

**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

**ÇELİK ENDÜSTRİ YAPILARININ YANGIN
GÜVENLİĞİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NİSANUR IŞIK

İSTANBUL, 2020



**FATİH SULTAN MEHMET VAKIF ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ PROGRAMI**

ÇELİK ENDÜSTRİ YAPILARININ YANGIN GÜVENLİĞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**NİSANUR IŞIK
(170241008)**

**Danışman
(Dr. Öğr. Üyesi Nihan DOĞRAMACI AKSOYLAR)**

İSTANBUL, 2020

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜNE

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı İnşaat Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı'nda **170241008** numaralı **NİSANUR IŞIK**'ın hazırladığı “**Çelik Endüstri Yapılarının Yangın Güvenliği**” konulu **Yüksek Lisans Tezi** ile ilgili **TEZ SAVUNMA SINAVI**, [20/07/2020] Pazartesi günü saat 10:00'da Çevrimiçi Video Görüşmesi ile yapılmış, sorulan sorulara alınan cevaplar sonunda adayın tezinin **KABULÜNE** **OYBİRLİĞİ** ile karar verilmiştir.

Düzeltilme verilmesi halinde:

Adı geçen öğrencinin Tez Savunma Sınavı [...]/.../20[...] tarihinde, saat da yapılacaktır.

Tez adı değişikliği yapılması halinde:

Tez adının

.....
..... şeklinde değiştirilmesi uygundur.

JÜRİ ÜYESİ	KANAATİ (*)	İMZA
Dr. Öğr. Üyesi Nihan Doğramacı AKSOYLAR	BAŞARILI	
Prof. İbrahim EKİZ	BAŞARILI	
Prof. Dr. Müberra Eser AYDEMİR	BAŞARILI	

..... KODLU TEZ ONAY SAFYASI KONULACAK

BEYAN/ ETİK BİLDİRİM

Bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bağlı olduğum üniversite veya bir başka üniversitedeki başka bir çalışma olarak sunulmadığını beyan ederim.

Nisanur IŞIK

Aileme

ÖZET

Günümüzde üstün mekanik özellikleri ekonomik, güvenilir, hafif, yapım süresinin kısalığı ve yeniden kullanılabilen bir malzemeden oluşması nedeniyle çelik yapıların kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Ancak son yıllarda meydana gelen yangınlar çelik yapılarda istenmeyen büyük hasarlara neden olmuştur. Çelik yapılarda can güvenliği açısından önemli bir tehdit oluşturan yangın kaynaklı hasarları az seviyeye indirmek için çeşitli önlemlerin alınması gerekir.

Bu çalışmada çelik yapıların yangına karşı dayanıklılıkları belirlenmiş ve yangın güvenlik performansları incelenmiştir. Bu amaçla ülkemizdeki çelik yapı stoğunun büyük bir kısmını oluşturan endüstriyel çelik yapı sistemleri dikkate alınmıştır. Çalışmada öncelikle mevcut bir çelik endüstri yapısının yapısal elemanları için tasarım kriterleri belirlenmiş ve yangına karşı yapısal tasarımları Avrupa Standartları (Eurocode) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapıların yangın güvenlik performansları pasif koruma yangın güvenlik yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Endüstri yapısının yapısal elemanların yangın performansları korumasız çelik eleman ve kutu, sprej kaplamalı korumalı çelik eleman olarak incelenmiştir. Çalışmada koruma malzemesi olarak incelenen kutu kaplama pasif koruma yönteminde 5mm, 10mm ve 20mm kalınlığında alçıpanel kaplamalar ve 10 mm kalınlıklı mineral lifli sprej kaplama dikkate alınmıştır. Çalışmanın sonucunda farklı pasif koruma malzemelerinin yapısal elemanlarının yangın dayanımlarına olan etkileri karşılaştırılarak en ideal çözüm yöntemi araştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: yangın, endüstriyel çelik yapılar, pasif yangın koruma, korumalı çelik, sprej kaplama.

FIRE SAFETY IN INDUSTRIAL STRUCTURE

ABSTRACT

The constructional usage of steel has been widespread due to its extraordinary mechanical features, the shortage time of the production, being economical, reliable, light and recyclable. However, that being said, in recent years the damage to the steel constructions caused by the fire has been quite extensive. Therefore some precautions had to be put in place to prevent the extreme damage caused by the fire.

In this practice, the endurance and the safety of the steel has been examined towards the fire. For this study the industrial steel structure have been used which covers most of the stocks in our country as an example. The first step in the practice was to specify the design criteria for available industrial structural element and the structural design to prevent fore has been verified using Eurocode as standard. Following this, fire safety performances for these structures have been evaluated using passive safety protection methods. The performances of the structural material which belongs to the industrial structure have been examined as non protected steel material, box and spray covered steel material in this investigation. The box covering has been taken into consideration as 5 mm 10 mm and 20 mm with thickness and gypsum board coverings and mineral fiber spray coverings with 10 mmm thickness. At the end of the practice the ideal solution has been concluded by cross-examining different passive fire protection materials endurance to the fire.

Keywords: fire, industrial steel structure, passive fire protection, protection steel, spray covering.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince bana her zaman destek olan, benimle bilgilerini ve tecrübelerini paylaşan, tecrübesiyle beni her zaman doğru bir şekilde yönlendiren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Nihan DOĞRAMACI AKSOYLAR üzerimde emeği başta olan anabilim dalı başkanımız değerli hocam Prof. İbrahim EKİZ, Prof Dr. Zekai CELEP, Dr. Öğr. Üyesi Cenk AKSOYLAR ile tüm öğretim üyelerine sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bunun yanı sıra tüm eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini üzerimden eksik etmeyen, her konuda yanımda olan aileme minnettarım.

Nisanur IŞIK

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ABSTRACT	vi
ÖNSÖZ.....	vii
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
KISALTMALAR	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1. TEZİN AMACI.....	2
1.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2. YANGIN KAVRAMI	6
2.1. YANMA.....	6
2.1.1. Yanıcı Maddeler.....	7
2.2. YANGIN SINIFLARI.....	7
2.2.1. A Sınıfı Yangınlar	8
2.2.2. B Sınıfı Yangınlar	8
2.2.3. C Sınıfı Yangınlar	8
2.2.4. D Sınıfı Yangınlar	8
2.3. YANGIN ÜÇENİ VEYA DÖRTYÜZLÜSÜ (TETRAHENDROMU).....	9
2.4. YANGIN EVRELERİ.....	9
2.5. YANGIN (SICAKLIK-ZAMAN) EĞRİSİ MODELLERİ.....	11
3. YÜKSEK SICAKLIKTA ÇELİK MALZEME ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1. ÇELİK ISIL (TERMAL) ÖZELLİKLERİ.....	15
3.1.1. Isıl Genleşme	15
3.1.2. Özgül Isı.....	16
3.1.3. Isıl İletkenlik.....	17
3.1.4. Yoğunluk	18

3.2. ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	18
3.2.1. Isıl (Termal) Şekil Değişirme.....	19
3.2.2. Sünme Şekil Değişirmesi.....	20
3.2.3. Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi.....	21
4. YANGINA KARŞI YAPISAL TASARIM	23
4.1. GİRİŞ.....	23
4.2. YANGIN GÜVENLİĞİ ESASLARI (TASARIM ESASLARI)	26
4.3. YANGIN TASARIMI.....	27
4.4. YAPISAL YANGIN DAYANIMI (YANGINA DAYANIKLILIK)	28
4.5. YAPISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ	30
4.6. YANGINA MARUZ ÇELİK ELEMANLARIN TASARIMI.....	32
4.6.1. Enkesitlerin Sınıflandırılması.....	32
4.6.2. Kiriş Tasarım Dayanımı.....	33
4.6.3. Kolon Tasarım Dayanımı.....	35
4.6.4. Kritik Sıcaklık Yöntemi	37
4.7. ÇELİK SICAKLIĞINDAKİ ARTIŞ.....	40
4.7.1. Korunmayan dâhili çelik yapı	40
4.7.2. Yangından Koruma Malzemesi ile Yalıtılmış Dâhili Çelik Yapı	43
5. ÇELİK ELEMANLARIN YANGINDAN KORUNMASI	45
5.1. YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİ	45
5.1.1. Aktif Yangın Koruma.....	45
5.1.2. Pasif Yangın Koruma	46
5.2. YANGINA DAYANIKLI YAPI.....	50
5.2.1. Kompozit Döşeme	51
5.2.2. Bütünleşik Döşeme Kirişler, (Integrated Floor Beams).....	52
5.2.3. Kısmen betona gömülü kiriş ve kolon elemanlar (Kompozit kiriş ve kolon elemanlar)	53
5.2.4. Harici Çelik Konstrüksiyon (External steelwork).....	54
6. SAYISAL UYGULAMALAR.....	56
6.1. GİRİŞ.....	56
6.2. TAŞIYICI SİSTEM TANIMI	57
6.3. TAŞIYICI SİSTEM TASARIMI	60

6.4. MEVCUT ENDÜSTRİ YAPISININ YANGIN DAYANIMI.....	60
6.4.1. Çerçeve Kirişlerinin (IPE 600) Yangın Dayanım Hesabı.....	61
6.4.2. Çerçeve Kolonları (IPE 600) Yangın Dayanımı.....	66
6.4.3. Yangın Koruma Yöntemleri ile Kiriş ve Kolon (IPE 600) Elemanların Yangın Dayanım Değerlendirilmesi	69
6.5. 2016 ÇYHTE YÖNETMELİĞİNE GÖRE KİRİŞ VE KOLON ELEMANLARIN BOYUTLANDIRILMASI.....	77
6.5.1. Çerçeve Kirişi Tasarım Hesabı.....	77
6.5.2. Çerçeve Kolonu Tasarım Hesabı.....	81
6.5.3. Çerçeve Kirişlerinin (IPE O 500) Yangın Dayanım Hesabı	85
6.5.4. Çerçeve Kolonları (IPE O 500) Yangın Dayanımı.....	90
6.5.5. Yangın Koruma Yöntemleri ile Kiriş ve Kolon (IPE O 500) Elemanların Yangın Dayanım Değerlendirilmesi.....	95
7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	103
7.1. SAYISAL UYGULAMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ	105
KAYNAKÇA	109
ÖZGEÇMİŞ.....	112

SEMBOLLER

A	: θ_i sıcaklığındaki bir enkesitin başlangıç alanı
A_m	: Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı
A_m / V	: Korunmayan çelik elamanların kesit katsayısı
A_p	: Yangından koruma malzemesinin alanı
A_p / V	: Yangından koruma malzemesinin, yapı elemanının birim uzunluğuna karşılık gelen alanı
C	: Karbon elementi
C_b	: Yanal burulmalı burkulma sınır durumunda moment düzeltme katsayısı
CO_2	: Karbondioksit
E	: Çeliğin normal sıcaklığa göre yapılan tasarımda kullanılan elastisite modülü
$E_{a,\theta}$: Yüksek sıcaklıktaki, θ_a , çelik gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde doğrusal elastik kısmın eğimi
$E_{fi,d}$: Yangında oluşan etkilerin, EN 1991-1-2'ye uygun şekilde tayin edilen ve ısı genleşmeler ile şekil değişikliklerini de içeren tasarım tesiri
F_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
F_e	: Elastik burkulma gerilmesi
F_n	: Karakteristik gerilme
H	: Hidrojen elementi
I_x	: x-x yönündeki atalet momenti
I_y	: y-y yönündeki atalet momenti

J	: Burulma sabiti
L	: İlgili kattaki bir kolonun sistem boyu
L_r	: Elastik olmayan yanal burulmalı burkulma durumu için sınır uzunluk
L_b	: Stabilitate bağlantısı ile desteklenmeyen eleman uzunluğu
L_p	: Akma sınır durumu için yanal olarak desteklenmeyen sınır uzunluk
M_d	: Tasarım momenti
$M_{b,fi,t,Rd}$: t anındaki burkulmaya direnç tasarım momenti
$M_{fi,\theta,RD}$: Mesnetlerden ısı olarak etkilenmeyen bir enkesitin t anındaki ve her noktasında aynı olan sıcaklığa, θ_a , eşit sıcaklıktaki, θ_a , tasarım direnç momenti
M_{Rd}	: Tüm enkesitin, normal sıcaklığa göre yapılan tasarımdaki plastik direnç momenti, $M_{pl,Rd}$ ve elastik direnç momenti, $M_{el,RD}$
M_n	: Karakteristik eğilme momenti katsayısı
M_p	: Plastik eğilme momenti
M_r	: YDKT ve GKT yük bileşimleri altında hesaplanan ikinci mertebe etkileri içeren gerekli
M_u	: YDKT yük bileşimi altında hesaplanan gerekli eğilme momenti dayanımı
$N_{b,fi,t,Rd}$: Basınca çalışan elemanın tasarım direnç momenti
$N_{fi,\theta,Rd}$: Çekmeye çalışan elemanın düzgün yayılı bir sıcaklıktaki, θ_a , tasarım dayanımı
P_c	: Mevcut aksenal kuvvet dayanımı (P_d)
P_n	: Karakteristik aksenal basınç kuvveti dayanımı
P_r	: YDKT veya GKT yük birleşimleri ikinci mertebe gerekli aksenal kuvvet dayanımı (P_u, N)

$R_{fi,d,t}$: Yangın anındaki taşıma gücü
V	: Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi
V_u	: Kesme kuvveti
$W_{el,x}$: x-x eksenine göre elastik mukavemet momenti
$W_{el,y}$: y-y eksenine göre elastik mukavemet momenti
$W_{pl,x}$: x-x eksenini etrafında plastik mukavemet momenti
$W_{pl,y}$: y-y eksenini etrafında plastik mukavemet momenti
a	: Çeliğin akma dayanımına bağlı hata faktörü
a_c	: Konvektif ısı transferi katsayısı
$a(t)$: Isıl genleşme katsayısı
b	: Profil başlık parçası uzunluğu
c_a	: Çeliğin özgül ısı
d	: Profil temiz açıklık
d_p	: Yangından koruma malzemesinin kalınlığı
$f_{p,\theta}$: Yüksek sıcaklıklarda, θ_a , çelik için orantılılık sınırı
f_y	: Akma dayanımı
h	: Profil yüksekliği
h_{net} $h_{net,r}$ $h_{net,c}$: Birim alana düşen net ısı akışının tasarım değeri
i	: Atalet yarıçapı
i_x	: x-x yönündeki atalet yarıçapı
i_y	: y-y yönündeki atalet yarıçapı
i_{ts}	: Tasarım atalet yarıçapı
t	: Süre

$k_{E,\theta}$: Çeliğin, t süresinde eriştiği θ_a sıcaklıktaki gerilme birim şekil değiştirme eğrisinin doğrusal elastik kısmının eğimi için hesaplanan azaltma faktörü
k_{sh}	: Gölge etkisi için düzeltme faktörü
$k_{y,\theta}$: Çeliğin, t süresinde eriştiği θ_a sıcaklıktaki akma dayanımını hesaplanan azaltma faktörü
l_{cr}	: Burkulma düzlemindeki kolon burkulma boyu
l_{fi}	: Kolonun, yangına karşı tasarımda kullanılacak burkulma boyu
s_k	: Kar ağırlığı
t_w	: Profil gövde kalınlığı
t_f	: Profil başlık parçası kalınlığı
z_i	: Plastik tarafsız eksenenden itibaren, başlangıç alanının, A_1 geometrik merkezine olan mesafe
$\Delta l / l$: Çeliğin ısı genleşmesi(uzaması)
Δt	: Süre
λ	: Yerel burkulma narinlik değeri
λ_a	: Çeliğin ısı iletkenliği
λ_p	: Kompakt elemanlar için narinlik sınır değeri
λ_p	: Yangına karşı koruma sisteminin ısı iletkenliği
$\bar{\lambda}$: Normal sıcaklıktaki boyutsuz narinlik oranı
λ_r	: Narin elemanlar için narinlik sınır değeri
$\bar{\lambda}_\theta$: Sıcaklığa bağlı boyutsuz narinlik oranı
ρ_a	: Çeliğin birim hacim kütlesi
$\Delta \varepsilon$: Şekil değiştirme değişimi
ε	: Şekil değiştirme

σ	: Gerilme
σ	: Stephen Boltzman katsayısı
$^{\circ}\text{C}$: Derece cinsinden sıcaklık (Celcius)
$\gamma_{M,0}$: Normal sıcaklıkta kullanılan malzeme özelliği için kullanılacak malzeme katsayısı
$\gamma_{M,\bar{f}i}$: Yangın esnasında gerekli malzeme özelliği için kullanılacak malzeme katsayısı
κ_1	: Enkesit boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarlama faktörü
κ_2	: Kiriş boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarlama faktörü
$\chi_{\bar{f}i}$: Yangına karşı tasarımda, eğilme burkulması için kullanılacak azaltma faktörü
$\psi_{\bar{f}i}$: $\psi_{1,1}$ veya $\psi_{2,1}$ şeklinde verilen frekans değerleri için birleşim faktörü
$\theta_{a,t}$: Çelik eleman sıcaklığı
$\theta_{g,t}$: t anındaki ortam gaz sıcaklığı
θ_g	: Yangın bölümündeki gaz sıcaklığı
θ_a	: Ortam sıcaklığı
$\Delta\theta_{g,t}$: Δt süresince ortam gaz sıcaklığı
μ_0	: $t = 0$ anındaki zorlanma derecesi
η_{fi}	: Yangın için azaltma faktörü
ρ_p	: Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi
$q_p(z)$: Rüzgar basıncı
ε_m	: Elemanın yüzey yayıcılık katsayısı
ε_f	: Alevin emisyon oranı, bir yapı açıklığından emisyon oranı
ϕ	: Konfigürasyon katsayısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1: ASTM E119 için sıcaklık- zaman değerleri	11
Çizelge 3. 1: Karbon çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde kullanılan denklemler	22
Çizelge 4. 1: Çelik yapıların yangına karşı korunmasında 3 yöntem.	27
Çizelge 4. 2: Zorlanma faktörü, μ_0 , değerleri için kritik sıcaklık	39
Çizelge 4. 3: Korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörü	42
Çizelge 4. 4: Koruma malzemesi ile kaplanmış çelik elemanlar için kesit faktörü ..	44
Çizelge 5. 1: Ön tasarım için malzeme özellikleri	50
Çizelge 6. 1: Kolon ve kiriş enkesitleri	60
Çizelge 6. 2: Normal sıcaklıkta hesaplanan iç kuvvet değerleri	61
Çizelge 6. 3: Normal sıcaklıkta hesaplanan iç kuvvet değerleri	67
Çizelge 6. 4: Çerçeve kiriş enkesit sınır değerleri.	78
Çizelge 6. 5: Çerçeve kiriş başlık parçası için enkesit sınır değerleri.	78
Çizelge 6. 6: Çerçeve kiriş gövde parçası için enkesit sınır değerleri.	78
Çizelge 6. 7: Çerçeve kolon enkesit sınır değerleri.	82
Çizelge 6. 8: Çerçeve kolon başlık parçası için Enkesit sınır değerleri.....	82
Çizelge 6. 9: Çerçeve kolon gövde parçası için enkesit sınır değerleri.	82
Çizelge 6. 10: Basınç elemanı için kritik sıcaklık değerleri	94

Çizelge 7. 1: IPE600 korumasız/korumalı kiriş elemanı yangın performans değerleri.	105
Çizelge 7. 2: IPE600 korumasız/korumalı kolon elemanı yangın performans değerleri	105
Çizelge 7. 3: IPEO500 korumasız/korumalı kiriş elemanı yangın performans değerleri.	107
Çizelge 7. 4: IPEO500 korumasız/korumalı kolon elemanı yangın performans değerleri.....	107

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1: Yangın sınıfları	7
Şekil 2. 2: Yanma üçgeni veya tetrahedromu	9
Şekil 2. 3: Yangın evreleri grafiği	10
Şekil 2. 4: ASTM E119 eğrisi.....	11
Şekil 2. 5: Standart sıcaklık-zaman eğrisi (ISO 834) .	12
Şekil 2. 6: ASTM E119 ile ISO 834 eğrilerinin karşılaştırma.....	13
Şekil 2. 7: Harici yangın eğrisi.	13
Şekil 2. 8: Hidrokarbon sıcaklık-zaman eğrisi.	14
Şekil 3. 1: Çeliğin sıcaklığa bağlı olarak değişen bağıl ısıl genleşmesi (uzaması) ..	16
Şekil 3. 2: Çeliğin sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri .	17
Şekil 3. 3: Çeliğin sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik değerleri	18
Şekil 3. 4: Sünme (Gerilme) sıcaklık eğrileri .	20
Şekil 3. 5: Sıcak haddelenmiş çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	21
Şekil 3. 6: Karbon çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi .	22
Şekil 4. 1: Alternatif tasarım türleri	25
Şekil 4. 2: Yangına maruz yapıların mekanik davranışları için farklı tasarım yaklaşımları	30

Şekil 4. 3: Çapraz bağlı çerçevelerde kolonların burkulma boyları .	37
Şekil 5. 1: Yangın dedektörü ve alarm butonu .	46
Şekil 5. 2: Sprinkler cihazı ve çalışma sistemi .	46
Şekil 5. 3: Şişen boyaların uygulama katmanları ile ısı etkisindeki davranışı	49
Şekil 5. 4: Kiriş üst başlığına oturan ön üretimli beton döşeme	51
Şekil 5. 5: Kompozit döşeme	52
Şekil 5. 6: Asimetrik bütünleşik kiriş detayları	53
Şekil 5. 7: Bütünleşik üretilen kiriş	53
Şekil 5. 8: Kısmen betona gömülü kiriş elemanı	54
Şekil 5. 9: Kısmen betona gömülü kolon elemanı	54
Şekil 6. 1: Sistemin 3 boyutlu (izometrik) görünümü	57
Şekil 6. 2: Sistem ön cephe görünümü .	58
Şekil 6. 3: Sistem cephe görünümü	59
Şekil 6. 4: Sistem çatı planı .	59
Şekil 6. 5: S235 çeliği IPE 600 profil enkesiti ve geometrik özellikleri	61
Şekil 6. 6: Korumasız IPE 600 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.	66
Şekil 6. 7: IPE 600 enkesiti ve geometrik özellikleri	67
Şekil 6. 8: Korunmasız IPE 600 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.	69
Şekil 6. 9: 5 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.	71
Şekil 6. 10: 10 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.	72
Şekil 6. 11: 20 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.	73
Şekil 6. 12: 10 mm spreycaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.	75

Şekil 6. 13: Çelik kiriş (IPE 600) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.....	76
Şekil 6. 14: Çelik kolon (IPE 600) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.....	76
Şekil 6. 15: IPE O 500 enkesiti ve geometrik özellikleri .	77
Şekil 6. 16: IPE O 500 enkesiti ve geometrik özellikleri	81
Şekil 6. 17: Korumasız IPE O 500 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.....	90
Şekil 6. 18: Korumasız IPE O 500 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.....	94
Şekil 6. 19: 5 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.	97
Şekil 6. 20: 10 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.	98
Şekil 6. 21: 20 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.	99
Şekil 6. 22: 10 mm spreyl kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.....	100
Şekil 6. 23: Çelik kiriş (IPE O 500) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.....	101
Şekil 6. 24: Çelik kolon (IPE O 500) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.....	101

KISALTMALAR

CTIF.	International Technical Committee for the Prevention and Extinction of Fire
LPG.	Likit petrol gazı
KKT.	Kuru kimyavi tozlu
ISO.	International Organization for Standardization
ASTM.	American Society for Testing and Materials
ABD.	Amerika Birleşik Devletleri
TS.	Türk standartları
EUROCODE.	European Standards
vb.	ve benzeri
örn.	örneğin
ÇYHTE.	Çelik Yapıların Tasarım Hesap ve Yapım Esasları
DBYHY.	Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik
SCI.	Science Citation Index
TS 498.	Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri

GİRİŞ

Dünya genelinde her yıl meydana gelen yangınlar binlerce can kaybına ve yüksek maddi hasarlara neden olan yıkıcı güce sahip afetlerdir. Uluslararası Yangın Önleme ve Söndürme Derneği (Comité Technique International de prevention et d'extinction de Feu / CTIF) tarafından her yıl 70 farklı ülkede yangından, ölen, yaralanan kişi sayıları ve yangın tipleri gibi birçok veriyi içeren yangın istatistikleri yayımlanmaktadır. Dünyada meydana gelen yaklaşık yıllık 4 milyon yangında ortalama 40 bin kişi hayatını kaybetmektedir [1]. Avrupa'da yapılan çalışmalarda ise yılda meydana gelen 2 milyon yangının %90'ının binalarda gerçekleştiği belirtilmiştir [2].

İstanbul'da son 5 yılda oluşan yangınlar incelendiğinde yıllık ortalama 15 bin yapısal ve 10 bin yapısal olmayan yangın olmak üzere toplamda yıllık 25 bin yangın meydana gelmiştir. Son 5 yılda meydana gelen yapısal yangınlarda daha önceki 5 yıla göre %12,5 artış meydana gelmiştir. Konut yangınlarında %7,4 artış meydana gelirken fabrika yangınlarında bu artış %22 olmuştur [3].

Yapılarda meydana gelen yangınlar can güvenliği açısından önemli bir tehdit oluşturduğundan, insanlar evlerinin ve iş yerlerinin beklenmeyen yangına karşı yeterli güvenliğe sahip olmasını beklerler. Yangında meydana gelecek kayıp risklerini sınırlandırarak en aza indirmek yapının tasarım ve yapım aşamasındaki birçok faktöre bağlıdır. Bunlar arasında yangının binanın diğer kısımlarına ve komşu binalara yayılmasının önlenmesi ve bina sakinlerinin tahliyesi için gerekli süre boyunca yapı elemanlarının çökmemesi sayılabilir.

Endüstriyel bina yangınları içlerinde bulunan ya da depolanan malzemelere bağlı olarak konut ve diğer bina yangınlarından farklılık gösterebilirler. Bu tip binalar genellikle tek katlı, geniş açıklıklı ve yüksek tavanlardan oluşan sistemleri içerir. Endüstri yapıları genellikle 20-50 m açıklıklı, 2° ile 15° arasında değişen çatı eğimine sahip çerçevelerin 5-10 m aralıklarla yerleştirilmesiyle oluşturulurlar. Bu yapıların

yangına karşı yapısal tasarım stratejileri hakkında literatürde farklı görüşler mevcuttur [4]. Tek katlı endüstriyel yapılarda kontrolsüz bir yangın başlangıçta mevcut havalandırma ile sınırlandırılır ancak çatı pencereleri eridikten ve en sonunda da tavan çöktükten sonra yangın kontrollü hale gelir [4]. Çelik endüstriyel yapıları yangına karşı dayanıklı olmadığından tam gelişmiş yangınlarda genellikle çökerler. Endüstriyel binaların yangın güvenliğinde temel hedefi yangının binanın diğer kısımlarına ve komşu binalara yayılmasının önlenmesi ve yapı elemanlarının insanların tahliyesi için gerekli süre boyunca yük taşıma işlevlerini yerine getirmesidir.

1.1. TEZİN AMACI

Dünyada ve ülkemizde meydana gelen yangınların can ve mal kayıpları ile sonuçlanmasının sebebi güvenlik önlemlerinin ya hiç ya da yeterli seviyede olmamasından kaynaklanmaktadır. Yapılarda yangın güvenliğinin öncelikli hedefi yangın oluşma riskini en aza indirerek olası hasarın azaltılmasıdır. Bu amaçla yangın güvenliğinin sağlanmasında başvurulan temel iki yöntem, aktif koruma ve pasif korumadır.

Binaların yangın güvenliğini sağlamak ve yangına dayanıklı tasarlayabilmek için dünyanın farklı bölgelerinde (Amerika, Avrupa, Japonya, Avusturya vb.) kullanılan yangın yönetmelikleri mevcuttur. Ülkemizde hali hazırda kullanılmakta olan yangın yönetmeliği de diğer ülke yönetmelikleri seviyesinde olmamakla birlikte aktif yangın güvenliği dışında binaların yangına dayanıklı tasarlanması üzerine yeterli bilgiyi içermemektedir. Bu nedenle Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'teki [5] eksikliklerin giderilerek uluslararası seviyeye çıkarılması için çalışmalar devam etmektedir [6].

Günümüzde Türkiye'deki yapı stoğunun sadece %20 sinde yangın güvenlik önlemlerinin alınmış olduğu ve kalan %80 maalesef yeterli yangın önlemlerinin bulunmadığı akademisyenler ve sektör çalışanları tarafında ifade edilmektedir [7]. Bunun en önemli nedenlerinden birisi de yapıların yangın güvenliği için ülkemize özel bir yangın standardının olmamasıdır.

Bu çalışma kapsamında çelik yapıların yangın güvenliklerinin yeterliliği araştırılmıştır. Bu amaçla ülkemizdeki çelik yapı stoğunun büyük bir kısmını oluşturan

endüstriyel çelik yapı sistemi dikkate alınmış ve yangına karşı dayanımı incelenmiştir. Çalışmada öncelikle normal şartlar altında tasarlanmış çelik endüstri yapısının yapısal elemanları için tasarım kriterleri belirlenmiş ve yangına karşı yapısal tasarımları Avrupa Standartları (Eurocode) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yapıların yangın güvenlik performansları pasif koruma yangın güvenlik yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmanın son kısmında farklı pasif koruma malzemelerinin endüstriyel çelik yapı elemanlarının yangın dayanımlarına olan etkileri karşılaştırılarak optimum çözüm sunulmuştur.

1.2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Çelik yapı sistemlerinin üstün mekanik özellikleri ekonomik, güvenilir, hafif, yapım süresinin kısalığı ve yeniden kullanılabilen bir malzemeden oluşması nedenleriyle kullanımı son yıllarda hızla yaygınlaşmıştır. Ancak çelik yapı elemanları normal şartlar altında yüksek mukavemet ve rijitlik göstermelerine rağmen ortam sıcaklığının artmasıyla bu özelliklerini hızlı bir şekilde kaybetmektedirler. Bu durum ulusal ve uluslararası literatürde büyük bir ilgi doğurmuş ve araştırmacılar tarafından çelik yapıların yüksek sıcaklıklardaki davranışı üzerine birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde çelik yapıların yangın dayanımı ile ilgili yapılan bazı çalışmalar incelenerek sunulmuştur.

Wong S. 2001 çalışmasında çelik çerçeve endüstri yapılarının yangın etkisindeki davranışı incelemiştir. Çalışma iki aşamadan oluşmuş ilk aşamada endüstriyel çelik çerçeveler ve üç adet yangın testi yapılarak yangın parametreleri belirlenmiştir. İkinci aşamada Sheffield Üniversitesi tarafından geliştirilen doğrusal olmayan sonlu eleman programı VULCAN kullanarak parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sonucunda yangın etkisindeki endüstriyel çelik çerçevelerin kritik sıcaklık değerini tahmin etmek için basit bir hesaplama yöntemi önermişlerdir [8].

Demirel F. ve Özkan E. 2003, yılında yapmış oldukları çalışmada yangının çelik yapı bileşenleri üzerindeki etkilerini sergileyerek, çelik yapı bileşenlerinde uygulanan pasif yangın güvenlik önlemleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yangın sınıflarına göre pasif koruma yöntemlerinin etkilerine değinilmiştir [9].

Sanrı I. 2004 yılında yapmış olduğu çalışmada, çelik yapı elemanlarının kritik sıcaklıklarının belirlenmesinde kullanılan yöntemleri açıklanmış ve çeliğin yüksek sıcaklık etkisindeki termal, mekanik özellikleri ve davranışı incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda çelik çerçevelerin yangın etkisi altında dayanımını belirlemek için üst sınır teoreminin (Upper Bound Theorem) hızlı bir yöntem olarak kullanılabilceği, ancak ikinci derece analiz yönteminin (Second Order Analysis) kritik sıcaklıktan emin olabilmek için uygulanması gerektiğini, bunun yanı sıra çerçeve sistemin stabilitesinin sadece eksenel yük büyüklüğünden değil, aynı zamanda sıcaklık artışından etkilendiğini ifade etmektedir [10].

Song Y. 2008 çalışmasında yangına maruz endüstriyel çelik çerçeve yapıların davranışı detaylı olarak incelenmiştir. Çalışma yeni bir sayısal modelin geliştirilmesi, geliştirilen model kullanılarak parametrik çalışmaların yapılması ve yangın etkisindeki endüstri yapının göçme mekanizmasına dayanan basit bir tasarım prosedürünün geliştirilmesi adımlarından oluşmuştur. Çalışmanın sonucunda önerilen yeni tasarım metodu sayısal testlerle ve mevcut yönetmelik tasarım şartlarıyla karşılaştırılmıştır [11].

Uzbaş B. 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada, yangın koruma yöntemlerinden biri olan fireproof uygulamasını endüstriyel çelik yapılarda incelemiştir. Bu amaçla fireproof uygulamasında kullanılacak uygun beton özellikleri araştırılmış ve bunların uygulama yöntemleri incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yazar tarafından fireproof betonu olarak hafif betonların kullanımı yaygınlaştırılması, çelik lif gibi katkı malzemelerinin kullanılması yangına maruz kalan çelik yapıların dayanımını olumlu yönde geliştireceği ifade edilmiştir [12].

Özerk Doğan D. 2010 yılında yapmış olduğu çalışmada fabrika ve iş merkezi olarak kullanılan 2 tip çelik yapıda yangına karşı korumada kullanılan 3 farklı pasif koruma yöntemi maliyet açısından karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda çelik yüzey alanları ile yangından koruma yöntemleri maliyeti arasında bir ilişkinin olduğu görülmüş ve m^2 'de 33 kg'dan az çeliğin kullanıldığı binalarda püskürtme sıvanın daha ekonomik olduğunu, 33 kg'dan fazla çelik kullanılan binalarda ise fiber sement plaka ile kaplamanın daha ekonomik sonuç verdiği bulunmuştur [13].

Yazgan M. 2010 yılında hazırlamış olduğu çalışmasında, yangın geçirmiş çelik binaların dayanımında meydana gelebilecek değişimleri saptamaya çalışmıştır. Bu amaçla mevcut bir çelik binada farklı katlarda ve farklı derecelerde olası yangın senaryoları üzerinde durarak meydana gelmesi muhtemel değişiklikler incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda yazar tarafından yangın esnasında dayanımda ve rijitlikte ortaya çıkan azalmaların olduğu katlara göre oranları bulunmuştur [14].

Dünder U. 2013 yılında yapmış olduğu yüksek lisans çalışmasında çelik yapılarda yangın nedeniyle oluşan ilave yükleri dikkate alarak yapısal elemanların yangın etkisindeki davranışını incelemiştir. Hem SAP2000 hem de SAFIR programları kullanılarak yangından dolayı yapısal elemanlardaki değişimler her bir zaman aralığında hesaplanmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır [15].

Ülkemizde son yıllarda çelik yapıların yangına karşı korunması yöntemlerinin incelendiği en önemli yayınlardan biri olan Eren Ö. ve Güzelçoban Mayuk S. tarafından 2013 yılında yapılmıştır. Bu yayında çelik yapıların yangına karşı koruma yöntemleri ve çelik yapı taşıyıcı elemanları, yangına dayanım süreleri açısından birbirleriyle karşılaştırılmış ve incelenmiştir. Bu amaçla çalışmada çelik yapılarda aktif, pasif ve diğer koruma yöntemleri ele alınmış ve dayanım süreleri açısından karşılaştırılmıştır. Yazarlar çalışmanın sonucunda, çelik yapılarda koruma yöntemlerinde seçim yaparken yangına dayanıklılık süresi, maliyet, yapının boyutları vb. özellikler gözünde bulundurulması gerektiğini ifade etmişlerdir [16].

McIntosh P. ve Farid M. 2014 yılında yapmış oldukları çalışmada, çelik yapılardaki yangın kaynaklı göçme riskini azaltmak için, uygulanan mevcut koruma yöntemlerini geliştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma da magnezyum hidroksitin kullanıldığı yeni bir yangın koruma sistemi geliştirilmiş ve deneylerle daha sonra önerilen yeni koruma yöntemi beton kaplama, boşluklu alçı panel kaplama gibi mevcut koruma yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Bu amaçla çelik yapı elemanları ile alçı panellerin arasına magnezyum hidroksit doldurulan birbiri ile tamamen aynı on numune üzerinde deneyler yapılmıştır. Çalışmanın sonucunda yazarlar magnezyum hidroksitin eklenen koruma yönteminin iki pozitif etkisinin olduğuna değinmişlerdir. Bunlardan ilki sistemin termal kütlelerini artırması, ikincisi ise endotermik ayrışmadan dolayı ısıyı uzaklaştırması olarak verilmiştir [17].

2. YANGIN KAVRAMI

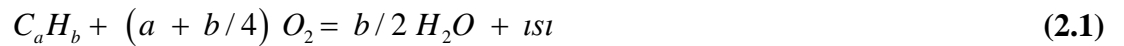
Yangın, yanıcı özelliğe sahip katı–sıvı–gaz gibi her faz halinde olabilen maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Yanıcı madde de tutuşma olayı genellikle ateşleyici bir unsurla karşılaştığında bazen de farklı sebeplerle kendiliğinden meydana gelebilmektedir. Yanıcı maddelerin yanma olayı ısı iletimi, ısı tutma yeteneği, ısı geçirgenlik, ısıl atalet ve genişleme kavramlarıyla ilişkilidir [18].

Her malzemenin ısı iletkenliği birbirinden farklı değerlere sahiptir. Malzemelerin genişmeleri de bu özelliklere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Isı enerjisinin, sıcaklıkları farklı iki ortam arasında birinden diğerine geçişi ısı iletimi (kondüksiyon), ısı taşınımı (konveksiyon), ısı ışınımı (radyasyonu) şekilde oluşmaktadır [19].

Yanma olayının gerçekleşmesi için gerekli olan oksijen elementi atmosferde %21 oranında bulunan herhangi bir koku veya rengine sahip olmayan bir gazdır. Oksijenin atmosferde sahip olduğu bu oran farklı alanlarda değişkenlik gösterse de yangının meydana gelebilmesi için yeterlidir. Ancak yanmanın sürdürülebilmesi için ortamda, gaz yangınlarında %12, katı ve sıvı yangınlarında ise %16 oranında oksijen elementinin bulunması gerekmektedir [20].

2.1. YANMA

Yanıcı özelliğe sahip maddelerin belirli bir sıcaklığın etkisiyle oksijen ile tepkimeye girmesi sonucu meydana gelen ekzotermik (ısı veren) bir reaksiyondur. Yanma olayı gerçekleştikten sonra ortamda ısı, ışık ve duman oluşması muhtemeldir [20].



Yanma reaksiyonu sonucu Denklem 2.1' de de gösterildiği gibi ısı açığa çıkar. Isı yanma olayının oluşumu için gerekli olan en önemli etkendir. Hayatın olağan akışında yanıcı madde ve oksijen teması sürekli mümkündür. Ancak yanmayı başlatacak asıl unsur ısıdır.

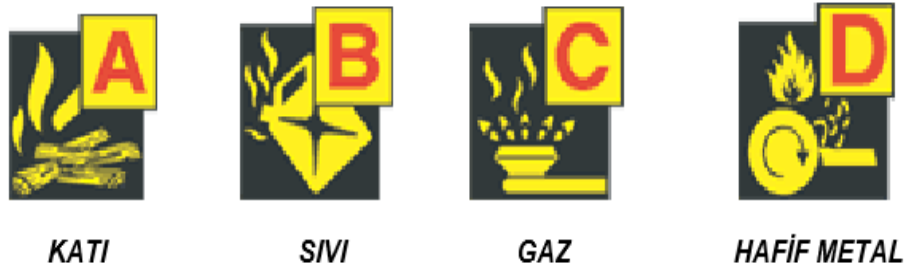
2.1.1. Yanıcı Maddeler

Nükleer yangınların dışında genellikle yangın olayına sebebiyet veren her türden organik özelliğine sahip maddeler yanıcı madde olarak kabul edilirler. Bu maddelerin yapısında; Karbon, Hidrojen, Kükürt, Fosfor ve Azot gibi elementler bulunmaktadır. Yanıcı maddeler doğada ‘katı, sıvı ve gaz’ olmak üzere üç halde bulunur [20].

Katı yanıcı maddeler; belirli bir kütleleri olup ısı etkisi ile gaz veya buhar çıkartan maddelerdir. Sıvı yanıcı maddeler; sıvı maddeler ısı ile önce buhar olur daha sonra yanar. Yanan kısım sıvının yüzeyindeki buharıdır. Gaz yanıcı maddeler; bu maddeler gaz halinde oldukları için hızlı yanma reaksiyonu göstermektedir. Gazların kapalı hacimlerdeki kaçakları, kıvılcım ile karşılaştığında patlamaya neden olabilmektedir. Gazların belirli bir patlama limiti vardır. Bunlar alt patlama limiti ve üst patlama limiti olarak adlandırılır [20].

2.2. YANGIN SINIFLARI

Her yangının sınıfını gösteren birtakım semboller, işaretlemeler vardır. Bu semboller söndürme cihazı ve madde ambalajlarının üzerinde bulunur. Şekil 2.1’de de gösterildiği gibi semboller ile maddenin hangi yangın sınıfında etkili olduğunu göstermektedir.



Şekil 2. 1: Yangın sınıfları [20].

2.2.1. A Sınıfı Yangınlar

Bu türdeki yangınlar genellikle maddenin katı halinde bulunan malzemelerin sebep olduğu yangınlardır. Ancak metal malzemelerin oluşturduğu yangınlar bu sınıfa dahil değildir. A sınıfı yangınlarda, yanan maddelerin kimyasal yapısına bağlı olarak çok yoğun karbon monoksit ve benzeri yanıcı, boğucu ve zehirleyici gazlar açığa çıkar.

2.2.2. B Sınıfı Yangınlar

Yanabilme özelliğine sahip sıvı fazdaki maddelerin neden olduğu yangın türüdür. Akaryakıt ve alkol yangınları bu gruptaki yangınlar içerisinde yer almaktadır [20].

Akaryakıt yangınları günlük yaşamda kullanımı yaygın olan benzin, gaz yağı, motorin, uçak yakıtı ve fuel-oil gibi ham petrolden meydana gelir. Yanıcı ve akıcı olduklarından bu maddeler akaryakıt olarak adlandırılır [20].

2.2.3. C Sınıfı Yangınlar

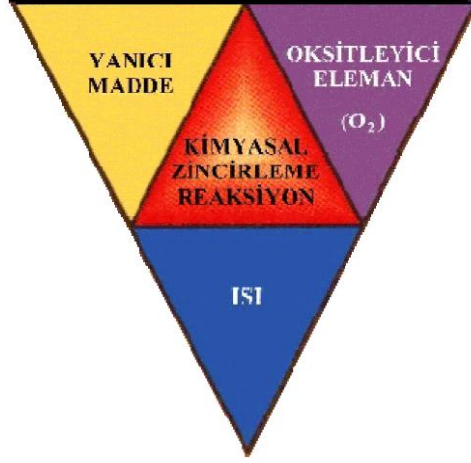
Maddenin gaz halinin sebep olduğu yangın türleridir. Hızlı yayılabilen tehlikeli olarak nitelendirilen yangın sınıflarından birisidir. Likit petrol gazı (LPG), havagazı, doğalgaz ve hidrojen vb. gazların oluşturduğu yangınlar bu sınıfta yer alır. C sınıfı yangınlar alevlidir ve patlama ile karşılaşma ihtimali oldukça yüksektir. C sınıfı yangına neden olan gazların oksijenle temasları olmaması gerekir. Aksi takdirde patlama şeklinde büyük yangınlara oluşturabilirler. Patlama ve parlama sırasında oluşan yüksek basınç, ısı ve alev yangının kısa zamanda yüksek hızla gelişmesine sebep olur. Bu tarz yangınlarda KKT, CO₂ uygulanabilir [20].

2.2.4. D Sınıfı Yangınlar

Metallerin sebep olduğu yangınlardır. Bu grupta çoğunlukla yangına sebep olan metaller magnezyum, sodyum, potasyum, alüminyumdur. Genellikle alev oluşturmazlar. Ortalama 2000–2500 °C derecede yanma oluşacağı için bu sınıftaki yangınları söndürmek için su, CO₂, KKT gibi malzemeler kullanılmaz. Bu sınıftaki yangınları söndürebilmek için hafif metal söndürme tozları (d tozu), kuru kum ve döküm talaşı tercih edilmelidir. D sınıfı yangınlarda bunların yanı sıra soğutma ve ayırma gibi kimyasal müdahalelerle de söndürme yapılabilir [20].

2.3. YANGIN ÜÇGENİ VEYA DÖRTYÜZLÜSÜ (TETRAHENDROMU)

Yanma olayının oluşabilmesi için yanıcı madde, ısı ve oksijenin aynı ortamda bulunması gerekmektedir. Bu üç unsurun bir araya gelmesiyle Şekil 2.2’de gösterilen yangın üçgeni oluşur. Bu reaksiyon bir tür kimyasal zincirleme reaksiyondur [20].



Şekil 2. 2:Yangın üçgeni veya tetrahendromu [20].

2.4. YANGIN EVRELERİ

Doğal bir yangının gelişimi genellikle tutuşma öncesi (pre-flashover), tutuşma sonrası (post-flashover) ve sönme (decay) olarak üç temel safhada tanımlanabilir. Literatürde yapılan farklı çalışmalarda da ateşleme ve büyüme safhaları genellikle tutuşma öncesi (pre-flashover) veya büyüme olarak adlandırılırken, bir sonraki safha tam gelişmiş (olgunlaşmış), etkin yanma veya tutuşma sonrası (post-flashover) olarak adlandırılmaktadır [11].

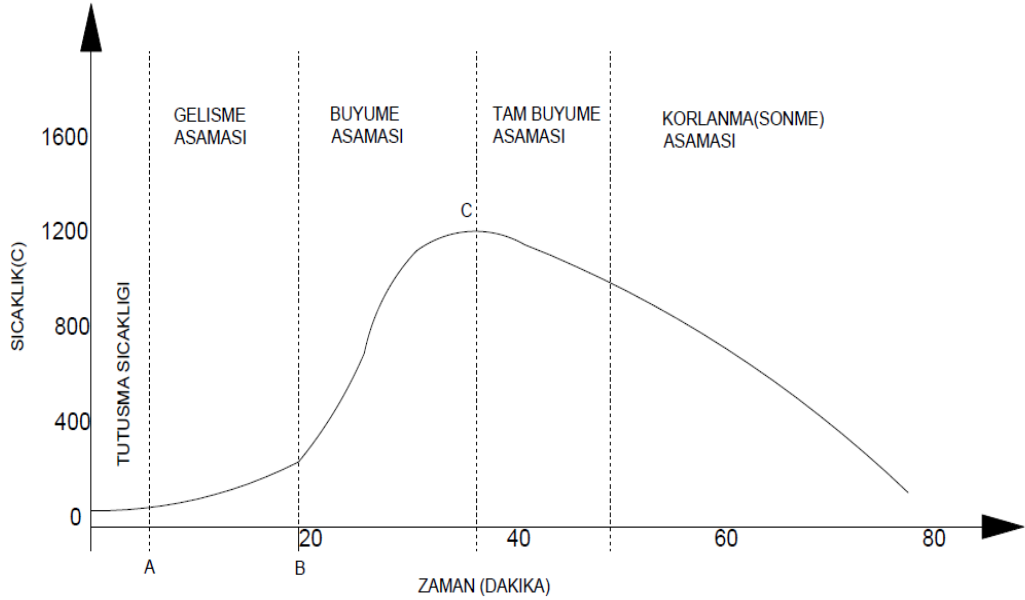
Tutuşma; yanma reaksiyonunun ilk aşaması olarak bilinir. Bu aşamada yanma reaksiyonunun gerçekleşeceği ortamda sıcaklık artışı çok yüksek derecelere varmadığından yangın henüz başlamamıştır.

Gelişme; bu aşamada yanma reaksiyonunun başladığı alanın büyüklüğü, yanıcı madde miktarının fazlalığı ve ısının yayılması yangının gelişmesine sebebiyet vermektedir. Bunun yanı sıra yanma reaksiyonu gerçekleştiği alan küçük ise, ışıma ile ısı, ortamdaki duvar ve tavanların tekrar yangına dahil olmasına neden olarak yanma reaksiyonunu hızlandırır.

Büyüme (Parlama-Flashover); ısı üretimi ve sıcaklık artışının meydana geldiği ve sürekli olarak artış gösterdiği aşamadır. Bu aşamada yangın meydana geldiği alanın tamamına yayılır. Yangın evrelerinden büyüme (parlama-flashover) evresi dikkate alınarak yangın mukavemeti hesabı yapılması gereklidir.

Tam büyüme; bu aşamada yangının meydana geldiği alandaki oksijen miktarı %15'in altındadır. Ortamda, yanma reaksiyonunu gerçekleştirecek miktarda oksijen yoktur. Ancak, eğer ortamda yanıcı madde oranı ve ısı yüksek ise yanma reaksiyonu devam eder. Eğer kontrol edilemeyen bir şekilde ortama oksijen girişi olursa patlama oluşma olasılığı yüksektir [13].

Tutuşma Sonrası (Korlanma ,Sönme); yanma olayının gerçekleştiği alanda yanıcı madde tükenme noktasına ulaştı ise bu evreye geçilmiştir. Yangın esnasında oluşan alevler etkinliğini yitirmeye korlaşmaya başlamıştır. Bu safhada ortamda bulunan sıcaklık azalmaya başlar, ancak eğer yapı elemanlarına zarar verecek sürede yanma olayı meydana gelmişse yüksek sıcaklığın etkinliği devam ettiğinden tahripkâr etkisi sürecektir. Şekil 2.3'te yangın evreleri verilmektedir.



Şekil 2. 3: Yangın evreleri grafiği [13].

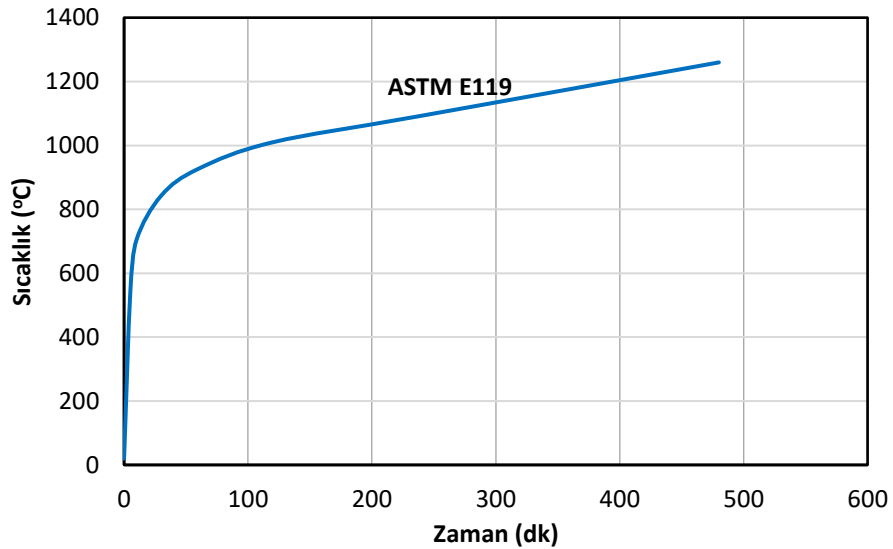
2.5. YANGIN (SICAKLIK-ZAMAN) EĞRİSİ MODELLERİ

Malzemelerin yangın esnasındaki dayanıklılıkları zaman ve sıcaklığın etkisine bağlı olarak değişim göstermektedir. Yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının yangın performansını değerlendirmek 100 yıldan uzun süredir yangına dayanıklılık testleri yapılmaktadır. Kayıtlara geçen ilk testler İngiltere, Almanya ve ABD’de gerçekleştirilmiş olsa da dünyanın birçok yerinde konuyla ilgili çalışmalar yapılmaya devam etmektedir. Yangına dayanıklılık testlerinde kullanılan zaman-sıcaklık eğrisine standart bir yangın senaryosunu temsil etmektedir. En yaygın kullanılan standart testlerin başında ASTM E119-20 [21] ve ISO 834 [22] verilebilir.

Yangına dayanıklılık testi için ilk standart olan ASTM standardı C19 (şimdi E119), 1918 yılında yayımlandı. ASTM E119’da standart yangın eğrisi, bir denklem yerine bir dizi nokta ile tanımlanmıştır (Çizelge 2.1). ASTM E119 yangın eğrisinin gerçek bir yangın senaryosunu temsil etmesi amaçlanmamıştır. Bunun yerine binalarda yangın süresince oluşabilecek maksimum sıcaklık değerlerini temsil eden zarf eğrisidir (Şekil 2.4). ASTM E119 yangın eğrisine benzer eğriler “Uluslararası Standart Örgütü” (ISO) gibi farklı kuruluşların standartlarında da kullanılmaktadır.

Çizelge 2. 1: ASTM E119 için sıcaklık- zaman değerleri [21].

θ (°C)	20	538	704	843	927	1010	1093	1260
t (dakika)	0	5	10	30	60	120	240	480



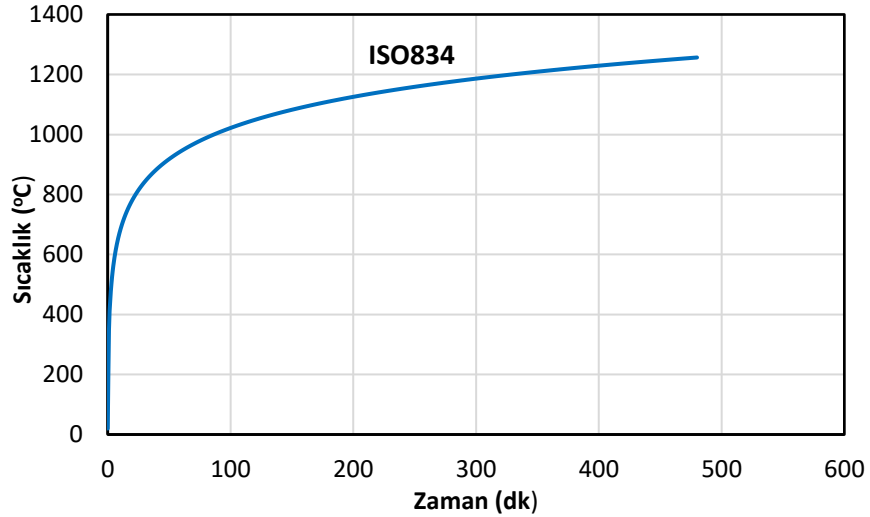
Şekil 2. 4: ASTM E119 eğrisi.

Genellikle sıcaklık-zaman eğrisi yaklaşımlarında farklı yakıt tipleri ve havalandırma koşulları gibi çeşitli faktörleri içeren üç farklı yaklaşım söz konusudur. TS EN 1991-1-2, 2004 [23] yönetmeliğinde bu yaklaşımlar standart, harici ve hidrokarbon sıcaklık-zaman eğrisi olarak verilmiştir. Tüm modellerde t geçen süreyi (dakika), θ_g yangın bölümündeki gaz sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) ifade etmektedir.

Standart sıcaklık zaman eğrisi (ISO 834'e göre)

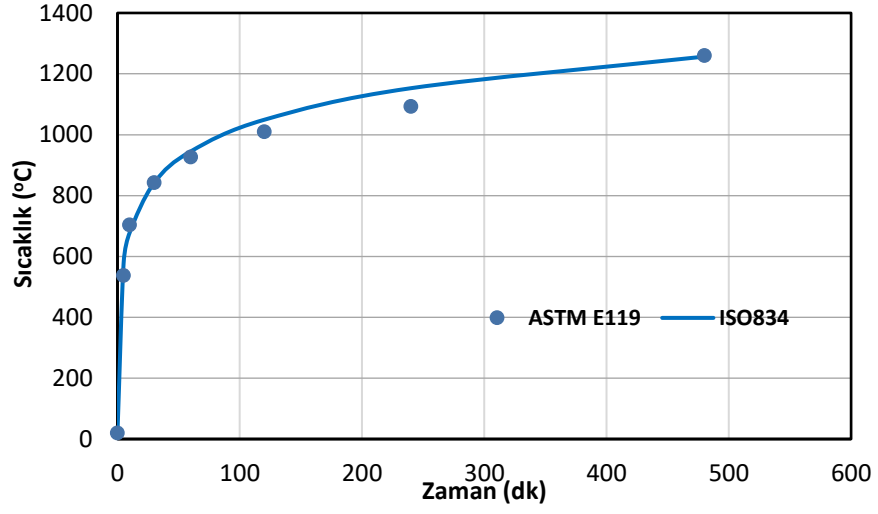
Bu yangın eğrisi modeli birçok mühendislik uygulamalarında genellikle yangına ilişkin ek bilgi bulunmadığında kullanılmaktadır. Bu modelin ana özellikleri yangının tüm bölmede (bölme büyük olsa bile) aktif olduğu varsayılır, bölmenin gerçek boyutundan bağımsızdır, tüm yanıcı maddeler tükendikten sonra bile yangın asla sönmez; kopartmanın yangın yüküne veya havalandırma koşullarına bağlı olmaması sayılabilir. Standart sıcaklık-zaman eğrisi aşağıdaki denklemde verilmiş ve bu denklem ile elde edilen eğri Şekil 2.5'te sunulmuştur.

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2.2)$$



Şekil 2. 5: Standart sıcaklık-zaman eğrisi (ISO 834) [22].

ASTM E119 yangın eğrisi ile standart sıcaklık-zaman eğrisinin (ISO 834) karşılaştırılması Şekil 2.6'da verilmiştir.

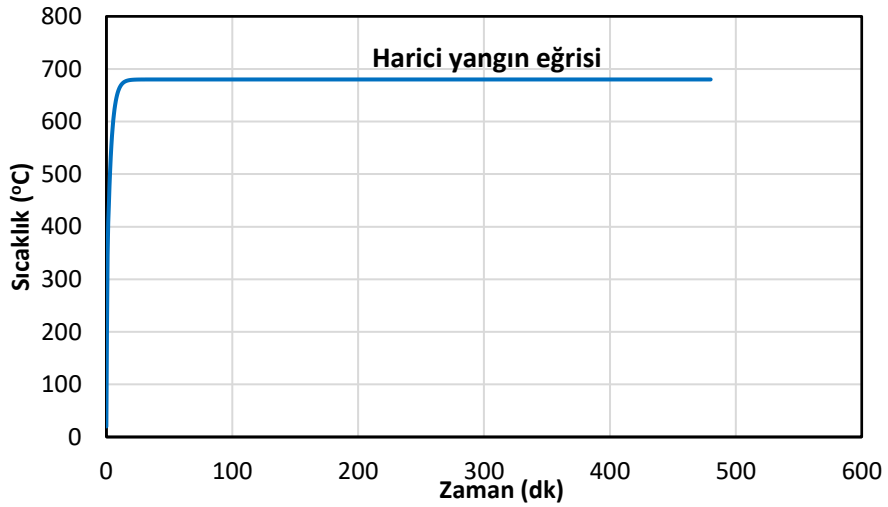


Şekil 2. 6: ASTM E119 ile ISO 834 eğrilerinin karşılaştırma.

Harici yangın eğrisi

Bu yangın eğrisi modeli, duvarların içinde kalan bölmedeki yangından çıkan dumanlara maruz ayırma duvarlarının dış yüzeylerinde kullanılır. Nispeten düşük sıcaklıkları karakterize ettiği için yüksek sıcaklıklara maruz bölmeyi çevreleyen yapısal elemanlarda kullanılmamalıdır. TS EN 1991-1-2, 2004 [23] yönetmeliğinde harici yangın eğrisi aşağıdaki eşitlikle tanımlanmış ve bu eşitlik kullanılarak elde edilen eğri Şekil 2.7’te verilmiştir.

$$\theta_g = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \quad (2.3)$$

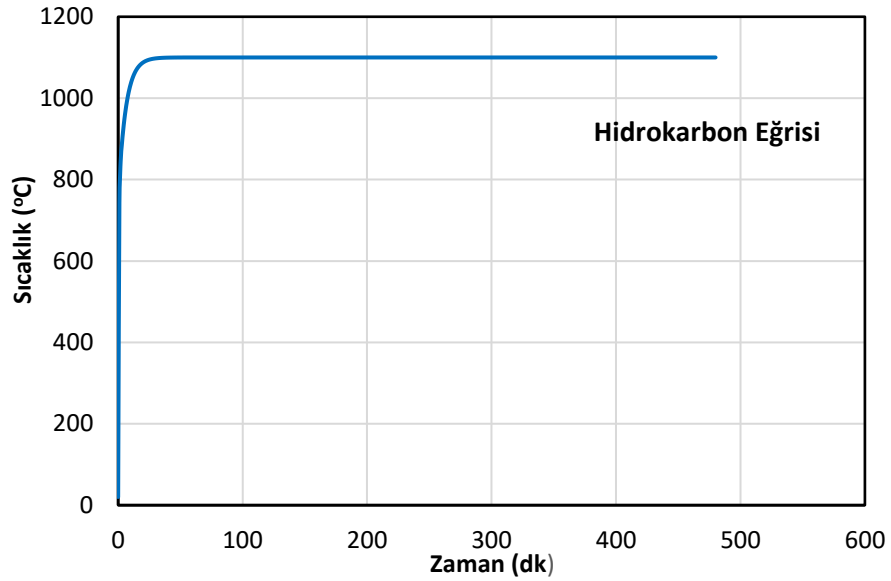


Şekil 2. 7: Harici yangın eğrisi.

Hidrokarbon eğrisi

Bu yangın eğrisi modeli, madeni yağ rafinerileri ve petrokimya tesislerinde işlenen hidrokarbonların (petrol gazı, doğal gaz, kimyasallar vb.) ve hidrokarbon ürünlerin tutuşmasından kaynaklanan yangın tehlikelerine uygulanabilir ve önemli ölçüde yüksek sıcaklıklarla karakterize edilir. Hidrokarbon eğrisi örneğin araç yakıt depoları, petrol veya yağ tankerleri, bazı kimyasal tankerler vb. gibi küçük petrol yangınlarında uygulanabilmektedir. Hidrokarbon eğrisinin denklemi TS EN 1991-1-2, 2004 [23] yönetmeliğinde aşağıda verilen eşitlikle tanımlanmış ve bu eşitlik kullanılarak elde edilen eğri Şekil 2.8’te verilmiştir.

$$\theta_g = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad (2.4)$$



Şekil 2. 8: Hidrokarbon sıcaklık-zaman eğrisi.

3. YÜKSEK SICAKLIKTAKİ ÇELİK MALZEME ÖZELLİKLERİ

Yangından dolayı oluşan yüksek sıcaklığa maruz yapıların davranışları, yapıyı oluşturan malzemelerin ısı (termal) ve mekanik özellikleriyle tanımlanır. Yapısal çelik malzemeleri yüksek sıcaklıklarda iç yapısını, bileşimini ve özelliklerini değiştiren fiziksel ve kimyasal bir sürece maruz kalmaktadırlar. Yangın etkisindeki çelik elemanlarda meydana gelen sıcaklık artışını tahmin edebilmek için ısı (termal) özelliklerin bilinmesi gerekmektedir. Bu özelliklerin belirlenmesi için test yöntemi, sıcaklık değişimi, ısıtma hızı ve uzama (strain) hızı gibi koşullara bağlıdır [24].

Mekanik davranışının belirlenmesinde ise çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisine ihtiyaç vardır. Bu ilişkiden elastisite modülü, akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve sünme davranışı hakkında bilgi edinilmektedir.

3.1. ÇELİK ISIL (TERMAL) ÖZELLİKLERİ

3.1.1. Isıl Genleşme

Çelik ısıtıldığında genişler ve ısı genleşme katsayısı sıcaklığın bir fonksiyonu olarak genişmeyi tahmin etmekte kullanılır. Çeliğin ısı genleşmesi;

$$\Delta l/l = \alpha(t) \times \Delta(t) \quad (3.1)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada $\alpha(t)$ ısı genleşme katsayısını, $\Delta(t)$ ise sıcaklıktaki değişimi ifade etmektedir.

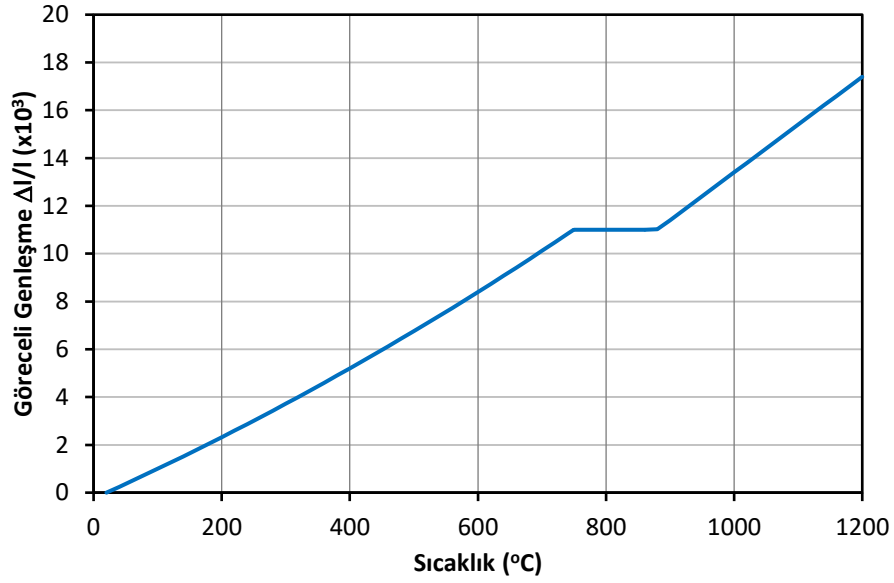
Çeliğin ısı genleşmesi (uzaması), $\Delta l/l$, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu ısı genleşme 750°C 'ye kadar artan sıcaklıkla doğrusal olarak uzarken, yaklaşık 750°C sıcaklıklarda faz değişikliğine uğramaya başlar, 750°C ile 850°C sıcaklık aralığında sabit kalır ve daha sonra tekrar artmaya başlar. Isıl genleşmedeki süreksizlik 750°C ile 850°C sıcaklık aralığında çelik malzemede gerçekleşen bir faz dönüşümünden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.1'de verilen bağıl ısı genleşmenin (uzamanın) sıcaklığa bağlı değişimi TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde verilen denklemler kullanılarak belirlenmektedir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 750^{\circ}\text{C} \text{ için } \Delta l/l = 1,2 \times 10^{-5} \theta_a + 0,4 \times 10^{-8} \theta_a^2 - 2,416 \times 10^{-4} \quad (3.2)$$

$$750^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 850^{\circ}\text{C} \text{ için} \quad \Delta l/l = 1,1 \times 10^{-2} \quad (3.3)$$

$$860^{\circ}\text{C} < \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \text{ için} \quad \Delta l/l = 2 \times 10^{-5} \theta_a - 6,2 \times 10^{-3} \quad (3.4)$$

Burada l , 20°C sıcaklıktaki uzunluğu, Δl sıcaklığın neden olduğu genişmeyi (uzama) ve θ_a çelik sıcaklığını ($^{\circ}\text{C}$) göstermektedir [25].



Şekil 3. 1: Çeliğin sıcaklığa bağlı olarak değişen bağıl ısıl genişmesi (uzaması) [25].

3.1.2. Özgül Isı

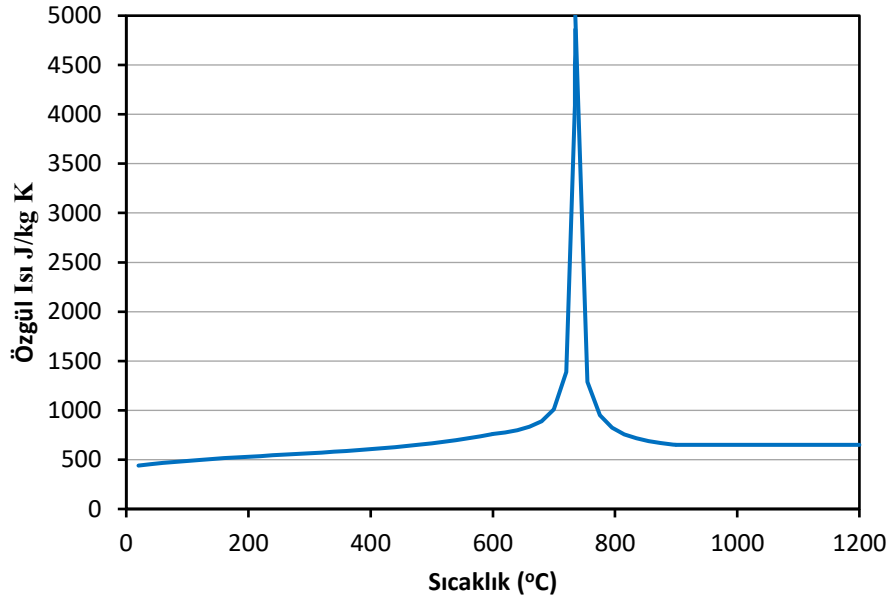
Malzemelerin ısıyı emme yeteneğinin ölçüsü özgül ısı olarak tanımlanmaktadır. Çeliğin özgül ısısı K (kelvin) cinsinden birim kütesinin sıcaklığını bir derece artırmak için gerekli olan ısı miktarıdır ve sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Çeliğin özgül ısısı Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 700°C ’e kadar yavaşça artarken 735°C ’de kristal yapısındaki metalürjik değişim nedeniyle ani yükseliş göstermekte ve bundan sonra tekrar orijinal seviyesine inmektedir. Çeliğin özgül ısısı, c_a (J/kg K), tüm yapısal çelik sınıfları için geçerlidir ve TS EN 1993-1-2,2007 [25] yönetmeliğinde verilen aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmektedir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C} \quad c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a \quad (3.5)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C} \text{ için } c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (3.6)$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C} \text{ için } c_a = 731 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (3.7)$$

Burada θ_a çelik sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) dır [25].



Şekil 3. 2: Çeliğin sıcaklığa bağlı özgül ısı değerleri [25].

Basit hesaplamalar için çeliğin özgül ısısı, c_a , 600 J/kg K alınabilir [4].

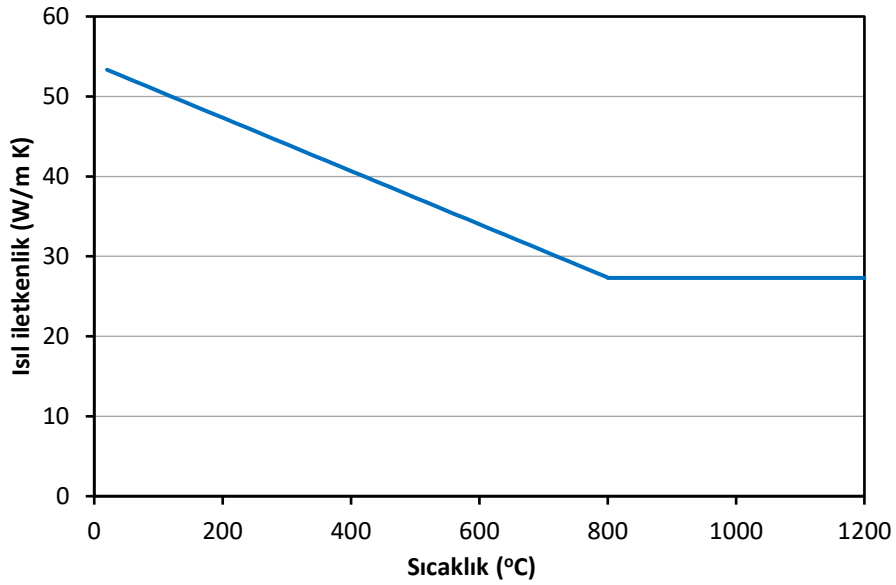
3.1.3. Isıl İletkenlik

Yangına maruz kalan çelik elemanların sıcaklıklarını belirlemek için ısı iletkenlik özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Bölüm 3.1.1’de açıklanan ısı genişleme katsayısı ve özgül ısı özelliklerinden farklı olarak ısı iletkenlik çeliğin mikro yapısından etkilenmektedir. Çeliğin ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişiklik gösterir ve Şekil 3.3’de görüldüğü gibi 0°C de 54 W/mK değerinden 800°C de 27.3W/mK değerine doğrusal olarak azalma gözlenmektedir. TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre çeliğin ısı iletkenliği, λ_a (W/mK), aşağıdaki denklemler kullanılarak tayin edilmektedir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800^{\circ}\text{C} \text{ için} \quad \lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \quad (3.8)$$

$$800^{\circ}\text{C} \leq \theta_a \leq 1200^{\circ}\text{C} \text{ için} \quad \lambda_a = 27,3 \quad (3.9)$$

Burada θ_a çelik sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) dır [25].



Şekil 3. 3: Çeliğin sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik değerleri [25].

Basit hesaplamalarda çeliğin ısıl iletkenliği λ_a , 45 W/mK alınmaktadır [4].

3.1.4. Yoğunluk

Çeliğin yoğunluğunun ρ_a , yüksek sıcaklık etkisinde değişmediği kabul edilmektedir. Bu nedenle çeliğin yoğunluğu, çelik sıcaklığından bağımsız olarak 7850 kg/m^3 olarak ele alınmaktadır [25].

3.2. ÇELİĞİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Yangından dolayı oluşan yüksek sıcaklıklar çelik malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişimlere neden olur. Yangına maruz kalan yapısal çeliğin mukavemetinde ve rijitliğinde 300 $^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda önemli oranda azalmalar gözlenmektedir. Yapısal çelik 1500 $^{\circ}\text{C}$ 'de erimektedir. Normal sıcaklıklarda nispeten önemsiz olan sünme (creep), 400 $^{\circ}\text{C}$ veya 500 $^{\circ}\text{C}$ üzerindeki sıcaklıkta çeliğin mekanik özelliklerine etkisinin oldukça fazla olduğu ifade edilmektedir.

Çeliğin yüksek sıcaklıkta deformasyonu genellikle şekil değiştirmesindeki $\Delta\varepsilon$ değişim olarak tanımlanmaktadır. Burada $\Delta\varepsilon$ 'nin üç bileşenden oluştuğu varsayılmaktadır [4].

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_i = \varepsilon_{th}(T) + \varepsilon_{\sigma}(\sigma, T) + \varepsilon_{cr}(\sigma, T, t) \quad (3.10)$$

Burada ε , t anındaki toplam şekil değiştirme; ε_i , $t=0$ anındaki başlangıç şekil değiştirme; $\varepsilon_{th}(T)$ termal şekil değiştirme (sadece sıcaklığın (T) bir fonksiyonu); $\varepsilon_{\sigma}(\sigma, T)$ gerilme-şekil değiştirme (hem uygulanan gerilmenin (σ), hem de sıcaklığın (T) bir fonksiyonu) ve $\varepsilon_{cr}(\sigma, T, t)$ sünme şekil değiştirmesi (gerilme, sıcaklık ve zamanın bir fonksiyonu)'dur.

Basit mesnetli kirişler gibi karmaşık olmayan yapısal sistemlerin yüksek sıcaklıklardaki azaltılmış dayanımları sadece gerilme-şekil değiştirme eğrileri dikkate alınarak hesaplanabilir. Daha karmaşık yapısal sistemlerde ise termal şekil değiştirme ve sünme şekil değiştirmesi hesaplarda mutlaka dikkate alınmalıdır.

3.2.1. Isıl (Termal) Şekil Değiştirme

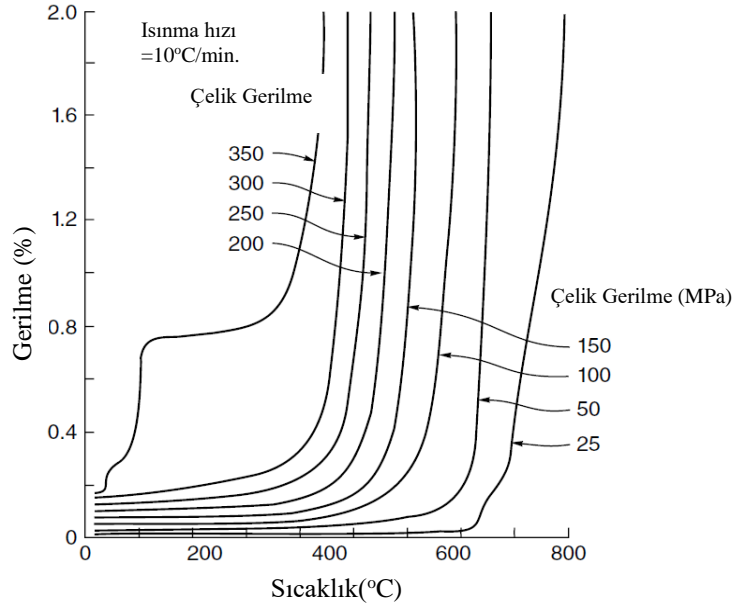
Termal şekil değiştirme (uzama) çoğu malzemenin ısıtıldığında ortaya çıkan ısı (termal) genişlemedir. Çeliğin ısı genleşmesi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Isıl genleşme katsayısı oda sıcaklığında genellikle $11.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ alınmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda bu katsayı artar ve 700°C ile 800°C sıcaklık aralığında çelik malzemede gerçekleşen bir faz dönüşümünden dolayı süreksizlik oluşmaktadır. Literatürde ısı uzama üzerine birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalar neticesinde ısı uzamayı tanımlayan doğrusal fonksiyon yönetmeliklerce de kabul görmektedir (Bölüm 3.1.1).

Kiriş ve kolon gibi tekil yapısal elemanların tasarımında termal şekil değiştirmelerin etkileri hesaba katılmayabilir. Ancak çerçeve veya daha karmaşık sistemlerde termal şekil değiştirmelerin etkileri mutlaka dikkate alınmalıdır. Özellikle sürekli sistemlerde yer alan kirişlerde oluşacak termal tepki kuvvetleri önemli sonuçlara neden olabilmektedir.

3.2.2. Sünme Şekil Değişirmesi

Sünme şekil değişirmesi kalıcı yük altında malzemenin zamana bağlı deformasyonunu ifade eder. Sünme, çelik malzemede normal sıcaklıklarda nispeten önemli olmamasına rağmen 400°C veya 500°C' nin üzerindeki sıcaklıklarda oldukça önemli hale gelmektedir. Yapılan çalışmalar sünme şekil değişirmesinin sıcaklığa ve gerilme seviyelerine oldukça bağlı olduğunu göstermektedir [4]. Şekil 3.4'de görüldüğü üzere sünme şekil değişirme eğrisi neredeyse dikey hale geldiği anda sünme deformasyonları çok hızlı şekilde armaktadır (ivmelenmektedir).

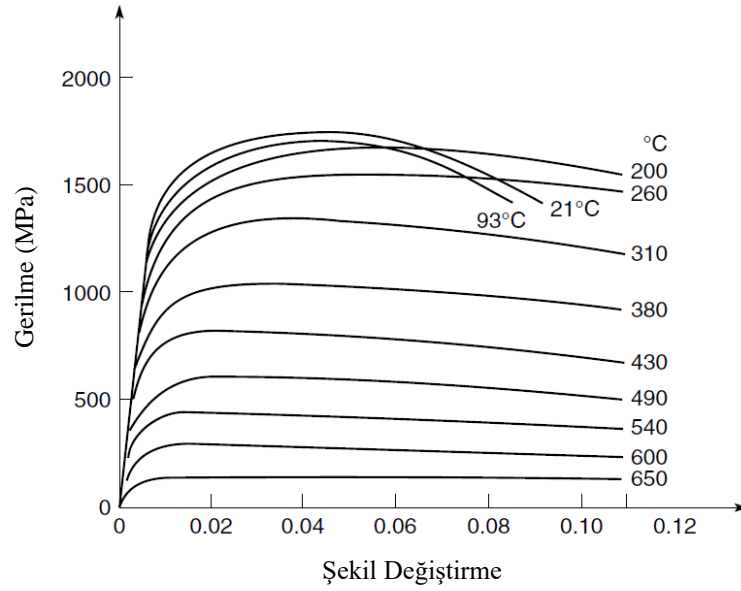
Göçme durumuna gelen yangına maruz çelik yapılarıdaki sünme şekil değişirmeleri oldukça önemli olmasına rağmen yeterli verinin olmamasından ve hesaplamaların karmaşıklığından dolayı sünme şekil değişirmeleri genellikle bilgisayar tabanlı yangın tasarım sürecine dahil edilmez. Genel yaklaşım yangın tasarımında kullanılan gerilme-şekil değişirme ilişkilerinin “etkin gerilme-şekil değişirme ilişkisi” olduğu varsayımdır [26]. Bu etkin gerilme-şekil değişirme ilişkisi Şekil 3.4'de verildiği gibi yangına maruz kalma süresince sünmeden dolayı oluşabilecek olası deformasyonları içermektedir.



Şekil 3. 4: Sünme (Gerilme) sıcaklık eğrileri [4].

3.2.3. Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi

Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değişirme eğrileri sabit sıcaklık test yöntemi veya değişken sıcaklık test yöntemi kullanılarak elde edilmektedir. Sıcak haddelenmiş tipik bir çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değişirme eğrileri Şekil 3.5’de verilmektedir. Bu eğrilerde sıcaklık arttıkça akma dayanımı ve elastisite modülünün azaldığı, ayrıca çekme dayanımının orta sıcaklık değerlerinde hafifçe artsa da yüksek sıcaklıklarda düştüğü görülmektedir.

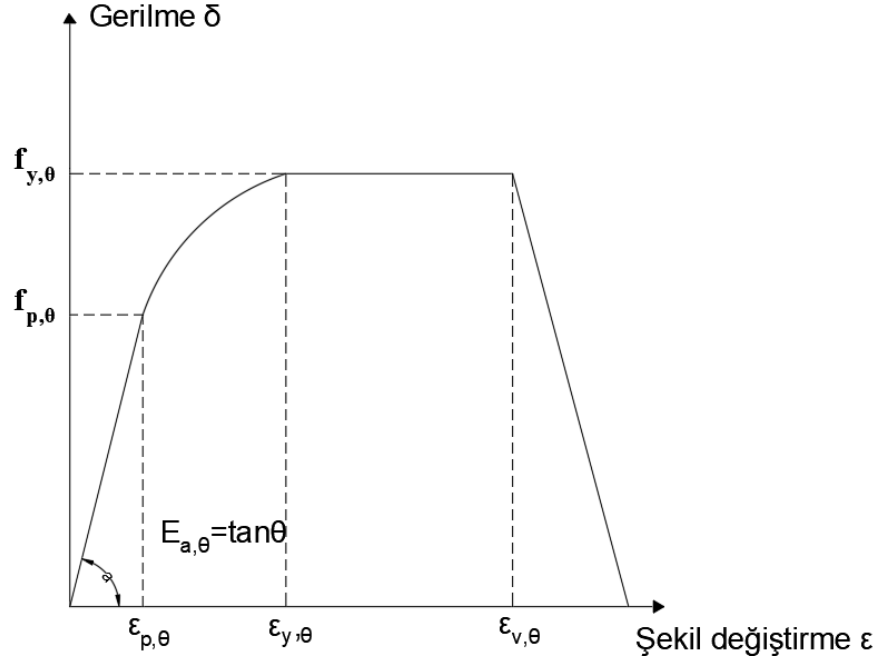


Şekil 3. 5:Sıcak haddelenmiş çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değişirme eğrileri [4].

Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değişirme ilişkisi TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde sıcaklığa bağlı üç parametre kullanılmaktadır. Bu parametreler i) $E_{a,\theta}$ doğrusal elastik bölümün eğimi, ii) $f_{p,\theta}$ orantılılık sınır dayanımı ve iii) $f_{y,\theta}$ akma dayanımıdır. TS EN 1993-1-2,2007 [25] yönetmeliğine göre çeliğin yüksek sıcaklıktaki gerilme-şekil değişirme ilişkisi Çizelge 3.1’de verilen denklemlerle belirlenir. Bu denklemler kullanılarak oluşturulan gerilme-şekil değişirme eğrisi, Şekil 3.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 3. 1: Karbon çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisinde kullanılan denklemler [25].

Birim şekil değiştirme aralığı	Gerilme σ	Tanjant modülü
$\varepsilon \leq \varepsilon_{p,\theta}$	$\varepsilon E_{a,\theta}$	$E_{a,\theta}$
$\varepsilon_{p,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{y,\theta}$	$f_{p,\theta} - c + (b/a) [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)}{a [a^2 - (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{y,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{i,\theta}$	$f_{y,\theta}$	0
$\varepsilon_{i,\theta} < \varepsilon < \varepsilon_{u,\theta}$	$f_{y,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{i,\theta}) / (\varepsilon_{u,\theta} - \varepsilon_{i,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{u,\theta}$	0,00	-
Parametreler	$\varepsilon_{p,\theta} = f_{p,\theta} / E_{a,\theta}$ $\varepsilon_{y,\theta} = 0,02$	$\varepsilon_{i,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{u,\theta} = 0,20$
Fonksiyonlar	$a^2 = (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta})(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta} + c / E_{a,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})^2}{(\varepsilon_{y,\theta} - \varepsilon_{p,\theta}) E_{a,\theta} - 2(f_{y,\theta} - f_{p,\theta})}$	



Şekil 3. 6: Karbon çeliğin yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkisi [25].

4. YANGINA KARŞI YAPISAL TASARIM

4.1. GİRİŞ

Yangın güvenliği mühendisliği can, mal ve çevre güvenliğinin sağlanması amacıyla bilimsel ve mühendislik ilkeleri kullanan çok disiplinli bir bilim alanıdır. Yapısal yangın mühendisliği veya tasarımı ise yangına maruz yapıların davranışını ele alan yangın güvenliği mühendisliği içerisinde belirli bir disiplin olarak sınıflandırılmaktadır [27].

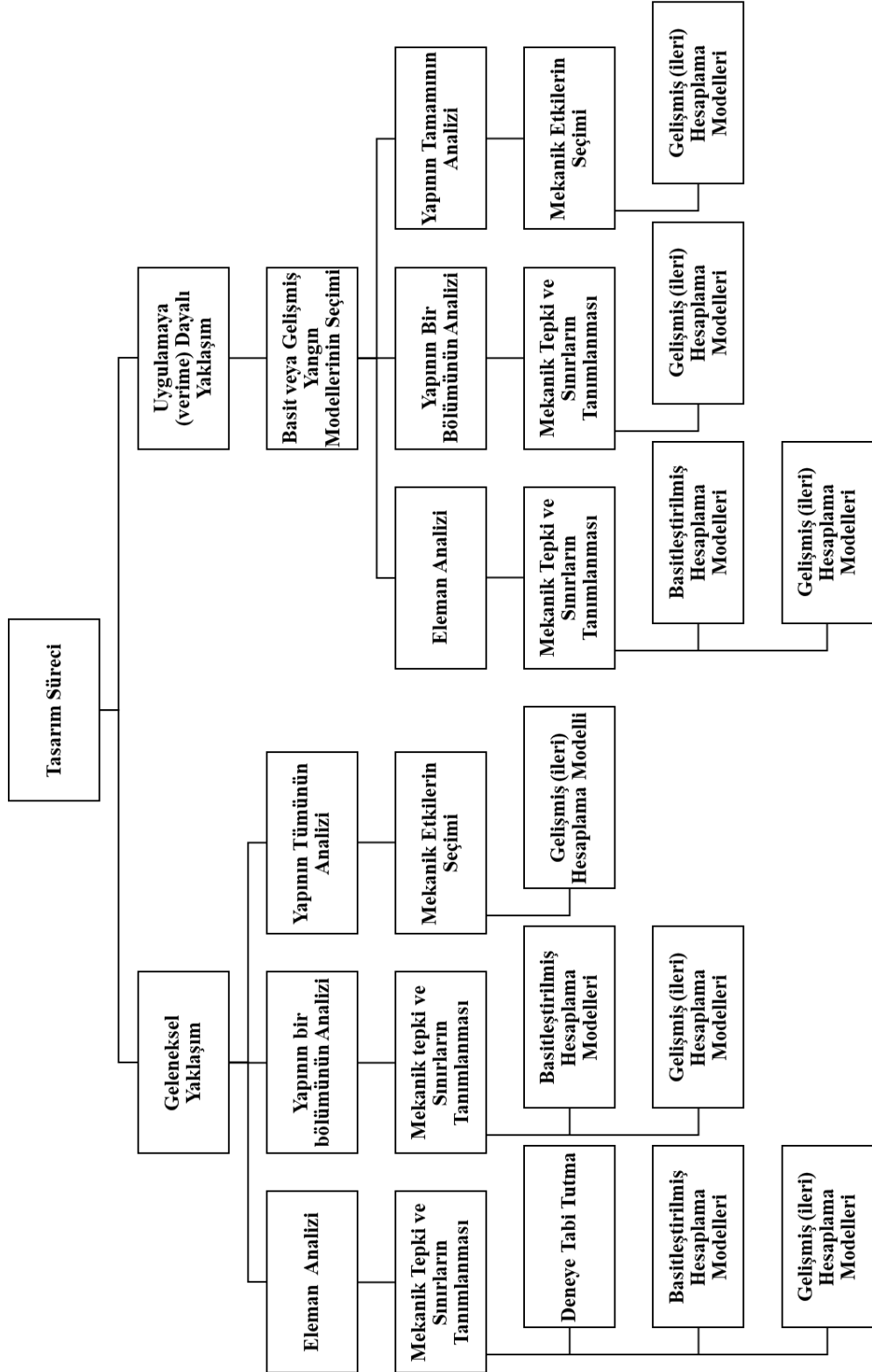
Literatürde yapılan çalışmalarda ve mevcut yangın yönetmeliklerinde yapısal yangın tasarımının esas olarak normal sıcaklık koşulları altındaki yapısal tasarımla benzer süreçlere sahip olduğu belirtilmektedir. Ancak yüksek sıcaklıkların malzeme özellikleri ve iç kuvvetler üzerindeki etkileri nedeniyle yangın tasarımı karmaşık hale gelmektedir. Yapısal yangın tasarımı için günümüz yangın yönetmelikleri iki farklı temel yaklaşım: i) deneylere dayalı tasarım yöntemi (prescriptive yöntem) ve ii) performansa dayalı tasarım yöntemini kullanmaktadır.

Deneylere dayalı (prescriptive) geleneksel tasarım yöntemi yapısal yangın mühendisliğinde en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Yangın güvenliği için gerekli temel hedeflere ulaşmayı amaçlayan bu tasarım yaklaşımında genel olarak yeterli can güvenliği seviyesinin sağlandığı varsayılmaktadır. Bu tasarım yöntemi yapı bileşeninin ya da elemanının sadece yangına dayanıklılık özelliğine dayanmaktadır. Yapı elemanının veya yapı bileşeninin yangına dayanıklılığı, yük taşıma işlevini kaybetmeden standart yangın deneylerinde (ISO 834, 1985) geçirebileceği süre olarak tanımlanmaktadır. Yangına dayanıklılık kavramı ve standart yangın testlerinin kolayca anlaşılabilmesi ve uygulanabilmesi, yangın yönetmeliklerinde belirtilen standart yangına dayanıklılık şartlarını sağlamak için tasarımcıların yaygın olarak bu yöntemi kullanmasına yol açmıştır. Bu yaklaşımda ısı etkileri standart sıcaklık-zaman eğrisi (ISO eğrisi) ile dikkate alınmaktadır. Ancak standart yangın testlerinin en önemli dezavantajlarından biri sıcaklık-zaman ilişkisinin gerçek yangını tam olarak temsil edememesidir. Bir diğer dezavantajı ise yaklaşımın eleman bazlı bir yöntem olması nedeniyle yangın etkisindeki tüm yapısal sistemin gerçek davranışı hakkında bilgi sağlayamamasıdır [28]. Ayrıca standart yangına maruz yapısal sistemin bir bütün

olarak nasıl davranacağı ve ısı genleşmenin yapısal sistemin dayanıklılığı ve stabilitesi üzerindeki etkilerini de hesaba katmamaktadır [24].

Deneylere dayalı (prescriptive) yöntem yapıların gerekli yangına dayanıklılık kriterlerinin sağlanmasında, özellikle pasif yangın koruma sistemlerinin kullanımı gerektiğinde oldukça emniyetli tarafta kalmaktadır. Bu nedenle bu yöntemle yapılan yangın tasarımlarının maliyetleri çok yüksek olmaktadır. Deneylere dayalı (prescriptive) yaklaşımlardaki bu kısıtlamalar mevcut yangın standartların iyileştirilmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Amerika ve Avrupa’da yangın yönetmeliklerinde yakın zamana kadar yapısal yangın tasarımı için kalifikasyon (qualification) deneylerine dayalı tasarım yöntemini kullanılmaktaydı. Son yıllarda birçok ülke yangın güvenliğinin sağlanmasında tasarımcıların daha rasyonel mühendislik yaklaşımları kullanabilecekleri performansa dayalı tasarım yöntemlerini yangın yönetmeliklerinde kullanmaya başlamıştır. Bu yöntem özellikle havaalanları, müzeler, sanat merkezleri, üniversiteler veya diğer karmaşık ve yüksek mühendislik hizmeti gerektiren yapıların yangın dayanım tasarımında kullanılmaktadır. Şekil 4.1’de literatürde mevcut alternatif tasarım türleri şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4. 1: Alternatif tasarım türleri [23].

Günümüzde yapıların yangın maruz yapıların tasarımı farklı yöntemler kullanılarak yapılmaktadır. Basit hesap yöntemleri kullanılarak yangına maruz yapıların tasarımı yapılabilindiği gibi, önemli değişkenlerin hesaba katıldığı daha detaylı ve karmaşık hesap yöntemler de tasarımda kullanılmaktadır. Tasarıma başlanmadan önce, tasarım esasları tanımlamak ve tasarım yangın şiddetini belirlemek esastır.

4.2. YANGIN GÜVENLİĞİ ESASLARI (TASARIM ESASLARI)

Yangın güvenliğinin amacı yangından kaynaklanan kayıp riskini sınırlayarak en aza indirmektir. Burada ifade edilen kayıp; i) bina sakinleri veya itfaiyeciler için ölüm ya da yaralanma, ii) bina elemanlarının ve/veya içindeki eşyaların zarar görmesinden dolayı oluşacak yüksek maddi hasar ve iii) tehlikeli maddelerin (gazların) atmosfere salınımı nedeniyle ve kirliliği yangın söndürme sularından dolayı işlerin durması ve çevre kirliliği şeklinde tanımlanabilir.

Ulusal ve uluslararası yönetmeliklerde yangın güvenliği için gerekli minimum şartlar düzenlenmiştir. Yangın güvenliği yönetmelikleri ülkeden ülkeye farklılıklar gösterse dahi aşağıda değinilen temel ilkeler ve hedefler tüm yönetmeliklerce esas alınmaktadır. Aktif ve pasif yangın koruma sistemlerinin birleşimini içeren birçok ölçümler doğrultusunda bu hedefler;

- Binadaki yangın tehlikelerini kontrol ederek yangın oluşumunu azaltmak ve engellemek,
- Bina sakinlerinin tahliyesi için güvenli kaçış yolları sağlamak,
- Yangının binanın diğer kısımlarına ve komşu binalara yayılmasını önlemek veya yavaşlatmak,
- Yük taşıyan yapı elemanlarının bina sakinlerinin tahliyesi için gereken süre boyunca yük taşıma işlevini sürdüreceği şekilde tasarlanması ve inşa edilmesi olarak verilmiştir [29].

4.3. YANGIN TASARIMI

Yangına dayanıklı yapısal tasarımda temel adım, yapının veya her bir elemanın yangına dayanıklılığının, maruz kaldığı yangın şiddetine eşit ya da daha fazla olması şartıdır.

$$\text{Yangına dayanıklılık} \geq \text{Yangın şiddeti}$$

Burada yangına dayanıklılık, yapı elemanının yük taşıma işlevini kaybetmeden yangına dayanma kabiliyetinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Yangın şiddeti ise yapılarda hasara veya çökmeye neden olabilecek kuvvetlerin veya sıcaklıkların bir ölçüsüdür. Yangına dayanıklılık ile yangın şiddeti zaman, sıcaklık veya dayanım alanlarında karşılaştırılır. Çelik yapıların yangına dayanıklılığının değerlendirilmesinde sıklıkla kullanılan bu 3 yöntem Çizelge 4.1’de verilmektedir.

Çizelge 4. 1: Çelik yapıların yangına karşı korunmasında 3 yöntem. [29].

Tanım	Birim	Yangın dayanımı > Yangın şiddeti
Zaman	dk-saat	Durabilite zamanı > Yangın süresi
Sıcaklık	°C	Çökmeye sebep olan sıcaklık > Yangında oluşabilecek en büyük sıcaklık
Dayanım	kN/kNm	Yüksek sıcaklıkta yük kapasitesi > Yangın sırasında uygulanan yük

Literatürde en yaygın olarak kullanılan yöntem yangın şiddeti ve yangına dayanıklılığın zaman alanında karşılaştırılmasıdır. Bu yöntemde yangına dayanıklılık, standart yangına maruz yapı elemanının yük taşıma işlevini kaybetmeden geçirebileceği minimum süre olarak tanımlanmaktadır. Yangın şiddeti ise yapıların standart yangın tasarım süresidir ve yönetmeliklerce belirlenmiştir. Burada zaman birimi olarak dakika veya saat kullanılmaktadır.

İkinci yöntemde yangına maruz yapının bir bölümünde oluşacak maksimum sıcaklığın (°C) hasara neden olacak kritik sıcaklıktan (°C) daha büyük olmaması sağlanmalıdır. Burada hasar, tek bir yapı elemanında çok fazla sıcaklık artışı nedeniyle oluşan hasar veya yapısal yük taşıma elemanındaki göçme olarak tanımlanır. Çelik en kesitindeki sıcaklığın düzgün (uniform) kabul edildiği durumlar için en uygun hesap yöntemidir.

Üçüncü yöntem olan dayanım alanında, yangın süresince elemanın yük taşıma kapasitesi ile yangın anında eleman üzerinde beklenen yüklerin karşılaştırılmasıdır. Yangın sırasındaki yük taşıma kapasitesi termal (ısı) analizle ve yüksek sıcaklıklardaki yapısal analizle hesaplanabilir. Yangın anındaki yük ise yük yönetmeliklerinde verilen yük birleşimleri kullanılarak hesaplanabilir [29].

4.4. YAPISAL YANGIN DAYANIMI (YANGINA DAYANIKLILIK)

Yangına dayanıklılık, yapı elemanının yük taşıma işlevini kaybetmeden yangına dayanma kabiliyetinin bir ölçüsüdür. Yapı elemanı, kolon, kiriş, döşeme, çatı, duvar, dikme gibi taşıyıcı elemanların yanı sıra dolgu, bölme, kaplama, kapı ve dekoratif elemanlar gibi taşıyıcı olmayan elemanları da kapsamaktadır. Yangına dayanıklılık, tek bir yapı malzemesinden veya farklı malzemelerin birleşiminden oluşan yapı elemanları için tanımlanan bir özelliktir. Dolayısıyla tek başına yapı malzemelerinin yangına dayanıklılığından söz edilemez [24]. Yapı elemanlarının yangına dayanıklılığı, yük taşıma kapasitesi R, bütünlük E ve ısı yalıtım I performans kriterlerine göre tanımlanır.

Yük Taşıma Kapasitesi R, yapı elemanının belirli mekanik etkiler altında yük taşıma işlevini yerine getirebilme ve istenilen süre boyunca stabilitesini kaybetmeden (çökme ve burkulma olmadan) yangına dayanabilme kabiliyetidir.

Bütünlük E, yapının iki bölümünü birbirinden ayırma işlevine sahip duvar, bölme veya döşeme gibi yapı elemanı bir taraftan yangına maruz kaldığında, alevlerin veya sıcak gazların geçebileceği herhangi bir çatlak veya aralık geliştirmemelidir.

Isı yalıtımı I, yapı elemanının, yangına maruz kalan taraftan maruz kalmayan tarafa önemli miktarda ısı geçişinin bir sonucu olarak yangın yayılması olmaksızın, yalnızca bir tarafından yangına maruz kalmaya dayanma yeteneğidir. Yangına maruz kalmayan yüzey veya bu yüzeye yakın mesafede herhangi bir malzeme tutuşmayacak şekilde ısı geçişi sınırlanmalıdır, yangına maruz kalmayan yüzeydeki sıcaklık artışı başlangıç sıcaklığına göre ortalama 140°C'yi ve herhangi bir noktada maksimum 180°C'yi geçmemelidir [29].

Günümüz yangın yönetmeliklerinde yapı elemanının yangına dayanıklılığı, standart yangına maruz kaldığında yük taşıma işlevini kaybetmeden geçirebileceği

minimum süre olarak ifade edilmektedir. Bir yapı bileşeninin ya da elemanının; yük taşıma, bütünlük ve ısı yalıtım özelliklerini belirlenen bir süre koruması “yangına dayanıklılık” olarak tanımlanmaktadır. Yapı elemanları, özelliklerini korudukları süreye göre, yangın dayanıklılık sınıfları ile ifade edilirler.

Yangın yönetmeliklerinde gerekli yangına dayanıklılık, R, E ve I özelliklerine göre ayrı ayrı tanımlanmaktadır. Yangın dayanıklılık süresi; R, REI, RE, EI, E harflerinden sonra, dakika cinsinden dayanım performans süreleri 15, 20, 30, 45, 60, 90, 120, 180, 240 veya 360 olarak ifade edilmektedir. Kolon, kiriş gibi taşıyıcı elemanların yangına dayanım süresi sadece yük taşıma kapasitesi R’ ye göre yapılabilir. Örneğin yangına maruz bir kolon 59 dakika yük taşıma kapasitesine sahipse R 30, 60 dakika yük taşıma kapasitesine sahipse R 60 olarak ifade edilir. Bununla birlikte döşeme plakaları ve duvar gibi yapı elemanlarının yangına dayanım süresi için ısı yalıtımı I ve bütünlük E kriterleri de gereklidir. Örneğin bir taşıyıcı duvar için yangın dayanım süreleri 60 / 60 / 60 verildiyse, bu yapı elemanının sırasıyla yük taşıma kapasitesi, bütünlük ve ısı yalıtımı kriterlerini 60 dakika boyunca karşıladığı anlamına gelmektedir. Bu yapı elemanı REI 60 olarak ifade edilir. Yük taşıyıcı olmayan yapı elemanının yangına dayanım süresi, ısı yalıtımı I ve bütünlük E kriterlerine göre yapılır. Örneğin taşıyıcı olmayan bölme duvar için yangın dayanım süresi -/ 60 / 60 olarak verilir ve EI 60 olarak ifade edilir. Eğer camlı bir yangın kapısı için yangın dayanım süresi -/ 30 / - verildiyse, bu elemanın yük taşıma kapasite veya ısı yalıtımı gerektirmeden 30 dakika boyunca bütünlüğünü koruması gerektiği anlamına gelmektedir [29].

Yönetmeliklerde, tek katlı yapılar için gerekli yük taşıma (R) yangın dayanım süreleri 15 dakika (R15) ile 60 dakika (R60) arasında değişmektedir. Bu yangın dayanım süreleri, bina kullanım sınıfına, yağmurlama sisteminin (sprinkler) olup olmamasına, bina yüksekliğine ve yangın kompartımanı büyüklüğüne bağlıdır.

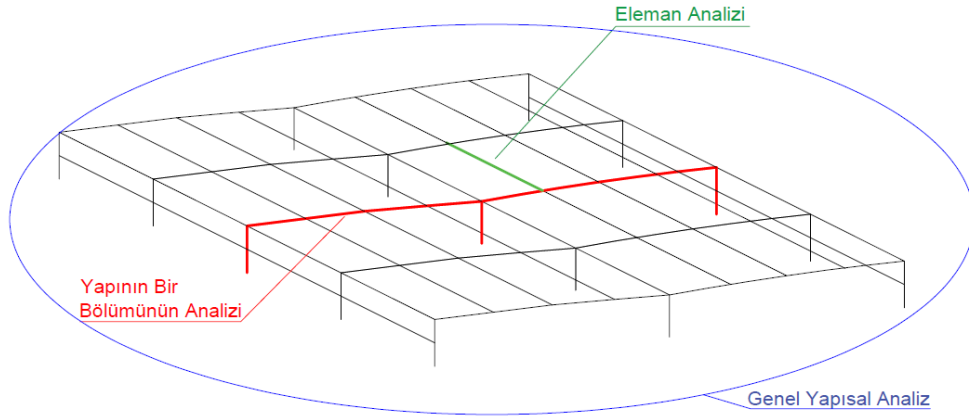
4.5. YAPISAL ANALİZ YÖNTEMLERİ

Yangın etkisindeki yapıların davranışını değerlendirmek için Avrupa (EUROCODE) yönetmeliklerinde verilen olası üç analiz yaklaşımı Şekil 4.2’de gösterilmektedir.

Eleman analizi; yapıyı oluşturan her bir eleman diğer yapısal elemanlardan tamamen ayrılmış olarak ele alınır. Ayrılan elemanın diğer elemanlarla bağlandığı noktalara uygun sınır koşulları tanımlanmaktadır.

Yapının bir bölümünün analizi; yapının yangın davranışı belirlemek için yapının bir kısmı dikkate alınır. Yapının diğer kısımlarıyla olan bağlantılarını yansıtmak için uygun sınır şartları tanımlanır.

Genel yapısal analiz; yapının yangın davranışını değerlendirmede tüm yapısal sistem dikkate alınır [29].



Şekil 4. 2: Yangına maruz yapıların mekanik davranışları için farklı tasarım yaklaşımları [29].

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre, yangın performansını (yangına karşı direnci) belirlemek için üç farklı tasarım metodu kullanılabilir:

1. Basitleştirilmiş hesaplama modelleri
2. Gelişmiş (ileri) hesaplama modelleri
3. Deneye tâbi tutma modelleri

Basitleştirilmiş hesaplama modelleri, karmaşık olmayan yapılardaki tekil elemanlar için emniyetli kabulleri esas alan tasarım metotlarıdır. Basitleştirilmiş

hesaplama modellerinde iki yaklaşım vardır. Bunlardan ilki çelik yapısal elemanların analizinde yaygın olarak kullanılan kritik sıcaklık yöntemidir. İkincisi hem çelik hem de kompozit yapısal elemanların analizleri için geliştirilen basit mekanik modellerin kullanılmasıdır. Bu hesaplama modelinde yangın etkisi (ısı etkileri) standart sıcaklık-zaman eğrisi (ISO eğrisi) ile dikkate alınmaktadır. Eleman direnci, uygulanan yük seviyesine ve yangın etkisinde malzemede meydana gelen dayanım (mukavemet) kaybına bağlı olarak TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmelik kurallarına göre hesaplanır. Bu hesaplama yöntemlerinin doğal yangına maruz tüm yapısal sistem yerine standart yangın etkisindeki tekil elemanlarla sınırlı olması ve bitişik yapılardan kaynaklı (kısıtlamaları) sınır şartlarını hesaba katmaması en önemli kısıdır [25].

Gelişmiş (ileri) hesaplama modelleri yangına maruz yapı davranışının belirlenmesinde daha gerçekçi yaklaşımları içeren tasarım metodlarını kapsamaktadır. Yangın etkisindeki yapıların mekanik davranışları ve termal analizlerini belirleyebilmek için ileri fiziksel davranış modelleri kullanılmaktadır. Bu hesaplama yöntemleri yangın süresince ısı özelliklerinin sıcaklıkla değişimi, bitişik yapıların ısıtılan elemanlar üzerindeki etkileri, termal (ısı) kaynaklı kuvvetler ve deformasyonlar gibi önemli değişkenleri hesaba katmaktadır. Tüm yapı tiplerine uygulanabilen gelişmiş (ileri) hesaplama modelleri sonlu elemanlar yazılımı kullanımını gerektirir. Bilgisayar tabanlı bu yöntemlerle daha gerçekçi sonuçlar elde edilse de bunlar yaklaşık değerlerdir. Bu nedenle doğru analiz modellerinin kullanılmasına dikkat edilmelidir.

Bir yapı ya da yapı elemanının yangına karşı direncini belirlemek için en yaygın kullanılan yöntem tam ölçekli deneylere tâbi tutma yöntemidir. Ancak özellikle büyük ve karmaşık yapılar düşünüldüğünde bu yöntem oldukça pahalıdır, bu nedenle yalnızca gerekli görüldüğü durumlarda yapılmaktadır. Deneyler yapı elemanlarının özelliklerini temsil eden numuneler üzerinde gerçekleştirilir. Ancak test edilen numuneler genellikle gerçek yapılardan geometrik olarak farklı boyut ve şekillere, farklı yükleme ya da mesnetlenme (sınır) şartlarına sahiptirler. Bu nedenle eleman bazlı bir yöntem olan deneye tabi tutma yangın etkisindeki tüm yapısal sistemin gerçek davranışı hakkında kesin bilgi sağlayamamaktadır. Ayrıca bir diğer önemli kısıt da

standart yangın testlerinin kullanılan sıcaklık-zaman ilişkisinin gerçek yangını tam olarak temsil edememesidir.

4.6. YANGINA MARUZ ÇELİK ELEMANLARIN TASARIMI

Yangına maruz çelik yapı elemanlarının yangın dayanımları basitleştirilmiş hesaplama ya da gelişmiş hesaplama yöntemleri kullanılarak belirlenmektedir. Bu bölümde Avrupa yönetmeliklerinde verilen basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri açıklanmaktadır. Basitleştirilmiş hesap yöntemleri yangın şartları için azaltılmış yükler ile yüksek sıcaklıklarda çeliğin akma dayanımı ve elastisite modülündeki azaltılmış değerler haricinde normal sıcaklıklarda olduğu gibi taşıma gücü tasarım ilkelerini esas alır.

Avrupa yönetmeliklerine göre yangına maruz yapısal elemanların tasarımı taşıma gücü sınır durumunda gerçekleştirilmelidir. (BS EN 1990 (2002), BS EN 1991-1-2 (2002), BS EN 1993-1-2 (2005)). Bir çelik yapı elemanının yük taşıma işlevi yangına maruz kaldığı “t” süresi boyunca sağlanmalıdır.

$$E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t} \quad (4.1)$$

Burada $E_{fi,d}$ yangın anında uygulanan yükten dolayı oluşan tasarım kuvveti ve $R_{fi,d,t}$ yangın anındaki taşıma gücü kapasitesidir. TS EN 1993-1-2, 2007 [25]'e göre, $E_{fi,d}$, ısı genleşme ve şekil değiştirme etkilerini içeren TS EN 1991-1-2, 2004 [23]'e göre belirlenen yangın durumunda oluşan eylemlerin tasarım tesir değeri ve $R_{fi,d,t}$ yangın etkisindeki çelik elemanın t anında karşılık gelen tasarım dayanım değeridir. Basitleştirilmiş hesaplama yöntemlerinde yük taşıma dayanımı ya zaman alanında ($E_{fi,d} \leq R_{fi,d,t}$) ya da sıcaklık alanında ($E_{fi,d} \leq R_{fi,d,\theta}$) da sağlatılmalıdır [23].

4.6.1. Enkesitlerin Sınıflandırılması

TS EN 1993-1-1, 2014 [30] yönetmeliği normal sıcaklığa göre tasarımda çelik yapı eleman enkesitlerini, yerel burkulma sınır durumu dikkate alındığında, dört sınıfa ayırır. Bunlar:

- Sınıf 1** Dayanımda hiçbir azalma olmaksızın plastik mafsal oluşumu için gerekli dönme kapasitesine sahiptirler (plastik mafsal oluşturabilen kesitler).
- Sınıf 2** Plastik moment dayanımı geliştirebilen fakat yerel burkulmadan dolayı sınırlı dönme kapasitesine sahiptirler (plastik mafsal oluşturamazlar).
- Sınıf 3** Elastik olarak hesaplanmış en dış basınç lifinde akma dayanımına ulaşılabilen ancak yerel burkulmadan dolayı plastik moment dayanımı geliştiremeyen kesitlerdir.
- Sınıf 4** Enkesitin bir veya daha fazla bölümünde akma dayanımına ulaşılmadan yerel burkulmanın olduğu kesitlerdir.

Yangına maruz çeliğin mukavemetinde ve rijitliğinde yüksek sıcaklıklarda önemli oranda azalmalar gözlenir, bu nedenle yüksek sıcaklıklarda enkesit sınıflandırılması normal sıcaklığa göre farklı olabilmektedir. Ancak her bir yüksek sıcaklık değeri için sınıflandırma yapmak yerine normal sıcaklık davranışına dayanan tek bir sınıflandırma yapılır. Enkesitler TS EN 1993-1-1, 2014 [30] yönetmeliğinde verilen kurallara göre ve TS EN 1993-1-2, 2007 [25] Denklem (4.2)'de verilen azaltılmış ε değeri kullanılarak sınıflandırılabilir.

$$\varepsilon = 0.85 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4.2)$$

Burada f_y 20 °C sıcaklıkta çeliğin akma dayanımıdır. Yüksek sıcaklıklarda malzeme özelliklerinin değişimini dikkate almak amacıyla 0.85 azaltma katsayısı kullanılır ve $\sqrt{k_{E,\theta}/k_{y,\theta}}$ için yaklaşık bir değer olarak kabullenilmektedir [25].

4.6.2. Kiriş Tasarım Dayanımı

4.6.2.1. Düzgün (Uniform) Sıcaklık Etkisindeki Kirişler

Tasarım moment dayanımı yüksek sıcaklıklarda malzemedeki azaltılmış değerler için gerekli düzenlemeler yapılarak normal sıcaklık tasarımına benzer şekilde belirlenmektedir. TS EN 1993-1-1, 2014 [30] yönetmeliğine göre sıcaklığı, θ_a , her

noktada aynı olan Sınıf 1 veya Sınıf 2 enkesitin tasarım dayanım momenti, $M_{fi,\theta,Rd}$ aşağıdaki Denklem 4.3 kullanılarak tayin edilmektedir.

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right] M_{Rd} \quad (4.3)$$

Burada M_{Rd} tüm enkesitin, normal sıcaklığa göre yapılan tasarımda, TS EN 1993-1-1, 2014 [30] uygun şekilde, plastik direnç momenti, $M_{pl,Rd}$ veya gerekli olduğu durumda kesme etkilerini de dikkate almak suretiyle, TS EN 1993-1-2, 2007 [25]'e uygun şekilde hesaplanan azaltılmış moment dayanımıdır. $k_{y,\theta}$ çeliğin, t süresinde ulaştığı θ_a sıcaklıktaki akma dayanımı için azaltma faktörüdür. $\gamma_{M,0}$ normal sıcaklıkta kullanılacak malzeme katsayısıdır. $\gamma_{M,fi}$ yangın anında kullanılacak malzeme katsayısıdır. Sıcaklığı her noktada aynı olan Sınıf 3 enkesitin t anındaki tasarım direnç momenti, $M_{fi,t,Rd}$, TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliği Madde 4.2.3.4 (1) göre aşağıdaki denklem kullanılarak tayin edilmelidir.

$$M_{fi,t,Rd} = k_{y,\theta} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{M,fi}} \right] M_{Rd} \quad (4.4)$$

Burada ise M_{Rd} Normal sıcaklığa göre yapılan tasarımda, TS EN 1993-1-1, 2014 [30]'e uygun şekilde, bütün enkesitin elastik direnç momenti, $M_{el,Rd}$, gerekli olduğu durumda kesme etkilerini de dikkate almak suretiyle, TS EN 1993-1-1, 2014 [30]'e uygun şekilde hesaplanan azaltılmış moment dayanımıdır.

4.6.2.2. Düzgün Olmayan (Non Uniform) Sıcaklık Etkisindeki Kirişler

Yapısal elemanların sıcaklığı θ_a , genellikle enkesit üzerinde her noktada aynı olmaz. Örneğin üst başlıklarıyla beton döşemeleri destekleyen çelik kirişlerin tasarım moment dayanımının hesaplanmasında (elastik ya da plastik) homojen olmayan sıcaklık dağılımı analitik olarak dikkate alınabilir. Bunun için kiriş en kesiti düzgün dağılımlı sıcaklık elemanlarına bölünür, her bir elemanın dayanımı kendi sıcaklık

değerine bağlı olarak azaltılır ve tüm kesit boyunca bu değerler toplanarak dayanım momenti elde edilebilir.

TS EN 1993 1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre sıcaklığı, θ_a , aynı olmayan Sınıf 1 veya Sınıf 2 enkesitin t anındaki tasarım dayanım momenti, $M_{fi,t,Rd}$ aşağıdaki denklem kullanılarak tayin edilmelidir.

$$M_{fi,t,Rd} = \sum_{i=1}^n A_i z_i k_{y,\theta,i} \frac{f_{y,i}}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.5)$$

Burada z_i plastik tarafsız eksenden itibaren, başlangıç alanının A_i , geometrik merkezine olan mesafe, $f_{y,i}$ plastik tarafsız eksenin basınca maruz tarafında pozitif, çekmeye maruz tarafında negatif olarak alınan ve başlangıç alan A_i , dikkate alınarak hesaplanan anma akma dayanımı $A_i \theta_i$ sıcaklığındaki enkesit başlangıç alanıdır. Denklem 4.5'e alternatif olarak iki ampirik uyarılma faktörü κ_1 ve κ_2 kullanılarak tasarım dayanım momenti aşağıdaki Denklem 4.6 ile hesaplanabilir.

$$M_{fi,t,Rd} = \frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \quad (4.6)$$

Burada $M_{fi,\theta,Rd}$ sıcaklığı, θ_a her noktada aynı olan kesitin, tasarım direnç momenti κ_1 enkesit boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarılma faktörü, κ_2 kiriş boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarılma faktörüdür [25].

4.6.3. Kolon Tasarım Dayanımı

Sıcaklığı θ_a , her noktada aynı ve enkesitleri Sınıf 1, Sınıf 2 veya Sınıf 3 olan basınca maruz bir elemanın t anındaki tasarım burkulma dayanımı yüksek sıcaklıklarda malzemedeki azaltılmış değerler için gerekli düzenlemeler yapılarak normal sıcaklık tasarımına benzer şekilde belirlenmektedir. TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre tasarım burkulma dayanımı aşağıdaki denklemler kullanılarak belirlenmelidir.

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (4.7)$$

Burada χ_{fi} yangına karşı tasarımda eğilme burkulması için azaltma faktörü, A enkesit alanı, $k_{y,\theta}$ çeliğin, t süresinde ulaştığı θ_a sıcaklıktaki akma dayanımı için azaltma faktörü f_y çeliğin 20°C'deki akma dayanımı $\gamma_{M,fi}$ yangın anında kullanılacak malzeme katsayısıdır.

Eğilme burkulması azaltma katsayısı χ_{fi} hesaplanmasında yangın etkisindeki efektif uzunluk değeri kullanılmaktadır. Bu terim eğilme eksenlerine (x-x veya y-y) göre burkulma faktörünün en küçüğü olarak alınır ve aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanır.

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \chi_{fi} \leq 1.0 \quad (4.8)$$

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \times [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] \quad (4.9)$$

$$\alpha = 0,65 \sqrt{235 / f_y} \quad (4.10)$$

Burada α çeliğin karakteristik akma dayanımı f_y 'ye bağlı hata faktörüdür. θ_a sıcaklığındaki boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}_\theta$

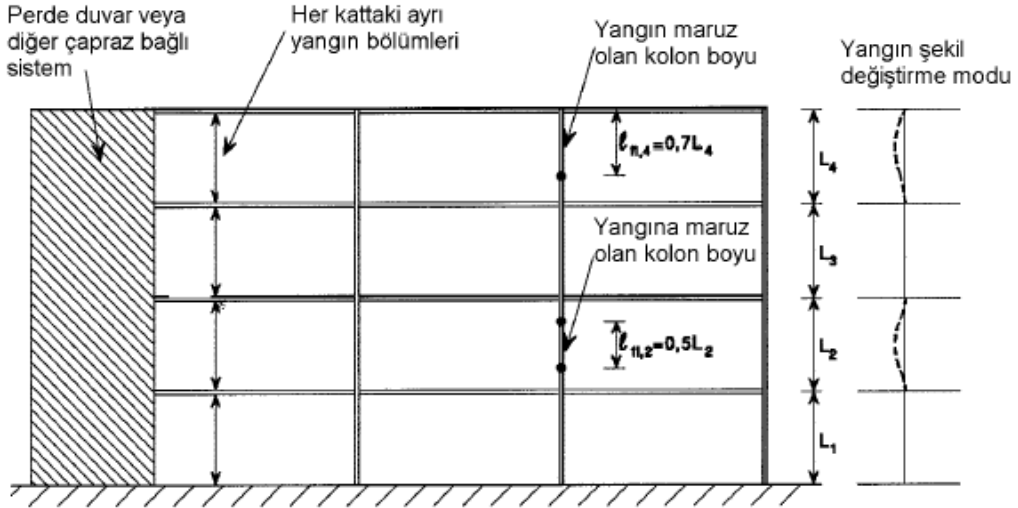
$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \left[k_{y,\theta} / k_{E,\theta} \right]^{0.5} \quad (4.11)$$

denklemiyle hesaplanır $\bar{\lambda}$ normal sıcaklıkta boyutsuz narinlik oranı, $k_{E,\theta}$ çeliğin, t süresinde ulaştığı θ_a sıcaklıktaki gerilme-şekil değiştirme eğrisinin doğrusal elastik kısmının eğimi için azaltma faktörüdür. Normal sıcaklığa göre tasarımda kullanılan boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}$, TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre aşağıdaki denklem

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} \quad (4.12)$$

kullanılarak hesaplanır. Burada ℓ_{cr} burkulma düzleminde kolon burkulma boyu, i hesap yapılan eksene göre atalet yarıçapıdır [25].

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] Madde 4.2.3.2 (3)'e göre yangına karşı tasarımda kullanılan kolon burkulma boyu l_{fi} genellikle normal sıcaklığa göre yapılan tasarımda olduğu gibi tayin edilmelidir. Bununla beraber, çapraz bağlı bir çerçevede, kolon burkulma boyu, l_{fi} , yangın bölümlerini (yangına maruz kalan bölümleri) ayıran bina elemanlarının yangın direncinin, kolonun yangın direncinden daha az olmaması şartıyla, üst ve alt katlardaki yangın bölmelerinde bulunan kolonların doğrultusundaki sürekli veya yarı sürekli bağlantı noktalarına sabitlenmiş şekilde değerlendirerek belirlenmektedir (Şekil 4.3).



Şekil 4.3: Çapraz bağlı çerçevelerde kolonların burkulma boyları [25].

4.6.4. Kritik Sıcaklık Yöntemi

Çelik yapısal elemanların maksimum sıcaklıktaki dayanımlarını hesaplama yöntemine alternatif olarak doğrulama işlemi, sıcaklık alanı içerisinde yürütülmektedir. Çelik elemanın yangın anındaki kullanımına bağlı olarak bir sınır sıcaklığı belirlemek için kritik sıcaklık yöntemi TS EN 1993-1-2, 2007 [25] Madde

4.2.4' de açıklanmaktadır. Bu yöntem yangına maruz yapısal elemanların yangına dayanıklılıklarını belirlemede kullanılan en basit yöntemdir.

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] Madde 4.2.4'e göre kritik sıcaklık yöntemi yalnızca deformasyon (şekil değiştirme) kriterlerinin veya stabilite durumunun dikkate alınmadığı eleman tipleri için kullanılmaktadır. Bu nedenle çekme elemanları ve bağlı kirişler için kullanılabilirken kolon ve bağlı olmayan kirişler gibi stabilitenin söz konusu olduğu elemanlarda kullanılmaz.

Kritik sıcaklık yöntemine göre çelik yapı eleman sıcaklığının $\theta_{a,t}$, yangına maruz kaldığı "t" süresi boyunca kritik sıcaklığa θ_{cr} eşit ya da daha az olması sağlanmalıdır.

$$\theta_{a,t} \leq \theta_{cr} \quad (4.13)$$

Kritik sıcaklık θ_{cr} düzgün sıcaklık dağılımı olan çelik elemanda göçme anındaki sıcaklık olarak tanımlanır ve TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre aşağıdaki Denklem 4.14 kullanılarak belirlenmektedir.

$$\theta_{cr} = 39,19 \ln \left[\frac{1}{0,9674 \mu_0^{3,883}} - 1 \right] + 482 \quad (4.14)$$

Burada; μ_0 $t = 0$ anındaki zorlanma derecesi olarak tanımlanmaktadır.

$$\mu_0 = \frac{E_{fi,d}}{R_{fi,d,0}} \quad (4.15)$$

denklemini ile elde edilir ve 0.013'den küçük alınmamalıdır. Burada: $E_{fi,d}$ yangın etkisinde oluşan eylemlerin tasarım etkileri, $R_{fi,d,0}$ yangın etkisindeki çelik elemanın $t = 0$ anına (normal sıcaklık) karşılık gelen tasarım dayanım değeridir [25].

Ayrıca TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde çekmeye maruz elemanlar ve yanal burulmadan kaynaklanan burkulmanın muhtemel bir hasar şekli olmadığı kirişler için alternatif olarak, μ_0 değerinin aşağıdaki Denklem 4.16 kullanılarak hesaplanmasının emniyetli tarafta kalınmasını sağladığı belirtilmektedir.

$$\mu_0 = \eta_{fi} \left[\frac{\gamma_{M,fi}}{\gamma_{M,0}} \right] \quad (4.16)$$

Burada; η_{fi} tasarım yük düzeyinde yangın için azaltma faktörü, $\gamma_{M,fi}$ yangın anında kullanılacak malzeme katsayısı ve $\gamma_{M,0}$ normal sıcaklıkta kullanılacak malzeme katsayısıdır. 0,22'den 0,80'e kadar olan μ_0 değerleri için θ_{cr} değerlerine ilişkin örnekler Çizelge:4.2'de verilmektedir [25].

Çizelge 4. 2: Zorlanma faktörü, μ_0 , değerleri için kritik sıcaklık [25].

μ_0	θ_{cr}	μ_0	θ_{cr}	μ_0	θ_{cr}
0,22	711	0,42	612	0,60	549
0,24	698	0,44	605	0,62	543
0,26	685	0,46	598	0,64	537
0,28	674	0,48	591	0,66	531
0,30	664	0,50	585	0,68	526
0,32	654	0,52	578	0,70	520
0,34	645	0,54	572	0,72	514
0,36	636	0,56	566	0,74	508
0,38	628	0,58	560	0,76	502
0,40	620	0,60	554	0,78	496

Kritik sıcaklık θ_{cr} denklemi enkesit Sınıf 4 olan elemanlar hariç tüm enkesit sınıfları için geçerlidir. Enkesit Sınıfı 4 olan elemanlarda (yerel burkulma oluşan elemanlar) θ_{cr} olarak 350°C kullanılmaktadır [25].

4.7. ÇELİK SICAKLIĞINDAKİ ARTIŞ

4.7.1. Korunmayan dâhili çelik yapı

Çelik yapı profillerinde sıcaklık dağılımının eşdeğer yayılım gösterebilmesi için korunmasız bir çelik elemanda Δ_t zaman $\Delta\theta_{a,t}$, olarak adlandırılan ısı artışı aşağıda verilen Denklem 4.17 ile elde edilmektedir.

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a p_a} h_{net} \Delta_t \quad (4.17)$$

Düzeltilme faktörü	k_{sh}	
Korunmayan çelik elemanların kesit katsayısı	A_m / V	[1/m]
Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı	A_m	[m ² /m]
Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi	V	[m ³ /m]
Çeliğin, özgül ısısı	c_a	[J/kgK]
Birim alana düşen net ısı akışının tasarım değeri	h_{net}	[W/ m ²]
Süre	Δ_t	[saniye],
Çeliğin, birim hacim kütlesi	p_a	[kg/ m ³]

Standart yangına maruz kalan I profillerde, düzeltme faktörü aşağıda verilen Denklem 4.18 ile belirlenmektedir.

$$k_{sh} = 0,9 \times \frac{[A_m / V]_b}{[A_m / V]} \quad (4.18)$$

Burada $[A_m / V]_b$ kesit faktörüdür.

Diğer durumlarda ise k_{sh} düzeltme faktörü aşağıda verilen Denklem 4.19 yardımıyla saplanılmaktadır.

$$k_{sh} = \frac{[A_m / V]_b}{[A_m / V]} \quad (4.19)$$

Enkesit şekli dış bükey olan ve her bir tarafı yangın ile sarılmış yapı elemanları için düzeltme faktörü $k_{sh} = 1$ kabul edilmektedir. Düzeltme faktörünün bire eşit olması herhangi bir etkisinin olmadığı ve yapının emniyetli tarafta kaldığını göstermektedir.

Birim alana düşen net ısı değeri:

$$h_{net} = h_{net,r} - h_{net,c} \quad (4.20)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde net konvektif ısı akısı birleşeni:

$$h_{net,c} = \alpha_c \cdot (\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4.21)$$

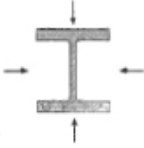
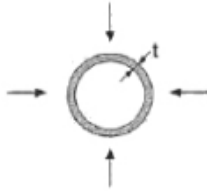
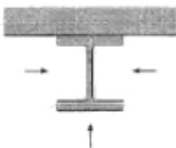

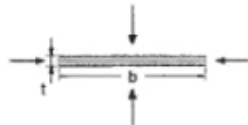
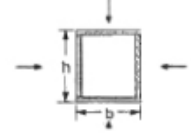
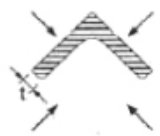
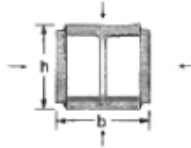

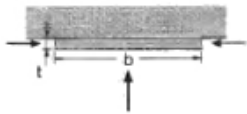
denklemleri ile ve radyoaktif (ışınmayla) ısı akısı birleşeni ise

$$h_{net,r} = \phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W}/\text{m}^2] \quad (4.22)$$

belirlenmiştir. Bu denklemde $\varepsilon_f = 1,0$ alınır, ε_f ve ε_m TS EN 1991-1-2',2004 [23]'den elde edilerek hesaplanır.

Δ_t değeri ise maksimum 5 saniye kabul edilebilmektedir. Bunun yanı sıra kesit faktör değeri aşağıda verilen TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde mevcut olan Çizelge 4.3'den elde edilerek hesaplanır. Korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörü A_m / V değeri 10m^{-1} 'den daha küçük olmamalıdır [25].

Çizelge 4. 3: Korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörü [25].

<p>Bütün yüzeyleri yangına maruz kalan açık kesit:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{\text{çevre uzunluğu}}{\text{en kesit alanı}}$ 	<p>Bütün yüzeyleri yangına maruz kalan dairesel kesit:</p> $A_m / V = 1 / t$ 
<p>Üç yüzeyi yangına maruz kalan açık kesit:</p> $\frac{A_m}{V} = \text{yangına maruz olan yüzey} / \text{enkesit alanı}$ 	<p>Bütün yüzeyleri yangına maruz kalan içi boş kesit (veya sabit kalınlıkta kaynaklı boş kesit):</p> $t \ll b \text{ ise: } A_m / V \approx 1 / t$ 
<p>Üç yüzeyi yangına maruz kalan I profil başlığı:</p> $A_m / V = (b+2t) / (bt)$ $t \ll b \text{ ise: } A_m / V \approx 1 / t$ 	<p>Bütün yüzeyleri yangına maruz kalan kaynaklı kutu kesit:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{en kesit alanı}}$ $t \ll b \text{ ise: } A_m / V \approx 1 / t$ 
<p>Tüm yüzeyleri yangına maruz kalan köşebent:</p> $A_m / V = 2 / t$ 	<p>Bütün yüzeyleri yangına maruz kalan kutu donatılı I kesit:</p> $\frac{A_m}{V} = \frac{2(b+h)}{\text{en kesit alanı}}$ 
<p>Tüm yüzeyleri yangına maruz kalan içi dolu profil:</p> $A_m / V = 2(b+t) / (bt)$ $t \ll b \text{ ise: } A_m / V \approx 2 / t$ 	<p>Üç yüzeyi yangına maruz kalan içi dolu profil:</p> $A_m / V = (b+2t) / (bt)$ $t \ll b \text{ ise: } A_m / V \approx 1 / t$ 

4.7.2. Yangından Koruma Malzemesi ile Yalıtılmış Dâhili Çelik Yapı

Çelik yapı elemanlarında sıcaklık artışını azaltmak amacıyla yangından koruma malzemesi ile korunarak Δt zaman aralığında oluşabilecek sıcaklık artışı $\Delta\theta_{a,t}$, aşağıda verilen Denklem 4.23 ile hesaplanmaktadır. ($\theta_{g,t} > 0$ ise $\theta_{a,t} > 0$) olmalıdır.


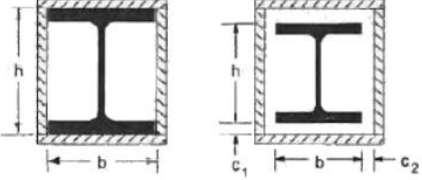
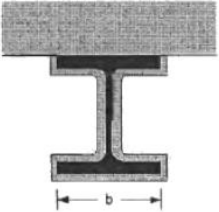
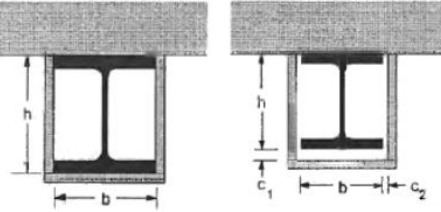
$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a p_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (\theta_{g,t} > 0 \text{ ise } \theta_{a,t} > 0) \quad (4.23)$$

$$\phi = \frac{c_p p_p}{c_a p_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (4.24)$$

Yangından koruma malzemesi ile yalıtılmış çelik yapı elemanlarının kesit faktörü	A_p/V	
Yangından koruma malzemesinin alanı	A_p	[m ² /m]
Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi	V	[m ³ /m]
Çeliğin sıcaklığa bağlı özgül ısısı	c_a	[J/kgK]
Yangından koruma malzemesinin kalınlığı	d_p	[m]
Süre	Δt	[saniye]
t anındaki çelik sıcaklığı	$\theta_{a,t}$	[°C]
t anındaki ortam gaz sıcaklığı	$\theta_{g,t}$	[°C]
t süresince ortam gaz sıcaklığındaki artış	$\Delta\theta_{g,t}$	[K]
Yangından koruma sisteminin ısı iletkenliği	λ_p	[W/mK]
Çeliğin birim hacim kütlesi	p_a	[kg/ m ³]
Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi	p_p	[kg/ m ³]

Δt zaman aralığı maksimum 30 saniye alınması gerekmektedir. Burada yangından koruma malzemesinin alanı A_p , genellikle iç yüzey alanı eleman ile arasında belirli bir açıklık olan içi bos bir çerçeve elemanında o eleman için kullanılan değer aynı olmalıdır. TS EN 1993-1-2, 2007 [25]'den alınan Çizelge 4.4'de koruma malzemesi ile kaplanmış çelik elemanlarda kesit faktörüne ilişkin detaylar verilmektedir [25].

Çizelge 4. 4: Koruma malzemesi ile kaplanmış çelik elemanlar için kesit faktörü [25].

Gösterim	Tarif	Kesit faktörü (A_p / V)
	Sabit kalınlıkta çevreleme elemanı	$\frac{\text{çelik çevre uzunluğu}}{\text{çelik en kesit alanı}}$
	Sabit kalınlıkta içi boş çevreleme elemanı ¹⁾	$\frac{2(b + h)}{\text{çelik en kesit alanı}}$
	Üç tarafı yangına maruz olan çelik profillerin sabit kalınlıkta çevreleme elemanı ile çevrenmesi	$\frac{\text{çelik çevre uzunluğu} - b}{\text{çelik en kesit alanı}}$
	Üç tarafı yangına maruz olan çelik profillerin sabit kalınlıkta içi boş çevreleme elemanı ile çevrenmesi ¹⁾	$\frac{2h + b}{\text{çelik en kesit alanı}}$

¹⁾ Aralık boyut ölçüleri c_1 ve c_2 normal şartlarda $h/4$ 'ü aşmamalıdır.

5. ÇELİK ELEMANLARIN YANGINDAN KORUNMASI

Çelik yapı elemanları normal koşullarda yüksek mukavemet ve dayanım gösteriyor olsa bile ortam sıcaklığının artmasıyla bu özelliklerini hızlı bir şekilde kaybetmektedirler. Çelik yapı elemanlarının bu dezavantajını azaltmak adına çeşitli izolasyon yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak bu yöntemler yapının maliyetine yaptığı artış nedeniyle yapısal çelik son yıllarda korunmasız olarak kullanılmaktadır.

Yangınların, can ve mal kayıpları ile sonuçlanmasının sebebi, gerekli güvenlik önlemlerinin ya hiç ya da yeterli düzeyde alınmamasından kaynaklanmaktadır. Yangın esnasında; algılama, müdahale, önleme, kurtarma vb. önlemlerin bir bütün içerisinde ele alınması, yangın güvenlik önlemleri olarak adlandırılmaktadır. Yapılarda yangın güvenliğinin sağlanmasında başvurulan temel iki teknik, "Aktif Koruma" ve "Pasif Koruma" dır [27].

5.1. YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİ

Günümüzde uygulanan yangın koruma önlemleri için iki temel yöntem kullanılmaktadır:

-Aktif Yangın Koruma

-Pasif Yangın Koruma

5.1.1. Aktif Yangın Koruma

Aktif yangın koruma önlemleri başlangıç anında ya da ilk safhalarında yangını veya dumanı algılayabilen yangının yayılmasına izin vermeden sınırlandırıp bölgesel olarak söndürmeyi amaçlayan güvenlik önlemlerini içermektedir. Bu sistemlerin yangın durumunda yapılarda sağlatılması istenen can ve mal güvenliği seviyeleri üzerinde çok önemli etkilere sahiptir. Bu sistemlerle yangına başlangıç aşamasında müdahale edilerek yangının sınırlandırılması amaçlanmaktadır. Böylece insanların güvenli tahliyesi sağlanarak can ve mal kayıpları en az seviyeye indirgeye bilinir.

Aktif yangın koruma önlemleri genellikle iki ayrı gruba ayrılabilir: a) yangın algılama ve uyarı sistemleri olan dedektörler ve alarm butonları ve b) yangın engelleme ve söndürme elemanları olan sprinkler sistemleri. İlk grupta yer alan detektörler ve alarm sistemleri yangının olduğu yapılarda insanları uyararak güvenli

olarak yapıları tahliye etmeyi amaçlar. Şekil 5.1’de tipik bir detektör ve alarm butonu görülmektedir.



Şekil 5. 1:Yangın dedektörü ve alarm butonu [27,31].

İkinci grupta ise yangın esnasında otomatik olarak devreye giren sprinkler sistemleri yer almaktadır. Küçük yangınları otomatik olarak söndürmeyi sağlayan bu cihazlar yangını söndürmek, soğutmayı sağlamak ve gelişen yangını sınırlamak amacıyla kurulan ve su püskürtmesi yapan sistemlerdir. Şekil 5.2’de sprinkler cihazı ve çalışma sistemi görülmektedir [27].



Şekil 5. 2: Sprinkler cihazı ve çalışma sistemi [27].

5.1.2. Pasif Yangın Koruma

Yapılarda yangından dolayı meydana gelen yüksek sıcaklıklar tüm yapı elemanlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilemektedir. Sıcaklık arttıkça yapı malzemelerinin dayanım ve rijitliklerinde hızlı azalmalar gözlenmektedir. Yangına maruz yapıların yük taşıma kapasitesi, kayıpları geciktirmek için yapı elemanların dayanımlarını artırmak ve yangına karşı korumak çoğu zaman bir gerekliliktir. Yapı elemanlarını kaplamalar, spreyleyler ve şişen boyalar gibi malzemelerle yalıtarak yangından korumak mümkün olabilir. Yapılarda yangın esnasında oluşan sıcaklık

artışlarını geciktirmek için kullanılan bu yangın koruma malzemeleri ve sistemleri genellikle bir veya birden fazla mekanizma dikkate alınarak tasarlanırlar. Bu mekanizmalar düşük ısıl iletkenlik, yüksek ısı kapasitesi, ısı soğuran (emen) fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar, kabarma ve tekrar ışıma diye adlandırılırlar. Bu yangından koruma malzemelerinin performansları test edilerek mevcut yönetmeliklerce (örn. EUROCODE) belirlenmektedir.

Pasif koruma malzemeleri genellikle yangınla reaksiyona giren (reaktif) ve yangınla reaksiyona girmeyen (reaktif olmayan) malzeme olarak ikiye ayrılırlar. Reaktif olmayan koruma malzemeleri yangına maruz kaldıklarında özelliklerini korurlar. Reaktif olmayan koruma malzemelerinden en yaygın olarak kullanılanları kaplamalar ve spreylerdir. Reaktif koruma malzemeleri ise yangına maruz kaldıklarında değişken özellikleriyle tanımlanırlar. Bu tip koruma malzemelerinden en çok bilineni şişen (intümesan) boyalardır [27].

5.1.2.1. Kaplamalar

Kaplamalar, günümüzde yapısal çelik elemanların yangına karşı korumasında en çok kullanılan koruma yöntemidir. Yangına maruz yapısal çelik elemanlarını 30 ile 120 dakika arasında yangından koruyabilmek amacıyla çeşitli özelliklere sahip kalınlıkları 5 mm ila 50 mm arasında değişkenlik gösteren tipleri (plakaları) mevcuttur. Genellikle mineral liflerden ya da doğal olarak meydana gelen vermikulit ve mika gibi plaka benzeri malzemelerden çimento veya silikat bağlayıcılar kullanılarak üretilirler. Kaplamalar çelik elemanlar üzerine vida, bağlama kayışları veya galvanizli köşebentlerle mekanik olarak tespit edilebilirler veya yapıştırılabilirler.

Kaplamalar kalite standartlarına uygun olarak çeşitli kalınlıklarda fabrikalarda üretilmektedirler. Yapısal elemanları çevreleyerek oluşturdukları kutu görünümüleriyle temiz bir iç mekân sağlarlar. Ancak bu elemanları karmaşık sistemlere sahip yapısal elemanlarda uygulamak çok kolay değildir. Estetik görünümüleri nedeniyle genellikle dekoratif amaçlı mekânlarda kullanılmaktadırlar. Dekoratif olmayan kaplamalar, dekoratif kaplamalara göre daha ekonomik olmalarına rağmen bu elemanlar spreylere ve şişen (intümesan) boyalara göre yüksek maliyetli yangın koruma malzemeleridir.

Bunlara ek olarak kaplamalar için gereken uygulama süresi sadece yapı maliyetini değil aynı zamanda inşa süresini de artırmaktadır [27].

5.1.2.2. Spreyler

Günümüzde yapısal çeliği yaygından korumada kullanılan en yaygın yöntem spreylendir. Sprey malzemeler ısı yalıtım özelliği yüksek olan mineral lif, vermikülit ve/veya hafif agrega içeren esas olarak çimento veya alçı bazlı malzemelerdir. Bu yangın koruma yöntemi yerinde (şantiyede) doğrudan çelik yüzeye püskürtülerek uygulanmaktadır. Görünümleri estetik olmadığından, genellikle asma tavanların üzerinde görünmeyen kirişlerde ve dekoratif görünümünün önemli olmadığı hacimlerde bulunan yapısal elemanların korunması amacıyla kullanılırlar. Ayrıca karmaşık sistemlere sahip elemanların korunmasında özellikle tercih edilirler. Buna karşın yerinde yapılan sprej uygulamalarının kapsamlı şekilde koruyucu kaplama gerektirmesi inşa süresini etkileyebilir. Uygulanmasının kolay ve hızlı, işçilik maliyetinin ekonomik olması nedeniyle bu koruma yöntemi son 50 yıldır artarak kullanılmaktadır. çelik elemanların korunmasında yaygın olarak kullanılan 10 ile 35 mm kalınlıklı sprej (püskürtme) kaplamalar 30 ile 120 dakika arasında yangına karşı dayanım süresi sağlamaktadır. Bununla beraber yüksek ısı ve mekanik özelliklere sahip malzemelerin kullanımıyla dört saate varan dayanım süreleri elde edilebilmektedir [27].

5.1.2.3. Şişen (İntümesan) Boyalar

Yangınla kimyasal olarak reaksiyona girmeyen kaplama ve sprej koruma yöntemlerine karşın şişen (intümesan) boyalar yangınla reaksiyona girerler. Yangın esnasında maruz kaldıkları ısı ya da alev nedeniyle şişerek kabarak kalınlaşp kömürsü bir köpük tabakası oluşturarak yüzeyin hava, ısı ve ateş ile temasını engelleyip yanmayı yavaşlatan boyalardır. Şişen (intümesan) boyalar çeşitli kimyasal bileşiklerden oluşan koruma malzemeleridir. Ahşap, plastik ve çelik yüzeylere uygulanabilirler. Yangından dolayı artan ısı ile orijinal kalınlıklarının yaklaşık 50 katı kadar şişebilirler. 0,25 ile 2,5 mm arasında değişen kalınlığa sahip şişen (intümesan) boyalar 30 ile 120 dakika arasında yangına karşı dayanım sağlamaktadırlar.

Şişen (intümesan) boyalar görünüşte geleneksel boyalara benzerdirler ve iki farklı kategoride sınıflandırılabilirler; su veya solvent (su ile karışan ve çözücü olarak kullanılan sıvı) bazlı (şişen boya veya ince film kaplama olarak da adlandırılırlar) ve epoksi bazlı (mastik veya kalın film kaplama olarak da adlandırılır) boyalardır. Su ve solvent bazlı boyalar nispeten ince (genellikle kalınlıkları en fazla 5mm) kaplamalardır. Bu tip şişen (intümesan) boyalar bazı binaların dış cephelerinde kullanılmalarına rağmen, çoğunlukla bina içindeki görünen yüzeyler için tasarlanmıştır. epoksi bazlı şişen boyalar ise kalın (kalınlıkları en fazla 45mm) kaplamalardır ve genellikle petrokimya tesislerinde kullanılır.

Şişen (intümesan) boya uygulaması üç kattan oluşur; i) ilk kat paslanmaya karşı koruyucu astar, ii) ikinci kat şişen bileşim, iii) üçüncü kat ise dekoratif katmandır (geniş bir renk yelpazesi mevcuttur). Şişen (intümesan) boyalar genellikle fırça, püskürtme veya mala ile uygulanmalarının yanı sıra düzgün dekoratif bir yüzey elde etmek isteniyorsa da havasız spreyle uygulanırlar. Günümüzde çoğu şişen boya uygulaması inşaat yapım süresine destek olmak için saha dışında yapılmaktadır. Bu şişen (intümesan) boyalar çeliğin mimari ve estetik açıdan önem taşıdığı yapılarda özellikle tercih edilirler. Bunların yanında yangın geciktirici bu boyalar dış kaplamalarda veya bina görünümünün korunması gereken tarihi yapılarda da kullanılırlar. Şekil 5.3'de şişen boyaların uygulama katmanları ile ısı etkisindeki davranışı görülmektedir [27].



Şekil 5. 3: Şişen boyaların uygulama katmanları ile ısı etkisindeki davranışı [32].

Çelik yapıların yangına dayanıklı yapı tasarımı yapılırken tasarımda kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1’de verildiği şekilde kullanılmalıdır.

Çizelge 5. 1: Ön tasarım için malzeme özellikleri [33].

Malzeme	Birim hacim Kütlesi ρ_p [kg/m ³]	Termal iletkenlik Λ_p [W/(m.K)]	Özgül ısı c_p [J/(kg.K)]
SPREY			
Mineral lif	300	0,12	1200
Vermikülit	350	0,12	1200
Perlit	350	0,12	1200
YÜKSEK YOĞUNLUKLU SPREYLER			
Vermikülit (veya perlit) ve çimento	550	0,12	1100
Vermikülit (veya perlit) ve alçı	650	0,12	1100
KAPLAMALAR			
Vermikülit (veya perlit) ve çimento	800	0,20	1200
Lifli silikat veya lifli kalsiyum silikat	600	0,15	1200
Lifli çimento	800	0,15	1200
Alçı kaplama	800	0,20	1700
SIKIŞTIRILMIŞ LİFLİ KAPLAMA			
Lifli silikat, mineral veya taş yünü	150	0,20	1200
Beton	2300	1,60	1000
Hafif beton	1600	0,80	840
Beton tuğla	2200	1,00	1200
Delikli tuğla	1000	0,40	1200
Dolu tuğla	2000	1,20	1200

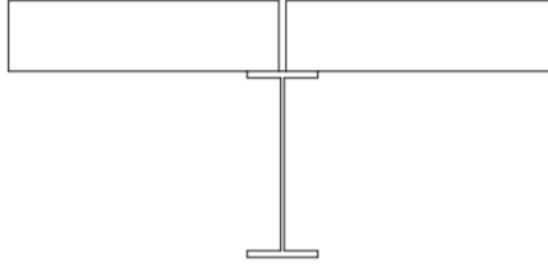
5.2. YANGINA DAYANIKLI YAPI

Son yıllarda yangına dayanıklı yapı tasarımının önemi giderek artmaktadır. Yapıların yangın koruma önlemlerinden pasif koruma malzeme maliyetlerinin yüksek olması bünyelerinde doğal olarak yangına karşı dayanıklılığı bulunan ve özel olarak yangın koruması gerektirmeyen alternatif yapısal sistemlerin geliştirilmesine yol

açmaktadır. Bu sistemler; kompozit döşemeler, bütünleşik (integrated) kirişler ve kısmen betona gömülü kiriş, kolon yapısal elemanlardır.

5.2.1. Kompozit Döşeme

Ön üretilmiş (prekast) beton döşemeler, genellikle üç tarafı yangına maruz ve yangın koruma gerektiren kiriş üst başlığına oturtularak teşkil edilir (Şekil 5.4). Bu kirişlerin yangın dayanım süresi farklı uygulama tekniklerine göre değişiklik göstermektedir. Ön üretilmiş beton döşemeler yeterli donatı miktarının sağlanması ve uygun donatı detaylandırılması ile 120 dakikaya kadar yangına karşı dayanım gösterirler [27].

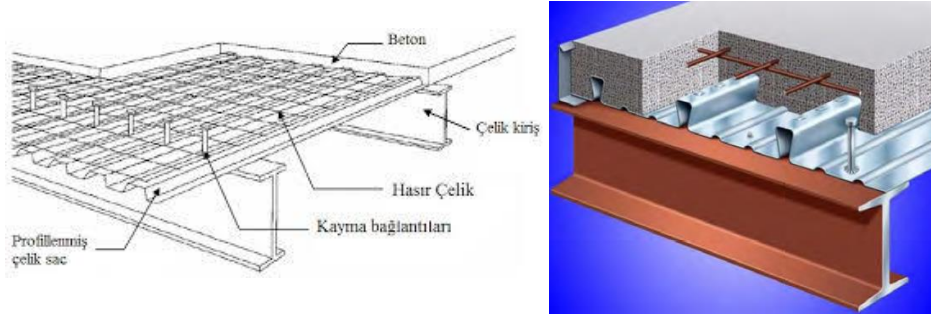


Şekil 5. 4: Kiriş üst başlığına oturan ön üretilmiş beton döşeme [27].

Kompozit döşemeler, ön üretilmiş (prekast) beton döşemelere alternatif olarak özellikle çok katlı yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu döşemeler çelik kirişlere mesnetlenen profillenmiş trapez sac üzerine donatılı beton dökülmesiyle teşkil edilirler (Şekil 5.5). Profillenmiş çelik sac, inşaat yapım sürecinde işçiler ve malzeme için platform, ayrıca ıslak beton için kalıp görevini görürken, beton yeterli dayanıma ulaştığında ise, eğilmenin çekme bileşeninin tamamını veya bir kısmını taşıyan donatı görevini üstlenir [34]. Döşeme iç mesnetlerinde sürekliliği sağlamak ve betondaki rötre ve oturma kaynaklı çatlakları kontrol altında tutmak için ilave donatı kullanılabilir. Çatlak kontrolünün yanı sıra, ilave donatı yangın esnasında döşeme mesnetlerinde eğilme dayanımı sağlamaktadır [27].

Çelik yapılarda kompozit döşeme davranışının dayanım sürelerini önemli oranda arttırdığı yapılan çalışmalarla gösterilmektedir [35]. Kompozit döşemelerde istenilen (gerekli) yangın dayanım süresi betonun yeterli yalıtım derinliği

oluşturularak sağlanabilir. Bu döşemelerde yangın dayanım süresi, döşeme şekline (trapez veya girintili (re-entrant) sac), beton ağırlığına (normal veya hafif ağırlıklı beton) ve beton yalıtım kalınlığına bağlı olarak değişmektedir. İstenilen yangın dayanım süresinin uzun olması, yalıtım betonunun da kalın olmasına neden olmaktadır [27]. Kompozit döşemelerde yangın dayanım süresi 120 dakikaya kadar çıkabilmektedir.



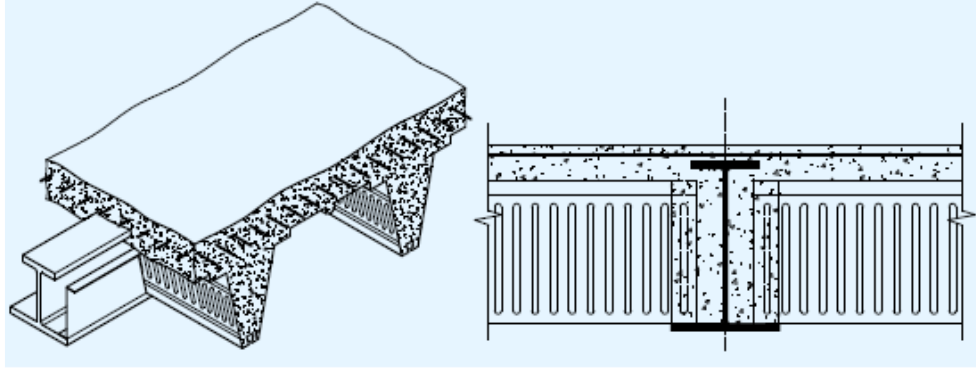
Şekil 5. 5: Kompozit döşeme [27,36].

5.2.2. Bütünleşik Döşeme Kirişler, (Integrated Floor Beams)

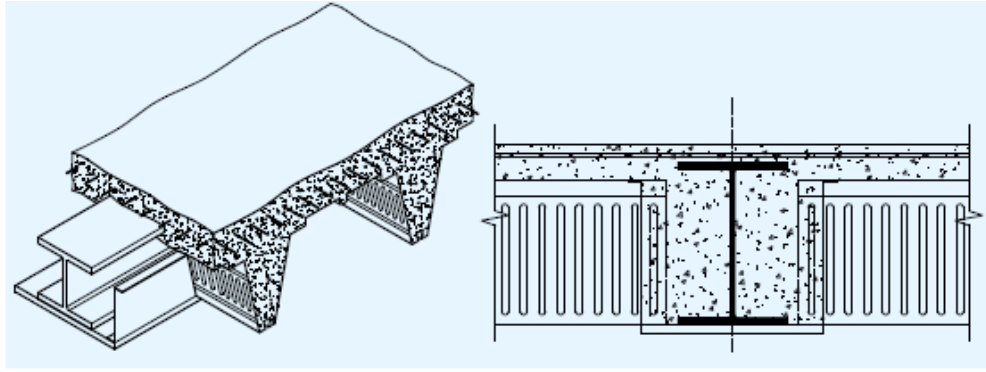
Ön üretilmiş beton döşemeler ve kompozit döşemeler kiriş üst başlığına mesnetlendiğinden döşemenin altında kalan kiriş yüzeyleri üç taraftan yangına maruz kalırlar ve yangın dayanım süreleri sınırlıdır. Bu tip sistemlerde yangın dayanım sürelerini artırmak için kirişler tamamen ya da kısmen beton içine yerleştirilir [37].

Döşemenin kiriş üst başlığına mesnetlenmesi yerine bütünleşik kirişler döşeme sisteminin bir parçası olarak yerinde dökme veya ön üretilmiş beton döşeme derinliğinin içinde yer alırlar [27]. Böylece alt başlık ya da levha haricinde tüm çelik kesit beton ile kaplanarak yangına karşı yalıtımı sağlanır. Açık kesitli bütünleşik kirişler, asimetrik çelik kiriş ve bütünleşik üretilen kiriş olarak iki gruba ayrılır. Bu kirişler sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 de görülmektedir.

Genellikle, yangın korumasız bütünleşik kirişler 60 dakikaya kadar yangına dayanım sağlamaktadırlar. İlave boyuna donatı kullanımıyla korumasız bir alt başlıkla yangına dayanım süresi 90 dakikaya kadar çıkabilmektedir [27].



Şekil 5. 6: Asimetrik bütünleşik kiriş detayları [27].

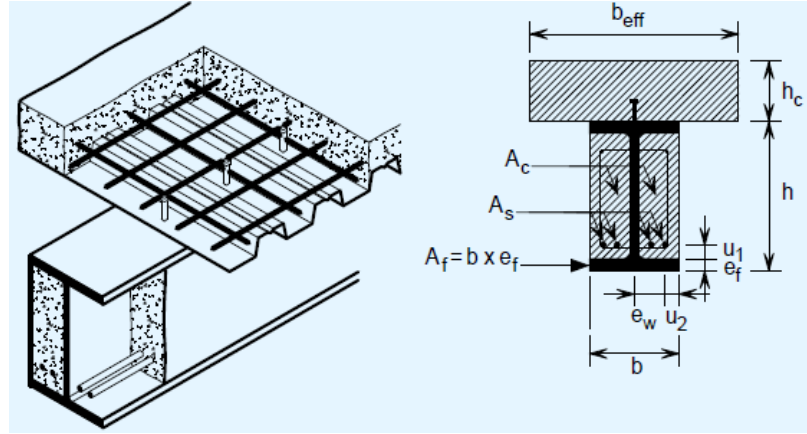


Şekil 5. 7: Bütünleşik üretilen kiriş [27].

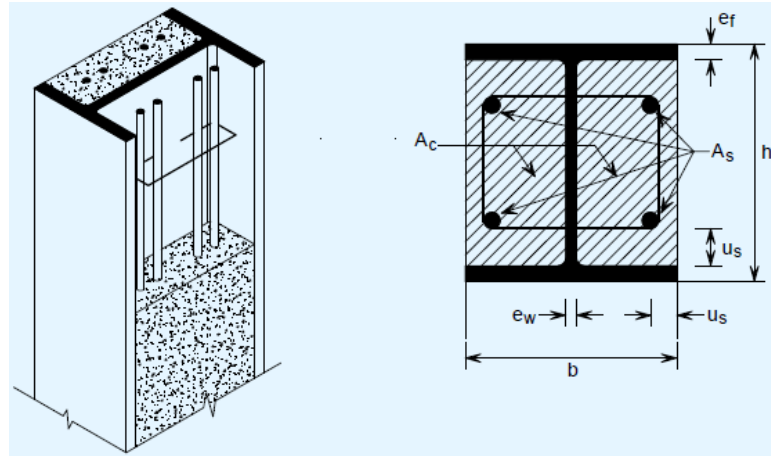
5.2.3. Kısmen betona gömülü kiriş ve kolon elemanlar (Kompozit kiriş ve kolon elemanlar)

Kısmen betona gömülü kiriş ve kolon taşıyıcı elemanlar, I kesitli çelik profillerin alt ve üst başlıkları arasında kalan boşluklarının düz ya da donatılı betonla doldurulmasıyla teşkil edilirler. Kısmen betona gömülü kiriş ve kolon elemanı ve enkesit detayları sırasıyla Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’da verilmektedir. Korumasız çelik taşıyıcı elemanların yangın dayanımları dikkate alındığında özellikle yangın dayanım süresi 15 dakika olan korumasız I kesitli profillerle karşılaştırıldıklarında kısmi gömülü kesitler 60 dakikaya kadar yangına dayanım gösterebilmektedirler [27]. Düşük ısı iletkenliği sahip beton kullanarak çelik taşıyıcı elemanın daha çok yüzey alanının kaplanması, yangın dayanım süresinde artışa neden olmaktadır. Bununla beraber beton içindeki donatı miktarının artırılmasıyla daha uzun dayanım süreleri elde edilir. Böylece yangın esnasında çelik taşıyıcı elemanlarda oluşan dayanım kaybı telafi edilmektedir.

Kısmen betona gömülü çelik kesitleri de içeren kompozit kiriş ve kolon elemanların yangına karşı dayanımları yönetmeliklerce ifade edilmektedir. Bu yaklaşıma göre kompozit elemanların yangın dayanımları, yük seviyelerine, enkesit özelliklerine, eleman tipine ve donatı miktarına bağlı olarak belirlenmektedir. Genellikle kısmen betona gömülü çelik kesitlerin yangın dayanımının ve yük seviyesinin artması, daha büyük en kesitler ve ilave donatı miktarı gerektirmektedir.



Şekil 5. 8: Kısmen betona gömülü kiriş elemanı [27].



Şekil 5. 9: Kısmen betona gömülü kolon elemanı [27].

5.2.4. Harici Çelik Konstrüksiyon (External steelwork)

Modern çelik çerçeveli binalarda, belli durumlarda kiriş ve kolon gibi ana taşıyıcı elemanlar cephenin dışında teşkil edilmektedir. Bu tip yapılarda cephenin dışında yer alan taşıyıcı elemanlar yangın esnasında sadece pencerelerden ya da diğer açıklıklardan çıkan alevlere maruz kalacaktır. Bu sebeple harici çelik konstrüksiyonun maruz kalacağı sıcaklık, binanın içerisinde kalan çelik elemanlara göre daha düşük

olacaktır. Buda harici elik konstrüksiyonun yangın korunma gereksinimlerini önemli ölçüde azaltmaktadır [27]. Harici elik konstrüksiyon yangın tasarımı için daha fazla bilgi TS EN 1993-1-2, 2007 [25]'de mevcuttur.

6. SAYISAL UYGULAMALAR

6.1. GİRİŞ

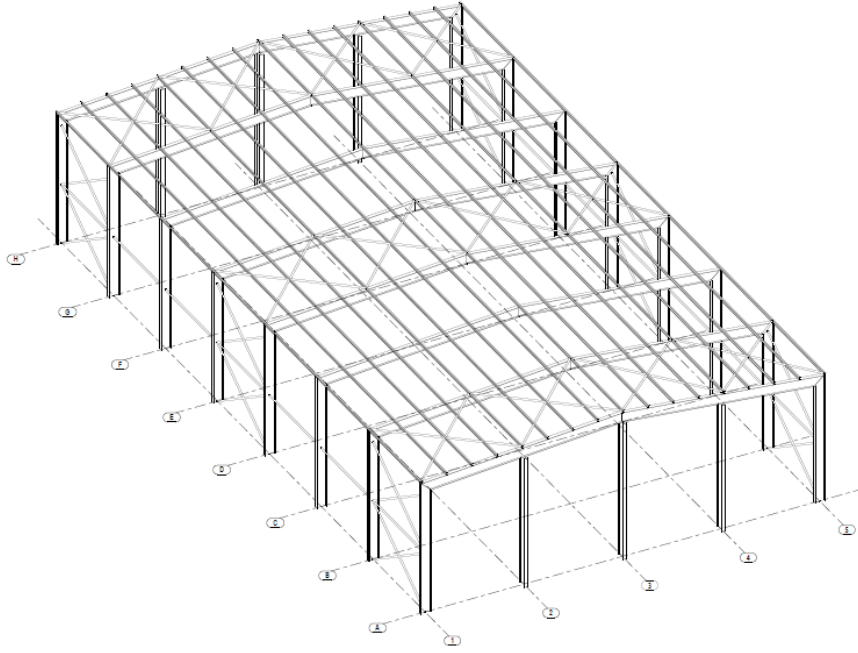
Bu çalışmada yangın etkisinde çelik yapılarda kullanılan yangın koruma malzeme ve sistemlerinin yapısal elemanların yangına dayanıklılığı üzerindeki etkisi incelenmektedir. Ayrıca çelik yapı elemanlarının yangına karşı dayanımını belirlemek için, bu elemanların yangın tasarımları gerçekleştirilmiş ve kritik sıcaklık değerleri yönetmeliklere göre belirlenmiştir.

Bu kapsamda tek katlı, tek açıklıklı endüstriyel çelik bir yapı seçilerek yangına dayanıklılığı incelenmiştir.

Çalışmanın ilk aşamasında mevcut bir çelik endüstri yapısı ele alınmış ve yapısal elemanların yangına karşı dayanımları EUROCODE yönetmeliğince belirlenmiştir. Sonraki aşamada mevcut endüstri yapısı Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine 2016 [38] göre normal şartlar altında yeniden boyutlandırılmış ve yangın tasarımları yapılmıştır. Çalışmanın son aşamasında ise 3 farklı yangın koruma yöntemi kullanılarak hem mevcut yapı elemanlarının hem de yeniden boyutlandırılan yapı elemanlarının yangına karşı dayanım stratejileri araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı yapının yapısal elemanları korumasız çelik ve kutu kaplama, spreycaplama ile korumalı olarak incelenmiştir. Çalışmada koruma malzemesi olarak kutu kaplama 5,10 ve 20 mm, spreycaplama 10 mm olarak ele alınmış ve yangın dayanım değerleri elde edilmiştir [39].

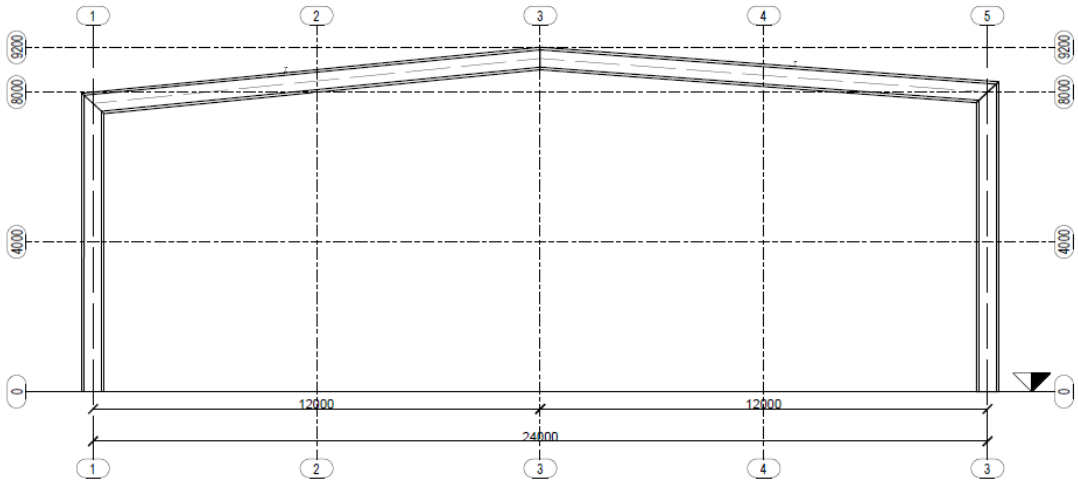
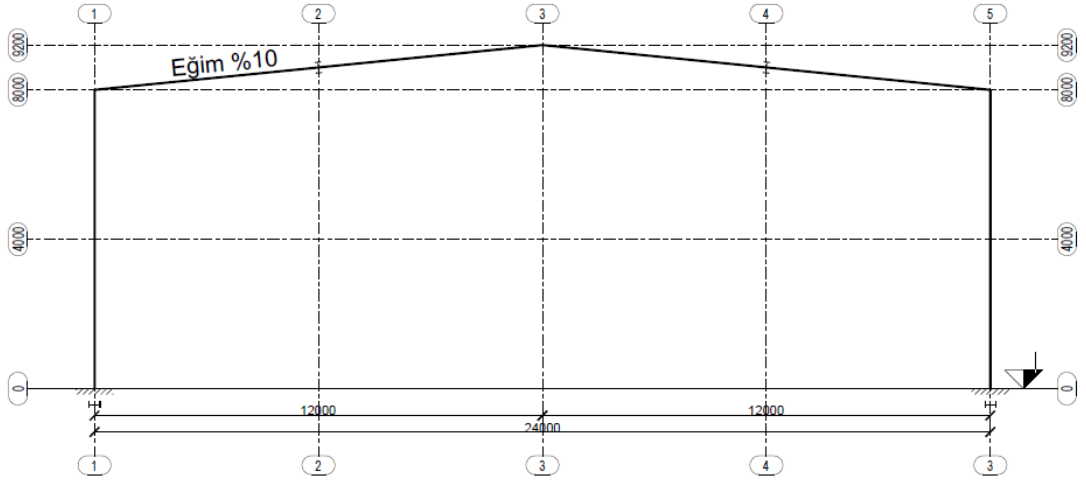
6.2. TAŞIYICI SİSTEM TANIMI

Bu çalışmada yangın dayanımı incelenecek sistem olarak Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğin Uygulama Kılavuzunda 2017 [39] verilen çelik endüstri binası kullanılmaktadır. Yapının üç boyutlu genel sistem görünüşü Şekil 6.1’de verilmektedir.



Şekil 6. 1: Sistemin 3 boyutlu (izometrik) görünümü [39].

Tek katlı, tek açıklı endüstriyel çelik yapıda aks aralığı 6 m, çerçeve açıklığı 24 m, yapı yüksekliği 8 m ve çatı eğimi %10 (sabit) olarak ele alınmaktadır. Yapıda yatay yükler x yönünde (kısa doğrultu) süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçevelerle, y yönünde (uzun doğrultu) ise süneklik düzeyi normal merkezi çaprazlı çelik çerçevelerle aktarılmaktadır. Yapıya ait tipik çerçeve enkesiti Şekil 6.2’de, yan cephe sistem görünüşü Şekil 6.3’de ve sistem çatı planı Şekil 6.4’de verilmektedir.



Şekil 6. 2: Sistem ön cephe görünümü [39].

6.3. TAŞIYICI SİSTEM TASARIMI

Sayısal incelemelerde kullanılan tipik tek katlı, tek açıklıklı endüstriyel çelik yapının tasarım adımları ÇYHTE Uygulama Kılavuzunda 2017 [39] detaylı olarak sunulmaktadır. Bu nedenle burada tasarım adımlarının kısa bir özeti verilecektir.

Çelik endüstri binasının tasarımında kullanılan sabit yükler TS 498 (1997) [40] yönetmeliğine, kar yükleri TS EN 1991-1-3, 2007 [41] yönetmeliğine, rüzgar yükleri TS EN 1991-1-4, 2007 [42] yönetmeliğine göre belirlenmektedir. Çatı sabit yük değeri $0,75 \text{ kN/m}^2$ cephe sabit yük değeri $2,8 \text{ kN/m}^2$, kar ağırlığı (s_k) $0,75 \text{ kN/m}^2$ ve tepe kaynaklı hız basıncı $q_p(z)=1.12 \text{ kN/m}^2$ alınmıştır. Çelik endüstri yapısının deprem yükü hesapları DBYHY 2007 [43] yönetmeliğine göre yapılmaktadır. Çelik endüstri binasının zemin sınıfı Z3 olan bir bölgede ve işyeri (fabrika) olarak kullanılacağı kabul edilmiştir. İstanbul'da inşa edilen endüstri yapısının rüzgar etkileri için arazi kategorisi II alınmıştır [39].

İncelenen endüstriyel çelik yapının analiz ve boyutlandırılmasında ÇYTHE 2016 [38] yönetmeliği ve DBYBHY 2007 [43] yönetmeliği kullanılmıştır. Yapıda kolon ve kiriş enkesiti için Çizelge 6.1 verilen çelik profil sınıfı ve çelik sınıfı olarak S235 çeliği kullanılmaktadır.

Çizelge 6. 1: Kolon ve kiriş enkesitleri [39].

	Kolon Enkesiti	Kiriş Enkesiti
Endüstriyel Çelik Yapı	IPE 600	IPE 600

6.4. MEVCUT ENDÜSTRİ YAPISININ YANGIN DAYANIMI

Bu çalışma kapsamında mevcut endüstri yapısının yangına karşı direnci TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde verilen "Basitleştirilmiş Hesaplama Modelleri" tasarım yöntemi kullanılarak belirlenmektedir. Bu hesaplama yöntemi doğal yangın etkisindeki tüm yapısal sistem yerine standart yangın etkisindeki tekil elemanları dikkate alır. Bu nedenle çalışmada mevcut yapının kolon ve kiriş elemanlarının yangına dayanıklılığı ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yangın etkisi (ısısal etkiler) standart sıcaklık-zaman eğrisi ISO 834 [22] ile tanımlanmaktadır.

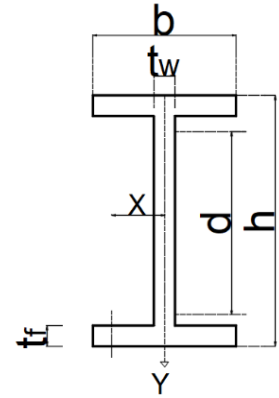
6.4.1. Çerçeve Kirişlerinin (IPE 600) Yangın Dayanım Hesabı

Basitleştirilmiş hesaplama modelinde yapısal elemanların yüksek sıcaklıktaki tasarımı, malzemedeki azaltılmış değerler için gerekli düzenlemeler yapılarak normal sıcaklık tasarımına benzer şekilde gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle yapısal elemanların yangına dayanıklılıkları normal sıcaklık altındaki değerler kullanılarak belirlenir. Burada yangın tasarımı yapılacak olan kirişin analiz ve boyutlandırılması ÇYTHE Uygulama Kılavuzunda 2017 [39] detaylı olarak verilmektedir (Şekil 6.5). Bu nedenle sayısal incelemelerde uygulama kılavuzunda verilen çerçeve kirişlerde oluşan iç kuvvetler dikkate alınmıştır (Çizelge 6.2).

Çizelge 6. 2: Normal sıcaklıkta hesaplanan iç kuvvet değerleri [39].

P_u	-100,98 kN
M_u	436,96 kN
V_u	125,07 kN

$A = 15600 \text{ mm}^2$	$i_x = 24,3 \text{ mm}^4$	$i_y = 4,66 \text{ cm}$
$h = 600 \text{ mm}$	$W_{pl.x} = 3512 \text{ cm}^3$	$I_y = 3387 \text{ mm}^4$
$b = 220 \text{ mm}$	$W_{el.x} = 3070 \text{ cm}^3$	$W_{pl.y} = 486 \text{ m}^3$
$t_w = 12 \text{ mm}$	$I_x = 92080 \text{ cm}^4$	$W_{el.y} = 308 \text{ cm}^3$
$t_f = 19 \text{ mm}$	$d = 514 \text{ mm}$	$J = 165 \text{ cm}^4$



Şekil 6. 5: S235 çeliği IPE 600 profil enkesiti ve geometrik özellikleri [44].

Enkesitin sınıflandırılması

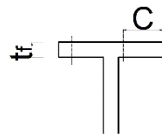
TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde enkesitler her bir yüksek sıcaklık değeri için sınıflandırmak yerine normal sıcaklık davranışına dayanan tek bir sınıflandırma yapılır. Bu çalışmada enkesitler TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde verilen azaltılmış ε değeri kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Enkesitleri sınıflandırırken

kullanılan sınır değerler ise TS EN 1993-1-1, 2014 [30] Tablo 5.2 kullanılarak belirlenmektedir.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1 \text{ (Normal sıcaklık için)} \quad (6.1)$$

$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85 \text{ (Yüksek sıcaklık için)} \quad (6.2)$$

Başlık parçası



$$\frac{c_f}{t_f} < \left[\frac{c_f}{t_f} \right]_{sınır} \quad c_f = \frac{(b - t_w - 2r)}{2} = \frac{(220 - 12 - 2 \times 24)}{2} = 80 \quad (6.3)$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{80}{19} = 4,21 < 9\varepsilon = 9 \times 0,85 = 7,65 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.4)$$

Gövde parçası



$$\frac{c_w}{t_w} < \left[\frac{c_w}{t_w} \right]_{sınır} \quad c_w = d \quad (6.5)$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{514}{12} = 42,83 < 72\varepsilon = 72 \times 0,85 = 61,2 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.6)$$

Yukarıda sınıflandırma dikkate alınarak tüm enkesit **Sınıf 1** enkesit koşullarını sağlamıştır.

Yangın etkisindeki tasarım yükü

TS 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre yangın etkisindeki yapısal elemanların iç kuvvet değerleri normal sıcaklıktaki yapısal analiz sonuçları kullanılarak elde edilmektedir. Bu çalışmada da yapısal elemanlara etkiyen iç kuvvet değerleri normal sıcaklık iç kuvvet değerlerinin azaltma faktörü η_{fi} ile çarpılması sonucu elde edilmiştir. Yangın durumunda tasarım yük düzeyi için azaltma faktörü olan η_{fi} için yönetmelikte tavsiye edilen 0,65 değeri kullanılmaktadır.

Yangın etkisindeki tasarım yükü:

$$M_{d,\bar{f}_i} = 0,65 \times 436,9 = 283,99 kNm \quad (6.7)$$

$$V_{d,\bar{f}_i} = 0,65 \times 125,07 = 81,29 kN \quad (6.8)$$

Korunmayan çelik kiriş elemanda sıcaklık artışı

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliği korunmayan çelik elemanındaki sıcaklık artışlarını küçük zaman adımlarında doğrusallaştırarak diferansiyel denklemi basitleştirerek belirlenmektedir. Yönetmelikte zaman adım aralığı maksimum 5 sn olacak şekilde sınırlandırmıştır. Bu çalışmada korunmayan çelik kirişte Δ_t süresi içerisinde oluşacak sıcaklık artışı;

$$\Delta\theta_{a,t} = k_{sh} \frac{A_m / V}{c_a P_a} \dot{h}_{net} \Delta_t \quad (6.9)$$

denklemi ile belirlenmektedir. Burada kesit faktörü değerleri TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine aşağıda belirlenmiştir.

Korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik;

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{çevre uzunluğu}}{\text{kesit alanı}} = \frac{2(b+h)}{A} = \left[\frac{2(220+600)}{15600} \right] 10^3 = 105,12 m^{-1} \quad (6.10)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik;

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{yangına maruz yüzey alanı}}{\text{enkesit alanı}} = \frac{2 \times h + b}{A} = \left[\frac{2 \times 600 + 220}{15600} \right] 10^3 = 91,02 m^{-1} \quad (6.11)$$

Kesit faktörünün kutu (box) değeri

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{2 \times (b+h)}{A} = \left[\frac{2 \times (220+600)}{15600} \right] 10^3 = 105,12 m^{-1} \quad (6.12)$$

Gölge etkisi düzeltme faktörü;

$$k_{sh} = 0,9 \times \frac{[A_m / V]_b}{[A_m / V]} = 0,9 \times \frac{105,12}{91,02} = 1,04 \text{ (3 tarafı yangına maruz)} \quad (6.13)$$

$$k_{sh} = \frac{[A_m / V]_b}{[A_m / V]} = 0,9 \times \frac{105,12}{105,12} = 0,9 \text{ (4 tarafı yangına maruz)} \quad (6.14)$$

Denklem 6.9 ile verilen ifade aşağıda verilen çeliğin ısısal özelliklerine göre belirlenmiştir.

Çeliğin özgül ısısı	$c_a =$	600 J/kg K
Çeliğin birim hacim kütlesi	$\rho_a =$	7850 kg/m ³
Elemanın yüzey yayıcılığı	$\varepsilon_m =$	0,7
Yangının yayıcılığı	$\varepsilon_f =$	1,0
Konfigürasyon katsayısı	$\phi =$	1,0
Stephen Boltzman katsayısı	$\sigma =$	5,67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
Konvektif ısı transferi katsayısı	$\alpha_c =$	25 W/m ² K
Süre	$\Delta_t =$	1,5 sn

Birim alana düşen net ısı akısının değeri:

$$\dot{h}_{net} = h_{net,r} - h_{net,c} \quad (6.15)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde net konvektif ısı akısı bileşeni:

$$h_{net,c} = 25(\theta_g - \theta_m) \text{ [W/ m}^2\text{]} \quad (6.16)$$

denklemleri ile ve radyoaktif (ışınmayla) ısı akısı bileşeni ise

$$h_{net,r} = (1,0)(0,7)(1,0)(5,67 \times 10^{-8})[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \text{ [W/ m}^2\text{]} \quad (6.17)$$

denklemleriyle belirlenmiştir.

Yangın etkisindeki giriş elemanının tasarım dayanımı;

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{R,fi}} \right] \cdot M_{Rd} \quad (6.18)$$

denklemiyle belirlenmiş ve burada kullanılan yangın tasarım değerleri aşağıda verilmektedir.

$\theta_a = 20^\circ C$ sıcaklıkta çelik için akma dayanımı azaltma katsayısı	$k_{y,20} =$	1,0
Normal sıcaklıkta kullanılan malzeme katsayısı	$\gamma_{M,0} =$	1,0
Yangın anında kullanılan malzeme katsayısı	$\gamma_{M,fi}$ =	1,0

Yangın etkisindeki kiriş elemanın dayanım denklemindeki M_{Rd} elemanın plastik moment tasarım dayanım kapasitesidir. Bu değer ÇYHTE uygulama kılavuzunda [13] IPE 600 kirişi için akma sınır durumuna ($M_{Rd} = M_n = M_p = \phi \times F_y \times W_{px}$) bağlı olarak belirlenmiş ve 742,79 kNm olarak hesaplanmıştır. Böylece IPE 600 kirişinin yangın dayanım momenti,

$$M_{fi,\theta,Rd} = 1,0 \left[\frac{1,0}{1,0} \right] \times 742,79 = 742,79 kNm \quad (6.19)$$

olarak bulunmuştur. Bu ifadeye alternatif olarak kirişin yangın dayanımı κ_1 ve κ_2 faktörleri kullanılarak,

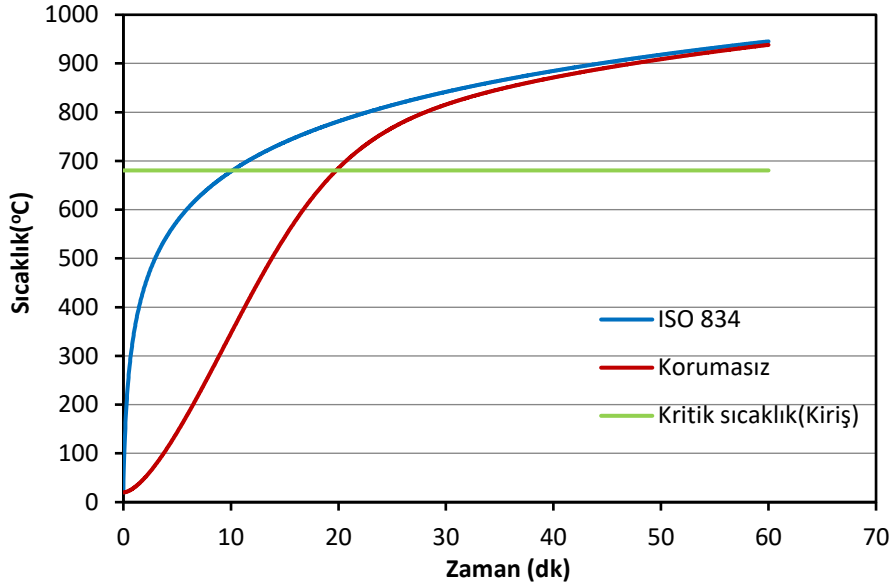
$$\frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \cdot \kappa_2} = \frac{742,79}{1,0 \times 0,7} = 1061,13 kNm \quad (3 \text{ tarafı yangına maruz}) \quad (6.20)$$

denklemiyle elde edilmiştir. Bu denklem sonucunda enkesit boyunca düzgün olmayan sıcaklık dağılımları analitik olarak dikkate alınmıştır. Burada enkesit ve kiriş boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarılma faktörleri sırasıyla κ_1 ve κ_2 dir. 4 tarafı yangına maruz kalan profiller için $\kappa_1 = 1,0$, 3 tarafı yangına maruz kalan profiller için $\kappa_1 = 0,7$ alınmıştır. Hesaplarda κ_2 uyarılma faktörü 1,0 alınmaktadır.

Zorlanma faktörü;

$$\mu_0 = \frac{M_{d,fi}}{M_{fi,\theta,Rd}} = \frac{283,99}{1061,13} = 0,268 \quad (6.21)$$

IPE 600 kiriş için θ_{cr} değeri Bölüm 4.6.4 Çizelge 4.2’de verilen zorlanma faktörü tablosu kullanılarak 680,6 °C olarak belirlenmiştir. IPE 600 çerçeve kiriş 680,6 °C kritik sıcaklık değerine 19,79 dakikada ulaşmaktadır. Bu sonuçlar neticesinde çelik kiriş elemanının yönetmeliklerde verilen gerekli yük taşıma yangın dayanım süresi olan 60 dakikayı sağlamadığı görülmektedir. Bu gerekli yangın dayanım süresinin sağlanabilmesi için yangın koruma malzemelerinin kullanılması gerekir. IPE 600 çerçeve kirişine ait standart yangın eğrisi, korumasız kirişin yangın sıcaklık eğrisi ve kritik sıcaklık değeri Şekil 6.6’da sunulmaktadır. Bu şekilde görüldüğü üzere IPE 600 çelik profilin 60.dakikadaki ortam sıcaklık değeri 938,3°C’dir.

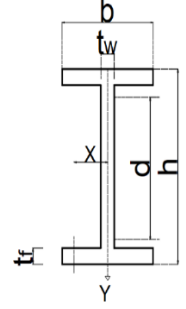


Şekil 6. 6: Korumasız IPE 600 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.

6.4.2. Çerçeve Kolonları (IPE 600) Yangın Dayanımı

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre basınç elemanının yangın tasarım burkulma dayanımı enkesitleri sınıflandırılmasına göre farklı şekillerde yapılmaktadır. Bu nedenle mevcut kolonların yangın tasarımı için öncelikli olarak enkesit sınıflandırılması yapılmıştır. Burada yangın hesabı yapılacak olan kolonların analiz ve boyutlandırılması ÇYTHE Uygulama Kılavuzunda 2017 [39] detaylı olarak verilmektedir. Buna göre normal sıcaklık analizlerinden elde edilen iç kuvvetler Çizelge 6.3’de ve kolon profiline ait özellikler Şekil 6.7’de özetlenmektedir.

$$\begin{aligned}
A &= 15600 \text{ mm}^2 & i_x &= 24,3 \text{ mm}^4 & i_y &= 4,66 \text{ cm} \\
h &= 600 \text{ mm} & W_{pl.x} &= 3512 \text{ cm}^3 & I_y &= 3387 \text{ mm}^4 \\
b &= 220 \text{ mm} & W_{el.x} &= 3070 \text{ cm}^3 & W_{pl.y} &= 486 \text{ m}^3 \\
t_w &= 12 \text{ mm} & I_x &= 92080 \text{ cm}^4 & W_{el.y} &= 308 \text{ cm}^3 \\
t_f &= 19 \text{ mm} & d &= 514 \text{ mm} & J &= 165 \text{ cm}^4
\end{aligned}$$



Şekil 6. 7: IPE 600 enkesiti ve geometrik özellikleri [44].

Çizelge 6. 3: Normal sıcaklıkta hesaplanan iç kuvvet değerleri [39].

P_u	-136,55 kN
M_u	436,96 kN
V_u	88,21 kN

Enkesit sınıflandırılması

TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde enkesitleri her bir yüksek sıcaklık değeri için sınıflandırmak yerine normal sıcaklık davranışına dayanan tek bir sınıflandırma yapılır. Bu çalışmada enkesitler TS EN 1993-1-2, 2007 [25] verilen azaltılmış ε değeri kullanılarak sınıflandırılmaktadır. Enkesitleri sınıflandırırken kullanılan sınır değerler ise TS EN 1993-1-1, 2014 [30] Tablo 5.2 kullanılarak belirlenmektedir.

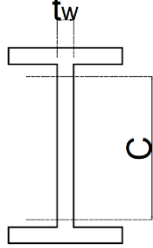
$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85 \quad (6.22)$$

Başlık parçası

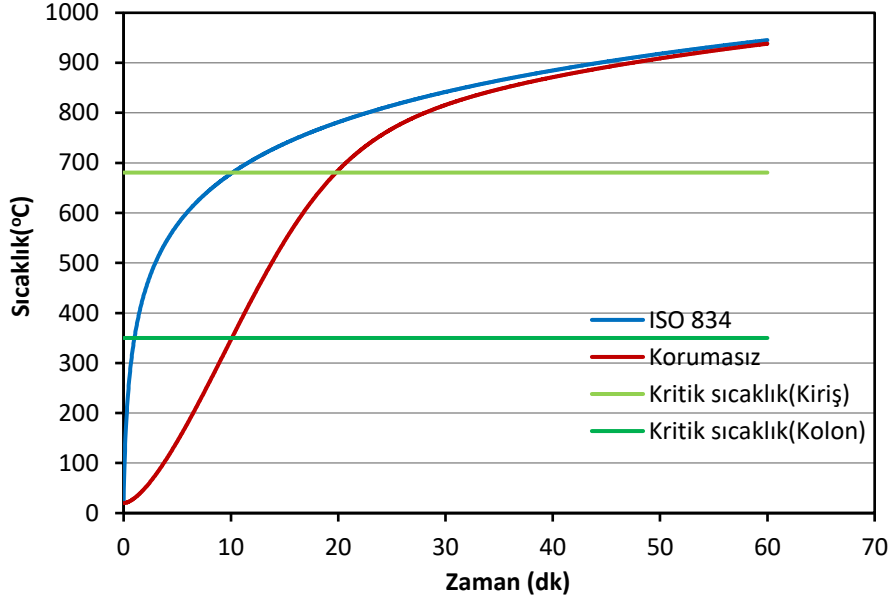
$$\begin{aligned}
& \frac{c_f}{t_f} < \left[\frac{c_f}{t_f} \right]_{sınır} \quad c_f = \frac{(b - t_w - 2r)}{2} = \frac{(220 - 12 - 2 \times 24)}{2} = 80 \quad (6.23)
\end{aligned}$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{80}{19} = 4,21 < 9\varepsilon = 9 \times 0,85 = 7,65 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.24)$$

Gövde parçası


$$\frac{c_w}{t_w} < \left[\frac{c_w}{t_w} \right]_{sınır} \quad c_w = d \quad (6.25)$$
$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{514}{12} = 42.83 > 42\varepsilon = 42 \times 0,85 = 35,7 \text{ (Sınıf 4)} \quad (6.26)$$

Yukarıda yapılan sınıflandırmaya göre enkesitin başlık parçası Sınıf 1 sınırlarını sağlamış, gövde parçası ise Sınıf 4 olarak saptanmaktadır. Bu durumda tüm enkesit **Sınıf 4** olarak değerlendirilir. Yerel burkulmanın gözlemlendiği **Sınıf 4** elemanları için yangın hesabı yönetmelikte verilen kritik sıcaklık yöntemine göre yapılmalıdır. Sınıf 4 enkesit özellikleri için yönetmeliğimiz kritik sıcaklık değerini $\theta_{cr} = 350^\circ C$ alınması gerektiğini belirtmektedir. IPE 600 kolon enkesiti bu kritik sıcaklık değerine 10,06 dakikada ulaşır. Bu sonuçlar neticesinde çelik kolon elemanının yönetmeliklerde verilen gerekli yük taşıma yangın dayanım süresi olan 60 dakikayı sağlamadığı görülmektedir. Bu gerekli yangın dayanım süresinin sağlanabilmesi için yangın koruma malzemelerinin kullanılması gerekir. IPE 600 çerçeve kolonuna ait standart yangın eğrisi, korumasız kolonun yangın sıcaklık eğrisi ve kritik sıcaklık değeri Şekil 6.8’de sunulmaktadır. Bu şekilde görüldüğü üzere IPE 600 çelik profilin 60.dakikadaki ortam sıcaklık değeri $938,3^\circ C$ ’dir.



Şekil 6. 8: Korunmasız IPE 600 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.

6.4.3. Yangın Koruma Yöntemleri ile Kiriş ve Kolon (IPE 600) Elemanların Yangın Dayanım Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında çerçeve kiriş ve kolonlarında yangından dolayı meydana gelen sıcaklık artış oranına azaltarak yönetmeliklerce tanımlanan yangın dayanım sürelerinin sağlanması için farklı pasif yangın koruma malzemeleri kullanılarak yangın dayanımları değerlendirilmektedir.

Bölüm 6.4.1’de 3 tarafı yangına maruz korunmasız çelik kirişlerin yangın tasarımı yapılmış ve 680,6°C değerine 19,79 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Devamında Bölüm 6.4.2 ‘de çelik kolonların yangın tasarımı gerçekleştirilmiş ve 350°C değerine 10,06 dakikada ulaştığı belirlenmektedir. Ancak yönetmelikler çelik yapı elemanlarının gerekli yük taşıma dayanım süresini R60 dakika olarak vermiştir. Bu bölümde kutu kaplama ve spreyci yangın koruma malzemeleri kullanılarak kiriş ve kolon elemanların yangın dayanım süreleri araştırılmaktadır.

Yangından koruma malzemesi ile yalıtılmış çelik yapı elemanlarında sıcaklık artışı;

Yalıtılmış çelik elemanlarda sıcaklık artış hesabı korunmayan çelik elemanın hesabına benzer şekilde TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre belirlenmiştir. Buna göre yalıtılmış çelik kiriş ve kolon elemanda Δ_t süresi içerisinde oluşacak sıcaklık artışı,

$$\Delta\theta_{a,t} = \frac{\lambda_p}{d_p c_a \rho_a} \frac{A_p}{V} \left(\frac{1}{1 + \phi/3} \right) (\theta_{g,t} - \theta_{a,t}) \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \Delta\theta_{g,t} \quad (6.27)$$

$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} d_p \frac{A_p}{V} \quad (6.28)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemlerde kullanılan tasarım değerleri aşağıda açıklanmıştır.

6.4.3.1 Kutu Kaplama (Alçıpanel) ile Yangın Koruma

Kutu kaplama ile korunan çelik elemanlar için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{çevre uzunluğu}}{\text{kesit alanı}} = \frac{2(b+h)}{A} = \left[\frac{2(220+600)}{15600} \right] 10^3 = 105,12 m^{-1} \quad (6.29)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{yangına maruz yüzey alanı}}{\text{enkesit alanı}} = \frac{2 \times h + b}{A} = \left[\frac{2 \times 600 + 220}{15600} \right] 10^3 = 91,02 m^{-1} \quad (6.30)$$

Alçıpanel kutu kaplama malzemesinin özellikleri aşağıda verilmektedir.

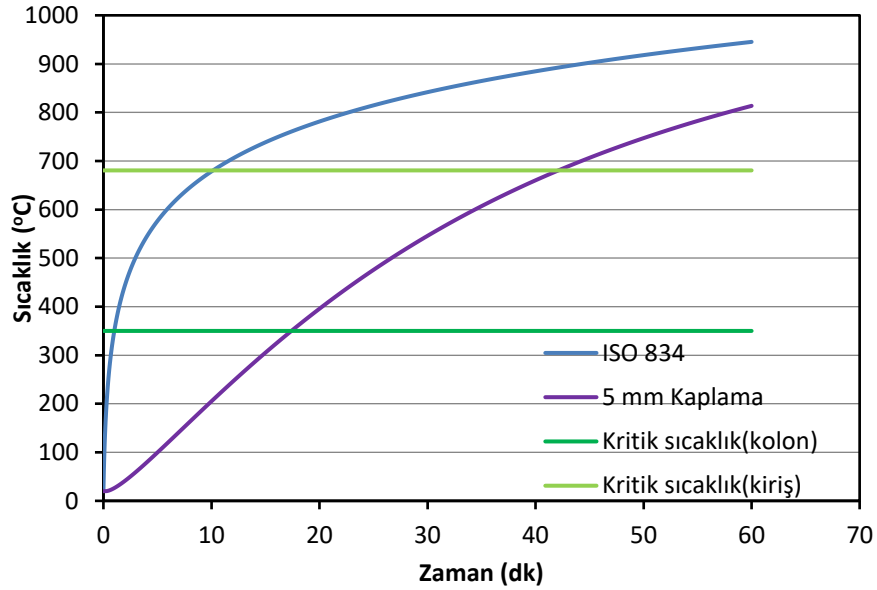
Koruma malzemesinin ısı iletkenliği	$\lambda_p =$	0,2 W/m K
Koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı	$c_p =$	1700 J/kg°C
Koruma malzemesinin birim hacim kütlesi	$\rho_p =$	800 kg/m ³

5 mm kalınlıklı alçı panel kutu kaplama ile yalıtılmış IPE 600 çelik kesiti

Tasarım değerleri denklem 6.28'de yerine konulduğunda ϕ değerini

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,005 \times 91,02 = 0,131 \quad (6.31)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 5 mm kalınlı alçı panellerle yangına karşı korunan IPE 600 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 813,6^{\circ}C$ olarak bulunmuştur. 5 mm kalınlıklı alçıpanellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 680,6^{\circ}C$ kritik sıcaklık değerine 42,12 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 350^{\circ}C$ değerine ise 17,40 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 5 mm kalınlı alçıpanel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE 600 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla yaklaşık %113 ve %73 oranında artırmaktadır. Ancak her iki yapısal elemanda da 5 mm kalınlıklı alçı panel kaplamalar R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamamaktadır. Şekil 6.9 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.

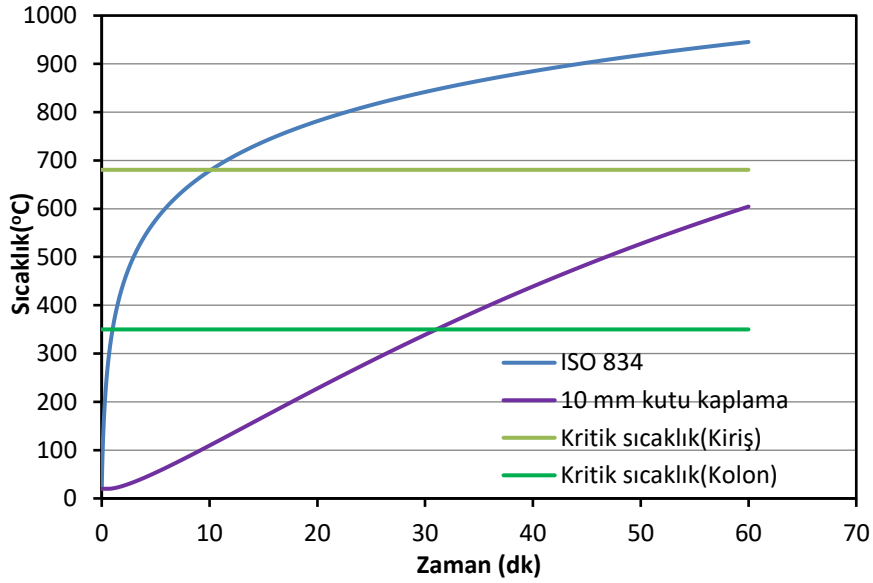


Şekil 6. 9: 5 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.

10 mm'lik kutu kaplama ile yalıtılmış IPE 600 çelik kesiti

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,01 \times 91,02 = 0,263 \quad (6.32)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 10 mm kalınlı alçıpanellerle yangına karşı korunan IPE 600 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 603,1^{\circ}C$ olarak bulunmuştur. 10 mm kalınlıklı alçı panellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 680,6^{\circ}C$ kritik sıcaklık değerine 71,60 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 350^{\circ}C$ değerine ise 31,29 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 10 mm kalınlı alçı panel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE 600 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %262 ve %211 oranında artmaktadır. 10 mm'lik alçı panellerle yalıtılmış çerçeve kirişleri R60 gerekli yük dayanım süresini sağlarken kolonlarımız bu dayanım süresine ulaşamamıştır. Şekil 6.10 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.

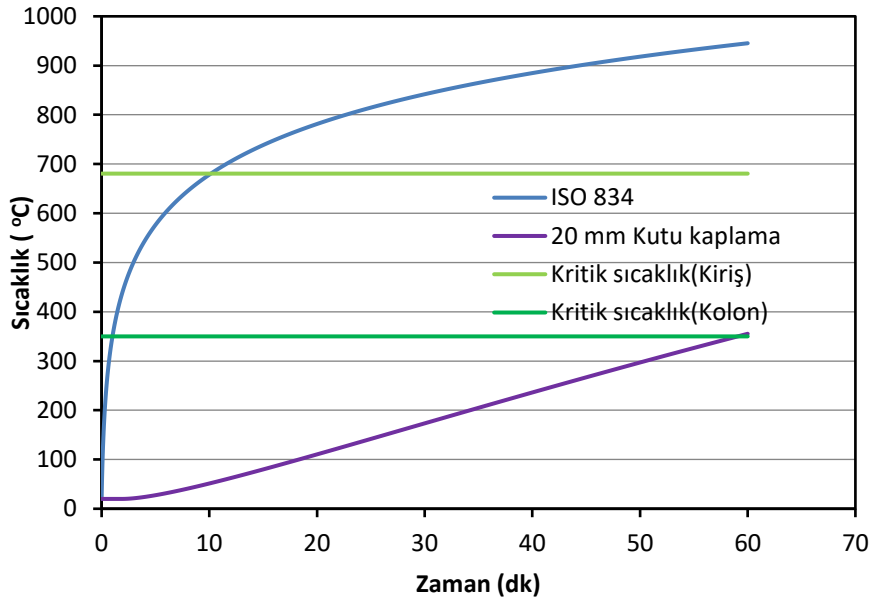


Şekil 6. 10: 10 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.

20 mm'lik kutu kaplama ile yalıtılmış IPE 600 çelik kesiti

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,02 \times 91,02 = 0,526 \quad (6.33)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 20 mm kalınlı alçı panellerle yangına karşı korunan IPE 600 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 355,3^{\circ}C$ olarak bulunmuştur. 20 mm kalınlıklı alçı panellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 680,6^{\circ}C$ kritik sıcaklık değerine 129,88 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 350^{\circ}C$ değerine ise 59,09 dakikada ulaştığı gözlenmektedir. 20 mm kalınlı alçı panel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE 600 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %556 ve %487 oranında artırmaktadır. Çerçeve kiriş ve kolon elemanı R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamıştır. Şekil 6.11 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.



Şekil 6. 11: 20 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.

6.4.3.2 Sprey (Mineral lifli) Malzeme ile Yangın Koruma

Sprey malzeme ile yalıtılmış kaplama için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{4b + 2h - 2t_w}{A} = \left[\frac{4 \times 220 + 2 \times 600 - 2 \times 12}{15600} \right] 10^3 = 131,79 m^{-1} \quad (6.34)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{3b + 2h - 2t_w}{A} = \left[\frac{3 \times 220 + 2 \times 600 - 2 \times 12}{15600} \right] 10^3 = 117,69 m^{-1} \quad (6.35)$$

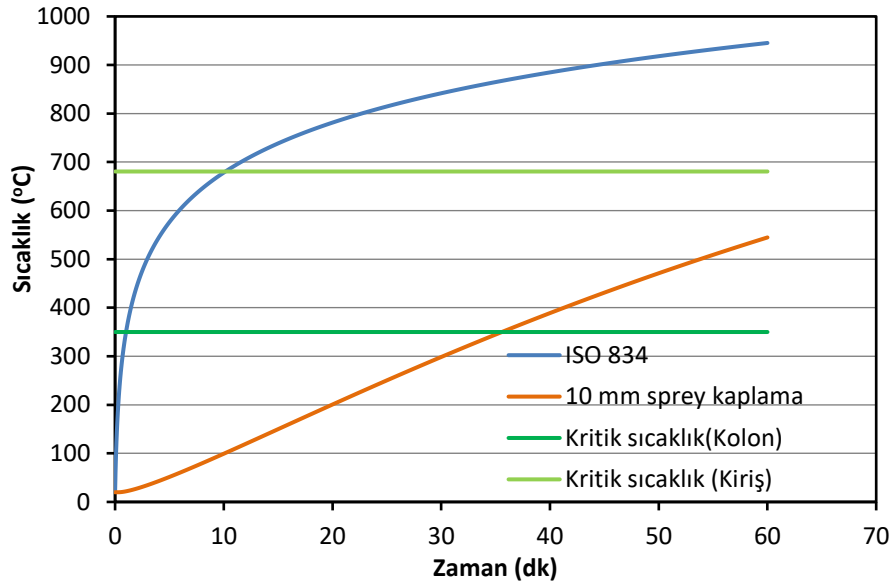
Mineral lifli malzemesinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Koruma malzemesinin ısı iletkenliği	$\lambda_p =$	0,12	W/m K
Koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı	$c_p =$	1200	J/kg°C
Koruma malzemesinin birim hacim kütlesi	$\rho_p =$	300	kg/m ³

10 mm'lik spre y kaplama ile yalıtılmış IPE 600 çelik kesiti

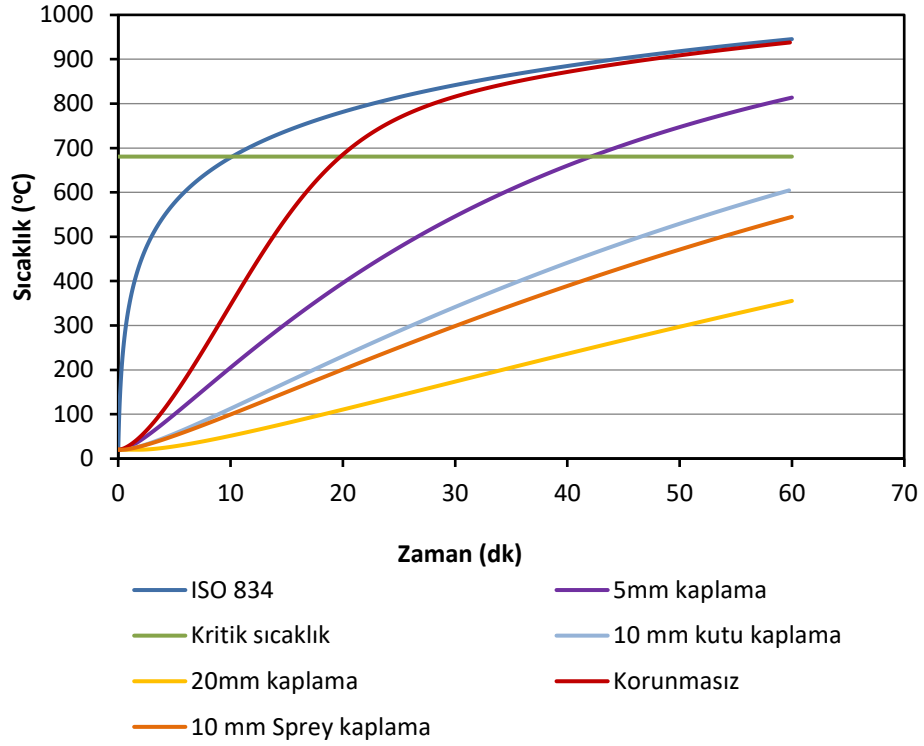
$$\phi = \frac{1200 \times 300}{600 \times 300} \times 0,01 \times 117,69 = 0,09 \quad (6.36)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 10 mm kalınlı mineral lifli spre y uygulama yangına karşı korunan IPE 600 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değer i $\theta_{a,t} = 544,8^\circ C$ olarak bulunmuştur. 10 mm kalınlı mineral lifli spre y ile korunan çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 680,6^\circ C$ kritik sıcaklık değerine 82 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 350^\circ C$ değerine ise 35,58 dakikada ulaştığı gözlenmektedir. 10 mm kalınlı mineral lifli spre y uygulama kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE 600 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %314 ve %254 oranında artırmaktadır. 10 mm'lik mineral lifli spre y kaplama çerçeve kirişleri R60 gerekli yük dayanım süresini sağlarken kolonlarımız bu dayanım süresine ulaşamamıştır. şekil 6.12 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.

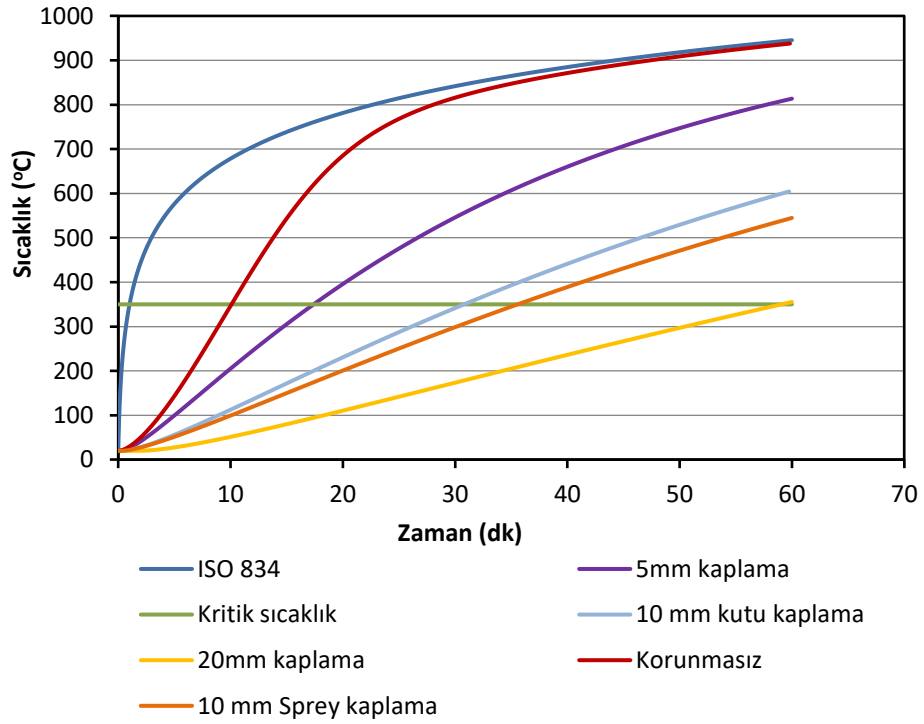


Şekil 6. 12: 10 mm sprej kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE 600) için sıcaklık zaman eğrisi.

Çerçeve IPE 600 kolon ve kiriş elemanlarına uygulanabilecek 5 mm, 10 mm ve 20 mm kalınlığa sahip kaplama örnekleri ile 10 mm kalınlığında sprej kaplama uygulamaları Şekil 6.13 ve 6.14’te gösterildiği gibi karşılaştırılmaktadır.



Şekil 6. 13: Çelik kiriş (IPE 600) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.



Şekil 6. 14: Çelik kolon (IPE 600) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.

6.5. 2016 ÇYHTE YÖNETMELİĞİNE GÖRE KİRİŞ VE KOLON ELEMENLARIN BOYUTLANDIRILMASI

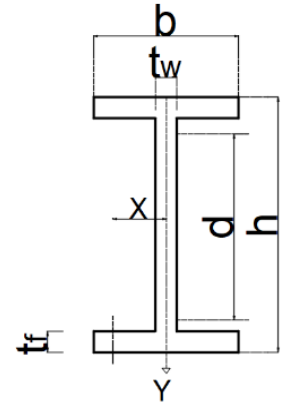
6.5.1. Çerçeve Kirişi Tasarım Hesabı

Çerçeve kirişinde oluşan iç kuvvetler Bölüm 6.4.1 Çizelge 6.2’de verilmektedir. Bu iç kuvvetler dikkate alınarak 2016 ÇYHTE [38] yönetmeliğine göre çerçeve kirişinin tasarımı bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Seçilen enkesite ait geometrik özellikler Şekil 6.15’de gösterilmektedir.

Seçilen Enkesit

IPE O 500

$A = 13700 \text{ mm}^2$	$i_x = 206 \text{ mm}$	$i_y = 43,8 \text{ mm}$
$h = 506 \text{ mm}$	$I_x = 57780 \text{ cm}^4$	$I_y = 2622 \text{ cm}^4$
$b = 202 \text{ mm}$	$W_{pl.x} = 2613 \text{ cm}^3$	$W_{pl.y} = 409 \text{ cm}^3$
$t_w = 12,0 \text{ mm}$	$W_{el.x} = 2284 \text{ cm}^3$	$W_{el.y} = 260 \text{ cm}^3$
$t_f = 19 \text{ mm}$	$d = 426 \text{ mm}$	$J = 144 \text{ cm}^4$



Şekil 6. 15: IPE O 500 enkesiti ve geometrik özellikleri [44].

Enkesit sınıflandırılması

Yerel burkulma sınır durumu için enkesit_sınıflandırılması 2016 ÇYHTE [38] ve TS EN 1993-1-1, 2014 [30] yönetmeliklerine göre ayrı ayrı yapılmaktadır. Bunun temel nedeni yangın dayanım hesaplarının EUROCODE yönetmeliklerine göre yapılması ve bu yönetmelikteki sınıflandırılmanın kullanılmasıdır. Yönetmeliklerde eğilme elemanları için verilen başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri, başlık ve gövde parçasının sınıflandırılmaları sırasıyla Çizelge 6.4. Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6’te verilmektedir. Yerel burkulma sınır durumunda enkesitin başlık ve gövde parçaları λ_p sınır değerini aşmadığında elemanlar kompakt olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 6. 4: Çerçeve kiriş enkesit sınır değerleri.

	2016 ÇYHTE		TS EN 1993-1-1		
	Sınır değerleri		Sınır değerleri		
	λ_p (kompakt/komp akt olmayan)	λ_r (narin olmayan/narin)	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
Başlık Parçası	$0,38 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$1,0 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$10 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$14 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Gövde Parçası	$3,76 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$5,7 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$72 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$83 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$124 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Çizelge 6. 5: Çerçeve kiriş başlık parçası için enkesit sınır değerleri.

	2016 ÇYHTE		TS EN 1993-1-1		
	Sınır Değerleri		Sınır değerleri		
	λ_p (kompakt/komp akt olmayan)	λ_r (kompakt olmayan/narin)	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
Genişlik/ Kalınlık oranı (λ)					
5,315	11,09	29,172	9	10	14
Kompakt		Sınıf-1			

Çizelge 6. 6: Çerçeve kiriş gövde parçası için enkesit sınır değerleri.

	2016 ÇYHTE		TS EN 1993-1-1		
	Sınır Değerleri		Sınır değerleri		
	λ_p (kompakt/komp akt olmayan)	λ_r (kompakt olmayan/narin)	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
Genişlik/ Kalınlık oranı (λ)					
35,5	109,69	166,28	72	83	124
Kompakt		Sınıf-1			

Yerel burkulma sınır durumunda enkesitin başlık ve gövde parçaları λ_p sınır değerini aşmadığından kiriş elemanı enkesiti kompakt enkesit olarak değerlendirilmektedir.

Çerçeve kirişinin narinliği çerçeve düzlemine dik doğrultuda 6,00 metre aralıklarla oluşturulan çatı bağlantı sistemi yanal doğrultuda mesnetlenen uzunluğa bağlı olarak

$$\left(\frac{L_c}{i}\right)_{\text{maks}} = \frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{1,0 \times 6030}{43,8} = 137,67 \leq 200 \quad (6.37)$$

olduğundan narinlik sınır değeri koşulunu sağlamıştır.

Basınç kuvveti dayanımı P_n hesabı

Elastik burkulma gerilmesi F_e

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left[\frac{L_{cy}}{i_y}\right]^2} = \frac{\pi^2 \times (200000)}{137,67^2} = 104,14 \text{ N / mm}^2 \quad (6.38)$$

$$137,67 > 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 137,40 \quad (6.39)$$

kontrol değerinden büyük olduğundan elastik burkulma denklemi kullanılmıştır.

$$F_{cr} = 0,877 \times F_e = 0,877 \times 104,14 = 91,330 \text{ N / mm}^2 \quad (6.40)$$

Karakteristik basınç kuvvet dayanımı P_n

$$P_n = F_c \times A_g = 91,330 \times (13700) = 1251221 \text{ N} = 1251,221 \text{ kN} \quad (6.41)$$

$$P_d = \phi_c \times P_n = 0,9 \times 1251,221 = 1126,09 \text{ kN} \quad (6.42)$$

olarak elde edilmiştir.

Eğilme momenti dayanımı M_n hesabı

$$M_p = F_y W_{px} = 235 \times (2613 \times 10^{-3}) = 614 \text{ kNm} \quad (6.43)$$

$$L_p = 1,76 i_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \times 43,8 \times \sqrt{\frac{200000}{235}} = 2248,8 < L_b = 6030 \text{ mm} \quad (6.44)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{ht_w}{b_f t_f} \right)}} = \frac{202}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \times \frac{506(12)}{202(19)} \right)}} = 51,87 \text{ mm} \quad (6.45)$$

$$h_0 = d - t_f = 506 - 19 = 487 \text{ mm} \quad (6.46)$$

$$\begin{aligned} L_r &= 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7 f_y} \sqrt{\frac{J_c}{W_{ex} h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{W_{ex} h_0} \right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 f_y}{E} \right)^2}} = \\ &= 1,95 \times 51,87 \times \frac{200000}{0,7 \times 235} \sqrt{\frac{144 \times 10^4}{2284 \times 10^3 \times 487} + \sqrt{\left(\frac{144 \times 10^4}{2284 \times 10^3 \times 487} \right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 \times 235}{200000} \right)^2}} \\ &= 7575,10 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6.47)$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 436,9}{2,5 \times 436,9 + 3 \times 259,76 + 4 \times 107,20 + 3 \times 20,47} = 2,312 \quad (6.48)$$

$L_p = 2248,8 \text{ mm} < L_b = 6030 \text{ mm} < L_r = 7575,1 \text{ mm}$ olduğundan kirişin eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumuna göre aşağıda kontrol edilmiştir.

$$\begin{aligned} M_n &= C_b \left[M_p - (M_p - 0,7 f_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \\ &= 2,312 \left[614 - (614 - 0,7 \times 235 \times 2284 \times 10^{-3}) \left(\frac{6030 - 2248}{7575 - 2248} \right) \right] = 1028,44 \text{ kNm} \\ [M_n = M_p]_{\min} &= 614 \text{ kNm} \end{aligned} \quad (6.49)$$

Kirişin tasarım eğilme momenti dayanım kontrolü

$$M_d = \phi \times M_n = 0,90 \times 614 = 552,6 \text{ kNm} \quad (6.50)$$

Kirişin tasarım dayanım kontrolü için yukarıda bulunan değerler formülde yerlerine konulursa;

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_u(N)}{P_d} = \frac{100,97}{1126} = 0,0896 < 0,20 \quad (6.51)$$

$$\frac{P_r}{2 \times P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{ex}} = \frac{100,97}{2 \times 1126} + \frac{436,9}{552,6} = 0,836 \leq 1 \quad (6.52)$$

elde edilir.

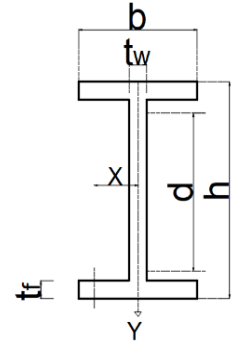
6.5.2. Çerçeve Kolonu Tasarım Hesabı

Çerçeve kolonunda oluşan iç kuvvetler Bölüm 6.4.2 Çizelge 6.3’de verilmektedir. Bu iç kuvvetler dikkate alınarak 2016 ÇYHTE [38] yönetmeliğine göre çerçeve kolonun tasarımı bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Seçilen enkesite ait geometrik özellikler Şekil 6.16’da gösterilmektedir.

Seçilen Enkesit

IPE O 500

$A = 13700 \text{ mm}^2$	$i_x = 206 \text{ mm}$	$i_y = 43,8 \text{ mm}$
$h = 506 \text{ mm}$	$I_x = 57780 \text{ cm}^4$	$I_y = 2622 \text{ cm}^4$
$b = 202 \text{ mm}$	$W_{pl,x} = 2613 \text{ cm}^3$	$W_{pl,y} = 409 \text{ cm}^3$
$t_w = 12,0 \text{ mm}$	$W_{el,x} = 2284 \text{ cm}^3$	$W_{el,y} = 260 \text{ cm}^3$
$t_f = 19 \text{ mm}$	$d = 426 \text{ mm}$	$J = 144 \text{ cm}^4$



Şekil 6. 16: IPE O 500 enkesiti ve geometrik özellikleri [44].

Enkesit sınıflandırılması

Yerel burkulma sınır durumu için enkesit_sınıflandırılması 2016 ÇYHTE [38] ve TS EN 1993-1-1, 2014 [30] yönetmeliklerine göre ayrı ayrı yapılmıştır. Bunun temel nedeni yangın dayanım hesaplarının EUROCODE yönetmeliklerine göre yapılması ve bu yönetmelikteki sınıflandırılmanın kullanılmasıdır. Yönetmeliklerde eğilme elemanları için verilen başlık ve gövde parçalarının genişlik/kalınlık oranlarının sınır değerleri, başlık ve gövde parçasının sınıflandırılmaları sırasıyla Çizelge 6.7, Çizelge

6.8 ve Çizelge 6.9’te verilmiştir. Yerel burkulma sınır durumunda enkesitin başlık ve gövde parçaları λ_p sınır değerini aşmadığında elemanlar kompakt olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 6. 7: Çerçeve kolon enkesit sınır değerleri.

	2016 ÇYHTE	TS EN 1993-1-1		
	Sınır Değerleri	Sınır Değerleri		
	λ_r	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
Başlık Parçası	$0,56 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$9 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$10 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$14 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$
Gövde Parçası	$1,49 \sqrt{\frac{E}{f_y}}$	$33 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$38 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$	$42 \sqrt{\frac{235}{f_y}}$

Çizelge 6. 8: Çerçeve kolon başlık parçası için Enkesit sınır değerleri.

Genişlik/Kalınlık oranı (λ)	2016 ÇYHTE	TS EN 1993-1-1		
	Sınır Değerleri	Sınır Değerleri		
	λ_r (narin olmayan/narin)	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
5,315	16,46	9	10	14
	narin olmayan	Sınıf-1		

Çizelge 6. 9: Çerçeve kolon gövde parçası için enkesit sınır değerleri.

Genişlik/Kalınlık oranı (λ)	2016 ÇYHTE	TS EN 1993-1-1		
	Sınır Değerleri	Sınır Değerleri		
	λ_r (narin olmayan/narin)	Sınıf-1	Sınıf-2	Sınıf-3
35,5	43,47	33	38	42
	narin olmayan	Sınıf-2		

Kolon elemanının narinliği, çerçeve düzleminde yanal yer değiştirmesi önlenmemiş, çerçeve düzlemine dik doğrultuda yanal yer değiştirmesi düşey düzlem çaprazlar ile önlenendiği kabul edilmiştir. Buna göre çerçeve kolonunun eğilme rijitliği ile bu kolona bağlanan çerçeve kirişinin eğilme rijitliğine bağlı olarak yönetmeliğimizdeki nomogramlar kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$L_{cx} = K_x H = 1,45 \times 8000 = 11600mm \quad (6.53)$$

$$L_{cy} = K_y H = 1,00 \times 4000 = 4000mm \quad (6.54)$$

$$\frac{L_{cx}}{i_x} = \frac{11600}{206} = 56,31 \leq 200 \quad (6.55)$$

$$\frac{L_{cy}}{i_y} = \frac{4000}{43,8} = 91,32 \leq 200 \quad (6.56)$$

$$(L_c / i)_{maks} = (L_{cx} / i_x; L_{cy} / i_y)_{maks} = (56,31; 91,32)_{maks} = 91,32 \quad (6.57)$$

olduğundan narinlik sınır değer koşulunu sağlamıştır.

Basınç kuvveti dayanımı P_n hesabı

Elastik burkulma gerilmesi F_e

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left[\frac{L_{cy}}{i_y} \right]^2} = \frac{\pi^2 \times (200000)}{91,32^2} = 236,699N / mm^2 \quad (6.58)$$

$$91,32 < 4,71 \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 4,71 \sqrt{\frac{200000}{235}} = 137,40 \quad (6.59)$$

kontrol değerinden küçük olduğundan

$$F_{cr} = \left[0,658 \frac{f_y}{F_e} \right] \times F_y = \left[0,658 \frac{235}{236,699} \right] \times 235 = 155,092N / mm^2 \quad (6.60)$$

Karakteristik basınç kuvvet dayanımı P_n

$$P_n = F_c \times A_g = 155,092 \times (13700 \times 10^{-3}) = 2124,8 \text{ kN} \quad (6.61)$$

$$P_d = \phi_c \times P_n = 0,9 \times 2124,8 = 1912,324 \text{ kN} \quad (6.62)$$

olarak elde edilmiştir.

Eğilme momenti dayanımı M_n

$$M_p = F_y W_{px} = 235 \times (2613 \times 10^{-3}) = 614 \text{ kNm} \quad (6.63)$$

$$L_p = 1,76 i_y \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 1,76 \times 43,8 \times \sqrt{\frac{200000}{235}} = 2248,8 < L_b = 4000 \text{ mm} \quad (6.64)$$

$$i_{ts} = \frac{b_f}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \frac{h t_w}{b_f t_f} \right)}} = \frac{202}{\sqrt{12 \left(1 + \frac{1}{6} \times \frac{506(12)}{202(19)} \right)}} = 51,87 \text{ mm} \quad (6.65)$$

$$h_0 = d - t_f = 506 - 19 = 487 \text{ mm} \quad (6.66)$$

$$\begin{aligned} L_r &= 1,95 i_{ts} \frac{E}{0,7 f_y} \sqrt{\frac{J_c}{W_{ex} h_0} + \sqrt{\left(\frac{J_c}{W_{ex} h_0} \right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 f_y}{E} \right)^2}} = \\ &= 1,95 \times 51,87 \times \frac{200000}{0,7 \times 235} \sqrt{\frac{144 \times 10^4}{2284 \times 10^3 \times 487} + \sqrt{\left(\frac{144 \times 10^4}{2284 \times 10^3 \times 487} \right)^2 + 6,76 \left(\frac{0,7 \times 235}{200000} \right)^2}} \\ &= 7575,10 \text{ mm} \end{aligned} \quad (6.67)$$

$$C_b = \frac{12,5 \times 314,40}{2,5 \times 436,9 + 3 \times 349,23 + 4 \times 261,14 + 3 \times 172,73} = 2,02 \quad (6.68)$$

$L_p = 2248,8 \text{ mm} < L_b = 4000 \text{ mm} < L_r = 7575,1 \text{ mm}$ olduğundan eğilme momenti dayanımı yanal burulmalı burkulma sınır durumuna göre aşağıda kontrol edilmiştir.

$$\begin{aligned}
M_n &= C_b \left[M_p - (M_p - 0,7 f_y W_{ex}) \left(\frac{L_b - L_p}{L_r - L_p} \right) \right] \leq M_p \\
&= 2,02 \left[614 - (614 - 0,7 \times 235 \times 2284 \times 10^{-3}) \left(\frac{4000 - 2248,8}{7575 - 2248,8} \right) \right] = 1082 > 614 kNm \\
[M_n = M_p]_{\min} &= 614 kNm \tag{6.69}
\end{aligned}$$

Kolonun tasarım eğilme momenti dayanım kontrolü

$$M_d = \phi \times Mn = 0,90 \times 614 = 552,6 kNm \tag{6.70}$$

Kolonun tasarım dayanımı kontrolü için bulunan değerler formülde yerlerine konulduğunda

$$\frac{P_r}{P_c} = \frac{P_u(N)}{P_d} = \frac{136,55}{1912,324} = 0,0714 < 0,20 \tag{6.71}$$

$$\frac{P_r}{2 \times P_c} + \frac{M_{rx}}{M_{ex}} = \frac{136,55}{2 \times 1912} + \frac{436,9}{552,6} = 0,826 \leq 1 \tag{6.72}$$

elde edilmiştir. Yapılan hesaplamalar doğrultusunda çerçeve kiriş ve kolon elemanları IPE O 500 profil kesiti olarak seçilmektedir.

6.5.3. Çerçeve Kirişlerinin (IPE O 500) Yangın Dayanım Hesabı

Yangın dayanım tasarımı yapılacak olan IPE O 500 çerçeve kirişine ait özellikler Bölüm 6.5.1’de, iç kuvvet değerleri ise Bölüm 6.4.1 Çizelge 6.2’de verilmiştir. IPE O 500 kirişinin yangın tasarım dayanımı Bölüm 6.4.1’de detaylı olarak verilen basitleştirilmiş hesaplama metoduna göre yapılmaktadır.

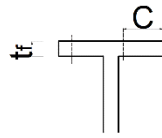
Enkesitin sınıflandırılması

Enkesitler TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde verilen azaltılmış ε değeri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Enkesitleri sınıflandırırken kullanılan sınır değerler ise TS EN 1993-1-1, 2014 [30] Tablo 5.2 kullanılarak belirlenmektedir.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{235}} = 1 \text{ (Normal sıcaklık için)} \quad (6.73)$$

$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85 \text{ (Yüksek sıcaklık için)} \quad (6.74)$$

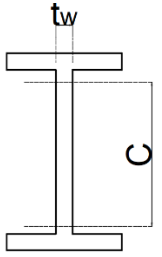
Başlık parçası



$$\frac{c_f}{t_f} < \left[\frac{c_f}{t_f} \right]_{sınır} \quad c_f = \frac{(b - t_w - 2r)}{2} = \frac{(202 - 12 - 2 \times 21)}{2} = 74 \quad (6.75)$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{74}{19} = 3,89 < 9\varepsilon = 9 \times 0,85 = 7,65 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.76)$$

Gövde parçası



$$\frac{c_w}{t_w} < \left[\frac{c_w}{t_w} \right]_{sınır} \quad c_w = d \quad (6.77)$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{426}{12} = 35,5 < 72\varepsilon = 72 \times 0,85 = 61,2 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.78)$$

Yukarıda sınıflandırma dikkate alınarak tüm enkesit **Sınıf 1** enkesit koşullarını sağlamaktadır.

Yangın etkisindeki tasarım yükü

TS 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre yangın etkisindeki yapısal elemanların iç kuvvet değerleri normal sıcaklıktaki yapısal analiz sonuçları kullanılarak elde edilir. Bu çalışmada da yapısal elemanlara etkileyen iç kuvvet değerleri normal sıcaklık iç kuvvet değerlerinin azaltma faktörü η_{fi} ile çarpılması sonucu elde edilmiştir.

Yangın etkisindeki tasarım yükü:

$$M_{d,fi} = 0,65 \times 436,9 = 283,99 kNm \quad (6.79)$$

$$V_{d,fi} = 0,65 \times 125,07 = 81,29 kN \quad (6.80)$$

Burada yangın durumunda tasarım yük düzeyi için azaltma faktörü olan η_{fi} için yönetmelikte tavsiye edilen 0,65 değeri kullanılmıştır.

Korunmayan çelik kiriş elemanda sıcaklık artışı

Korunmayan çelik elemandaki sıcaklık artışı Bölüm 6.4.1'de verilen hesap adımları izlenerek TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre belirlenmiştir.

Korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik;

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{çevre uzunluğu}}{\text{kesit alanı}} = \frac{2(b+h)}{A} = \left[\frac{2(202+506)}{13700} \right] 10^3 = 103,35m^{-1} \quad (6.81)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik;

$$\frac{A_m}{V} = \frac{\text{yangına maruz yüzey alanı}}{\text{enkesit alanı}} = \frac{2 \times h + b}{A} = \left[\frac{2 \times 506 + 202}{13700} \right] 10^3 = 88,61m^{-1} \quad (6.82)$$

Kesit faktörünün kutu (box) değeri

$$\left[\frac{A_m}{V} \right]_b = \frac{2 \times (b+h)}{A} = \left[\frac{2 \times (202+506)}{13700} \right] 10^3 = 103,35m^{-1} \quad (6.83)$$

Gölge etkisi düzeltme faktörü;

$$k_{sh} = 0,9 \times \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} = 0,9 \times \frac{103,35}{88,61} = 1,05 \quad (3 \text{ tarafı yangına maruz}) \quad (6.84)$$

$$k_{sh} = \frac{[A_m/V]_b}{[A_m/V]} = 0,9 \times \frac{103,35}{103,35} = 0,9 \quad (4 \text{ tarafı yangına maruz}) \quad (6.85)$$

Hesaplarda kullanılan değişkenler aşağıda verilmektedir.

Çeliğin özgül ısısı	$c_a =$	600 J/kg K
Çeliğin birim hacim kütlesi	$\rho_a =$	7850 kg/m ³
Elemanın yüzey yayıcılığı	$\varepsilon_m =$	0,7
Yangının yayıcılığı	$\varepsilon_f =$	1,0
Konfigürasyon katsayısı	$\phi =$	1,0
Stephen Boltzman katsayısı	$\sigma =$	5,67.10 ⁻⁸ W/m ² K ⁴
Konvektif ısı transferi katsayısı	$\alpha_c =$	25 W/m ² K
Süre	$\Delta_t =$	1,5 sn

Birim alana düşen net ısı akısının değeri:

$$\dot{h}_{net} = h_{net,r} - h_{net,c} \quad (6.86)$$

denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu denklemde net konvektif ısı akısı bileşeni:

$$h_{net,c} = 25(\theta_g - \theta_m) \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.87)$$

denklemleri ile ve radyoaktif (ışınmayla) ısı akısı bileşeni ise

$$h_{net,r} = (1,0)(0,7)(1,0)(5,67 \times 10^{-8})[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (6.88)$$

denklemleriyle belirlenmiştir.

Yangın etkisindeki giriş elemanının tasarım dayanımı;

$$M_{fi,\theta,Rd} = k_{y,\theta} \left[\frac{\gamma_{M,0}}{\gamma_{R,fi}} \right] \cdot M_{Rd} \quad (6.89)$$

denklemleriyle belirlenmiş ve burada kullanılan yangın tasarım değerleri aşağıda verilmiştir.

$\theta_a = 20^\circ C$ sıcaklıkta çelik için akma dayanımı azaltma katsayısı $k_{y,20} = 1,0$

Normal sıcaklıkta kullanılan malzeme katsayısı $\gamma_{M,0} = 1,0$

Yangın anında kullanılan malzeme katsayısı $\gamma_{M,fi} = 1,0$

Yangın etkisindeki kiriş elemanın dayanım denklemindeki M_{Rd} elemanın plastik moment tasarım dayanım kapasitesidir. Bu değer Bölüm 6.5.1’de hesaplanan IPE O 500 kirişi için akma sınır durumuna bağlı 552,6 kNm bulunmuştur.

$$M_{fi,\theta,Rd} = 1,0 \left[\frac{1,0}{1,0} \right] \times 552,6 = 552,6 kNm \quad (6.90)$$

olarak bulunmuştur. Bu ifadeye alternatif olarak kirişin yangın dayanımı κ_1 ve κ_2 faktörleri kullanılarak,

$$\frac{M_{fi,\theta,Rd}}{\kappa_1 \cdot \kappa_2} = \frac{552,6}{1,0 \times 0,7} = 789,43 kNm \text{ (3 tarafı yangına maruz)} \quad (6.91)$$

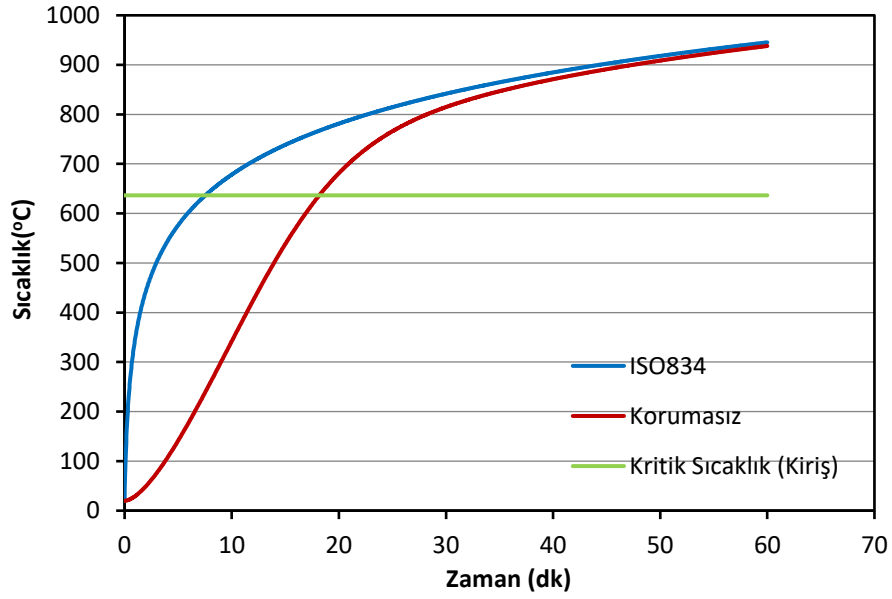
denklemiyle elde edilmiştir. Bu denklem sonucunda enkesit boyunca düzgün olmayan sıcaklık dağılımları analitik olarak dikkate alınmıştır. Burada enkesit ve kiriş boyunca düzenli olmayan sıcaklık için uyarılma faktörleri sırasıyla κ_1 ve κ_2 dir. 4 tarafı yangına maruz kalan profiller için $\kappa_1 = 1,0$, 3 tarafı yangına maruz kalan profiller için $\kappa_1 = 0,7$ alınmıştır. Hesaplarda κ_2 uyarılma faktörü 1,0 alınmıştır.

Zorlanma faktörü;

$$\mu_0 = \frac{M_{d,fi}}{M_{fi,\theta,Rd}} = \frac{283,99}{789,43} = 0,36 \quad (6.92)$$

IPE O 500 kirişi için θ_{cr} değeri Bölüm 4.6.4 Çizelge 4.2’de verilen zorlanma faktörü tablosu kullanılarak 636,6 °C olarak belirlenmektedir. IPE O 500 çerçeve kirişi

636,6°C kritik sıcaklık değerine 18,18 dakikada ulaşmıştır. Bu sonuçlar neticesinde çelik kiriş elemanının yönetmeliklerde verilen gerekli yük taşıma yangın dayanım süresi olan 60 dakikayı sağlamadığı görülmektedir. Bu gerekli yangın dayanım süresinin sağlanabilmesi için yangın koruma malzemelerinin kullanılması gerekir. IPE O 500 çerçeve kirişine ait standart yangın eğrisi, korumasız kirişin yangın sıcaklık eğrisi ve kritik sıcaklık değeri Şekil 6.17.'de sunulmaktadır. Bu şekilde görüldüğü üzere IPE O 500 çelik profilin 60.dakikadaki ortam sıcaklık değeri 938,1°C'dir.



Şekil 6. 17: Korumasız IPE O 500 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.

6.5.4. Çerçeve Kolonları (IPE O 500) Yangın Dayanımı

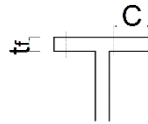
Yangın dayanım tasarımı yapılacak olan IPE O 500 çerçeve kolonuna ait özellikler Bölüm 6.5.2'de, iç kuvvet değerleri ise Bölüm 6.4.2 Çizelge 6.3'de verilmektedir. IPE O 500 kolonunun yangın tasarım dayanımı Bölüm 6.4.2'de detaylı olarak verilen basitleştirilmiş hesaplama metoduna göre yapılmıştır.

Enkesit sınıflandırılması

Enkesitler TS EN 1993-1-2, 2007 [25] verilen azaltılmış ε değeri kullanılarak sınıflandırılmıştır. Enkesitleri sınıflandırırken kullanılan sınır değerler ise TS EN 1993-1-1, 2014 [30] Tablo 5.2 kullanılarak belirlenmektedir.

$$\varepsilon = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,85 \times \sqrt{\frac{235}{235}} = 0,85 \quad (6.93)$$

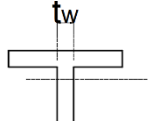
Başlık parçası



$$\frac{c_f}{t_f} < \left[\frac{c_f}{t_f} \right]_{sınır} \quad c_f = \frac{(b - t_w - 2r)}{2} = \frac{(202 - 12 - 2 \times 21)}{2} = 74 \quad (6.94)$$

$$\frac{c_f}{t_f} = \frac{74}{19} = 3,89 < 9\varepsilon = 9 \times 0,85 = 7,65 \text{ (Sınıf 1)} \quad (6.95)$$

Gövde parçası



$$\frac{c_w}{t_w} < \left[\frac{c_w}{t_w} \right]_{sınır} \quad c_w = d \quad (6.96)$$

$$\frac{c_w}{t_w} = \frac{426}{12} = 35,5 < 42\varepsilon = 42 \times 0,85 = 35,7 \text{ (Sınıf 3)} \quad (6.97)$$

Yukarıda yapılan sınıflandırmaya göre enkesitin başlık parçası **Sınıf 1** sınırlarını sağlamış, gövde parçası ise **Sınıf 3** olarak saptanmaktadır. Bu durumda tüm enkesit **Sınıf 3** olarak değerlendirilmektedir.

Yangın etkisindeki tasarım yükü

$$N_{d,fi} = \eta_{fi} \times P_u = 0,65 \times 136,55 = 88,75 \text{ kNm} \quad (6.98)$$

Burada yangın durumunda tasarım yük düzeyi için azaltma faktörü olan η_{fi} için yönetmelikte tavsiye edilen 0,65 değeri kullanılmıştır.

Yangın etkisindeki kolon elemanın tasarım dayanımı

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} A k_{y,\theta} \frac{f_y}{\gamma_{M,fi}} \quad (6.99)$$

denklemlerle belirlenmiş ve burada kullanılan yangın tasarım değerleri aşağıda hesaplanmıştır.

θ_a sıcaklığındaki boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}_\theta$, TS 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde normal sıcaklıktaki boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}$ bağlı olarak tanımlanmaktadır. Bölüm 6.5.2’de hesaplanan kolonun maksimum narinlik oranı $\lambda_{maks} = 91,32$ değeri dikkate alındığında boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}$,

$$\bar{\lambda} = \frac{\ell_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E}} = \frac{4000}{43,8} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{235}{210000}} = 0,996 \quad (6.100)$$

olarak elde edilmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda yüksek sıcaklıklardaki boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}_\theta$ pratik olarak $1,3 \times \bar{\lambda}$ olarak alınmaktadır [27]. Buna göre $\bar{\lambda}_\theta = 1,3 \times \bar{\lambda} = 1,3 \times 0,996 = 1,295$ (6.101)

bulunmuştur. Bu narinlik değeri kullanılarak Denklem 6.98’de verilen eğilme burkulması azaltma katsayısı χ_{fi} ;

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \quad (6.102)$$

ile

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \times [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] \quad (6.103)$$

$$a = 0,65 \sqrt{235 / f_y} \quad (6.104)$$

denklemleriyle belirlenmiştir. Burada çeliğin karakteristik akma dayanımı f_y ’e bağlı hata faktörü olan a

$$a = 0,65 \sqrt{235 / 235} = 0,65 \quad (6.105)$$

elde edilmiş ve

$$\varphi_\theta = \frac{1}{2} \times [1 + \alpha \bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] = \frac{1}{2} \times [1 + 0,65 \times 1,295 + 1,295^2] = 1,759 \quad (6.106)$$

olarak hesaplanmıştır. Bu değerler yerine konulduğunda azaltma faktörü χ_{fi} ;

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} = \frac{1}{1,759 + \sqrt{1,759^2 - 1,295^2}} = 0,339 \quad (6.107)$$

elde edilmiştir.

Böylece IPE O 500 kolonun sadece basınç kuvveti etkisindeki yangın tasarım burkulma dayanımı,

$$N_{b,fi,t,Rd} = \left[0,339 \times 13700 \times 1,0 \times \frac{235}{1,0} \right] \times 10^{-3} = 1091,4 \text{ kN} \quad (6.108)$$

elde edilmiştir.

Zorlanma faktörü μ_0

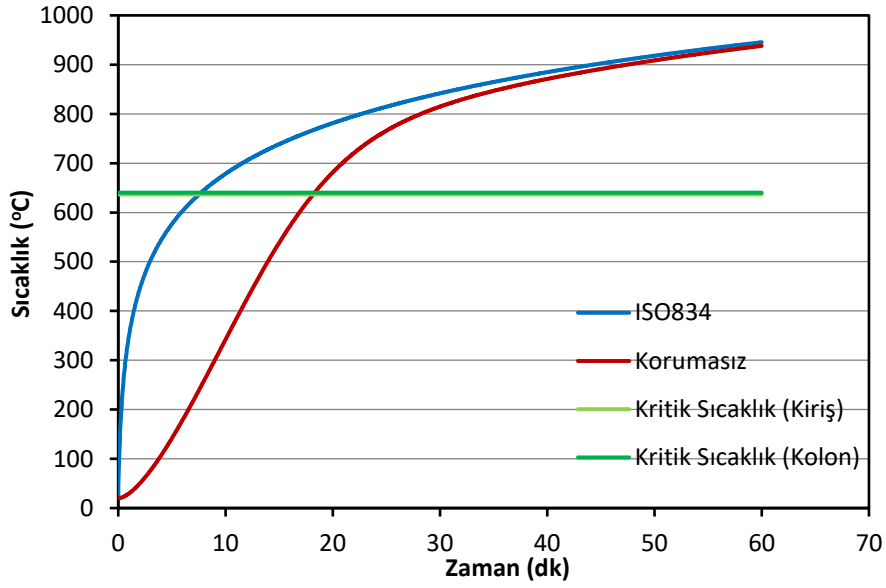
$$\mu_0 = \frac{N_{d,fi}}{N_{b,fi,t,Rd}} = \frac{283,99}{1091,4} = 0,260 \quad (6.109)$$

olarak bulunur. SCI-P375,2012 [33] dokümanında verilen basınç elemanları için boyutsuz narinlik oranı $\bar{\lambda}$ bağlı kritik sıcaklık tablosu (Çizelge 6.10) kullanılarak IPE O 500 için

$\theta_{cr} = 640,2^{\circ}$ olarak belirlenmiştir (Şekil 6.18).

Çizelge 6. 10: Basınç elemanı için kritik sıcaklık değerleri [33].

ELEMANLARIN TANIMI	KRİTİK SICAKLIK (°C) İÇİN ZORLANMA FAKTÖRÜ μ_0						
	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	
a) Basınç elemanları için Boyutsuz eksen narinliği $\bar{\lambda}$	0,4	485	526	562	598	646	694
	0,6	470	518	554	590	637	686
	0,8	451	510	546	583	627	678
	1,0	434	505	541	577	619	672
	1,2	422	502	538	573	614	668
	1,4	415	50	536	572	611	666
	1,6	411	500	535	571	610	665
b) Betonarme ya da kompozit döşeme ile desteklenen korumalı kiriş	558	587	619	654	690	750	
c) Betonarme ya da kompozit döşeme ile desteklenen korumasız kiriş	594	621	650	670	717	775	
d) Betonarme döşeme ile desteklenmeyen kiriş (gerilmeye maruz) elemanı	526	558	590	629	671	725	



Şekil 6. 18: Korumasız IPE O 500 çelik profil için sıcaklık zaman eğrisi.

6.5.5. Yangın Koruma Yöntemleri ile Kiriş ve Kolon (IPE O 500) Elemanların Yangın Dayanım Değerlendirilmesi

Bu çalışma kapsamında çerçeve kiriş ve kolonlarında yangından dolayı meydana gelen sıcaklık artış oranına azaltarak yönetmeliklerce tanımlanan yangın dayanım sürelerinin sağlanması için farklı pasif yangın koruma malzemeleri kullanılarak yangın dayanımları değerlendirilmiştir.

Bölüm 6.5.3’de 3 tarafı yangına maruz korumasız çelik kirişlerin (IPE O 500) yangın tasarımı yapılmış ve 636,6°C değerine 18,18 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Devamında Bölüm 6.5.4 ‘de çelik kolonların (IPE O 500) yangın tasarımı gerçekleştirilmiş ve 640,2°C değerine 18,32 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Ancak yönetmelikler çelik yapı elemanlarının gerekli yük taşıma dayanım süresini R60 dakika olarak vermiştir. Bu bölümde kutu kaplama ve spreyci yangın koruma malzemeleri kullanılarak kiriş ve kolon elemanların yangın dayanım süreleri araştırılmıştır.

Yangından koruma malzemesi ile yalıtılmış çelik yapı elemanlarında sıcaklık artışı;

Yalıtılmış çelik elemanlarda sıcaklık artış hesabı korunmayan çelik elemanın hesabına benzer şekilde TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğine göre belirlenmektedir. Bölüm 6.4.3’de verilen Denklem 6.27 ve Denklem 6.28’e göre çelik kiriş ve kolon elemanda Δ_t süresi içerisinde oluşacak sıcaklık artışı belirlenecektir.

6.5.5.1. Kutu Kaplama (Alçıpanel) ile Yangın Koruma

Kutu kaplama ile korunan çelik elemanlar için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{çevre uzunluğu}}{\text{kesit alanı}} = \frac{2(b+h)}{A} = \left[\frac{2(202+506)}{13700} \right] 10^3 = 103,35m^{-1} \quad (6.110)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{\text{yangına maruz yüzey alanı}}{\text{enkesit alanı}} = \frac{2 \times h + b}{A} = \left[\frac{2 \times 506 + 202}{13700} \right] 10^3 = 88,61m^{-1} \quad (6.111)$$

Alçıpanel kutu kaplama malzemesinin özellikleri aşağıda verilmektedir.

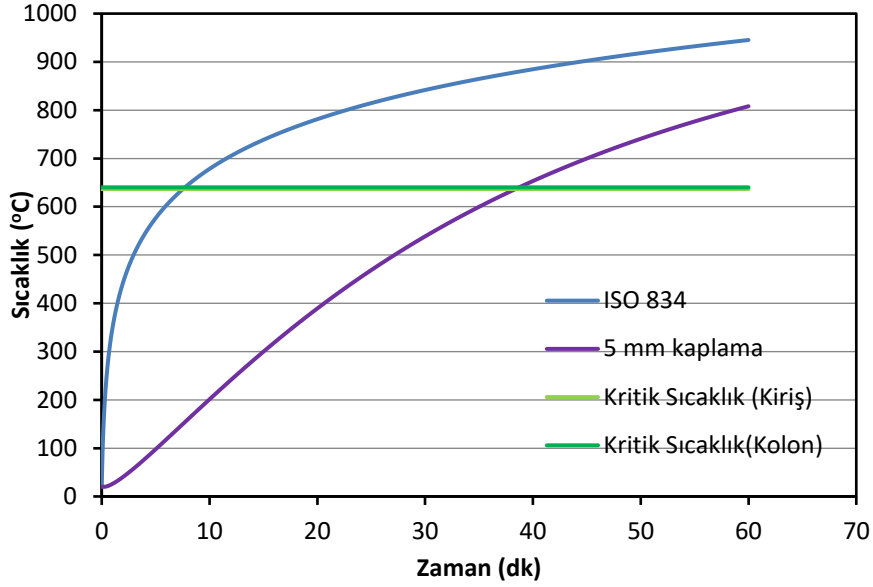
Koruma malzemesinin ısı iletkenliği	$\lambda_p =$	0,2	W/m K
Koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı	$c_p =$	1700	J/kg°C
Koruma malzemesinin birim hacim kütlesi	$\rho_p =$	800	kg/m ³

5 mm kalınlıklı alçı panel kutu kaplama ile yalıtılmış IPE O 500 çelik kesiti

Tasarım değerleri Denklem 6.28'de yerine konulduğunda ϕ değeri

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,005 \times 88,61 = 0,127 \quad (6.112)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 5mm kalınlı alçı panellerle yangına karşı korunan IPE O 500 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değerleri $\theta_{a,t} = 808,1^\circ C$ olarak bulunmuştur. 5 mm kalınlıklı alçıpanellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 636,6^\circ C$ kritik sıcaklık değerine 38,38 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 640,2^\circ C$ değerine ise yaklaşık 38,72 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 5 mm kalınlı alçıpanel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE O 500 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla yaklaşık %111 ve %111 oranında artırmaktadır. Ancak her iki yapısal elemanda da 5 mm kalınlıklı alçı panel kaplamalar R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamamıştır. şekil 6.19 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.

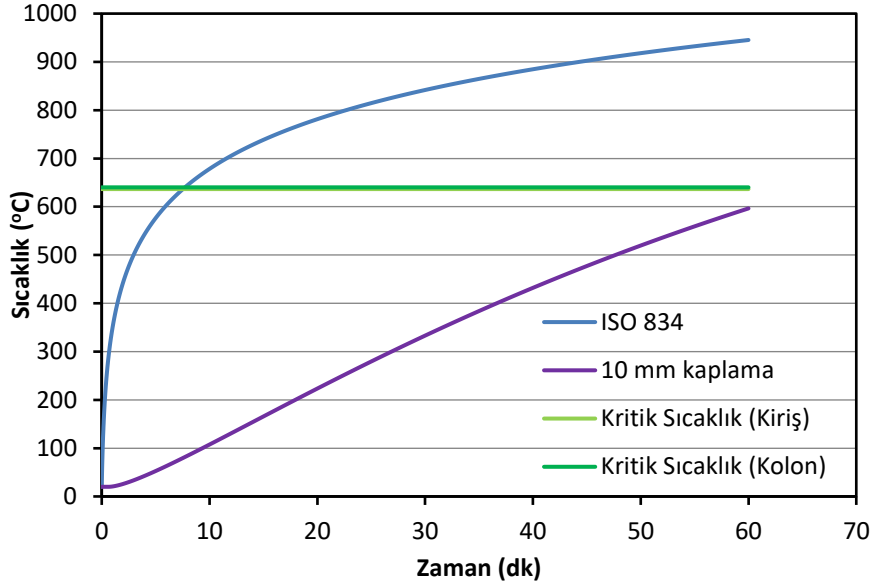


Şekil 6.19: 5 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.

10 mm'lik kutu kaplama ile yalıtılmış IPE O 500 çelik kesiti

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,01 \times 88,61 = 0,256 \quad (6.113)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 10 mm kalınlı alçıpanellerle yangına karşı korunan IPE O 500 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 596,6^{\circ}C$ olarak bulunmuştur. 10 mm kalınlıklı alçı panellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 636,6^{\circ}C$ kritik sıcaklık değerine 65,79 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 640,2^{\circ}C$ değerine ise 66,33 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 10 mm kalınlı alçı panel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE O 500 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %262 ve %262 oranında artırmaktadır. 10 mm'lik alçı panellerle yalıtılmış çerçeve kolon ve kirişleri R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamıştır. Şekil 6.20 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.

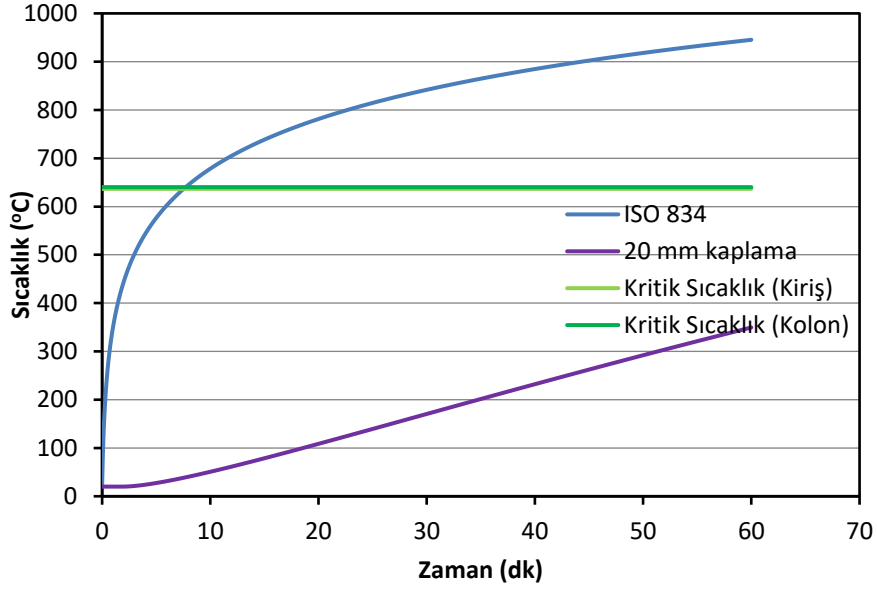


Şekil 6. 20: 10 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.

20 mm'lik kutu kaplama ile yalıtılmış IPE O 500 çelik kesiti

$$\phi = \frac{1700 \times 800}{600 \times 300} \times 0,02 \times 88,61 = 0,512 \quad (6.114)$$

olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 20 mm kalınlı alçı panellerle yangına karşı korunan IPE O 500 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 349,6^\circ C$ olarak bulunmuştur. 20 mm kalınlıklı alçı panellerle yalıtımlı çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 636,6^\circ C$ kritik sıcaklık değerine 120,45 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 640,2^\circ C$ değerine ise 121,38 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 20 mm kalınlı alçı panel kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE O 500 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %562 ve %560 oranında artırmaktadır. Çerçeve kiriş ve kolon elemanı R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamıştır. Şekil 6.21 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.



Şekil 6. 21: 20 mm kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.

6.5.5.2. Sprey (Mineral lifli) Malzeme ile Yangın Koruma

Sprey malzeme ile yalıtılmış kaplama için kesit faktörü

4 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{4b + 2h - 2t_w}{A} = \left[\frac{4 \times 202 + 2 \times 506 - 2 \times 12}{13700} \right] 10^3 = 131,09 m^{-1} \quad (6.115)$$

3 tarafı yangına maruz kalan korumalı çelik;

$$\frac{A_p}{V} = \frac{3b + 2h - 2t_w}{A} = \left[\frac{3 \times 202 + 2 \times 506 - 2 \times 12}{13700} \right] 10^3 = 116,35 m^{-1} \quad (6.116)$$

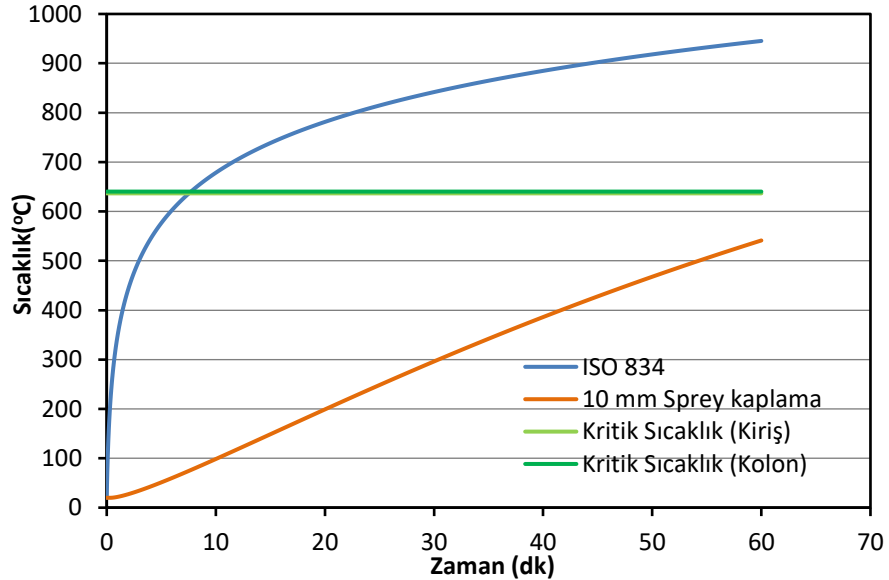
Mineral lifli malzemesinin özellikleri aşağıda verilmiştir.

Koruma malzemesinin ısı iletkenliği	$\lambda_p =$	0,12 W/m K
Koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı	$c_p =$	1200 J/kg°C
Koruma malzemesinin birim hacim kütlesi	$\rho_p =$	300 kg/m ³

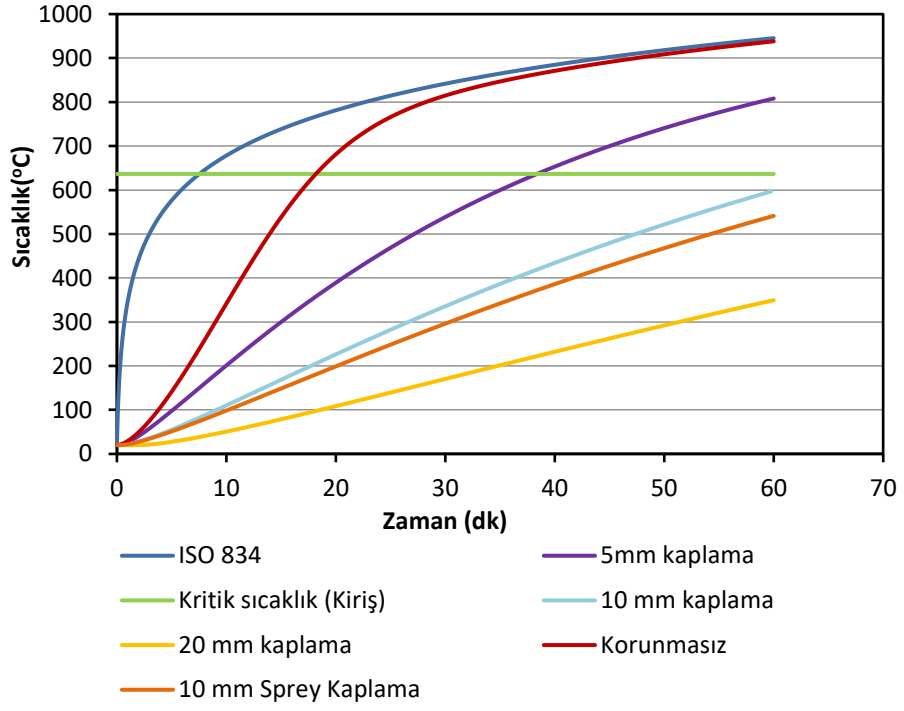
10 mm'lik sprej kaplama ile yalıtılmış IPE O 500 çelik kesiti

$$\phi = \frac{1200 \times 300}{600 \times 300} \times 0,01 \times 116,35 = 0,09 \quad (6.117)$$

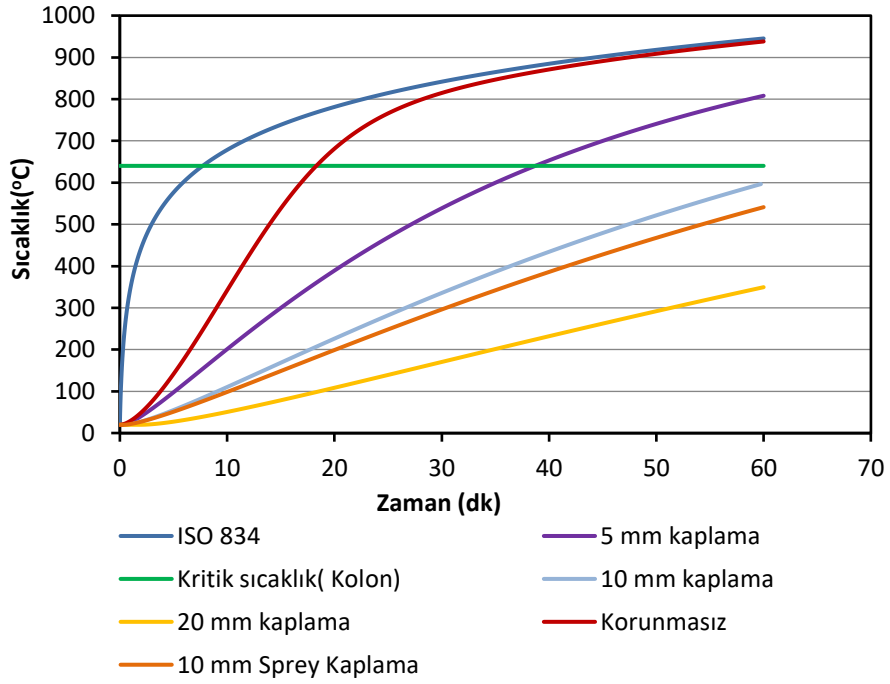
olarak hesaplanmıştır. 3 tarafı yangına maruz 10 mm kalınlı mineral lifli sprej uygulama yangına karşı korunan IPE O 500 profilinin 60. dakikadaki ortam sıcaklığı değeri $\theta_{a,t} = 541,2^\circ C$ olarak bulunmuştur. 10 mm kalınlı mineral lifli sprej ile korunan çelik kiriş, korumasız çelik kiriş için hesapladığımız $\theta_{cr} = 636,6^\circ C$ kritik sıcaklık değerine 74,88 dakikada ulaştığı, korumasız kolon için hesapladığımız $\theta_{cr} = 640,2^\circ C$ değerine ise yaklaşık 75,49 dakikada ulaştığı gözlenmiştir. 10 mm kalınlı mineral lifli sprej uygulama kullanılarak yapılan kutu kaplama yangın koruması IPE O 500 kiriş ve kolon elemanın yangına dayanım süresini sırasıyla %312 ve %312 oranında artırmaktadır. 10 mm'lik mineral lifli sprej kaplama çerçeve kirişleri Çerçeve kiriş ve kolon elemanı R60 gerekli yük dayanım süresini sağlamıştır. Şekil 6.22 yalıtımlı kiriş ve kolonun sıcaklık zaman eğrisi verilmektedir.



Şekil 6. 22: 10 mm sprej kaplama ile korunan çelik kiriş ve kolon (IPE O 500) için sıcaklık zaman eğrisi.



Şekil 6. 23: Çelik kiriş (IPE O 500) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.



Şekil 6. 24: Çelik kolon (IPE O 500) için korumasız ve korumalı çelik elemanlarda sıcaklık-zaman eğrisi.

Çelik yapı elemanlarına uygulanabilecek koruma uygulamaları değerlendirilecek olur ise Şekil 6.23 ve Şekil 6.24' de de görüldüğü üzere kaplama malzemesinin kalınlığı arttıkça koruma süresi artmaktadır. Bunun yanı sıra spreycaplama uygulamaları kutucaplama malzemelerine kıyasla ısıl iletkenliği λ_p , özgül ısısı c_p ve korumamalzemesinin birim hacim kütlesi ρ_p 'nin düşük olması sebebiyle 10 mm kutucaplamaya oranla daha yüksek koruma sağladığı görülmektedir. Ayrıca spreycaplamauygulamasının uygulama kolaylığı ve maliyeti de göz önüne alındığında optimumçözüm sağladığı görülmektedir.

7. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Yangınlar meydana geldiklerinde büyük hasarlara ve ciddi can kayıplarına neden olan nadir ve öngörülemeyen olaylardır. Yangınlar bulunduğumuz ortamlarda, çalışma ve yaşam alanlarımız da önemli bir tehdit oluşturduğundan yangın kaynaklı bu kayıpları en az seviyeye indirmek amacıyla çeşitli önlemlerin alınmasını gerektirir. Yapıların tasarım ve yapım aşamasındaki birçok faktöre bağlı olan bu önlemlerin başında yangın oluşma risklerini belirleyici çalışmalar yapılarak yangın oluşumunu azaltmak veya engellemek, yangının yayılmasının önlenerek insanların tahliyesi için güvenli kaçış yolları ve gerekli sürenin sağlanması gelmektedir.

Bu çalışmada çelik yapıların yangın güvenlik performansları araştırılmıştır. Bu amaçla ülkemizdeki çelik yapı stoğunun büyük bir kısmını oluşturan endüstriyel çelik yapı sistemi dikkate alınmış ve yangına karşı dayanıklılığı incelenmiştir. Endüstriyel bina yangınları içlerinde bulunan ya da depolanan malzemelere bağlı olarak konut ve diğer bina yangınlarından farklılık gösterebilirler.

Çalışmada ilk olarak yangına karşı dayanıklılığı incelenecek olan çelik elemanların yüksek sıcaklıklardaki davranışları belirlenmiştir (Bölüm 3). Yangından dolayı oluşan yüksek sıcaklıklar çelik malzemelerin mekanik özelliklerinde önemli değişimlere neden olur. Yangına maruz yapısal çeliğin mukavemetinde ve rijitliğinde önemli oranda azalmalar gözlenir. Bu durumda yapısal elemana etkiyen yüke ve sınır koşullarına bağlı olarak deformasyonlara ve göçmeye neden olur.

Yangın dayanımları incelenecek olan yapısal elemanların yangın tasarım kriterleri ve yangın tasarım adımları çalışmanın 4. Bölümü'nde açıklanmıştır. Ülkemizde yürürlükte olan Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'in binaların yangına dayanıklı tasarlanması üzerine yeterli bilgiyi içermemektedir. Bu nedenle 4.Bölüm'de yapısal elemanların yangın tasarım adımları Avrupa (Eurocode) yönetmeliklerine göre verilmiştir.

Yangından dolayı meydana gelebilecek kayıpları azaltmak için kullanılan yangın güvenlik önlemleri Bölüm 5'te açıklanmıştır. Yapısal elemanların yangın güvenliklerinin sağlanmasında kullanılan temel yöntemler olan "Aktif Koruma" ve

Pasif Koruma” yöntemleri bu bölümde verilmiştir. Yangının başlangıç safhalarında yangını veya dumanı algılayabilen yangının yayılmasına izin vermeden sınırlandırıp bölgesel olarak söndürmeyi amaçlayan aktif güvenlik önlemlerinin yapılan çalışmalarda can ve mal güvenliği açısından önemli etkilere sahip olduğu ifade edilse de insanların tahliyesi için kısıtlı zaman sağladıkları vurgulanmıştır. Bu nedenle yangına maruz yapıların yük taşıma kapasitesini, kayıpları geciktirmek için yapı elemanların dayanımlarını artırmak ve yangına karşı korumak için pasif koruma yöntemleri kullanılmalıdır. Ancak ülkemizde kullanılan yangın yönetmeliğimiz de aktif yangın güvenliği dışında binaların yapım aşamasında yangına dayanıklı tasarlanması ve pasif yangın koruma üzerine yeterli bilgi bulunmaması nedeniyle özellikle pasif yangın koruma yöntemleri bu bölümde detaylı olarak verilmiştir.

Çalışmanın 6. Bölümü’nde yangına maruz yapısal çelik elemanların yangın güvenlik performansları pasif koruma yöntemleri kullanılarak sayısal uygulamalarla değerlendirilmiştir. Bu bölümde farklı yangın koruma malzeme ve sistemlerinin yapısal çelik elemanların yangına dayanıklılığı üzerindeki etkisi sayısal olarak incelenmiştir. Sayısal uygulamalar iki aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir

İlk aşamada normal şartlar altında tasarlanmış mevcut tek katlı, tek açıklıklı çelik endüstri yapısının yapısal elemanları için tasarım kriterleri belirlenmiş ve yangına karşı yapısal tasarımları Avrupa Standartları (Eurocode) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra mevcut yapının yangın güvenlik performansı farklı pasif koruma yangın güvenlik yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

İkinci aşamada ise endüstri binasının yapısal elemanları Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmeliğine 2016 yönetmeliğine göre yeniden boyutlandırılmış ve yangın tasarımları gerçekleştirilmiştir. Daha sonra yeniden boyutlandırılmış bu elemanların yangın güvenlik performansları farklı pasif koruma yangın güvenlik yöntemleri kullanılarak değerlendirilmiştir.

Her iki aşamada da yapısal elemanların yangın performansları korumasız çelik eleman ve kutu kaplama, spreycaplama ile korumalı çelik eleman olarak incelenmiştir. Çalışmada koruma malzemesi olarak incelenen kutu kaplama pasif koruma yönteminde 5mm, 10mm ve 20mm’ lik kaplamalar dikkate alınmıştır. Diğer

koruma yöntemi olarak sprej kaplama dikkate alınmış ve hesaplarda 10 mm olarak kullanılmıştır.

7.1. SAYISAL UYGULAMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Sayısal uygulamaların ilk aşamasında incelen mevcut endüstriyel çelik yapısının yangına karşı dayanımı TS EN 1993-1-2, 2007 [25] yönetmeliğinde verilen “Basitleştirilmiş Hesaplama Modelleri” kullanılarak belirlendiğinden tüm yapısal sistem yerine standart yangın etkisindeki kolon ve kiriş elemanlarının yangına dayanıklılığı ayrı ayrı hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Buna göre;

- IPE 600 profilinden oluşan korumasız kiriş elemanının kritik sıcaklık değeri $\theta_{cr} = 680,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ hesaplanmış ve bu kritik sıcaklık değerine 19,79 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Kirişin yönetmelikle tanımlanan 60 dakika gerekli yük taşıma yangın dayanım süresini sağlamadığı görülmüş ve yangın koruma malzemeleri kullanılarak performansı belirlenmiştir. IPE600 korumasız ve korumalı kirişe ait yangın performans değerleri Çizelge 7.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 7. 1: IPE 600 korumasız/korumalı kiriş elemanı yangın performans değerleri.

Çelik Eleman (IPE 600 Kiriş Elemanı)	Yangın Enkesit Sınıfı	θ_{cr} ($^\circ\text{C}$)	Yangına Dayanıklılık R (dakika)	Dayanım Süresindeki artış (%)
Korumasız Çelik	Sınıf 1	680,6	19,79	-
Korumalı Çelik (5mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	680,6	42,12	113
Korumalı Çelik (10mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	680,6	71,60	262
Korumalı Çelik (20mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	680,6	129,88	556
Korumalı Çelik (10mm mineral lifli sprej)	Sınıf 1	680,6	82,00	314

- IPE 600 profilinden oluşan korumasız kolon elemanının yerel burkulmaya göre kesit sınıflandırması yangın için Sınıf 4 olduğu için yönetmelikle sınırlandırılmıştır. IPE600 kolon elemanının kritik sıcaklık değeri $\theta_{cr} = 350^\circ\text{C}$ olarak alınmış ve bu kritik sıcaklık değerine 10,06 dakikada

ulaştığı belirlenmiştir. Kolon elemanının da yönetmeliklerce tanımlanan 60 dakika gerekli yük taşıma yangın dayanım süresini sağlamadığı görülmüş ve yangın koruma malzemeleri kullanılarak performansı belirlenmiştir. IPE600 korumasız ve korumalı kolonuna ait yangın performans değerleri Çizelge 7.2’de özetlenmiştir.

Çizelge 7. 2:IPE 600 korumasız/korumalı kolon elemanı yangın performans değerleri

Çelik Eleman (IPE 600 Kolon Elemanı)	Yangın Enkesit Sınıfı	θ_{cr} (°C)	Yangına Dayanıklılık R (dakika)	Dayanım Süresindeki artış (%)
Korumasız Çelik	Sınıf 4	350	10,06	-
Korumalı Çelik (5mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 4	350	17,40	73
Korumalı Çelik (10mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 4	350	31,29	211
Korumalı Çelik (20mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 4	350	59,09	487
Korumalı Çelik (10mm mineral lifli sprey)	Sınıf 4	350	35,58	254

Sayısal uygulamaların ikinci aşamasında incelen endüstri binasının yapısal elemanları ÇYTHE Yönetmeliğine göre yeniden boyutlandırılarak gelen yükler altındaki en ideal (optimum) kesit boyutları araştırılmıştır. Yapısal elemanların yönetmeliğimizde verilen yük de dayanım katsayıları yöntemine göre sınır durum tasarımları gerçekleştirilmiş ve kiriş ve kolon elemanlarının profil enkesitleri IPE O 500 olarak belirlenmiştir. Daha sonra ilk aşamada gerçekleştirilen hesaplama adımları takip edilerek standart yangın etkisindeki kolon ve kiriş elemanlarının yangına dayanıklılığı ayrı ayrı hesaplanmış ve değerlendirilmiştir. Buna göre;

- IPEO500 profilinden oluşan korumasız kiriş elemanının kritik sıcaklık değeri $\theta_{cr} = 636,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ hesaplanmış ve bu kritik sıcaklık değerine 18,18 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Kirişin yönetmeliklerce tanımlanan 60 dakika gerekli yük taşıma yangın dayanım süresini sağlamadığı görülmüş ve yangın koruma malzemeleri kullanılarak performansı belirlenmiştir. IPEO500 korumasız ve korumalı kirişe ait yangın performans değerleri Çizelge 7.3’te özetlenmiştir.

Çizelge 7. 3: IPE O 500 korumasız/korumsalı kiriş elemanı yangın performans değerleri.

Çelik Eleman (IPE O 500 Kiriş Elemanı)	Yangın Enkesit Sınıfı	θ_{cr} (°C)	Yangına Dayanıklılık R (dakika)	Dayanım Süresindeki artış (%)
Korumasız Çelik	Sınıf 1	636,6	18,18	-
Korumsalı Çelik (5mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	636,6	38,38	111
Korumsalı Çelik (10mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	636,6	65,79	262
Korumsalı Çelik (20mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 1	636,6	120,45	562
Korumsalı Çelik (10mm mineral lifli sprej)	Sınıf 1	636,6	74,88	312

- IPEO500 profilinden oluşan korumasız kolon elemanının kritik sıcaklık değeri $\theta_{cr} = 640,2^{\circ}C$ hesaplanmış ve bu kritik sıcaklık değerine 18,18 dakikada ulaştığı belirlenmiştir. Kolon elemanının da yönetmeliklerce tanımlanan 60 dakika gerekli yük taşıma yangın dayanım süresini sağlamadığı görülmüş ve yangın koruma malzemeleri kullanılarak performansı belirlenmiştir. IPEO500 korumasız ve korumsalı kolonuna ait yangın performans değerleri Çizelge 7.4'te özetlenmiştir.

Çizelge 7. 4: IPE O 500 korumasız/korumsalı kolon elemanı yangın performans değerleri.

Çelik Eleman (IPE O 500 Kolon Elemanı)	Yangın Enkesit Sınıfı	θ_{cr} (°C)	Yangına Dayanıklılık R (dakika)	Dayanım Süresindeki artış (%)
Korumasız Çelik	Sınıf 3	640,2	18,32	-
Korumsalı Çelik (5mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 3	640,2	38,72	111
Korumsalı Çelik (10mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 3	640,2	66,33	262
Korumsalı Çelik (20mm alçıpanel kaplama)	Sınıf 3	640,2	121,38	560
Korumsalı Çelik (10mm mineral lifli sprej)	Sınıf 3	640,2	75,49	312

Sayısal uygulamaların sonucunda endüstriyel çelik binanın yapısal elemanlarının yangın performansları korumasız ve korumsalı olarak belirlenmiştir.

Sayısal sonuçlar yapısal elemanın yangın performansını belirlerken en önemli etkenlerden birisinin enkesitlerin yangına karşı sınıflandırılmaları olduğunu göstermiştir. Yönetmelikler yerel burkulmanın gözlemlendiği elemanlarda yangına dayanıklılık süresini yaklaşık %40 oranında azaltarak sınırlandırmıştır. Ayrıca pasif koruma yöntemlerinden mineral lifli spreycaplama yönteminin aynı kalınlığa sahip alçıpanel kutucaplama yöntemine göre daha %13-15 oranında daha fazla yangın dayanım süresi sağladığı belirlenmiştir.

Endüstriyel bina elemanlarının yangına karşı dayanımlarında belirleyici yapısal elemanların kolonların olması bu tip yapılarda çelik kolon yerine betonarme, önüretimli (prekast) ya da yangına dayanıklı duvar panellerinin kullanılması tercih edilebilir.

Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda bu tez kapsamında değerlendirmiş olduğumuz pasif yangın koruma yöntemleri olan alçıpanel kutucaplama ve mineral lifli spreycaplama malzemelerinin maliyet açısından detaylı bir karşılaştırma yapılması araştırmacılara önerilmektedir.

KAYNAKÇA

- [1] **World Fire Statistics** (2020). International association of fire and rescue services, sayı:25.
- [2] **URL-1:** <<https://firesafeeurope.eu/resources/>>, erişim tarihi: 25/06/2020.
- [3] **URL-2:** <http://itfaiye.ibb.gov.tr/img/_160251922020_.pdf>, erişim tarihi 01/05/2019.
- [4] **Buchanan, A. H., & Abu, A. K.** (2017). Structural Design For Fire Safety, Second John Wiley & Sons.
- [5] **Binaların Yangından Koruması Hakkında Yönetmelik**, (2007). 19/12/2007 tarih ve 26735 sayılı Resmi Gazete.
- [6] **URL-3:** <<https://www.imsad.org/Haber/yangina-ilk-onlem-binalarin-proje-asamasinda-alinmali>>. erişim tarihi:27/06/2020.
- [7] **URL-4:** <<https://www.ekoyapidergisi.org/4697-binalarin-80inde-yangin-emniyeti-yok.html>>, erişim tarihi:27/06/2020.
- [8] **Wong, S., Y.** (2001).The Structural Response of Industrial Portal Frame. Doktora tezi Sheffield Üniversitesi.
- [9] **Demirel, F. & Özkan, E.** (2003). Çelik yapı bileşenler ve yangın güvenlik önlemleri, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi Sayı: 18.
- [10] **Sanrı, I.** (2004) Steel Frame Under Fire, Yüksek lisans tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- [11] **Song, Y.** (2008). Analysis of industrial steel portal frames under fire conditions, Doktora tezi Sheffield Üniversitesi.
- [12] **Uzbaş, B.** (2010). Endüstriyel Çelik Yapılarda Fireproof Uygulamaları, Dergipark, sayı: 25.
- [13] **Özberk, Doğan, D.** (2010). Çelik yapılarda pasif yangından koruma yöntemlerinin karşılaştırılmalı maliyet analizi, Yüksek lisans tezi, Pamukkale Üniversitesi.
- [14] **Yazgan, M., T.** (2010). Yangın Geçirmiş Çelik Binaların Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek lisans tezi, Gebze Üniversitesi.

- [15] **Dünder, U.** (2013). Analysis of Fire Induced Forces in Steel Design, Yüksek Lisans tezi, Boğaziçi Üniversitesi.
- [16] **Eren, Ö. & Mayuk, S., G.** (2013). Çelik Yapıların Yangına Karşı Korunma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi, NWSA Engineering Sciences, Cilt:8, Sayı: 3.
- [17] **McIntosh, P. & Farid, M.** (2014). Fire Protection of Steel Structure Through the Application of Phase Endothermic Reaction, Auckland Üniversitesi, Yeni Zelanda.
- [18] **İpekçi, C. A.**(1998). Yangının Çelik Taşıyıcı Sistemler Üzerindeki Etkisi, Yüksek lisans tezi, İstanbul: İTÜ.
- [19] **Toydemir, N., Gürdal, E., Tanaçan, L., Özkal, S., Doymuş, N., & Ciravoğlu, Ö.** (2000). Yapı elemanı tasarımında malzeme, Literatür yayınları.
- [20] **Yangın ve Kazalarla Mücadele Eğitim Kitabı** (2020). İstanbul. Büyükşehir Belediyesi, İBİTEM.
- [21] **ASTM E119-20.** (2020). Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org.
- [22] **ISO834-1.** (1999). International Organization for Standardization, Fire Resistance Tests Elements of Buildings Construction- Part 1: General Requirements.
- [23] **TS EN 1991-1-2** (2004). Yangına maruz kalan yapılar üzerinde etkiler Bölüm 1–2: genel kurallar—yangın güvenlik tasarımı, TSE.
- [24] **Phan, L. T., McAllister, T. P., Gross, J. L., & Hurley, M. J.** (2010). Best practice guidelines for structural fire resistance design of concrete and steel buildings. NIST technical note, sayı:1681-199.
- [25] **TS EN 1993-1-2** (2007). Çelik yapıların tasarımı-Bölüm 1–2: Genel kurallar Yangına karşı yapısal tasarım.
- [26] **CEN (2005b).**(2005). BS EN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of Steel Structures,Part 1-1, BS.
- [27] **Steel Buildings in Europe Multi Storey Steel Building** (2009) Part:6 Fire Engineering.
- [28] **Bailey, C.** (2004). Developments and future direction of structural fire engineering.
- [29] **Steel Buildings in Europe Single-Storey Steel Buildings** (2009). Part 7:Fire Engineering.

- [30] **TS EN 1993-1-1** (2014). Çelik yapıların tasarımı Bölüm 1:1: Genel kurallar ve binalarda uygulanacak kurallar.
- [31] **URL-5:** <<http://elektrikdeposu.com/urun/buton-yangin-ihbar-yuvarlak>>, erişim tarihi: 18.01 2020.
- [32] **URL-6:** <<http://www.profire.com.tr/intumesan-boya.html>>, erişim tarihi: 16.03.2019.
- [33] **SCI-P375** (2012). Fire resistance design of steel framed buildings, SCI.
- [34] **Yorgun, C.** (2005). Çelik sac-beton kompozit döşeme sistemlerinin uygulamalarına yönelik değerlendirmeler. Türkiye Mühendislik Haberleri, 435, 60-64.
- [35] **Öven, A.** İMO Teknik Dergi, no. 226, pp. 3377-3393, 2005.
- [36] **URL-7:** <<http://acikerisim.deu.edu.tr>> , erişim tarihi: 18 01 2020.
- [37] **Eren, Ö. & Başarır, B.** (2013). Çelik strüktürlerin yaşam döngüsü içinde sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi Engineering Sciences, 8(2), 120-135.
- [38] **ÇYHTE** (2016). Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik, Ankara.
- [39] **ÇYHTE (Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik) Uygulama Klavuzu**, (2017). Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, İstanbul.
- [40] **TS 498** (1987). Yapı elemanlarının boyutlandırılması alınacak yüklerin hesap değeri, Ankara: TSE.
- [41] **TS EN 1991-1-3** (2007). Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-3: Genel etkiler - Kar etkileri.
- [42] **TS EN 1991-1-4** (2007). Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-4: Genel etkiler- rüzgar etkileri.
- [43] **DBYHY** (2007) Deprem bölgelerinde yapılacak binaların hakkında yönetmelik, 06/03/2007 tarih ve 26454 sayılı Resmi Gazete.
- [44] **URL-8:**
<https://sections.arcelormittal.com/products_and_solutions/products_range/EN?expand=520>, erişim tarihi: 12.01.2020

