152X52 Döşeme kalınlığı (t): 15 cm
16	2008	Fire Resistance Assessment of Partially Protected Composite Floors	+	+	+		+	+			+		Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	Tek katlı , çelik betonarme kompozit 8.7x 6.6 m		Fracof, Fransa ve University Ulster; Vassart ve diğ.	Ahşap sandık	?	Kum torbaları	FRACOF	Kirişler: IPE 500, IPE 550, IPE 600 Kolonlar: HD 320x158 Döşeme kalınlığı (t): 13 cm
17	2008	Cossfire	+	+	+		+	+			+			ISO 834 Yangın eğrisi	Tek katlı , çelik betonarme kompozit 20x 6.6x 3m		Cossfire, Fransa ve University Ulster; Vassart ve diğ.	Ahşap sandık	203 Termokupl, 36 LVDT, 1 kamera	Kum torbaları	ANSYS	Kirişler: IPE270 Kolonlar: HEB 200
18	2008	Experimental Investigation of Behaviour of a Steel Sub-frame Under a Natural Fire	+	+	+			+				+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	?		University of Coimbraand Aveiro; Santiago ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	Termokupl, LVDT ve Strain gauge kullanılmıştır.	Beton bloklar	-	Kirişler: IPE 300 Kolonlar: HE 300
19	2008	Experiment on Restrained Steel Beams Subjected to Heating and Cooling	+	+		+		+				+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	-		Tongji University Fire Laboratory, China; Li ve diğ.	?	Termokupl ve LVDT ve strain gauge kullanılmıştır.	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: H300, H 250 Kolonlar:H300
20	2009	Fire Behaviour of Steel and Composite Construction	+	+	+			+				+	Tam ölçekli	Standart değil	4 katlı kompozit çelik yapı (21mx 45 m), betonarme döşeme		Stuttgart-Vaihingen University, Almanya; Anon	Ahşap sandık	?	Su tankları	-	?
21	2009	Experimental Investigation of the Behaviour of Fin Plate Connections in Fire	+	+		+		+				+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	Elektrikli Fırın: 1 m³		University of Sheffield, Manchester; Yu ve diğ.	Elektrikli Fırın	Termokupl, LVDT ve kamera kullanılmıştır.	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: UB 305x165x40 Kolonlar:UC 203x86
22	2009	Thermal and Structural Response of a two-story,two bay Composite Steel Frame under Fire Loading	+	+	+			+			+		Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	7.2 x 6 m 2 katlı Çelik betonarme kompozit yapı		Harbin Institue of Technology Tests Dong Y, Prasad K.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	12 adet N tipi,15 adet ktipi termokupl,9 LVDT	Hidrolik krikolarve Beton Bloklar	-	Kiriş: H250x 125x 6x 9 Döşeme kalınlığı (t): 15 cm
23	2009	Experimental Study on the Behavior of Full Scale Composite Steel Frames under Furnace Loading	+	+	+	+		+			+		Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	2 katlı, 3.6 m. Yükseklik 2.8 m Çelik betonarme kompozit yapı		Harbin Institue of Technology Tests Dong Y, Prasad K.	50x 50 mm x 1 m uzunluğunda sandıklar	11 K (Kompozit kirişler) termokupl, 7 LVDT	Hidrolik krikolar	SAFIR	Kiriş: H250x 125x 6x 9 Kolon: H200x 200x 8x12 Döşeme kalınlığı (t): 10 cm
24	2009	Effects of Partial Fire Protection on Temperature Developments in Steel Joints Protected by Intumescent Coatings	+	+	+		+	+			+	+	Tam Ölçekli, Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	Fırın boyutları: 3.5x 3x 2 m		Manchester University; Dai ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	Termokupl sayı belirtilmiyor. Yerdeğiştirmeler,gerilmeler ölçülmemiştir.	Yükleme yapılmamıştır.	-	Kirişler: UB 305X165X40
25	2010	Fire Test on an Administrative Building in Mokrsko	+	+	+				+	+	+	+	Tam ölçekli	Standart değil	Tek katlı , çelik betonarme kompozit 12x18 x 4 m		Czech University,Prague; Wald ve diğ.	50x 50 mmx 1 m uzunluğunda sandıklar	128 termpokupl ve LVDT	Kırma taş dolu torbalar	-	Kirişler: IPE 400, IPE 270 Kolonlar: HEB 180 Döşeme kalınlığı (t): 12 cm
26	2010	Membrane Action of Composite Slabs in Fire	+	+			+	+				+	Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	Tek katlı , çelik betonarme kompozit 5x 12.5 m		TU Münich Fire Tests; Stadler,Mensinger	Ahşap sandık	?	?	?	Kirişler: IPE 160, IPE 240

Çizelge A.1 (devam): Yapısal yangın deneylerinin literatür özeti.

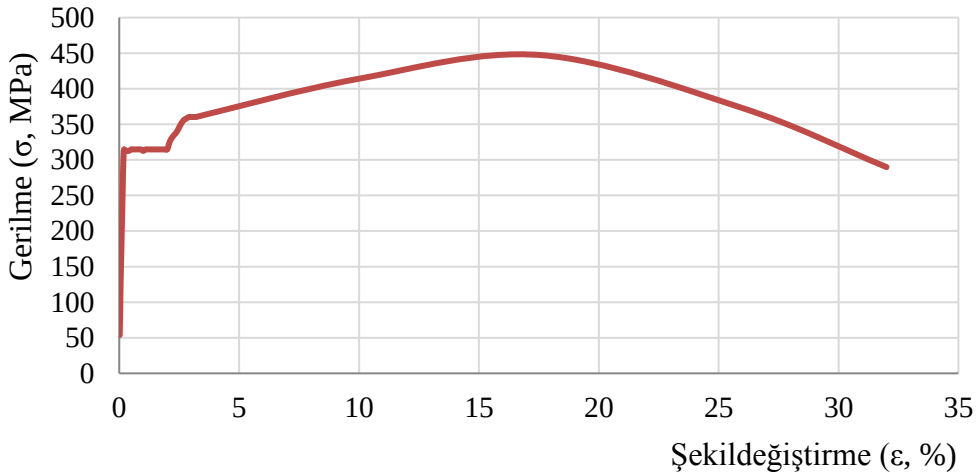
			Ölçümler		Eleman		Eleman		Eleman		Eleman		Ölçek	Standardizasyon	Kompartman Boyutları	Deney alanı teknik çizim veya Resim	Araştırma Programı/ Yazarlar	Yangın Yükü	Kullanılan Araçlar	Yükleme	Sayısal Analiz Programları	Kolon-Kiriş Boyutları
			Parametreler		Kolonlar		Gövdesi Dolu Kirişler		Gövdesi Boşluklu Kirişler		Bağlantılar											
	Tarih	Çalışmanın Adı	Sıcaklık	Yerdeğiştirme	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız	Korumalı	Korumasız										
27	2011	Full- Scale Fire Test on a Composite Floor Slab Incorporating Long Span Cellular Steel Beams	+	+					+	+			Tam ölçekli	Yangın Eğrisi: BS EN 1991-1-2 Strüktür Tasarımı: BS EN 5950_1_3	9mx 15mx 2.88 m çelik betonarme kompozit yapı		University of Ulster Fire Test	1x1x0.5 m ahşap sandıklar	350 adet termokupl, 17 LVDT	Kum torbaları	OZONE	Kiriş: 583x178 @ 6500 ACB 400; 600x210 CB 400@600 Döşeme kalınlığı (t): 12 cm
28	2011	A Structural Fire Engineering Prediction for The Veseli Fire Tests, 2011	+	+	+		+	+				+	Tam ölçekli	ISO 834 Yangın eğrisi	10.4x 13.4x 9 m iki katlı çelik kompozit yapı		University of Sheffield, The Structural Fire Engineering Research Group, COMPFire	50x 50 x1000 mm ahşap sandıklar	Termokupl ve LVDT kullanılmış fakat sayı belirtilmemiştir	Beton dolu torbalar	VULCAN	Kirişler: IPE 240,270,330,220 Döşeme kalınlığı (t): 12 cm
29	2012	Testing of Composite Slab-Beam Systems at Elevated Temperatures	+	+	+		+	+			+		1/4 ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	Elektrikli Fırın: 3x3x0.75 m		Nanyang Technological ,Singapur; Nguyen,Tan	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	31 K tipi olmak üzere toplam 35 termokupl, 16 LVDT kullanılmıştır.	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: UB 130x130x28.1, UB80x80x15.6 Döşeme kalınlığı (t): 5.5 cm
30	2012	Behaviour of Protected Cellular Beams Having Different Openings Shapes in Fire Conditions	+	+					+	+			Tam Ölçekli, Tekil eleman Portatif test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	?		University of Ulster; Sanghoon ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	43 adet Termokupl, 5 LVDT kullanılmıştır.	Hidrolik krikolar	DIANA, SCI Software	Kirişler: UB 610x305x179, 356x171x57, 457x191x74 Döşeme kalınlığı (t): 15 cm
31	2012	Experimental and Numerical Investigation on the Behaviour of a Composite Floor made of Cellular Beams in a Fire Situation	+	+	+				+	+	+		Tam ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	Tek katlı,15x 9x 3m çelik betonarme kompozit yapı		University of Clermont, CTICM, France; Bihina ve diğ.	45 adet Ahşap sandık	Termokupl ve LVDT kullanılmış fakat sayı belirtilmemiştir.	Kum torbaları	ANSYS	Kirişler: UB 305x165x40 Döşeme kalınlığı (t): 12 cm
32	2012	High Temperature Tests on Partially Encased Beams	+	+			+	+					Tam ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	Standart değil	2.5 ve 4 m açıklıklı kirişler		University of Salamanca,Spain Polytechnic Institue of Braganca	Elektro-seramik ısıtıcı	5 adet Strain gauge, termokupl sayısı belirtilmemiştir	Hidrolik krikolar	-	Kirişler: IPE 100 S275 Döşeme: C20
33	2016	Performance of Unprotected and Protected Cellular Beams in Fire	+	+					+	+			Tam ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	4.5 m açıklıklı kirişler		University of Ulster; Nadjai ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	66 adet termokupl, LVDT sayısı belirtilmemiştir.	Hidrolik krikolar	DIANA	Kirişler: UB 356x151x57 UB 356X605X179
34	2016	Web-Post Buckling of Fully and Partially Protected Cellular Steel Beams at Elevated Temperatures in a Fire	+	+					+	+			Tekil Eleman deneydüzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	1.9 m açıklıklı kirişler		Shandong University; Wang ve diğ.	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	Termokupl sayısı belirtilmemiştir.	Yükleme yapılmamıştır.	ABAQUS	Kirişler: UB 457x152x52
35	2016	Çelik-Beton Kompozit Kat Döşemesi Yangın Dayanım Deneyi	+	+				+				+	Tam ölçekli,Portatif çerçeve test düzeneği	ISO 834 Yangın eğrisi	4.3 m açıklıklı kirişler		Boğaziçi Üniversitesi, Serdar Selamet ve Taygun Fırat Yolaçan	Portatif gaz kaynaklı tutuşturucu	24 adet termokupl, LVDT sayısı belirtilmemiştir.	Metal diskler ile yayılı yükleme	-	Kirişler: HEA 400

EK B: Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

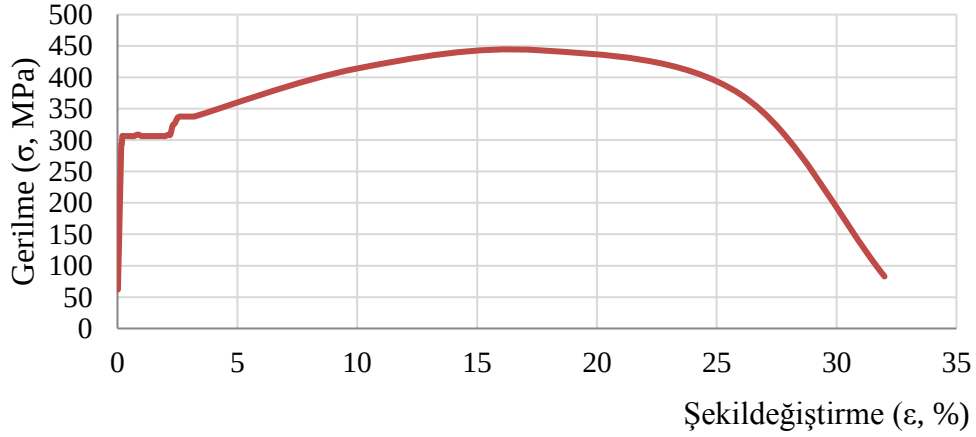
B-1 Numunesi

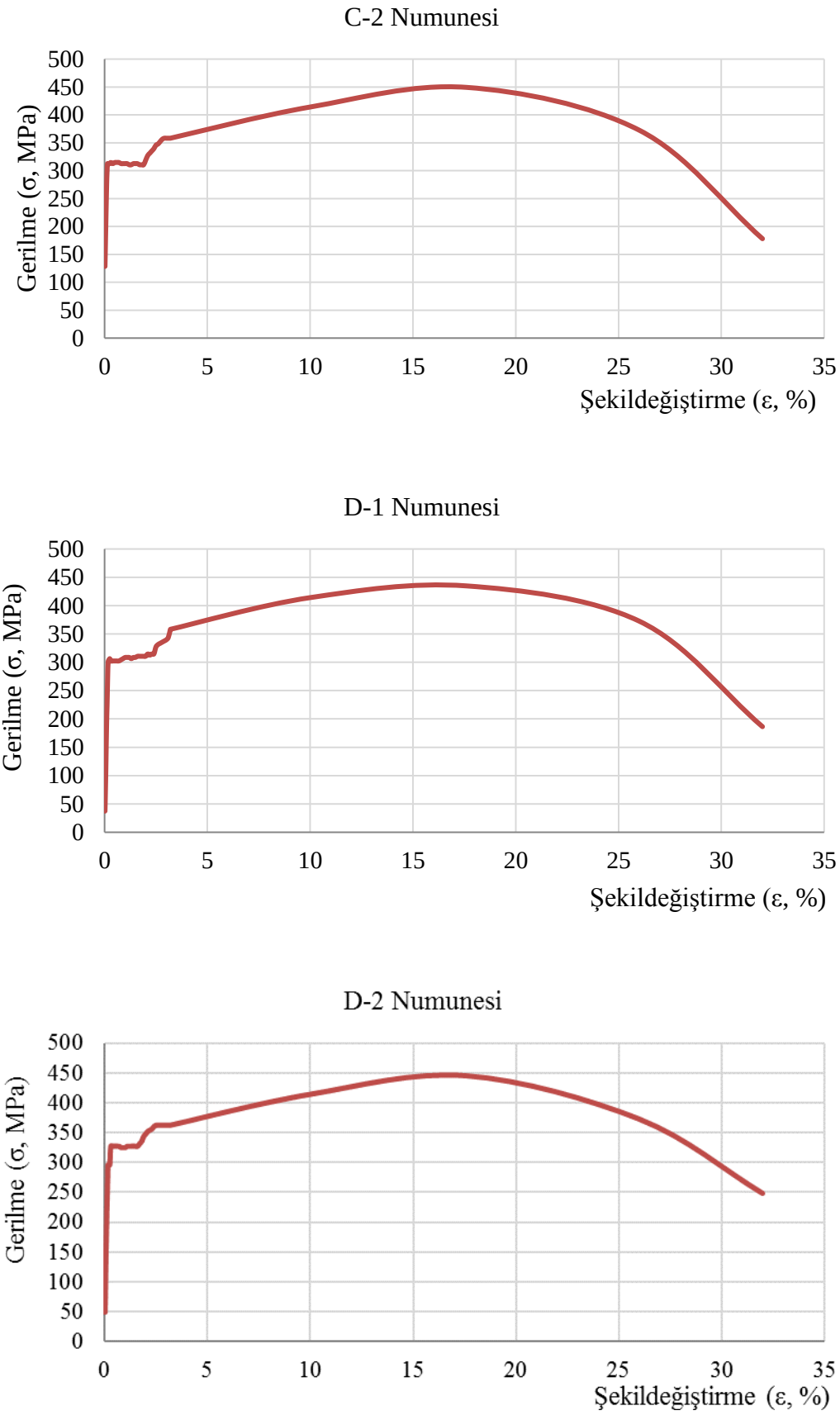


B-2 Numunesi



C-1 Numunesi





Şekil B.1: B, C, D numunelerinin çekme deneyi sonuç grafikleri

EK C1: Gövdesi boşluklu kiriş tasarımı hesap girdi ve çıktıları

----------**Input Data**----------

Design Option

Design code country Propped Beam weight Slab weight Shear Defl
EN1994-1-1:2004 Generic No Included Included Ignored

EN 1994-1-1:2004 Design Option

Shrinkage Approx E Cement Psi_L Psi_S t0_L t0_S t_L t_S RH_L RH_S
Defl Ratios Class
Ignored No Class N 1.100 0.5500 28.00 1.000 36500. 36500. 50.00 50.00

Design Criteria

Deflection limit

Type Cons. dead Addi. dead Fin. live Fin. total post-cons
Absolute[m] N/A N/A N/A N/A N/A
Span/Def 360.0 N/A 360.0 200.0 N/A

Natural frequency

Minimum required Dead load used Live load used 4.000Hz 100.0% 10.00% Yes

Safety factors

Partial load factors

Load Combi Cons Xi Fin. Xi Cons Psi0 Fin. Psi0 Cons. Fin. Cons Fin.
GammaG GammaG GammaQ GammaQ
Eq 6.10 1.000 1.000 1.000 1.000 1.350 1.350 1.500 1.500

Material partial safety factors

Steel yield Steel buck Steel ulti Conc Decking Studs Rebar
1.000 1.000 1.250 1.500 1.000 1.250 1.150

Steel beam

Beam material

Grade Characteristic strength Welding material
S275 (EN) 275.0E+6N/m² Grade 35

Beam Section

Section Dist. from left Tapered Description
1 0.0m No STD I(m) 0.2 0.073 0.0047 0.0069

Section dimension

Section D Bt Bb tt tb tw
[m] [m] [m] [m] [m] [m] [m]
1 0.2000 0.07300 0.07300 0.006900 0.006900 0.004700

Restraints at construction stage

Top flange restrained Secondary member as point restraint
Yes Yes

Restraints at Final stage

NoStud zone restrained Secondary member as point restraint
Yes Yes

Concrete slab

Slab material

Grade Den Light Density Es/Ecs Es/Ecl Es/Ecv Es/Ecsh % live Shrinkage
Class strain
C20/25 801_1000 No 2400.kg/m³ 6.842 32.10 5.526 30.34 33.00% 325.0E-6

Slab section dimension

X Depth Available Available Override Effective Effective Tapered
width width Effective width width
(Left) (Right) width (Left) (Right)
[m] [m] [m] [m] [m] [m]
0.0 0.07800 0.5000 0.5000 No - - No

Reinforcement:

Mesh reinforcement

Name Cover Direction
A193 0.02500m Parallel
Transverse reinforcement
Arrangement Material grade Characteristic strength
[N/m2]
User defined 500B 500.0E+6
No transverse reinforcements have been defined
Metal decking:
Decking property
Type Angle Material grade
User defined 90.00° S280
Decking dimension
Pitch Top width Bottom width Depth Thickness
[m] [m] [m] [m] [m]
0.1510 0.01900 0.08200 0.03800 700.0E-6
Shear studs
Type Height Diameter Steel Grade Fu
[m] [m] [N/m2]
Standard 0.07500 0.01600 Standard (SD1 450.0E+6
(16mm/75mm) (EN13918))
Stud arrangement
Left no Right no Stud layout Minimum saving for using
stud zone stud zone multiple stud zones
[m] [m] [%]
0.0 0.0 User defined N/A
Web opening
No. Type W/D H Left Top Stiffener Dist Top Top Bottom Bottom
dist dist to width thick width thick
open
[m] [m] [m] [m] [m] [m] [m] [m] [m]
1 Circular 0.1400 - 0.2500 0.1000 None - - - - -
2 Circular 0.1400 - 0.4400 0.1000 None - - - - -
3 Circular 0.1400 - 0.6300 0.1000 None - - - - -
4 Circular 0.1400 - 0.8200 0.1000 None - - - - -
5 Circular 0.1400 - 1.010 0.1000 None - - - - -
6 Circular 0.1400 - 1.200 0.1000 None - - - - -
7 Circular 0.1400 - 1.390 0.1000 None - - - - -
8 Circular 0.1400 - 1.580 0.1000 None - - - - -
9 Circular 0.1400 - 1.770 0.1000 None - - - - -
10 Circular 0.1400 - 1.960 0.1000 None - - - - -
11 Circular 0.1400 - 2.150 0.1000 None - - - - -
12 Circular 0.1400 - 2.340 0.1000 None - - - - -
13 Circular 0.1400 - 2.530 0.1000 None - - - - -
14 Circular 0.1400 - 2.720 0.1000 None - - - - -
15 Circular 0.1400 - 2.910 0.1000 None - - - - -
16 Circular 0.1400 - 3.100 0.1000 None - - - - -
17 Circular 0.1400 - 3.290 0.1000 None - - - - -
18 Circular 0.1400 - 3.480 0.1000 None - - - - -
19 Circular 0.1400 - 3.670 0.1000 None - - - - -
20 Circular 0.1400 - 3.860 0.1000 None - - - - -
21 Circular 0.1400 - 4.050 0.1000 None - - - - -
22 Circular 0.1400 - 4.240 0.1000 None - - - - -
23 Circular 0.1400 - 4.430 0.1000 None - - - - -
Loads
No. Type Unit Cons Cons Final Final Dist1 Cons Cons Final Final Dist2

dead1 live1 dead1 live1 dead2 live2 dead2 live2
1 Area [N/m2] 250.0 900.0 1500. 5000. - - - - - -
UDL

----------Summary of Results----------

Ultimate limit state moment and moment capacities at critical section

Stage Critical Section Moment Moment Moment/capacity
section class capacity ratio
[m] [Nm] [Nm]
Cons. 2.333 Plastic 11830. 37950. 0.3117
Final 2.333 Plastic 32480. 78010. 0.4163

Ultimate limit state shear force and shear capacities at critical section

Stage Critical Section Shear force Shear Shear/capacity
section class capacity ratio
[m] [N] [N]
Cons. 4.665 Plastic 10140. 166700. 0.06083
Final 4.665 Plastic 27850. 166700. 0.1670

Final stage working stresses and allowable stresses

Material Critical Section Stress Allowable Stress/Allowable
section class stress ratio
[m] [N/m2] [N/m2]
Steel 2.333 Plastic 195.5E+6 275.0E+6 0.7108
Concrete 2.333 Plastic -3.092E+6 13.33E+6 0.2319

Deflections and deflection limits

Stage Position Deflection Deflection Deflection/limit
limit ratio
[m] [m] [m]
Cons. dead load 2.333 0.005136 0.01296 0.3963
Addi. dead load 2.333 937.0E-6 N/A N/A
(final stage)
Live load (final 2.333 0.002728 0.01296 0.2105
stage)
Shrinkage 0.0 0.0 N/A N/A
Post construction 2.333 0.003665 N/A N/A
Total load (final 2.333 0.008801 0.02332 0.3773
stage)

Natural frequency

Frequency Minimum required
[Hz.] [Hz.]
11.51 4.000

Maximum working stresses

Location Construction Final stage Strain
[N/m2] [N/m2] [x1000]
Top of beam 71.76E+6 52.88E+6
Bottom of beam 71.76E+6 195.5E+6
Concrete 3.092E+6 0.2151
Bottom of beam 71.76E+6 195.5E+6
Concrete 3.092E+6 0.2151

Shear stud results

Stud summary

Characteristic Total number Actual shear Required minimum shear
strength of studs interaction interaction
[N] [%] [%]
57470.N 31 137.9% 40.00%

Stud layout

Zone Start End Num of Num of Spacing Spacing Spacing One stud

Rows Lines of Rows of Lines of Group capacity
[m] [m] [m] [m] [m] [N]
1 0.0 4.530 1 1 - - 0.1510 39080.
Transverse shear
Transverse shear design summary
Crit. Shear Shear Shear Total Slab Decking Mesh Rebar Util.
section surface perim. force resist. resist. resist. resist. resist. factor
[m] [m] [N] [N] [N] [N] [N] [N]
0.01000 a-a 0.06693 129400. 419800. 0.0 252000. 167800. 0.0 0.3082
There is no transverse shear reinforcement required or defined
Web open capacity check
Construction stage Final stage
No Type VM VMc V Vc VM VMc V Vc Pass
[Nm] [Nm] [N] [N] [Nm] [Nm] [N] [N]
1 Circular 579.2 3740. 9193. 39620. 1590. 3518. 25240. 44190. Yes
2 Circular 527.1 3704. 8367. 39620. 1447. 3580. 22970. 44130. Yes
3 Circular 475.1 3656. 7541. 39620. 1304. 3541. 20700. 44390. Yes
4 Circular 423.0 3600. 6714. 39620. 1161. 3460. 18430. 44760. Yes
5 Circular 371.0 3541. 5888. 39620. 1018. 3352. 16170. 45100. Yes
6 Circular 318.9 3483. 5062. 39620. 875.6 3241. 13900. 45380. Yes
7 Circular 266.8 3428. 4236. 39620. 732.6 3136. 11630. 45630. Yes
8 Circular 214.8 3379. 3409. 39620. 589.7 3043. 9361. 44480. Yes
9 Circular 162.7 3339. 2583. 39620. 446.8 2966. 7092. 43420. Yes
10 Circular 159.8 3309. 2536. 39620. 303.9 2909. 4824. 42630. Yes
11 Circular 159.8 3291. 2536. 39620. 263.2 2874. 4177. 42140. Yes
12 Circular 159.8 3285. 2536. 39620. 263.2 2863. 4177. 41980. Yes
13 Circular 159.8 3292. 2536. 39620. 263.2 2876. 4177. 42160. Yes
14 Circular 159.8 3311. 2536. 39620. 315.2 2913. 5003. 42680. Yes
15 Circular 166.8 3342. 2648. 39620. 458.1 2972. 7271. 43500. Yes
16 Circular 218.9 3383. 3475. 39620. 601.0 3050. 9540. 44580. Yes
17 Circular 271.0 3432. 4301. 39620. 743.9 3144. 11810. 45610. Yes
18 Circular 323.0 3487. 5127. 39620. 886.8 3250. 14080. 45360. Yes
19 Circular 375.1 3546. 5953. 39620. 1030. 3361. 16350. 45070. Yes
20 Circular 427.1 3605. 6780. 39620. 1173. 3468. 18610. 44740. Yes
21 Circular 479.2 3660. 7606. 39620. 1316. 3547. 20880. 44360. Yes
22 Circular 531.2 3707. 8432. 39620. 1459. 3579. 23150. 44130. Yes
23 Circular 583.3 3742. 9258. 39620. 1601. 3508. 25420. 44190. Yes
where:
VM - Vierendeel moment
VMc - Vierendeel moment capacity
V - Shear force
Vc - Shear capacity
Web post capacity check
Web Open Construction stage Final stage
No (Left-Right) VwpEd VwpRd MwpEd MwpRd NwpEd NwpRd VwpEd VwpRd MwpEd MwpRd NwpEd NwpRd Pass
[N] [N] [Nm] [Nm] [N] [N] [N] [N] [Nm] [Nm] [N] [N]
1 1-2 8745. 37310. 0.0 538.5 8745. 49320. 16700. 37310. 0.0 538.5 16700. 49320. Yes
2 2-3 7909. 37310. 0.0 538.5 7909. 49320. 15200. 37310. 0.0 538.5 15200. 49320. Yes
3 3-4 7073. 37310. 0.0 538.5 7073. 49320. 13690. 37310. 0.0 538.5 13690. 49320. Yes
4 4-5 6237. 37310. 0.0 538.5 6237. 49320. 12130. 37310. 0.0 538.5 12130. 49320. Yes
5 5-6 5401. 37310. 0.0 538.5 5401. 49320. 10540. 37310. 0.0 538.5 10540. 49320. Yes
6 6-7 4565. 37310. 0.0 538.5 4565. 49320. 8938. 37310. 0.0 538.5 8938. 49320. Yes
7 7-8 3729. 37310. 0.0 538.5 3729. 49320. 7321. 37310. 0.0 538.5 7321. 49320. Yes
8 8-9 2893. 37310. 0.0 538.5 2893. 49320. 5692. 37310. 0.0 538.5 5692. 49320. Yes

9 9-10 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 4054. 37310. 0.0 538.5 4054. 49320. Yes
10 10-11 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 2993. 37310. 0.0 538.5 2993. 49320. Yes
11 11-12 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 2994. 37310. 0.0 538.5 2994. 49320. Yes
12 12-13 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 2994. 37310. 0.0 538.5 2994. 49320. Yes
13 13-14 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 2993. 37310. 0.0 538.5 2993. 49320. Yes
14 14-15 2605. 37310. 0.0 538.5 2605. 49320. 4184. 37310. 0.0 538.5 4184. 49320. Yes
15 15-16 2959. 37310. 0.0 538.5 2959. 49320. 5821. 37310. 0.0 538.5 5821. 49320. Yes
16 16-17 3795. 37310. 0.0 538.5 3795. 49320. 7449. 37310. 0.0 538.5 7449. 49320. Yes
17 17-18 4631. 37310. 0.0 538.5 4631. 49320. 9065. 37310. 0.0 538.5 9065. 49320. Yes
18 18-19 5467. 37310. 0.0 538.5 5467. 49320. 10670. 37310. 0.0 538.5 10670. 49320. Yes
19 19-20 6303. 37310. 0.0 538.5 6303. 49320. 12250. 37310. 0.0 538.5 12250. 49320. Yes
20 20-21 7139. 37310. 0.0 538.5 7139. 49320. 13820. 37310. 0.0 538.5 13820. 49320. Yes
21 21-22 7975. 37310. 0.0 538.5 7975. 49320. 15310. 37310. 0.0 538.5 15310. 49320. Yes
22 22-23 8811. 37310. 0.0 538.5 8811. 49320. 16830. 37310. 0.0 538.5 16830. 49320. Yes
where:
VwpEd - Web post longitudinal shear force
VwpRd - Web post longitudinal shear capacity
MwpEd - Web post moment
MwpRd - Web post moment capacity
NwpEd - Web post compression
NwpRd - Web post compression capacity
Maximum weld thickness between beam web and flange
Throat thickness Leg length (top) Throat thickness Leg length
(top) (Bottom) (bottom)
[m] [m] [m] [m]
713.0E-6 0.001008 312.2E-6 441.6E-6
----------**Detailed Results**----------
Moment and shear force at ultimate limit state
Section(x) Construction Final Construction Final
moment moment shear shear
[m] [Nm] [Nm] [N] [N]
2.333 11830 32480 11.41E-6 10.35E-6
Moment and shear force at serviceability limit state.
Section(x) Cons. Cons. Addi. Final Shrink. Cons. Cons. Addi. Final
dead live dead live moment dead live dead live
load load load load load load load load
moment moment moment shear shear shear shear
[m] [Nm] [Nm] [Nm] [Nm] [Nm] [N] [N] [N] [N]
2.333 5546 2448 3400 13600 6011 7.668E-6 0 0 0 0 0
Moment and shear capacities
Section(x) Steel beam Composite Shear Buckling
moment beam capacity shear capacity
capacity moment
capacity
[m] [Nm] [Nm] [N] [N]
2.333 37950 78010 166700 166700

EK C2: Gövdesi dolu kiriş tasarımı hesap girdi ve çıktıları

----------Input Data----------

Design Option

Design code country Propped Beam weight Slab weight Shear Defl
EN1994-1-1:2004 Generic No Included Included Ignored
EN 1994-1-1:2004 Design Option
Shrinkage Approx E Cement Psi_L Psi_S t0_L t0_S t_L t_S RH_L RH_S

Defl Ratios Class

Ignored No Class N 1.100 0.5500 28.00 1.000 36500. 36500. 50.00 50.00
Design Criteria

Deflection limit

Type Cons. dead Addi. dead Fin. live Fin. total post-cons
Absolute[m] N/A N/A N/A N/A N/A
Span/Def 360.0 N/A 360.0 200.0 N/A
Natural frequency
Minimum required Dead load used Live load used To be checked
Natural frequency
Minimum required Dead load used Live load used To be checked
4.000Hz 100.0% 10.00% Yes
Safety factors

Partial load factors

Load Combi Cons Xi Fin. Xi Cons Psi0 Fin. Psi0 Cons. Fin. Cons Fin.
GammaG GammaG GammaQ GammaQ
Eq 6.10 1.000 1.000 1.000 1.000 1.350 1.350 1.500 1.500
Material partial safety factors
Steel yield Steel buck Steel ulti Conc Decking Studs Rebar
1.000 1.000 1.250 1.500 1.000 1.250 1.150
Steel beam
Beam material
Grade Characteristic strength Welding material
S275 (EN) 275.0E+6N/m² Grade 35

Beam Section

Section Dist. from left Tapered Description
1 0.0m No STD I(m) 0.2 0.073 0.0047 0.0069

Section dimension

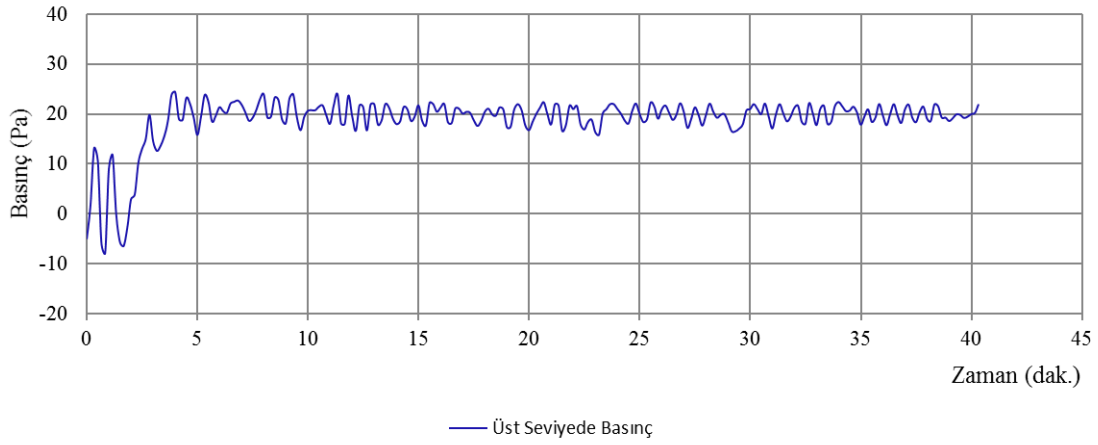
Section D Bt Bb tt tb tw
[m] [m] [m] [m] [m] [m]
1 0.2000 0.07300 0.07300 0.006900 0.006900 0.004700
Restraints at construction stage
Top flange restrained Secondary member as point restraint
Yes Yes
Restraints at Final stage
NoStud zone restrained Secondary member as point restraint
Yes Yes
Concrete slab
Slab material
Grade Den Light Density Es/Ecs Es/Ecl Es/Ecv Es/Ecsh % live Shrinkage
Class strain
C20/25 801_1000 No 2400.kg/m³ 6.842 32.10 5.526 30.34 33.00% 325.0E-6
Slab section dimension
X Depth Available Available Override Effective Effective Tapered

width width Effective width width
(Left) (Right) width (Left) (Right)
[m] [m] [m] [m] [m] [m]
0.0 0.07800 0.5000 0.5000 No - - No
Reinforcement:
Mesh reinforcement
Name Cover Direction
A193 0.02500m Parallel
Transverse reinforcement
Arrangement Material grade Characteristic strength
[N/m2]
User defined 500B 500.0E+6
No transverse reinforcements have been defined
Metal decking:
Decking property
Type Angle Material grade
User defined 90.00° S280
Decking dimension
Pitch Top width Bottom width Depth Thickness
[m] [m] [m] [m] [m]
0.1510 0.01900 0.08200 0.03800 700.0E-6
Shear studs
Type Height Diameter Steel Grade Fu
[m] [m] [N/m2]
Standard 0.07500 0.01600 Standard (SD1 450.0E+6
(16mm/75mm) (EN13918))
Stud arrangement
Left no Right no Stud layout Minimum saving for using
stud zone stud zone multiple stud zones
[m] [m] [%]
0.0 0.0 User defined N/A
Loads
No. Type Unit Cons Cons Final Final Dist1 Cons Cons Final Final Dist2
dead1 live1 dead1 live1 dead2 live2 dead2 live2
Area [N/m2] 250.0 900.0 1500. 5000. - - - - - -
UDL
----------Summary of Results----------
Ultimate limit state moment and moment capacities at critical section
Stage Critical Section Moment Moment Moment/capacity
section class capacity ratio
[m] [Nm] [Nm]
Cons. 2.333 Plastic 11830. 37950. 0.3117
Final 2.333 Plastic 32480. 78010. 0.4163
Ultimate limit state shear force and shear capacities at critical section
Stage Critical Section Shear force Shear Shear/capacity
section class capacity ratio
[m] [N] [N]
Cons. 4.665 Plastic 10140. 166700. 0.06083
Final 4.665 Plastic 27850. 166700. 0.1670
Final stage working stresses and allowable stresses

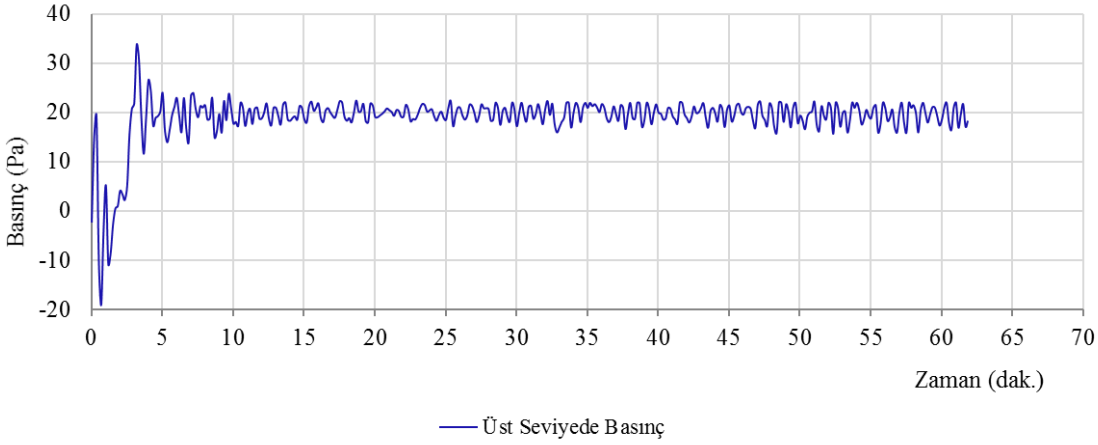
Material Critical Section Stress Allowable Stress/Allowable
section class stress ratio
[m] [N/m2] [N/m2]
Steel 2.333 Plastic 167.4E+6 275.0E+6 0.6086
Concrete 2.333 Plastic -3.008E+6 13.33E+6 0.2256
Deflections and deflection limits
Stage Position Deflection Deflection Deflection/limit
limit ratio
[m] [m] [m]
Cons. dead load 2.333 0.005004 0.01296 0.3862
Addi. dead load 2.333 886.6E-6 N/A N/A
(final stage)
Live load (final 2.333 0.002518 0.01296 0.1943
stage)
Shrinkage 0.0 0.0 N/A N/A
Post construction 2.333 0.003405 N/A N/A
Total load (final 2.333 0.008409 0.02332 0.3605
stage)
Natural frequency
Frequency Minimum required
[Hz.] [Hz.]
12.02 4.000
Maximum working stresses
Location Construction Final stage Strain
[N/m2] [N/m2] [x1000]
Top of beam 67.04E+6 52.88E+6
Bottom of beam 67.04E+6 167.4E+6
Concrete 3.008E+6 0.2152
Shear stud results
Stud summary
Characteristic Total number Actual shear Required minimum shear
strength of studs interaction interaction
[N] [%] [%]
57470.N 31 137.9% 40.00%
57470.N 31 137.9% 40.00%
Stud layout
Zone Start End Num of Num of Spacing Spacing Spacing One stud
Rows Lines of Rows of Lines of Group capacity
[m] [m] [m] [m] [m] [N]
1 0.0 4.530 1 1 - - 0.1510 39080.
Transverse shear
Transverse shear design summary
Crit. Shear Shear Shear Total Slab Decking Mesh Rebar Util.
section surface perim. force resist. resist. resist. resist. resist. factor
[m] [m] [N] [N] [N] [N] [N] [N]
0.01000 a-a 0.06693 129400. 419800. 0.0 252000. 167800. 0.0 0.3082
There is no transverse shear reinforcement required or defined
Maximum weld thickness between beam web and flange
Throat thickness Leg length (top) Throat thickness Leg length
(top) (Bottom) (bottom)

[m] [m] [m] [m]
713.0E-6 0.001008 312.2E-6 441.6E-6
----------**Detailed Results**----------
Moment and shear force at ultimate limit state
Section(x) Construction Final Construction Final
moment moment shear shear
[m] [Nm] [Nm] [N] [N]
2.333 11830. 32480. 11.41E-6 10.35E-6
Moment and shear force at serviceability limit state
Section(x) Cons. Cons. Addi. Final Shrink. Cons. Cons. Addi. Final
dead live dead live moment dead live dead live
load load load load load load load load
moment moment moment moment shear shear shear shear
[m] [Nm] [Nm] [Nm] [Nm] [Nm] [N] [N] [N] [N]
2.333 5546. 2448. 3400. 13600. 7199. 7.668E-6 0.0 0.0 0.0
Moment and shear capacities
Section(x) Steel beam Composite Shear Buckling
moment beam capacity shear
capacity momentcapacity
[m] [Nm] [Nm] [N] [N]
2.333 37950. 78010. 166700. 166700.

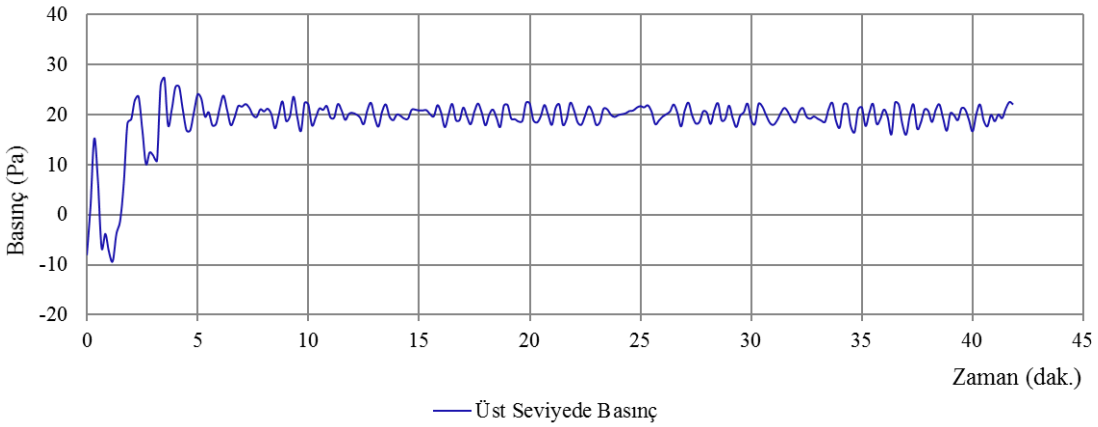
EK D: Numunelerin fırın içi basınç zaman grafikleri



(a)



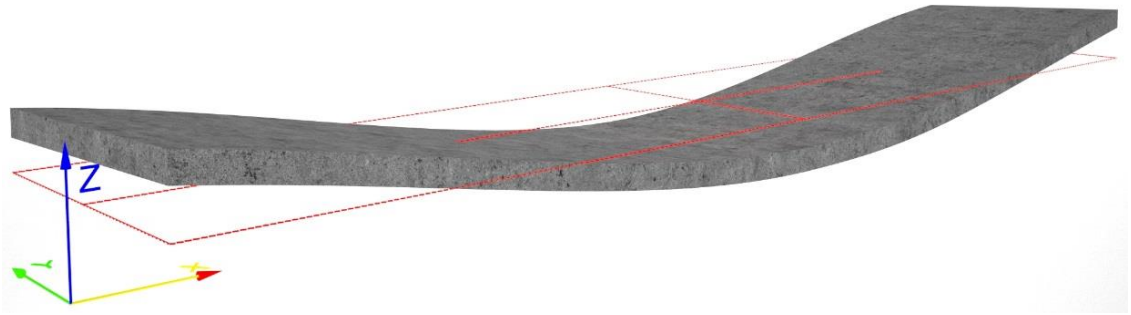
(b)



(c)

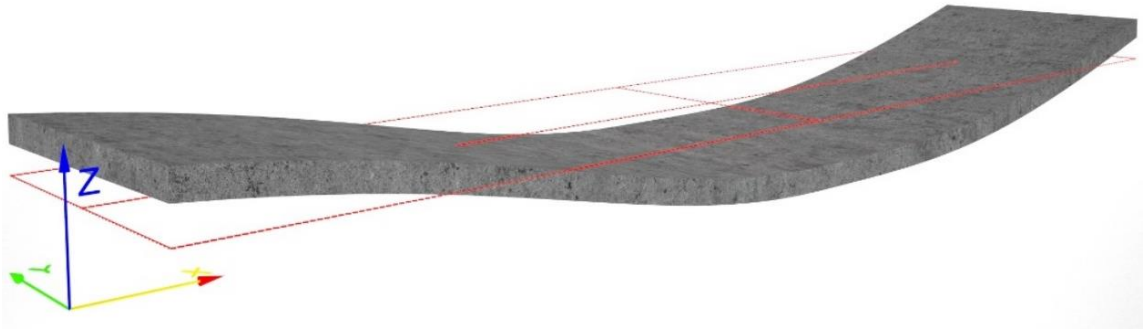
Şekil D.1: Fırın içerisindeki basıncın zamana bağlı değişimi: (a) DK-R numunesi için basınç-zaman eğrisi, (b) GBK-YP numunesi için basınç-zaman eğrisi, (c) GBK-YN numunesi için basınç-zaman eğrisi.

EK E: Betonarme döşemenin yangın sonrası yerdeğiştirme durumunun 3 boyutlu modellemesi

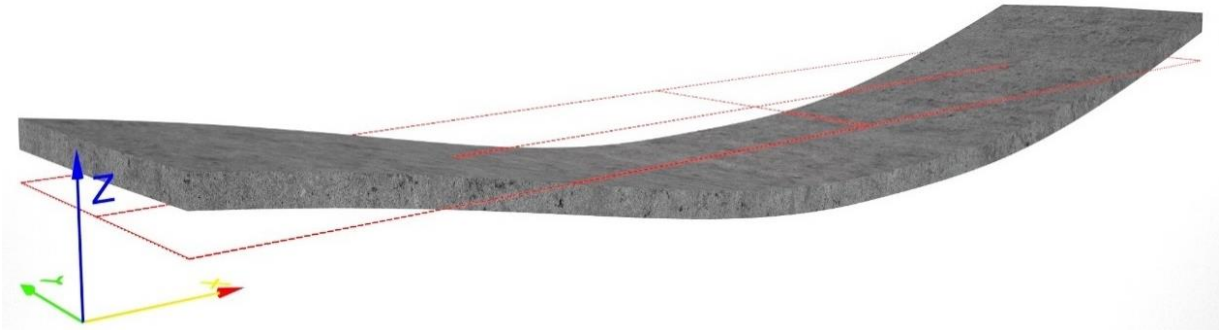


(a)

DK-R numunesi deney sonunda fırın içerisine düştüğü için ölçüm alınamamıştır.



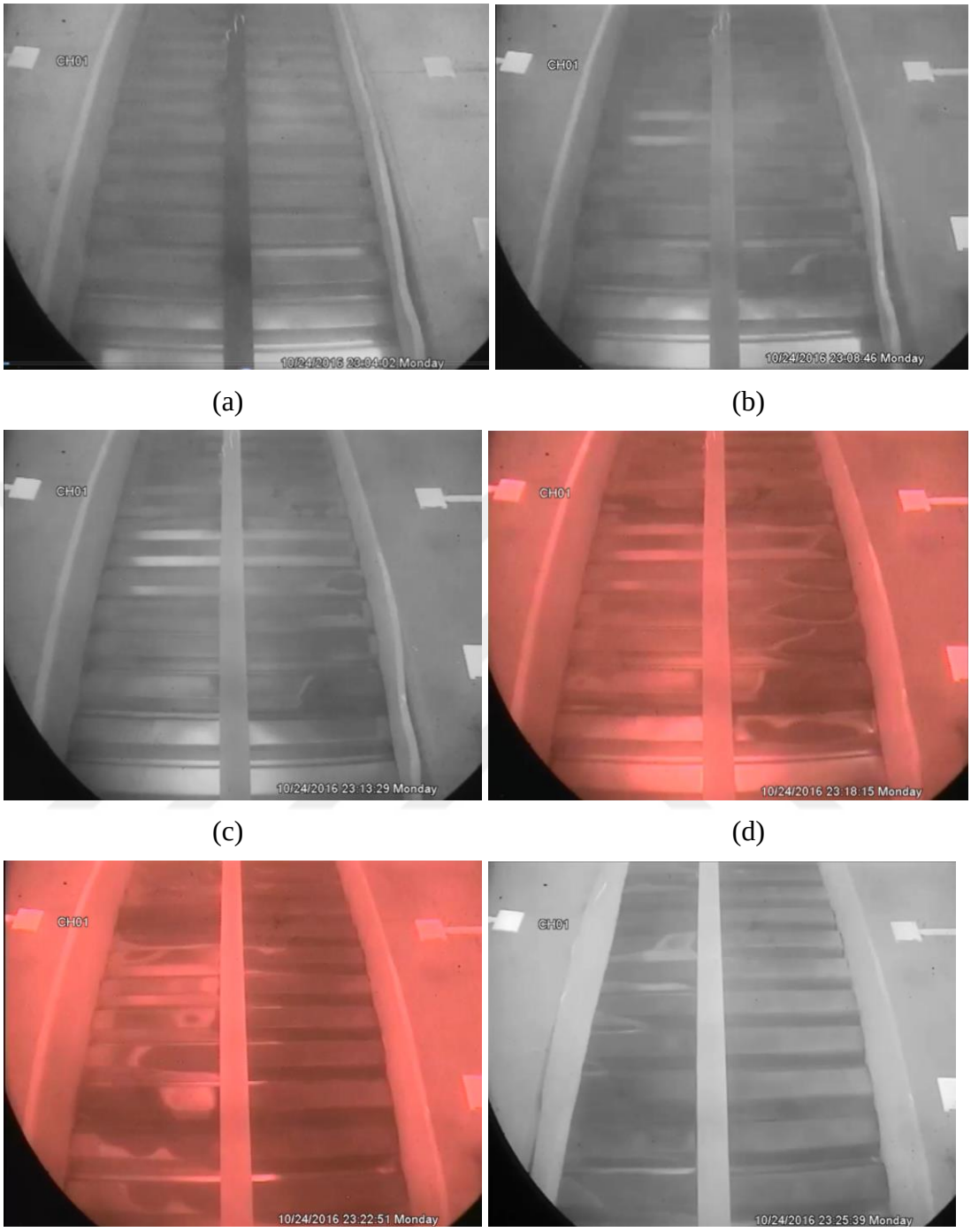
(b)



(c)

Şekil E.1: Numunelerin döşemesinin yangın sonrası durumlarının 3D boyutlu modelleri: (a) GBK-YS numunesinin döşeme modellemesi, (b) GBK-YP numunesi döşeme modellemesi, (c) GBK-YN numunesi döşeme modellemesi.

EK F: Termal kamera görüntüleri (Kritik zamanlarda)

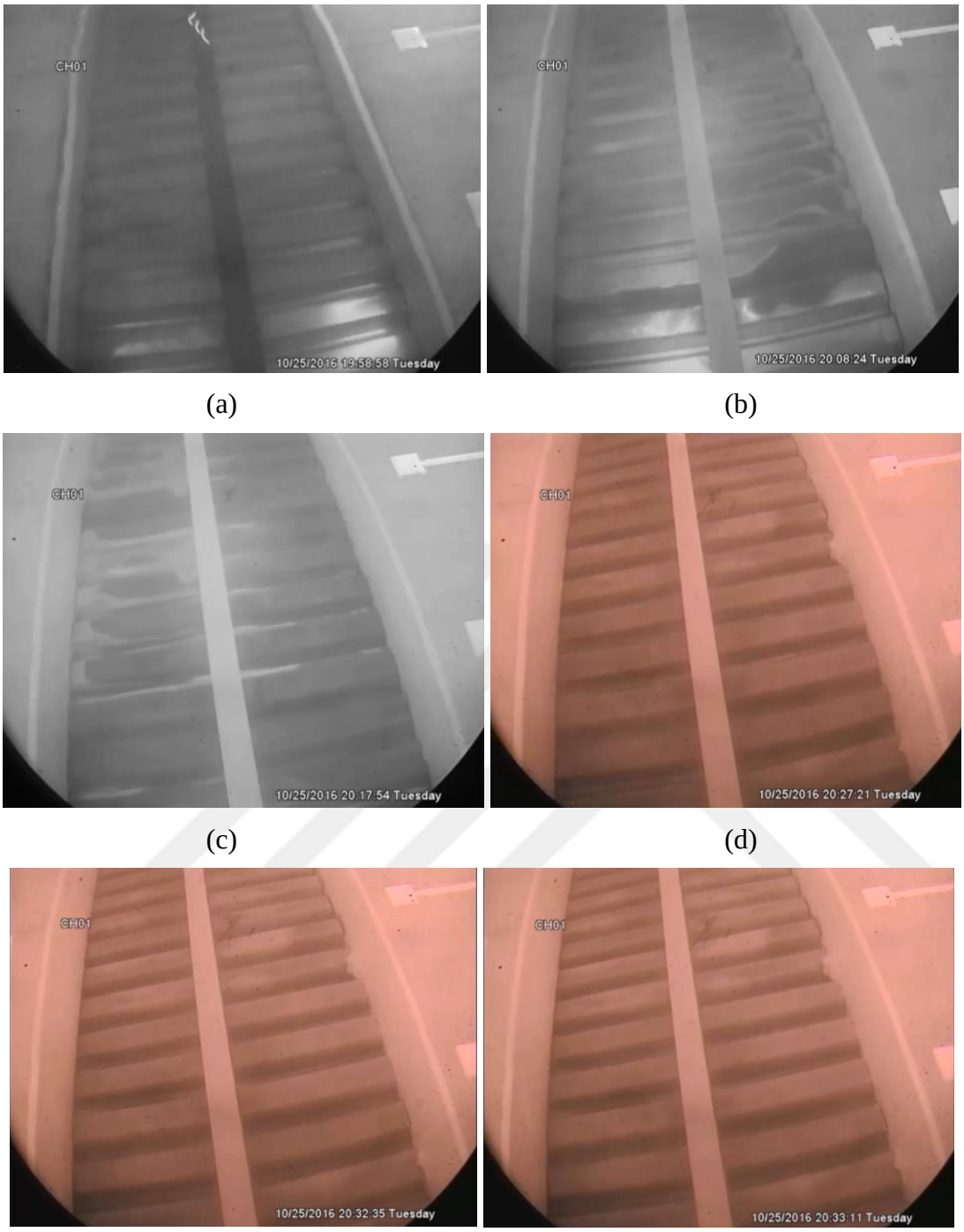


(a) (b)

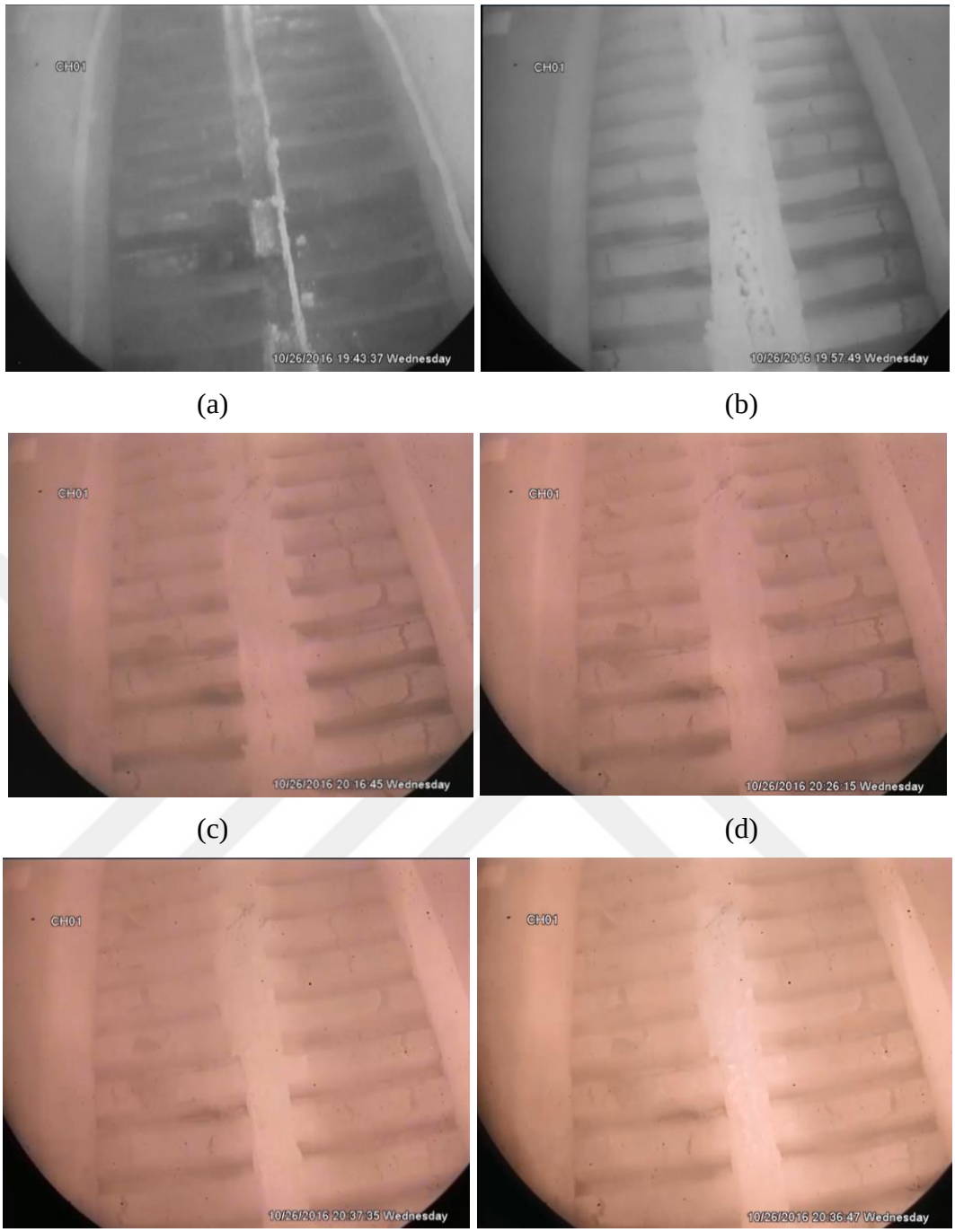
(c) (d)

(e) (f)

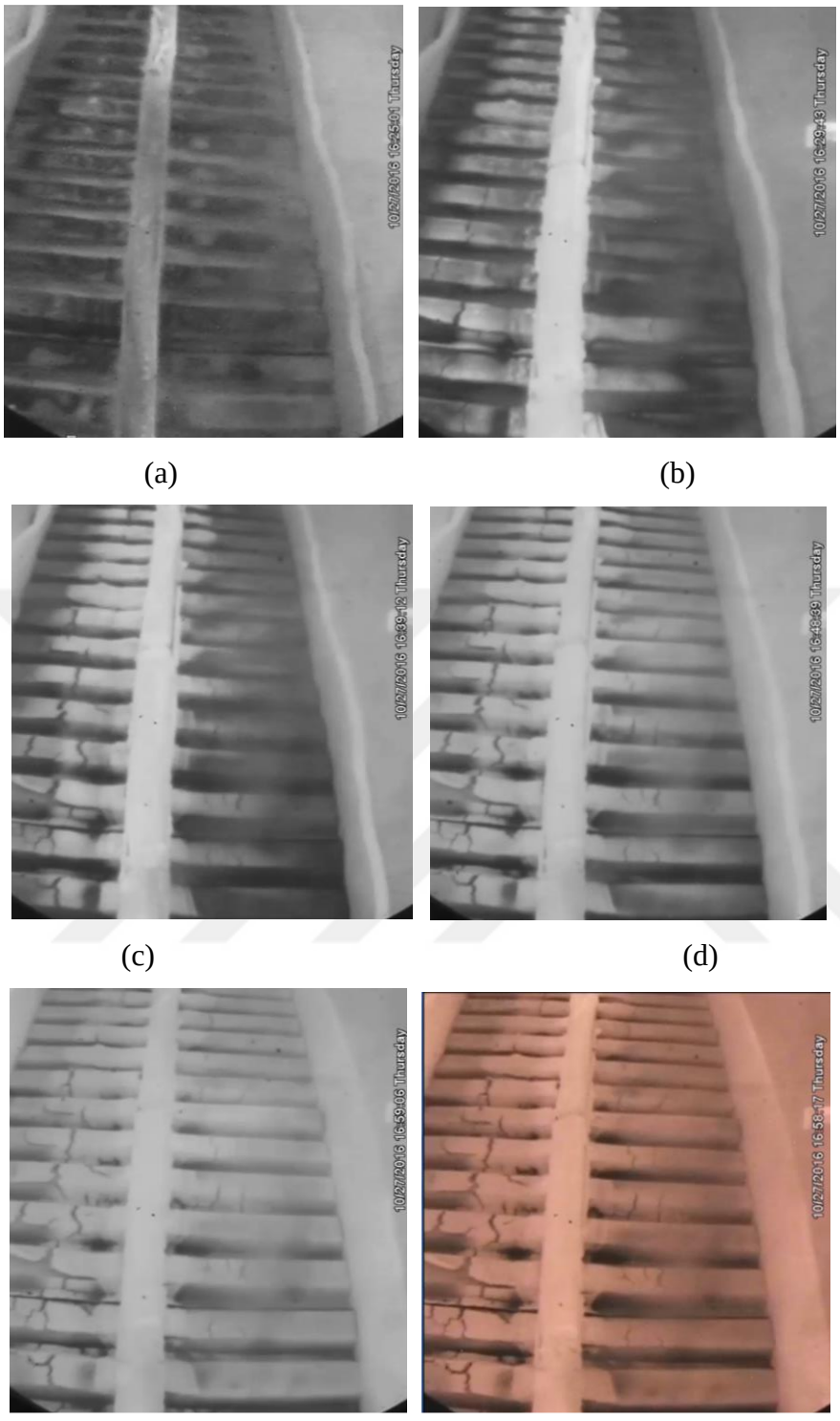
Şekil F.1: GBK-YS numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 15. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 24.5. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 27.5 dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü.



Şekil F.2: DK-R numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b)Deneyin 15. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 25. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 35. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 40. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 40.3. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü.

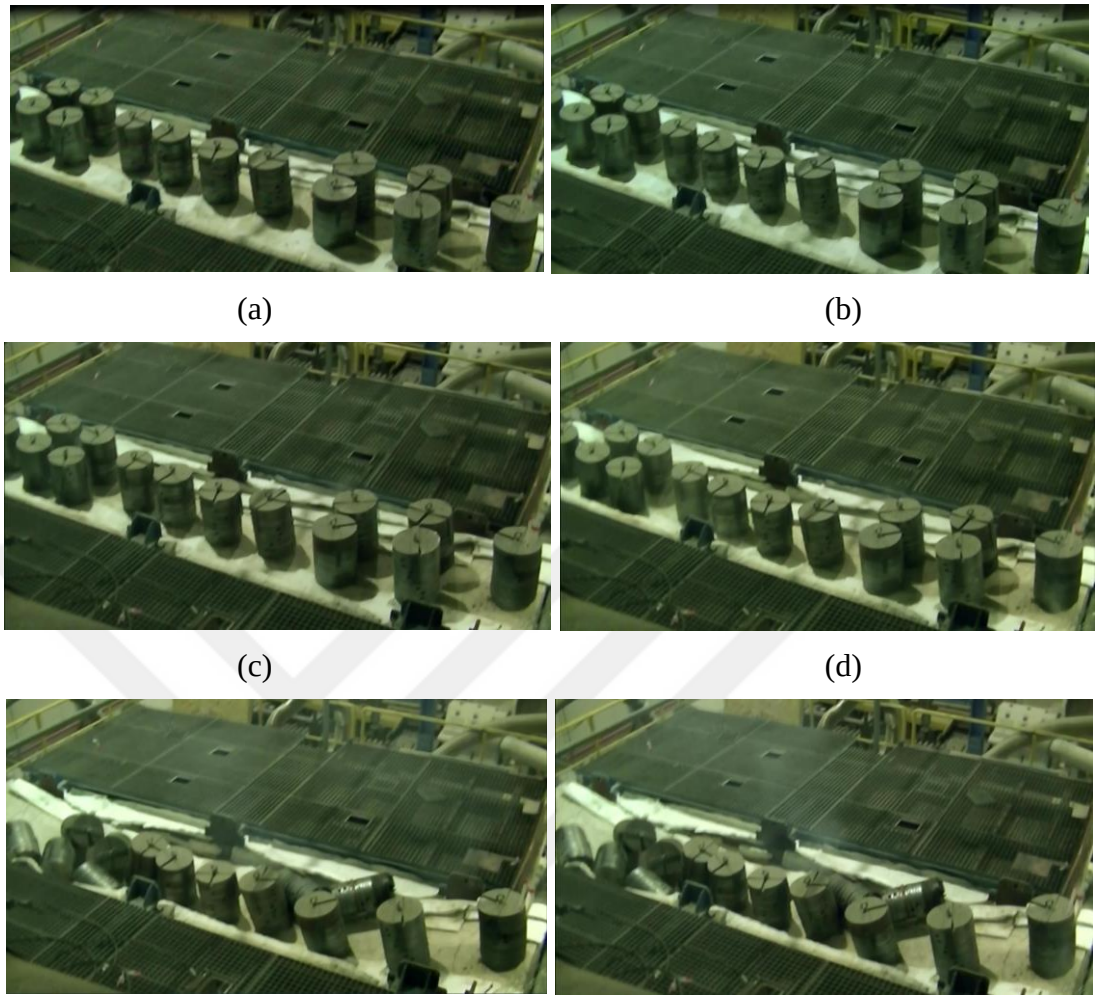


Şekil F.3: GBK-YP numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 40. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 50. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 60.2. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 61.8. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü.



Şekil F.4: GBK-YN numunesinin deney esnasında fırın içinden alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında termal kamera görüntüsü, (b) Deneyin 10. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (c) Deneyin 20. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (d) Deneyin 30. dakikasında fırın içi termal kamera görüntüsü, (e) Deneyin 41. dakikasında (L/20) fırın içi termal kamera görüntüsü, (f) Deneyin 41.8. dakikasında (deney sonu) fırın içi termal kamera görüntüsü.

EK G: Kamera görüntüleri

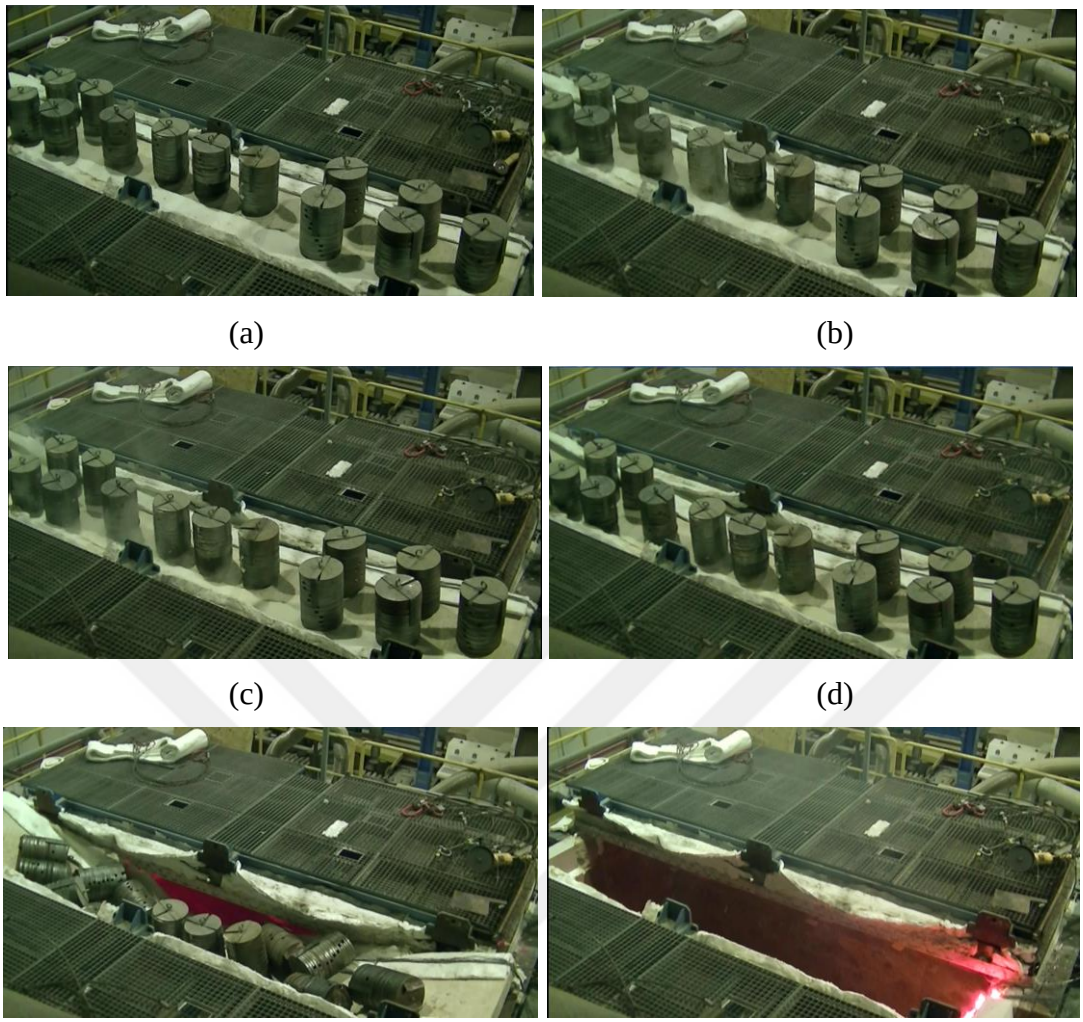


(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Şekil G.1: GBK-YS numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 15. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 24.5. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 27.5 dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü.

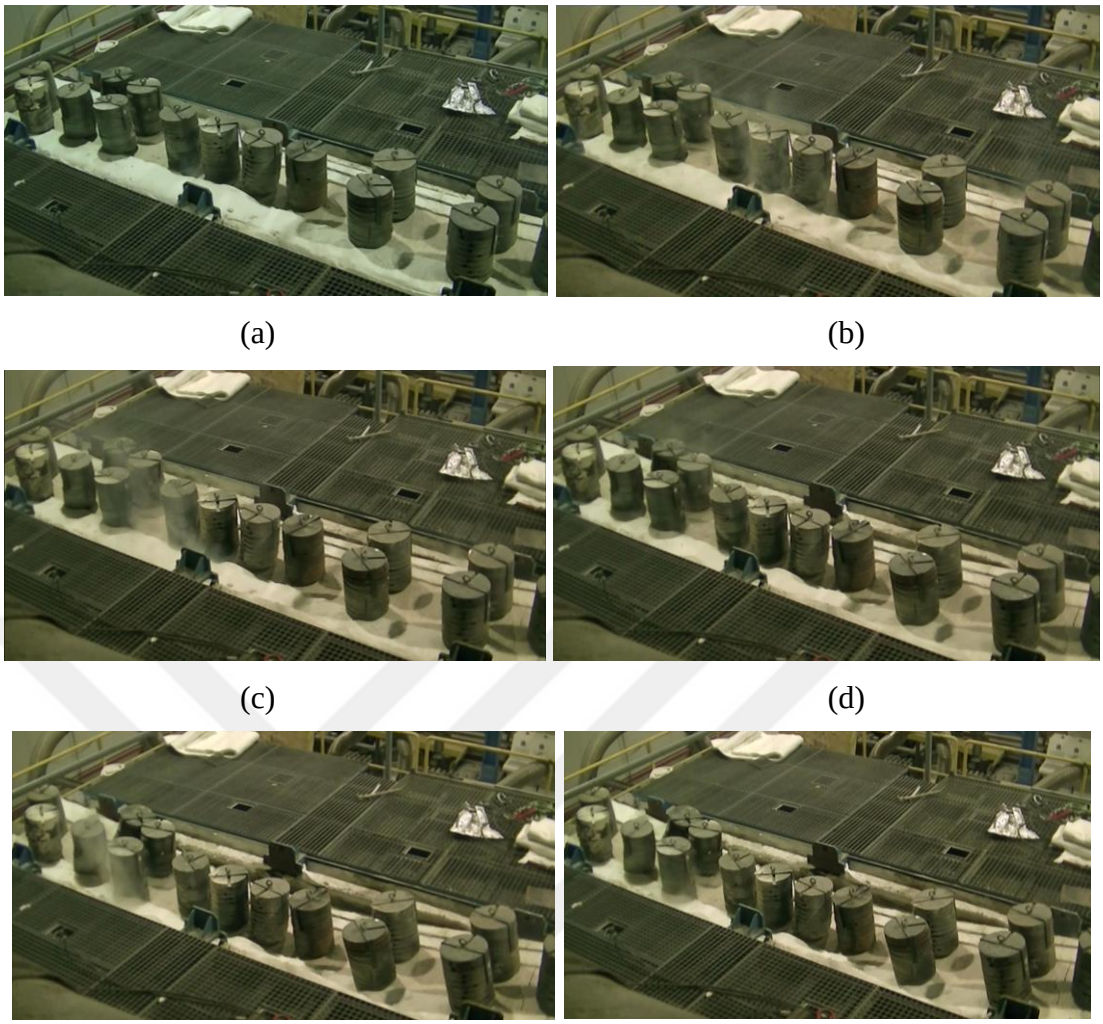


(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Şekil G.2: DK-R numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 15. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 25. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 35. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 40. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 40.3. dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü.



(a) (b)

(c) (d)

(e) (f)

Şekil G.3: GBK-YP numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 40. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 50. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 60.2. dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 61.8. dakikasında (deney sonu) kamera görüntüsü.



(a) (b)



(c) (d)



(e) (f)

Şekil G.4: GBK-YN numunesinin deney esnasında fırın dışından alınan görüntüleri: (a) Deneyin 5. dakikasında kamera görüntüsü, (b)Deneyin 10. dakikasında kamera görüntüsü, (c) Deneyin 20. dakikasında kamera görüntüsü, (d) Deneyin 30. dakikasında kamera görüntüsü, (e) Deneyin 41. Dakikasında (L/20) kamera görüntüsü, (f) Deneyin 41.8. dakikasında kamera (deney sonu) görüntüsü.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Pınar Sunar Bükülmez

Doğum Tarihi ve Yeri **:** 29.01.1983, Kassel F. Almanya Cumhuriyeti

E-posta **:** pinar.sunar@arc.bau.edu.tr, sunarpinar@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2007, Bahçeşehir Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı Bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2010, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi, Mimarlık Ana Bilim Dalı, İç Mimarlık Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2007 yılında Bahçeşehir Üniversitesi Mimarlık Fakültesi'nden Fakülte Birinciliği ile mezun olmuştur.
- 2007'den yılından beri Bahçeşehir Üniversitesi Mimarlık ve Tasarım Fakültesi'nde araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sunar Bükülmez, P.,** Celik, O.C. (2019). Gövdesi Dolu ve Dairesel Boşluklu Yalıtımsız Kompozit Döşeme Kirişlerinin Yangin Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakülte Dergisi*, 34 (2), (basım aşamasında)
- **Sunar Bükülmez, P.,** Celik, O.C. (2019). Pre and Post-Fire Mechanical Properties of Structural Steel and Concrete in Steel-Concrete Composite Cellular Beams, The Central European Symposium on Building Physics 2019, (basım aşamasında), Prague, Czech Republic, September 9-11.
- **Sunar Bükülmez, P.,** Celik, O.C. (2017). Structural Fire Behaviour And Testing of Protected and Unprotected Steel-Concrete Composite Cellular Beams, *Conference Proceedings of Applications of Structural Fire Engineering (ASFE 2017)*, (pp.295-305). Manchester, U.K, University of Manchester, September 7-8.
- **Sunar Bükülmez, P.,** Celik, O.C. (2017). Gövdesi Boşluklu Çelik-Betonarme I-Kiriş Numunelerinin Yangin Deneyleri. Teknik Rapor, No.315M285, TÜBİTAK MAG, Ankara, Türkiye.

- **Sunar Bükülmez, P.,** Aydöner, T., Bal, A., Binbir, E., Celik, O.C. (2017). Yangın Korumalı ve Korumasız Gövdesi Boşluklu Kompozit I-Kirişlerin Yangın Davranışının Deneysel İncelenmesi, *Uluslararası Katılımlı 7. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 26-27 Ekim, Gaziantep, Türkiye, s.115-124.
- **Sunar Bükülmez, P.,** Celik, O.C. (2015). Gövdesi Boşluklu Kompozit I-Kirişlerin Yangın Karşısındaki Davranışları Üzerine Yapılan Deneysel Çalışmalar, *6. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 9-11 Aralık, Eskişehir, s.27-30.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Ceylanlı Z., **Sunar P.,** (2016). Two Nations in The Process of Modernization: Perspectives n The Interior Space in Turkey and Japan in The Interwar Period, *4th International Conference on Archi-Cultural Translations through the Silk Road, Mukogawa Women's University*, Nishinomiya, Japan, July 14-16, Selected Papers, ISBN 978-4-9906255-2-8, 199-204.
- Tanrıöver, S., Ceylanlı Z. and **Sunar, P.,** (2015). The Analysis of a Hybrid Educational Approach in Interior Architecture Design Studio: The Case of Bahçeşehir University, International Conference Unspoken Issues in Architectural Education, Open House Journal, ISSN 0168-2601, 40 (2), 80-87.
- **Sunar P.,** Tanriöver S.H. (2013). An Analysis of Indoor Environmental Quality in an Office the Case of an University Campus in Istanbul. *2nd Central European Symposium on Building Physics*, (pp. 201-207) Vienna, Austria, September 9-11.
- **Sunar P.,** Kültür S., Koçlar Oral G., Manioglu G. (2013). Evaluation of Energy Efficient Approach in Traditional Construction for Tomorrow s Buildings The Case of Gaziantep. *8th International Symposium on Architect Sinan*, Trakya University, (pp. 285-290) Edirne, Turkey, 25-26 April.
- **Sunar P.,** Ceylanlı Z. (2012). Istanbul Fires in the 19th Century an Analysis on Architecture and Urban Pattern. *2nd International Conference on Archi-Cultural Translations through the Silk Road*, Mukogawa Women's University, Nishinomiya, Japan, July 14-16, Selected Papers, ISBN 978-4-9906255-2-8, 185-191.
- **Sunar P.,** Aytis S. (2010). İç Mimari Tasarımda Malzemede Yangın Güvenligi. *1st International Graduate Research Symposium on the Built Environment*, Middle East Technical University (METU), (pp. 85-88) Ankara, Turkey, October 15-16.