İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA PASİF YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra KARACA

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

NİSAN 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA PASİF YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esra KARACA
(502181527)

Mimarlık Anabilim Dalı

Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Halet Almıla BÜYÜKTAŞKIN

NİSAN 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 502181527 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Esra KARACA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA PASİF YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI'' başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Dr. Öğr. Üyesi Halet Almıla BÜYÜKTAŞKIN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Mustafa ÖZGÜNLER** Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi	.....
	Doç. Dr. Nuri SERTESER İstanbul Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 11 Nisan 2023
Savunma Tarihi : 26 Nisan 2023



Sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi birikimini ve tecrübelerini benden esirgemeyen, tez çalışmamın bu aşamaya gelmesinde büyük emeği olan değerli hocam ve danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Halet Almıla Büyüktaşkın'a, tez sürecinde hep yanımda olan sevgili arkadaşlarım ve meslektaşlarım Betül Gözalan ve Mevlüde Melike Turan'a, destek ve anlayışları için kıymetli aileme teşekkür ederim.

Nisan 2023 Esra Karaca

(Mimar)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **vii**
İÇİNDEKİLER ..... **ix**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı **1**
1.2 Tezin Kapsamı **1**
1.3 Tezin Yöntemi **1**
2. MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK **3**
2.1 Tarihsel Gelişim **3**
2.1.1 18. ve 19. yüzyıl: çeliğin mimaride kullanılmaya başlanması **3**
2.1.2 20. yüzyılın ilk yarısı : Uluslararası Stil **6**
2.1.3 1970'li yıllar: Yüksek Teknoloji (High Tech) mimari akımı **7**
2.1.4 21.yüzyıl: Teknolojik gelişmeler ve küreselleşme **7**
2.2 Ülkemizde Çelik Taşıyıcı Sistemlerin Görünür Olarak Kullanıldığı Yapılar **8**
2.3 Mimari Olarak Görünür Yapısal Çelik Elemanların Sınıflandırılması **10**
2.3.1 AESS 1 - temel elemanlar **11**
2.3.2 AESS 2 - yakın görünümde olmayan elemanlar **11**
2.3.3 AESS 3 - yakın görünümdeki elemanlar **11**
2.3.4 AESS 4 - vitrin elemanları **11**
2.4 Çeliğin Mimari Yapılarda Kullanımının Avantajları **12**
2.5 Çeliğin Mimari Yapılarda Kullanımının Dezavantajları **12**
2.5.1 Korozyon etkisi **12**
2.5.2 Ses ve ısıl iletkenlik **13**
2.5.3 Yangın dayanımı **13**
3. YAPISAL ÇELİK VE YANGIN **15**
3.1 Yangın Olayına İlişkin Genel Kavramlar **15**
3.1.1 Yangının gelişimi ve büyümesi **15**
3.1.2 Yangın dayanımı **16**
3.1.3 Yangın yükü **17**
3.1.4 Yapı malzemelerinin yanıcılık sınıfları **19**
3.2 Yapısal Çeliğin Yangın Sırasındaki Davranışı **22**
3.2.1 Yapısal çeliğin ısıl (termal) özellikleri **23**
3.2.1.1 Yoğunluk **23**
3.2.1.2 Isıl genleşme **23**
3.2.1.3 Isıl iletkenlik **24**
3.2.1.4 Özgül ısı **25**

3.2.1.5 Isı yayılma katsayısı **26**
3.2.2 Yapısal çeliğin mekanik özellikleri **27**
3.2.3 Kesit faktörü **31**
4. MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA YANGINA KARŞI KORUMADA UYGULANAN PASİF KORUMA YÖNTEMLERİ 35
4.1 Taşıyıcı Sistemlerin Yangına Karşı Korunmasına Yönelik Ulusal ve Uluslararası Standart ve Yönetmelikler **35**
4.1.1 European Norms (EN) 13381 - Avrupa Test Standartları **36**
4.1.2 British Standards (BS) 476 - İngiltere Test Standartları **36**
4.1.3 American National Standards Institute (ANSI) / UL 263 - Amerikan Test Standartları **36**
4.1.4 Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik (BYKHY) **37**
4.1.5 Eurocode **37**
4.1.6 British Standards (BS) 5950 ..... **37**
4.1.7 International Building Code (IBC) ve National Fire Protection Association (NFPA) 500 ..... **38**
4.2 Mimari Olarak Görünür Çelik Yapılarda Ana Taşıyıcı Bileşenlere Uygulanabilen Pasif Koruma Yöntemleri **38**
4.2.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması **38**
4.2.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım **46**
4.2.3 İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım **51**
4.2.4 Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması **59**
4.3 Mimari Olarak Görünür Çelik Yapıların Diğer Taşıyıcı Bileşenlerine Uygulanabilen Pasif Koruma Yöntemleri **64**
4.3.1 Döşeme sistemlerinin yangına karşı pasif korunumu **64**
4.3.2 2 Çelik taşıyıcı bileşenlerin birleşim bölgelerinin yangına karşı pasif korunumu **69**
5. MALİYET ANALİZİ 74
5.1 Karşılaştırma Örneğinin Tanıtımı **74**
5.2 Kolonlarda Pasif Koruma Yöntemlerinin Uygulanması **75**
5.2.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması (kolonlar) **75**
5.2.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım (kolonlar) **80**
5.2.3 İntümesan boyalar ile yalıtım (kolonlar) **83**
5.2.4 Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması (kolonlar) **86**
5.3 Kirişlerde Pasif Koruma Yöntemlerinin Uygulanması **90**
5.3.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması ile yalıtım (kirişler) **90**
5.3.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım (kirişler) **92**
5.3.3 İntümesan boyalar ile yalıtım (kirişler) **94**
5.4 Döşeme sistemlerinde pasif koruma yöntemlerinin uygulanması **96**
5.4.1 Püskürtme sıva ile yalıtım uygulaması **97**
5.4.2 İntümesan (genleşen) boya uygulaması **98**
6. DEĞERLENDİRME 102
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 107
KAYNAKLAR 115
ÖZGEÇMİŞ 121

KISALTMALAR

AESS : Architecturally Exposed Steel Structures
ASTM : American Society for Testing and Materials
AISC : Architecturally Exposed Steel Structures
BS : British Standards
BYKHY : Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik
CEN : Comité Européen de Normalisation
DFT : Dry Film Thickness
SFRM : Spreyed Fire Resistive Material
SHS : Square Hollow Section
UL : Underwriter Laboratories
WFT : Wet Film Thickness

SEMBOLLER

A : Çelik profilin kesit alanı
α_a : Isıl genleşme katsayısı
c_a : Özgül ısı katsayısı
^oC : Sıcaklık
C : Beton sınıfı
Ea : 20°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin elastisite modülü
$\bar{E}a,\theta$: θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin elastisite modülü
fay : 20°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin olağan akma sınırı
fayθ : θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin %2 şekil değiştirmeye ilişkin itibari akma sınırı (maksimum gerilme sınırı)
fapθ : θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin orantılılık sınırı
fauθ : θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin 1.25 ile kısıtlanmış minimal kopma sınırı
Hp : Yangına maruz kalan çeliğin çevresi
K_a : Isıl iletkenlik katsayısı
kg : Kilogram
lt : Litre
θ_a : Çeliğin sıcaklık değeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Yangın yükünün ortam sıcaklığına etkisi. **18**
Çizelge 3.2 : Yangın yükünün bina kullanım türlerine göre belirlenen değerleri . . **18**
Çizelge 3.3 : Yapı elemanlarının yangına dayanım sembolleri ve süreleri **19**
Çizelge 3.4 : Yapı elemanlarının yangına dayanım süreleri **20**
Çizelge 3.5 : Bina kullanım türlerine göre belirlenen yangın dayanım süreleri **21**
Çizelge 3.6 : Yapısal çelik malzemenin yüksek sıcaklık altında azalma katsayıları. **28**
Çizelge 3.7 : Elastisite modülü ve akma dayanımının sıcaklıkla değişimi. **30**
Çizelge 4.1 : Korumada kullanılan betonun özellikleri **41**
Çizelge 4.2 : Çelik taşıyıcı bileşenleri yangına karşı korumada kullanılan püskürtme sıvaların fiziksel özellikleri. **47**
Çizelge 4.3 : İntümesan boyanın sahada ve saha dışında uygulama yöntemlerinin karşılaştırılması. **57**
Çizelge 4.4 : Isınan toplam kolon yüzeyinin soğutulması için gerekli su miktarı... **63**
Çizelge 4.5 : Kompozit döşemelerde minimum beton kalınlık değerleri. **67**
Çizelge 4.6 : Çelik kiriş ve metal tabliyeler arasındaki boşlukların doldurulmasına yönelik öneriler. **67**
Çizelge 5.1 : Çelik kutu enkesitlerde yangın sınıflarına göre beton sınıflarının ve donatı yüzdelerinin belirlenmesi için oluşturulan tablo. **76**
Çizelge 5.2 : Çelik donatı çubukların enkesit alanları ve ağırlık değerleri **79**
Çizelge 5.3 : Betonla doldurulan kolonlar için pasif koruma maliyeti. **79**
Çizelge 5.4 : Uygulamada kullanılan çimento bazlı püskürtme sıva malzemesinin fiziksel özellikleri. **80**
Çizelge 5.5 : Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kolonlarda pasif koruma maliyeti. **82**
Çizelge 5.6 : Uygulamada kullanılan intümesan boyanın fiziksel özellikleri. **83**
Çizelge 5.7 : İntümesan boya kalınlıklarının kesit faktörü ve kritik sıcaklık değeri üzerinden gösterimi. **84**
Çizelge 5.8 : İntümesan boya uygulanan kolonlarda pasif koruma maliyeti. **86**
Çizelge 5.9 : Kolon yüzeyinde m^2 başına oluşan maksimum buharlaşma hızı. **88**
Çizelge 5.10: Su soğutma yöntemi uygulanan kolonlarda pasif koruma maliyeti. .. **89**
Çizelge 5.11: Betonla doldurulan kirişler için pasif koruma maliyeti. **92**
Çizelge 5.12: Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kirişlerde pasif koruma maliyeti. **94**
Çizelge 5.13 : İntümesan boya uygulanan kirişlerde pasif koruma maliyeti. **96**
Çizelge 5.14 : Kompozit döşeme için minimum püskürtme sıva kalınlık değerleri. **97**
Çizelge 5.15 : Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kompozit döşemelerin toplam pasif koruma maliyeti. **98**
Çizelge 5.16 : İntümesan boya uygulanan kompozit döşemelerin toplam pasif koruma maliyeti. **98**

Çizelge 5.17 : Pasif koruma maliyetlerinin taşıyıcı bileşen bazında gösterimi. **99**
Çizelge 7.1 : Uygulama koşullarının karşılaştırılması. **108**
Çizelge 7.2 : Pasif koruma yöntemlerinin çelik elemanların enkesit türüne göre kullanımı. **110**
Çizelge 7.3 : Pasif koruma yöntemlerinin belirlenen performans kriterlerinin karşılaştırılması. **114**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Coalbrookdale Köprüsü (İngiltere, 1778). **4**
Şekil 2.2 : Ditherington Flax Değirmeni (Shrewsbury, İngiltere). **4**
Şekil 2.3 : Bibliotheque Ste. Genevieve Binası'nın okuma odasında bulunan dökme demir kirişler. **4**
Şekil 2.4 : Dökme demir kiriş detayları, Bibliotheque Ste. Genevieve. **5**
Şekil 2.5 : Galérie des Machines (Ferdinand Dutert, 1889). **5**
Şekil 2.6 : Farnsworth Evi (Ludwig Mies van der Rohe, Illinois, 1951). **6**
Şekil 2.7 : Farnsworth Evi'nin çelik çerçeveli taşıyıcı sistemi. **6**
Şekil 2.8 : Sainsbury Görsel Sanatlar Merkezi (Foster+Partners, Birleşik Krallık, 1977). **7**
Şekil 2.9 : Pekin Olimpiyat Stadı (Herzog& de Meuron + ARUP, Çin, 2008). **8**
Şekil 2.10 : Eyüp Feshane Binası (İstanbul, 1868)…. **8**
Şekil 2.11 : Tarihi Basmane Garı (İzmir, 1863). **9**
Şekil 2.12 : Afrodisyas Ek Müzesi (Cengiz Bektaş, Denizli, 2007). **9**
Şekil 2.13 : Maslak no:1 Ofis Binası'nın çelik taşıyıcılı cephe elemanları. **10**
Şekil 2.14 : İzmir Adnan Menderes Havalimanı'nın çelik düşey taşıyıcı elemanları. **10**
Şekil 2.15 : Çelik malzemenin yüksek sıcaklık altındaki gerilme- elastisite modülü. **13**
Şekil 3.1 : Yangın sonrasında çelik taşıyıcı elemanlarda meydana gelen deformasyonlar. **15**
Şekil 3.2 : Yanma sürecinde sıcaklık-zaman ilişkisi. **16**
Şekil 3.3 : Taşıyıcı sistem için belirlenmiş yangın dayanımı kriterleri. **17**
Şekil 3.4 : Çeliğin mekanik ve ısıl özelliklerinin sıcaklıkla değişimi. **22**
Şekil 3.5 : Isıl genleşme – sıcaklık grafiği. **24**
Şekil 3.6 : Isıl iletkenlik – sıcaklık grafiği. **25**
Şekil 3.7 : Özgül ısı – sıcaklık grafiği. **25**
Şekil 3.8 : Çelik malzemenin ısı iletkenlik katsayısı ($K_{a)}$ ve özgül ısı katsayısının (c_a) sıcaklıkla değişimi. **26**
Şekil 3.9 : Çelik malzemede a_a ısı yayılma katsayısı ve α_a ısıl genleşme katsayısının sıcaklıkla değişimi. **27**
Şekil 3.10 : Yapısal çelik malzemenin yüksek sıcaklık altında azalma katsayıları… **29**
Şekil 3.11 : Yapısal çelik malzemenin şekil değiştirme- gerilme eğrisinin %2 uzamaya kadar sıcaklıkla değişim. **30**
Şekil 3.12 : Yüksek dayanımlı çelik malzemenin yüksek sıcaklıklardaki elastisite modülü ve akma gerilmesi oranları. **31**
Şekil 3.13 : Çelik elemanlarda kesit faktörünün yangın dayanımına etkisi **32**
Şekil 3.14 : Yangına karşı koruma uygulanmamış çelik elemanlar için kesit faktörünün hesaplanması. **33**
Şekil 3.15 : Yangına karşı koruma uygulanmış çelik elemanlar için kesit faktörünün hesaplanması. **34**

Şekil 4.1 : Betonla doldurulmuş çelik enkesit türleri. **39**
Şekil 4.2 : Donatılı beton ile doldurulmuş dairesel enkesitli çelik kolon **40**
Şekil 4.3 : Çelik kutu enkesitli elemanın betonla yalıtımının çeliğin sıcaklığına etkisi. **40**
Şekil 4.4 : Çelik elemanlar içerisindeki donatı yerleşimi. **41**
Şekil 4.5 : Guangzhou IFC Binası'nın beton dolgulu boru enkesitli kolonları. **42**
Şekil 4.6 : QRC West Binası'nın büyük boyutlu dairesel çelik kolonlarının betonla doldurulması. **43**
Şekil 4.7 : Çelik kutu kolonların tabandan basınç yoluyla doldurulması yöntemi. **43**
Şekil 4.8 : SEG Plaza Binası'nın çelik kolonlarının yapım aşaması. **44**
Şekil 4.9 : SEG Plaza Binası 'nın çelik kolon-kiriş birleşim detayı. **44**
Şekil 4.10 : Moorgate Exchange Office Binası'nın çelik kolon birleşim detayı **45**
Şekil 4.11 : Moorgate Exchange Office Binası'nın çelik kolon taban detayı..... **45**
Şekil 4.12 : Çelik taşıyıcı kolonlara püskürtme sıvanın uygulanması. **46**
Şekil 4.13 : Farklı türdeki yalıtım malzemelerinde sıva kalınlıklarının sıcaklık değişimleri. **47**
Şekil 4.14 : Püskürtme sıva yönteminin çelik profillere uygulama şekilleri. **48**
Şekil 4.15 : Püskürtme sıva uygulaması sonrası yalıtım kalınlıklarının kontrol edilmesi. **48**
Şekil 4.16 : EMP Müzesi (Frank Gehry, Seattle, Washington). **49**
Şekil 4.17 : Püskürtme işlemi sonrası çelik elemanların son görünümü **49**
Şekil 4.18 : Ağırlıkça hafif yalıtımlar önboyutlama abağı. **50**
Şekil 4.19 : Fransa (solda) ve Almanya'da (sağda) tipik bir yangın yalıtım malzemesinin termal özelliklerini belirleme abakları. **51**
Şekil 4.20 : İntümesan boyanın yangın esnasındaki ve sonrasındaki görünümü..... **52**
Şekil 4.21 : İntümesan (genleşen) boya ile korumanın yangın dayanımına etkisi. .. **52**
Şekil 4.22 : Bloomberg Building (Foster+Partners, Londra, 2017) **53**
Şekil 4.23 : İntümesan boyanın ısı etkisinde genleşerek oluşturduğu yüzey **53**
Şekil 4.24 : Epoksi esaslı intümesan boyanın taşıyıcı sistemde kullanımı, Leadenhall Binası, Londra. **54**
Şekil 4.25 : Çelik yapı eleman üzerine uygulanan boya katmanları **54**
Şekil 4.26 : İntümesan boyanın ısı etkisiyle gösterdiği kimyasal tepkime aşamaları. **55**
Şekil 4.27 : İntümasan boya uygulaması için gerekli ekipmanları. **56**
Şekil 4.28 : Katlar arası boya kalınlığının kontrol edilmesi. **56**
Şekil 4.29 : İntümesan boya uygulamasının saha dışında yapılması. **57**
Şekil 4.30 : ESSO Palace Binası (Julio Lafuente, Roma, 1978**)**. **58**
Şekil 4.31 : İstinye Park AVM Binası'nın ofis bölümüne ait intümesan boya uygulaması. **58**
Şekil 4.32 : İstinye Park AVM Binası'nın alışveriş katlarına ait intümesan boya uygulaması. **59**
Şekil 4.33 : Yangın esnasında su dolu kolondaki ısı dağılımının gösterimi. **59**
Şekil 4.34 : Su dolaşımlı koruma uygulamasında su ve çelik elemanların sıcaklık oranları. **60**
Şekil 4.35 : USS Corporation Head Office binasının dış cephesinde yer alan kolonların görünüşü. **61**
Şekil 4.36 : Su dolaşımı sisteminin düşey taşıyıcı bileşenlerdeki çalışma prensibi. **62**
Şekil 4.37 : Doğal su dolaşımı ile yangına karşı korunan NorConhaus ofis binası (SE-Architekten, Hannover). **63**

Şekil 4.38 : Yangın esnasında mekandaki döşeme ve tavan arasındaki sıcaklık farkı. **65**
Şekil 4.39 : Çelik taşıyıcılı sistemlerde kullanılan tipik bir kompozit döşeme sistemi. **66**
Şekil 4.40 : Kompozit döşeme sistemlerinde kullanılan çelik tabliye türleri. **66**
Şekil 4.41 : Çalışma için oluşturulan kompozit döşeme düzeneği. **69**
Şekil 4.42 : Sökülebilir birleşim detayları. **70**
Şekil 4.43 : Tahrip etkisiyle sökülebilir birleşim detayları..... **70**
Şekil 4.44 : Kolon kiriş birleşim bölgesinde meydana gelen yerel burkulma. **71**
Şekil 4.45 : Birleşim elemanında meydana gelen bir kopma örneği, World Trade Center. **71**
Şekil 4.46 : Birleşim bölgelerinde meydana gelen hasar örnekleri. **72**
Şekil 4.47 : İçi betonla doldurulmuş çelik enkesitlerin kolon-kolon birleşim bölgesi detaylarI. **72**
Şekil 4.48 : İçi betonla doldurulmuş çelik enkesitlerin kolon-kiriş birleşim bölgesi detayları. **73**
Şekil 4.49 : İçi betonla doldurulmuş çelik kolonun tabanında açılan havalandırma deliğinin gösterimi. **73**
Şekil 5.1 : Bina zemin kat kalıp planı ve kesiti. **74**
Şekil 5.2 : Burkulma boyu – burkulma yükü diyagramı. **78**
Şekil 5.3 : Su dolaşım sistemindeki su ve buhar kütle akış debilerinin şematik gösterimi **88**
Şekil 5.4 : Yapının kompozit döşemeleri için gerekli minimum kalınlık değerinin gösterimi. **96**
Şekil 5.5 : Kolonlara uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi. **100**
Şekil 5.6 : Kirişlere uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi. **100**
Şekil 5.7 : Kompozit döşemelere uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi.. ..... **101**

MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA PASİF YANGIN KORUMA YÖNTEMLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Sanayi devrimi ile birlikte gerçekleşen teknolojik gelişmeler ve hızlı üretim imkanları sayesinde çelik malzeme, mimari yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek çekme ve basınç mukavemetine sahip olması, yapım süresinin kısa olması, geri dönüştürülebilirlik özelliği, tasarımda esneklik ve şeffaflık gibi avantajlarından ötürü ise günümüzde inşa edilen yapıların taşıyıcı sistemleri için vazgeçilmez bir malzeme haline gelmiştir.

Çelik, birçok yönden avantajlı bir malzeme olmasına karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yapısal çelik elemanlar, yanıcı özelliğe sahip olmamasına rağmen yüksek sıcaklıklar altında elemanlarda ısıl şekil değişimleri oluşmakta ve yapının yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Bu olumsuz özelliği, çeliğin mimari olarak görünür şekilde kullanıldığı yapılarda çok daha büyük bir sorun meydana getirmektedir. Bu yüzden, yapı içerisinde bulunan kullanıcıların ortamdan tahliye edilmesi ve yangının kontrol altına alınabilmesi için süre kazanmak amacıyla mimari olarak görünür çelik taşıyıcı elemanların yangın güvenliğinin sağlanması büyük önem teşkil etmektedir.

Tez çalışması yedi bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan giriş bölümünde tez çalışmasının amacı, kapsamı ve çalışma sürecinde izlenen yöntem hakkında bilgi verilmiştir.

İkinci bölümde, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlar ele alınmıştır. Mimari olarak görünür yapısal çelik elemanların yapılarda kullanımının farklı yüzyıllar ve mimarlık akımlarının etkisi altında gerçekleşen tarihsel gelişimine değinilmiştir. Bu türdeki çelik elemanların belirli kriterlere göre sınıflandırılması hakkında bilgi verilmiştir. Buna paralel olarak, çelik taşıyıcı elemanların mimaride kullanımının avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir. Bu elemanların en büyük dezavantajlarından biri olan yangın dayanımı özellikleri, tez kapsamında ele alınarak tezin ilerleyen bölümlerinde detaylı olarak irdelenmiştir.

Üçüncü bölümde, yangın ile ilişkili genel kavramlar ve çelik taşıyıcı elemanların yangına karşı dayanımı ile ilgili tanımlar ele alınmıştır. Yangına karşı korumasız çelik elemanların yangın esnasındaki davranışlarının anlaşır hale getirilmesi amacıyla malzemenin yüksek sıcaklıklar altında gösterdiği kimyasal, ısıl ve mekanik davranışları irdelenmiştir.

Dördüncü bölümde, yangına karşı korumada mimari olarak görünür çelik taşıyıcı elemanlar için uygulanan pasif koruma yöntemleri irdelenmiştir. Yapısal çelik

elemanlar için tarihsel süreç boyunca kullanılan bu yöntemlerden yalnızca çeliğin yapıda görünür olarak algılanabilmesine elverişli olan yöntemler detaylı olarak ele alınmıştır. Bu yöntemlerin yangına karşı korumada gösterdikleri temel işleyiş mekanizmaları, uygulama yöntemleri ve kullanım alanları hakkındaki bilgilere detaylı olarak yer verilmiştir.
Beşinci bölümde, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlarda yangına karşı korumada kullanılan pasif koruma yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için birtakım performans kriterleri belirlenmiştir. Koruma yöntemlerinin toplam uygulama maliyetleri açısından kıyaslanabilmesi için, üç katlı çelik taşıyıcılı bir yapı örneği üzerinden analiz ve hesaplamalar yapılmıştır. Altıncı bölümde ise, yapılan analizler sonucunda elde edilen bulgulardan yola çıkılarak pasif koruma yöntemleri hakkında değerlendirmeler yapılmıştır.

Tezin yedinci ve bölümünde, çalışma kapsamında yapılan analiz ve karşılaştırmalara ilişkin değerlendirmeler ele alınarak sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapısal Çelik, Yangın, Pasif Yangın Koruma Yöntemleri

COMPARISON OF PASSIVE FIRE PROTECTION METHODS FOR ARCHITECTURALLY EXPOSED STEEL STRUCTURES

SUMMARY

With the help of the technological developments and rapid production opportunities that took place with the industrial revolution, steel material has started to be used in architectural structures. By reason of its advantages such as high tensile and compressive strength, short construction period, recyclability, flexibility and transparency in design, steel has become an indispensable material for the load-bearing systems of the buildings constructed today.

Even though steel is an advantageous material in many ways, it also has some disadvantages. Despite the fact that structural steel does not have flammable properties, thermal deformations occur in the elements under high temperatures and a rapid decrease is observed in the load bearing capacity of the structure. This negative characteristic bring about a much bigger problem in buildings where steel used as architecturally exposed. Therefore, it is of great importance to ensure the fire safety of architecturally exposed steel structures in order to gain time to evacuate the users inside the building and to control the fire.

The thesis consists of seven parts. In the first part, which is the introduction, information is given about the purpose, scope of the thesis and the method followed in the study process.

In the second part, architecturally exposed steel structures are reviewed. The historical development of the use of architecturally exposed steel structures in buildings under the influence of different centuries and architectural movements has been mentioned. Information was given about the classification of this type of steel elements according to certain criteria. In parallel with this, the advantages and disadvantages of the use of structural steel elements in architecture are given. Fire resistance properties, which is one of the biggest disadvantages of these elements, are discussed within the scope of the thesis and discussed in detail in the following sections of the thesis.

In the third part, general concepts related to fire and the fire resistance of structural steel are discussed. In order to understand the behavior of unprotected steel elements during fire, the chemical, thermal and mechanical behavior of the material under high temperatures has been examined.

In the fourth chapter, passive protection methods applied for architecturally exposed steel structures in fire protection are discussed. Therefore, among these methods used throughout the historical process for structural steel elements, only the methods that are suitable for architecturally exposed steel structures are discussed in detail.

Information on the basic working mechanisms, application methods and usage areas of these methods in protection against fire are given in detail.

In the fifth part, some performance criteria have been determined in order to compare the passive protection methods used for fire protection in architecturally visible structural steel elements. In order to compare the protection methods in terms of total application costs, analysis and calculations were made on a three-storey steel carrier structure example. In the sixth chapter, evaluations were made about passive protection methods based on the findings obtained as a result of the analyzes made.

In the seventh and last part of the thesis, the evaluations regarding the analysis and comparisons made within the scope of the study are discussed and the results and suggestions are given.

Keywords: Structural Steel, Fire, Passive Fire Protection Systems.

1. GİRİŞ

Çelik, malzeme olarak birçok yönden avantaja sahip olmasına rağmen bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Yanmaz özellikli olmasına rağmen yüksek sıcaklıklar altında ısıl şekil değişimleri ve yapının taşıyıcı sisteminin yük taşıma kapasitesinde hızlı oranda bir düşüş gözlenmektedir. Bu olumsuz özelliği, çeliğin mimari olarak görünür olarak kullanıldığı yapılarda çok daha büyük bir sorunu meydana getirmektedir. Bu yüzden, yapı içerisinde bulunan kullanıcıların yapıdan tahliye edilmesi ve yangının kontrol altına alınabilmesi için süre kazanmak amacıyla görünür çelik taşıyıcı elemanların yangın güvenliğinin sağlanması büyük önem teşkil etmektedir.

1.1 Tez Çalışmasının Amacı

Tezin amacı, mimari olarak görünür yapısal çelik taşıyıcı elemanlarda yangına karşı korumada uygulanabilen pasif koruma sistemlerini karşılaştırmak ve yapıların kullanım amacına göre belirlenmiş tasarım kriterleri açısından bu elemanlar için en uygun sistemi belirlemektir.

1.2 Tez Çalışmasının Kapsamı

Tez kapsamında, yapılarda görünür olarak kullanılan çelik taşıyıcı elemanlar ve bu elemanların yangına karşı dayanımını belirli bir zaman dilimi boyunca sürdürmesini sağlayan pasif koruma yöntemleri ele alınmıştır. Çalışma yalnızca mimari olarak görünür çelik taşıyıcı elemanları kapsadığı için, çelik yapılarda yangına karşı korumada uygulanmakta olan mevcut pasif koruma yöntemleri arasından yalnızca bu tür elemanlara uygulanabilir olan yöntemler seçilmiştir.

1.3 Tezin Yöntemi

Yangına karşı pasif koruma yöntemlerinin karşılaştırılabilmesi için çalışmada öncelikli olarak mimari olarak görünür çelik taşıyıcılı elemanlarda uygulanabilir yöntemler tüm yönleriyle ele alınıp incelenmiştir. Bu incelemeler sonrasında, mevcut

yöntemlerin karşılaştırılması için uygulamalara yönelik birtakım tasarım kriterleri belirlenmiş ve karşılaştırmalar belirlenen bu kriterler üzerinden değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmelerin yapılması için taşıyıcı bileşenlerinin tümü görünür yapısal çelik elemanlardan oluşan bir bina örneği ele alınmıştır. Belirlenen performans kriterleri üzerinden, bu bileşenlere sırasıyla pasif koruma yöntemleri uygulanarak analiz ve hesaplamalar yapılmıştır. Buradan yola çıkarak, pasif koruma yöntemleri karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlar yardımıyla, tasarımcılar mimari olarak görünür çelik yapıların yangına karşı korunumu için uygulanacak uygun pasif koruma yöntemlerinin belirlenmesi için tasarımcılara bir kılavuz oluşturulması hedeflenmiştir.

2. MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK

Mimari açıdan görünür yapısal çelik elemanlar, tanım olarak mimari yapılarda taşıyıcı sistemi oluşturan çelik elemanların istenilerek açıkta bırakılmasıdır. Bu elemanlar mimari yapılarda mekan kurgusunun bir parçasını oluşturmaktadır. Bu yüzden, bu elemanlar için tasarım ve yapım sürecinde standart yapısal çeliğe göre daha fazla titizlik ve özen gerektiren uygulanmaların gerçekleştirilmesi gerektirmektedir (Boake, 2015).

2.1 Tarihsel Gelişim

Yapısal çelik elemanların tarihsel süreç boyunca binalarda görünür olarak kullanımı, farklı mimarlık akımları ile teknolojik, kültürel ve çevresel etmenlerin dönüşüme uğraması ile gelişim göstermiştir. Görünür yapısal çelik kullanımı beş ayrı döneme ayrılarak incelenebilir:

- 18. ve 19. Yüzyıl: çeliğin mimaride kullanılmaya başlanması
- 20. Yüzyılın ilk yarısı : Uluslararası stil
- 1970'ler: Yüksek Teknoloji (High Tech) mimari akımı
- 21. Yüzyıl: teknolojik gelişmeler ve küreselleşme

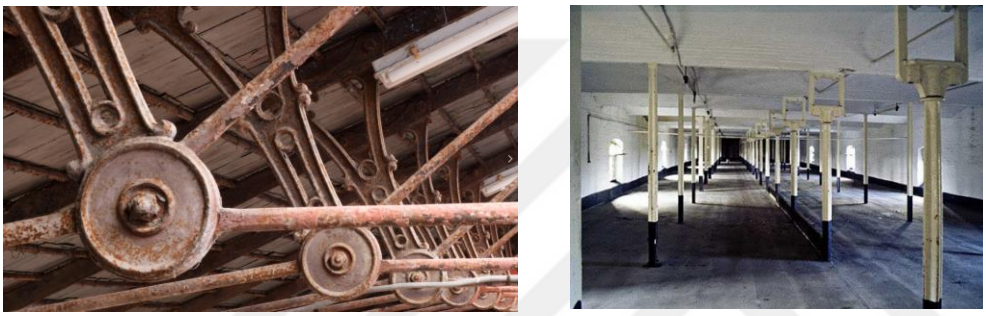
2.1.1 18. ve 19. Yüzyıl: çeliğin mimaride kullanılmaya başlanması

Demir ve çelik, insanlık tarihinde çok uzun dönemlerden bu yana bilinen malzemeler olmasına rağmen, bundan iki yüzyıl öncesindeki dönemlere kadar yalnızca el yapımı eşya ve silah gibi ürünlerin üretiminde kullanılmıştır. 18. yüzyılda font (dökme) demir üretimi ile demirin yapı malzemesi olarak kullanım olanağı ortaya çıkmıştır ve ilk olarak mühendislik yapılarında kullanılmıştır. İngiltere'de 1778 yılında inşa edilen Coalbrookdale Köprüsü bunun ilk örneğidir (Şekil 2.1) (Buzkan, 2016).



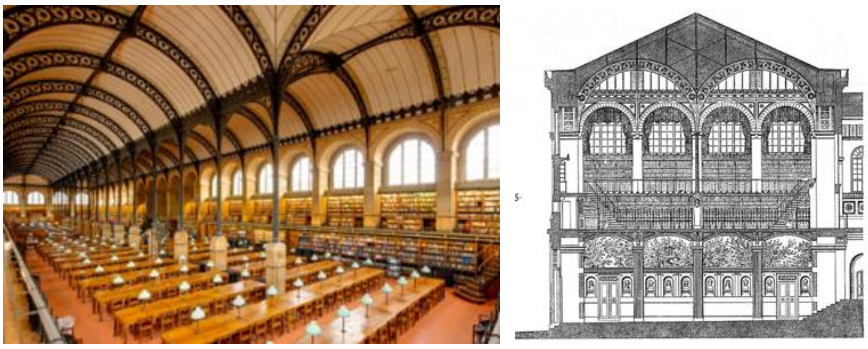
Şekil 2.1 : Coalbrookdale Köprüsü, İngiltere, 1778 (Url-1).

Çeliğin malzeme olarak taşıyıcı sistemde kullanıldığı ilk yapı ise İngiltere'de 1797 yılında yapımı tamamlanan Ditherington Flax Değirmeni' dir (Şekil 2.2) (Karaduman, 2010).



Şekil 2.2 : Ditherington Flax Değirmeni (Shrewsbury, İngiltere, 1797) (Url-2).

Paris'te bulunan Bibliotheque Ste. Genevieve Binası, Henri Labrouste tarafından 1843'te tasarlanmış ve 1845-1851 yılları arasında inşa edilmiştir. Bu bina, açıkta bırakılan dökme demir taşıyıcı eleman detaylarıyla 'Yapısal Rasyonalizm' akımının önemli örnekleri arasında yer almaktadır. Yapının okuma odasının bulunduğu bölümde yer alan çatının taşıyıcı sistemi, mekanı ikiye bölen dökme demirden yapılmış iyonik kolonlardan ve dökme demir kemerlerden oluşmaktadır (Şekil 2.3 ve Şekil 2.4) (Trachtenberg ve Hyman, 2003).

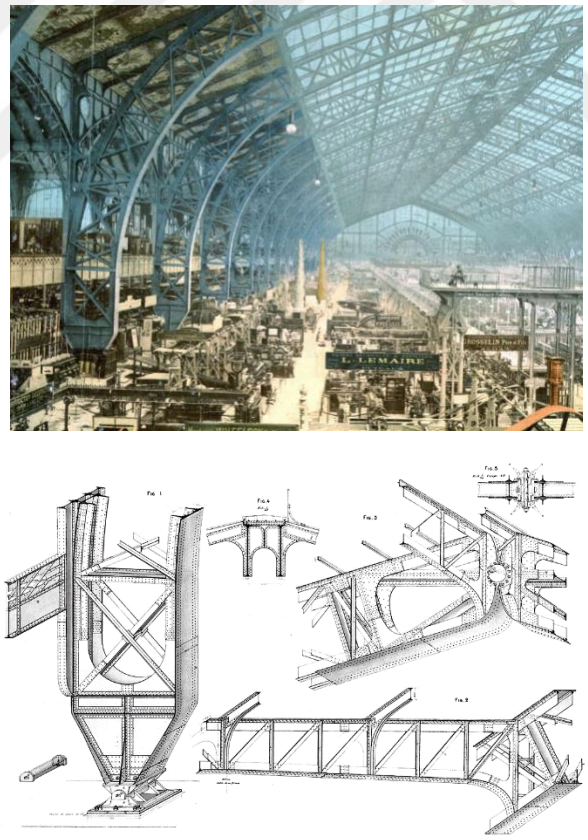


Şekil 2.3 : Bibliotheque Ste. Genevieve Binası'nın okuma odasında bulunan dökme demir kirişler (Url-3 ve Url-4).



Şekil 2.4 : Dökme demir çelik kiriş detayları, Bibliotheque Ste. Genevieve Binası (Url-5 ve Url-6).

1889 yılında mimar Ferdinand Dutert ve mühendis Victor Contamin tarafından Paris Uluslararası Sergisi için tasarlanan Galerie des Machines binası ise, döneminde bazı yapısal yeniliklere öncülük etmiştir. Binadaki geniş açıklıkların geçilebilmesi için köprü yapımında kullanılan büyük boyutlu ve üç mafsallı çelik kemerler ilk kez burada kullanılmıştır (Şekil 2.5) (Url-7).



Şekil 2.5 : Galérie des Machines (Ferdinand Dutert, Paris, 1889) (Url-7).

2.1.2 20. Yüzyılın ilk yarısı : Uluslararası Stil

20. yüzyılın ilk yarılarına gelindiğinde ise, bu dönemde ortaya çıkan 'Uluslararası Stil' akımının dışa vurumculuk etkisi ile taşıyıcı elemanlar birçok yapıda görünür olarak kullanılmaya başlanmıştır. Bu döneme ait en önemli yapılardan birisi olan Farnsworth Evi, 1951 yılında Ludwig Mies van der Rohe tarafından tasarlanmıştır (Şekil 2.6 ve Şekil 2.7).



(a) (b)

Şekil 2.6 : Farnsworth Evi (Ludwig Mies van der Rohe, Illinois, 1951) (Url – 8 (a) ve Url – 9 (b)).

Tek doğrultuda düzenlenmiş çerçeve sistemine sahip olan bu yapıda I, C ve L enkesitli haddelenmiş çelik profiller kullanılmıştır (Url-10).



(a) (b)

Şekil 2.7 : Farnsworth Evi'nin çelik çerçeveli taşıyıcı sistemi ve detay gösterimi (Url-11 ve Url-12).

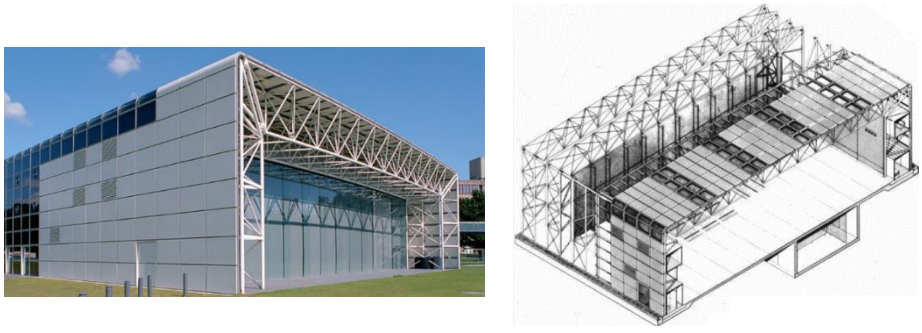
Rohe, taşıyıcı sistemde yer alan detayları cephelerin veya duvarların arkasına gizlemek yerine, çeliğin tektonik yapısını kullanarak yapının nasıl ayakta durduğunu ve hangi malzemelerden oluştuğunu göstermeye çalışmıştır. Zemin ve tavanda, kesintisiz bir yüzey görünümü sağlamak için yapının köşelerini C enkesitli kirişlerle çevreleyecek bir düzende tasarlamıştır. Taşıyıcı sistemin görünmeyen kısımları için bulonlu

birleşim, görünür kısımları için ise kaynaklı birleşim yöntemleri kullanılmıştır (Url-13).

2.1.3 1970'li Yıllar: Yüksek Teknoloji (High Tech) mimari akımı

Mimarlıkta tasarım ve uygulama alanında meydana gelen gelişmeler, yeni yapım yöntemleri ile üretim tekniklerininin oluşmasına öncülük etmiştir. Yüksek Teknoloji (High Tech) olarak adlandırılan bu mimarlık akımı, 1970'li yıllarda İngiltere'de ortaya çıkmış ve gelişme göstermiştir. Norman Foster, Richard Rogers, Nicholas Grimshaw, Michael Hopkins ve Ian Ritchie gibi İngiliz mimarlar bu akımın öncüleri olarak kabul edilmektedir (Boake, 2015).

Bu mimari anlayışta, Sanayi Devrimi sonrasında yapılarda kullanımına ağırlık verilen cam ve çelik gibi endüstriyel malzemeler ile makine estetiği kavramı ortaya çıkmıştır. Diğer bir deyişle, taşıyıcı sistem değişen ve teknoloji karşısında sürekli olarak kendini yenileyebilme ve günümüz koşullarına hızla adapte olabilme özelliğine sahip olmaya başlamıştır. Boş gövdeli/boru enkesitli çelik elemanların mimari yapılarda kullanılmaya başlanması ise, çelik elemanların görünür olarak kullanıldığı yapı tasarımında önemli bir etki yaratmıştır (Boake, 2015).
1977 yılında Foster + Partners tarafından tasarlanan Sainsbury Center Binası, taşıyıcı sisteminde görünür olarak kullanılan boru enkesitli çelik elemanlarıyla Yüksek Teknoloji mimari akımının önemli yapıları arasına yerleşmiştir (Şekil 2.8) (Boake, 2015).

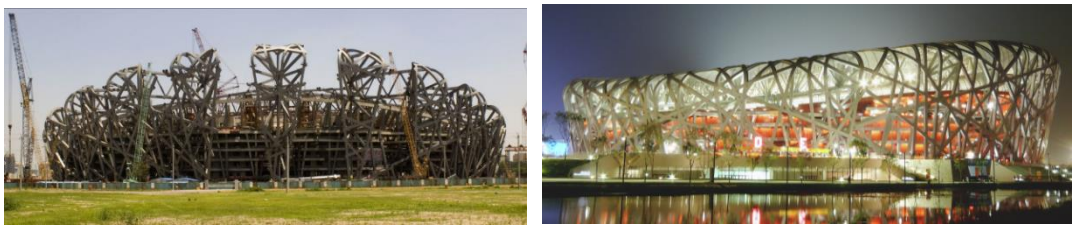


Şekil 2.8 : Sainsbury Görsel Sanatlar Merkezi, (Foster + Partners, Norwich, Birleşik Krallık, 1977) (Url-14).

2.1.4 21. Yüzyıl: teknolojik gelişmeler ve küreselleşme

2000li yıllarda, bilgisayar destekli tasarım araçları ve yapısal analiz programlarındaki gelişmeler ve büyük boyutlu kesitlerin üretim imkanlarının oluşması sayesinde,

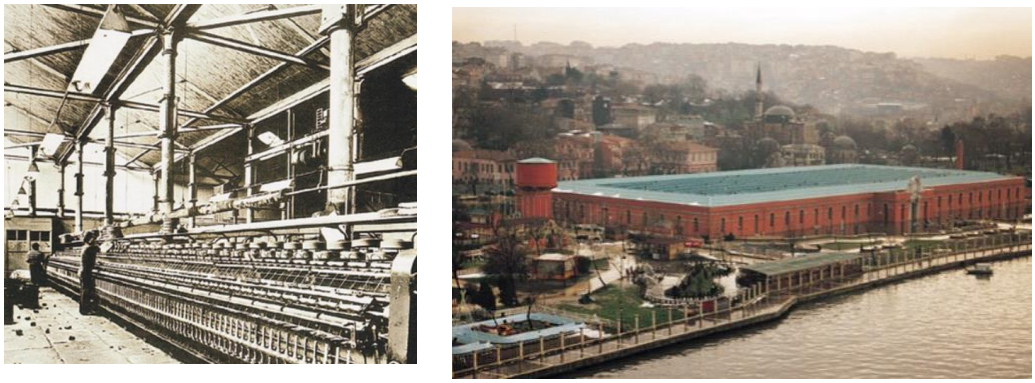
karmaşık ve kompleks geometrilere sahip çelik taşıyıcılı yapılar tasarlanmaya başlanmıştır (Şekil 2.9) (Boake, 2015).



Şekil 2.9 : Pekin Olimpiyat Stadı (Herzog & de Meuron + ARUP, Çin, 2008) (Url-15 ve Url-16).

2.2 Ülkemizde Çelik Taşıyıcı Sistemlerin Görünür Olarak Kullanıldığı Yapılar

Ülkemizde çelik malzemenin taşıyıcı elemanlarda görünür olarak kullanımı cumhuriyet öncesi dönemlere dayanmaktadır. Türk mimarlık tarihi açısından ayrı bir yere sahip olan Eyüp Sultan Feshane Binası çelik taşıyıcılı yapı türünde inşa edilen ilk örneklerden biridir (Şekil 2.10). 1835 yılında ülke çapında çuha ve fes temininin sağlanması amacıyla kurulan bu fabrika, yangın nedeniyle büyük bir hasar görmüş ve 1868 yılında tekrar inşa edilmiştir. Yapının tüm yatay ve düşey taşıyıcı bileşenlerinin çelik prefabrik elemanlardan oluşması, ülkemizde ilk kez bu yapıda görülmüştür. Yapıda yer alan prefabrike çelik döküm kolonlar Belçika'da üretilerek ülkemize getirilmiştir (Öztürk, 2008: sf.43).



Şekil 2.10 : Eyüp Feshane Binası (İstanbul, 1868) (Url-17).

Cumhuriyet öncesi dönemde ülkemizde inşa edilmiş mimari açıdan görünür çelik yapılardan bir diğeri ise Basmane Garı'dır (Şekil 2.11). 1863 yılında ünlü mimar Gustave Eiffel tarafından tasarımı yapılan bu yapının kolonları ve çatı taşıyıcı sistemi çelikten oluşmaktadır (Öztürk, 2008; sf.47).



Şekil 2.11 : Tarihi Basmane Garı (Gustave Eiffel, İzmir, 1863) (Url-18).

Günümüzde ise mimari olarak görünür çelik taşıyıcı elemanlar, ülkemizde büyük ve küçük ölçekte birçok yapı türünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Çelik taşıyıcılı sistemler, 2000 yılı öncesine kadar daha çok az katlı yapılarda kullanılırken, büyük ölçekli karma projelerde ve çok katlı yapılardaki kullanımı giderek artış göstermektedir (Öztürk, 2008).

Şekil 2.12, Şekil 2.13 ve Şekil 2.14'te ülkemizin farklı bölgelerinde 2000 ve sonrasındaki yıllarda yapımı tamamlanan bazı çelik yapı örnekleri gösterilmektedir. Bu yapılarda çelik taşıyıcı elemanlar görünür olarak kullanılmıştır.



Şekil 2.12 : Afrodisyas Ek Müzesi (Cengiz Bektaş, Denizli, 2007) (Url-19).



Şekil 2.13 : Maslak No:1 Ofis Binası'nın çelik taşıyıcılı cephe elemanları (Url-20).



Şekil 2.14 : İzmir Adnan Menderes Havalimanı'nın çelik düşey taşıyıcı elemanları (Url-21).

2.3 Mimari Olarak Görünür Çelik Taşıyıcı Elemanların Sınıflandırılması

Mimaride çeliğin görünür olarak kullanımı başlarda sadece yüksek prestijli ve maliyetli projelerde karşılaşılırken, çelik malzemenin inşaat sektöründe bilinirliğinin artmasıyla birlikte küçük ve orta ölçekli projelerde de kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır. Standart yapısal çelikle kıyaslandığında, mimari görünür çeliğin belirli bir projeye uygun tasarlanması ve detaylandırılması için farklılaştırılmış bir yaklaşım gerekmektedir (Boake, 2015).

Bundan dolayı, mevcut çelik yapı şartnamelerine vs. ek olarak mimar, mühendis ve imalatçılar arasındaki iletişime yardımcı olabilecek yeni bir şartnameye ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyacı karşılamak için 2003 yılında American Institute of Steel Construction (AISC) tarafından bir yönetmelik hazırlanmıştır.Bu yönetmelikte yer sınıflandırma sisteminde, görünür yapısal çelik elemanlar beş ana kategori altında düzenlenmiştir (Boake, 2015):

- AESS 1 (temel elemanlar)
- AESS 2 (yakın görünümde olmayan elemanlar)
- AESS 3 (yakın görünümdeki elemanlar)
- AESS 4 (vitrin elemanlar)
- AESS C (özel elemanlar)

2.3.1 AESS 1 – temel elemanlar

Bu tür elemanlar; arenalar, depolar, büyük mağazalar ve saçak yapılarındaki çatı taşıyıcılarında bulunabilir. Göreceli olarak geniş görüş mesafesi nedeniyle yalnızca % 20 - % 60 aralığında ek maliyet gerektirir.

2.3.2 AESS 2 - yakın görünümde olmayan elemanlar

Yakın görünümde olmayan (6 metrenin üzerindeki mesafeden görülebilir) elemanları kapsamaktadır. Standart yapısal çeliğin % 40 - %100 arasında ek maliyet gerektirir. Bu tür elemanlar genellikle düşük ila orta düzey maliyetteki mimari uygulamalarda yer alır.

2.3.3 AESS 3 - yakın görünümdeki elemanlar

Yakın görünümde olan (6 metre ve altındaki bir mesafeden görülebilir) elemanları kapsamaktadır. Bu elemanlar, yakın görünümde bulunmaları sebebiyle ortamdaki kullanıcılar ile daha fazla etkileşim içerisindedir. Bu nedenle, AESS -1 ve AESS-2 sınfılandırmasında yer alan elemanlara kıyasla daha pürüzsüz ve daha dayanıklı bir yüzeye sahip olmaları gerekmektedir. Bu tür elemanların kullanımı genellikle havalimanlarında, alışveriş merkezlerinde, hastanelerde veya lobilerde tercih edilmektedir. Standart yapısal çeliğe göre % 60 - % 150 ek maliyet gerektirmektedir.

2.3.4 AESS 4 - vitrin elemanları

Vitrin öğeleri veya “baskın” öğeler olarak da tanımlanırlar. Tasarımcının formun bir öğede gösterilmesini istediği durumlarda kullanılmaktadırlar. Tüm kaynaklar taşlanmış ve tüm yüzeyler zımparalanarak pürüzsüzleştirilmiştir. Bu elemanlar, yapılardaki detayların karmaşıklığına bağlı olarak standart yapısal çelikle kıyaslandığında % 100 - % 250 ek maliyet gerektirmektedir.

Buna ek olarak, bu yönetmelikte mimari olarak görünür yapısal çeliği tanımlamak için birtakım faktörler belirlenmiştir (Boake, 2015):

- Mesafe ve görünürlük
- Bağlantı ve birleşim yöntemleri
- Yapısal elemanların boyutu ve şekli
- İmalat ve montajda gerekli toleranslar
- Ayrıntılara erişim imkanı

2.4 Çeliğin Mimari Yapılarda Kullanımının Avantajları

Çeliğin yapısal olarak kullanımının mimariye kazandırdığı avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Tasarımda esneklik ve özgünlük
- Hafiflik
- İnşaat hızı
- Ekonomi
- Kolay denetim
- Renovasyon
- Geri dönüştürülebilirlik
- Çevresel koşullara karşı dayanım

2.5 Çeliğin Mimari Yapılarda Kullanımının Dezavantajları

Yapısal çeliğin mimari yapılarda sunduğu pek çok avantajının yanısıra bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu dezavantajlar şu şekilde sıralanabilir:

- Korozyon etkisi
- Ses ve ısıl iletkenlik
- Yangın dayanımı

2.5.1 Korozyon etkisi

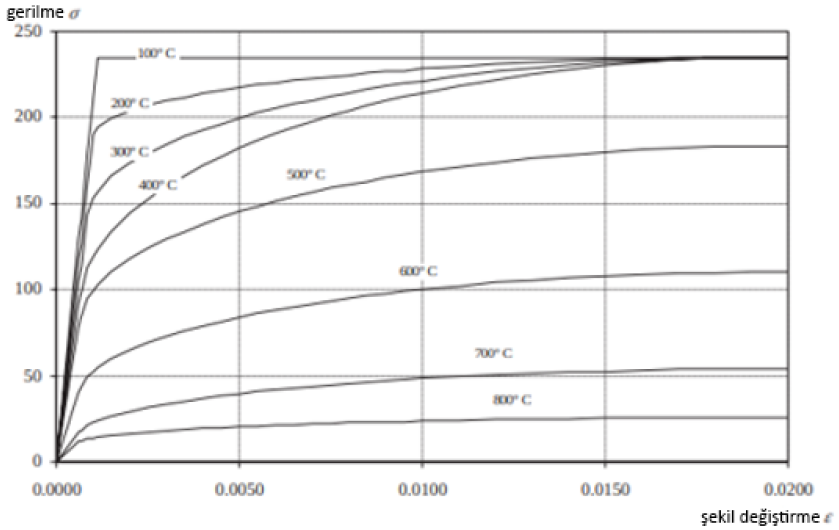
Yapısal çelik, hava nemi %65'in üzerine çıktığında korozyona karşı savunmasız hale gelmektedir. Bu nem seviyesinin üzerinde ise, ortamdaki oksijen ve suyun etkisi ile malzeme oksidasyona uğrayarak korozyon meydana gelmektedir. Oksidasyon etkisiyle oluşan gerilmeler sonucunda meydana gelen malzeme kaybından dolayı, korozyondan etkilenen yapısal çelik bileşenlerin yük taşıma kapasitesinde önemli düzeyde azalmalar meydana gelmektedir (Kaftan, 2006).

2.6.2 Ses ve ısıl iletkenlik

Yapısal çelik malzemenin ısı ve ses iletkenliği yüksek olması, malzemenin kullanıldığı yapılarda birtakım yalıtım sorunlarını meydana getirmektedir. Bu sorunların önlenmesi veya etkisinin azaltılması amacıyla uygun tasarım kararlarının alınması gerekmektedir (Öğüt, 2006).

2.6.3 Yangın dayanımı

Çelik malzeme olarak yanıcı özelliğe sahip olmamasına rağmen, çok yüksek sıcaklıklar altında mukavemetinde ve elastisite modülünde çok hızlı bir azalma gerçekleştiği için tüm taşıyıcılık özelliğini kaybedebilmektedir (Şekil 2.15) (Öztürk, 2008).



Şekil 2.15 : Çelik malzemenin yüksek sıcaklık altındaki gerilme- şekil değiştirme grafiği (Franssen & Real, 2015).

Çelik malzeme, yangın esnasında yüksek sıcaklığa maruz kaldığında termal enerjiyi emer ve belirli bir soğuma süresinden sonra kararlı veya kararsız duruma döner. Bunun sonucunda, çelik elemanlar büyük deformasyon nedeniyle ya tamamen kullanışsız hale gelir ya da güçlendirilerek yeniden kullanılabilir (Url-22).

3. YAPISAL ÇELİK VE YANGIN

Çelik, yanıcı özelliğe sahip bir malzeme olmamasına karşın ısıya karşı oldukça duyarlıdır. Bu yüzden, yapısal çelik elemanlar yangına karşı korunmasız durumda iken yüksek sıcaklıklarda mukavemetini kaybetmekte ve şekil değişiklikleri oluşmaya başlamaktadır. Bu durum, yapısal çelik elemanların yapının yükünü taşıyamayacak hale gelerek tüm taşıyıcılık özelliklerini yitirmesine neden olmaktadır (Şekil 3.1) (Harmanty, 1993).



(a) (b)

Şekil 3.1: Yangın sonrasında yapısal çelik elemanlarda meydana gelen deformasyonlar (Url-23 ve Url-24).

3.1 Yangın Olayına İlişkin Genel Kavramlar

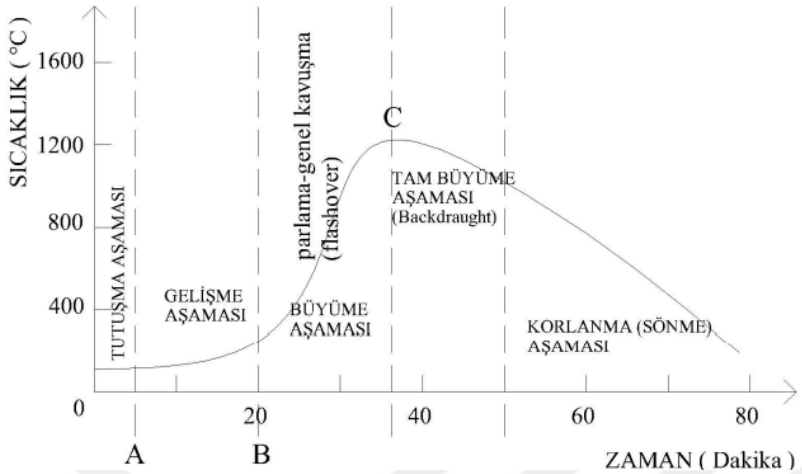
Yangın, ortamdaki maddenin oksijen ve ısı ile birleşmesinden oluşan, zaman ve mekan olarak kontrol edilememiş yanma tepkimelerinin sebep olduğu bir durumdur (TSE, 1989). Yanma olayı ise, yanıcı maddelerin tutuşma sıcaklığına kadar ısıya maruz bırakılması sonucunda oksijen ile meydana getirdiği ekzotermik zincirleme reaksiyonlardır. Bu reaksiyonlar sonucunda ısı enerjisi ortaya çıkmaktadır (Özcan ve diğerleri, 2000).

Yangın etkisi sebebiyle yapılarda fiziksel ve kimyasal bozulmalar sonucunda kalıcı hasarlar meydana gelmektedir (İbibikcan, 2011).

3.1.1 Yangının gelişimi ve büyümesi

Bir yangın olayı beş temel aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırası ile tutuşma,

gelişme, büyüme, tam büyüme ve sönmedir. Yanma sürecindeki sıcaklık ve zaman ilişkisi ise Şekil 3.2'de gösterilmektedir:



Şekil 3.2 : Yanma sürecinde sıcaklık-zaman ilişkisi (Shields & Silcock, 1987).

Bir ortamda yangının yayılmasını etkileyen faktörler aşağıda sıralanmıştır (Shields ve Silcock, 1987);

- Yanıcı maddeler arasındaki mesafe,
- Yanıcı madde miktarı,
- Tutuşma kaynağının konumu ve büyüklüğü,
- Ortamın geometrisi ve hacmidir.

3.1.2 Yangın dayanımı

Yangın dayanımı, yapıda bulunan bir taşıyıcı elemanın bir yangın esnasında aşağıda belirtilen kriterlerin tümünü veya bazılarını, belirli bir süre için yeterli düzeyde yerine getirebilme yeterliliğinin bir ölçüsüdür (Şekil 3.3). Bu özellikler şunlardır (Stollard & Abrahams, 1991):

Stabilite (Durağanlık): Taşıyıcı elemanının stabilitesini ve yük taşıma kapasitesini sürdürebilmesi için gereken boyutsal yeterliliktir.

Bütünlük: Yapı elemanının ısı etkilerine karşı bütünlüğünü bozmadan dayanımını sürdürebilmesi ve yangının geçişini önlemesidir.

Yalıtım: Yangınla etkileşimi olmayan tarafın, yangınla etkileşimi olan ortamda meydana gelen aşırı sıcaklık artışına karşı direnimidir.



Şekil 3.3 : Taşıyıcı sistem için belirlenmiş yangın dayanımı kriterleri (Güler, 2002).

Yapıda yer alan taşıyıcı elemanlardan yangın esnasında ve sonrasında stabilite ve bütünlük kriterlerini sağlamaları beklenmektedir. Ayrıca taşıyıcı elemanlar, binada bulunduğu konum itibariyle yapıyı düşeyde ve yatayda bölümlere ayırıyor ise yalıtkanlık özelliği de göstermelidir. Bu kriterlerin sağlanabilmesi için yapı elemanlarında şu yöntemlerle önlem alınabilmesi mümkün olmaktadır (Stollard & Abrahams, 1991):

Boyut artırımı: Yapı elemanlarının boyutu arttıkça yangın etkisi altında stabilite ve bütünlüğünü koruması doğru orantılı olarak artış göstermektedir.

Yalıtım: Isı etkisine karşı yalıtım katmanı oluşturulması ile aşırı sıcaklık artışı önlenerek yapı elemanları yangına dayanımlı hale getirilebilmektedir.

Dağıtım: Yapı elemanına etkiyen ısının ortamdaki havaya ve diğer maddelere dağıtılmasıdır. Bu önlem sayesinde, yangın esnasında yapı elemanının kritik sıcaklığa ulaşması engellenerek stabilitesini koruması amaçlanmaktadır.

3.1.3 Yangın yükü

Yangın yükü; bir yapı içerisindeki yanıcı özellikteki tüm maddelerin kütleleri ile ısıl değerlerinin çarpımlarının toplam değerinin yapının toplam zemin alanına bölünmesi ile elde edilen bir büyüklüktür ve birimi MJ/m^2 (kcal/m^2) dir. Yangın yükü, yangına karşı korumada kullanılan yöntemler için gereken hesaplamalarda oldukça önemli bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır (Arda & Yardımcı, 1995).
Yangın sonucunda açığa çıkan toplam ısı miktarı, yanıcı maddenin yangın yükü ile doğru orantılıdır. Çizelge 3.1’ de aynı ortamda altı farklı yangın yüküne bağlı olarak ortaya çıkan sıcaklık değerleri yaklaşık olarak gösterilmektedir (Doğan Özberk, 2010):

Çizelge 3.1: Yangın yükünün ortam sıcaklığına etkisi (Becan, 1994).

Yangın yükü (MJ/m^2)	Mekandaki azami sıcaklık (°C)
250	420
335	550
420	730
500	920
670	985
1000	1130

Buna ek olarak yangın yükü değeri; binalarda kullanılan yapım teknikleri, yapım aşamasında kullanılan yapı malzemeleri ve bina kullanım türüne bağlı olarak farklılıklar göstermektedir (Çizelge 3.2) (Ballı, 2010: sf. 40-41).

Çizelge 3.2 : Yangın yükünün bina kullanım türlerine göre belirlenen değerleri (Arda & Yardımcı, 1995).

Bina türleri	Yangın yükü (kg/m^2)
İdari binalar	50-90
Meskenler	15-35
Okullar	15-50
Endüstriyel yapılar	120
Konaklama yapıları	20-50

Yangın yükü artış gösterdikçe yapıların yangın oluşturma tehlikesi ve yangının yayılım hızı da doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Binalardaki yangın yükü değeri, binanın kullanım amacına göre dört sınıfa ayrılarak incelenebilir (Ballı, 2010: sf. 40-41):

- Çok yüksek düzeyde yangın yükü: kimyasal madde depoları ve büyük ölçekli endüstriyel binalar
- Yüksek düzeyde yangın yükü: büyük ölçekli mağazalar, çarşılar ve alışveriş merkezleri, spor salonları, çok amaçlı salonlar, küçük endüstri yapıları, depolar ve atölyeler
- Orta düzeyde yangın yükü: eğitim yapıları, konaklama yapıları, apartmanlar, hastaneler, oteller, idari binalar, cezaevleri, ticari yapılar ve iş merkezleri
- Düşük düzeyde yangın yükü: müstakil konutlar ve otoparklar

3.1.4 Yapı malzemelerinin yanıcılık sınıfları

Yapı malzemeleri, yanmaya karşı gösterdiği dayanım süresine sınıflara ayrılmaktadır. BYKHY'e göre yapı elemanlarının yangına dayanım (direnç) sembolleri Çizelge 3.3, yapı elemanlarının yangına dayanım (direnç) süreleri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3 : Yapı elemanlarının yangına dayanım sembolleri (BYKHY, 2022).

Ek-3/A Yapı Elemanlarının Yangına Dayanım (Direnç) Sembolleri	
R	Yük taşıma kapasitesi
E	Bütünlük
I	Yalıtım
W	Işınım yayma
M	Mekanik dayanım
C	Kendiliğinden kapanma
S	Duman sızıntısı
P veya PH	Gücün sürekliliği veya sinyal verilmesi (alarm)
G	Isli yangın direnci
K	Yangına karşı koruma yeteneği
D	Sabit sıcaklık altında dayanıklılık süresi
DH	Standart zaman-sıcaklık eğrisi altında dayanıklılık süresi
F	Güçlendirilmiş duman ve ısı havalandırıcılarının işlerliği
B	Doğal, duman ve ısı havalandırıcılarının işlerliği

Çizelge 3.4 : Yapı elemanlarının yangına dayanım süreleri (BYKHY, 2022: sf. 91).

Ek - 3/B - Yapı Elemanlarının Yangına Dayanım (Direnç) Süreleri			
	Yapı Elemanı	**Yangın Dayanım Süresi (dk)**	**Etkilenen Yüzey**
1	**Taşıyıcı Sistem (Çerçeve, kiriş veya kolon)**	R Bkz. EK-3c	Etkilenen yüzeyler
2	**Yük Taşıyıcı Duvar (Aşağıdaki maddelerde de açıklanmayan duvar)**	R Bkz. EK-3c	Ayrı ayrı her bir yüzey
3	**Döşemeler**		
	b) Bir dükkân ve üstündeki kat arasında	REI 60 veya Bkz. EK-3c (hangisi daha büyükse)	Alt yüzeyden

Çizelge 3.4 (devam) : Yapı elemanlarının yangına dayanım süreleri (BYKHY, 2022: sf. 91).

	Yapı Elemanı	Yangın Dayanım Süresi (dk)	Etkilenen Yüzey
	c) Kompartıman döşemeleri dahil her türlü diğer döşemeler	REI Bkz. EK-3c	Alt yüzeyden
	d) Bodrum kat ile zemin kat arası döşeme	REI 90 veya Bkz. EK-3c (hangisi daha büyükse)	
4	**Çatılar**		
	a) Kaçış yolu teşkil eden her bölüm	REI 30	
	b) Döşeme görevi yapan her türlü çatı	REI Bkz. EK-3c	Alt yüzeyden
	c) Dıştan yangına maruz kalan çatılar (Yük taşıyıcı değil)	EI Bkz. EK-3c	Dış yüzeyden
5	**Dış Duvarlar**		
	a) Parsel sınırın herhangi bir noktasına 2 m.'den daha yakın her bölüm	REI Bkz. EK-3c	Ayrı ayrı her bir yüzey
	b) Parsel sınırdan 2 m. veya daha uzak olan her bölüm	REI Bkz. EK-3c	Binanın iç yüzeyden
6	**Yangın Kompartıman Duvarları (Bina içindeki farklı kullanım işlevlerini birbirinden ayıranlar)**	REI 60 veya Bkz. EK-3c (hangisi daha büyükse)	Ayrı ayrı her bir yüzey
7	**Yangın Kompartıman Duvarları (6 numarada belirtilenler dışındakiler**	REI Bkz. EK-3c	Ayrı ayrı her bir yüzey
8	**Korunumlu Şaftlar (Korunumlu yangın merdiveni yuvaları ve acil durum asansör kuyuları hariç)**	REI 120	Ayrı ayrı her bir yüzey
9	**Korunumlu Yangın Merdiveni Yuvaları, Acil Durum Asansörü Kuyuları ve Yangın Güvenlik Holü**		
	a) Binanın geri kalanından ayıran duvar	REI 120	Binaya bakan yüzey
	b) Yangın merdiveni yuvası, acil durum asansör kuyusu ve yangın güvenlik holünü birbirinden ayıran duvar	REI 60	Ayrı ayrı her bir yüzey
10	**Yangın Kesici**	EI 30	Ayrı ayrı her bir yüzey
11	**Asma Tavan**	EI 30	Alt taraftan

Çizelge 3.5'te ise, bina kullanım sınıflarına göre yangın dayanım süreleri yer almaktadır.

Çizelge 3.5 : Bina kullanım türlerine göre belirlenen yangın dayanım süreleri (BYKHY, 2022; sf. 92).

Ek - 3/C Bina Kullanım Sınıflarına Göre Yangına Dayanım (Direnç) Süreleri

Bina kullanım sınıfları		**Yapı Elemanlarının Yangına Dayanım Süreleri (dk)**					
		Bodrum kat(ların) derinliği*(m)			**Bina Yüksekliği(m)**		
		10m'den fazla	10m'den az	5m'den az	21,5m'den az	30,5m'den az	30,5m'den fazla
1.Konutlar	a)Bir veya iki ailelik evler	-	30(2)	30	60	-	-
	b)Apartmanlar	90	60	30(2)	60	90	120
2. Konaklama Amaçlı Binalar							
-yağmurlama sistemi yok		90	60	60	60	90	İzin verilmez.
-yağmurlama sistemli		60	60	30(2)	60	60	120(3)
3.Kurumsal Binalar							
-yağmurlama sistemi yok		90	60	60	60	90	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		90	60	30(2)	60	90	120(3)
4.Büro Binaları							
-yağmurlama sistemi yok		90	60	30(2)	60	90	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		60	60	30(2)	30(2)	60	120(3)
5.Ticaret Amaçlı Binalar							
-yağmurlama sistemi yok		90	60	60	60	90	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		60	60	30(2)	30(2)	60	120(3)
6. Endüstriyel Yapılar							
-yağmurlama sistemi yok		120	90	60	90	120	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		90	60	30(2)	60	90	120(3
7.Toplanma Amaçlı Binalar							
-yağmurlama sistemi yok		90	60	60	60	90	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		60	60	30(2)	60	60	120(3
8.Depolama Amaçlı Tesisler							
a) Depolar							
-yağmurlama sistemi yok		120	90	60	90	120	İzin verilmez
-yağmurlama sistemli		90	60	30(2)	60	90	120(3
b) Otopark							
-açık otoparklar		-	-	15(2)(4)	15(2)(4)	15(2)(4)	60
-diğer otoparklar		90	60	30(2)	60	90	120(3

* Binanın en alt bodrum kat döşemesi ile zemin kat döşemesi arasındaki mesafe.

Çizelge 3.5 (devam) : Bina kullanım türlerine göre belirlenen yangın dayanım süreleri (BYKHY, 2022; sf. 92).

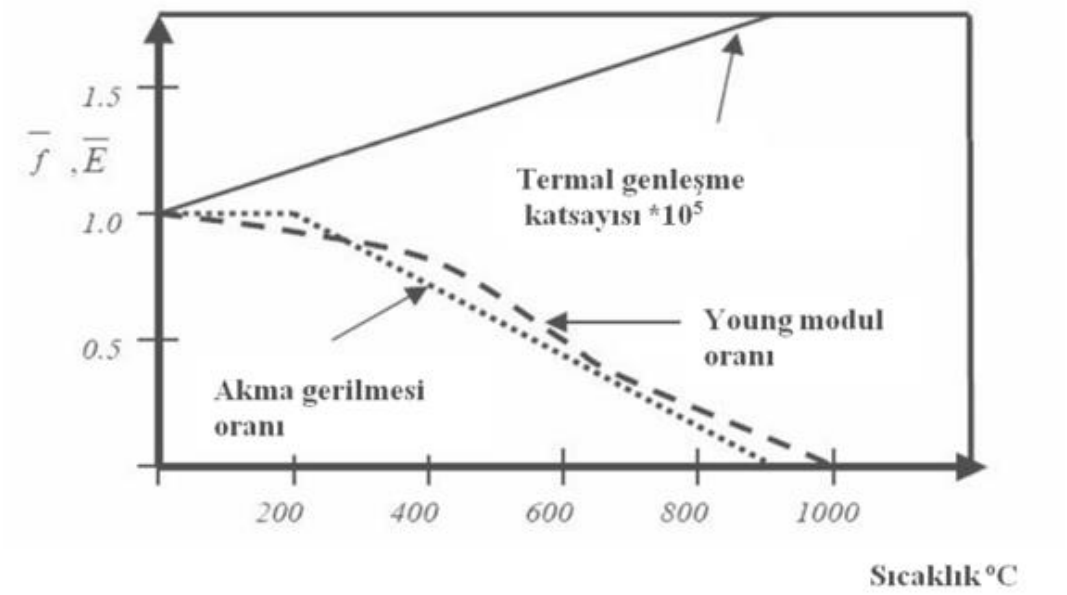
(1) Bir bodrumun üstündeki döşeme (veya birden fazla bodrum var ise en üstteki bodrumun üstündeki döşeme), eğer giriş ve üst katlar için olan yangına dayanım süreleri daha fazla ise o hükümleri sağlamalıdır.
(2) Binaları ayıran yangın kompartıman duvarları için en az 60 dakikaya yükseltilir.
(3) Taşıyıcı sistemin bir bölümünü teşkil etmeyen elemanlar için 90 dakikaya düşürülebilir.
(4) Acil kaçışı oluşturan elemanlar için 30 dakikaya yükseltilir.

3.2 Yapısal Çeliğin Yangın Sırasındaki Davranışı

Taşıyıcı özellikteki çelik elemanların yangın esnasındaki davranışını etkileyen başlıca etmenler şunlardır (Buchanan, 2001):

- Çelik elemanlara etkiyen yüksek sıcaklık değerleri
- Yapıya etkiyen sabit ve hareketli yükler
- Çeliğin yüksek sıcaklık değerleri altındaki mekanik, ısıl ve kimyasal özellikleri
- Yapının geometrisi ve tasarımı

Bu durumlardan dolayı, yüksek sıcaklıkta yapısal çelik malzemenin mekanik ve ısıl özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Çünkü sıcaklık artışı ile ile birlikte malzemenin elastisite modülü, akma dayanımı ve ısıl genleşme katsayısında önemli oranda değişimler gözlenmektedir (Şekil 3.4) (Arda & Yardımcı, 1995).



Şekil 3.4 : Çeliğin mekanik ve ısıl özelliklerinin sıcaklıkla değişimi (Anon., 1998).

3.2.1. Yapısal çeliğin ısıl (termal) özellikleri

Çelik malzemenin yüksek sıcaklıktaki özelliklerine ilişkin şu kavramlar ele alınmıştır:

- Yoğunluk
- Isıl genleşme
- Isıl iletkenlik
- Özgül ısı
- Isıl yayılma katsayısı

Bu bölümde yapısal çelik için ‘’a’’ indisi, kompozit yapılardaki çelik donatılar için ‘’s’’ indisi kullanılmıştır.

3.2.1.1 Yoğunluk

Çelik malzemenin yoğunluğunun sıcaklıkla değişmediği ve değerinin sabit olarak 7850 kg/m^3 olduğu kabul edilmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

3.2.1.2 Isıl genleşme

Çelik bir malzeme ısıtıldığında genleşmekte, diğer bir deyişle uzamaktadır. Isıl genleşme katsayısı ise sıcaklığın bir fonksiyonu olarak genleşmeyi tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır. Çelik malzemenin ısıl genleşmesi;

$$\Delta l / l = a(t) \times \Delta(t) \tag{3.1}$$

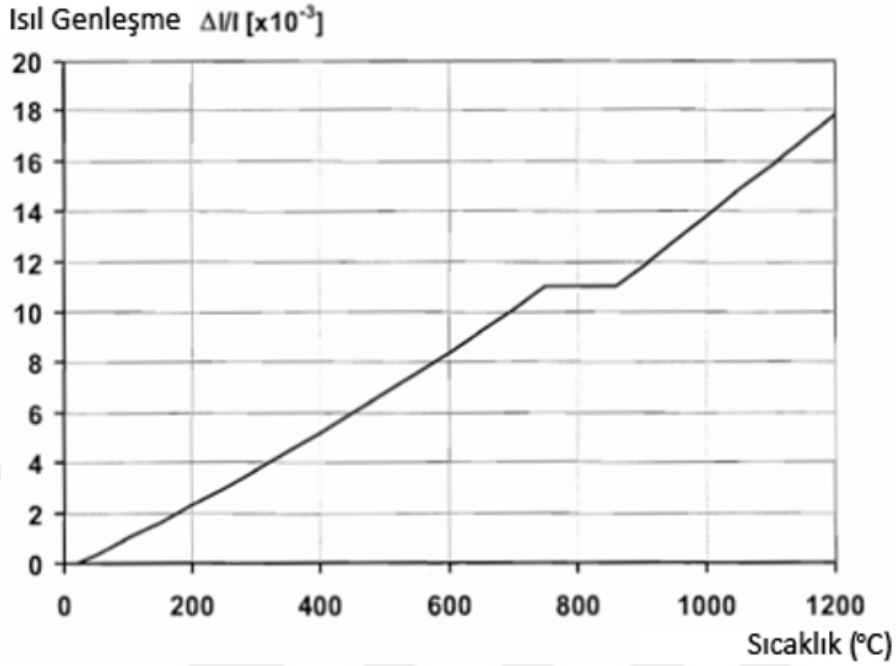
olarak tanımlanmaktadır. Burada α (t) ısıl genleşme katsayısını, Δ(t) ise sıcaklıktaki değişimi ifade etmektedir. Çeliğin ısıl genleşmesi (uzaması), $\Delta l/l$, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak tanımlanır. Bu ısıl genleşme 750°C’ye kadar artan sıcaklıkla doğrusal oranda meydana gelirken, yaklaşık 750°C sıcaklıkta faz değişikliğine uğramaya başlamaktadır. Isıl genleşmedeki süreksizlik ise 750°C ile 850°C sıcaklık aralığında çelik malzemede gerçekleşen bir faz değişiminden kaynaklanmaktadır. Şekil 3.5’te verilen bağıl ısıl genleşmenin (uzamanın) sıcaklığa bağlı değişimi aşağıda yer alan denklemler kullanılarak belirlenmektedir (Eurocode 3, 1995).

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

$$750^oC \leq \theta_a \leq 850\ ^oC \text{ için} \quad \Delta l/l = 1{,}1 \times 10^{-2} \tag{3.3}$$

$$860^oC \leq \theta_a \leq 1200\ ^oC \text{ için} \quad \Delta l/l = 2 \times 10^{-5}\theta_a - 6{,}2 \times 10^{-3} \tag{3.4}$$

Burada l, 20 °C sıcaklıktaki uzunluğu, Δl sıcaklığın neden olduğu genleşmeyi(uzama) ve a θ çelik sıcaklığını (°C) göstermektedir.



Şekil 3.5 : Isıl genleşme – sıcaklık grafiği (Eurocode 3, 1993).

3.2.1.3 Isıl iletkenlik

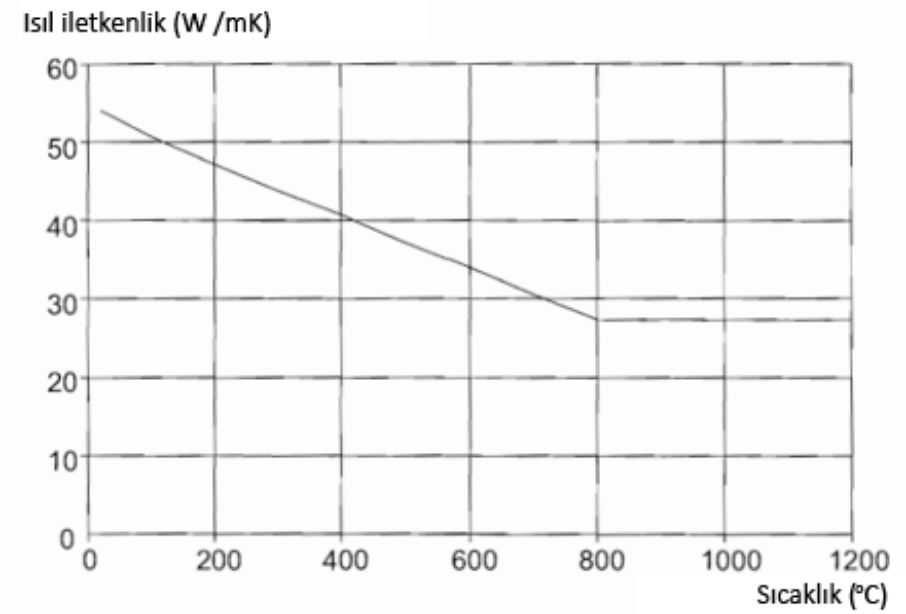
Taşıyıcı sistemlerin yangına dayanıklılığı, sistemi oluşturan bileşenlerin ısıl ve mekanik özellikleri ile ilgilidir. Çeliğin yüksek sıcaklıklardaki dayanımının az olması ise bu malzemenin en büyük dezavantajı olarak kabul edilmektedir. Ortamdaki maddeler arasındaki karşılıklı ısı transferinin bir sonucu olarak taşıyıcı çelik elemanlardaki sıcaklık artışı, malzemenin 'ısıl iletkenliğinin (K_a)' bir fonksiyonudur. Malzemenin ısıl iletkenlik değeri, malzemenin oda sıcaklığı koşulları altındaki kimyasal bileşimine göre değişkenlikler gösterebilir. Bu değer yaklaşık olarak aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir (Şekil 3.6) (Eurocode 3, 1995):

$$K_a = 54\text{-}3{,}33 \times W/m^oC \qquad 20^oC \leq \theta_a \leq 800\ ^oC$$

$$K_a = 27{,}3 \qquad 800^oC \leq \theta_a \leq 1200\ ^oC \qquad (3.5)$$

K_a: Isıl iletkenlik katsayısı, W/m^oC

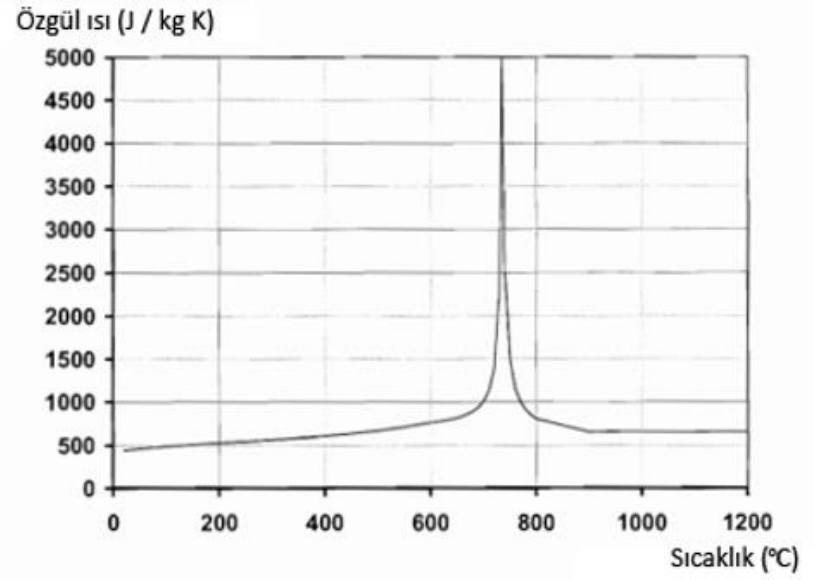
θ_a: Çeliğin sıcaklık değeri, ^oC



Şekil 3.6 : Isıl iletkenlik – sıcaklık grafiği (Eurocode 3, 1993).

3.2.1.4 Özgül ısı

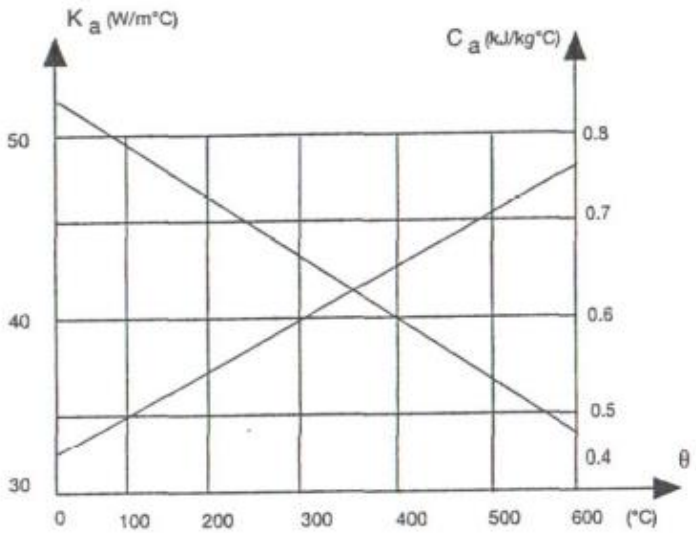
Yapısal çelik elemanların kesit üzerindeki sıcaklık artışını ve dağılımını etkileyen ikinci özellik ise özgül ısı(c_a) değeridir. Özgül ısı, malzemenin kütlesini bir birim sıcaklığa yükseltmek için gerekli olan ısı miktarını tanımlayan özelliktir. Birimi ise kJ/kg^{o}C dir (Şekil 3.7) (Güler, 2002).



Şekil 3.7: Özgül ısı – sıcaklık grafiği (Eurocode 3, 1993).

Çelik malzemenin ısı ile ilişkilendirildiği fiziksel özellikleri çeliğin cinsine göre büyük farklılıklar göstermediği için, çeliğin ısıl iletkenlik katsayısı ve özgül ısı katsayısı

değerlerinin sıcaklıkla değişimi tek bir diyagram (Şekil 3.8) üzerinde gösterilebilmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

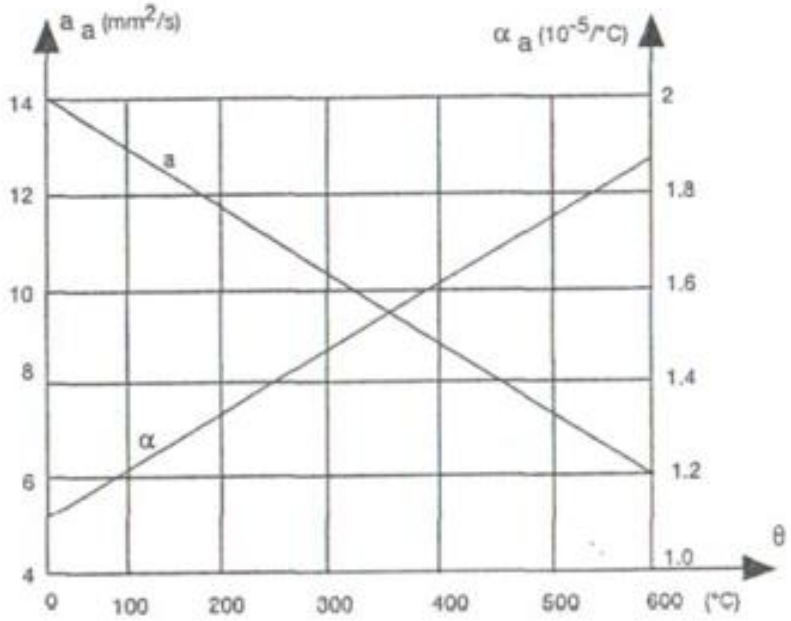


Şekil 3.8 : Çelik malzemenin ısı iletkenlik katsayısı (K_a) ve özgül ısı katsayısının (c_a) sıcaklıkla değişimi (Arda & Yardımcı, 1995).

3.2.1.5 Isı yayılma katsayısı

Çelik elemanların ısıl özelliklerinden bir diğeri ise ısı yayılma katsayısıdır(a_a). Bu özellik, malzemeye etkiyen ısının kesit yüzeyi boyunca ne kadar etkin bir şekilde dağılım gösterdiğinin bir ölçütüdür. Malzemenin ısıl iletkenlik katsayısı değerinin değerinin özgül ısısına oranı olarak da tanımlanmaktadır. Bu yüzden ısı yayılma katsayısı, ısıl iletkenlik ve özgül ısı değerlerindeki değişimlere göre farklılıklar göstermektedir (Güler, 2002).

Isı yayılma katsayısı değeri arttıkça ısı, ısıtılan yüzey alanından daha hızlı bir şekilde uzaklaşmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, çeliğin ısıl iletkenliği yüksek bir malzeme olması sebebiyle, yüksek bir ısıl yayılma kapasitesine sahiptir (Şekil 3.9) (Güler, 2002).



Şekil 3.9 : Çelik malzemede a_a ısı yayılma katsayısı ve α_a ısıl genleşme katsayısının sıcaklıkla değişimi (Arda & Yardımcı, 1995).

Ancak pratik amaçlarla, hesaplarda sabit değerlerin kullanılması da mümkündür. Örnek olarak, ENV 1994-1-2'ye göre yaklaşık sabit değerler olarak;

Ka ≈ 45 W/m°C

αa ≈ 1.4 x 10-5

ca ≈ 600 J/kg°C kullanılabilir. Daha kesin bir hesap için ise;

αa = -2,416*10-4 + 1,2*10-5 θa + 0,4*10-8 θa 2 20°C ≤ θa ≤ 750°C

αa = 11*10-8 750°C ≤ θa ≤ 860°C

αa = -6,2*10-8 + 2*10-5 θa 860°C ≤ θa ≤ 1200°C (3.6)

ca = 425 + 7,73*10-1 θa - 1,69*10-3 θa 2 + 2,22*10-6 θa 3 20°C ≤ θa ≤ 600°C

ca = 666 – [13002 / (θa-738)] 600°C ≤ θa ≤735°C

ca = 545 – [17820 / (θa-731)] 735°C ≤ θa ≤ 900°C

ca = 650 900°C ≤ θa ≤ 1200°C (3.7)

3.2.2 Yapısal çeliğin mekanik özellikleri

Yüksek sıcaklık değerlerinin akma sınır ve elastisite modülü gibi yapısal çelik malzemenin mukavemet özelliklerine birincil düzeyde etkili olan özellikleri, yaklaşık olarak 100 ^{o}C sıcaklıktan itibaren önem teşkil etmektedir (Arda & Yardımcı, 1995). ENV 1994-1-2;

f_{ay} : 20°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin olağan akma sınırı,

$f_{ay\theta}$: θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin %2 şekil değiştirmeye ilişkin itibari akma sınırı (maksimum gerilme sınırı),

$f_{ap\theta}$: θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin orantılılık sınırı,

$f_{au\theta}$: θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin 1.25 ile kısıtlanmış minimal kopma sınırı,

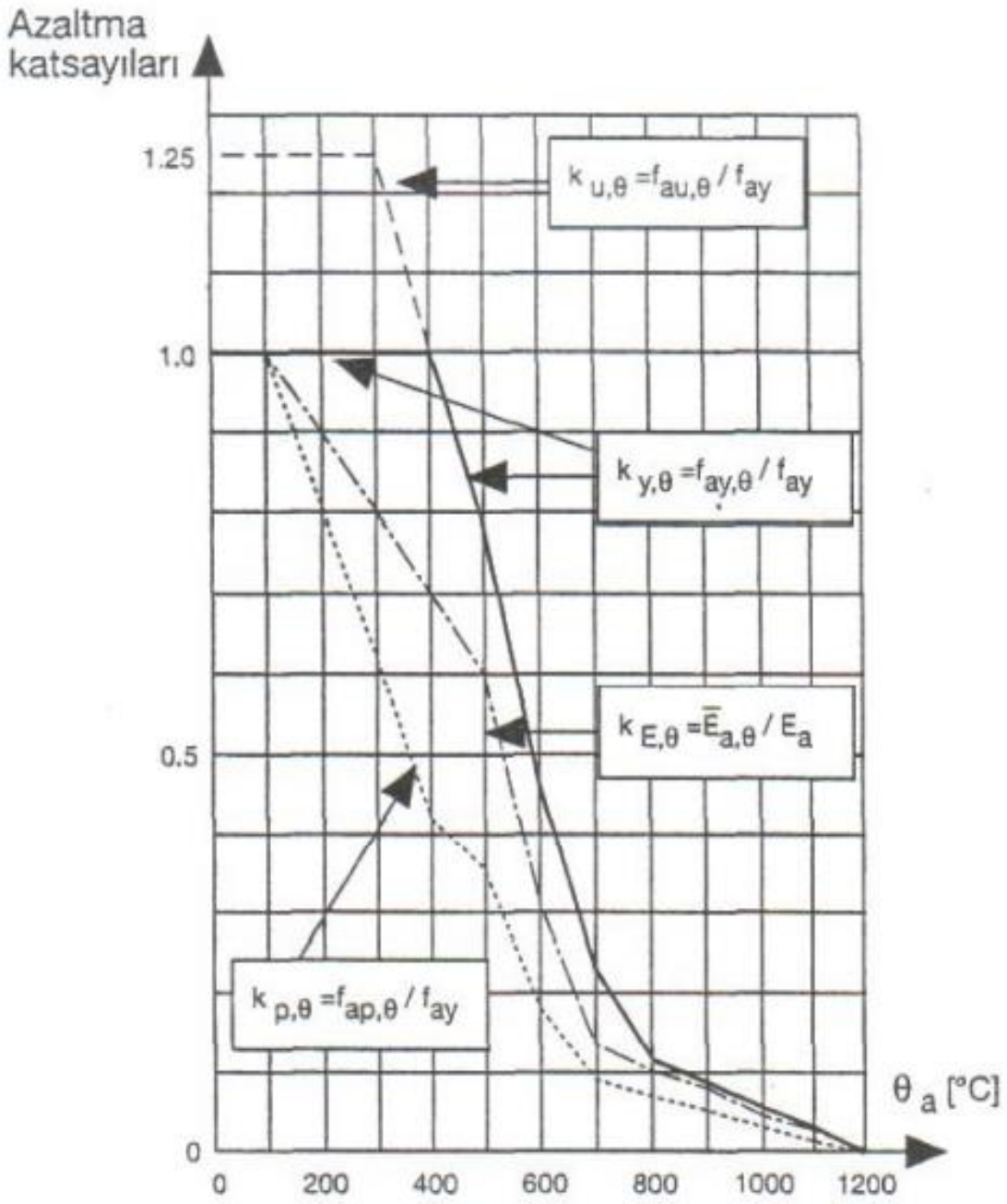
E_a : 20°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin elastisite modülü,

$\bar{E}_{a,\theta}$: θ°C sıcaklıktaki yapısal çelik malzemenin elastisite modülü, olmak üzere Çizelge 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.6 : Yapısal çelik malzemenin yüksek sıcaklık altında azalma katsayıları (Eurocode 4, 1994).

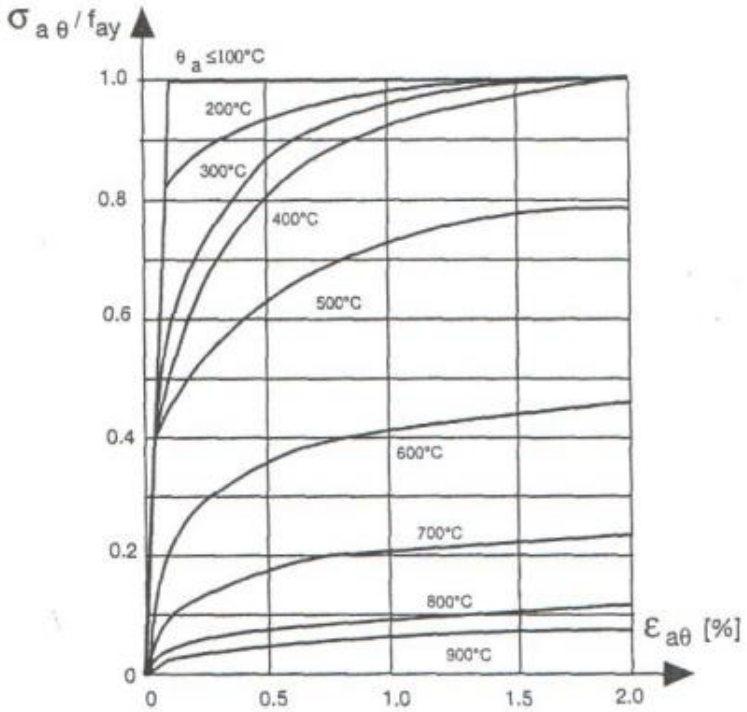
Çelik sıcaklığı θ_a (°C)	**$k_{Es\emptyset} = \bar{E}_{a,\theta} / E_a$**	**$k_{p,\theta} = f_{ap,\theta} / f_{ay}$**	**$k_{y,\theta} = f_{ay,\theta} / f_{ay}$**	**$k_{u,\theta} = f_{au,\theta} / f_{ay}$**
20	1,00	1,00	1,00	1,25
100	1,00	1,00	1,00	1,25
200	0,90	0,807	1,00	1,25
300	0,80	0,613	1,00	1,25
400	0,70	0,42	1,00	1,00
500	0,60	0,36	0,78	0,78
600	0,31	0,18	0,47	0,47
700	0,13	0,075	0,23	0,23
800	0,09	0,05	0,11	0,11
900	0,0675	0,0375	0,06	0,06
1000	0,045	0,025	0,04	0,04
1100	0,0225	0,0125	0,02	0,02
1200	0,00	0,00	0,00	0,00

Çizelge 3.6' nın grafik hali ise Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10 : Yapısal çelik malzemenin yüksek sıcaklık altında azalma katsayıları (Eurocode 4, 1994).

Yapısal çelik malzemenin şekil değiştirme-gerilme diyagramının sıcaklıkla değişimi ise %2 uzamaya kadar Şekil 3.11 üzerinde incelenebilir. Bu şekil üzerinden, yapısal çelik malzemenin yangına karşı gösterdiği davranış açık bir şekilde gösterilmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

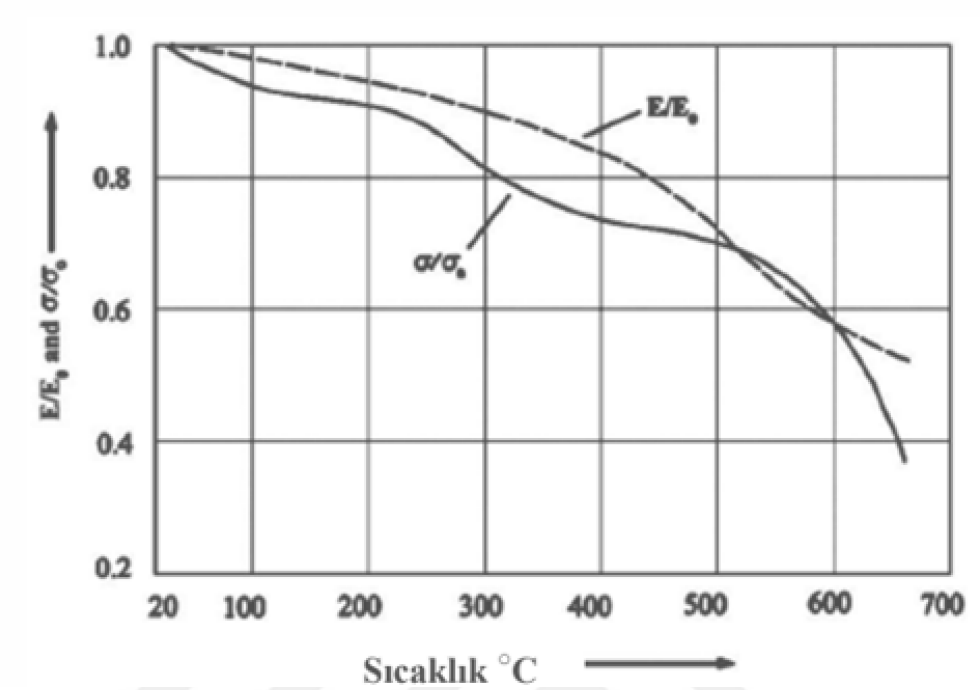


Şekil 3.11 : Yapısal çelik malzemenin şekil değiştirme- gerilme eğrisinin %2 uzamaya kadar sıcaklıkla değişimi (Eurocode 4, 1994).

Çizelge 3.7 : Elastisite modülü ve akma dayanımının sıcaklıkla değişimi (Eurocode 3, 1993).

Sıcaklık (°C)	**Elastisite modülü (N/mm^2)**	**Akma dayanımı (N/mm^2)**
20	210000	355
100	210000	355
200	189000	355
300	168000	355
400	147000	355
500	126000	276,9
600	65100	166,85
700	27300	81,65
750	23100	60,35
800	18900	39,05
850	16537,5	30,175
900	141750	21,3
950	11812,5	17,75
1000	9450	14,2

Çizelge 3.7'nin grafik hali ise Şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12 : Yüksek dayanımlı çelik malzemenin yüksek sıcaklıklardaki elastisite modülü ve akma gerilmesi oranları (Saha, 2004).

4.2.3 Kesit faktörü

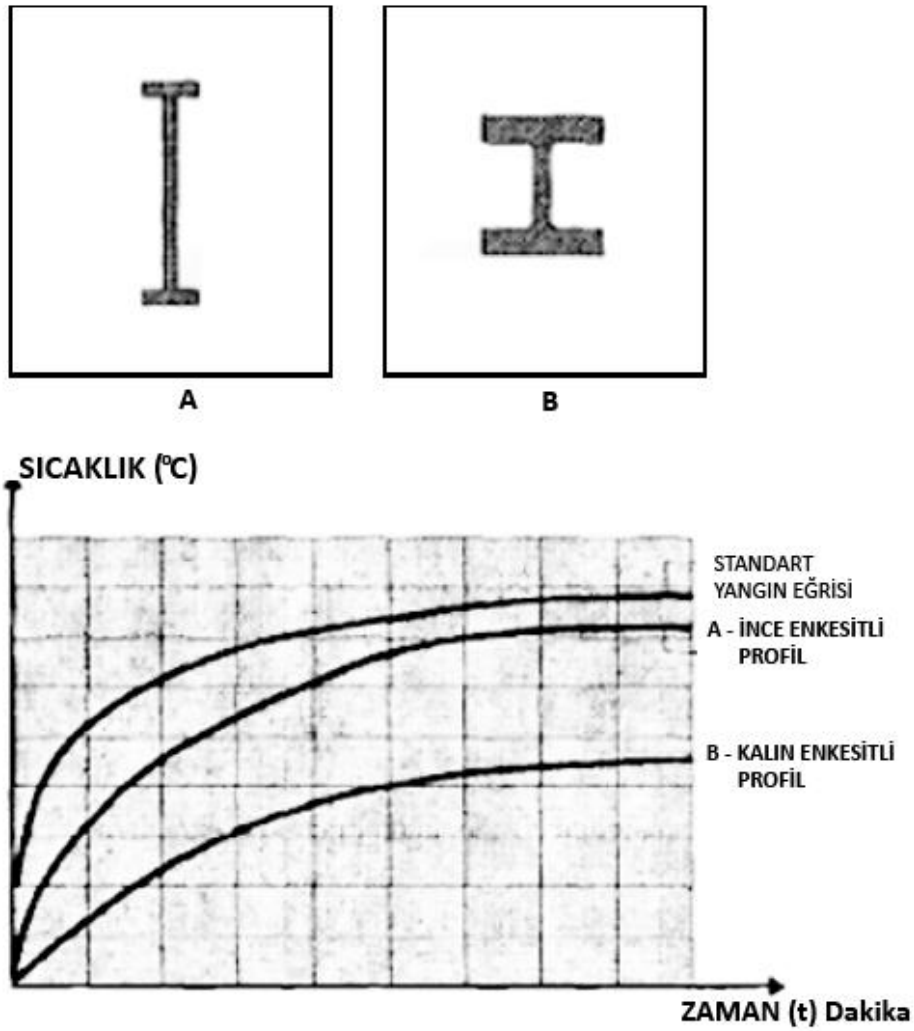
Taşıyıcı çelik elemanların ısınma süresi kütleleri ile doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Bu durum, toplam kütle artışı ile çelik elemanın belirli bir sıcaklık düzeyine ulaşması için gereken ısı enerjisi miktarının artmasından kaynaklanmaktadır. Kesit faktörü (H_p/A) olarak adlandırılan yöntem ile yangın esnasında çelik elemanların maruz kalacağı yangın yükü hesaplanmaktadır. H_p/A değeri arttıkça çelik elemandaki ısı artışı daha hızlı bir şekilde gerçekleşmekte ve bu da yangından korunma için kullanılacak malzemenin daha fazla miktarda uygulanmasını gerektirmektedir (SPCE, 1990).

H_p/A (yangına maruz kalan çelik profilin ısınma oranı):

- Alevlere maruz kalan çeliğin çevresi – H_p (m)
- Çelik profilin enkesit alanı - A (m^2)

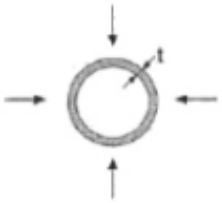
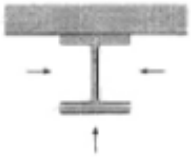
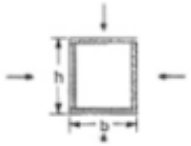
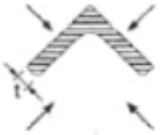
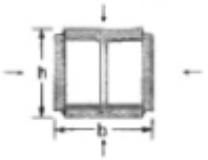
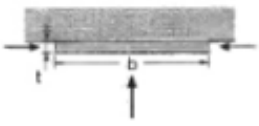
Kesit faktörüne etki eden nedenlerden ötürü, kesit faktörü düşük olan çelik elemanlar yüksek kesit faktörüne sahip elemanlardan daha yavaş bir şekilde ısınmaktadırlar

(Şekil 3.13). Bu yüzden, kalın ve küçük enkesitli çelik elemanlardaki sıcaklık artış hızı ince ve geniş enkestli çelik elemanlardan daha düşüktür (SPCE, 1990).

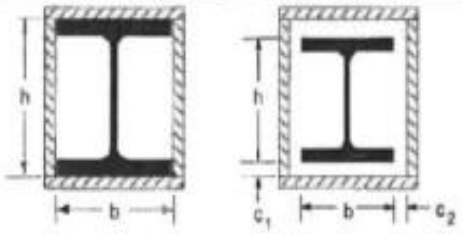
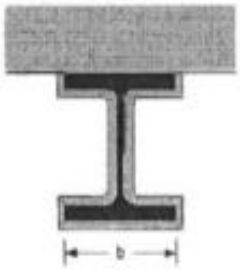
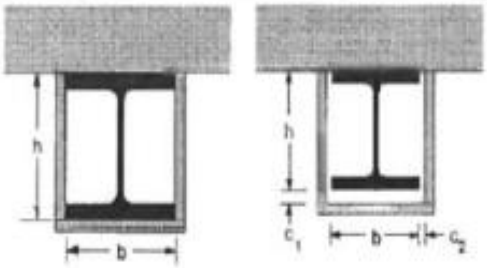


Şekil 3.13 : Çelik elemanlarda kesit faktörünün yangın dayanımına etkisi (SPCE, 1990).

Düşük kesit faktörüne sahip çelik taşıyıcı elemanlardaki ısı artışı daha yavaş olduğu için yangına karşı koruma için uygulanması gereken yalıtım miktarı büyük kesit faktörüne sahip elemanlardan daha azdır. Yangına karşı koruma uygulanmamış taşıyıcı çelik elemanlar için kesit faktörü Şekil 3.14, yangına karşı koruma uygulanmış çelik elemanlar için kesit faktörü ise Şekil 3.15'te gösterilmiştir.

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

Şekil 3.14 : Yangına karşı koruma uygulanmamış çelik elemanlar için kesit faktörünün hesaplanması (TS EN 1993-1-2, 2007).

Gösterim	Tarif	Kesit faktörü (A_m / V)
	Sabit kalınlıkta çevreleme elemanı	$\frac{\text{çelik çevre uzunlugu}}{\text{çelik en kesit alanı}}$
	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 çevrelenmesi	$\frac{\text{çelik çevre uzunlugu - b}}{\text{çelik en kesit alanı}}$
	Üç tarafı yangına maruz olan çelik profillerin sabit kalınlıkta içi boş çevreleme elemanı ile çevrelenmesi[1)]	$\frac{2h+b}{\text{çelik en kesit alanı}}$
[1)] Aralık boyut ölçüleri c_1 ve c_2 normal şartlarda h /4'ü aşmamalıdır.		

Şekil 3.15 : Yangına karşı koruma uygulanmış çelik elemanlar için kesit faktörlerinin hesaplanması (TS EN 1993-1-2, 2007).

Sonuç olarak kesit faktörü, çelik yapılarda yangına karşı koruma sağlamak amacıyla uygulanacak yöntemlerde önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

4. MİMARİ OLARAK GÖRÜNÜR YAPISAL ÇELİK ELEMANLARDA YANGINA KARŞI KORUMADA UYGULANAN PASİF KORUMA YÖNTEMLERİ

Pasif koruma yöntemleri, yangına karşı korumada herhangi bir dış müdahaleye gerek kalmadan kendiliğinden aktifleşen uygulamalardır. Yapılarda uygulanan pasif koruma yöntemlerinin kapsamı şu şekilde sıralanabilir (Gewain ve diğerleri, 2003: sf.1):

- Yapı malzemelerinin yangına karşı yapısal özelliklerine ilişkin düzenlenen standart ve yönetmelikler
- Yapı içerisinde yangının yayılımını önlemeye yönelik tasarımlar
- Yapısal elemanlarda yangın esnasında meydana gelen sıcaklık artışını önleme ve geciktirmeye yönelik tasarım ve uygulamalar

Tez çalışması kapsamında, bu önlemler arasından yalnızca çelik taşıyıcılı elemanların yangına karşı korunumunu sağlayan pasif koruma yöntemleri irdelenecektir.

4.1 Taşıyıcı Sistemlerin Yangına Karşı Korunmasına Yönelik Ulusal ve Uluslararası Standart ve Yönetmelikler

Ulusal ve uluslararası standart ve yönetmeliklerde yapısal yangın güvenliğinin sağlanması için gereken birtakım kriterler düzenlenmiştir. Bu standart ve yönetmelikler ülkelere göre bazı farklılıklar gösterse dahi aşağıda yer alan temel hedefler tüm yönetmeliklerce esas alınmaktadır. Bu hedefler şu şekildedir:

- Binadaki olası yangın tehlikelerini kontrol ederek yangın oluşumunu azaltmak ve engellemek,
- Bina içerisinde yer alan kullanıcıların tahliyesi için güvenli kaçış rotaları sağlamak,
- Yangının binanın meydana geldiği kısımdan diğer kısımlarına ve komşu binalara yayılımını önlemek veya yavaşlatmak,
- Taşıyıcılık işlevi gösteren yapı elemanlarının binadaki kullanıcıların tahliyesi için gerekli olan süre içerisinde bu işlevini sürdürebilecek şekilde tasarlanması ve inşa edilmesidir (SCI, 2010).

Yapısal yangın koruma sistemlerinin test standartları uluslararası normlara dayanmaktadır. Bu sistemler temel olarak aşağıda yer alan test standartlarına göre düzenlenmektedir:

4.1.1 European Norms (EN) 13381 - Avrupa Test Standartları

EN 13381, yapısal çelik elemanlara uygulanan yangın koruma sistemlerinin Avrupa standartlarına uyumlulukları hakkındaki bilgileri kapsayan standartlar serisinden oluşmaktadır. Bu seri genel olarak şunları kapsamaktadır:

- Yapısal çelik elemanlara uygulanan pasif yangın koruma yöntemleri
- Boru/kutu enkesitli kompozit çelik elemanlara uygulanan yangın koruma yöntemleri
- Çelik elemanlara yangına karşı korumada uygulanan reaktif yöntemler

EN 13381 standartlar serisinin dördüncü bölümünde ise, temel yapısal çelik elemanlara uygulanan pasif yangından korunma sistemlerinin yangın dayanımına katkısını belirlemeye yönelik test yöntemleri açıklanmaktadır.

4.1.2 British Standards (BS) 476 - İngiltere Test Standartları

BS 476'da yapının taşıyıcı elemanlarının yangına dayanıklılığının belirlenmesine yönelik test standartları yer almaktadır. Bu standart; taşıyıcı kirişlerin, kolonların, döşemelerin, düz çatıların ve duvarların yangına dayanımını belirlemeye yönelik yöntemleri kapsamaktadır.

Kirişler ve kolonlar yük taşıma kapasitesi (stabilite) açısından değerlendirilirken; döşeme, düz çatı ve duvar gibi ortam bölücü elemanların taşıma kapasitesi, bütünlük ve yalıtım açısından ölçümleri yapılarak incelenmektedir.

4.1.3 American National Standards Institute (ANSI) / UL 263 - Amerikan Test Standartları

Bu standart, yapısal çelik elemanlara uygulanan yangın koruma önlemlerini değerlendirmek için oluşturulmuştur. Ofis, hastane, okul ve konut gibi yapılarda meydana gelen selülozik yangın oluşumunu simüle etmek için geliştirilmiştir.

4.1.4 Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik (BYKHY)

Binaların Yangından Korunması Hakkındaki Yönetmelik'te çelik taşıyıcı elemanların ve sistemlerin yangına karşı korunmasına dair birtakım durumlar belirtilmiştir. Bu yönetmeliğe göre;

- Binanın taşıyıcı sisteminin yangına dayanımının belirlenmesinde, taşıyıcı sistemin yük taşıma kapasitesi, sistemin yalıtımı ve bütünlüğü değerlendirilmektedir.
- Yangın oluşması durumunda binada bulunan tüm canlıların ortamdan güvenli bir şekilde tahliye edilmesi ve yangına uygun zamanda müdahale edilebilmesi için, taşıyıcı sistem ve bileşenlerinin bütünsel ile bileşensel düzeyde ele alınarak boyutlandırılmasının yapılması gerekmektedir. Bu boyutlandırma yapılırken, yangın ile ilgili yönetmelikler ve geçerli standartlar esas alınmaktadır.
- Toplam yapı alanı 5000 m^2 den az ve tek katlı yapılar haricindeki tüm çelik taşıyıcı sistemli binaların yangına karşı korunumunun sağlanmasına yönelik uygulamaların yapılması gerekmektedir (BYKHY, 2022).

4.1.5 Eurocode

Eurocode, Avrupa Standardizasyon Komitesi (CEN) tarafından geliştirilen bir dizi yapısal tasarım standartlarını içermektedir. Yapısal çelik malzemenin yangın tasarımına ilişkin standartlar ise Eurocode 1, Eurocode 3 ve Eurocode 4'te yer almaktadır.

- Eurocode 1 - Bölüm 2.7'de yapısal yangın ile ilgili genel tanım ve kavramlar,
- Eurocode 3 - Bölüm 1.2'de yapısal yangın tasarıma ilişkin bilgilendirmeler,
- Eurocode 4 - Bölüm 1.2'de ise kompozit çelik ve beton yapıların tasarıma ilişkin bilgiler bulunmaktadır. Yapısal yangın tasarımı ve ilgili hesaplama modeller bulunmaktadır.

4.1.6 British Standards (BS) 5950

Bu yönetmeliğin sekizinci bölümünde yapısal çelik elemanların yangın dayanımının sağlanması için uygulanan pasif koruyucu malzemelere yer verilmiştir. Yönetmelikte, yangın testlerine ve analitik yöntemlere dayalı olarak yangın direncini belirlemek için

bir methodoloji ortaya koyulmuştur. Ek olarak, tasarımcıya yapıda yangın güvenliğinin sağlanmasına yönelik uygun tasarım yöntemleri belirtilmiştir.

4.1.7 International Building Code (IBC) ve National Fire Protection Association (NFPA) 500

Daha önce değinilen yönetmelik ve standartlara ek olarak, IBC ve NPFA 500'de hem aktif hem de pasif koruma yöntemlerine ilişkin bilgilendirmeler bulunmaktadır. Bu iki yönetmelikte, yapının yangına karşı korunma durumları göz önünde bulundurularak aktif ve pasif koruma yöntemlerinin birbirini tamamlayıcı şekilde birlikte kullanılmaları önerilmektedir.

4.2 Mimari Olarak Görünür Çelik Yapıların Ana Taşıyıcı Bileşenleri İçin Alınması Gereken Pasif Koruma Yöntemleri

Yangına maruz kalan yapısal çelik elemanlarda ısı etkisiyle oluşan sıcaklık artış hızını azaltmak veya önlemek için birtakım pasif koruma yöntemleri mevcuttur. Bu yöntemlerin uygulanabilmesi için, koruma yönteminin yangın dayanımını belirleyen stabilite, bütünlük ve yalıtım kriterlerinden en az birine sahip olması gerekmektedir (Güler, 2002: sf. 102).

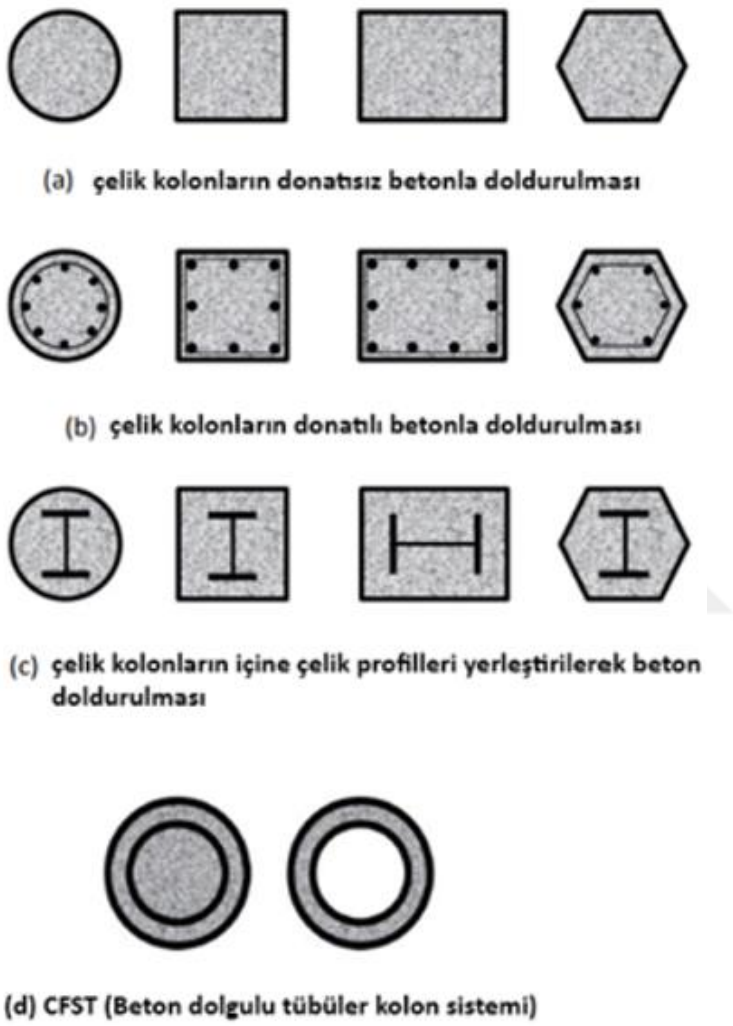
Mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlarda yangına karşı korumada uygulanabilecek pasif koruma yöntemleri şunlardır:

- Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması
- Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım
- İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım
- Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması

4.2.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması

Kutu veya boru enkesitli çelik veya demir enkesitlerin betonla doldurulması ile oluşturulan sistemlere ilişkin bilinen ilk patent 1898 yılında alınmıştır, ancak bu yöntemin kullanımı, 20. yüzyılın ortalarından itibaren yapısal araştırma methodlarının geliştirilmesi ve geniş yelpezade çelik enkesitli elemanların üretiminin sağlanması ile yaygınlık kazanmıştır (NCCI, 2014).

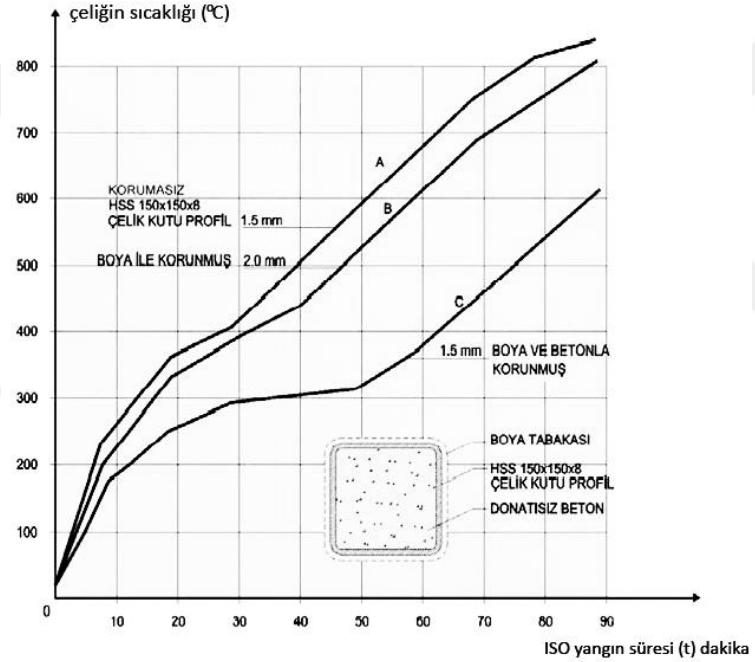
Bu yöntemde, günümüzde kutu veya boru enkesitli çelik elemanların içi beton ile doldurularak taşıyıcı elemanlarda yangına dayanım sağlanmaktadır (Şekil 4.1 ve Şekil 4.2). Kolon ve kirişlerin içine yerleştirilen beton, yangın anında ortaya çıkan ısı sebebiyle mukavemetini kaybeden çeliğin üzerine gelen yüklerin taşınmasına yardımcı olmaktadır (Şekil 4.3). Buna ek olarak, betonun yapısında bulunan su, betonun çelik gibi hızlı ısınmasına engel olmaktadır (IISI, 1993).



Şekil 4.1 : Betonla doldurulmuş çelik enkesit türleri ((a),(b) ve (c): BC 4, 2021; (d): Beyhan, 2015).



Şekil 4.2 : Donatılı beton ile doldurulmuş dairesel enkesitli çelik kolon (NCCI, 2014).



Şekil 4.3: Çelik kutu enkesitli elemanın betonla yalıtımının çeliğin sıcaklığına etkisi (IISI., 1993).

Bu koruma yöntemi, genellikle yüksek yangın dayanımının beklendiği durumlarda uygulanmaktadır. Yüksek dayanım süresi, kullanılacak betonun içeriğindeki karışım oranlarına ve seçilen agrega türlerine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir (Demirel ve Özkan, 2003: sf. 92).

Kullanılacak beton karışımı için agrega ve çimentonun uygun olarak seçilmesiyle betonun yangına karşı koruyuculuğu istenilen düzeye getirilebilmektedir (Çizelge 4.1). Yüksek dayanımlı beton karışımı elde etmek için silisli agregalar yerine dolomit, kalker ve bazalt gibi hafif agregaların kullanılması da çelik kolonların içerisine

dökülecek beton karışımının yangına karşı dayanımının arttırılmasına katkı sağlamaktadır (Akman, 2000).

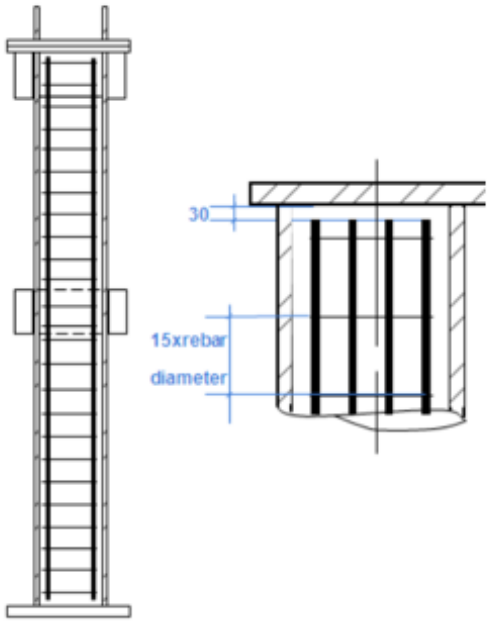
Çizelge 4.1 : Korumada kullanılan betonun özellikleri (Arda & Yardımcı, 1995).

	Yoğunluk (kg/m^3)	**Isıl iletkenlik katsayısı (W/(m.°C))**	**Özgül ısı (J/(kg.°C))**
Boşluklu beton	600	0,30	1200
Hafif beton	1600	0,80	1200
Normal beton	2300	1,70	1200

Bu yöntemde, kutu/boru enkesitli çelik elemanların içerisine dökülen betona donatı yerleştirilerek daha fazla yangın dayanımı sağlanabilmektedir (Şekil 4.4) (Ünver, 2003). Çelik donatı kullanımının belirlenmesi, kesit boyutu ve ek yalıtım ihtiyacına göre genellikle şu şekilde yapılmaktadır:

- Çelik enkesitin maksimum boyutu <300 mm ise, çelik donatı kullanımı zorunlu değildir, ancak kesit yüzeyininin dışarıdan ek bir uygulama ile yalıtılması gerekmektedir.

- Çelik enkesitin minimum boyutu 300 mm ve üzerinde bir büyüklükte ise, çelik donatı kullanımı gerekmektedir. Bu durumda, kesit yüzeyinde genel olarak ek bir yangın yalıtımının uygulanmasına gerek duyulmamaktadır (Wang, 2014).



Şekil 4.4 : Çelik elemanlar içerisindeki donatı yerleşimi (NCCI, 2014).

Kutu veya boru profillerin içine beton malzemenin doldurulmasıyla elde edilen taşıyıcı sistem bileşenleri, çelik ve betonun yapısal avantajlarını birleştirmektedir. Bu uygulama sayesinde, yapısal çelik elemanlarda boyutlandırılmanın artırılmasına gerek kalmadan mevcut elemanın taşıma kapasitesi artırılabilmekte ve dış yüzeye herhangi bir ek müdahale yapılmadan estetik görünümün korunması sağlanabilmektedir (Şekil 4.5) (Ünver, 2003: sf. 59).



(a) **(b)**

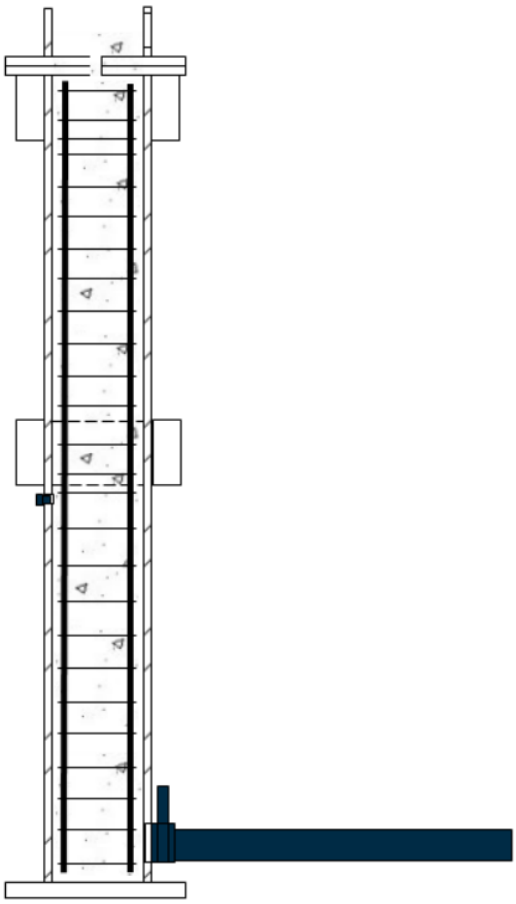
Şekil 4.5 : Guangzhou IFC Binası'nın beton dolgulu boru enkesitli kolonları ((a): Boake, 2015: sf.95; (b): Url 26).

Çelik enkesitler içerisine betonun yerleştirilmesi iki farklı şekilde yapılmaktadır. Bunlardan birincisi geleneksel yöntem olarak da tanımlanmakta olan üst dolgu uygulamasıdır. Bu yöntemde, taşıyıcı bileşenin yüksekliği arttıkça uygulamanın gerçekleştirilmesi zorlaşmaktadır.

Bir diğer yöntem ise betonun taban düzleminden basınç yoluyla doldurulmasıdır. Bu yöntemde beton, taşıyıcı bileşenin en uç noktasına ulaşana kadar kontrollü olarak taban düzleminden basınçla pompalanmaktadır (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7). Geleneksel yöntemin aksine taşıyıcı çelik bileşenin yüksekliğinin fazla olduğu durumlarda da güvenli bir şekilde uygulanabilmektedir (Boake, 2015; sf.94).



Şekil 4.6 : QRC West Binası'nın büyük boyutlu dairesel çelik kolonlarının betonla doldurulması (Boake, 2015; sf.94).



Şekil 4.7 : Çelik kutu kolonların tabandan basınç yoluyla doldurulması yöntemi (NCCI, 2014).

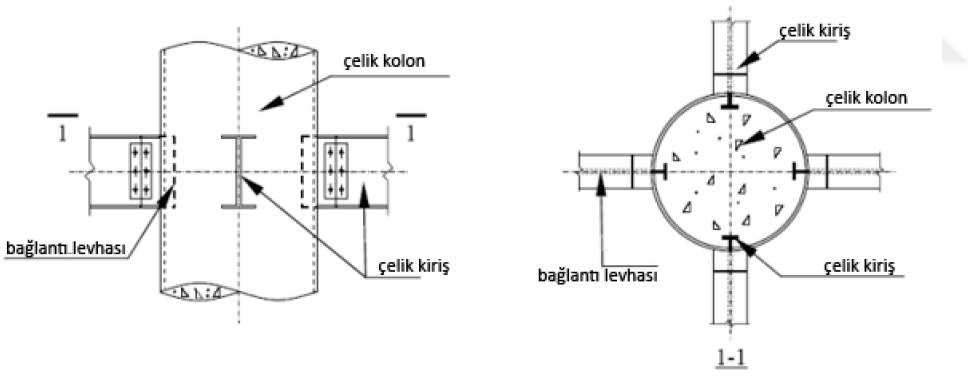
Çin'de bulunan SEG Plaza Binası, bu yöntemle yangına karşı koruma sağlanmış örnek yapılardan biridir (Şekil 4.8 ve Şekil 4.9). Toplamda 76 kattan oluşan bu yapıda yer

alan boru enkesitli kolonların enkesit çapları 900 - 1600 mm arasında değişmekte olup, bu kolonların içerisi betonla doldurulmuştur (NCCI, 2014).



Şekil 4.8 : SEG Plaza Binası'nın çelik kolonlarının yapım aşaması (NCCI, 2014).

Bu yapı için yangına karşı koruma önlemleri, binanın yangına karşı üç saat dayanım gösterebileceği şekilde uygulanmıştır. İçerisi betonla doldurularak yangına karşı korunan çelik kolonların dış yüzeyi, düşük yoğunluklu bir yalıtım malzemesi ile kaplanarak yapının toplam yangın dayanım süresi arttırılmıştır (NCCI, 2014).



Şekil 4.9 : SEG Plaza Binası 'nın çelik kolon-kiriş birleşim detayı (NCCI, 2014).

Bu pasif koruma yönteminin uygulandığı bir diğer çelik yapı örneği ise Londra'da bulunan 12 katlı Moorgate Exchange Office Binası'dır (Şekil 4.10). Yapının iç kolonlarının çapı 508 mm, dış kolonların çapı ise 457 mm'dir. Yapıda yangına karşı 90 dakikalık bir koruma sağlanması için gereken intümesan boya kullanım ihtiyacını ortadan kaldırmak amacıyla, boru enkesitli kolonların içerisi betonla doldurulmuştur. Bu yöntemin tercih edilmesiyle dış kolonlardaki yalıtım kaplamasının hasar görme ihtimali ortadan kaldırılmıştır. Ek olarak, tüm kolonlar mimari olarak görünür şekilde

tasarlandığı için estetik etki göz önünde bulundurularak kolonların dış yüzeyi ince katmanlı bir dekoratif boya ile boyanmıştır (NCCI, 2014).



Şekil 4.10 : Moorgate Exchange Office Binası'nın çelik kolon birleşim detayı (NCCI, 2014).

Bu yapıda, sahadaki uygulama kolaylığı açısından çelik donatıların kolon içerisine yerleşimi saha dışında yapılmış ve beton dökümü sahada tamamlanmıştır. Bu yöntemle toplam inşaat süresinin kısaltılması sağlanmıştır. Kolonların içerisindeki beton ise, tabandan basınç yolu ile doldurulmuştur (Şekil 4.11) (NCCI, 2014).



Şekil 4.11: Moorgate Exchange Office Binası'nın çelik kolon taban detayı (NCCI, 2014).

4.2.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım

Yapısal çelik elemanların dış yüzeylerinin özel aletlerle basınçlı olarak püskürtme sıva işlemiyle kaplanması işlemidir (Şekil 4.12). Yangına dayanıklı sıva karışımının püskürtülmesi ile yapılan bu yöntem, uygulama bakımından diğer pasif koruma yöntemleriyle kıyaslandığında daha hızlı ve ekonomik bir seçenek olarak ön plana çıkmaktadır (Blanc, A. ve diğerleri, 1993).



Şekil 4.12 : Çelik taşıyıcı kolonlara püskürtme sıvanın uygulanması (Url-27).

Püskürtme yöntemiyle uygulanan sıvaların yangına karşı koruma amaçlı kullanılmasının nedeni, kullanılan karışım içerisindeki malzemelerin aşırı gözenekli yapıları nedeniyle çok düşük düzeyde ısı iletkenlik değerlerine sahip olmalarıdır (Zhang, 2015).

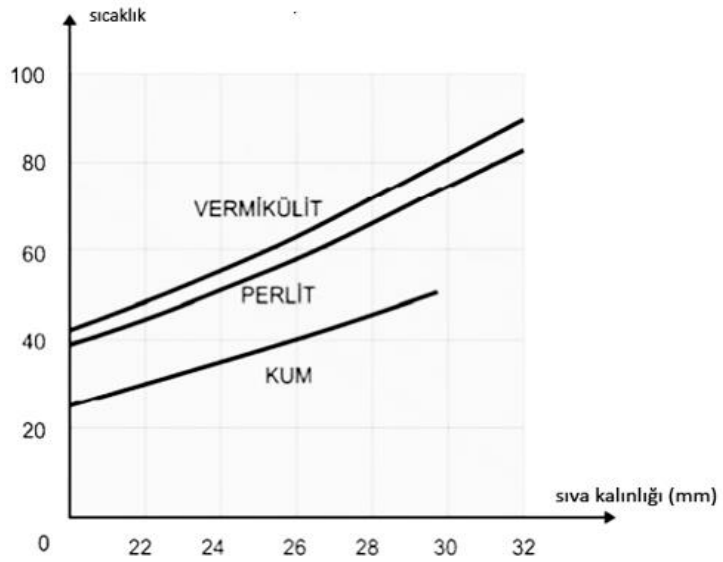
Bu sıvalar, tipik olarak çimentolu (alçıtaşı veya Portland çimentosu) bağlayıcılardan ve inorganik gözenekli agregalardan (perlit, vermikülit, vb.) veya mineral yünlerden oluşmaktadır. Bunlar arasında çimento esaslı püskürtme sıvalar daha yaygın olarak kullanılmakla beraber en çok kullanılan türü Portland çimentosu esaslı sıvalardır (Zhang, 2015).

Buna ek olarak, yangına karşı pasif korumada kullanılan püskürtme sıvalar, karışımında bulunan bağlayıcı malzemelerin türüne göre (çimento, vermikülit, alçı vb.) yüksek, orta ve düşük yoğunluklu olarak çeşitlilik göstermektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2 : Çelik taşıyıcı bileşenleri yangına karşı korumada kullanılan püskürtme sıvaların fiziksel özellikleri (Orbay, 1997).

Püskürtme sıva malzemesinin türü	**Püskürtme sıva malzemesinin fiziksel özellikleri**		
	Yoğunluk (kg/m^3)	Isıl iletkenlik katsayısı (W/(m.°C))	Özgül ısı (J/(kg.°C))
Mineral lif	300	0,12	1200
Vermikülit çimento	350	0,12	1200
Vermikülit çimento	550	0,12	1200
Vermikülit alçı	650	0,12	1200

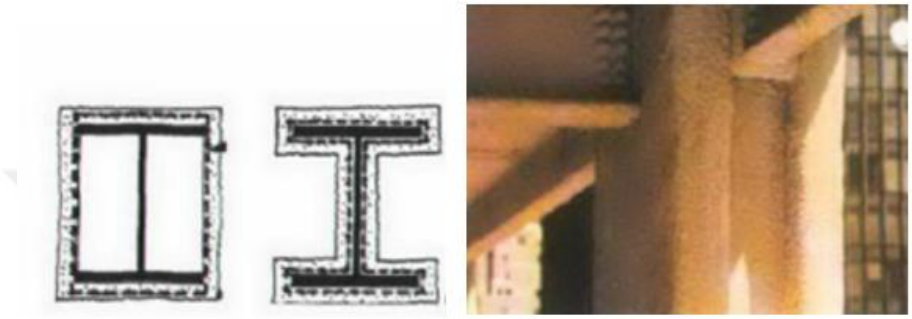
Pasif korumada kullanılan püskürtme sıva katmanı, taşıyıcı yapı bileşenlerine 10 mm - 60 mm arasında uygulanmaktadır. Bu koruma yöntemi ile genellikle 2 - 4 saat arasında yangın dayanımı düzeyi sağlanabilmektedir (Beyhan, 2015). Püskürtülen sıva malzemesinin kalınlığı, yatay ve düşey taşıyıcı elemanların formuna ve boyutlarına göre de değişiklik göstermektedir (Şekil 4.13) (Demirel ve Özkan, 2003: sf. 98).



Şekil 4.13 : Farklı türdeki yalıtım malzemelerinde sıva kalınlıklarının sıcaklık değişimleri (Harmanty, 1993).

Bu yöntem, her çeşit kiriş, kolon ve kafes kirişlerde ve karmaşık birleşim detaylarında uygulama kolaylığına sahiptir (Arpacıoğlu, 2004: sf: 44).

Uygulama öncesinde, püskürtme sıva malzemesinin çelik yüzeye tutunabilmesi için yüzeyin kumlama ve astarlama ile işleme hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Yangın dayanım süresinin arttırılmasının istendiği durumlarda ise, çelik taşıyıcı elemanın çevresi tel hasır ile sarılarak yüzeye uygulanacak püskürtme sıva kalınlık miktarının artırılmaktadır (Şekil 4.14). Ayrıca, bu yöntem ile püskürtme sıva katmanını yüzeyde tutacak ek bağlantı elemanlarına gerek kalmadan uygulama kolaylığı sağlanabilmektedir (Smith, 2000).



Şekil 4.14 : Püskürtme sıva yönteminin çelik profillere uygulamaları (Smith, 2000).

Püskürtme sıva işlemi yapılırken uygulama esnasında çelik taşıyıcı elemanlar haricinde aynı ortamda bulunan diğer yapı elemanlarına da sıva sıçrayarak yüzeyler kirlenebilir, zarar görebilir. Bu yüzden, püskürtme sıva ile yangın korumasının hangi yapım aşamasında gerçekleştirileceğine tasarım sürecinde karar verilerek planlanması ve buna yönelik ek önlemlerin alınması gerekmektedir (Blanc ve diğerleri, 1993).

Uygulama esnasında çelik yüzeylere tek geçiş ile sıva püskürtüldükten sonra yangın dayanım süresine göre belirlenen yalıtım kalınlığının sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmelidir getirilmelidir (Şekil 4.15). Bu yüzden, ilk geçiş sonrası uygulanan yalıtım kalınlıkları kontrol edilmeli ve gerekirse ikinci bir geçiş ile yüzeylerdeki kalınlık değerleri gereken düzeye (Url-27).



Şekil 4.15: Püskürtme sıva uygulaması sonrası yalıtım kalınlıklarının kontrol edilmesi (Url-27).

Bunlara ek olarak, püskürtme sıva işlemi ile yangın koruması yapıldıktan sonra yapı elemanının yüzeyi pürüzlü ve estetik olmayan bir görünüm kazanmaktadır (Şekil 4.16 ve Şekil 4.17). Bu yüzden, bu koruma işlemi genellikle yapıların fazla görünür olmayan bölümlerinde veya bodrum katları, asma tavan altı gibi estetik kaygının yüksek düzeyde olmadığı yerlerde kullanımı tercih edilmektedir (Blanc ve diğerleri, 1993).



Şekil 4.16 : EMP Müzesi (Frank Gehry, Seattle, Washington) (Boake, 2015).

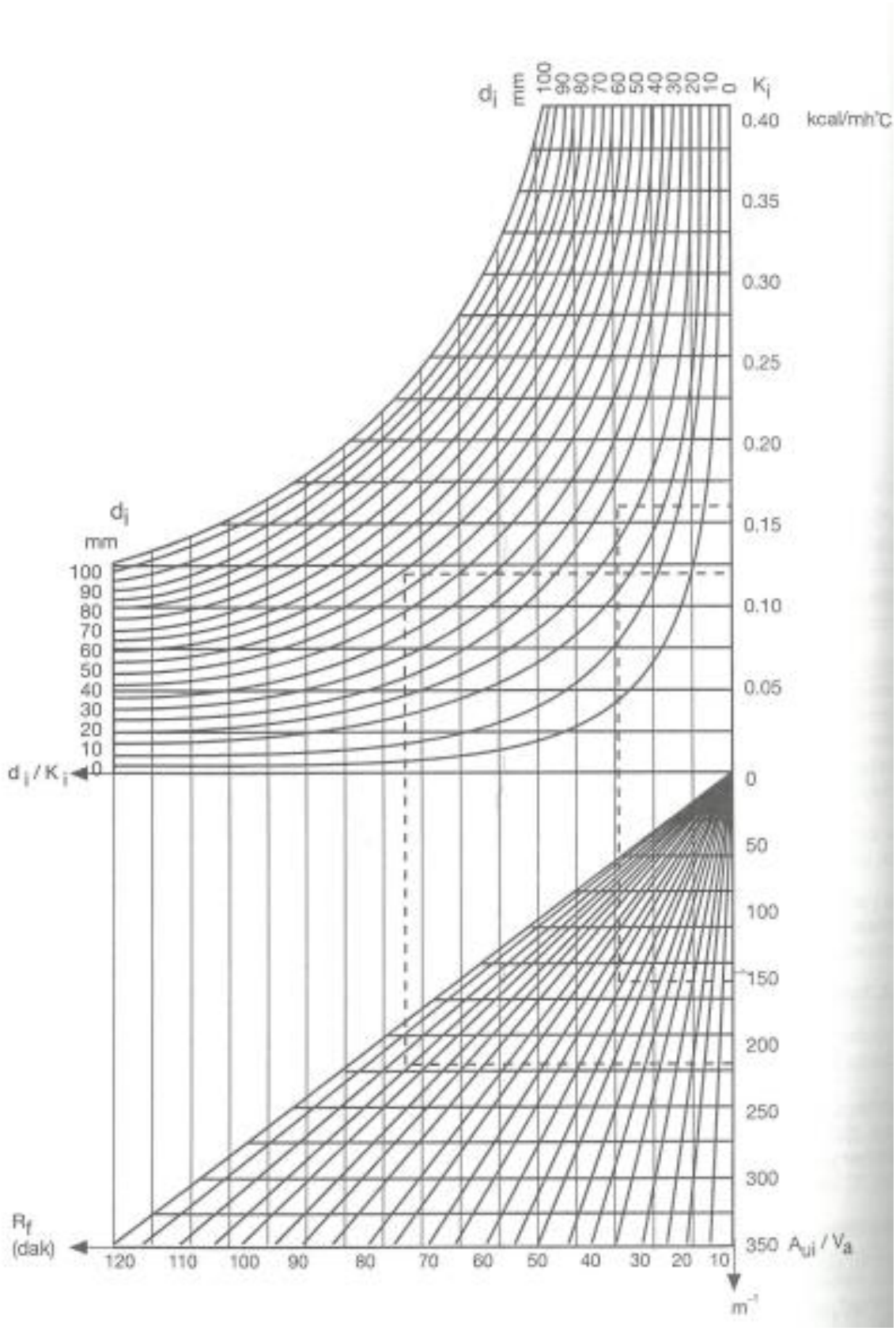
Görünür yerlerde bulunan yapısal çelik elemanlarda uygulama durumlarında ise, yapı elemanına püskürtme sıva ile koruma işlemi yapıldıktan sonra yüzey üzerine kaplama tarzı ek bir katmanlama işlemi yapılarak estetik bir görünüm verilebilmektedir. Uygulanacak bu ek katman, aynı zamanda püskürtme sıva katmanını dış etkilere karşı koruyacak bir bariyer işlevi de görmektedir (Blanc ve diğerleri, 1993).



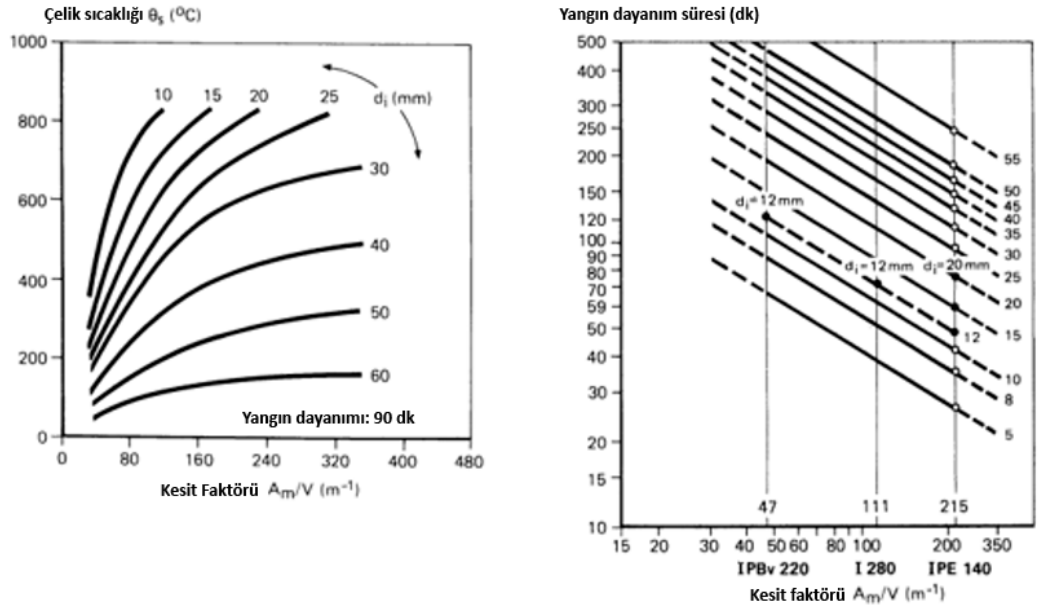
(a) (b)

Şekil 4.17 : (a): Püskürtme işlemi sonrası çelik elemanların son görünümü (Url-28). (b): Le Pain Quotidien Cafe, Kanyon AVM (Karaca, 2022).

Püskürtme sıva ile pasif yangın koruma uygulamasında, yapısal çelik elemanlara uygulanacak yalıtım kalınlıklarının belirlenmesine birtakım abaklar oluşturulmuştur. Bu abaklarda yer alan verilerden yararlanılabilmesi için çeliğin kritik sıcaklık değeri, kesit faktörü, yangın dayanım süresi ve püskürtmede kullanılan sıva malzemenin ısıl iletkenlik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir (Şekil 4.18 ve Şekil 4.19).



Şekil 4.19 : Ağırlıkça hafif yalıtımlar önboyutlama abağı (Belçika yangın araştırma ulusal komisyonu, kritik sıcaklığın 540 ºC olduğu durumlar için hazırlanmıştır (Arda & Yardımcı, 1995: sf. 26).



Şekil 4.18 : Fransa (solda) ve Almanya'da (sağda) tipik bir yangın yalıtım malzemesinin termal özelliklerini belirleme abakları (Twilt ve diğerleri, 1994: sf. 21).

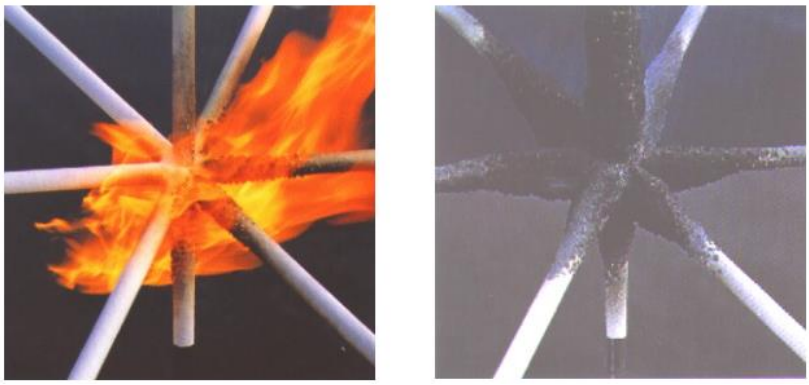
4.2.3 İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım

İntümesan özellikli yangın koruyucu kaplamalar ilk olarak 1938 yılında Heinrich Tramm ve arkadaşları tarafından geliştirilerek patentleşmiştir. İntümesan katkılar, yangın sürecinde polimerik malzemenin yüzeyinde köpüksü bir kömür tabakası meydana getirmektedir. Oluşan bu kömür tabakası, ortamdaki oksijenin polimer malzemeye doğru yayılımını sağlarken, aynı zamanda da yanıcı özellikteki maddelerin yüzeyinde yangına karşı koruyucu bir bariyer işlevi görmektedir (İbibikcan, 2011).

İntümesan (genleşen) boyalar, yangın esnasında kömürleşen bir tabaka oluşturduğu için yangın esnasında çelik taşıyıcı elemanlara etkiyen yüksek sıcaklık etkisini azaltmaktadır. Bu sayede, taşıyıcı sistemin dayanımını yitirmesini geciktirerek bina içerisindeki kullanıcıların ortamdan tahliye edilmesi ve yangına müdahale edilerek söndürülmesi için zaman kazandırmaktadır (İbibikcan, 2011: sf.110).

Boya içerisinde yer alan farklı kimyasal bileşiklerin yangın esnasında yüksek ısı etkisiyle tepkimeye girmesi ile oluşan bu karbon köpük tabakası, intümesan boyanın uygulandığı orijinal film kalınlığının 10 ile 100 kat arasında bir kalınlık düzeyine ulaşmaktadır. Oluşan bu tabaka, ısı geçişini engelleyici fiziksel bir bariyer oluşturarak

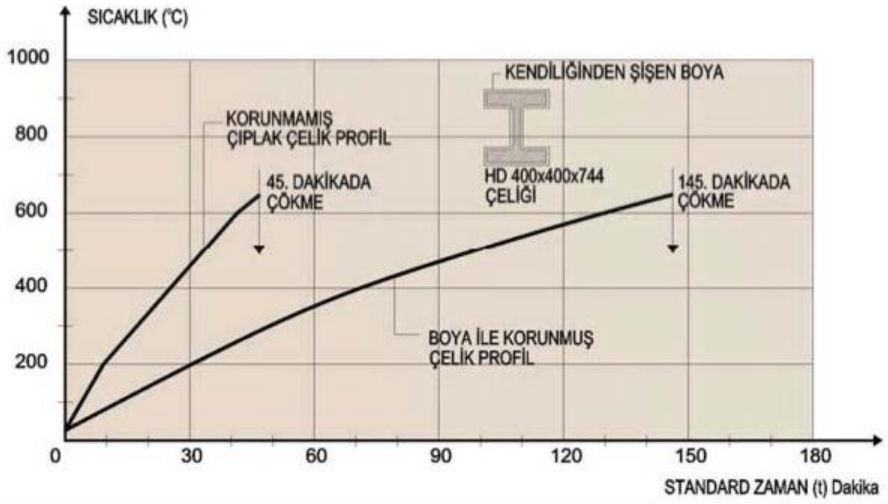
boyanın altında bulunan çelik elemanı yangına karşı belirli bir süre boyunca korumaktadır (Şekil 4.20) (İbibikcan, 2011: sf.110).



Şekil 4.20 : İntümesan boyanın yangın esnasındaki ve sonrasındaki görünümü (Url - 29).

İntümesan boya uygulaması, yüzeylerin görünümünde estetiği bozacak düzeyde bir etki oluşturmadığı için mimari olarak görünür çelik taşıyıcılı sistemlerde sıklıkla tercih edilen pasif koruma yöntemlerinden biridir (Eren & Güzelçoban Mayuk, 2013: sf. 162).

Bir laboratuar çalışmasında, intümesan boya uygulaması yapılmış çelik yatay ve düşey taşıyıcı elemanların belirli zaman aralıklarında gösterdikleri yangın dayanımları Şekil 4.21'de gösterilmiştir (Öner, 2000).



Şekil 4.21: İntümesan (genleşen) boya ile korumanın yangın dayanımına etkisi (IISI, 1993).

İntümesan (genleşen) boyalar kalınlıklarına göre sınıflandırıldığında ise iki grupta incelenmektedir:

İnce tabakalı boyalar: İnce tabakalı boyalar solvent ya da su kökenlidir. Genellikle, 30 dakika yangın dayanımı için 0.25-1.00 mm arası kalınlık, 120 dakikalık yangın dayanımı için ise 5.0-6.0 mm arasında bir boya kalınlığı uygulanması gerekmektedir. İnce yapısı sebebiyle yapısal çelik elemanların yüzeyinde istenen estetik görünüm sağlanabilmektedir (Şekil 4.22). Çelik yapılarda en fazla kullanılmakta olan intümesan boya türüdür (Anon., 2001).



Şekil 4.22 : Bloomberg Building (Foster + Partners, Londra, 2017) (Boake, 2015: sf. 91).

Su bazlı intümesan boyaların ısı etkisine karşı beklenen düzeyde etki gösterebilmeleri için; yapısal bileşenlerinde bağlayıcı reçine, pigment, amonyum polifosfat, tiksotropik, dolgu malzemeleri, pentaeritritol, köpük kesen ajan, şişme ajanı, kuruma engelleyen ajan gibi maddeler bulunmaktadır. Yangın esnasında boya yüzeyinde oluşan kömürleşen tabaka ise içerisinde bulunan hava gözeneklerinin homojen olarak dağılımını sağlayarak yüzeyde süngerimsi bir görünüm oluşturmaktadır (Şekil 4.23) (İbibikcan, 2011).



Şekil 4.23 : İntümesan boyanın ısı etkisinde genleşerek oluşturduğu yüzey (Url-30).

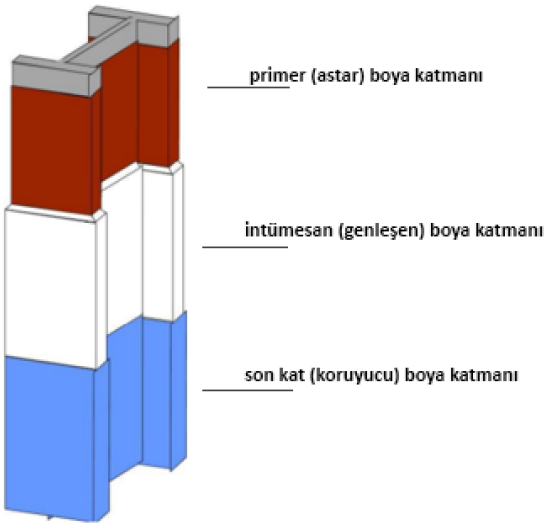
Kalın tabakalı boyalar: Bu boyalar epoksi kökenli olmakla birlikte 30 dakikalık yangın dayanımı için genellikle 2.0-4.0 mm arası, 120 dakikalık yangın dayanımı için ise 15-20 mm arası boya kalınlığı gerekmektedir (Şekil 4.24) (Anon., 2001).



Şekil 4.24 : Epoksi esaslı intümesan boyanın taşıyıcı sistemde kullanımı, Leadenhall Binası, Londra (Url-31).

İntümesan boya uygulamasında yapısal çelik elemanların yüzeyine farklı özelliklere ve yapılara sahip üç farklı boya tabakası sürülmesi gerekmektedir. İlk olarak, temizlenmiş ve boyamaya uygun hale getirilmiş yüzeye astar boya uygulaması yapıldıktan sonra yangına karşı korumayı sağlayacak olan intümesan boya yüzeye uygulanmaktadır.

Yangına karşı korumayı sağlayacak olan bu boya katmanı, çevresel ve dış etkilere yeteri düzeyde dayanıklı olmadığı için son kat boyası olarak su geçirimsiz bir koruyucu boya tabakası ile bu yüzeyin kaplanması gerekmektedir (Şekil 4.25) (Çobanoğlu, 2003).

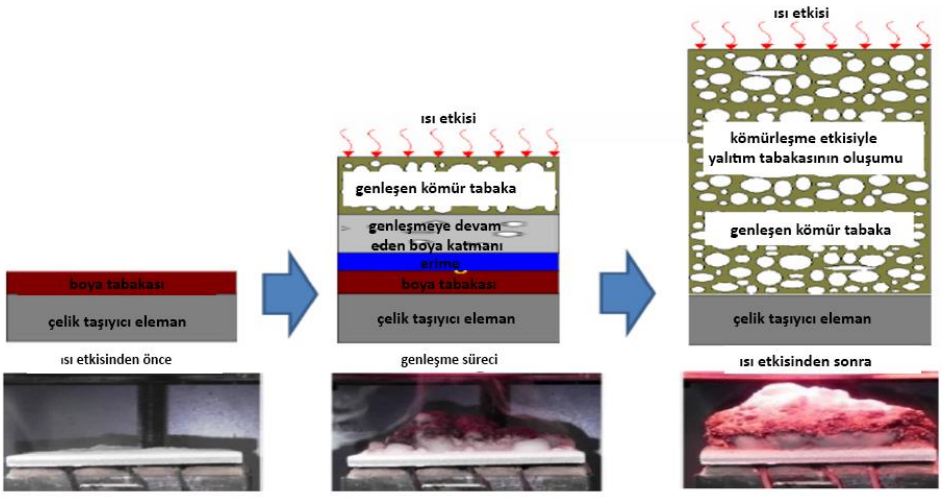


Şekil 4.25 : Çelik yapı eleman üzerine uygulanan boya katmanları (Url-32).

Dünyada intümesan(genleşen) boyalar ile ilgili ABD, Rusya ve AB olmak üzere üç farklı standart bulunmaktadır. Standartlara uygun olarak piyasada yer alan intümesan boyalar; yangına karşı koruma süresine göre 30 (standart altı), 60, 90 ve en çok 120 dakika dayanımlı olarak üretilmektedir (İbibikcan, 2011: sf. 110).

İntümesan boyanın yangın esnasında maruz kaldığı ısı etkisi ile genleşmesiyle birlikte başlayan başlayan kimyasal tepkime süreci ise şu şekilde ilerlemektedir (Şekil 4.26);

- Yangın esnasında ortaya çıkan ısı polimerik bağlayıcıyı yumuşatmaya başlar ve bu organik asidi açığa çıkması,
- Poliollerin karbonizasyonu,
- Melaminin ayrışmasıyla açığa çıkan gaz, eriyen karışımı genleştirmeye başlaması,
- Kimyasal bağlanma reaksiyonu sonucunda köpükleşen kömür tabaka katılaşarak gereken düzeyde yangın yalıtımını sağlamasıdır (İbibikcan, 2011).



Şekil 4.26 : İntümesan boyanın ısı etkisiyle gösterdiği kimyasal tepkime aşamaları (Url-33).

İntümesan boyaların yapısal çelik elemanlara uygulanması öncesinde aşağıda yer alan kriterlerin tamamlanması gerekmektedir:

- çelik taşıyıcı elemanlara uygulanacak boya kalınlığının belirlenmesi,
- çevresel gereksinimlerin tanımlanması
- boya işlemi öncesi gerekli yüzey ve ortam hazırlıklarının yapılması
- gerekli ekipman hazırlıklarınının tamamlanması gerekmektedir.

Çelik taşıyıcı elemanlara uygulanacak boya kalınlığının belirlenmesi: Bina için gereken yangın dayanım süresi göz önünde bulundurularak, yapısal çelik elemanın yangına maruz kalan yüzeyleri göz önünde bulundurularak kesit faktörü (H_p/A) hesaplandıktan sonra uygun boya kalınlıkları belirlenmektedir.

Çevresel gereksinimlerin tanımlanması: Intümesan boya uygulaması yapılacak olan ortamın ve yapısal çelik elemanının yüzey sıcaklığı 5 ^{0}C 'den düşük olmaması; bağıl nem oranının ise %85'i geçmemesi gerekmektedir (Url-34).

Boya işlemi öncesi gerekli yüzey ve ortam hazırlıklarının yapılması: Uygulama öncesinde boyanacak yüzeyin kumlama ve astarlama yapılarak boya uygulaması için uygun hale getirilmesi gerekmektedir (Url-34). İntümesan boyaların uygulama işleminin ise püskürtülerek veya fırça ve rulolarla sürülerek yapılması gerekmektedir (Şekil 4.27).



Şekil 4.27 : İntümesan boya uygulaması için gerekli ekipmanlar (Url-34).

Yapısal çelik eleman için gerekli boya kalınlık değerinin elde edilebilmesi için, boyanın birden fazla kat halinde ve kontrollü ölçümler yapılarak uygulanması gerekmektedir (Şekil 4.28). Ayrıca, estetik amaçlara uygun olarak istenilen renk pigmentlerinin bu boya karışımının içerisine eklenerek uygulanabilmesi mümkündür.



Şekil 4.28 : Katlar arası boya kalınlığının kontrol edilmesi (Url-27).

Bunlara ek olarak, intümesan boya uygulaması sahada ve fabrikada (saha dışında) olmak üzere iki farklı şekilde yapılabilmektedir (Şekil 4.29). Çizelge 4.3'te sahada ve fabrikada (saha dışında) yapılan uygulamalara yönelik yapılan karşılaştırılmalar yer almaktadır.

Çizelge 4.3 : İntümesan boyanın sahada ve saha dışında uygulama yöntemlerinin karşılaştırılması.

	Sahada uygulama	**Fabrikada uygulama**
Nakliye ve montaj	Çelik elemanların montajı, boya uygulaması öncesinde tamamlanmış olduğu için risk bulunmamaktadır.	Boya uygulaması tamamlanmış çelik elemanların sahaya nakliyesi ve montajı esnasında boya tabakasında çizilme vb. riski bulunmaktadır.
Uygulama ve kalite kontrolü	Çelik eleman yüzeylerin boya kalınlığının kontrol edilebilmesi bazı durumlarda zorlaşmaktadır.	Uygulama fabrikada yapıldığı için boya kalınlıklarının uygunluk düzeyi kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.
Dış çevre koşullarından etkilenim	Öngörülemeyen hava koşulları, uygulamanın tamamlanmasını geciktirebilir ve toplam inşaat süresini uzamasına sebep olabilmektedir.	Uygulama kontrollü bir ortamda gerçekleştiği için, dış çevre ve hava koşulları uygulamayı etkilememektedir.
Çevre kirliliği ve ek önlemler	Diğer yapı elemanlarının yüzeylerinin boyadan etkilenmemesi için uygulama öncesi ortamda ek önlemlerin alınması gerekmektedir.	Ek bir önlem gerekmemektedir.
Erişilebilirlik	Sahada çelik elemanlar kurulu halde bulunduğu için boyama esnasında bazı yüzeylere (karmaşık geometri, gizli birleşim noktaları vs.) erişim zorlaşmaktadır.	Çelik elemanların tüm yüzeylerine kolaylıkla erişim sağlanabilmektedir.



Şekil 4.29 : İntümesan boya uygulamasının saha dışında yapılması (Url-35).

Roma'da bulunan ESSO Palace Binası, yangına karşı pasif korumada intümesan boyanın kullanıldığı yapı örnekleri arasında yer almaktadır (Şekil 4.30). 1978 yılında inşa edilen bu yapı, daha sonraki yıllarda ofis binası olarak kullanılmaya karar verilmesinin ardından taşıyıcı çelik elemanları için pasif koruma yöntemleri uygulanmıştır. Yapının hem iç mekanında hem de dış cephesinde yer alan görünür çelik taşıyıcı elemanlar, yangına karşı koruma sonrasında eski estetik görünümünü yitirmemeleri için intümesan boya ile kaplanmıştır. Bu elemanların yangın dayanımı, bulundukları konuma göre 45 ile 60 dakika arasında değişim göstermektedir (Url-36)

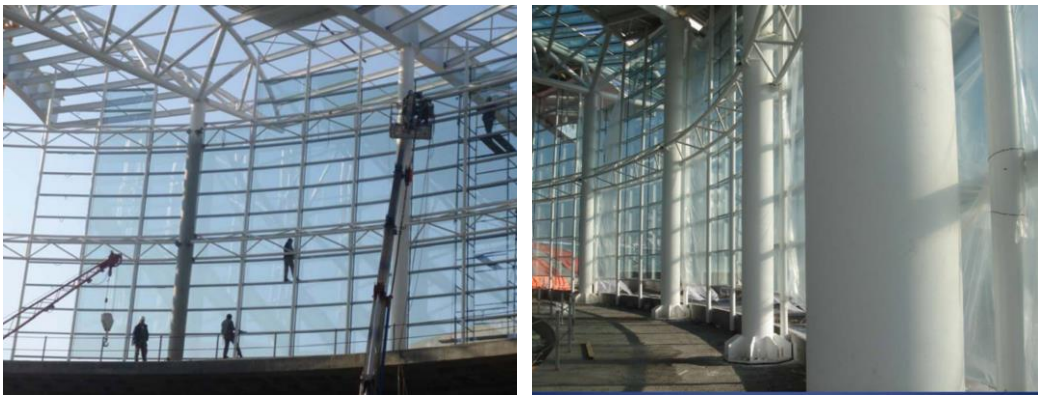


Şekil 4.30 : ESSO Palace Binası (Julio Lafuente, Roma, 1978) (Url-36).

İntümesan boya uygulaması ile yangına karşı pasif koruma sağlanan mimari yapılara verilebilecek bir diğer örnek ise İstanbul'da bulunan İstinye Park Alışveriş Merkezi Binası'dır. Yapının ofis ve yönetim bölümlerinde bulunan yapısal çelik elemanlar 60 dakikalık; alışveriş katlarında bulunan yapısal çelik elemanlar ise 90 dakikalık yangın dayanım performansı gösterecek şekilde intümesan boya uygulaması ile yalıtılmıştır (Şekil 4.31 ve Şekil 4.32).



Şekil 4.31 : İstinye Park AVM Binası'nın ofis bölümüne ait intümesan boya uygulaması (Url-37).

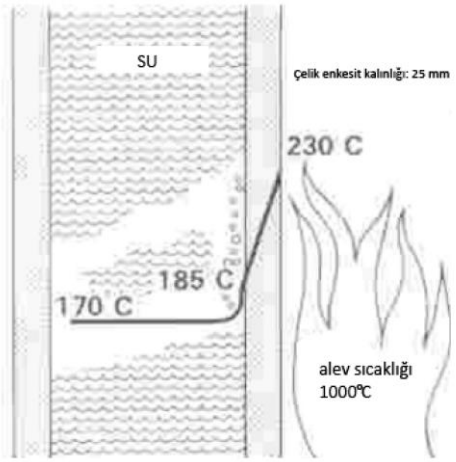


Şekil 4.32 : İstinye Park AVM Binası'nın alışveriş katlarına ait intümesan boya uygulaması (Url-37).

4.2.4 Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması

Yangına karşı korumada ek bir yalıtım katmanı uygulanmasını gerektirmeyen ve yangın korumasını çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaşımı yaparak sağlayan pasif koruma yöntemidir. Bu yangına karşı koruma yönteminin kullanılabilmesi için yapısal çelik elemanların boru ya da kutu enkesitli kapalı profillerden oluşması ve bu profillerin içerisine çelik su borularının yerleştirilmesi gerekmektedir.

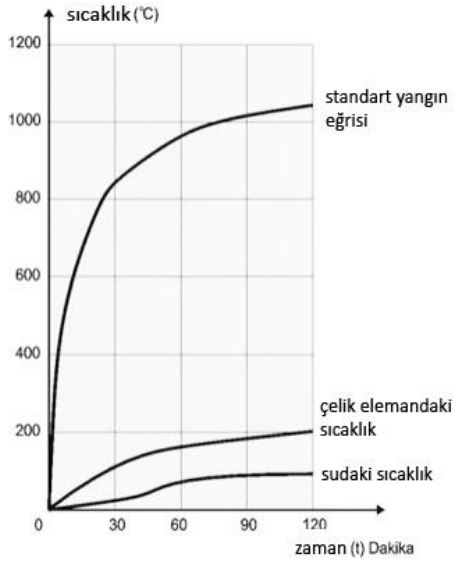
Yapısal çelik elemanların içinden su dolaştırılması ile yangında ortaya çıkan ısı enerjisi su tarafından absorbe edilerek çelik eleman üzerindeki yangın etkisi azaltılmaktadır (Şekil 4.33) (Arda & Yardımcı, 1995).



Şekil 4.33 : Yangın esnasında su dolu kolondaki ısı dağılımının gösterimi (Url-38).

Bu sistemde taşıyıcı bileşenlerin içerisinde yer alan su, yangının meydana getirdiği sıcaklık artışı ile ısınarak yukarıya doğru hareket etmekte ve çelik bileşenlerin soğutulma işlemini sürdürmek amacıyla su tankından su aktarımı meydana gelmektedir. Sistemde dolaşımı sağlanan suyun sıcaklığı , yangının etkisi ile kaynama

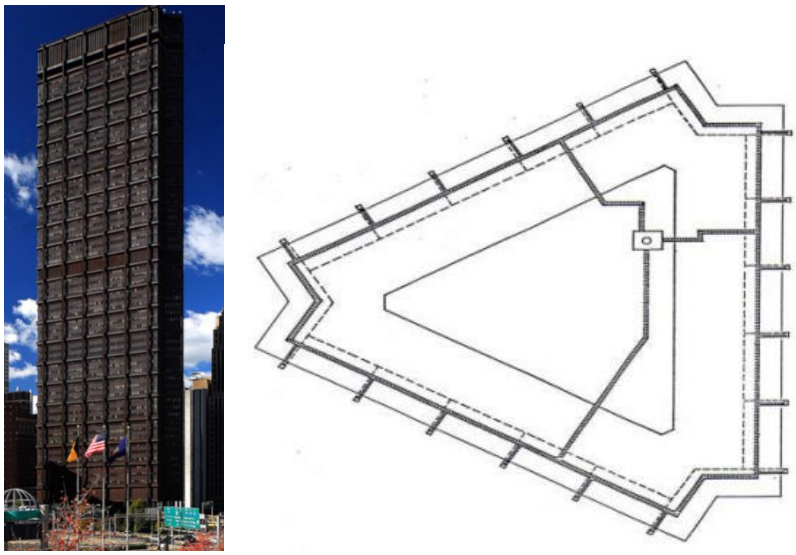
noktasını geçse dahi çelik taşıyıcı bileşenlerin sahip olduğu sıcaklık değeri 100 - 200 ^{o}C ‘yi geçmemektedir (Şekil 4.34).



Şekil 4.34 : Su dolaşımlı koruma uygulamasında su ve çelik elemanların sıcaklık oranları (IISI, 1993).

Bu sayede yapısal çelik elemanlar, yangına karşı korunarak taşıyıcılığını sürdürmektedirler. Su, yüksek özgül ısı katsayısına sahip olması ve buharlaşma ile büyük miktarda ısıyı absorbe edebilme kapasitesi sayesinde çok iyi bir soğutucudur (Arda ve Yardımcı, 1995). Soğutma sisteminde kullanılması gereken su miktarı, çelik taşıyıcı elemanın maruz kaldığı yangın yüküne göre değişiklik göstermektedir (Sunar, 2010: sf. 93).

Çelik bileşenlerin su dolaşımı yoluyla yangına dayanıklı hale getirilmesi ile ilgili ilk patent 1884 yılında ABD'de alınmıştır (Bond, 1988). USS Corporation Head Office binası, ABD’de çelik yapıların yangına karşı korumasında bu yöntemin kullanıldığı ilk örnektir. Bu yapı, Pittsburgh’ da 1970 yılında 64 katlı olarak inşa edilmiştir. Çelik taşıyıcı sistemde yer alan 18 adet kolon, 610 x 914 mm ebatlarında çelik kutu profillerden imal edilmiştir. Yüksek bir yapı olması sebebiyle, su dolaşım sistemindeki hidrostatik basıncın oluşmasını önlemek için sistem her 16 katta bir bölünerek toplamda 4 zona ayrılmıştır. Her bölge için ayrı bir su deposu ve pompa bulunmaktadır. Buna ek olarak, dolaşım suyu içerisindeki meydana gelebilecek pas ve donma olaylarını engellemek için birtakım katkılar eklenmiştir. Koruma sadece kolonlar için uygulanmış, yapının yatay taşıyıcı bileşenleri ise püskürtme sıva yöntemi ile korunmuştur (Bennets & Thomas, 2002).



(a) (b)

Şekil 4.35 : (a): USS Corporation Head Office binasının dış cephesinde yer alan kolonların görünüşü (Url-39).
(b):Yapınının dış kolonları için oluşturulmuş yangın koruma planı (Url-39).

Yangına karşı korumada kullanılan diğer yöntemlerde genellikle taşıyıcı elemanlara ısı geçişi geciktirilirken, bu yöntemde çelik bileşenlerden su dolaşımı yapılarak taşıyıcı sistem daimi olarak yangına dayanımlı hale getirilmektedir. Bu yöntemin avantajları genel olarak şunlardır:

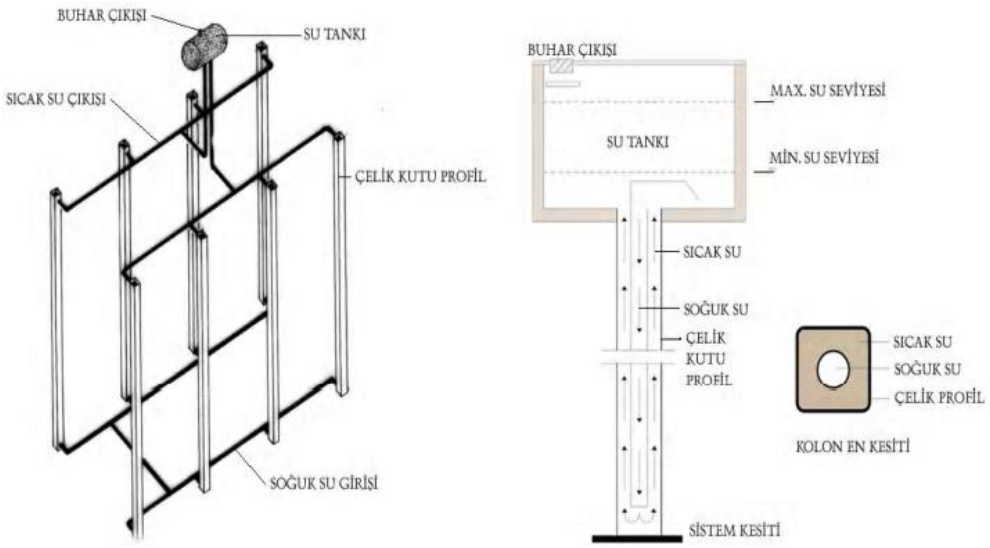
- Yapısal çelik eleman yüzeyine dışarıdan yapılacak olan yalıtım ihtiyacının ortadan kalkması, toplam kolon boyutunda azalmaya neden olarak sirkülasyon için daha fazla hacim sağlanmaktadır.
- Çelik elemanların boyutunun artmasıyla birlikte kullanılacak yalıtım ürünlerinin miktarı artacağı için toplam maliyette de bir artış yaşanmaktadır. Bu yöntemde ise elemanların boyut artışı maliyeti çok fazla değiştirmemektedir.
- Yapısal çelik elemanların dış yüzeyini gizleyecek bir işlem gerektirmediği için mimari olarak bileşenler daha net olarak ifade edilebilmektedir.
- Yapının yangına maruz kalması durumunda yapısal çelik elemanlar yangından fazla etkilenmeyeceği için, bu elemanların güçlendirme ve iyileştirme maliyetleri diğer koruma sistemlerine göre daha düşük olmaktadır (Bond, 1988).

Su dolaşım yoluyla soğutma sistemi, yapılarda iki farklı şekilde uygulanmaktadır. Ya yalnızca yangına karşı korunumu yüksek önem teşkil eden birincil düşey taşıyıcı

bileşenlerde (kolonlarda) ya da yapıdaki tüm kolon ve kirişleri kapsayacak şekilde taşıyıcı sistemin tamamına uygulanmaktadır (Arda & Yardımcı, 1995).

Bu sistem yanızca düşey bileşenler için kullanıldığında, sistemin doğal dolaşımlı olması yeterlidir. Bu sistemde kolonların içerisinde sürekli olarak su bulunur ve bir yangın anında su ısındığında suyun yoğunluğu azalacağı için üstteyer alan su deposuna geri dönmektedir. Suyun ısınması ile birlikte ortaya çıkan buhar depoya yükselmekte ve buradan dışarıya tahliye edilmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

Yalnız kolonların korunduğu bu sistemde, kolonların içerisinde yer alan su borularının içi sürekli olarak su ile dolu olduğu için, dolaşımda kullanılan suyun içerisine potasyum karbonat veya buna benzer özellikteki bir antijel malzeme eklenerek donmaya karşı tedbir alınması gerekmektedir. Ek olarak, korozyon etkisine karşı potasyum nitrat gibi antikorozif katkılar suyun içerisine eklenmesi gerekmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

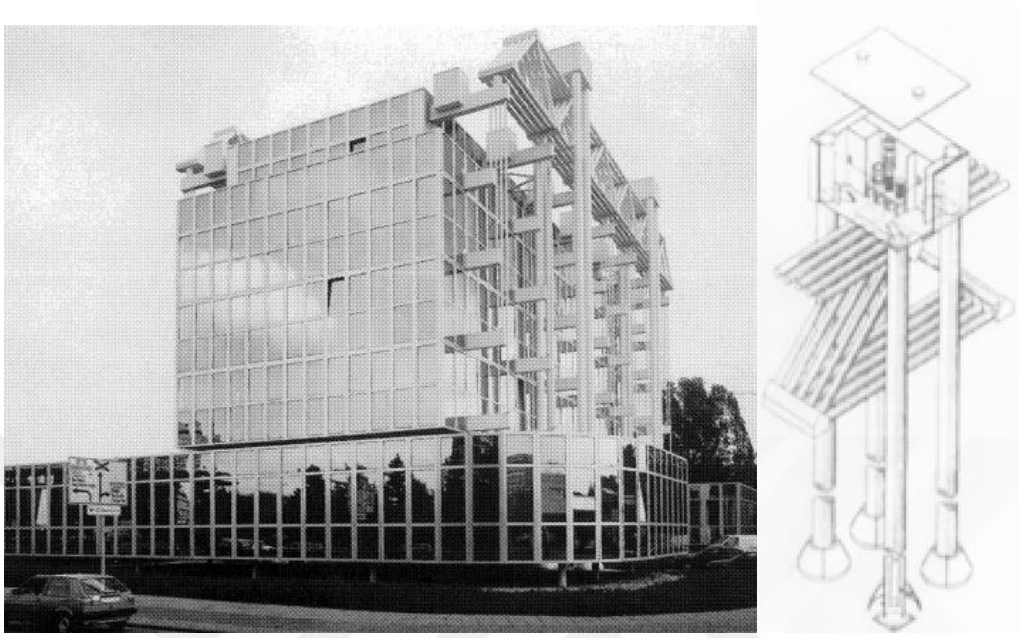


Şekil 4.36: Su dolaşımı sisteminin düşey taşıyıcı bileşenlerdeki çalışma prensibi (Gewain ve diğerleri, 2003).

Buna örnek olarak Hannover'de bulunan NorConhaus binası (Şekil 4.37) verilebilir. Toplamda beş kattan oluşan bu yapıda dış kolonlara kompozit döşeme sistemlerle birlikte yangına karşı 90 dakikalık dayanım gösterecek bir su dolanım sistemi oluşturulmuştur (Twilt ve diğerleri, 1994: sf.47).

Koruma için gerekli olan su depoları, mimari bir eleman görünümü oluşturacak şekilde tasarlanmıştır (Eurofer, 1990). Su dolaşım sistemi, her biri dört kolon ve dört askı

taşıyıcı elemandan oluşacak şekilde zonlara ayrılmıştır. Su dolaşım sistemi haricinde binada herhangi bir yangın yalıtımı ise uygulanmamıştır (Twilt ve diğerleri, 1994: sf.47).



(a) (b)

Şekil 4.37 : Doğal su dolaşımı ile yangına karşı korunan NorConhaus ofis binası (SE-Architekten, Hannover, 1986).
((a): Twilt ve diğerleri, 1994: sf.47, (b): Çobanoğlu, 2003).

Bu sistem, yüksek katlı yapılarda uygulanmak istendiğinde suyun hidrostatik iç su basıncının göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Arda ve Yardımcı, 1995).

Kolonlarda su dolaşım sisteminin oluşturulması için dikkatli bir tasarım yapılması gerekmektedir. Bunun için öncelikli olarak, sistemden beklenen sürede yangına dayanım sağlayabilmesi için gerekli olan su miktarı belirlenmelidir (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 : Isınan toplam kolon yüzeyinin soğutulması için gerekli su miktarı (Twilt ve diğerleri, 1994).

Yangına dayanım süresi (dakika)	Gerekli su miktarı (kg/m^2)
30	30
60	82
90	147
120	222

Bu sistemin diğer uygulama şeklinde ise, bütün taşıyıcı sistem bileşenlerinde su dolaşımı yapılarak yangından koruma sağlanmaktadır. Sistemin sürdürülebilirliğini sağlamak amacıyla kolon ve kirişler arasında süreklilik oluşturacak düzeyde uygun bağlantıların oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca dolaşımın sağlanması için bir motor gücü de gerekmektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

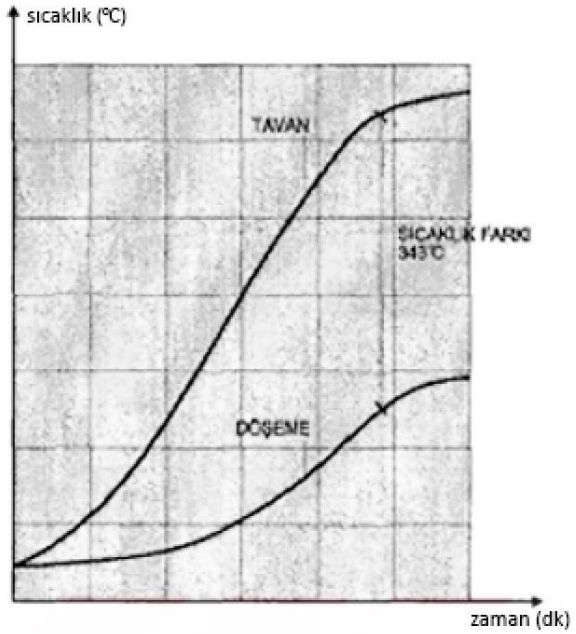
Tüm bunlara ek olarak, bu sistem genellikle sadece dikey kolonların korunması için kullanılmaktadır. Çünkü kirişler veya eğimli kolonlarda kullanılması durumunda yeterli ve kontrollü su akışının sağlanması ve biriken buharın sistemden uzaklaştırılması hususunda önemli düzeyde zorluklar ortaya çıkmaktadır (Zhao & Shen, 1999).

4.3 Mimari Olarak Görünür Çelik Yapıların Diğer Taşıyıcı Bileşenleri İçin Alınması Gereken Pasif Koruma Yöntemleri

Bir yapının yangına karşı korunumunun sağlanabilmesi için yapının taşıyıcı sisteminin bir bütün ele alınması ve taşıyıcılık işlevinin sürdürülmesinde etkin rol oynayan tüm bileşenler için uygun koruma önlemlerinin alınması gerekmektedir. Bu bölümde, mimari olarak görünür çelik yapılarda ana taşıyıcı elemanlar (kolon ve kirişler) haricindeki diğer bileşenler için alınabilecek pasif koruma önlemleri ele alınmıştır.

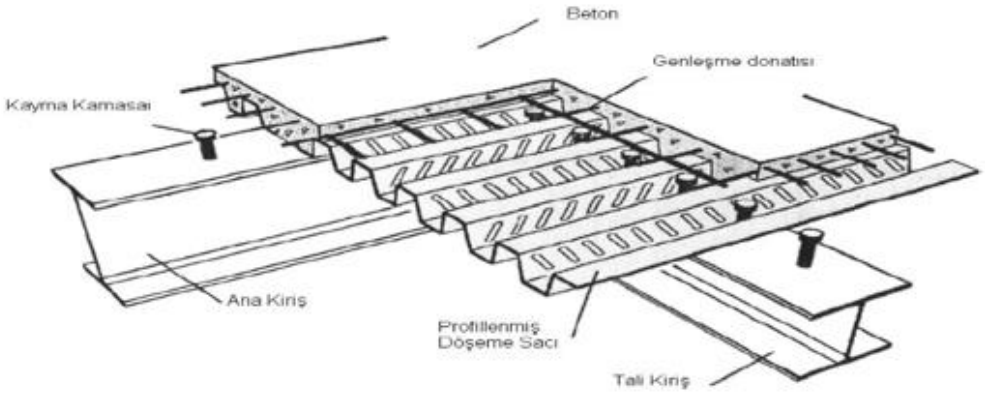
4.3.1 Döşeme sistemlerinin yangına karşı pasif korunumu

Döşemeler, yangın esnasında sıcaklığa en yüksek oranda maruz kalan taşıyıcı bileşenlerdir. Bunun sebebi ise, yangın anında oluşan yüksek sıcaklıktaki alev ve yanıcı gazların döşemeyle doğrudan etkileşime geçmesi ve bunların yükselerek tavan yüzeyinde toplanmasıdır. Yapılan bir çalışmada yapılan yangın simülasyonunda, yangın oluşturulan ortamlarda tavan ve döşeme yüzeyleri arasında meydana gelen sıcaklık farkının çok yüksek olduğu görülmüştür (Şekil 4.38) (IISI, 1993).



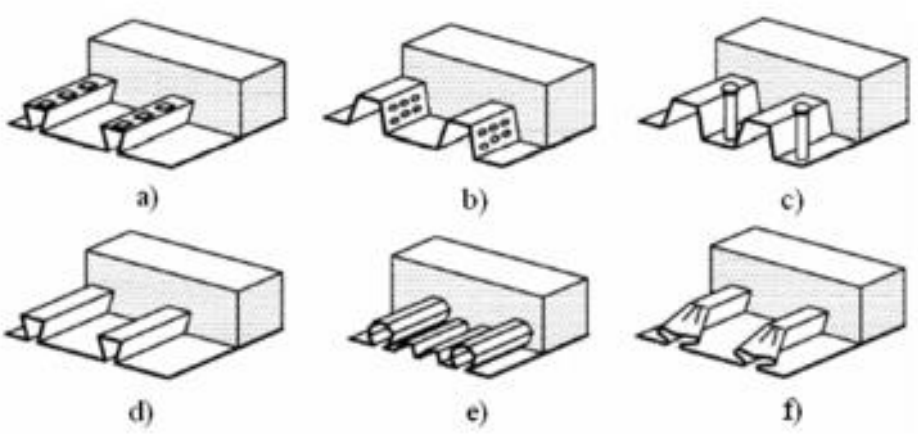
Şekil 4.38 : Yangın esnasında ortamdaki döşeme ve tavan arasında meydana gelen sıcaklık farkı (Egan, 1978).

Çok katlı çelik yapılarda betonarme döşemelere alternatif olarak, çelik tabliyeli kompozit döşemeler kullanılmaktadır. Kompozit döşemeler, trapez ya da girintili profillerden oluşan çelik tabliyelerin üzerine beton dökülmesiyle oluşturulmaktadır (Şekil 4.39) (Eren & Güzelçoban Mayuk, 2013).



Şekil 4.39 : Çelik taşıyıcılı sistemlerde kullanılan tipik bir kompozit döşeme sistemi.

Şekil 4.40'ta kompozit döşeme sistemini oluşturmak için uygulamada sık kullanılan profillendirilmiş çelik tabliyeler gösterilmektedir (Eurocode 4, 2004).



Şekil 4.40 : Kompozit döşeme sistemlerinde kullanılan çelik tabliye türleri (Eurocode 4, 2004).

Kompozit döşeme sisteminde kullanılan beton, döşeme tabliyesindeki gerilmeler ve betondaki genleşme veya büzülmeler nedeniyle oluşabilecek çatlamaların oluşumunu engellemek amacıyla, lif ya da donatılarla güçlendirilir. Bu donatılar aynı zamanda yangın esnasında döşemenin betonarme döşemeler gibi davranış göstermesini sağlayarak yangına karşı taşıyıcılık dayanımını sağlamaktadır. Ancak yangın esnasında bu çelik donatılar maksimum akma dayanımı sınırına ulaştığında döşemede çökme meydana gelmektedir (Newman, 1991).

Ek olarak, kompozit döşemelerde kullanılan profillendirilmiş trapez/yivli çelik tabliyeler, yangın durumunda sistemin taşıyıcılığını sürdürmesinde herhangi bir etkiye sahip değildir. Bu elemanlar, yangın esnasında oluşan alev ve sıcak gazların geçişini önleyerek döşeme katmanındaki betona ısı akışının azaltılması için bir bariyer işlevi görmektedir. Dolayısıyla, yalnızca kompozit döşemenin bütünlüğünü ve yalıtımını korumada önemli rol oynamaktadır. Bu yüzden, gerekli yangın dayanım süresinin çok uzun olmadığı durumlarda bu elemanların yangına karşı yalıtılmasına bazı durumlarda gerek duyulmamaktadır (Newman, 1991).

BS 5950 yönetmeliğinin 8. bölümünde, belirtilen yangın dayanım süreleri içerisinde döşemelerin yalıtım kriterlerini sağlamaları için gereken beton kalınlıklarına yer verilmiştir. Çizelge 4.5'te kompozit döşemelerde belirlenen yangın sürelerine dayanım sağlanabilmesi için gereken minimum beton kalınlık değerleri yer almaktadır.

Çizelge 4.5 : Kompozit döşemelerde minimum beton kalınlık değerleri (Newman, 1991).

Yangına dayanım süresi (dakika)	Trapez döşeme 		Kırlangıç döşeme 	
	Normal ağırlıklı beton	Hafif ağırlıklı beton	Normal ağırlıklı beton	Hafif ağırlıklı beton
30	60	50	90	90
60	70	60	90	90
90	80	70	110	105
120	95	80	125	115
180	115	100	150	135
240	130	115	170	150

Kompozit döşeme sisteminin kullanıldığı yapılarda, metal trapez ve yivli tabliyelerin yüzeylerindeki girinti ve çıkıntılar nedeniyle çelik kiriş ve tabliye katmanları arasında boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar, yangın durumunda çelik taşıyıcılı sistemler için risk oluşturmaktadır. Araştırmalar, her zaman kiriş üst flanşı ile kompozit döşemenin sacı arasındaki boşlukları doldurmanın gerekli olmadığını göstermiştir. Sebebi ise, kompozit kirişlerinin üst levhasının plastik tarafsız eksene yakın olmasıdır. Dolayısıyla bu durum, kesitin kesitin eğilme dayanımına çok az katkı sağlamaktadır. Bu yüzden, metal trapez veya yivli döşeme altındaki boşlukların bazı durumlarda doldurulmasına gerek duyulmamaktadır. Fakat, çelik taşıyıcı kirişlere uygulanan koruma kalınlıklarında bir artışa gerek duyulabilmektedir (Çizelge 4.6) (Corus, 2006).

Çizelge 4.6 : Çelik kiriş ve metal tabliyeler arasındaki boşlukların doldurulmasına yönelik öneriler (Corus, 2006).

1. Trapez Döşeme				
Kiriş tipi	**Kirişin yangından korunma yöntemi**	**Yangın dayanımı (dk)**		
		60 dk'ya kadar	**90 dk**	**90 dk ve üzeri**
Kompozit kirişler	Sprey ve plakalarla yalıtım	Kalınlıkta artışa gerek yoktur	%10 kalınlığı artırma veya %15 artışla-	Boşlukları doldurma

Çizelge 4.6 (devam) : Çelik kiriş ve metal tabliyeler arasındaki boşlukların doldurulmasına yönelik öneriler (Corus, 2006).

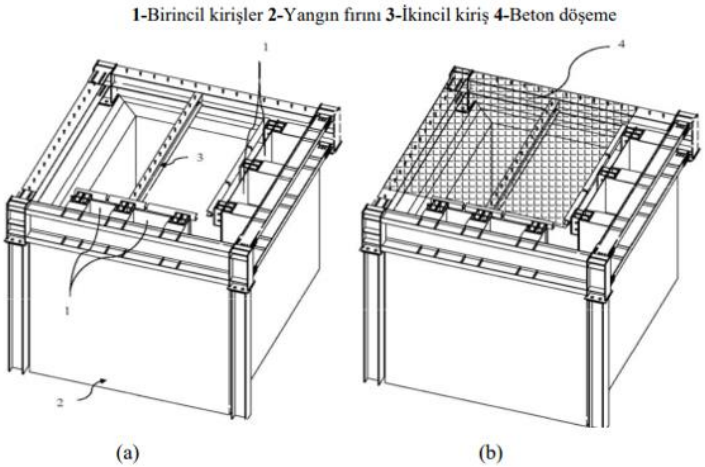
1. Trapez Döşeme

Kiriş tipi	**Kirişin yangından korunma yöntemi**	**Yangın dayanımı (dk)**		
		60 dk'ya kadar	**90 dk**	**90 dk ve üzeri**
Kompozit kirişler			Hp/A kullanılarak kalınlığı değerlendirilir	
	İntümesan boya ile yalıtım	%20 kalınlığı artırma veya %30 artışla Hp/A kullanılarak kalınlığı değerlendirilir	%30 kalınlığı artırma veya %50 artışla Hp/A kullanılarak kalınlığı değerlendirilir	Boşlukları doldurma
Kompozit olmayan kirişler	Tüm tipler	Boşlukları doldurma		

2. Kırlangıç Döşeme

Kiriş tipi	**Kirişin yangından korunma yöntemi**	**Yangın dayanımı (dk)**		
		60 dk'ya kadar	**90 dk**	**90 dk ve üzeri**
Kompozit olmayan kirişler	Tüm tipler	Boşluklar, bütün yangın dayanım aralıkları için doldurulmamış olarak kalabilir.		

Tüm bunlara ek olarak, yapılan bir çalışma kapsamında çelik-beton kompozit kat döşemesi yapısal yangın deneyi gerçekleştirilmiştir. Yüksek katlı çelik bir yapı için tasarlanmış olan kompozit döşemenin alt yüzeyi 105 dakika boyunca ısıtılmış ve sonrasında 90 dakika kontrollü bir şekilde soğutulmuştur (Şekil 4.41).



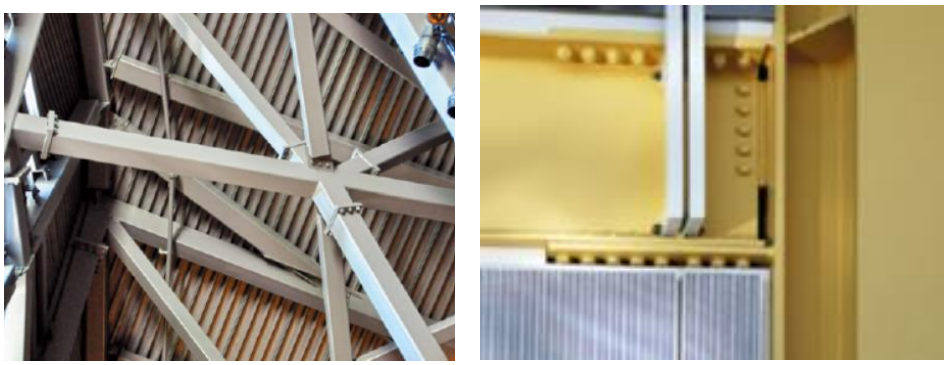
Şekil 4.41 : Çalışma için oluşturulan kompozit döşeme düzeneği (Selamet & Yolaçan, 2017).

Çalışmanın sonucunda, kompozit döşemenin standart yangın eğrisine göre 105 dakika yangın dayanımı olduğu kanıtlanmıştır. Alınan sonuçlara göre, yalıtımsız bırakılmış olan ikincil kirişin 800 °C'e kadar ısındığını ve dayanımını yitirdiği, döşemenin beton katmanının ise membran davranışı göstererek yük taşıyıcılık özelliğini yangın boyunca devam ettirdiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, ekonomik kriterlerin göz önünde bulundurulduğu büyük çaplı çelik yapılarda kullanılan kompozit kat döşemelerinde taşıyıcı özelliğini yangın esnasında yitirecek olan ikincil çelik kirişlerin yalıtımsız bırakılması bir öneri olarak sunulmaktadır. (Selamet & Yolaçan, 2017).

4.3.2 Çelik taşıyıcı bileşenlerin birleşim bölgelerinin yangına karşı pasif korunumu

Çelik yapı bileşenlerinde birleşim elemanları ve birleşim bölgelerinin temel işlevi, belirli noktalarda bir araya getirilen yapı bileşenleri arasındaki yük aktarımını sağlamaktır. Çelik taşıyıcılı sistemlerde birleşimler, elemanların tahrip etkisiyle sökülüp sökülememesine bağlı olarak iki ana grupta incelenebilir (Şekil 4.42 ve Şekil 4.43):

- Sökülebilir birleşimler: somun ve cıvatalı birleşimler
- Tahrip etkisiyle sökülebilir birleşimler: kaynak, perçin veya yapıştırmalı birleşimler



Şekil 4.42 : Sökülebilir birleşim detayları (Boake, 2015: sf. 122-123).



Şekil 4.43 : Tahrip etkisiyle sökülebilir birleşim detayları (Boake, 2015: sf. 123-127).

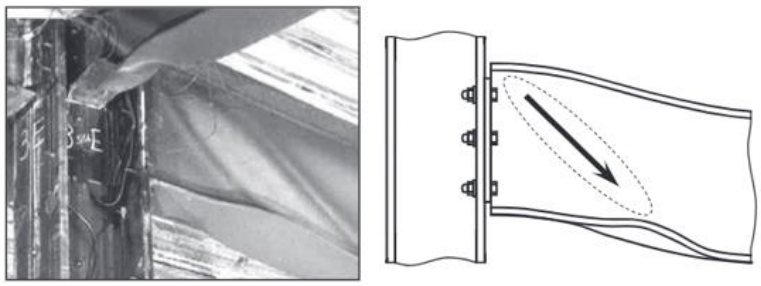
Büyük ölçekli yangın testleri, bilimsel çalışmalar ve geçmişte meydana gelen yangın olayları, çelik taşıyıcı çerçeve sistemli elemanların bağlantı – birleşim bölgelerinin yangın performansı hakkında önemli veriler oluşturmaktadır (Newman, 1991: sf 13-14).

Çelik taşıyıcılı sistemlerin bağlantı ve birleşim noktalarında bulunan bağlantı elemanlarının toplam malzeme yoğunluğu, taşıyıcı bileşenleri oluşturan diğer bölgelerden daha yüksektir. Diğer bir deyişle, yangına karşı korunmuş veya korunmamış çelik yapıların birleşim bölgeleri, taşıyıcı sistemin diğer kısımlarından daha düşük bir kesit faktörüne sahiptir. Dolayısıyla, yangın esnasında yüksek sıcaklıklara erişmeleri diğer taşıyıcı elemanlarda kıyasla daha uzun sürede gerçekleşmektedir (Twilt ve diğerleri, 1994).

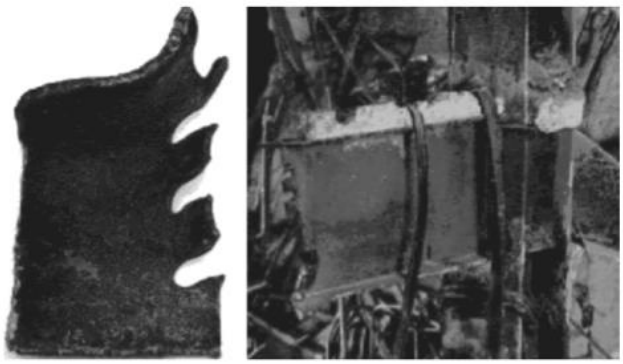
Bu durum, birleşim bölgelerinin yangın dayanımı için olumlu bir durum oluşturmaktadır. Ancak bu bileşenler, diğer taşıyıcı elemanların uç-sınır bölgelerinde bulunmaları sebebiyle, yangın esnasında meydana gelen ısının diğer elemanlar arası aktarımı ve yayılımı hususunda bir nevi köprü işlevi görmektedir. Bu durum ise,

birleşim elemanlarının ısı yayma kapasitesini artırarak yangının yayılımını hızlandırmaya yol açan bir bileşen konumuna gelmesine sebep olmaktadır (Newman, 1991: sf 13-14).

Ek olarak, birleşim elemanlarında yangın esnasında meydana gelen ısıl genleşmeler sonucunda ilave yük etkisi meydana gelebilmektedir. Bu etki bağlantı/birleşim noktalarında ek bir basınç ve kayma etkisinin oluşmasına neden olmaktadır. Meydana gelen bu durum, yapının stabilitesini korumasını zorlaştırmaktadır (Şekil 4.44 ve Şekil 4.45) (Lawson & Newman, 1990).

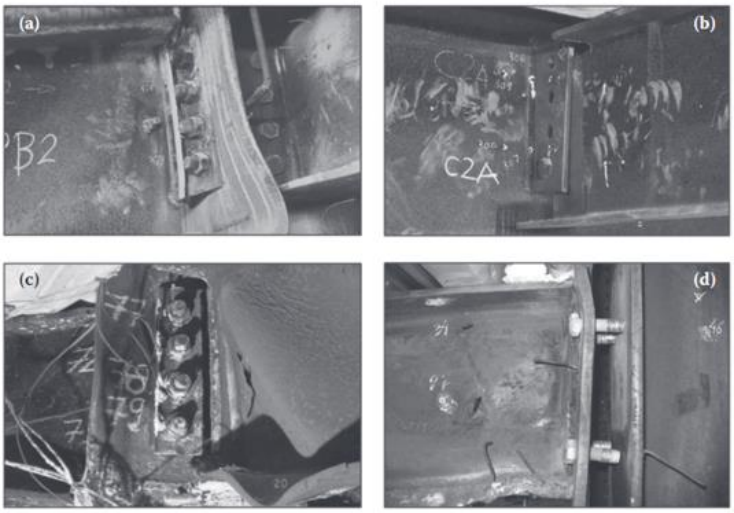


Şekil 4.44 : Kolon kiriş birleşim bölgesinde meydana gelen yerel burkulma (Wang ve diğerleri, 2013).



Şekil 4.45 : Birleşim elemanında meydana gelen bir kopma örneği, World Trade Center. (Wang ve diğerleri, 2013).

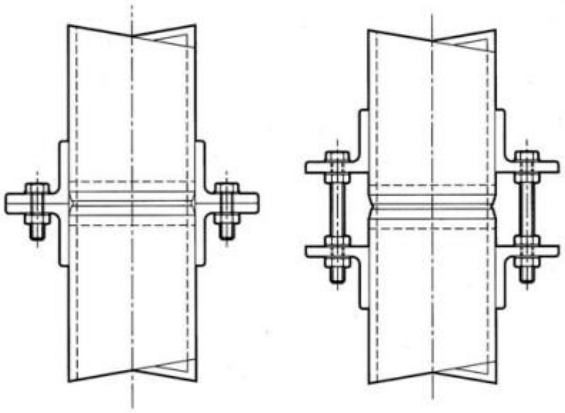
Şekil 4.46'da yer alan görsellerde çelik taşıyıcı sisteme sahip çok katlı bir yapı üzerinde yapılmış bir yangın dayanım testi sırasında birleşim bölgelerinde meydana gelen durumlar yer almaktadır.



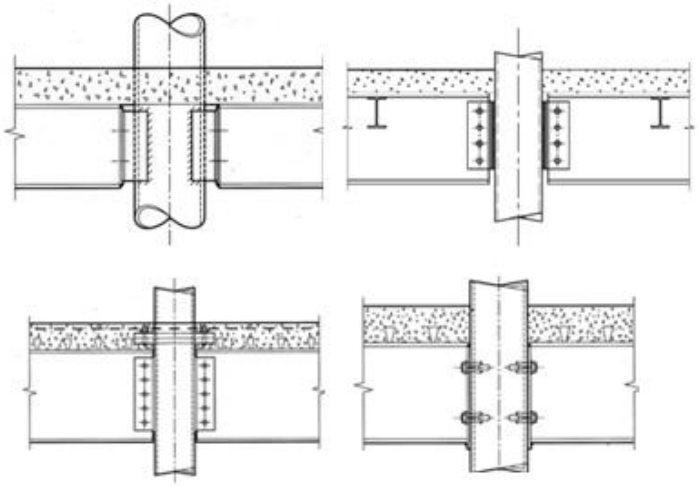
Şekil 4.46 : Birleşim bölgelerinde meydana gelen hasar örnekleri (Wang ve diğerleri, 2013).

Birleşimlerin için yangına karşı korumada kullanılan yalıtım kalınlıklarının en az diğer yapı bileşenlerinin düzeyinde olmalıdır. Bu durum sağlandığında, birleşim bölgeleri için ek bir kontrol veya önlem gerekmemektedir (Arda & Yardımcı, 1995).

Çelik elemanların yangına karşı koruması beton dolgulu kompozit sistemler ile sağlandığında ise genellikle ek bir yalıtım önlemine gerek duyulmamaktadır. Taşıyıcı elemanlar arasındaki bağlantılar yük aktarımını uygun düzeyde iletecek şekilde tasarlandığında yapının yangın performansı optimum düzeyde tutulabilmektedir (Şekil 4.47 ve Şekil 4.48) (Twilt ve diğerleri, 1994).

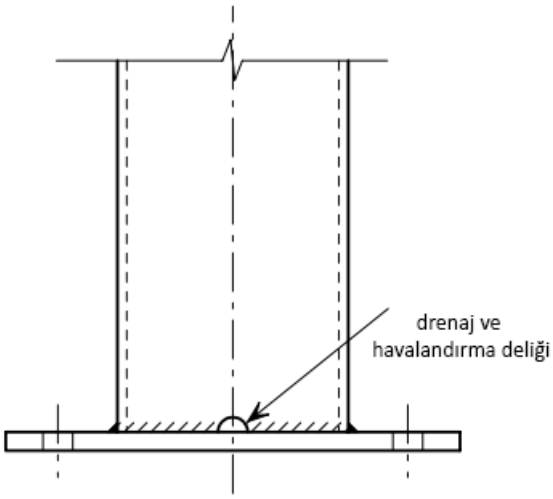


Şekil 4.47: İçi betonla doldurulmuş çelik enkesitlerin kolon-kolon birleşim bölgesi detayları (Corus, 2002).



Şekil 4.48 : İçi betonla doldurulmuş çelik enkesitlerin kolon-kiriş birleşim bölgesi detayları (Corus, 2002).

Bu birleşim detaylarına ek olarak, çelik elemanların içerisinin betonla doldurulduğu kapalı çelik profilleri iç kısmında, yangın esnasında oluşabilecek yüksek seviyeli buhar basıncını önlemek için kolon yüzeyinde havalandırma deliklerinin açılması gerekmektedir (Şekil 4.49). Bu deliklerin yerleşiminin her kat yüksekliğinin altında ve üstünde birbirine zıt konumlarda yapılması gerekmektedir (Corus, 2002).



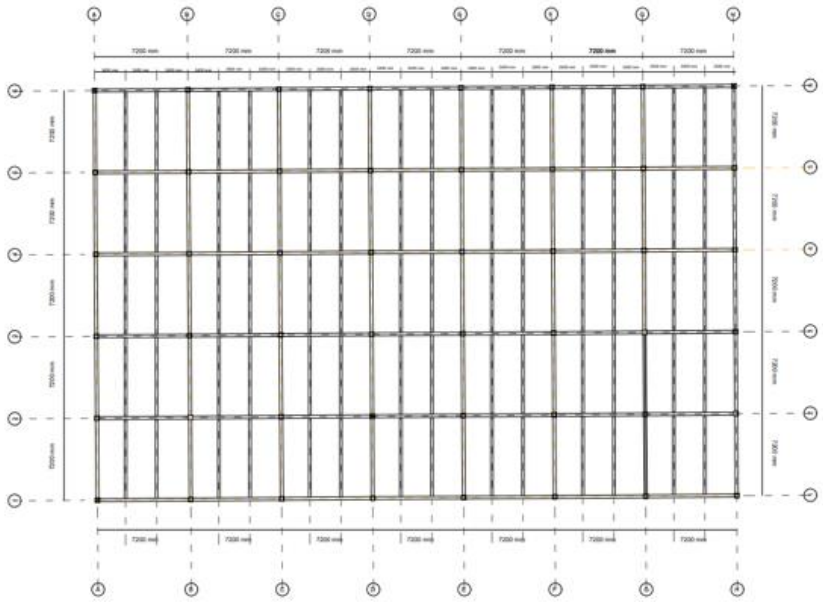
Şekil 4.49 : İçi betonla doldurulmuş çelik kolonun tabanında açılan havalandırma deliğinin gösterimi (Corus, 2002).

5. MALİYET ANALİZİ

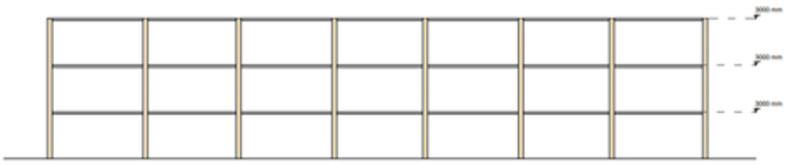
Pasif koruma yöntemlerinde uygulama maliyetlerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması için yapıda bulunan kolon, kiriş ve döşemeler için pasif koruma yöntemlerinin uygulama maliyetleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Maliyet hesaplamaları yapılırken malzeme birim fiyat bilgilerine firmalardan alınan fiyat teklifleri; işçilik birim fiyatları ve birim sürede yapılan işçilik miktarlarına ise, T.C. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın 2023'te yayınlamış olduğu İnşaat ve Tesisat Birim Fiyatları Listesi'nde yer alan veriler üzerinden erişim sağlanmıştır. Yapılan analiz ve hesaplamalar ile ortaya çıkan sonuçlar değerlendirildikten sonra pasif koruma yöntemleri karşılaştırılmıştır.

5.1 Karşılaştırma Örneğinin Tanıtımı

Yangına karşı korumada kullanılan pasif koruma yöntemlerinin bir yapı örneği üzerinden maliyet analizi ile karşılaştırılması, toplam zemin alanı 5443 m^2 ve taşıyıcı sistemi çelik olan üç katlı bir ofis binası baz alınarak yapılmıştır. Yapının zemin kat kalıp planı ve kesiti aşağıda yer almaktadır (Şekil 5.1).



Şekil 5.1 : Bina zemin kat kalıp planı ve kesiti.



Şekil 5.1 (devam) : Bina zemin kat kalıp planı ve kesiti.

BYKHY-2022'ye göre bodrum kat derinliği 10 m'den, bina yüksekliği ise 21,5 m'den az olan ve yağmurlama sistemi bulunmayan ticari amaçlı bir bina için 60 dakikalık yangın dayanım süresi yeterli olarak görülmektedir. Yapıda yer alan çelik kolon ve kiriş enkesitleri ise şu şekildedir:

- **Çelik kolon enkesiti:** Kare kutu enkesitli profil (SHS) 350/8 ([]350 x 350 x 8 mm)
- **Çelik kiriş (birincil kiriş) enkesiti:** Kare kutu enkesitli profil (SHS) 260/6,3 ([]260 x 260 x 6,3 mm)
- **Çelik kiriş (ikincil kiriş) enkesiti:** Kare kutu enkesitli profil (SHS) 220/6,3 ([]220 x 220 x 6,3 mm)

5.2 Kolonlar İçin Pasif Koruma Yöntemlerinin Uygulanması

Kolonlar için şu sistemler ayrı ayrı olarak uygulanmıştır:

- Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması
- Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım
- İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım
- Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması

5.2.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması (kolonlar)

Bu yöntemde, çelik elemanların yangına karşı dayanımının artırılması için boru/kutu enkesitli çelik kolonların içi betonla doldurulmaktadır. Tez çalışmasında ele alınan yapıda yer alan çelik kolonlar için bu uygulamada gerekli olan beton miktarı, beton sınıfı ve donatı yüzdesinin belirlenmesinde Şekil 5.2 ve Çizelge 5.1'de yer alan verilerden yararlanılmıştır.

Kullanılacak beton sınıfı ve donatı yüzdesinin belirlenmesi:

Çelik kolonların enkesiti 350 x 350 x 8 mm ve beklenen yangın dayanım süresi 60 dakika olduğu için tablodaki şu bilgiler kullanılmıştır:

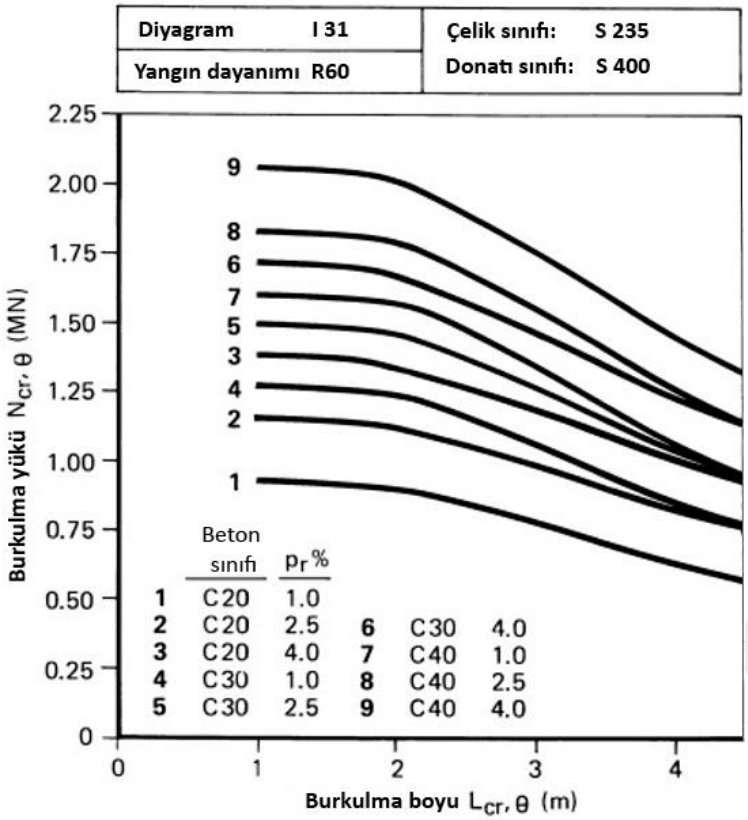
Beton sınıfı: Çizelge 5.1'e göre, boyutu 350 x 350 x 8 mm olan çelik kutu enkesitli bir profilin içerisine yerleştirilecek betonun C 40 dayanımında olması gerekmektedir.
Donatı yüzdesi: Şekil 5.2'ye göre C 40 betonu için 7, 8 veya 9 nolu eğriler kullanılabilir. Buradan yola çıkılarak, donatı yüzdesi % 1 olarak seçilmiştir.

Çizelge 5.1 : Çelik kutu enkesitlerde yangın sınıflarına göre kullanılacak beton sınıflarının ve donatı yüzdelerinin belirlenmesi için oluşturulan tablo (Twilt ve diğerleri, 1994: sf.59).

Yangın Sınıfı	Beton Sınıfı	Enkesit Ölçüleri	Diyagram No
R60	C 20	Ø 219,1 x 4,5	I 1
R90			I 2
R120			I 3
R60		Ø 244,5 x 5,0	I 4
R90			I 5
R120			I 6
R60	C 30	Ø 273,0 x 5,0	I 7
R90			I 8
R120			I 9
R60		Ø 323,9 x 5,6	I 10
R90			I 11
R120			I 12
R60	C 40	Ø 355,6 x 5,6	I 13
R90			I 14
R120			I 15
R60		Ø 406,4 x 6,3	I 16
R90			I 17
R120			I 18
R60	C 20	□ 180 x 6,3	I 19
R90			I 20
R120			I 21

Çizelge 5.1 (devam): Çelik kutu enkesitlerde yangın sınıflarına göre kullanılacak beton sınıflarının ve donatı yüzdelerinin belirlenmesi için oluşturulan tablo (Twilt ve diğerleri, 1994: sf.59).

Yangın Sınıfı	Beton Sınıfı	Enkesit Ölçüleri	Diyagram No
R60	C 20	□ 200 x 6,3	I 22
R90			I 23
R120			I 24
R60		□ 220 x 6,3	I 25
R90			I 26
R120			I 27
R60	C30	□ 250 x 6,3	I 28
R90			I 29
R120			I 30
R60		□ 260 x 6,3	I 31
R90			I 32
R120			I 33
R60	C 40	□ 300 x 7,1	I 34
R90			I 35
R120			I 36
R60		□ 350 x 8,0	I 37
R90			I 38
R120			I 39
R60		□ 400 x 10,0	I 40
R90			I 41
R120			I 42



Şekil 5.2 : Burkulma boyu – burkulma yükü diyagramı (350x350x8 mm boyutlu çelik kutu enkesit için) (Twilt ve diğerleri, 1994).

Gerekli beton ve donatı miktarının belirlenmesi:

Çelik kolonun iç alanı = $(350 - 16)^2 = 111556$ mm^2

donatı alanı = 111556 x 0,01 = 1116 mm^2

Çizelge 5.2'deki çelik donatı tablosundan 14 mm lik demir donatı seçildiğinde, bir kolonda 8 adet donatı kullanımı yeterli olmaktadır.Toplam beton miktarı ise şu şekildedir:

Toplam beton miktarı (m$^{3)}$ = kolon yüksekliği x yapıda bulunan toplam kolon sayısı x kullanılacak net beton alanı = 9000 mm x 48 x (111556 mm^2 – 1116 mm^2) = 47 m^3

Ayrıca, **Çizelge 5.2'** de verilen donatı tablosuna göre 14 mm çapında 1 m donatının ağırlığı 1,208 kg'dır. Buradan yola çıkarak toplam donatı ağırlığı şu şekildedir:

Toplam çelik donatı ağırlığı (kg) = (kolon yüksekliği x kolon sayısı x 1 kolonda bulunan donatı sayısı x 1 adet donatının ağırlığı)

= 9 x 48 x 8 x 1,208 = 4,174 kg

Çizelge 5.2 : Çelik donatı çubukların enkesit alanları ve ağırlık değerleri (Url-40).

Donatı çapı (mm)	Çevre uzunluğu (mm)	Kesit alanı (mm2)	Kütle (kg/1m)	Kütle (kg/12 m)
8 mm	25,1	50,2	0,394	4,728
10 mm	31,4	78,5	0,616	7,392
12 mm	37,7	113,0	0,887	10,644
14 mm	44,0	153,9	1,208	14,496
16 mm	50,3	201,0	1,578	18,936
18 mm	56,5	254,3	1,997	23,964

Sonuç olarak, yapıdaki çelik kolonların betonla doldurularak yangına karşı 60 dakika dayanım göstermesinin beklendiği durumda gerekli olan toplam beton miktarı ve toplam donatı ağırlığı şu şekildedir:

Toplam beton miktarı ($m^{3)}$ = 47 m^3
Toplam çelik donatı ağırlığı (kg) = 4174 kg = 4,174 ton
1 m^3 betonun sahadaki işçilik süresi 9,37 saat, 1 ton nervürlü inşaat çeliğinin sahadaki işçilik süresi ise 115 saat olduğuna göre, toplam işçilik süreleri:

- 47 x 9,37 = 440,4 saat (toplam beton işçilik süresi)
- 115 x 4,174 = 480 saat (toplam demir işçilik süresi)

Çizelge 5.3 : Betonla doldurulan kolonlar için pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	Miktar	Birim	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Malzeme maliyeti				
Beton çelik çubuğu, nervürlü (Ø 14-32 mm) (S420, B420B-C, B500B-C)	4,174	ton	17000	70.960 TL
Beton (C 40 Sınıfı)	47	m^3	1650	77.550 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	36,9	ton	360	13.280 TL

Çizelge 5.3 (devam) : Betonla doldurulan kolonlar için pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	Miktar	Birim	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Demir donatı işçilikleri (Ø 14 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması, malzeme nakliyesi)	480	saat	70	33.600 TL
Beton işçilikleri Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, C 40 basınç dayanım sınıfında, gri renkte, normal hazır beton dökülmesi (beton nakli dahil)	440,4	saat	70	30.830 TL
			Toplam maliyet	226.220 TL

5.1.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım (kolonlar)

BYKHY-2022'ye göre bodrum kat derinliği 10 m'den, bina yüksekliği ise 21,5 m'den az olan ve yağmurlama sistemi bulunmayan ticari amaçlı bir bina için 60 dakikalık yangın dayanım süresi yeterli olarak görülmektedir. Bu yüzden, 60 dakikalık yangın dayanım süresine sahip çimento bazlı bir püskürtme sıva malzemesinin kullanılması uygun görülmüştür.

Yukarıdaki kriterler göz önünde bulundurularak farklı firmalardan teklif alınmıştır. Bu yöntem için kullanılmak üzere seçilen püskürtme sıva malzemesinin ismi Monokote® Type Z-106 dır.

Çizelge 5.4 : Monokote® Type Z-106 çimento bazlı yangın koruma kaplamasının fiziksel özellikleri (Url-41).

Fiziksel özellikler	TYPE Z-106	Test Methodu	Laboratuar Test Değeri
Minimum yoğunluk	352 kg/m^3	ASTM E 605	N/A
Minimum yapışma mukavemeti	94.5 kN/m2	ASTM E 736	> 94.5 kN/m^2

Çizelge 5.4 (devam) : Monokote® Type Z-106 çimento bazlı yangın koruma kaplamasının fiziksel özellikleri (Url-41).

Fiziksel özellikler	TYPE Z-106	Test Methodu	Laboratuar Test Değeri
Minimum basınç mukavemeti	680 kPa (100 psi)	ASTM E 761	> 680 kPa (100 psi)
Eğilme ve kopma mukavemeti	Çatlak Yok Dökülme yok	ASTM E 759 ASTM E 760	Geçer
Hava erozyonu	0.000 gm/m^2	ASTM E 859	0.000 gm/m^2
Mold inhibitörü	Evet	ASTM G 21	Geçerli / Genleşme yok
Standart renk	Gri	N/A	N/A

Seçilen çimento bazlı püskürtme sıva malzemesi BS476 - Bölüm 21 and ASTM E119/UL263 test standartlarına göre yapısal çelik elemanlar, döşeme/tavan ve çatı/döşeme elemanlar üzerinde 4 saate kadar yangın dayanımı sağlamaktadır. Buna ek olarak, neme karşı dayanıklı ve iç mekanlarda neme ve aşınmaya karşı dayanım gereken yerler için uygundur. Bu ürün, su ve/veya yüksek nem ile tekrarlanan fiziksel temasa karşı dayanıma sahiptir (Url-41).

Püskürtme sıva uygulaması öncesinde çelik elemanların yüzeyinin işleme hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için, yüzeye kumlama işlemi yapıldıktan sonra bir kat primer (astar) boya uygulmasının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu uygulamanın ise maliyeti 360 TL/tondur.

Püskürtme sıva uygulamasında yalıtım malzemesi olarak kullanılacak ürün vermikülit çimento esaslıdır. Uygulanacak yalıtım kalınlığının belirlenmesi için Şekil 4.18'de yer alan abaktaki bilgilerden faydalanılmıştır. Bu abak, çeliğin kritik sıcaklığının 540 ^oC olduğu durumlar için hazırlanmıştır.

Çelik taşıyıcı elemanlara uygulanacak vermikülit çimento yalıtım malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı (K_i) 0,12 W/m.K ve yapının yangına karşı beklenen dayanım süresi 60 dakikadır.

Yangına karşı korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörünün belirlenmesi (4 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik için):

TS EN 1993-1-2'ye göre bu yapıda yer alan çelik kolonların kesit faktörü:

A / V = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı = 2 (b + h) / A = (350 x 4) / (350 x 350 – 334 x 334) x 10^3 = 130 m^{-1}

Şekil 4.19'a göre, 540 ºC sıcaklıkta 130 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profilin 60 dakikalık yangın dayanımı için uygulanması gereken püskürtme sıva kalınlığı 30 mm dir.

Yapıda kullanılacak toplam sıva miktarının bulunabilmesi için aşağıdaki formül uygulanmalıdır:

Gerekli toplam sıva miktarı = Toplam çelik kolon sayısı x (bir kolona uygulanacak toplam sıva hacmi x püskürtme sıva yoğunluğu)

- Yapıda bulunan toplam çelik kolon sayısı : 48
- Bir kolona uygulanacak toplam sıva hacmi = 0,35 x 4 x 9 x 0,030 = 0,37 m^3
- Püskürtme sıva yoğunluğu = 352 kg/m^3
- Gerekli toplam sıva miktarı= 48 x 0,37 x 352 = 6251 kg

Uygulama esnasında oluşabilecek %15 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 6251 x 1,15 = 7188 kg püskürtme sıva gerekmektedir.

1 m^2 püskürtme sıvanın tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,35 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

- 0,35 x 604,8 = 211,7 saat

Çizelge 5.5 : Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kolonların toplam uygulama maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	**Miktar**	**Birim**	**Birim fiyat (TL)**	**Toplam fiyat (TL)**
Malzeme maliyeti				
Vermikülit bazlı püskürtme sıva	7188	kg	25	179.700 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	36,9	ton	360	13.280 TL
Püskürtme sıva uygulaması	211,7	saat	70	14.820 TL
			Toplam maliyet	207.800 TL

5.2.3 İntümesan boyalar ile yalıtım (kolonlar)

BYKHY-2022'ye göre bodrum kat derinliği 10 m'den az olan bir ticari bina için 60 dakikalık yangın dayanım süresi yeterli olarak görülmektedir. Bu yüzden, 60 dakikalık yangın dayanım süresine sahip su bazlı bir boyanın bu yapıda kullanılması uygun görülmüştür.

Yukarıdaki kriterler göz önünde bulundurularak boya maliyeti için farklı firmalardan teklif alınmıştır. Kullanılmak üzere seçilen intümesan boyanın ürün ismi ise AVIKOTE WB 600 dür. Su bazlı ve beyaz renkte ince tabakalı uygulanan bir intümesan boya türüdür. Temiz, kuru ve astar boyası ise kaplanmış yüzeylere uygulanması gerekmektedir. Uygulandığı yüzeylerde yangına karşı 90 dakikaya kadar dayanım sağlayabilir (Url-42).

Çizelge 5.6 : AVIKOTE WB 600 intümesan boyasının fiziksel özellikleri (Url-42).

Fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ilgili temel bilgiler	
Form	Sıvı
Renk	Beyaz
Koku	Karakteristik bir kokusu yoktur.
pH değeri	8,0 - 9,5
Kaynama noktası	> 100 °C
Parlama noktası	-
Patlama riski	Ürün patlama riski taşımamaktadır.
Buhar basıncı (20 °C)	2,4 hPa
Yoğunluk (20 °C)	1,3 - 1,5 g/cm^3
Sudaki çözünürlük	Tamamen çözünebilir.

İntümesan boya uygulaması öncesinde çelik elemanların yüzeyinin işleme hazır hale getirilmesi gerekmektedir. Bunun için, yüzeye kumlama işlemi yapıldıktan sonra bir kat primer (astar) boya uygulmasının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu uygulamanın ise maliyeti 360 TL/ton'dur.

Ürün için verilen teknik föyde, dikdörtgen enkesitli kutu profillerde 60 dakikalık yangın dayanımı için uygulanması gereken kuru film kalınlığı verilmiştir (Çizelge 5.7).

Çizelge 5.7: İntümesan boya kalınlıklarının kesit faktörü ve kritik sıcaklık değeri üzerinden gösterimi (Url-42).

60 dakikalık yangın dayanımı için belirlenen boya kalınlık değerleri (SHS enkesitli profiler için)

Kesit faktörü (m^{-1})	Belirli sıcaklık değerlerindeki boya kalınlıkları (mm)							
	450 °C	500 °C	520 °C	550 °C	600 °C	650 °C	700°C	750°C
85	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
90	0,446	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
95	0,577	0,401	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370	0,370
100	0,707	0,495	0,437	0,377	0,370	0,370	0,370	0,370
105	0,837	0,589	0,520	0,449	0,370	0,370	0,370	0,370
110	0,968	0,683	0,603	0,520	0,420	0,370	0,370	0,370
115	1,058	0,776	0,687	0,591	0,477	0,372	0,370	0,370
120	1,122	0,870	0,770	0,663	0,533	0,420	0,370	0,370
125	1,186	0,964	0,853	0,734	0,590	0,468	0,370	0,370
130	1,250	1,039	0,937	0,806	0,646	0,515	0,370	0,370
135	1,313	1,086	1,020	0,877	0,703	0,563	0,370	0,370
140	1,377	1,133	1,067	0,949	0,760	0,610	0,370	0,370
145	1,441	1,181	1,114	1,020	0,816	0,658	0,370	0,370
150	1,505	1,228	1,162	1,070	0,873	0,706	0,370	0,370
155	1,568	1,275	1,209	1,120	0,929	0,753	0,370	0,370
160	1,632	1,322	1,256	1,170	0,986	0,801	0,370	0,370
165		1,369	1,303	1,220	1,041	0,849	0,370	0,370
170		1,417	1,351	1,270	1,094	0,896	0,406	0,370
175		1,464	1,398	1,320	1,148	0,944	0,477	0,370
180		1,511	1,445	1,370	1,201	0,991	0,549	0,370
185		1,558	1,492	1,420	1,254	1,040	0,620	0,370
190		1,606	1,539	1,470	1,307	1,091	0,691	0,370
195		1,653	1,587	1,520	1,360	1,142	0,763	0,370
200			1,634	1,570	1,413	1,193	0,834	0,393
205			1,681	1,620	1,466	1,244	0,906	0,460
210				1,670	1,519	1,295	0,977	0,527
215					1,573	1,346	1,044	0,593
220					1,626	1,397	1,103	0,660
225					1,679	1,448	1,162	0,727
230						1,499	1,222	0,793
235						1,550	1,281	0,860
240						1,601	1,340	0,927
245							1,400	0,993
250							1,459	1,087
255								1,197

Bu çelik taşıyıcı bileşenin kesit faktörü değerleri TS EN 1993-1-2 yönetmeliğine göre hesaplanmıştır. Yangına karşı koruma uygulanmamış çelik elemanlar için kesit faktörü (4 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik için) şu şekilde hesaplanmaktadır:

A / V = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı = 2 (b + h) / A = (350 x 4) / (350 x 350 – 334 x 334) x 10^3 = 130 m^{-1}

Çizelge 5.7'ye göre, 550 ºC sıcaklık ve 130 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profilin 60 dakikalık yangın dayanımı için uygulanması gereken boya kalınlığı 0,806 mm'dir.

Ürün içerisinde yer alan katı madde oranı %70 olduğu için, 1000 mikron (1 mm) kuru film kalınlığı elde etmek için 1428 mikron (1,428 mm) ıslak film kalınlığına ulaşmak gerekmektedir. Bu yüzden, 0,806 mm kuru film kalınlığına (DFT) ulaşmak için yaş film kalınlığının (WFT) 1,150 mm olması gerekmektedir.

Seçilen AVICOTE WB 600 isimli su bazlı intümesan boya için teknik föyde yer alan bilgilere göre boya kuru film kalınlığı (DFT) 0,5 mm olduğunda, 0,7 litre ile boya ile 1 m^2 lik yüzey boyanabilmektedir. 1 m^2 yüzeyin boyanabilmesi için;

- 0,5 mm DFT – 0,7 lt ise
- 0,806 mm DFT – 1,128 lt

Bir kolon için uygulanacak boya yüzey alanı: 350 mm x 4 x 9000mm x 10^{-6} = 12,6 m^2
Yapıda toplamda 48 kolon bulunduğu için uygulanacak toplam boya yüzey alanı ve miktarı:
12,6 x 48 = 604,8 m^2 => 682,2 lt boya
Uygulama esnasında oluşabilecek %10 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 682,2 x 1,1= 750,4 lt boya gerekmektedir.

Su bazlı boyanın nemden korunması için uygulanacak son kat solvent bazlı 1 kg boya ile 8 m^2 'lik bir alan kapatılabilmektedir.
Yapıda toplam kolon yüzey alanı 604,8 m^2 olduğu için kullanılacak solvent bazlı boya miktarı 604,8 / 8 = 75,6 kg'dır. Boya uygulamasında %10 luk bir sarfiyat olduğundan bu miktar 75,6 x 1,01 = 83,2 kg olacaktır.

1 m^2 intümesan boya işleminin tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,9 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

- 0,9 x 604,8 = 611 saat

Çizelge 5.8 : İntümesan boya yöntemi uygulanan kolonlarda pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	**Miktar**	**Birim**	**Birim fiyat (TL)**	**Toplam fiyat (TL)**
Malzeme maliyeti				
Su bazlı intümesan boya	750,4	lt	300	225.120 TL
Son kat koruyucu boya	83,2	kg	200	16.640TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	36,9	ton	360	13.280 TL
İntümesan boya uygulaması	611	saat	70	42.770 TL
Son kat koruyucu boya uygulaması	611	saat	70	42.770 TL
			Toplam maliyet	340.580 TL

5.2.4 Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması (kolonlar)

Çelik taşıyıcı bileşenlerin içinden su dolaşımı ile yapılacak olan yalıtım uygulamasının maliyet analizini yapabilmek için sistemde yer alan bileşenlerin boyutlarını ve miktarlarını belirlemek gerekmektedir. Aşağıda yer alan hesaplamalar ile çelik taşıyıcı elemanlara 60 dakikalık yangın boyunca etkiyen yangın yükü bulunarak, su dolaşım sisteminde kullanılacak su deposu hacmi ve kolonların içerisinde yerleştirilecek çelik su borularının ölçüleri belirlenmiştir.

- **Yangın esnasında kolonların içinde soğutma suyu olarak bulunması gereken su miktarı**

Dış kolonların dış cephe kabuğuna yeterince yakın olduğu ve cephede yer alan pencere açıklığının yüksekliği 2 m olduğu varsayılmıştır. Ayrıca, bu hesaplamada yangının iç ortamda meydana geldiği duruma göre hesaplamalar yapılmıştır. Yangına maruz kalan yüzey alanları ise şu şekildedir (Twilt ve diğerleri, 1994):
Her bir kolonun toplam yüksekliği 9 m olmakla birlikte, yangın iç ortamda meydana geldiği için kolonun tüm yüzeyleri yangın etkisine maruz kalmıştır. Dolayısıyla hesaplama şu şekildedir:

Yangına maruz kalan yüzey alanı (m^2) = 4 x 0,350 m x 9 m = 12,6 m^2

Çizelge 5.3'e göre 60 dakikalık yangın dayanımı için m^2 başına gerekli su miktarı 82 kg/m^2 dir. Bu yüzden, iç ortamda yer alan bir kolon için gerekli su miktarı = 82 kg/m^2 x 12,6 m^2 = 1033,2 kg' dır.

Hesap yapılan alandaki kolonların stabil durumda iken (yangın olmadığı durumda) içerisinde bulunması gerekli olan su miktarı ise:
= 1033,2 x 12 = 12400 kg = 12,4 m^3 tür.

- **Gerekli su deposu hacminin hesaplanması**

Su deposunun hacmi, yangın esnasında soğutma suyu olarak kullanılması gereken su miktarı ve kolonların içerisinde bulunan toplam su miktarının toplanması ile bulunmuştur. Ayrıca, soğutma suyu olarak kullanılacak su miktarının buharlaşma etkisi de göz önüne alındığında %10 oranında ekleme yapılarak hesaplamalar yapılmıştır (Twilt, L. ve diğerleri., 1994):

Bir kolonun iç hacmi (yaklaşık olarak) = 0,35 x 0,35 x 9 = 1,10 m^3
Hesap yapılan alandaki kolonların toplam hacmi = 12 x 1,10 m^3 = 13,2 m^3

Sonuç olarak, güvenlik amacıyla eklenen %10 su miktarı da eklendiğinde gerekli su deposu hacmi şu şekilde olacaktır:
Gerekli su deposu hacmi= 13,2 + 1,1 x 12,4 = 24,84 m^3
Kullanılabilecek su deposunun hacmi için ise yaklaşık olarak 25 m^3 yeterli olacaktır. (25 m^3 = 25 ton su = 25000 lt)

- **Su ve su buharının max kütle akış oranı (debisi)**

Çizelge 6.7'de ISO yangın eğrisine göre, yangın esnasında kolon yüzeyindeki maksimum buharlaşma oranınlarının tahmini verileri yer almaktadır. Buradaki veriler kullanılarak kolonlardaki toplam kütle akış oranı (debisi) bulunmuştur.

- Bir kolonda meydana gelen kütle akış oranı (debisi) = (m^2 başına oluşan maksimum buharlaşma oranı max buharlaşma oranı) x (yangın esnasında ısınan kolonun toplam yüzey alanı)
- Her bir kolon için = 2 x 12,6 = 25,2 kg/dk/kolon

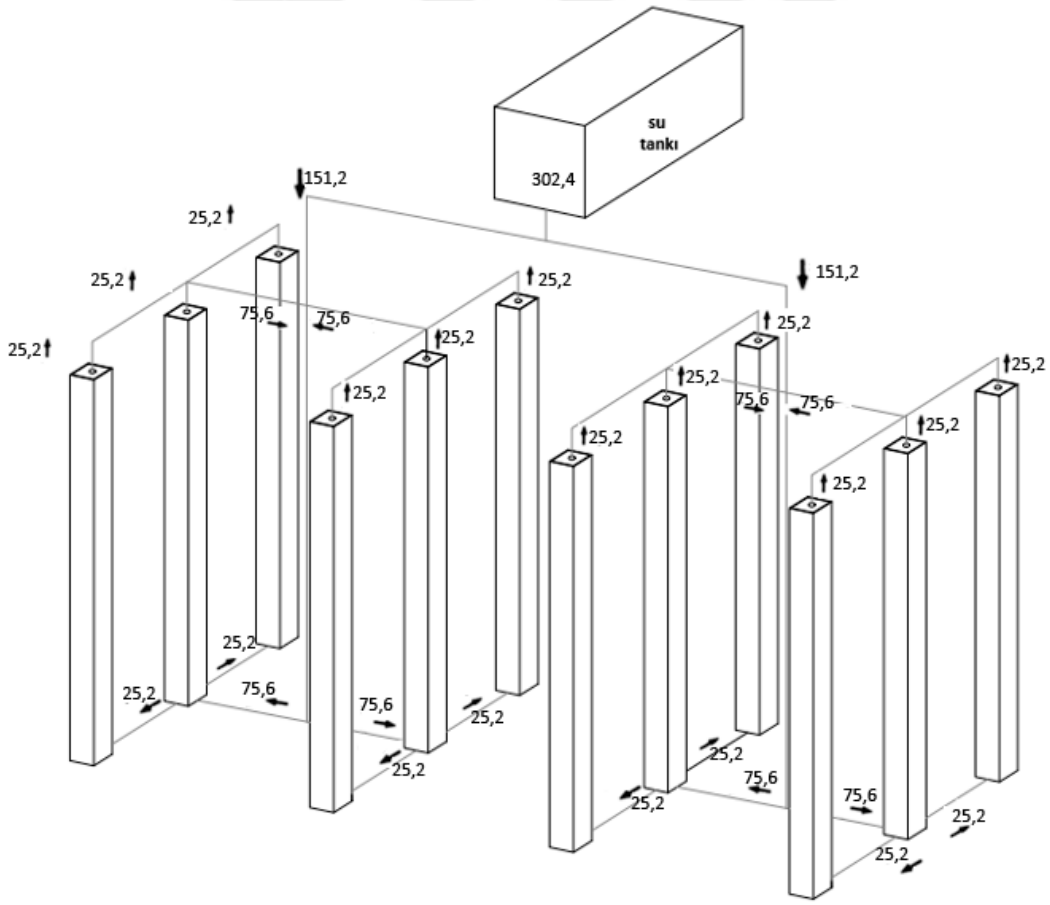
Bu değer, hem buharın yükselerek sistemden havalandırma yoluyla çıkmasını hem de su tankından kolona tekrar su iletilme oranını temsil eder.

Çizelge 5.9 : Kolon yüzeyinde m^2 başına oluşan maksimum buharlaşma hızı (Twilt, L. ve diğerleri, 1994).

Yangın süresi (dk)	Maksimum buharlaşma hızı ($kg/m^2/dk$)	Eşdeğer maksimum buharlaşma oranı ($m^3/m^2/s$)
30	1,5	0,040
60	2,0	0,054
90	2,3	0,064
120	2,6	0,072

Dolayısıyla, sistemi yenilemek için tüm kolonlara su boruları aracılığıyla iletilmesi için gerekli olan toplam su kütlesinin debisi şudur (Şekil 5.4):

- Toplam su kütlesinin akış oranı (debisi) = 12 x 25,2 = 302,4 kg/dk



Şekil 5.3 : Su dolaşım sistemindeki su ve buhar kütle akış debilerinin örnek üzerinde şematik gösterimi.

- **Çelik su borusu çapının (R) bulunması:**

Su debisi= 25,2 kg/dk = 0,0252 m^3/dk

Suyun buharlaşma hızı (60 dakika yangın dayanımı için): 2 kg/m/min = 0.033 m/s

Debi (m^3/dk) = Hız (m/dk) x Alan (m^2)

0,0252 m^3/dk = (2 m/dk) x (3,14 x r^2)

r = 0,065 m= 65 mm >> R= 2r = 130 mm

Bu uygulamada işçilik giderleri şu şekilde belirlenmiştir:

1 metre mekanik montaj için bir işçi tarafından ortalama 2,7 saat süre harcamaktadır (Url-43). Mekanik montajı yapılacak toplam çelik boru uzunluğu ise 432 m (9 m x 48) olduğuna göre;

- Toplam işçilik süresi = 432 x 2,7= 1166,4 saattir.

Çizelge 5.10 : Su soğutma yöntemi uygulanan kolonlarda pasif koruma maliyeti**.**

Malzeme ve Uygulamalar	**Miktar**	**Birim**	**Birim fiyat (TL)**	**Toplam fiyat (TL)**
Malzeme maliyeti				
Su deposu (25 ton) ve su pompası	4	adet	40000	160.000 TL
Galvanize çelik su borusu (iç çap: 130 mm; uzunluk: 9m) ve bağlantı elemanları	48	adet	3250	153.600 TL
Su (su deposunda bulunan)	100	m^3	30	3.000 TL
Su (kolonların içerisinde bulunan)	36,5	m^3	30	1.095 TL
Potasyum karbonat (donmayı önleyici katkı)	12800	lt	10	128.000 TL
Potasyum nitrat (korozyon oluşumunu önleyici katkı)	300	lt	140	42.000 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	36,9	ton	360	13.280 TL
İşçilik giderleri - Mekanik tesisat ve montaj işlemleri - Korozyon ve donmayı önleyici uygulamalar	1166,4	saat	70	81.650 TL
			Toplam maliyet	582.625 TL

5.3 Kirişler için pasif koruma yöntemlerinin uygulanması

Yapıda yer alan birincil (ana) ve ikincil (tali) kirişler için şu sistemler ayrı ayrı olarak uygulanmıştır:

- Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması
- Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım
- İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım

Çelik taşıyıcı kirişlerin içinden su dolaştırılarak soğutulması ile sağlanan pasif koruma yöntemi, yangına karşı aktif koruma sistemlerine dahil olması nedeniyle bu yapı örneğinde yer alan kirişlere uygulanmamıştır.
Yapıda yer alan birincil kirişler toplamda 210 adet, ikincil kirişler ise toplamda 105 adettir. Profil ölçüleri ise aşağıda yer almaktadır:

- Birincil kirişler: 260 x 260 x 6,3 mm (Her bir kirişin uzunluğu 7,2 metredir)
- İkincil kirişler: 220 x 220 x 6,3 mm (Her bir kirişin uzunluğu 6,94 metredir)

5.3.1 Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması (kirişler)

- **Beton sınıfı ve donatı yüzdesinin belirlenmesi**

Beton sınıfı: Çizelge 5.1'e göre, boyutu 260 x 260 x 6,3 mm olan çelik kutu enkesitli bir profilin içerisine yerleştirilecek betonun C 30 dayanımında olması gerekmektedir.

Çelik donatı yüzdesi: Şekil 5.2'ye göre C 30 betonu için 7, 8 veya 9 nolu eğriler kullanılabilir. Buradan yola çıkılarak, donatı yüzdesi % 1 olarak seçilmiştir.

- **Donatı miktarının belirlenmesi:**

Birincil kirişler için:
Çelik kirişin iç alanı = $(260 - 12,6)^2 = 61207$ mm^2
Çelik donatı alanı = 61207 x 0,01 = 612 mm^2

Çizelge 5.2'deki çelik donatı tablosundan 14 mm lik demir donatı seçildiğinde, bir kirişte 4 adet donatı kullanımı yeterli olmaktadır.Toplam beton miktarı ise şu şekildedir:

Toplam beton miktarı ($m^{3)}$ = kiriş uzunluğu x yapıda bulunan toplam birincil kiriş sayısı x kullanılacak net beton alanı = 7200 mm x 105 x (61207 mm^2 – 1530 mm^2) = 45 m^3

Ayrıca, **Çizelge 5.2'**de yer alan donatı tablosuna göre 14 mm çapında 1 m donatının ağırlığı 1,208 kg'dır. Buradan yola çıkarak toplam donatı ağırlığı şu şekildedir:
Toplam çelik donatı ağırlığı (kg) = (kiriş uzunluğu x kiriş sayısı x 1 kirişte bulunan donatı sayısı x 1 adet donatının ağırlığı)

= 7,2 x 105 x 4 x 1,208 = 3653 kg = 3,653 ton

İkincil kirişler için ise;

Beton sınıfı: Çizelge 5.1'e göre, boyutu 220 x 220 x 6,3 mm olan çelik kutu enkesitli bir profilin içerisine yerleştirilecek betonun C 20 dayanımında olması gerekmektedir.

Çelik donatı yüzdesi: Şekil 5.2'ye göre C 20 betonu için 7, 8 veya 9 nolu eğriler kullanılabilir. Buradan yola çıkılarak, donatı yüzdesi % 1 olarak seçilmiştir.

Çelik kirişin iç alanı = $(220 – 12,6)^2$ = 43015 mm^2
Çelik donatı alanı = 43015 x 0,01 = 430 mm^2

Çizelge 5.2'deki çelik donatı tablosundan 12 mm lik demir donatı seçildiğinde, bir kirişte 4 adet donatı kullanımı yeterli olmaktadır.Toplam beton miktarı ise şu şekildedir:

Toplam beton miktarı ($m^{3)}$ = kiriş uzunluğu x yapıda bulunan toplam birincil kiriş sayısı x kullanılacak net beton alanı = 6940 mm x 210 x (43015 mm^2 – 430 mm^2) = 61,1 m^3

Ayrıca, Çizelge 5.2'de yer alan çelik donatı tablosuna göre 8 mm çapında 1 m donatının ağırlığı 0,887 kg'dır. Buradan yola çıkarak toplam donatı ağırlığı şu şekildedir:
Toplam çelik donatı ağırlığı (kg) = (kiriş uzunluğu x kiriş sayısı x 1 kirişte bulunan donatı sayısı x 1 adet donatının ağırlığı)

= 6,94 x 210 x 4 x 0,887 = 5170 kg = 5,17 ton

1 m^3 betonun sahadaki işçilik süresi 9,37 saat, 1 ton nervürlü inşaat çeliğinin işçilik ise 115 saat olduğuna göre, toplam işçilik süreleri şu şekildedir:

- 9,37 x 106,1 = 995 saat (toplam beton işçilik süresi)
- 115 x 8,823 = 1015 saat (toplam demir işçilik süresi)

Çizelge 5.11 : Betonla doldurulan kirişler için pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	**Miktar**	**Birim**	**Birim fiyat (TL)**	**Toplam fiyat (TL)**
Malzeme maliyeti				
Beton çelik çubuğu, nervürlü (Ø 8-32 mm) (S420, B420B-C, B500B-C)	8,823	ton	17000	150.000 TL
Beton (C 30 Sınıfı)	45	m^3	1550	69.750 TL
Beton (C 20 Sınıfı)	61,1	m^3	1510	92.260 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	98,8	ton	360	35.570 TL
Demir donatı işçilikleri (nervürlü beton çelik çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması, malzeme nakliyesi)	1015	saat	70	71.050 TL
Beton işçilikleri Beton santralinde üretilen veya satın alınan ve beton pompasıyla basılan, gri renkte, normal hazır beton dökülmesi (beton nakli dahil)	995	saat	70	69.650 TL
			Toplam maliyet	**488.280 TL**

5.3.2 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım (kirişler)

Yangına karşı korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörünün belirlenmesi (3 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik için):
TS EN 1993-1-2 / 2007 yönetmeliğine göre bu yapıda yer alan çelik kirişlerin kesit faktörü şu şekildedir:

Birincil kirişler için:

A / V = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı = (2h+ b) / A = (260x2+260) /(260^2-$247,4^2$) x 10^3= 120 m^{-1}

Şekil 4. 19'a göre, 540 ºC sıcaklıkta 120 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profil için gereken püskürtme sıva kalınlığı ise 25 mmdir. Yapıda kullanılacak toplam sıva miktarının bulunabilmesi için aşağıdaki formül uygulanmalıdır:
Bir kiriş için gerekli toplam sıva miktarı = (toplam sıva hacmi x püskürtme sıva yoğunluğu)

- Bir kirişe uygulanacak toplam sıva hacmi = 0,26 x 3 x 7,2 x 0,025 = 0,14 m^3
- Püskürtme sıva yoğunluğu = 352 kg/m^3
- Gerekli toplam sıva miktarı= 105 x 0,14 x 352 = 5174 kg

Uygulama esnasında oluşabilecek %15 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 5174 x 1,15 = 5950 kg püskürtme sıva gerekmektedir.

1 m^2 püskürtme sıvanın tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,35 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

- 0,35 sa/m^2 x 786 m^2 = 275 saat

İkincil kirişler için:
A / V = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı = (2h+ b) / A = (220x2+220) /(220^2-207,4^2) x 10^3= 120 m^{-1}

Şekil 4. 19'a göre, 540 ºC sıcaklıkta 120 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profil için gereken püskürtme sıva kalınlığı ise 25 mm'dir. Yapıda kullanılacak toplam sıva miktarının bulunabilmesi için aşağıdaki formül uygulanmalıdır:
Bir kiriş için gerekli toplam sıva miktarı = (toplam sıva hacmi x püskürtme sıva yoğunluğu)

- Bir kirişe uygulanacak toplam sıva hacmi = 0,22 x 3 x 0,025 x 6,94 = 0,11 m^3
- Püskürtme sıva yoğunluğu = 352 kg/m^3
- Gerekli toplam sıva miktarı= 210 x 0,11 x 352 = 8131 kg

Uygulama esnasında oluşabilecek %15 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 8131 x 1,15 = 9350 kg püskürtme sıva gerekmektedir.

1 m^2 püskürtme sıvanın tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,35 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

- 0,35 sa/m^2 x 1282,5 m^2 = 489 saat

Çizelge 5.12 : Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kirişlerde pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	**Miktar**	**Birim**	**Birim fiyat (TL)**	**Toplam fiyat (TL)**
Malzeme maliyeti				
Püskürtme sıva (birincil kirişler için)	15300 (9350+5950)	kg	25	382.500 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	98,8	ton	360	35.570 TL
Demir donatı işçilikleri (nervürlü beton çelik çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması, malzeme nakliyesi) İşçilik giderleri - Malzeme nakliyesi - Püskürtme sıva uygulamaları	764 (489+275)	saat	70	53.480 TL
			Toplam maliyet	**471.550 TL**

5.3.3 İntümesan (Genleşen) Boyalar ile Yalıtım (kirişler)

TS EN 1993-1-2 / 2007 yönetmeliğine göre bu yapıda yer alan çelik kirişlerin kesit faktörü şu şekildedir:

Yangına karşı korunmayan çelik elemanlar için kesit faktörünün belirlenmesi (3 tarafı yangına maruz kalan korumasız çelik için):

Birincil kirişler için:

A / V = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı = (2h+ b) / A = (260x2+260) /(260^2-$247{,}4^2$) x 10^3= 120 m^{-1}

Çizelge 5.7'ye göre, 550 ^oC sıcaklık ve 120 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profilin 60 dakikalık yangın dayanımı için uygulanması gereken boya kalınlığı 0,663 mm dir.

Ürün içerisinde yer alan katı madde oranı %70 olduğu için, 1000 mikron (1 mm) kuru film kalınlığı elde etmek için 1428 mikron (1,428 mm) ıslak film kalınlığına ulaşmak gerekmektedir. Bu yüzden, birincil kirişlerde 0,663 mm kuru film kalınlığına (DFT) ulaşmak için yaş film kalınlığının (WFT) 0,947 mm dir.

Seçilen AVICOTE WB 600 isimli su bazlı intümesan boya için teknik föyde yer alan bilgilere göre boya kuru film kalınlığı (DFT) 0,5 mm olduğunda, 0,7 litre ile boya ile 1 m^2 lik yüzey boyanabilmektedir. 1 m^2 yüzeyin boyanabilmesi için;

0,5 mm DFT – 0,7 lt ise >> 0,663 mm DFT – 0,928 lt'dir.

Bir kiriş için intümesan boya uygulanacak yüzey alanı:

- Birincil kirişler için: 260 mm x 3 x 105 x 7200mm x 10^{-3} = 590 m^2 => 547,5 lt boya,
- Uygulama esnasında oluşabilecek %10 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 547,5 x 1,1= 602,3 lt boya gerekmektedir.

1 m^2 intümesan boya işleminin tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,9 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

- 0,9 x 786 = 707,4 saat

İkincil kirişler için:

Kesit faktörü (A / V) = yangına maruz yüzey alanı / enkesit alanı:

- (2h + b) / A = (220 x 2+220) / (220^2- $207,4^2$) x 10^3= 120 m^{-1}

Çizelge 5.7 ye göre, 550 ºC sıcaklık ve 120 m^{-1} kesit faktörüne sahip dikdörtgen enkesitli çelik profilin 60 dakikalık yangın dayanımı için uygulanması gereken boya kalınlığı 0,663 mm dir.

İkincil kirişler için: 220 mm x 3 x 210 x 6940mm x 10^{-3} = 962 m^2 >> 892,7 lt boya gerekmektedir.

Uygulama esnasında oluşabilecek %10 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise:

- 892,7 x 1,1= 982 lt boya gerekmektedir.

1 m^2 intümesan boya işleminin tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,9 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

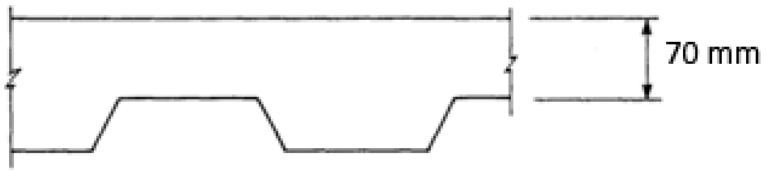
- 0,9 x 1282,5 = 1154 saat

Çizelge 5.13: İntümesan boya uygulanan kirişlerde pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	Miktar	Birim	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Malzeme maliyeti				
Su bazlı intümesan boya	1584,3 (602,3+982)	lt	300	475.290 TL
Son kat koruyucu boya	258,5 (73,8+120,2)	kg	200	51.700 TL
Uygulama maliyeti				
Yüzey kumlama ve primer (astar boya) uygulaması	98,8	ton	360	35.570 TL
İntümesan boya uygulaması	1861,4 (1154+707,4)	saat	70	130.300 TL
Son kat koruyucu boya uygulaması	1861,4 (1154+707,4)	saat	70	130.300 TL
			Toplam maliyet	**588.850 TL**

5.4 Döşemeler İçin Yangına Karşı Pasif Koruma Uygulamaları

Maliyet analizi için incelenen bina örneğinde tüm döşemelerde kompozit döşeme sistemi kullanılmıştır. Kompozit döşeme sistemi, trapez sac+beton katmanı ve onu destekleyen kompozit kirişlerden oluşmaktadır. Döşeme sisteminin yapıdan beklenen 60 dakikalık yangın dayanımını gösterebilmesi için minimum beton kalınlığı 70 mm olarak uygulanmıştır.



Şekil 5.4 : Yapının kompozit döşemeleri için gerekli minimum kalınlık değerinin gösterimi.

Döşeme sisteminde yer alan kompozit kirişlerin pasif yangın korunumu için ise tez kapsamında incelenen püskürtme sıva ve intümesan boya ile korunum yöntemleri sırasıyla uygulanıp maliyet karşılaştırması yapılmıştır.

5.4.1 Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım uygulaması (döşemeler)

Püskürtme sıva yöntemi ile metal trapez yüzeyde 60 dk yangın dayanımı elde edebilmek için uygulanması gereken sıva kalınlığı 25 mm'dir (Çizelge 5.14).

Çizelge 5.14 : Kompozit döşeme için minimum püskürtme sıva kalınlık değerleri.

Çelik tabliye/levha türü	**Kompozit döşemenin toplam yükseklik değeri (mm)**	**Minimum yalıtım kalınlığı (mm)**				
		REI 30	REI 60	REI 90	REI 120	REI 180
Trapez	40-280	15	25	36	46	x
Kırlangıç (yivli)	40-200	11	11	15	24	40

Yapının döşeme sistemlerinde yangına maruz kalan toplam metal yüzey alanı ise:
2,18 x 6,94 x 105 x 3 = 5720 m^2

Toplam sıva miktarı:

- 5720 m^2 x 352 kg/m^3 x 0,025 m = 50336 kg
- Uygulama esnasında oluşabilecek %15 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise:

50336 x 1x13 x 1,15 = 57886 kg püskürtme sıva gerekmektedir.

1 m^2 püskürtme sıvanın tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,35 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi:

0,35 x 5720 = 2002 saattir.

Çizelge 5.15 : Püskürtme sıva yöntemi uygulanan kompozit döşemelerin toplam pasif koruma maliyeti.

Malzeme ve Uygulamalar	Miktar	Birim	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Malzeme maliyeti				
Püskürtme sıva	57886	kg	25	1.258.400 TL
Uygulama maliyeti				
Püskürtme sıva uygulama işçiliği	2002	saat	70	140. 140TL
			Toplam maliyet	**1.398.540 TL**

5.4.2 İntümesan (genleşen) boya uygulaması (döşemeler)

- 60 dakikalık yangın dayanımı için 1 litre intümesan boya ile yaklaşık olarak 0,9 m^2 lik yüzey boyanabilmektedir. Yapının döşeme sistemlerinde yangına maruz kalan toplam metal yüzey alanı ise = 2,18 x 6,94 x 105 x 3 = 5720 m^2
- Toplam intümesan boya miktarı = 5720 m^2 / (0,9 m^2 / lt) = 6355 lt
- Uygulama esnasında oluşabilecek %10 oranında malzeme sarfiyatı eklendiğinde ise: 6355 x 1,1 = 6990 lt intümesan boya gerekmektedir.

1 m^2 intümesan boya işleminin tamamlanması için gereken işçilik süresi 0,9 saat olduğu için, uygulama için gereken toplam işçilik süresi: 0,9 x 5720 = 5148 saattir.

Çizelge 5.16 : İntümesan boya uygulanan kompozit döşemelerin toplam pasif koruma maliyeti.

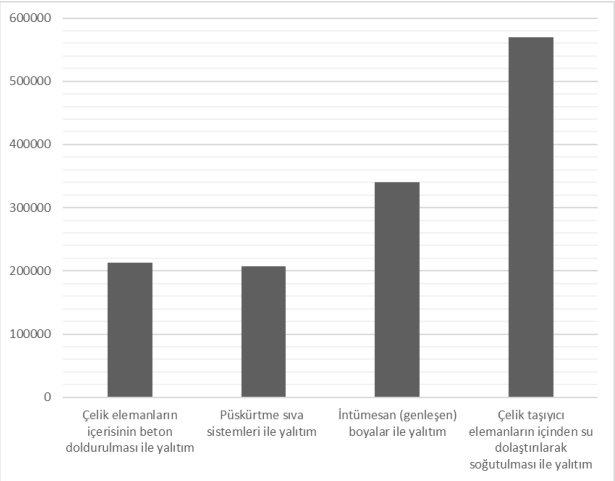
Malzeme ve Uygulamalar	Miktar	Birim	Birim fiyat (TL)	Toplam fiyat (TL)
Malzeme maliyeti				
Su bazlı intümesan boya(kiriş)	6355	lt	300	1.906.500 TL
Son kat koruyucu boya	715	kg	200	143.000 TL
Uygulama maliyeti				
İntümesan boya uygulaması	5148	saat	70	360.360 TL
Son kat koruyucu boya uygulaması	5148	saat	70	360.360 TL
			Toplam maliyet	**2.770.220 TL**

Maliyet hesaplamaları, her bir taşıyıcı çelik bileşen türü için ayrı olarak hesaplanmıştır. Analiz kapsamında ele alınan 3 katlı çelik taşıyıcılı ofis binasına ilişkin toplam pasif koruma maliyetlerinin taşıyıcı bileşen bazında gösterimi Çizelge 5.17'de yer almaktadır.

Çizelge 5.17 : Pasif koruma maliyetlerinin taşıyıcı bileşen bazında gösterimi.

Pasif koruma uygulanan taşıyıcı yapı bileşeni	**Pasif koruma uygulaması türü**	**Uygulamanın toplam maliyeti (TL)**
kolonlar	Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	220.620
	Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	207.800
	İntümesan boyalar ile yalıtım	340.580
	Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması	582.625
kirişler	Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	488.280
	Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	471.550
	İntümesan boyalar ile yalıtım	588.850
	Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması	- (sistem uygulanmamaktadır)
döşemeler	Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	- (sistem uygulanmamaktadır)
	Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	1.398.540
	İntümesan boyalar ile yalıtım	2.770.220
	Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması	- (sistem uygulanmamaktadır)

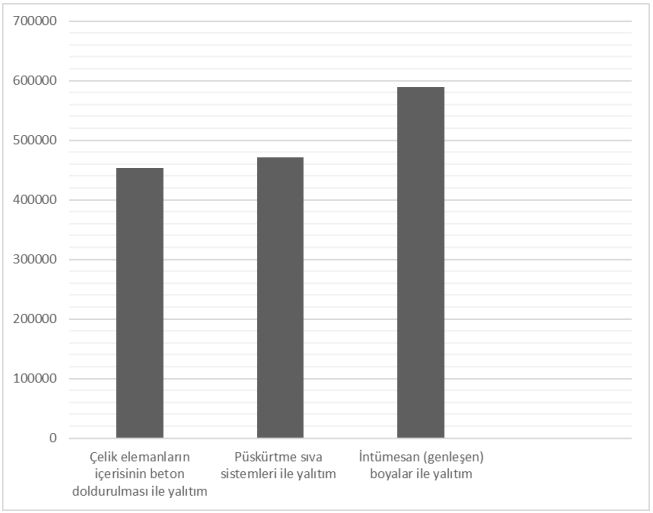
Bu sonuçlara göre yapının kolonlarına uygulanan pasif koruma yöntemleri arasında maliyeti en düşük olan yöntemin püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım; maliyeti en yüksek olan yöntemin ise çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması ile yalıtım olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : Kolonlara uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi.

Yapıda yer alan çelik kirişlerde ise; uygulanan pasif koruma yöntemleri arasında maliyeti en düşük olan yöntemin püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım; maliyeti en yüksek olan yöntemin ise intümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 5.6).

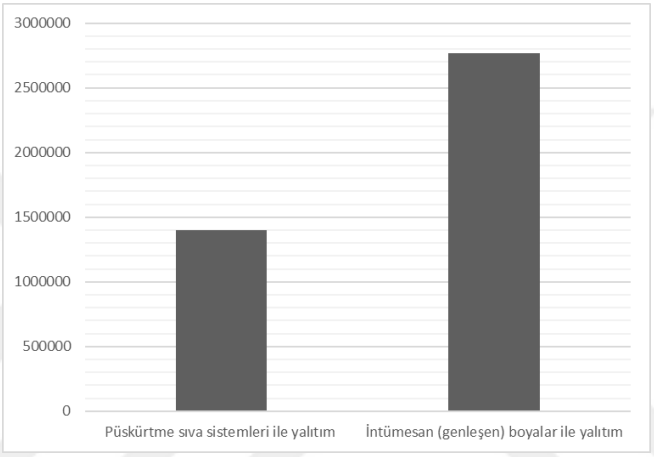
Ek olarak, çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması ile yalıtım uygulaması, yalnızca boru/kutu enkesitli çelik kolonlara uygulandığında pasif koruma sağlaması sebebiyle bu yöntem kirişlerde uygulandığında tez konusu kapsamında dışında kalmaktadır. Bu yüzden, kirişlerde bu yönteme dair herhangi bir maliyet hesaplaması yapılmamıştır.



Şekil 5.6 : Kirişlere uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi.

Yapının kompozit döşeme sisteminde ise, belirlenen 60 dakikalık yangın dayanımını sağlayacak minimum beton kalınlık değeri belirlenmiş ve metal trapez levha yüzeyine püskürtme sıva ve intümesan (genleşen) boya uygulamasının yapıldığı durumlara ait bir maliyet hesaplaması yapılmıştır.

Yapılan hesaplamalara göre intümesan boya uygulamasının püskürtme sıva uygulamasından daha maliyetli olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.7). Diğer iki pasif koruma yöntemi ise, döşemenin metal yüzeyinde kullanımı için uygun olmadıkları için bu uygulamalara yönelik bir maliyet hesaplaması yapılmamıştır.



Şekil 5.7 : Kompozit döşemelere uygulanan pasif koruma maliyetlerinin gösterimi.

6. DEĞERLENDİRME

Tez çalışması kapsamında, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlar ele alınmış ve bu elemanların yangına karşı korunumunda uygulanabilecek pasif koruma yöntemleri detaylı olarak irdelenmiştir. Bu yöntemlerin kaşılaştırılabilmesi için birtakım performans kriterleri belirlenmiştir:

- Uygulama maliyeti
- Uygulama koşulları
- Uygulama süresi / hızı
- Görsel etki / estetik görünüm
- Çelik taşıyıcı elemanlarda kullanım olanakları
- Yangına karşı dayanım ve süreklilik
- Çevresel koşullara karşı dayanım
- Hafiflik / yapıya etkiyen ek yüklerin etkisi

Yapılan araştırmalar ve analizler göz önünde bulundurulduğunda pasif koruma yöntemlerinin özellikleri, avantajları ve dezavantajları sırası ile şu şekilde açıklanabilmektedir:

Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması:

Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması yönteminde, kutu veya boru enkesitli çelik elemanların içi yangın dayanımının arttırılması amacıyla betonla doldurulmaktadır. Kutu veya boru profillerin içine beton malzemenin doldurulmasıyla elde edilen çelik taşıyıcı elemanlar, çelik ve betonun yapısal avantajlarını birleştirmektedir. Bu uygulama sayesinde küçük enkesitli kolonlarda boyutlandırmanın arttırılmasına gerek kalmadan mevcut elemanın taşıma kapasitesi artırılabilmekte ve dış yüzeye herhangi bir ek müdahale yapılmadan mimari olarak görünür taşıyıcı çelik elemanlarda estetik görünümün korunması da sağlanabilmektedir.

Uygulama hem sahada hem de saha dışında tamamlanabilmektedir. Betonun doldurulduğu çelik kutu/boru enkesitli profil, uygulama esnasında kalıp işlevi görmesi sebebiyle betonun yerleştirilmesi için gereken işçilik maliyetlerinin azalmasını sağlamaktadır. Bu pasif koruma yönteminde, bir yangın esnasında ortamda oluşan ısı çelik profiller aracılığıyla ısı emici özelliğe sahip beton malzemeye iletilmektedir. Betonun dışını saran çelik profil ve betonun içerisinde yer alan çelik donatılar is betonda oluşan ısı etkisini sınırlamaya yardımcı olmaktadır. Ayrıca, dışta yer alan çelik profil yangın esnasında akma dayanımına ulaştığında mukavemetini kaybederek taşıyıcılık özelliğini yitirmekte olsa bile, bu sistemde çelik taşıyıcı elemanlara etkiyen yükler iç kısımda bulunan beton malzemeye aktarılmakta ve bu katman yapının taşıyıcılık işlevinin sürdürülmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, betonun yapısında bulunan su, betonun çelik gibi hızlı ısınmasına engel olmaktadır.

Ek olarak, kutu/boru enkesitli çelik kolonların içine dökülen betona donatı yerleştirilerek yangına karşı daha uzun süre dayanım sağlanabilmektedir. Bu yöntemde donatı kullanımı; kesit boyutu ve ek yalıtım ihtiyacına göre genellikle şu şekilde belirlenmektedir:

- Çelik enkesit maksimum boyutu < 300 mm ise, çelik donatı kullanımı zorunlu değildir, ancak kesit yüzeyininin dışarıdan ek bir uygulama ile yalıtılması gerekmektedir.

- Çelik enkesit minimum boyutu 300 mm ve üzerinde bir büyüklükte ise, çelik donatı kullanımı gerekmektedir. Dolayısıyla, kesit yüzeyinde genel olarak ek bir yangın yalıtımına gerek duyulmamaktadır.

Sonuç olarak bu uygulama, çelik taşıyıcı elemanların yangın dayanımını artırmasının yanısıra yapının yük taşıyıcılığına katkıda bulunmaktadır. Bu yüzden, bu yöntemin çoğunlukla yüksek katlı ve yüksek düzeyde yangın yüküne maruz kalma riski bulunan yapılarda pasif yangın koruma yöntemi olarak kullanımının tercih edilmesi uygundur.

Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım:

Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım, yapısal çeliğin yangına karşı korunumunda kulanılan pasif koruma yöntemlerden biridir. Püskürtme malzemesi olarak kullanılan malzemeler tipik olarak çimentolu (alçıtaşı veya Portland çimentosu) bağlayıcılardan ve inorganik gözenekli agregalardan (perlit, vermikülit, vb.) veya mineral yünlerden

oluşan hafif sıvalardır. Bu malzemeler çok düşük ısıl iletkenliğe sahip olmaları ve yoğun gözenekli yapıda olmaları sayesinde yangına karşı dayanım sağlamaktadır. Bu uygulamada en yaygın olarak kullanılan malzeme türü ise çimento bazlı sıvalardır. Uygulama öncesinde çelik profilin dış yüzeyinin kumlanması; yağ, kir, pas ve yabancı maddelerden arındırılarak püskürtme sıva işlemine hazır hale getirilmesi gerekmektedir. İşlemin püskürtme yöntemiyle yapılması ise, uygulama süresini kısaltarak maliyetin önemli ölçüde azaltılmasını sağlamaktadır.

Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım uygulaması, diğer pasif koruma yöntemleri ile kıyaslandığında maliyeti en az olan yöntemdir. Ancak bu yöntem, uygun maliyet ve hızlı işlem gibi önemli avantajlara sahip olmasına rağmen bazı dezavantajları nedeniyle yangına karşı gösterdiği performansı olumsuz yönde etkilenmektedir.

Bu uygulamada, çelik taşıyıcılı eleman yüzeylerinin kaplanan sıva ile görünürlüğünün azalması ve yüzeylerde estetik olmayan bir görünüm oluşturması sebebiyle mimari olarak görünür çelik taşıyıcı elemanlarda kullanmak için yeterince uygun bir sistem değildir. Ayrıca, yüzeylere uygulanan sıva katmanı, çelik taşıyıcı elemanların toplam enkesit alanını önemli düzeyde artırmaktadır ve bu da yapıda toplam mekansal hacmi azaltmaktadır.

Bu sistemin bir diğer dezavantajı ise, uygulamada kullanılan sıva malzemelerinin mekanik dayanımının zayıf olmasıdır. Uygulamada kullanılan sıva malzemelerinin düşük gerilme mukavemetine sahip olması ve malzemenin çelik yüzeyle tutunumunun (adhezyonunun) zayıf olması sebebiyle yapıda meydana gelebilecek deprem, titreşim, bina bakım çalışmaları gibi durumlarda sıva katmanı belirli bölgelerde çelik yüzeyden ayrılarak hasar görebilmektedir. Yapısal çelik elemanların yüzeyinde meydana gelen bu sıva kayıplarının gözlemlenememesi veya tamir edilmemesi halinde, pasif korumada yangın direncinin azalmasına neden olmaktadır.

İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım:

İntümesan boyalar, çelik taşıyıcı elemanları yangına karşı yalıtmak için yangın esnasında hızla kömürleşen ve genleşen çok katmanlı kaplama sistemleridir. Uygulama için gerekli boya kalınlıkları, uygulanması planlanan yapısal çelik elemanın boyutlarına ve yapı için gereken yangın dayanım düzeyine bağlı olarak belirlenmektedir. Uygulama öncesinde boyanacak yüzeylerin kumlanması; yağ, kir,

pas ve yabancı maddelerden arındırılarak boyama işlemine hazır hale getirilmesi gerekmektedir.

Ek olarak, intümesan boyaların yangın esnasında beklenen performansı göstermesi için belirlenen boya kalınlık düzeylerine göre kontrol edilerek uygulanması gerekmektedir.

İntümesan boyalar, yangına karşı korunan yüzey alanı başına azaltılmış ağırlık (hafiflik), estetik etki gibi avantajlara sahiptir. Estetik etkinin mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlardan beklenen önemli bir tasarım kriteri olması sebebiyle, bu tür elemanlarda intümesan boyaların kullanımı sıklıkla tercih edilmektedir.

Bunlara ek olarak, intümesan boya uygulaması hem sahada hem de saha dışında uygulanabilmektedir. Dolayısıyla, şantiyedeki toplam inşaat süresinin kısaltılması için boya uygulamasının saha dışında tamamlanması alternatif bir seçenek olarak sunulabilmektedir. Uygulama sonrası bakım ve onarım işlemleri ise diğer sistemlerle kıyaslandığında daha kolay bir şekilde yapılabilmektedir.

Tüm bu avantajlarının yanı sıra, bu koruma yönteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Bu koruma yönteminin uygulanabilmesi için sahada uygun çevre koşullarının (sıcaklık, nem düzeyi vb.) sağlanması ve boyama işlemi yapılmayacak diğer yapı elemanlarının korunması gerekmektedir. Saha dışı uygulama yapılması istenen durumlarda ise, elemanların nakliye ve montajı esnasında yüzeylerin mekanik olarak hasar gören kısımlarının yeniden boyanması gerekmektedir.

Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması:

Bu sistem, yangın esnasında kolonlar içerisinde yer alan boruların içerisinde yer alan suyun soğutulması prensibiyle çalışmaktadır. Sistem, yangın esnasında meydana gelen ısı artışını dolaşım yoluyla sürekli olarak önleyecek ve bu sayede yangın boyunca yapısal çelik elemanların taşıyıcılığını yitireceği kritik sıcaklık değerine ulaşmayacak şekilde tasarlanmaktadır. Ek olarak, sistemin yangın süresince etkin bir şekilde performans gösterebilmesi için yeterli düzeyde su depolama hacminin ve mekanik tesisatının bulunması gerekmektedir. Bu sistemin başlıca avantajları ise şunlardır:

Çelik elemanların yangına karşı korunumu için elemanların dış yüzeyinde herhangi bir ek müdahale gerekmemektedir. Bu sayede, taşıyıcı elemanların yapı içerisinde kapladığı toplam hacim daha az olmakta ve kullanıcılar için daha geniş bir hacmin

oluşması sağlanmaktadır. Bu durum ayrıca, taşıyıcı elemanların yapıdaki estetik etkisinin daha iyi ifade edilebilmesine katkı sağlamaktadır.

Taşıyıcı çelik elemanlar, yangın esnasında kritik sıcaklık değerlerine ulaşmadığı için yangından sonra minimum bir bakım maliyeti gerektirerek tekrar kullanılabilmektedir. Buna ek olarak, diğer pasif koruma sistemleri taşıyıcı elemanların yangına dayanımını belirlenen süre aralıklarında sürdürebilirken; bu sistemde yangın korunumu sınırsız olarak sağlanabilmektedir.

Genel olarak bu sistem, doğru tasarım ve uygulama koşulları sağlandığında, yangına karşı korumada oldukça etkin düzeyde bir performans göstermektedir. Sistemin en büyük dezavantajları ise, uygulanabildiği çelik taşıyıcı elemanların boru/kutu enkesit tipleri (kapalı profiller) ile sınırlı olması ve yüksek uygulama maliyetine sahip olmasıdır. Sistemde suyun dolaşımının etkin olarak sağlanabilmesi için bu sistem genellikle yalnızca dikey kolonlarda kullanılmaktadır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik, yapısal olarak birçok avantajının bulunması sebebiyle inşaat sektörü için vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Ancak, birçok yönden avantajlı bir malzeme olmasına karşın bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Çelik, yanıcı özelliğe sahip bir malzeme olmamasına karşın yüksek sıcaklıklar altında ısıl şekil değişimlerine uğramakta ve yapının yük taşıma kapasitesinde hızlı bir düşüş gözlenmektedir. Sahip olduğu bu olumsuz özellik, yapısal çelik elemanların mimari olarak görünür bir şekilde kullanıldığı durumda bu malzemeyi yangına karşı daha çok koruma zorunluluğu getirmektedir. Bu durum ise, olası bir yangın durumunda yapının taşıyıcılık işlevini sürdürebilmesi, yapı içerisinde bulunan kullanıcıların ortamdan tahliye edilmesi ve yangının kontrol altına alınması imkanları açısından önemlidir. Bu yüzden, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanların yangına karşı korunumu için pasif koruma yöntemlerinin uygulanması gerekmektedir.

Bu tez çalışmasında, mimari olarak görünür yapısal elemanlarda yangına karşı korumada kullanılan pasif koruma yöntemleri alınmıştır. Çalışmanın ilk bölümünde mimari olarak görünür yapısal çelik elemanların tarihsel olarak gelişim aşamalarına, genel özelliklerine, sınıflandırma yöntemlerine ve bu elemanların kullanıldığı bazı yapı örneklerine yer verilmiştir. Çalışmanın sonraki aşamalarında ise ele alınan konuya açıklık kazandırmak amacıyla, çelik elemanların yangına karşı dayanımına ilişkin kavramlar ele alınmıştır. Yangına karşı korumasız çelik elemanların yangın esnasındaki davranışlarını anlamak amacıyla malzemenin yüksek sıcaklıklar altında gösterdiği kimyasal, ısıl ve mekanik özellikleri irdelenmiştir. Buna ek olarak, mimari olarak görünür çelik yapıların yangına karşı korunumunda uygulanabilen pasif koruma yöntemleri detaylı olarak incelenmiştir. Daha sonrasında ise, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlarda kullanılan bu yöntemlerin karşılaştırılabilmesi için bazı performans kriterleri belirlenmiş ve bu kriterler baz alınarak gerekli analizler ve hesaplamalar yapılmıştır.

Uygulama maliyeti

Tez çalışması kapsamında yapılan maliyet analizlerinden yola çıkılarak, yapılan karşılaştırılmalar sonucunda:

Kolonlarda en az maliyetli yöntemin püskürtme sıva ile yalıtım, maliyeti en yüksek yöntemin ise çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması uygulaması olduğu;

Kirişler ve döşemelerde ise en az maliyetli yöntemin püskürtme sıva ile yalıtım, maliyeti en yüksek yöntemin intümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım uygulaması olduğu belirlenmiştir.

Uygulama koşulları

Pasif koruma yöntemleri, sahada veya saha dışında uygulanabilme imkanları bakımından bazı benzerlikler veya farklılıklar göstermektedir. Bu durum tablo halinde şu şekilde gösterilebilir (Çizelge 7.1):

Çizelge 7.1 : Uygulama koşullarının karşılaştırılması

Pasif koruma uygulaması türü	Sahada uygulanabilirlik	Saha dışında uygulanabilirlik
Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	+	+ (1)
Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	+	-
İntümesan boyalar ile yalıtım	+	+ (2)
Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması	+	-

(1) Kısmen saha dışı uygulamalar da yapılabilmektedir (çelik donatıların yerleşimi saha dışında, beton dökümü ise sahada yapılabilir.)

(2) Genellikle mekanik darbeye dayanımı düşük olduğu için solvent bazlı boya uygulaması sahada yapılmaktadır. Epoksi bazlı boyalar ise mekanik darbeye dayanıklı olduğu için uygulama çoğunlukla saha dışında tamamlanmaktadır.

Uygulama süresi / hızı

Pasif koruma yöntemlerinin uygulama hızı, binanın toplam inşaat süresini etkileyen faktörler arasında yer almaktadır. Maliyet analizinde işçilik giderlerinin belirlenmesi için çalışmanın bir önceki bölümünde her uygulama için gereken toplam işçilik

süreleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Buradan elde edilen verilere göre, uygulama işlemi en kısa sürede tamamlanabilen pasif koruma yönteminin püskürtme sıva ile yalıtım uygulaması, en uzun sürede tamamlanan pasif koruma yönteminin ise çelik elemanların içerisinin betonla doldurulma uygulaması olduğu sonucuna varılmıştır.

Ancak bu karşılaştırma, uygulamaların tüm aşamalarının sahada yapıldığı ve sahadaki ortam şartlarının tüm uygulamalar için elverişli olduğu duruma göre yapılmıştır. Seçilen pasif koruma yönteminin bazı aşamalarının saha dışında tamamlanarak uygulamanın yapılması halinde toplam uygulama süreleri için yapılan karşılaştırmalar farklılık gösterebilmektedir.

Görsel etki ve estetik görünüm

Mimari olarak çelik taşıyıcı elemanların kullanıcılar tarafından algılanan görünümü, yapıya kazandıracağı görsel etki açısından önem arz etmektedir. Dolayısıyla, pasif koruma yönteminin kullanıldığı yapının veya bölümün kullanım amacına uygun doğrultuda seçilmesi gerekmektedir. Karşılaştırmalar ise şu şekilde yapılabilir:

Beton ile koruma yönteminde, beton malzeme çelik kutu/profillerin içerisine yerleştirildiği için yapılacak pasif koruma uygulaması çelik taşıyıcı elemanının görünümünü olumsuz yönde etkilememektedir. Ayrıca, bu yöntemin uygulanması durumunda tercihe bağlı olarak yüzeyler dekoratif bir boya ile boyanabilmektedir.

Püskürtme sıva uygulaması ile yangına karşı pasif koruma işlemlerinin yapılması durumunda, yapısal çelik elemanının yüzeyi pürüzlü ve estetik olmayan bir görünüm kazanmaktadır. Bu yüzden, bu koruma işlemi genellikle yapıların fazla görünür olmayan bölümlerinde veya estetik kaygının yüksek düzeyde olmadığı yerlerde kullanımı tercih edilmektedir.

İntümesan (genleşen) boyalar, görünür çelik elemanlarda sağladığı estetik etki sebebiyle sıklıkla tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadır. Uygulama sonrasında çelik taşıyıcı elemanların dış yüzeyi istenen renkte son kat koruyucu bir boya tabakası ile kaplanmaktadır. Uygulanan bu boya işlemleri yüzeylerin görünümünde estetik olarak olumsuz bir etki oluşturmamaktadır

Su dolaşımlı sistemlerde ise, çelik taşıyıcı elemanların içerisinden su dolaştırılarak yangına karşı pasif koruma sağladığı için taşıyıcı elemanların dış yüzeyinde ek bir

yalıtım tabakası ile önlem alınmasını gerektirmemektedir. Dolayısıyla, yüzeylerde estetik açıdan olumsuz bir durum meydana gelmemektedir.

Çelik taşıyıcı elemanlarda kullanım olanakları

Mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlarda kullanılan pasif koruma yöntemleri, sahip oldukları özelliklere bağlı olarak bazı durumlara bağlı olarak çelik taşıyıcı sistemlerin bazı bileşenlerinde kullanım olanağı bulunmamakta veya kullanılması halinde bazı sakıncalı durumlar meydana gelebilmektedir. Kullanım olanakları Çizelge 7.2'de ifade edilmektedir:

Çizelge 7.2 : Pasif koruma yöntemlerinin çelik elemanların enkesit türüne göre kullanımı.

Çelik Taşıyıcı Eleman Türü	**Pasif Koruma Yöntemi**			
	Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	İntümesan (genleşen) boyalar ile yalıtım	Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması
Yatay taşıyıcı elemanlar				
a) Kolonlar				
- Açık profil (I, H, L, C profiller)	-	+	+	-
- Kapalı profil (dairesel/kutu enkesitli profiller)	+	+	+	+
Düşey taşıyıcı elemanlar				
a) Kirişler				
- Açık profil (I, H, L, C profiller)	-	+	+	-
- Kapalı profil (dairesel/kutu enkesitli profiller)	+	+	+	-
b) Kompozit döşeme	-	+	+	-

Yangına karşı dayanım ve süreklilik

Her bir sistemde, yapının taşıyıcılık işlevini sürdürmesi için beklenen yangın dayanım süresine uygun olarak tasarım yapılabilmektedir. Su dolaşımlı sistem haricindeki diğer

pasif koruma yöntemlerinin çalışma prensibi genel olarak çelik taşıyıcı sistemlere ısı geçişinin geciktirilmesini amaçlamaktadır. Belirlenen yangın dayanım süresinden sonra bu sistemler yangına karşı koruyuculuk işlevini yitirerek taşıyıcı elemanların hasar görmesine sebep olmaktadır.

Su dolaşımlı sistemde ise, sistemin uygun şekilde tasarlanması ve uygulanması durumunda, yangın esnasında çelik elemanlarda sıcaklık artışı belirli bir değerin üzerine çıkmadığı için yapının taşıyıcı sistemi hasar görmemektedir. Dolayısıyla, bu yöntemler arasında yangına karşı dayanım ve sürekliliğin korunumu konusunda su dolaşımlı sistem öne çıkmaktadır.

Çevresel koşullara karşı dayanım

Pasif koruma yöntemlerinin iç ve dış çevre koşullarına karşı dayanımları şu şekilde açıklanabilmektedir:

Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurularak pasif koruma önlemi sağlanması durumunda, beton kapalı (kutu/boru) bir profilin içerisinde bulunduğu için iç ve dış çevre koşullarından büyük oranda etkilenmemektedir.

Püskürtme sıva yöntemi ise genel olarak yüksek nem düzeyi ve ekstrem sıcaklık farklılıklarının bulunduğu çevre koşullarına karşı yeterli dayanıma sahip değildir. Ayrıca, uygulamada kullanılan sıva malzemelerinin dayanımı, diğer sistemlerle kıyaslandığında daha azdır. Dolayısıyla, bu yöntemin uygun nem ve sıcaklık koşullarının sağlandığı iç mekanlarda kullanımı tercih edilmektedir.

İntümesan boya uygulamasında çevresel koşullara karşı dayanım kullanılan boyanın türüne göre farklılık göstermektedir. Bu boyalar, solvent (su) bazlı ve epoksi bazlı olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Yapısal özellikler sebebiyle solvent bazlı boyalar iç mekanlarda, epoksi bazlı boyalar ise hava koşullarına daha dayanıklı olmaları nedeniyle dış ortama maruz kalan çelik elemanlarda kullanımı tercih edilmektedir. Ayrıca, intümesan boya uygulamasının ardından çelik yüzeylerin su geçirimsiz bir koruyucu boya tabakası ile kaplanması gerekmektedir.

Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması ile sağlanan pasif koruma yönteminde ise, kolonların içerisinde yer alan su borularının içi sürekli olarak su ile dolu olduğu için çelik taşıyıcı elemanlar korozyona; elemanların içerisinde yer alan su ise donma riskiyle karşı karşıya kalmaktadır. Bu yüzden, dolaşımda kullanılan

suyun içerisine potasyum karbonat veya buna benzer özellikteki bir antijel malzeme eklenerek donmaya karşı tedbir alınması gerekmektedir. Ek olarak, korozyon etkisine karşı potasyum nitrat gibi antikorozif katkılar suyun içerisine eklenmesi gerekmektedir.

Hafiflik / yapıya etkiyen ek yüklerin etkisi

Maliyet analizi gerekli hesaplamalar yapılırken pasif koruma önlemleri için gereken toplam malzeme miktarları da belirlenmiştir. Buradan yola çıkarak, hafiflik bakımından en avantajlı yöntemin intümesan boya uygulaması; en dezavantajlı sistemin ise çelik elemanların içerisine beton doldurulması ile sağlanan pasif koruma yöntemidir.

Sonuç olarak, bu elemanlar için uygun olan pasif koruma yönteminin seçiminde maliyet önemli bir unsur olmasına rağmen, bu yöntemlerin bazı performans kriterlerini de beklenen düzeylerde sağlaması beklenmektedir. Dolayısıyla, mimari olarak görünür yapısal çelik elemanlara uygulanabilecek olan bu pasif koruma yöntemlerine yönelik performans kriterleri belirlenmiş ve yöntemler karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalardan çıkan sonuçlara göre ise, her bir yöntemin farklı durumlar açısından birden fazla avantajının ve dezavantajının bulunduğu gözlenmiştir. Pasif koruma yöntemleri sırası ile şu özellikleri ile ön plana çıkmaktadır:

- Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması yöntemi yüksek yangın yüküne karşı dayanım gösterebilmesi ve kütlesel artış ile yapının taşıyıcılığına katkı sağlaması,
- Püskürtme sıva yöntemi toplam uygulama maliyetlerinin az olması ve hızlı bir şekilde uygulanabilmesi,
- İntümesan boyalar sağladığı estetik görünüm, bileşenlerde uygulama olanaklarının fazla olması ve yapıya sağladığı hafiflik,
- Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması yöntemi ise, yangına karşı dayanım süresinin sınırsız olması ve sistemin sürdürebilir olması ile ön plana çıkmaktadır.

Dolayısıyla, her yöntem belirli yönleriyle olumlu veya olumsuz olarak ön plana çıkmaktadır. Bu yüzden, yangına karşı korumada en uygun pasif koruma yönteminin seçilebilmesi için taşıyıcı bileşenlerin yer aldığı yapının ve bulunduğu ortamın tüm

özellikleri bir bütün olarak ele alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, uygulanacak pasif koruma yönteminin belirlenmesi aşamasında tasarımcılara bu yöntemler hakkında mimari bir kılavuz oluşturması amaçlanmıştır.

Çizelge 7.3 : Pasif koruma yöntemlerinin belirlenen performans kriterlerinin karşılaştırılması.

Pasif koruma yöntemleri	**Mimari olarak görünür çelik taşıyıcı sistemlerde uygulanan pasif koruma yöntemleri için belirlenen performans kriterleri**										
	Uygulama maliyeti (1)	Uygulama süresi/hızı	Görsel etki/estetik görünüm	Yangına karşı dayanım ve süreklilik	Çevresel koşullara karşı dayanım	Hafiflik / yapıya etkiyen ek yüklerin etkisi	Uygulama koşulları		Yapısal çelik elemanlarda kullanım olanakları		
							Sahada uygulama	Saha dışı uygulama	Kapalı profil (dairesel /kutu enkesitli)	Açık profil (I, L, H, C ve U enkesitli)	Levhalar / yüzeyler
Çelik taşıyıcı elemanların içerisinin betonla doldurulması	3	2	4	3	4	1	+	+ (2)	+	-	-
Püskürtme sıva sistemleri ile yalıtım	4	4	1	3	1	3	+	-	+	+	+
İntümesan (genleşen) boya ile yalıtım	2	3	3	3	2	4	+	+ (3)	+	+	+
Çelik taşıyıcı elemanların içinden su dolaştırılarak soğutulması	1	1	4	4	3	2	+	-	+ (4)	-	-

Performans kriterlerinin değerlendirilmesi (1 - 4 arası)
1 : kötü
2 : orta
3 : iyi
4 : çok iyi

Performans kriterlerinin değerlendirilmesi (+ / -)
+ : uygulanabilir
- : uygulanamaz

NOT:

(1) Uygulama maliyeti karşılaştırması, yalnızca yapıdaki çelik kolonlar baz alınarak yapılmıştır.
(2) Bu yöntemde kısmen saha dışı uygulamalar da yapılabilmektedir (Çelik donatıların yerleşimi saha dışında tamamlandıktan sonra betonun dökümü sahada yapılabilmektedir.
(3) Genellikle darbe dayanımı düşük olduğu için solvent (su bazlı) intümesan boya uygulaması sahada yapılmaktadır. Epoksi bazlı intümesan boyalar ise darbeye karşı daha dayanıklı olduğu için uygulamaların çoğunlukla saha dışında yapılması tercih edilmektedir.
(4) Bu yöntem kirişlere uygulandığında yöntem pasif koruma kapsamı dışında kalmaktadır. Ek olarak literatürde bu koruma yönteminin boru /kutu enkesitli kirişlere de uygulanabildiğine dair yeterli düzeyde veri bulunmamaktadır.

KAYNAKLAR

Akman, M. S. (2000). Yapı Hasarları ve Onarım İlkeleri. TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası. İstanbul.

Anonim. (1984). Fire and Building: A Guide for the Design Team. The Aqua Group. London.

Anonim (2001). Fire protection systems for Architectural Steelwork. (Teknik Bülten, unitherm, http://www.unitherm-online.com).

Arda, T. S. & Yardımcı, N. (1995). Çelik Yapı Elemanlarının Yangın Mukavemeti. Akbasım. İstanbul.

Arpacıoğlu, Ü.T. (2004). Yangın Olgusu ve Yüksek Yapılarda Yangın Güvenliği. Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.

Ballı, E.N. (2010). Toplu Konut Projelerinde Yangına Karşı Alınacak Önlemler ve Malzeme Önerileri. Haliç Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.

BC 4 (2021). Design Guide for Steel-Concrete Composite Columns with High Strength Materials - An Extension of Eurocode 4. Building and Construction Authority. Singapore.

Becan, A. S. (1994). Konutlarda Bina Yangın Güvenliği Sorunlarını Gözeten Mimari Tasarım Kararları İçin Yaklaşım Modeli Araştırması. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Bennets, I.D. & Thomas, I.R. (2002). Design of steel structures under fire conditions. Prog. Struct. Engng Mater. (DOI: 10.1002/pse.100).

Boake, T. (2015). Architecturally Exposed Steel Structures. Birkhäuser Verlag GmbH. Basel. Switzerland.

Blanc, A., Mcevoy, M. & Plank, R. (1993). Architectural and Construction in Steel. The Steel Construction Institute. Cambridge.

Bond, G.V.L. (1988). Fire and Steel Constructon: Water Cooled Hollow Columns. Croydon: Constrado. N.D.

Buchanan, A., H. (2001). Structural Design for Fire Safety. John Wiley&Sons Ltd. West Sussex. England.

BYKHY (2022). Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. Ankara.

Chitty, R. & Mitchell, J. F. (2003). Fire Safety Engineering A Reference Guide. Building Research Establishment. London.

Correia, A.M., & Rodrigues, J.P.C. (2006). Fire resistance of a water filled cooled structure, III. European Conference on Computational Mechanics

Solids. Structures and Coupled Problems in Engineering. Lisbon, Portugal.

Corus. (2002). Design guide for SHS concrete filled columns. The Steel Construction Institute, Berkshire.

Corus (2006). Fire Resistance Of Steel-Framed Building, North Lincolnshire. UK.

Çobanoğlu, E. (2003). Çelik İskelet Strüktürlerde Yangın Korunumu. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.

Doğan Özberk, D., (2010). Çelik Yapılarda Pasif Yangından Koruma Yöntemlerinin Karşılaştırılmalı Maliyet Analizi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. Denizli.

Egan, M. D. (1978). Concepts in Building Firesafety. John Wiley&Sons. Inc. New York. USA.

Eren, Ö. V & Güzelçoban Mayuk, S. (2013). Çelik Yapıların Yangına Karşı Korunma Yöntemlerinin Değerlendirilmesi. E-Journal of New World Sciences Academy. NWSA-Engineering Sciences. ISSN: 1306-3111\1308-7231.

Eren, Ö. (2014). Büyük Açıklıklı Çelik Yapılar. Arı Sanat Yayınevi. İstanbul.

EN 1993-1-1. (2005). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels.

Eurocode 4. (2004**).** Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Brussels.

Franssen, J. & Real, P.V. (2015). Fire Design of Steel Structures. John Wiley&Sons. Inc. 2nd Edition. New York. USA.

Güler, B. (2002). High Rise Steel Structures and Their Fire Resistance Problem: A Research After the World Trade Center Disaster. Middle East Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences. Master of Science. Ankara.

Gewain R.G., Iwankiw N.R. & Alfawakhiri F. (2003). Facts For Steel Buildings: Fire. AISC. United States of America.

Harmanty, T.Z. (1993). Fire Safety Desing and Concrete. Longman Scientific & Technical Copyright. England.

IISI. (1993). International fire engineering design for steel structures: state of art. International Iron and Steel Institute. Brussels.

İbibikcan, E. (2011). Yangın Geciktirici İntumesan Boya Gelişimi. Tüyak Yangın ve Güvenlik Sempozyumu ve Sergisi. İstanbul.

Kaftan, M. A. (2006). Çelik Yapılarda Korozyon oluşumu ve Korozyondan Korunma Yöntemlerinin Maliyet Açısından Karşılaştırılması. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. Denizli.

Langdon-Thomas, G.J. (1972). Fire safety in buildings: principles and practice, London : Adam and Charles Black.

NCCI. (2014). Design Guide for Concrete Filled Hot Finished Structural Hollow Section (SHS) Columns. UK.

Newman, G.M. (1991). The Fire Resistance of Composite Floors with Steel Decking. Steel Construction Institute. 2nd Edition. Berkshire.

Orbay, Y.K.A. (1997). Çelik Bir Binanın Taşıyıcı Sisteminin, Alçı ile Yangın Korunumu. II. Ulusal Alçı Kongresi Bildirileri. 02-03 Mayıs 1997. İstanbul.

Özcan O., Sağman N. & İnce, A. (2000). Yangınla Mücadele Eğitimi Ders Kitabı. İtfaiye Eğitim Merkezi Yayınları. İstanbul.

Özkan, E. (2002). Çelik Yapı Bileşenlerinde Alınması Gereken Yangın Güvenlik Önlemleri ve Bir Uygulama Örneği. Gazi Üniversitesi Mimarlık Fakültesi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara.

Özkan, E. & Demirel, F. (2003). Çelik Yapı Bileşenleri ve Yangın Güvenli Önlemleri. Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. / Cilt 18, No 4, 89-107.

Özyiğit, O. (2004). Çelik Yapıların Eleman ve Bileşen Düzeyinde İncelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul.

Öztürk, M. (2008). Çelik Taşıyıcı Sistemli Yapılarda Taşıyıcı Yapı Elemanlarının Farklı Malzemeli Yapı Bileşenleri ile Bağlantılarının İrdelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Yüksek Lisans Tezi. İzmir.

Öğüt, M. R. (2006). Az Katlı Yapılarda Taşıyıcı Sistem Olarak Çelik Malzemenin Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi. İzmir.

Podolski, D. (2017). Temperature Distribution in Intumescant Coating Protected Steel Sections. the University of Manchester Faculty of Science and Engineering. Master of Philosophy. England.

Saha, J. (2004). Guide Book on Fire Protection of Steel Structures, INSDAG.

SCI (2010). Steel Buildings in Europe Single-Storey Steel Buildings-Part 7: Fire Engineering. ArcelorMittal.

Selamet, S. & Yolaçan, T.F. (2017). Çelik-Beton Kompozit Kat Döşemesi Yangın Dayanım Deneyi. İMO Teknik Dergi: 2017 8007-8022.

Smith, R. (2000). Sprayed Mineral Coatings and Intumescent Coatings for the Fire Protection of Structural Steel. International Fire Protection Magazine.

Smith, R. (2002). Fire Rated Caldding of Structural Steel. International Fire Protection Magazine.

Stollard, P. &Abrahams, J. (1999). Fire from First Principles: a design guide to building fire safety. Chapman& Hall Inc. Third Edition. London.

SPCE (1990). Steel and fire safety: a global approach. Steel Promotion Committee of Eurofer. Belgium.

Tama, Y.S. (2012). Çelik Yapıların Yangına Karşı Korunması, Teknik Makale, sayı:32, Çelik Yapılar Dergisi.

Trachtenberg, M. & Hyman, I. (2003). Architecture: from Prehistory to Post-Modernism. 2nd Edition. Pearson.

TS EN 1993-1-2 (2007). Çelik yapıların tasarımı-Bölüm 1–2: Genel kurallar Yangına karşı yapısal tasarım. Ankara.

TS EN 1991-1-3 (2007). Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-3: Genel etkiler - Kar etkileri. Ankara.

TS EN 1991-1-4 (2007). Yapılar üzerindeki etkiler - Bölüm 1-4: Genel etkiler - Rüzgar etkileri. Ankara.

TS 498 (1987). Yapı elemanlarının boyutlandırılması alınacak yüklerin hesap değeri. Ankara.

Twilt, L. ve diğerleri. (1994). Design Guide for Structural Hollow Section Columns Exposed to Fire. Verlag TÜV Rheinland GmbH. Germany.

Ünver, H. (2003). Çelik Yapı Detaylarının Taşıyıcı Sistemler Açısından irdelenmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Mimarlık Bölümü. İstanbul.

Wang, Y.C. (2002). Steel and Composite Structures: Behaviour and Design for Fire Safety, Spon Press.

Wang, Y.C. ve diğerleri. (2013). Performance Based Fire Engineering of Structures. CRC Press: Taylor&Francis Group.

Yazgan, M. T. (2010). Yangın Geçirmiş Binaların Dayanımlarının Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi. Gebze Yüksek Teknolojisi Enstitüsü. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü. Gebze.

Zhao, J.C. & Shen, Z.Y. (1999). Experimental studies of the behaviour of unprotected steel frames in fire. Journal of Constructional Steel Research, 50(2), pp. 137-150.

Url-1 <http://www.proprofs.com/flashcards/cardshowall.php?title=modual-2-art-history> erişim tarihi: 04.10.2022.

Url-2 < https://chenarch.com/Lecture-22.html> erişim tarihi: 17.09.2022.

Url-3 <https://en.m.wikipedia.org/wiki/SainteGenevi%C3%A8ve_Library#/media/File:Salle_de_lecture_Bibliotheque_Sainte-Genevieve_n03.jpg> erişim tarihi: 17.09.2022.

Url-4 <https://en.m.wikipedia.org/wiki/SainteGenevi%C3%A8ve_Library#/media/File:Biblioth%C3%A8que_Sainte-Genevi%C3%A8ve_elevation.jpg>erişim tarihi: 17.09.2022.

Url-5 <https://archidose.blogspot.com/2013/03/henri-labrouste-structure-brought-to.html > erişim tarihi: 27.11.2022.

Url-6 <http://arqbibliotecas.blogspot.com/2010/11/biblioteca-sainte-genevieve-paris-1861.html> erişim tarihi: 18.12.2022.

Url-7 <https://atlasofplaces.com/architecture/galerie-des-machines/> erişim tarihi: 18.12.2022.

Url-8 < https://www.mcmdaily.com/farnsworth-house/> erişim tarihi: 18.12.2022.

Url-9 <https://divisare.com/projects/376075-ludwig-mies-van-der-rohe-cemal-emden-farnsworth-house> erişim tarihi: 27.12.2021.

Url-10 <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-mies-van-der-rohe/amp/> erişim tarihi: 14.12.2021.

Url-11 <https://www.mcmdaily.com/farnsworth-house/> erişim tarihi: 20.12.2021.

Url-12 <https://en.wikiarquitectura.com/building/farnsworth-house/> erişim tarihi: 20.12.2021.

Url-13 <https://architizer.com/blog/inspiration/stories/architectural-details-mies-van-der-rohe/amp/)> erişim tarihi: 24.12.2021.

Url-14 <http://www.greatbuildings.com/cgibin/gbcdrawing.cgi/Sainsbury_Cent re.html/Sainsbury_Axon.gbd > erişim tarihi: 04.01.2022.

Url-15<https://www.arup.com/projects/chinese-national-stadium> erişim tarihi: 05.01.2022.

Url-16 <https://www.archdaily.com/776995/iaks-selects-8-outstanding-sports-and-leisure-facilities-as-all-time-best/> erişim tarihi: 17.02.2022.

Url-17 <https://www.sanayicidergisi.com.tr/sanayii-tarihi/tekstil-sanayiinin-temeli-feshane-i-amirede-atildi-h634.html> erişim tarihi: 08.03.2022.

Url-18 <https://arkiv.com.tr/proje/afrodisyas-ek-muzesi/1410 > erişim tarihi: 11.03.2022.

Url-19 https://www.arkitera.com/proje/maslak-no-1-ofis-yapisi/ erişim tarihi: 11.03.2022.

Url-20 < https://www.arkitera.com/proje/adnan-menderes-havalimani-ic-hatlar-terminali/> erişim tarihi: 11.03.2022.

Url-21 <https://www.nsmh.com/Umur-Basim-Dudullu> erişim tarihi: 17.03.2022.

Url-22 <http://www.worldscientificnews.com/wp-content/uploads/2018/04/WSN-102-2018-131-145.pdf)> erişim tarihi: 21.03.2022.

Url-23 <https://www.fireproductsearch.com/fire-behaviour/> erişim tarihi: 30.04.2022.

Url-24 < https://www.metabunk.org/threads/what-would-a-new-wtc7-collapse-investigation-look-like.2511/page-3> erişim tarihi: 19.09.2021.

Url-25 <https://doczz.biz.tr/doc/269459/%C3%A7elik-yap%C4%B1larda-yap%C4%B1sal-yang%C4%B1n-etkileri-ve-pasif-koruma?ysclid=lail3z49ec819969378 (Beyhan, F. Çelik Yapılarda Yapısal Yangın Etkileri-Pasif Koruma, Gazi Üniversitesi Ders notu)> erişim tarihi: 19.09.2021.

Url -26 <https://eurofyre.co.uk/systems/fire-detection/ul-fire-alarm-systems/> erişim tarihi: 23.12.2022.

Url-27 <https://www.donmezticaret.com/monolit_service/fire-proofing/> erişim tarihi: 05.11.2022.

Url-28 <https://www.archtoolbox.com/spray-applied-fireproofing/> erişim tarihi: 05.11.2022.

Url-29 <https://evstudio.com/fire-resistance-treatments-for-wood/> erişim tarihi: 07.11.2022.

Url-30 <https://www.isonem.com.tr/ozel-boyalar/isonem-anti-fire-paint-plus> erişim tarihi: 05.11.2022.

Url -31 < http://www.nacejubail.org/Meetings/HEMPACORE%20ONE_SSPC_A pril2014.pdf> erişim tarihi: 10.12.2022.

Url-32<http://yanginsempozyumu.org/wp-content/uploads/2021/10/y9-1.pdf> erişim tarihi: 08.12.2022.

Url-33<https://architecturetoday.co.uk/turning-up-the-heat-2/>erişim tarihi: 08.12.2022.

Url- 34 <http://www.cookeonfire.com/pdfs/17.pdf > erişim tarihi: 20.11.2022.

Url-35 <https://images.pittsburghskyline.com/2007/11.07/440/us_steel_tower/> erişim tarihi: 20.11.2022.

Url-36<https://eurocodeapplied.com/design/en1993/shs-design-properties>erişim tarihi: 14.12.2022.

Url- 37 <https://camlicademir.com/nervurlu.html> erişim tarihi: 26.11.2022.

Url-38 <https://www.dengeyapi.com.tr/tr/product/21/56/monokote-z-106-celik-yapi-yangin-koruma-kaplamasi.html#.Y6cL5tXP23A> erişim tarihi: 08.11.2022.

Url-39 <https://www.dengeyapi.com.tr/tr/product/20/57/avikote-wb-600-intumesan-boya.html#.Y3y1VknP23A> erişim tarihi: 08.11.2022.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** ESRA KARACA

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık (%100 İngilizce) Bölümü
- **Lisans** **:** 2019, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (Ç.A.P.)
- **Yükseklisans** **:** 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Çevre Kontrolü ve Yapı Teknolojisi Yüksek Lisans Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Araştırma Görevlisi, Nişantaşı Üniversitesi - İç Mimarlık (İngilizce) Bölümü, (2020 - 2022).
- Araştırma Görevlisi, İstanbul Kültür Üniversitesi - İç Mimarlık ve Çevre Tasarımı (İngilizce) Bölümü, (2023 - devam ediyor).