

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YANGIN KOŞULLARINDA BETONARME YAPI ELEMANLARININ
EUROCODE'A GÖRE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Uğur GÜNAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YANGIN KOŞULLARINDA BETONARME YAPI ELEMANLARININ
EUROCODE'A GÖRE TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Uğur GÜNAY
(501191094)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Turgut ÖZTÜRK
Eş Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Serdar ULUSOY**

TEMMUZ 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL MEMBERS UNDER
FIRE CONDITIONS ACCORDING TO EUROCODE**

M.Sc. THESIS

**Uğur GÜNAY
(501191094)**

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

**Thesis Advisor: Prof. Dr. Turgut ÖZTÜRK
Thesis Co-Advisor: Assist. Prof. Dr. Serdar ULUSOY**

JULY 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501191094 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Uğur GÜNAY, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YANGIN KOŞULLARINDA BETONARME YAPI ELEMANLARININ EUROCODE'A GÖRE TASARIMI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Turgut ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Öğr. Üyesi Serdar ULUSOY**
Türk-Alman Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Tülay AKSU ÖZKUL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mecit ÇELİK
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Murat HAMDERİ
Türk-Alman Üniversitesi

Teslim Tarihi : 26 Mayıs 2023
Savunma Tarihi : 14 Temmuz 2023





Aileme,



ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim ve tez çalışmam boyunca bana destek olan tez danışmanlarım Prof. Dr. Turgut Öztürk ve Dr. Öğr. Üyesi Serdar Ulusoy'a emek ve katkılarından ötürü teşekkür ederim. Bu süreçteki maddi ve manevi desteklerinden ötürü başta sevgili babam Zeki ve annem Zehra olmak üzere, değerli kız kardeşlerim Rümeysa ve Esra'ya minnettarım. Yine çalışmamı oluştururken ufuk açıcı bilgileri ile verdikleri destekten ötürü Araş. Gör. Halil İbrahim Tanrıverdi ve Y. Müh. Cem Turutoğlu'na sevgilerimi sunarım. Son olarak, değerli destekleriyle hep yanımda hissettiğim Öğr. Gör. Gamze Hallı'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Temmuz 2023

Uğur Günay
(Araş. Gör.)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xv
SEMBOLLER	xvii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xxi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xxiii
ÖZET.....	xxvii
SUMMARY	xxix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
1.2 Literatür Araştırması	4
2. YANGINDAN KORUNMANIN TEMELLERİ.....	7
2.1 Yangının Fiziği ve Temelleri	7
2.1.1 Yangın üçgeni	7
2.1.2 Yangının gelişimi ve parlaması.....	7
2.1.2.1 Parlama öncesi evre	8
2.1.2.2 Parlama evresi	9
2.1.2.3 Parlama sonrası evre	10
2.1.3 Yangına tepki ve yangına dayanıklılık kavramları	12
2.2 Yangının Davranışı ve Başarım Kriterleri	14
2.2.1 Yangın eğrileri ve modelleri	14
2.2.2 Yangın başarım kriterleri	15
2.3 Yapı Malzemelerinin Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Davranışı	15
2.3.1 Giriş.....	15
2.3.2 Beton	16
2.3.2.1 Normal şartlar altında betonun davranışı	18
2.3.2.2 Yüksek sıcaklık altında betonun davranışı.....	21
2.3.3 Çelik	25
2.3.3.1 Normal Sıcaklık Altında Yapı Çeliğinin davranışı	25
2.3.3.2 Yüksek sıcaklık altında yapı çeliğinin davranışı.....	27
2.4 Yapı Elemanlarının Yangın Etkisi Altındaki Davranışı.....	28
2.4.1 Betonarme elemanlarda yangın kaynaklı dökülmenin önemi ve alınabilecek önlemler	28
2.4.1.1 Dökülmenin önemi.....	29
2.4.1.2 Dökülme türleri	29
2.4.1.3 Patlayıcı dökülmeyi etkileyen faktörler	31
2.4.1.4 Patlayıcı dökülmeye karşı tasarım	33
3. EUROCODE'A GÖRE BETONARME ELEMANLARIN YANGIN TASARIMI VE HESAP ADIMLARI.....	37
3.1 Eurocode ve Tasarımın Temelleri	37

3.1.1 Kapsam.....	37
3.1.1.1 Birincil hedefler.....	38
3.1.1.2 Uygulama alanları	38
3.1.2 Tasarımın temelleri	38
3.1.2.1 Malzeme özelliklerinin tasarım değerleri.....	39
3.1.2.2 Doğrulama yöntemleri.....	39
3.2 Yangın Durumunda EN 1'e Göre Yükler.....	40
3.2.1 Nominal yangın maruziyeti.....	40
3.2.2 Nominal yangın eğrileri	40
3.2.3 Parametrik yangın maruziyeti	41
3.2.4 Mekanik yükler	42
3.2.5 Eleman analizi	42
3.3 Malzeme Özellikleri	44
3.3.1 Yüksek sıcaklıklardaki dayanım ve deformasyon.....	45
3.3.1.1 Beton	45
3.3.1.2 Donatı çeliği	47
3.3.2 Termal ve fiziksel özellikler.....	51
3.3.2.1 Betonun termal uzaması	51
3.3.2.2 Betonun özgül ısısı	52
3.3.2.3 Betonun termal iletkenliği.....	54
3.3.2.4 Donatı çeliğinin termal uzaması.....	55
3.4 Basitleştirilmiş Hesap Metodu	56
3.4.1 Bölge yöntemi	57
3.4.1.1 Kesit küçültme.....	58
3.4.2 Ek E'ye göre kiriş ve tabliyeler için basitleştirilmiş hesap yöntemi.....	61
3.4.2.1 Basit mesnetlenmiş kiriş ve tabliyeler.....	61
3.4.2.2 Sürekli kiriş ve tabliyeler	62
3.5 Gelişmiş hesap metotları	63
3.5.1 Termal analiz.....	64
3.5.2 Mekanik analiz	64
3.6 ANSYS ile Termal Analiz.....	65
3.6.1 Tasarım adımları	65
3.6.2 Geometrinin ve <i>mesh</i> 'lerin belirlenmesi	66
3.6.3 Malzemelerin ve termofiziksel özelliklerinin tayin edilmesi.....	68
3.6.4 Başlangıç ve Sınır koşullarının belirlenmesi.....	68
3.6.5 Analizin çalıştırılması	69
3.6.6 Analizin Doğrulanması	69
3.7 Tablolaştırılmış Veri ve Denklemlerle Tasarım	69
3.7.1 Uygulama alanları ve tabloların kullanımı.....	70
3.7.1.1 Uygulama alanları	70
3.7.1.2 Tabloların kullanımı.....	70
3.7.2 Genel tasarım kuralları	71
3.7.3 Kolonların Boyutlandırılması.....	74
3.7.3.1 Tablo Yöntemi.....	74
3.7.3.2 Denklem 5.7	76
3.7.4 Duvarlar.....	77
3.7.4.1 Yük taşımayan bölme duvarlar	77
3.7.4.2 Yük taşıyan duvarlar	78
3.7.4.3 Yangın duvarları.....	78
3.7.5 Çekme elemanları.....	79

3.7.5.1 Kirişler	79
3.7.5.2 Basit mesnetli kirişler.....	81
3.7.5.3 Sürekli kirişler.....	81
3.7.5.4 Tüm yüzleri yangına maruz kalan kirişler	84
3.7.6 Tabliye tasarımı.....	84
3.7.6.1 Basit mesnetli tabliyeler.....	85
3.7.6.2 Sürekli tabliyeler	85
3.7.6.3 Düz tabliyeler	86
3.7.6.4 Dişli tabliyeler.....	87
3.8 Tasarım grafikleri yöntemi.....	88
4. NUMERİK ANALİZLER	93
4.1 ANSYS ile termal analiz	95
4.1.1 Dairesel kolon enkesiti.....	95
4.1.2 Donatısız dikdörtgen kiriş enkesiti	96
4.1.3 Donatılı ve donatısız kiriş T enkesiti	97
4.2 Kolonlar.....	100
4.2.1 Tablo Yöntemi ve Denklem ile inceleme	101
4.2.1.1 Tablo ile inceleme	101
4.2.1.2 Denklem 5.7 ile inceleme.....	102
4.3 Kirişler.....	103
4.3.1 Sürekli bir kirişin tablo yöntemi ile tasarımı	103
4.3.2 Sürekli bir kirişin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile tasarımı	105
4.3.2.1 Hesap adımları	107
4.3.3 Basit mesnetlenmiş öngermeli tek açıklıklı bir kirişin tablo yöntemi ile tasarımı.....	108
4.4 Tabliyeler	110
4.4.1 Sürekli bir tabliyenin tablo yöntemi ile tasarımı.....	111
4.4.2 Sürekli bir tabliyenin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile tasarımı	112
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	115
5.1 EN 2-1-2'ye Göre Yapılan Analizler ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi	115
5.2 Yangına Karşı Tasarım.....	117
5.2.1 Malzeme Özellikleri.....	118
5.2.2 Patlayıcı Dökülme.....	119
5.2.3 Yeni Tür Betonlar ve Beton Modelleri	119
5.3 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar	120
KAYNAKLAR	123
ÖZGEÇMİŞ.....	129



KISALTMALAR

ASTM	: American Society for Testing and Material
CEN	: Avrupa standardizasyon komitesi
E	: Bütünlük özelliği
EN	: Eurocode
FEM	: Sonlu elemanlar yöntemi
FPA	: Flower pollination algoritması
GDA	: Geri dönüştürülmüş agrega
I	: Yalıtım işlevi
ISO	: Uluslararası Standartlar Teşkilatı
PP	: Polipropilen
R	: Yük taşıma fonksiyonu
YDB	: Yüksek dayanımlı beton



SEMBOLLER

∂	: Diferansiyel operatörü
a	: Boyuna donatıların aksları arasındaki mesafe
α_{cc}	: Basınç dayanımında uzun vadeli etkiler için katsayı
a_m	: Ortalama eksen mesafesini
a_i	: "i" Donatısının (tendon, tel) açıkta kalan en yakın yüzeye (yangına maruz kalan) olan eksen uzaklığı
a_{sd}	: Sadece bir kat donatıya sahip kirişlerin köşe donatıları (veya tendon veya tel) için kiriş kenarına olan eksen mesafesi
$A_{d(t)}$	: Dolaylı etkilerin tasarım değeri
$A_{s,req}$	: Nihai sınır durum için gerekli donatı alanı
$A_{s,prov}$	: Mevcut donatı alanı
A_{si}	: "i" Donatısının (tendon, tel) kesit alanı
b_{min}	: Elemanın kesitinin gerekli minimum gövde genişliği
b_{mod}	: Standart yangın direnciyle ilgili modifiye edilen değer
b_w	: Kiriş gövde kalınlığı
$c_p(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta değeri
$c_v(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta değeri
c_p	: Özgül ısı
d_{eff}	: I-şekilli kirişlerin alt başlığının etkin yüksekliği
$E_{d,fi}$	: Belirli bir sıcaklıktaki tasarım ekileri
E_d	: Tasarım ekileri
$E_{s,\theta}$	: Doğrusal elastik bölgenin eğimi
$E_{d,fi}$	: Yangın durumundaki dış kuvvetlerin tasarım etkisi
$\epsilon_{c1,\theta}$	: $f_{c,\theta}$ değerine bağlı şekil değiştirme değeri
$\epsilon_{cu1,\theta}$	: kopma şekil değiştirmesi değeri
$\epsilon_c(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta betonun şekil değiştirme değeri
$\epsilon_s(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta çeliğin şekil değiştirme değeri
f_c	: Betonun karakteristik basınç dayanımı
f_{ct}	: Betonun karakteristik çekme dayanımı
$f_{c,\theta}$	: Betonun θ sıcaklığındaki basınç dayanımının karakteristik değeri

$f_{ct,\theta}$	: Betonun θ sıcaklığındaki çekme dayanımının karakteristik değeri
$f_{sp,\theta}$	: Orantılılık limiti
$f_{sy,\theta}$	: Azami gerilme seviyesi
f_{sy}	: Çeliğin karakteristik akma dayanımı
f_{su}	: Çeliğin karakteristik kopma dayanımı
f_{st}	: Çeliğin karakteristik dayanımı
f_{yk}	: Karakteristik akma dayanımı
G_k	: Kalıcı etkilerin karakteristik değeri
h_s	: Tabliye yüksekliği
k_θ	: Malzeme sıcaklığına bağlı olarak bir mukavemet veya deformasyon özelliği için azaltma faktörü
$k_c(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta değeri
$k_s(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta değeri
$k_p(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıkta değeri
k	: Isı iletkenliği
$l_{0,fi}$	: Kolonun yangın durumundaki efektif uzunluğu
l_{eff}	: Açıklığın etkin uzunluğu
$l_{bd,fi}$	: Normal sıcaklıktaki tasarımdan alınan ankraj uzunluğu değeri
$M_{rd,fi}$	: Yangın durumundaki tasarım moment taşıma kapasitesi
μ_{fi}	: Yangın durumundaki yük kullanım faktörü
N_{Rd}	: Ortam sıcaklığında uygulanan dayanım normal kuvveti
$N_{Ed,fi}$	: Yangın durumunda uygulanan tasarım normal kuvveti
N_{Ed}	: Ortam sıcaklığında uygulanan tasarım normal kuvveti
η_{fi}	: Yangın durumu için tasarım yük seviyesi için azaltma faktörü
$\rho(\theta)$	: Belirli bir sıcaklıktaki malzemenin yoğunluk değeri
ρ	: Yoğunluk
R_a	: Akslar arası mesafenin etkisi
R_b	: Enkesit ebadının etkisi
R_n	: Donatının etkisi
R_l	: Kolon uzunluğunun etkisi
$R_{d,fi}$	: Yangın durumundaki tasarım yük taşıma kapasitesi (dayanım)
$R_{fi,d,t}$	: Yangın durumundaki tasarım çekme kapasitesi
$R_{\eta_{fi}}$	: Yük seviyesi etkisi
T	: Sıcaklık
t	: Zaman

T_{∞}	: Oda sıcaklığı; başlangıç sınır koşulu
θ	: Sıcaklık
θ_{cr}	: Kritik sıcaklık
$Q_{k,1}$	: Baskın değişken etkilerin karakteristik değeri
$Q_{k,i}$	: Diğer değişken etkilerin karakteristik değeri
ν	: Poisson oranı
V_{Ed}	: Ortam sıcaklığında uygulanan tasarım kesme kuvveti
$V_{Rd,max}$	: Basınç payandalarının tasarım kesme dayanımı
$X_{d,fi}$	: Dayanım ve deformasyon gibi mekanik malzeme özellikleri
X_k	: Normal sıcaklık tasarımı için bir mukavemet veya deformasyon özelliğinin karakteristik değeri
$\Delta\theta$	: Sıcaklık değişimi
σ	: Gerilme
ω	: Normal sıcaklık koşullarındaki mekanik donatı oranı
$\gamma_{M,fi}$	: Yangın durumu için ilgili malzeme özelliği için kısmi güvenlik faktörü
γ_{GA}	: Ölü yükler için kısmi güvenlik faktörü
γ_Q	: Hareketli yükler için kısmi güvenlik faktörü
γ_s	: Donatı çeliği için kısmi güvenlik faktörü
λ_c	: Betonun termal iletkenliği
$\Psi_{1,1}, \Psi_{2,i}$	: Kombinasyon katsayıları



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Tipik bir yangının evrelerinin özeti (Buchanan ve Abu, 2017)	12
Çizelge 2.2 : Yüksek sıcaklıklarda betondaki fiziksel değişimler (Khoury, 2000) ...	16
Çizelge 2.3 : Betonun yükselen sıcaklıkla dönüşüm ve ayrışma süreçleri (Schneider, 1988)	22
Çizelge 3.1 : Basınç ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için matematiksel model.....	46
Çizelge 3.2 : Silisli ve kalkerli agregalı normal ağırlıklı betonun yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin ana parametreleri için değerler ..	46
Çizelge 3.3 : Yüksek sıcaklıklardaki donatı için matematiksel model.....	49
Çizelge 3.4 : Yüksek sıcaklıklarda sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin parametreleri için Sınıf N değerleri	50
Çizelge 3.5 : Betonun termal uzaması ile alakalı denklemler	51
Çizelge 3.6 : Dikdörtgen ve dairesel kolonlar için minimum boyutlar ve aks mesafeleri	75
Çizelge 3.7 : Yük taşımayan duvarların asgari duvar kalınlığı	77
Çizelge 3.8 : Taşıyıcı beton duvar için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri.....	78
Çizelge 3.9 : Betonarme ve öngerilmeli beton ile yapılan basit mesnetli kirişler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri	81
Çizelge 3.10 : Güçlendirilmiş ve öngerilmeli beton ile yapılan sürekli kirişler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri	83
Çizelge 3.11 : Güçlendirilmiş ve öngerilmeli beton sürekli I-kirişler için artırılmış kiriş genişliği ve gövde kalınlığı.....	84
Çizelge 3.12 : Betonarme ve öngerilmeli beton basit mesnetli tek ve çift yönlü dolu döşemeler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri.....	85
Çizelge 3.13 : Donatılı ve öngerilmeli betonarme masif düz döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafeleri.....	86
Çizelge 3.14 : Donatılı veya öngerilmeli betondan iki yönlü, basit mesnetli dişli döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafesi.	87
Çizelge 3.15 : En az bir kenarı sınırlandırılmış, donatılı veya öngerilmeli betondan iki yönlü dişli döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafeleri.....	88
Çizelge 4.1 : Yüksek sıcaklıkta kullanılan yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri (sabit kabulü ile)	95
Çizelge 4.2 : Kirişin boyutlandırılması.....	103
Çizelge 4.3 : Tabliyelerin üzerindeki Moment değerleri ve donatı miktarları	110



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Windsor Building'in yangından önce ve sonraki dış cephe görüntüsü (akt. Takagi, 2007:21).....	2
Şekil 2.1 : Yangın üçgeni	7
Şekil 2.2 : Yangının gelişim evreleri (Cortés ve diğ., 2020)	8
Şekil 2.3 : Havalandırması kontrol edilebilen veya kısıtlı olan bir alandaki yangının gelişim evreleri (Cortés ve diğ., 2020)	8
Şekil 2.4 : Oda yangını gelişimi ve tavan jeti mekanizması (Wade ve diğ., 2007)	9
Şekil 2.5 : Gerçek bir yangını temsil eden yangın eğrisi	10
Şekil 2.6 : Doğal yangınlardaki sıcaklık-zaman eğrilerinin ISO 834 standart yangın eğrisi ile karşılaştırılması (Zehfuss & Hosser, 2007)	11
Şekil 2.7 : Yangına tepki ve dayanıklılık.....	13
Şekil 2.8 : Yönetmeliklere göre yangın eğrileri.....	14
Şekil 2.9 : Betonun farklı boyut düzeylerindeki mekanik davranışı (van Mier, 1984)	17
Şekil 2.10 : Basınç etkisi altındaki betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi	18
Şekil 2.11 : Çekme etkisi altındaki betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi.....	19
Şekil 2.12 : Çift eksenli gerilme etkisindeki göçme eğrisi (Kupfer, 1973)	20
Şekil 2.13 : Farklı agregalara sahip betonun basınç dayanımı (solda) ve bu dayanımın oda sıcaklığındaki dayanıma oranı (sağda) (Hager ve diğ., 2016)	22
Şekil 2.14 : Farklı agregalara sahip betonun çekme dayanımı (solda) ve bu dayanımın oda sıcaklığındaki dayanıma oranı (sağda) (Hager ve diğ., 2016)	24
Şekil 2.15 : Sıcaklığın ve çeşitli agregaların elastisite modülü üzerindeki etkisi (Schneider, 1988).....	24
Şekil 2.16 : Betonun yüksek sıcaklıklardaki poisson oranı değerleri (Bahr ve diğ., 2013)	25
Şekil 2.17 : Tek eksenli çekme yükü altında donatı çeliğinin idealleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrisi. Sol tarafta sıcak haddelenmiş, sağ tarafta soğu şekillendirilmiş çelik.....	26
Şekil 2.18 : Yüksek sıcaklıklardaki yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Guo ve Shi, 2011).....	27
Şekil 2.19 : 834-1-1999'e (2002) göre 119 dakikalık yangın ile ani patlama sonucunda 60 mm'lik beton örtüsü kaybı (Klingsch ve diğ., 2013)	30
Şekil 2.20 : Köşe dökülmesi (Connolly, 1994)	30
Şekil 2.21 : Boşluk basıncı tarafından tetiklenen dökülme anındaki bir çekme gerilmesi profili.....	32
Şekil 2.22 : Sol tarafta 180 ve sağ tarafta 120 dakikalık yangına maruz kalmış polipropilen lifle imal edilmiş termal bariyerli yapı elemanları	33
Şekil 3.1 : Nominal sıcaklık-zaman eğrileri (EN 1991-1-2, 2002).....	41
Şekil 3.2 : Azaltma faktörü η_f 'nin $Q_{k,1}/G_k$ yük oranı ile değişimi.....	44
Şekil 3.3 : Betonda sıcaklık ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Krishna ve diğ., 2019)	45

Şekil 3.4 : Basınç ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (EN 1992-1-2, 2004)	45
Şekil 3.5 : Yüksek sıcaklıklarda betonun çekme dayanımı azaltma katsayısı	47
Şekil 3.6 : Yüksek sıcaklıklarda yapı çeliği için gerilme-şekil değiştirme modeli....	48
Şekil 3.7 : Betonun toplam termal uzaması	52
Şekil 3.8 : Sıcaklığa bağlı olarak betonun özgül ısı $c_p(\theta)$, silisli beton için ağırlıkça %0, 1,5 ve 3 olmak üzere 3 farklı nem içeriğinde	52
Şekil 3.9 : %3 nem içeriğine ve 2300 kg/m^3 yoğunluğa sahip silisli agregalı bir beton için hacimsel özgül ısı $c_v(\theta)$	54
Şekil 3.10 : Betonun termal iletkenlik katsayısı	54
Şekil 3.11 : Çeliğin toplam termal uzaması	56
Şekil 3.12 : Silika agregalı betonlar için kesit küçültme katsayısı (Soldaki, kiriş veya tabliye için; sağdaki, kolon veya duvar için)	58
Şekil 3.13 : EN Şekil B.3 - Yangına maruz kalan bölümler için mukavemet ve kesit azalması.....	59
Şekil 3.14 : Silisli agregalı beton kullanılarak küçültülmüş bir kesit için basınç dayanımının azaltılması.	60
Şekil 3.15 : Yangında plastisite teorisine göre yük kapasitesi hesabı	60
Şekil 3.16 : Küçültme faktörü $k_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fi}/f_{yk}(20^\circ\text{C})$ veya $k_p(\theta_{cr}) = \sigma_{p,fi}/f_{pk}(20^\circ\text{C})$ 'ye karşılık gelen donatı ve öngerme çeliğinin kritik sıcaklığı θ_{cr} için referans eğrileri	62
Şekil 3.17 : Denge oluşturmak için serbest eğilme momenti diyagramı $M_{Ed,fi}$ 'nin konumlandırılması (1 - Yangın koşulları altında düzgün yayılı yük için serbest moment diyagramı).....	62
Şekil 3.18 : Bir numerik analizin genel adımları	66
Şekil 3.19 : Tasarımdaki farklı malzemelerin teması	66
Şekil 3.20 : Donatısız ve donatılı T kesit ile donatı bölgesinin detaylı <i>mesh</i> dağılımı	67
Şekil 3.21 : Malzemelerin termofiziksel özelliklerinin programa tanımlanması.....	68
Şekil 3.22 : Ortam sıcaklığı $T_\infty = 20^\circ\text{C}$ ve sınır şartı $T(t)$	69
Şekil 3.23 : Nominal eksen mesafesini a gösteren yapı elemanlarından kesitler	71
Şekil 3.24 : Ortalama eksen mesafesini (a_m) hesaplamak için kullanılan boyutlar ...	73
Şekil 3.25 : Farklı kiriş kesit tipleri için boyutların tanımı. Sol: sabit genişlik, orta: değişken genişlik, sağ: I profil	79
Şekil 3.26 : Hayali bir kesitin gerekliliklerini karşılayan, genişliği b_w artan I-şekilli kiriş	80
Şekil 3.27 : Yangın koşulları için mesnetler üzerindeki eğilme momentlerine direnç zarfı.	82
Şekil 3.28 : Kaplamalı betonarme döşeme	84
Şekil 3.29 : Minimum donatı alanlarının sağlanması gereken döşeme sistemleri.....	86
Şekil 3.30 : Sıcaklık profillerinin sunulduğu enkesit alanı	89
Şekil 3.31 : 200 mm yüksekliğindeki tabliyeler için sıcaklık profili (x : maruz kalan yüzeyden uzaklık) R30'dan R240'a.....	90
Şekil 3.32 : $h \times b = 300 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ olan bir kirişin R30 anındaki sıcaklık profili	90
Şekil 3.33 : $h \times b = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ olan kolonların R90 (soldaki grafik) ve R120 (sağdaki grafik) anındaki sıcaklık profili	91
Şekil 3.34 : $R = 300 \text{ mm}$ olan kolonların R90 (soldaki grafik) ve R120 (sağdaki grafik) anındaki sıcaklık profili	91
Şekil 4.1 : İncelenecek elemanların bulunduğu yapının kesitleri	94

Şekil 4.2 : 300 mm çaplı dairesel enkesitin 90 dakikalık analiz sonundaki ısı profili	95
Şekil 4.3 : Sıcaklığın koordinatla değişiminin analiz ve EN sonuçlarının karşılaştırılması – dairesel kesit.....	96
Şekil 4.4 : Dikdörtgen kesit 90. dakikadaki sıcaklık profili	96
Şekil 4.5 : Donatılı ve donatısız T kesitlerin 90. dakikadaki sıcaklık profili	97
Şekil 4.6 : Sıcaklığın koordinatla değişiminin analiz ve EN sonuçlarının karşılaştırılması – T ve dikdörtgen kesit.....	98
Şekil 4.7 : İncelenen kesitteki donatıların koordinatları ve isimlendirilmesi	98
Şekil 4.8 : 1 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi	99
Şekil 4.9 : 2 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi	99
Şekil 4.10 : 3 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi	100
Şekil 4.11 : İncelenecek kolona ait bilgiler	101
Şekil 4.12 : İncelenen kolonun denklem 5.7'ye göre oluşturulmuş yangın dayanım grafiği.....	103
Şekil 4.13 : İncelenen kirişin detayları	104
Şekil 4.14 : Kiriş enkesiti ve azaltılacak alanın belirlenmesi	105
Şekil 4.15 : Beton kesitinin azaltılması (solda: a_z 'nin belirlenmesi; sağda: $k_c(\theta_M)$ 'nin belirlenmesi)	106
Şekil 4.16 : Açıklık 1'deki donatılar için 90 dakika sonundaki sıcaklığın belirlenmesi	106
Şekil 4.17 : Öngermeli kirişin üzerindeki yüklemeler.....	109
Şekil 4.18 : İncelenen tabliyeye ait detaylar	110
Şekil 4.19 : 200 mm'ye kadar kalınlığa sahip tabliyeler için sıcaklık profilleri.....	112
Şekil 4.20 : 90 dakikalık yangın sonundaki etki eden moment değeri ve dayanım momenti değeri	114



YANGIN KOŞULLARINDA BETONARME YAPI ELEMANLARININ EUROCODE'A GÖRE TASARIMI

ÖZET

Yüksek katlı betonarme yapıların tasarımında mimari ihtiyaçların sebep olduğu kısıtlamalar dışında, dış etkiler ve bunların sebep olduğu kısıtalamalar da mevcuttur. Bu kısıtlamaları güvenli bir şekilde aşmak ve talep edilen mimari ihtiyacı karşılamak adına statik hesap yöntemleri de oldukça önemlidir. Ülkemizde doğal afet olan dış etken denilince, doğal olarak deprem afeti öncelikli akla gelmektedir. Ancak değişen iklim koşulları, hızlı bir şekilde artan kentleşme oranı ve şehir içi sanayileşme gibi etkenler yapılarda yangın tasarımı ve güvenliğinin de öncelenmesi gerektiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın amacı, Eurocode'da sağlanan yöntemlere göre, betonarme yapılarda, talep edilen bir yangın dayanımı elde etmek için yapıların nasıl tasarlanacağını belirlemektir. Ayrıca bu tasarımı yapı elemanlarının boyutlandırılması düzeyinde, kapsamlı bir şekilde açıklamaktır. Amaç Eurocode'u birebir kopyalamak değil, farklı tasarım yöntemlerinin anlaşılmasını ve irdelenmesini sağlamaktır. Malzemenin anlaşılması iyi bir tasarımın anahtarı olduğundan, betonun yüksek sıcaklıklar altındaki özel davranışına ve içinde hangi süreçlerin meydana geldiğine de dikkat edilmektedir. Bu süreçlerde doğrusal olmayan analiz programlarıyla elamanlardaki ısı-enerji yayılımının nasıl olacağı da irdelenmiştir. Ayrıca, verilen tasarım yöntemleri eleştirel olarak değerlendirilmekte ve daha fazla çalışmanın gerekli olduğu noktalara ilişkin tavsiyeler verilmektedir.

Bu metin, yangın tasarımı veya beton ve yangın kombinasyonu hakkında önceden bilgi sahibi olmayı gerektirmeyecek şekilde geniş anlamda yazılmıştır. Ancak okuyucunun beton malzemesine ve normal sıcaklıklar için statik tasarımın temel tekniklerine aşina olduğu varsayılmaktadır.

Beş ayrı bölümden oluşan bu tezde birçok konu irdelenmiştir. İlk bölümde genel bir giriş bölümü ve bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların bir özeti maiyetinde olan literatür taraması bulunmaktadır. Bölüm 2'de yangın fizikine giriş yapılmakta, yüksek sıcaklıkta yapı malzemelerinin nasıl davranış sergilediği özetlenmektedir. Ayrıca yangına karşı korunma yöntemlerinden bahsedilip yangına karşı tasarımda en önemli unsurlardan olan dökülme konusu detaylıca incelenmiştir. Bölüm 3 Eurocode'a göre yangına karşı tasarım seçeneklerinin ne olduğuna odaklanmaktadır. Ayrıca bu bölümde Eurocode'da da kısa bir şekilde temas edilen, yapı elamanlarındaki ısı yayılımının lineer olmayan yöntemler ışığında ticari bilgisayar programı olan ANSYS (2021 – R2) Transient – Thermal ile nasıl belirlenebileceğine dair detaylı bir bölüm de mevcuttur. Bölüm 4, bir önceki bölümde anlatılan yöntemlerin detaylı bir şekilde numerik örneklerle açıklandığı kısımdır. Ayrıca ANSYS ile betonarme kesitlerde termal analizin yapıldığı bir alt başlık da mevcuttur. Son bölüm olan bölüm 5'te,

betonarme yapıların yangın tasarımına dair elde edilen bilgiler eleştirel bir gözle incelenmiştir. Ayrıca, araştırmanın durumu tartışılmakta ve bu tasarım yöntemlerinin iyileştirilmesi için önerilerde bulunmaktadır.



DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL MEMBERS UNDER FIRE CONDITIONS ACCORDING TO EUROCODE

SUMMARY

While one of the constraints in the design of reinforced concrete structures is the architectural expectations and needs, the other constraint is the potential external effects on the structures. Static calculation methods are also essential to reliably overcome these constraints and to provide the required architectural demands. In our country, the earthquake disaster naturally comes to mind when it comes to external factors. However, factors such as changing climatic conditions, rapidly increasing urbanization rate and urban industrialization show that fire design and safety in buildings should also be prioritized.

The main objective of this study is to examine how to design reinforced concrete structural members to obtain the required resistance against fire based on Eurocode 2 part 1-2 (EN). The aim here is to give detailed explanations and examples in order to understand the different design methods it offers rather than quoting EN verbatim. The dramatic effects of changes in material behavior due to high temperature will also be discussed. In addition, the process will be explained by mentioning which behaviors are predicted in the material in this process. In addition to this process, the heat-energy dissipation in the members will be examined with analysis programs using nonlinear calculation methods such as finite elements, finite differences and finite volumes. In this design, the methods and steps will be approached from a critical point of view and the points that can be improved will be pointed out.

Throughout this thesis, it is assumed that the reader is familiar with the basics of design of reinforced concrete members under normal temperature conditions. However, it has been tried to be prepared in a way that does not require any knowledge of design under elevated temperatures.

In this thesis, which consists of five separate chapters, many topics are discussed. The first chapter contains a general introduction and a literature review, which is a summary of the work done to date. Chapter 2 introduces the physics of fire and summarizes the behavior of building materials at high temperatures. In addition, methods of protection against fire are mentioned and the issue of spalling, which is one of the most important factors in design against fire, is examined in detail. Chapter 3 focuses on the design options against fire according to Eurocode principles. There is also a detailed section on how heat dissipation in structural elements, which is briefly touched upon in Eurocode, can be determined with the commercial analysis software ANSYS (2021 - R2) Transient - Thermal in the light of non-linear methods. Chapter 4 will be the part where the methods described in the previous chapter are explained in detail with numerical examples. The last chapter, chapter 5, critically examines the information obtained on the fire design of reinforced concrete structures. Furthermore, the state of the research is discussed and recommendations are made for the improvement of these design methods.

As a result of the design carried out in chapter 4 of the thesis, many different conclusions were reached. Firstly, the columns, which are compression members, were analyzed with a table according to EN 2-1-2 and the design target of R90 could not be achieved. When analyzed with the equation presented as an alternative under the same title, a resistance time of approximately 100 minutes was obtained. However, when the same column was examined with the advanced calculation method in the literature, approximately 126 minutes of resistance time was obtained. The connection between the simplicity of the presented methods and the strength time obtained from the design works inversely. The main reasons for this are the properties of the members in the sampling from which the tables are produced. Based on these results, it is seen that the elements under compressive effect can provide R120 class according to the advanced calculation, but when the same design is made with the tabular method, it does not even provide R90 class.

Like compression members, flexural members can also be designed or verified by tabulated data according to EN 2-1-2. However, while the assessments made with tables are insufficient for elements with strength close to the requested strength class, it is seen that the strengths are provided by the calculations made according to the simplified calculation method (in Annex-B for beams and in Annex-E for decks) and the elements at the limit are resistant to fire. As a result, fire resistance calculation with simplified or advanced calculation method should be preferred in parallel with the situation in the calculation of compression elements, and the values presented in the tables should be seen as a quick option to determine whether the flexural elements of the structures already in use provide the desired fire resistance.

Although the design can be done with the tables, equations and simplified calculation methods recommended by EN 2-1-2 against fire, the analysis is not economically efficient due to the fact that the tables and equations are produced as a result of the test data of a certain sample of members. In addition, while producing the temperature profiles presented in Appendix-A for simplified calculation methods, the reinforcement effect was not taken into consideration in the sections taken as basis. The presence of reinforcement in the cross-section to be designed affects the thermal profiles due to the higher heat transfer coefficient of steel material compared to concrete. Thus, in the calculation to be made, it should be kept in mind that there is a higher temperature at the reinforcement coordinates and therefore the strength of the material will be lower. In addition, although EN 2-1-2 suggests several different equations for fire simulation, the temperature profiles produced were produced according to the ISO834 standard fire curve. It should not be forgotten that fire curves are affected by many variables such as environmental conditions, type of combustible material, type of structure and these profiles presented for standard fires should not be applied to every fire. Therefore, the most effective sizing for each element should be determined by performing thermal and mechanical analysis with computer-based programs such as ANSYS.

In conclusion, the cumulative aim of the studies conducted and to be conducted is to develop a detailed model that includes the progression of the fire, the response and behavior of the members when the building and building materials are exposed to fire. Although the work to realize this is ongoing, this speed is not available in the regulations presented by the institutions. Existing computer-based calculation programs need to be more involved in design, and institutions need to encourage these methods more. In addition, this method should be included in more detail in the proposed codes.





1. GİRİŞ

Yangın, literatürde yangın üçgeni olarak geçen üç ana etmenin bir araya gelmesiyle oluşan hızlı bir yanma olayıdır. Alevlerin eşlik ettiği bu olaydaki üç ana etmen yanıcı madde, oksijen ve ısı kaynağıdır. Bu yanma süreci sonunda oksijen ve yanıcı malzemelerdeki karbonun yanma ürünü olarak birçok canlı için ölümcül olabilecek karbonmonoksit (CO) meydana gelmektedir. Bu olayın ölümcül bir başka etkisi de yapılara verdiği hasarlardır. Son yıllarda, özellikle büyük kentlerde, belirli bir alandaki yapı stoğu yoğunluğunun artmasıyla bu etkinin görülme sıklığı ve verdiği zararlar da artmaktadır. 2008 ve 2017 yılları arasındaki 10 yıllık süreçte İstanbul'da 400000'nin üzerinde yangın meydana gelmiş ve bunların %36'sı ise yapılarda gerçekleşmiştir (Kılıç, 2018).

Beton, yangına maruz kaldığında özgün davranışa sahip olan bir malzemedir. Yanmaz, yani yangın koşulları içinde yanıcı bir malzeme değildir ve ısının beton elemanlara yayılmasını önemli ölçüde yavaşlatan yüksek bir termal kütleye sahiptir. Ancak burada yangın süresi belirleyici etkenlerdendir. İncelenen birçok yangında yapı elemanlarındaki betonun yaklaşık 3 ila 5 cm kalınlığındaki dış tabakası zarar görmektedir (Denoël, 2007). Bu da yapıdaki süneklik ihtiyacını karşılayan donatıları koruyan beton örtüsünün yaklaşık kalınlığı olarak görülebilir ve bu durum malzemelerin yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını dikkatle incelemek gerektiğini göstermektedir.

Yangın geçirmiş birçok betonarme bina oldukça basit bir şekilde restore edilebilir ve yeniden kullanılabilir. Beton yapıların yangına karşı tasarımına mükemmel bir örnek olarak Madrid'deki Windsor Kulesi gösterilebilir. 14 Şubat 2005 tarihinde meydana gelen yangının çok sayıda kata yayılmasına ve 26 saat gibi oldukça uzun bir süre devam etmesine rağmen, Şekil 1.1'de görülebileceği gibi bina ayakta kalmayı başarmıştır. Çökmüş olan tek kısım, 20. katın üzerinde katları destekleyen çelik çevre kolonlarıdır (Takagi, 2007).

Görüleceği üzere yönetmeliklerde öngörülen ortalama yangın sürelerinden daha fazla sürebilen yangınlar meydana gelebilmekte, bu da betonarme yapıların yangına karşı dayanıklılığının hafife alınmamasını ve uygun bir yapısal yangın tasarımının gerekliliğini göstermektedir. Ancak beton, yüksek sıcaklıklarda kaotik davranan çeşitli bileşenlerden oluşan karmaşık bir malzeme olmaya devam etmektedir. Yangın sırasında betonda çeşitli fiziksel ve kimyasal dönüşümler meydana gelir ve bu da mukavemet ve rijitliğin azalmasına neden olur.



a) Yangından önce

b) 26 saatlik yangından sonra

Şekil 1.1 : Windsor Building'in yangından önce ve sonraki dış cephe görüntüsü (akt. Takagi, 2007:21)

Ayrıca, bir beton parçasının yüzeyinden, muhtemelen şiddetli bir şekilde, malzeme kopmasıyla, kesitin azalması ve donatının yüksek sıcaklıklara maruz kalması anlamına gelen dökülme (kavlama) meydana gelebilir. Sonuç olarak, karmaşıklığı nedeniyle, yangına maruz kalan betonun davranışı henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bugün var olan tasarım yönetmelikleri ve yöntemleri büyük ölçüde ampirik temellidir ve gerçek davranışı tam olarak yansıtan bir model geliştirilmemiştir. Bu durum, beton alanındaki yeni gelişmeler nedeniyle daha da zorlaşmaktadır. Yeni yapısal çalışmalar, örneğin yüksek binalarda olduğu gibi daha yüksek yapısal karmaşıklık, yüksek mukavemetli beton kullanımı, daha ekonomik tasarımlar veya depreme eğilimli bölgeler gibi

ekstrem ortamlarda yapı inşa etme gibi yeni zorluklarla karşılaşarak sınırları zorlamaya devam etmektedir. Bununla birlikte, yangın güvenliği açısından yeni zorluklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin, Danimarka'daki Great Belt tüneli ve İngiltere ve Fransa'yı bağlayan Manş tüneline meydana gelen yangınlarda can kaybı yaşanmamış, ancak yeni geliştirilen yüksek performanslı betondan yapılmış tünel elemanlarında geniş çaplı hasar ve büyük ölçüde dökülme meydana gelmiştir (Khoury, 2000). Great Belt tüneline tünel kalınlığının %68'i, Manş tüneline ise bazı yerlerde %100'ü dökülmüştür. Bu gibi örnekler ve istatistikler yangının betonarme yapılar üzerinde feci bir etkiye sahip olabileceğini ve dolayısıyla yangına karşı dayanımın kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmanın amacı, Eurocode'da sağlanan yöntemlere göre, betonarme yapılarda, talep edilen bir yangın dayanımı elde etmek için yapıların nasıl tasarlanacağını kapsamlı bir şekilde açıklamaktır. Amaç Eurocode'u birebir kopyalamak değil, farklı tasarım yöntemlerinin anlaşılmasını ve irdelenmesini sağlamaktır. Malzemenin anlaşılması iyi bir tasarımın anahtarı olduğundan, betonun yüksek sıcaklıklar altındaki özel davranışına ve içinde hangi süreçlerin meydana geldiğine dikkat edilmelidir. Bu süreçlerde doğrusal olmayan analiz programlarıyla elamanlardaki ısı-enerji yayılımının nasıl olacağı da irdelenecektir. Ayrıca, verilen tasarım yöntemleri eleştirel olarak değerlendirilmekte ve daha fazla çalışmanın gerekli olduğu noktalara ilişkin tavsiyeler verilmektedir.

Bu metin, yangın tasarımı veya beton ve yangın kombinasyonu hakkında önceden bilgi sahibi olmayı gerektirmeyecek şekilde geniş anlamda yazılmıştır. Ancak okuyucunun beton malzemesine ve normal sıcaklıklar için yapısal tasarımın temel tekniklerine aşina olduğu varsayılmaktadır. Tez beş ayrı bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde genel bir giriş bölümü ve bugüne kadar yapılmış olan çalışmaların bir özeti maiyetinde olan literatür taraması bulunmaktadır. Bölüm 2'de yangın fiziğine giriş yapılmakta, yüksek sıcaklıkta yapı malzemelerinin nasıl davranış sergilediği özetlenmektedir. Ayrıca yangına karşı korunma ve bu korunmanın öneminde bahsedilmektedir. Bölüm 3 Eurocode'a göre yangına karşı tasarım seçeneklerinin ne olduğuna odaklanmaktadır. Ayrıca bu bölümde Eurocode'da kısa bir şekilde temas edilen yapı elemanlarındaki ısı yayılımının lineer olmayan yöntemler ışığında ticari bilgisayar programı olan ANSYS

(2021 – R2) Transient – Thermal ile nasıl belirlenebileceğine dair detaylı bir bölüm de mevcuttur. Bölüm 4, bir önceki bölümde anlatılan yöntemlerin detaylı bir şekilde numerik örneklerle açıklanmaktadır. Son bölüm olan Bölüm 5'te, betonarme yapıların yangın tasarımına dair elde edilen bilgiler eleştirel bir gözle incelenmektedir. Ayrıca, araştırmanın durumu tartışılmakta ve bu tasarım yöntemlerinin iyileştirilmesi için önerilerde bulunmaktadır.

1.2 Literatür Araştırması

Betonarme yapılar, özellikle çok katlı olanları, tasarımı ve davranışı itibari ile tam olarak modellenemezler. Bu belirsizliğin içine yangın gibi davranışı yüzde yüz belirli olmayan bir afet girdiğinde durum daha da karmaşıklaşmaktadır. Bu belirsizlikleri azaltıp daha etkili bir tasarım yapılabilmesi adına, betonarme yapı ve yapı elemanlarında yangın veya yüksek sıcaklık etkisi, literatürde oldukça fazla çalışmaya konu olmuştur. Bu bölümde yangına karşı davranışa dair çalışmalar birçok açıdan incelenmiş ve bunlara dair bir özet sunulmuştur. Yapılan çalışmalar 20. yüzyılın başına dayanırken daha güncel çalışmaları özetlemek adına 1980 ve sonrası çalışmalar mercek altına alınmıştır.

Haksever ve Anderberg'in (1982) yaptığı çalışmada betonarme kolon yangın dayanımlarının nümerik hesabı deneysel bir çalışma üzerinden kontrol edildiğinde dayanım süresi tahmini gayet kabul edilebilirken, beton ve çeliğin malzeme davranışının analitik modelleri yetersiz olduğundan, deplasman tahmini doğru yapılamamıştır. 1989 yılında TT Lie'nin farklı donatı oranı ve geometriye sahip 80 adet kolon numunesi ile yaptığı çalışma ise donatı oranı ve enkesit büyüklüğünün yangın dayanımında çok önemli bir parametre olduğunu göstermiştir.

Lin ve diğ.'in (1992) 400-800°C sıcaklığa maruz bırakılmış kolonlarla yaptıkları çalışmada donatı ile beton kenarı arasındaki mesafenin en az 20 mm, kesit ayrıtının ise en az 100 mm olmasının yangın dayanımının artmasında belirgin bir fark oluşturduğunu göstermiş, etriye kullanımının da önemli bir artış sağladığı söylenmiştir. Yüksek dayanımlı beton (YDB) kolonlar üzerinde yapılan bir çalışmada ise yangın dayanımının normal dayanımlı kolonlara göre daha uzun olduğu gösterilip YDB'nin yangın dayanımı için en az 30 mm'lik bir beton örtüsü tavsiye edilmiştir (Kodur ve Sultan, 1998). Ali ve diğ.'in (2004) 99 adet normal ve YDB kolon ile yaptığı çalışmada en önemli dökülme tipi olan patlayıcı dökülme bütün elemanlarda ilk 45

dakikada görülmüş olup polipropilen lif kullanımının dökülmede %22'lere varan azaltmaya vesile olduğu saptanmıştır. Elemanın enkesit şeklinin yangın dayanımıyla ilişkisini araştıran bir çalışma 3'ü L, 3'ü T ve 3'ü + tipinde olan 9 farklı enkesitli kolonla yapılmış olup en yüksek dayanım T tipi enkesitte iken en düşük dayanım yüzey alanı en fazla olan + tipinde çıkmıştır (Xu ve Wu, 2009).

Dong ve diğ.'nin (2014) geri dönüştürülmüş agrega (GDA) ile üretilmiş betonarme kolonların yangın dayanımı üzerine yaptıkları araştırmada aynı eksenel yük altında normal betondan üretilmiş elemanların dayanımı GDA ile üretilenden daha düşük çıkmıştır. Bunun sebebi sıcaklığın penetrasyonunun GDA ile üretilen elemanlarda daha zor olmasıdır. Seręa (2015) yaptığı çalışmada 50 mm, 100 mm ve 150 mm etriye aralığına sahip kolonların yangın dayanımını araştırmış etriye aralığı arttıkça yük taşıma kapasitesindeki azalma ve dökülme ihtimalinin artması sebebiyle dayanımda belirgin düşmeler görülmüştür. Bununla beraber sık etriyeli kolonlarda erken çatlak oluşumu gözlenmiştir.

Buch ve Sharma (2019) dışmerkezliğin yangın dayanımıyla olan ilişkisini araştırmak adına betonarme kolonlara 20 ve 40 mm'lik dışmerkezlikle yüklemeler yapmıştır. Dışmerkezliğin %100 arttırılması dökülmeyi %200 arttırırken dayanımın %43 düşüş gösterdiği görülmüştür. 2019 yılında yapılan başka bir çalışmada ise Zhou ve Wang eksenel yük altında olan ve yangında hasar almış betonarme yapı elemanlarının güçlendirilmesine dair yöntemleri incelemiştir. Bu yöntemlerden çelik ile sargılama yönteminin dökülmeyi azaltmasına ve eski dayanımını kazandırmasına rağmen yangına ve korozyona karşı ek koruma yöntemlerine ihtiyaç duyulduğu söylenmiştir. Ultra yüksek performanslı betonun yüksek sıcaklık altındaki basınç ve çekme dayanımını inceleyen deneysel bir çalışmada çelik ve hibrit liflerle üretilen 2 farklı elemanlar 750 °C sıcaklığa kadar ısıya maruz bırakılmıştır (Banerji ve Kodur, 2022). Çalışma sonucunda her iki numune grubunun da oda sıcaklığında 175 MPa olan basınç dayanım değeri %25'in altına düşmüştür. Hibrit liflerin ise çekme dayanımına katkısı çelik liflere kıyasla onda bir oranında daha iyi olduğu görülmüştür. Başka bir çalışmada yangına dayanımlı ekonomik kolon kesitlerinin belirlenmesi amacıyla hibrit algoritma ile FPA algoritmaları karşılaştırılmış ve aynı sonuçlar elde edilmesine rağmen hibrit algoritmanın daha hızlı sonuç verdiği böylece yapısal analizin daha kısa sürede gerçekleştirilebildiği tespit edilmiştir (Günay ve diğ., 2023). Ayrıca optimum kesit boyutlarının karesel şekillere yakınsadığı gözlemlenmiştir.



2. YANGINDAN KORUNMANIN TEMELLERİ

2.1 Yangının Fiziği ve Temelleri

2.1.1 Yangın üçgeni

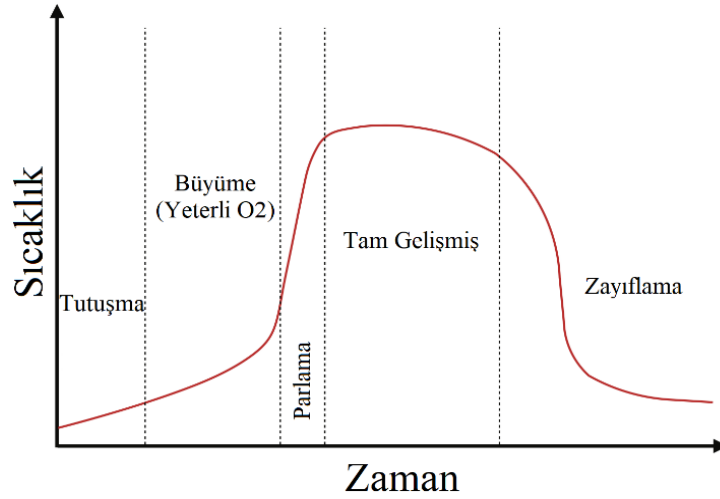
Yangın, yanıcı malzemenin ısı oluşumuyla birlikte ve genellikle alevin eşlik ettiği hızlı yanma sürecidir. Büyük yangın durumlarının meydana gelme olasılığının yükselmesi yapılarda hasara yol açmış ve böylece yangın tasarımı/korumasını yapıların tasarım sürecinde öncelikli hususlar arasına sokmuştur. Bir yangının başlaması için üç elementin aynı anda bulunması gerekir: havada yüzde 21 hacim kaplayan oksijen, yakıt (yanıcı maddeler) ve bir ısı kaynağı. Bu üç bileşen Şekil 2.1'de de gösterilen, genellikle yangın üçgeni olarak adlandırılan kavramı oluştururlar. İlk iki element yanma sıcaklığına ulaştığında yanar. Karbonun yanması karbondioksit (CO₂) üretir, ancak oksijen eksikliği durumunda insan için oldukça tehlikeli olan toksik gaz karbon monoksit (CO) oluşumuna yol açar (Adam, 2006).



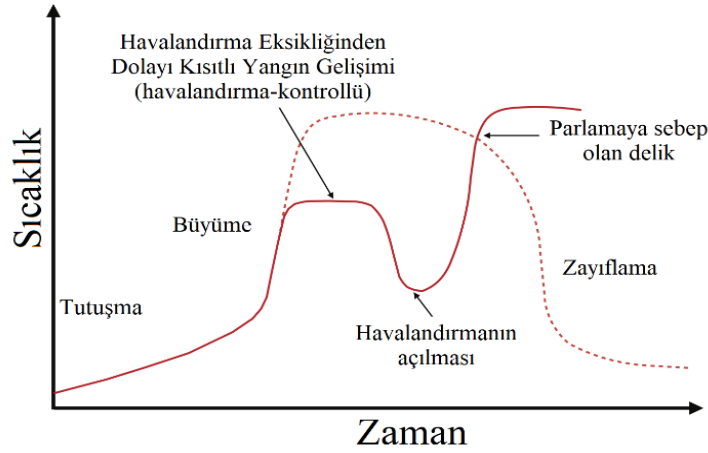
Şekil 2.1 : Yangın üçgeni

2.1.2 Yangının gelişimi ve parlaması

Bu bölümde kapalı alanlardaki yangınların davranışı ve bu davranışın farklı aşamaları araştırılmaktadır. Aşamalar, Şekil 2.2'de görülebileceği gibi tutuşma, büyüme, parlama, tam gelişmiş yangın ve zayıflama. Herhangi bir havalandırma engeli olursa parlama evresi gecikerek Şekil 2.3'tekine benzer. Bu aşamaların davranışları tamamen farklı olduğu için, parlama öncesi ve sonrası yangınlar arasında bir ayrım yapılır. Genel olarak, bir binayı yapısal olarak tasarlarken, parlama sonrası yangının esas olduğu görülür. Binalarda can güvenliği için tasarım yapılırken, parlama öncesi evrenin anlaşılması esastır.



Şekil 2.2 : Yangının gelişim evreleri (Cortés ve diğ., 2020)

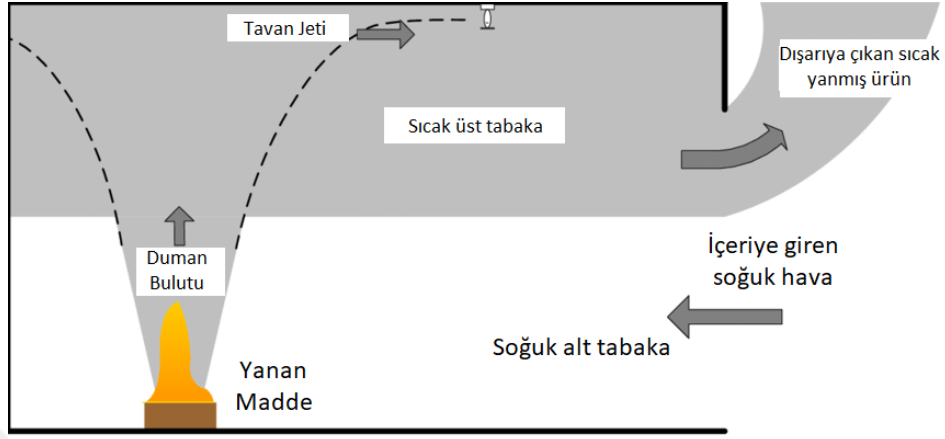


Şekil 2.3 : Havalandırması kontrol edilebilen veya kısıtlı olan bir alandaki yangının gelişim evreleri (Cortés ve diğ., 2020)

2.1.2.1 Parlama öncesi evre

Yangının parlama öncesi evresinin gelişimini ele alırsak, ilk olarak yangın üçgeninin üç unsuru da mevcut olduğunda bir yangın çıkar. Az miktarda malzeme yanmaya başlar ve ilk gazlar ve duman ortaya çıkar. Yanma ürünlerini tavana taşıyan bir duman bulutu oluşur. Başlangıçta, yanma işlemi havadaki oksijeni tüketir. Ancak kısa süre sonra hava kapı, pencere veya havalandırma açıklığı gibi açıklıklardan içeri akar. Yangın tarafından salınan enerji bir pompa gibi hareket ederek içerideki temiz havayı çeker ve onu yanma ürünlerini seyrelttiği yangın dumanına sürükler. Seyreltilmiş yanma ürünleri, yangın büyüdükçe kalınlığı ve sıcaklığı artan, odanın sıcak bir üst tabakasında toplanır ve durur. Soğuk alt katman, üst katmandan karıştırma ve radyasyonla hafifçe ısıtılan taze havadan oluşur. Bu iki katman Şekil 2.4'te gösterilmektedir. Soğuk alt katman güvenli tahliye sağlar ve bu nedenle can güvenliği

için gereklidir. Dumanın tavana ulaştığı yerde, duman ve sıcak gazlar yüzey boyunca radyal olarak dışarıya doğru yayılır. Buna tavan jeti denir. Tavan jetinin şekli ve yönü tavan tipine bağlıdır. Örneğin yatay ve pürüzsüz bir yüzey olması durumunda akış her yönde aynı olacaktır.



Şekil 2.4 : Oda yangını gelişimi ve tavan jeti mekanizması (Wade ve diğ, 2007)

Ateş yanmaya devam ettikçe sıcak üst tabaka büyür ve iki tabaka arasındaki arayüzün yüksekliği düşer. Böylece bu yüzey kapı bir gibi açıklığın üst noktasına indiğinden yangın ürünü olan sıcak gazlar tahliye edilebilir. Üst tabakanın kalınlığı, yangının boyutuna ve süresine ve açıklıkların boyutuna ve konumuna bağlıdır. Eğer yangın için yeterince hava, başka bir ifadeyle, oksijen beslemesi olmaz ise yangın zamanla azalarak sönümlenir.

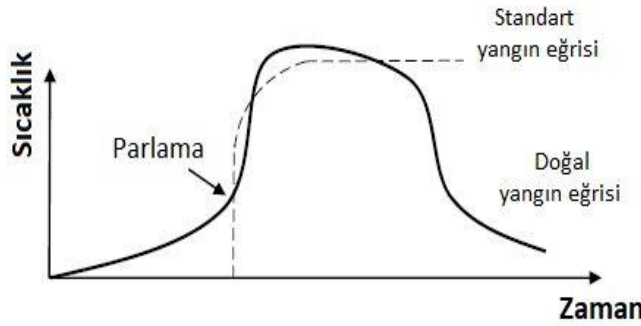
Bir önceki açıklama yalnızca tek bir öğenin yandığını varsayar. Ancak zemin, duvar ve tavandaki yanıcı maddeler, alevlerin hızla yayılması nedeniyle yangının gelişimini önemli ölçüde etkileyip arttırabilir. Sınırlayıcı elemanların ısıyı daha az emdiği iyi yalıtılmış bir odada, sıcaklıklar daha yüksek olacak ve yangın önemli ölçüde daha hızlı büyüyecektir. Bu durumda, doğrusal olmayan karmaşık bir davranış şekli açığa çıkmaktadır.

2.1.2.2 Parlama evresi

Parlama evresi, bir yangının tahmin etmesi güç ve dolayısıyla canlılara verebileceği zarar açısından en tehlikeli evresidir. Geçen on yıllık süreçte yangınla mücadele eden 750'ye yakın insan hayatını kaybetmiş ve 250000 insan ise yaralanmıştır (Campell ve diğ. 2019). Bu durum parlama evresinin ne zaman başlayacağına yönelik tahminin ihtiyacını doğurmaktadır.

Odada yeterli yanıcı malzeme ve uygun oksijen kaynağı olduğu sürece, parlama öncesi yangın büyümeye devam eder. Sıcak katmandaki sıcaklıklar artarak odadaki tüm nesnelere yayılan ısı akışının da artmasına neden olacaktır. Belirli bir noktada (genellikle 500 ila 600 °C civarında), bu radyan ısı akışı kritik bir değere ulaşacak ve odadaki açıkta kalan tüm yanıcı maddeler yanmaya başlayarak hem ısı salınım hızında hem de sıcaklıklarda hızlı bir artışa yol açacaktır. Bu geçişe parlama denir.

Parlamanın tanımı, odadaki bir bölgede yanan bir yangından odada bulunan açıktaki tüm yanıcı yüzeylerin yanmasına geçiştir. Bu nedenle, tanım gereği yalnızca kapalı bir bölgede meydana gelebileceğinden, açık ve kapatılmamış bir alanda parlamanın meydana gelmesi mümkün değildir. Ayrıca, parlama teriminin kesin bir olaydan ziyade bir geçiş tanımladığı belirtilebilir. Bununla birlikte, pratikte tasarımı basitleştirmek için, parlamanın başlangıcı ile maksimum ısı salınımı arasındaki büyüme periyodu genellikle göz ardı edilir ve parlama meydana geldiğinde, ısı salma oranının mevcut hava tarafından ayarlanan maksimum değere anında yükseldiği varsayılır (bkz. Şekil 2.5).

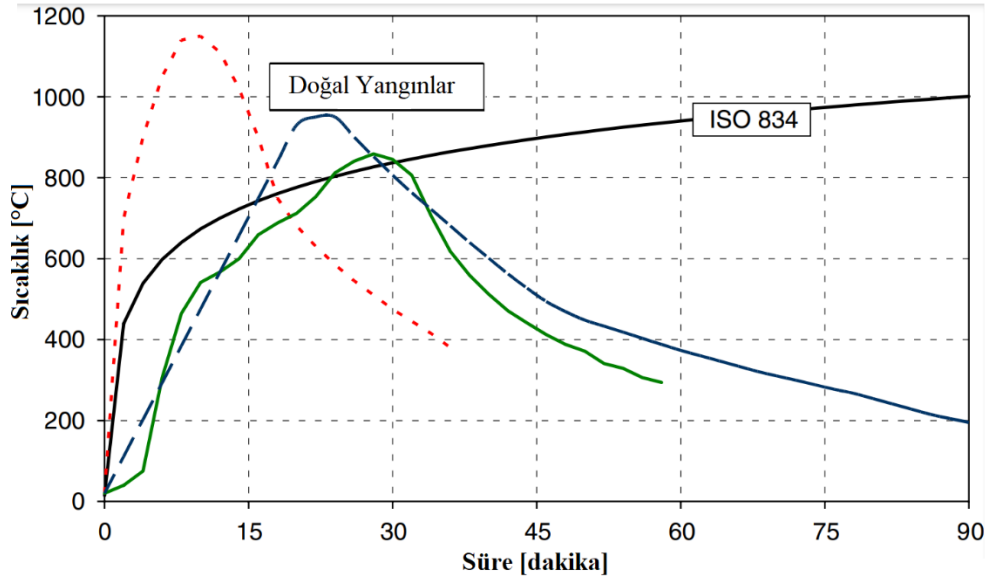


Şekil 2.5 : Gerçek bir yangını temsil eden yangın eğrisi

2.1.2.3 Parlama sonrası evre

Yangının alevlenmeden önceki ve sonraki davranışı tamamen farklıdır. Parlamadan sonra artık iki katman değil, hava ve yanma gazlarının akışının oldukça çalkantılı olduğu büyük bir katman vardır. Tam gelişmiş yangın veya tam oda müdahalesi olarak da adlandırılan parlama sonrası yangın, genellikle 1000 °C'nin üzerinde bir sıcaklığa sahiptir. Bu yüksek sıcaklıklar, radyan ısı akışlarıyla birlikte, odadaki tüm açıkta kalan yanıcı yüzeylerin yüksek sıcaklıktan erimesine neden olarak, yeterli oksijenin olduğu yerlerde yanan büyük miktarlarda yanıcı gazlar üretir. Ne kadar oksijen bulunduğuna bağlı olarak bir yangının havalandırma kontrollü mü yoksa yakıt kontrollü mü

olduğunu belirler. Tipik bir odada yangın havalandırma kontrollüdür, bu sebeple yanma hızı açıklıkların sayısına, boyutuna ve şekline bağlıdır. Genellikle tüm pencere camlarının, parlama sırasında sıcaklıktaki hızlı artış nedeniyle kırıldığı ve düştüğü varsayılır. Havalandırma kontrollü yangınların tipik özelliği pencerelerden dışarı taşan alevlerdir. Oda içindeki hava miktarı yetersiz olduğu için yanıcı gazların tamamı yanamaz. Bunlar dış hava ile karıştığında, ek bir yanma meydana gelir ve bu da pencerelerden alevlerin çıkmasına neden olur. Öte yandan, yakıt kontrollü yangınlar özellikle yakıtın yüzey alanının sınırlı olduğu geniş, iyi havalandırılan odalarda meydana gelir. Bu durumda yangın, açık havadaki bir yangına çok benzer, ancak sıcak üst gaz tabakasının veya sıcak duvarların ve tavan yüzeylerinin ışımsal geri beslemesini içerir. Çoğu yangın, zayıflama aşamasında yakıt kontrollü hale gelir (Denoël, 2007).



Şekil 2.6 : Doğal yangınlardaki sıcaklık-zaman eğrilerinin ISO 834 standart yangın eğrisi ile karşılaştırılması (Zehfuss & Hosser, 2007)

Bir binayı yangın güvenliği için yapısal olarak tasarlarken, parlama sonrası evre en çok ilgi çeken noktadır. Bir parlama sonrası yangında sıcaklığın tahmin edilmesi çok önemlidir; fakat bu kesin olarak yapılamaz. Bölüm 3'te açıklanacağı üzere Eurocode (EN 1992-1-2, 2004) yangın tiplerine göre farklı birkaç sıcaklık denklemi önermektedir. Ayrıca literatürde, ölçülen ve tahmin edilen sıcaklık denklemleri de bulunmaktadır. Bir dizi hesaplama modeli de mevcuttur (bkz. Şekil 2.6). Bunlar genellikle, odayı iyi karışmış bir reaktör olarak kabul eden tek bölgesel bir modele dayanır. Parlama sonrası yangının bir temsili, zamanın bir fonksiyonu olarak bölmede

üniform olduğu varsayılan gaz sıcaklığının gelişimini basitçe veren nominal yangın eğrileridir (Zehfuss ve Hosser, 2007). En çok kullanılan nominal eğri ISO834 standart eğrisidir ve bu Şekil 2.5 ve Şekil 2.6’da görülmektedir. Yangın eğrilerine dair detaylı bilgiler Bölüm 2.2’de bulunabilir.

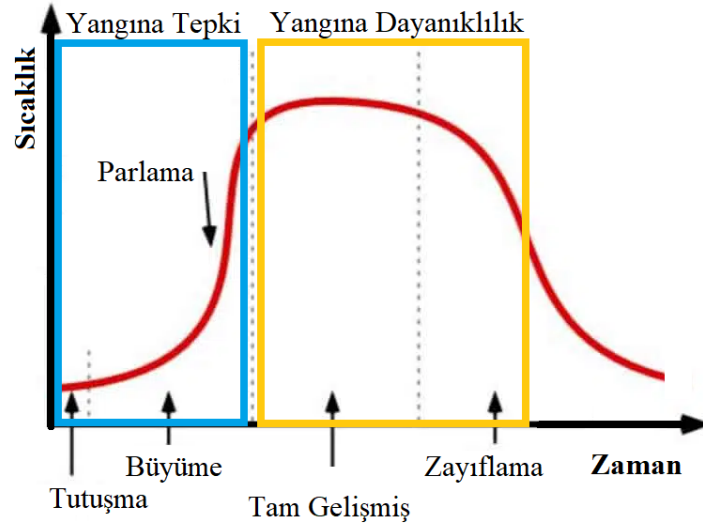
Bu bölümde anlatılan yangının evreleri ile alakalı bir özet Buchanan ve Abu’nun (2017) çalışmasındaki tabloda (bkz. Çizelge 2.1) görülebilir. Tabloda bir yangının evreleri ve bu evrelerin insan ve yangın davranışı açısından ne şekilde değerlendirilmesi gerektiğine dair bir öneri mevcuttur.

Çizelge 2.1 : Tipik bir yangının evrelerinin özeti (Buchanan ve Abu, 2017)

	Başlangıç Evresi	Büyüme Evresi	Yanma Evresi	Sönme Evresi
Yangın davranışı	Yakıtın ısınması	Yakıt kontrollü yanma	Havalandırma kontrollü yanma	Yakıt kontrollü yanma
İnsan Davranışı	Tutuşmayı önleme	Elle söndürme, kaçma	Ölüm	
Tespit	Duman detektörü	Duman detektörü, ısı detektörü vb.	Dış duman ve alev	
Aktif Kontrol	Tutuşmayı önleme	Serpinti veya itfaiyeci tarafından söndürme. Duman kontrolü	İtfaiyeci tarafından kontrol	
Pasif Kontrol	Materyallerin kontrolü	Alev yayılımına dayanıklı materyalleri seçme	Yangın direnci sağlamak, yangını kontrol altına almak ve çökmesini önlemek	

2.1.3 Yangına tepki ve yangına dayanıklılık kavramları

Yangına tepki ve yangına dayanıklılık (direnc), yangın güvenliği durumunda sıklıkla kullanılan iki tanımdır. Bu nedenle, ne anlama geldiklerini ve nasıl farklılaştıklarını bilmek önemlidir. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere yangına tepki parlama evresinden öncesi ile alakalı iken, yangına dayanıklılık sonrası ile alakalıdır.



Şekil 2.7 : Yangına tepki ve dayanıklılık

Yangına tepki, inşaat malzemeleri için geçerlidir ve bir malzemenin bir yangının başlaması ve gelişmesiyle ilgili tüm özelliklerinin bir ölçüsüdür. Tutuşabilirlik, alevlerin malzeme yüzeyi boyunca yayılma yolları, yanma nedeniyle açığa çıkan enerji gibi bir malzemenin tutuşması ve zehirli gazları oluşturmaya dair tüm özelliklerini ifade eder (Denoël, 2007). Yangına dayanıklılık ise bir yapının yangın sırasında ve sonrasında işlevini sürdürebilme yeteneğini ifade eder. Dolayısıyla bu durum yapı elemanları ile onların servis vermesiyle alakalıdır.

Dolayısıyla iki özelliğin tamamen farklı iki anlamı vardır. Birincisi bir yangının doğuşu ve gelişimi üzerinde bir etkiye sahiptir, ikincisi ise bir yangının tam yoğunluğu için önemlidir. Örneğin ahşap, yanabildiği için ateşe zayıf tepki veren bir malzeme değildir. Ahşap kirişler veya kolonlar ise tam tersine yangına karşı iyi bir direnç gösterirler. Ateşe karşı iyi tepki veren ancak ateşe karşı direnci çok zayıf olan çelik için bu durum tam tersidir. Beton, her iki niteliği de birleştirir ve bu da onu yangın güvenliği için mükemmel bir malzeme yapar.

Bu tezde ele alınan yangın güvenliği gereklilikleri ve hesaplama yöntemlerinin odak noktası, bir yangın durumunda binaların yapısal davranışı olduğundan, esas olarak yangına dayanıklılık ile ilgilidir. Bilindiği üzere Eurocode aracılığıyla yapısal yangın tasarımı, yapısal davranışa odaklanır ve bu nedenle yalnızca yangına karşı dayanıklılık ışığında tasarım yapılır. Bununla birlikte malzemenin özellikleri yapısal elemanların performansını etkileyecektir. Bu nedenle yangına maruz kalan yapı malzemelerinin davranışı Bölüm 2.3'te ele alınacaktır.

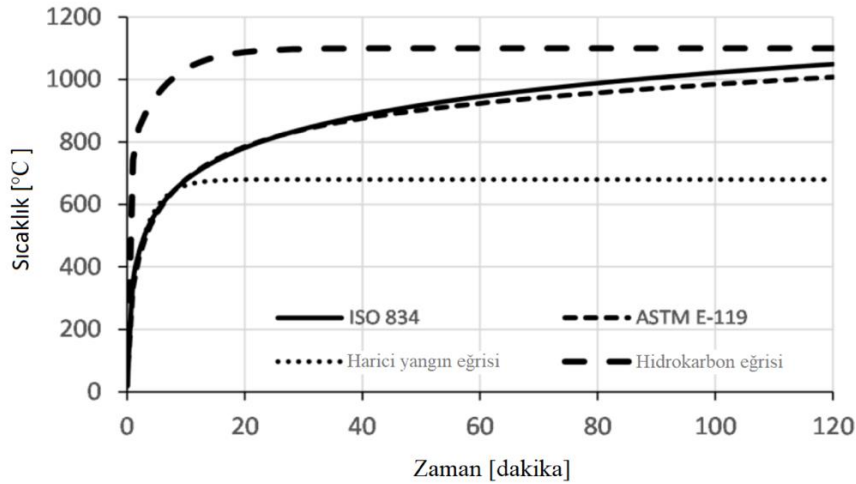
2.2 Yangının Davranışı ve Başarım Kriterleri

2.2.1 Yangın eğrileri ve modelleri

Her gerçek yangın benzersizdir. Ancak yangın sırasında aynı aşamalar gözlemlenebilir. Bunlar tutuşma, büyüme, parlama, tam gelişmiş yangın aşaması, zayıflama aşaması ve sönmedir (bkz. Bölüm 2.1). Yapısal yangın analizi amacıyla, varsayımlara ve karmaşıklık düzeyine bağlı olarak, yangın modelleri üç kategoriye ayrılabilir:

- nominal yangın eğrileri
- parametrik yangın eğrileri
- çok bölgeli modeller

Yangın başlangıç yerinin ve yangının gelişeceği koşulların kesin olarak tahmin edilmesi pratikte imkânsız olduğundan, yapısal elemanların yangın sınıflandırmasında kullanılacak bir referans yangın modeli tanımlamak için standart (nominal) yangın eğrileri ortaya konmaktadır. En yaygın olarak kullanılanlar ISO 834 yangın eğrisi (ISO834-1-1999, 2002), ASTM E119-18c (2018), hidrokarbon ve harici yangın eğrisidir (bkz. Şekil 2.8). Bu çalışmada, ANSYS ile sıcaklık profillerinin belirlenmesi bölümünde ISO 834 standart yangın eğrisi kullanılmıştır.



Şekil 2.8 : Yönetmeliklere göre yangın eğrileri

2.2.2 Yangın başarımlı kriterleri

Yangın sırasındaki sıcaklık yangın bölmesi içindeki mekânsal koordinatlardan bağımsız olarak ele alınmıştır. Sıcaklık-zaman fonksiyonları monoton olarak artmakta, tam gelişmiş yangın aşamasından sonra gelen soğutma aşaması göz ardı edilmektedir. Standart yangınlar kullanıldığında, yangın direnci önceden tanımlanmış bir hasar kriterinin karşılanmasına kadar geçen süre olarak dakika cinsinden ölçülür. Eurocode'a göre (EN 1992-1-2, 2004) yangın dayanımı, eleman fonksiyonuna ve topolojisine bağılı olarak aşağıdaki kriterlere göre tanımlanır:

- R - yük taşıma fonksiyonu (bir yapının veya bir elemanın ilgili yangın sırasında tanımlanmış kriterlere göre belirli eylemleri sürdürme yeteneğı)
- E - bütünlük özelliğı (bir ayırıcı elemanın, bir tarafı ateşe maruz kaldığında, alevlerin ve sıcak gazların içinden geçmesini önleme ve maruz kalmayan tarafta alevlerin oluşmasını önleme yeteneğı)
- I - yalıtım işlevi (bir tarafı yangına maruz kaldığında ayırıcı bir elemanın maruz kalmayan yüzdeki sıcaklık artışını belirlenen seviyelerin altında tutma yeteneğı)

Standart bir yangına maruz kalma için belirli bir süre için yük taşıma işlevi gerekirken, parametrik yangına maruz kalma için ise yapı, soğutma aşaması da dahil olmak üzere, tüm yangın süresi boyunca yangın etkisine dayanabilmelidir. Yük taşıma ve bütünlük özelliğı sadece termal stres analizi ve/veya deneysel testler yoluyla değerlendirilebilir. Yalıtım fonksiyonu ise sadece ısı transferi yoluyla belirlenebilir. Daha sonra eleman, direnç kriterini ve hasar kriteri karşılanana kadar standart yangının minimum süresini (dakika cinsinden) belirten işaretler kullanılarak sınıflandırılır. Örneğın, "REI 90", bir elemanın en az 90 dakika standart yangına maruz kalması için yük taşıma, bütünlük ve yalıtım işlevi sağladığını göstermektedir.

2.3 Yapı Malzemelerinin Yüksek Sıcaklık Etkisi Altındaki Davranışı

2.3.1 Giriş

Betonarme yapılarının sayısal analizlerini yapabilmek ve yapının servis kapasitesini belirlemek için, kullanılan malzemelerin, bu durumda beton ve donatı çeliğinin özelliklerinin bilinmesi esastır. Kullanılan malzemelerin özellikleri, test sonuçları yardımıyla karakterize edilir. Böylece, Eurocode 2'de (EN 1992-1-2, 2004) de olduğu

gibi, daha sonra fiziksel ve yapısal-mekanik davranışın tanımlanması için matematiksel model denklemleri formüle edilebilir. Bu bölümde beton ve donatı çeliği malzemelerinin ayrı ayrı, yapısal modellemesi için bir başlangıç noktası görevi gören çeşitli malzeme test yöntemlerinin sonuçları ve bunların bulguları sunulmaktadır. Bu ayırım normal sıcaklık (oda sıcaklığı) ve yüksek sıcaklıklar altında olmak üzere ikiye ayrılmıştır.

2.3.2 Beton

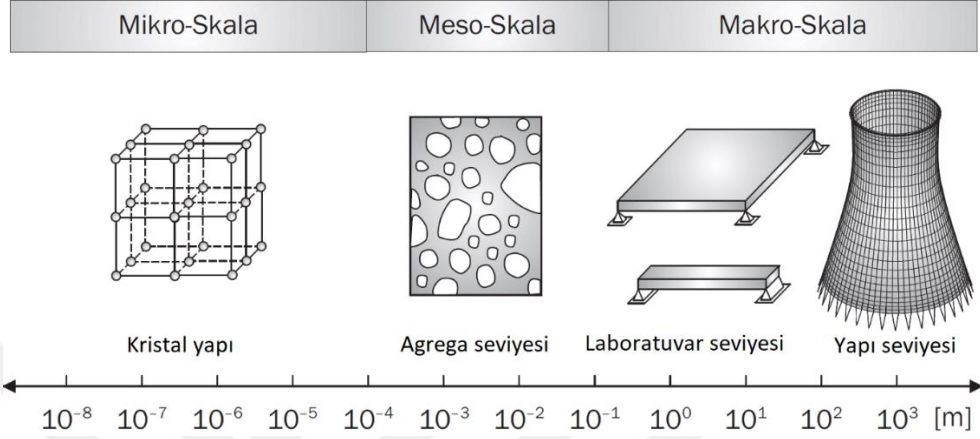
Beton, çimento, bağlayıcı katkı maddeleri, su ve farklı tane boyutlarındaki granüler agregalardan oluşan heterojen bir malzemedir. Karışım oranına ve agregaların özelliklerine bağlı olarak sertleşmiş betonun özellikleri ve dayanımı etkilenir. Bu değişim kimyasal değişimin yanında fiziksel değişimlere de sahne olur. Çizelge 2.2’de Khoury’nin (2000) sıcaklık yükselişiyle betonda ortaya çıkan fiziksel süreçleri görebiliriz.

Çizelge 2.2 : Yüksek sıcaklıklarda betondaki fiziksel değişimler (Khoury, 2000)

Sıcaklık [°C]	Fiziksel Değişim
1000	
900	Yangınlarda oda sıcaklığı nadiren bu değeri aşar; ancak alev sıcaklığı 1200 °C ve üzerine çıkabilir.
800	
700	
600	Bu sıcaklığın üzerinde beton artık tam yük taşıma kapasitesine sahip değildir.
550 ila 600	Çimentolu yapı malzemeleri önemli ölçüde süner ve mukavemet/yük taşıma kapasitesini kaybeder.
400	
300	Mukavemet kaybı başlar; ancak pratikte yangına maruz kalan betonun sadece üst birkaç santimetresi ısınır ve içerideki sıcaklıklar bunun çok altında kalır.
250 ila 420	Beton parçacıklarının yüzeyden ayrılmasıyla bir miktar dökülme meydana gelebilir.

Betonun davranışı esasen çimento hamuru matrisi ile agregalar arasındaki etkileşime bağlıdır. Yüksüz durumda bile, örneğin priz alma aşamasında olan taze betonun yüke ve zamana bağlı sünmenin bir sonucu olarak büzüldüğü hidrasyon aşamasında, ilk mikro çatlakların oluşumuyla sonuçlanan kalıntı gerilmeler ortaya çıkar. Artan bir yük,

bu mikro çatlakların makro çatlaklara dönüşmesine ve bu sebeple yapının bozulmasına yol açabilecek kontrolsüz boşluk oluşumuyla sonuçlanabilir. Probleme bağlı olarak, malzeme davranışı mikro, mezo veya makro düzeyde yapısal malzeme modelleri ile tanımlanır (van Mier, 1984). Betonarme inşaat alanındaki üç ölçek ve ilişkili uygulama alanları Şekil 2.9'de gösterilmektedir.



Şekil 2.9 : Betonun farklı boyut düzeylerindeki mekanik davranışı (van Mier, 1984)

Mikroskobik seviye, bireysel moleküllerin ve kristallerin etkileşimi hakkında bilgi sağlar. Esas olarak malzeme içindeki kimyasal süreçleri araştırmak için kullanılır. Bir sonraki seviye, betonun bireysel bileşenlerinin etkileşimlerinin incelenbildiği mezo seviyesidir. Örneğin, ısı ve nemin etkileri nedeniyle hal değişiklikleri gibi zamana bağlı süreçlerin ayrıntılı bir modellemesinin yapılması mümkündür. Bununla birlikte, yapısal ve mekanik modellemenin çoğunluğu makro düzeyde gerçekleşir. Laboratuvar test boyutlarına veya büyük gerçek yapılara sahip bileşenlerin analizi için malzeme modelleri burada bulunur ve çoğunlukla heterojen malzeme olan betonun homojenleştirilmesiyle karakterize edilir.

Bazı araştırmalar, çok ölçekli modeller olarak adlandırılan, çeşitli seviyeleri üzerinden eşzamanlı modelleme ile de ilgilenmektedir (Lackner ve Mang, 2007). Bu modellerle, etkinin meydana geldiği seviyedeki karmaşık malzeme davranışı açıklanabilir. Ancak bu modellerin dezavantajı, mikro düzeydeki değişimler ile analizlere başlandığında analizin sonucu için hatırı sayılır bir hesaplama süresi gerektirmesidir. Yangın durumunda betonarme yapıların davranışının hesaplanması için, betonun parçalanması sonucunda enine kesitin zayıflaması dikkate alınarak, mezo ve makro seviyelerde bir

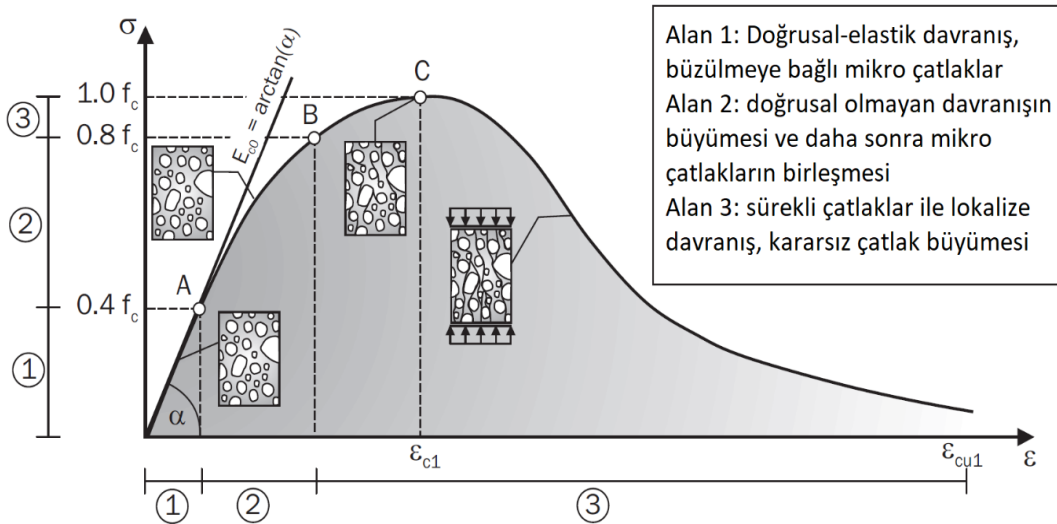
karişım malzeme formölasyonu yararlı olabilir. Kabuklanma davranışı bu çalışmanın bir parçası olmadığı için yapısal modelleme makro düzeyde gerçekleştirilir.

Betonun homojenleşmesine ilişkin basitleştirici varsayıma rağmen, basınç ve çekme alanlarındaki davranış ayrı ayrı açıklanmalıdır. Betonarme yapıların yök taşıma ve deformasyon davranışının incelenmesiyle ilgili olarak tek eksenli ve çok eksenli gerilmeler altındaki davranışlarına değinilecektir. Ayrıca bu çalışmanın ana konusu olan yöksek sıcaklıklar altındaki betonarme elemanların davranışını anlamak adına, malzemelerin normal ve yöksek sıcaklıklar altındaki davranışı ayrı ayrı incelenecektir.

2.3.2.1 Normal şartlar altında betonun davranışı

Tek eksenli gerilme altında betonun basınç ve çekme dayanımı

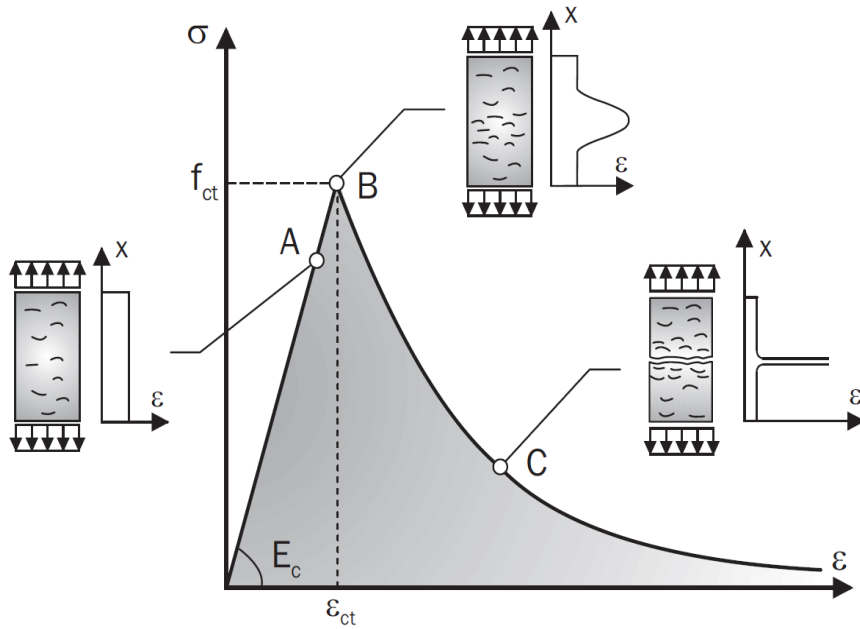
Onaran'a (1999) göre tek eksenli basınç gerilimi altında beton, basınç dayanımı f_c 'nin yöklaşık %40'ına ulaşılana kadar doğrusal-elastik bir şekilde davranır (bkz. şekil 2.10; A noktasına kadar olan kısım). Yökteki artışla, hali hazırda mevcut olan hasar noktalarında, örneğin yökส์üz durumdaki mikro çatlaklarda, bozulma lokalizasyonu meydana gelir. Mevcut mikro çatlaklar uygulanan gerilimin yönüne paralel olarak artar. Basınç dayanımı f_c 'nin yöklaşık %80'inde (bkz. şekil 2.10; B noktası), mikro çatlaklar birleşir ve sürekli yapısal yıkım başlar. Bu doğrusal olmayan kırılma öncesi alanda, çatlaklar büyüyebilir ve kırılma basıncı ϵ_{c1} 'e ulaşana kadar tekrar dallanabilir. Bu bölgede betonda hafif bir sertleşme olur.



şekil 2.10 : Basınç etkisi altındaki betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi

0,4 f_c 'deki doğrusal aralıktan başlayarak, gerilim-şekil değiştirme eğrisi üzerindeki teğetin eğimi sürekli olarak azalır ve maksimum basınç dayanımı f_c 'ye ulaşıldığında (bkz. Şekil 2.10; C noktası) sıfırın altına iner. Bu noktadan hareketle, yük kontrollü deneyler, beton göçmesi nedeniyle ani göçmeye neden olabilirken, deformasyon kontrollü deneyler, gerilmeye bir azalmaya ve buna paralel olarak şekil değiştirmede bir artışa yol açabilir. Bu alan, çimento matrisinde yükleme yönüne paralel olarak büyük bir çatlağın geliştiği göçme sonrası alan olarak adlandırılır.

Sabit çekme gerilimi altında beton, çekme dayanımının (f_{ct}) yaklaşık yüzde 80'ine kadar büyük ölçüde doğrusal elastik bir şekilde davranır. Bu alan, buradaki mikro çatlakların sayısının neredeyse hiç artmadığı gerçeğiyle karakterize edilir (bkz. Şekil 2.11; A noktası). Daha fazla yük artışı ile, yükleme yönüne (B noktası) dik makro çatlaklarda birleşen ve kırılmaya (C noktası) yol açan paralel mikro çatlaklardan oluşan oldukça lokalize bir çatlama süreci bölgesi gelişir. Bu aralık doğrusal değildir ve harç matrisinin ve agreganın sınır tabakasından önemli ölçüde etkilenir, çünkü bu aralıktaki bağ dayanımı ilgili çekme dayanımından daha düşüktür. Burada da kırılma sonrası davranış, yalnızca yüksek deformasyonlarla karakterize edilen deformasyon kontrollü testlerde belirlenebilir.



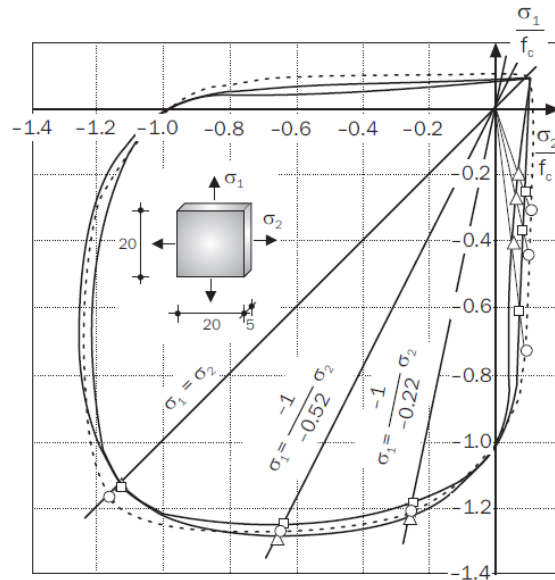
Şekil 2.11 : Çekme etkisi altındaki betonun gerilme – şekil değiştirme eğrisi

Çekme dayanımını beton çekme testleri ile belirlemek çok zor olduğundan bu dayanım, uygulaması kolay olan eğme veya yarma çekme testleri ile dolaylı olarak belirlenir.

Çok eksenli gerilme altında betonun basınç ve çekme dayanımı

Beton veya betonarme yapılar, genellikle bir yüklemenin sonucu olarak üç boyutlu gerilme durumlarına sahiptir. Bununla birlikte, düzlemsel bileşenleri incelerken, üç boyutlu durumun iki eksenli bir gerilme durumuna ($\sigma_3 = 0$) indirgenmesi kabul edilebilir. Tek eksenli gerilimle karşılaştırıldığında, çok eksenli gerilimin bir sonucu olarak deformasyon davranışı önemli ölçüde değişir. Tek eksenli malzeme davranışının açıklaması için bir gerilme – şekil değiştirme ilişkisi yeterli olmakla birlikte, çift eksenli gerilme altındaki malzeme davranışı göz önüne alındığında, ana gerilim alanında çizilen ve malzeme göçmesinin ne zaman meydana geldiğini gösteren bir göçme eğrisi eklenir.

İki eksenli durum için bir gerilme-uzama ilişkisinin net bir şekilde belirtilmesi mümkün değildir. Çift eksenli yükleme altında kırılma eğrilerini belirlemeye yönelik ilk deneyler Kupfer (1973) tarafından gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin temel bulgusu, ikinci bir asal basınç gerilmesi meydana geldiğinde mukavemette bir artış meydana geldiğidir. Yukarıda belirtilen göçme eğrisi, bir betonun çift eksenli gerilimler altında maksimum düzeyde absorbe edebileceği tüm olası gerilim durumlarını birleştiren farklı gerilim oranlarında (σ_1/σ_2) belirlenmiştir (bkz. Şekil 2.12).



Şekil 2.12 : Çift eksenli gerilme etkisindeki göçme eğrisi (Kupfer, 1973)

Tüm izin verilen gerilim oranları σ_1/σ_2 bu zarfın içindedir. Mukavemetteki bu artış, ikinci yük yönünde sınırlı bir enine şekil değiştirmenin bir sonucu olarak sıkıştırma

yükünden kaynaklanır. Basınç gerilmesi oranı $\sigma_1/\sigma_2 = 0,5$ veya $2,0$ için maksimum iki eksenli basınç dayanımının sınırlandırılmamış dayanımdan yüzde 20-25 daha yüksek olduğu görülebilir. Öte yandan, hafif bir enine çekme bile mukavemeti azaltmada güçlü bir etkiye sahiptir. Çift eksenli gerilimde $\sigma_1/\sigma_2 = 1,0$ gerilim oranıyla, nihai çekme dayanımı her zaman tek boyutlu çekme dayanımı f_{ctm} 'dir. Karışık gerilme oranları için, basınç dayanımı küçük çekme gerilmeleri nedeniyle zaten azalmıştır. Bu nedenle, çift eksenli bir yaklaşımda farklı arıza modları ortaya çıkar.

2.3.2.2 Yüksek sıcaklık altında betonun davranışı

Artan sıcaklıklardan kaynaklanan hareketler, betonun davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bölüm 2.3.2'de daha önce açıklandığı gibi, beton esas olarak agrega, çimento ve sudan oluşan homojen olmayan bir malzemedir. Bu üç ana bileşen, betonun yüksek sıcaklık davranışı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir ve farklı derecelerde farklı tepkiler verir. Genel olarak, yüksek sıcaklıkların etkisi altında betonun daha sünek veya daha yumuşak hale geldiği söylenebilir. Yüksek sıcaklıklar betonun mikro yapısında fiziksel ve kimyasal değişikliklere neden olur.

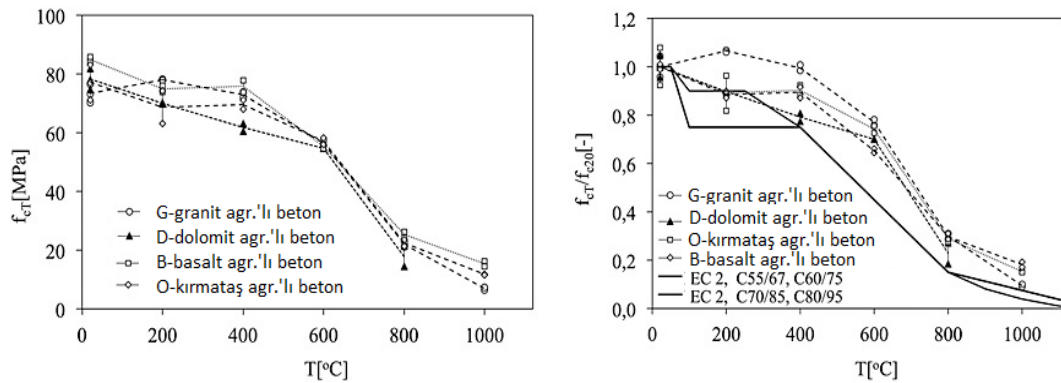
Bir yangın olayından kaynaklanan yüksek sıcaklık yükü, sıcaklığa bağlı, malzemeye bağlı, spesifik ayrışma ve dönüşüm süreçleriyle sonuçlanır. Eurocode göre (EN 1992-1-2, 2004), betonun gözeneklerindeki fiziksel boşluğa bağlı olarak su buharlaşmaya 30°C 'de başlar ve sadece 115°C 'de azami değeri görür ve 200°C 'de tamamen buharlaştığı kabul edilir. Aynı zamanda çimento taşının dehidrasyonu 30°C ile 300°C arasında gerçekleşir (Schneider, 1988). Bu süreç, kimyasal olarak bağlı suyun $120 - 600^{\circ}\text{C}$ 'de salınmasıyla örtüşür. Bu işlemler her zaman su ile bağlantılı olarak gerçekleşir ve öncelikle çimento taşında önemli bir mukavemet kaybına yol açar. Portlandit ayrışması 450°C ile 550°C arasında meydana geldiğinden, 450°C 'den itibaren çimento hamurunun mukavemetinde doğrudan bir kayıp olur. 600°C 'nin üzerinde, CSH (kalsiyum silikat hidrat) fazlarının bozunması başlar ve böylece çimento ölçeğini daha da azaltır. En önemli dönüşüm süreçleri Çizelge 2.3'te tekrar özetlenmiştir.

Çizelge 2.3 : Betonun yükselen sıcaklıkla dönüşüm ve ayrışma süreçleri (Schneider, 1988)

Sıcaklık °C	Betondaki Tepkisi
30-120	Buharlaştırma veya fiziksel olarak bağlanmış suyun buharlaşması.
30-300	Jel bozunması: dehidrasyon, 1. aşama
120-600	Kimyasal olarak bağlanmış suyun salınımı
450-550	Portlandit $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$ ayrışması
570	Kuvars dönüşümü $\alpha \rightarrow \beta\text{SiO}_2$
600-700	CSH fazlarının ayrışması; $\beta - \text{C}_2\text{S}$ oluşumu
600-900	Sadece kireç taşında: Kireçtaşının asitsizleştirilmesi $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1100-1200	Betonun erimesi; camsı maddelerin oluşumu.

Tek eksenli gerilme altında betonun basınç ve çekme dayanımı

Yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımını etkileyen ana parametreler, agrega tipi ve agrega ile çimento arasındaki karışım oranıdır. Grobeton karışımlarında, mukavemetle orantılı olarak daha az azalma olur. Agrega için, kuvars agregalı betondaki dönüşüm süreçlerinden dolayı, kalker agregalı betona göre çok daha erken belirgin dayanım kayıpları meydana gelir. Çimento tipinin kendisi, mukavemet kaybının sadece çok küçük bir kısmını oluşturur. Çimento hamurunun fiziksel tahribatı 100°C'de başlar ve sonuç olarak beton mukavemetinin kaybına yol açar. Ancak bunlar, katkı maddeleri ile sınır yüzey reaksiyonları ile kısmen dengelenir (Schneider, 1988). Şekil 2.13, farklı test yüklerinin ve farklı agrega türlerinin betonun yüksek sıcaklık basınç dayanımı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

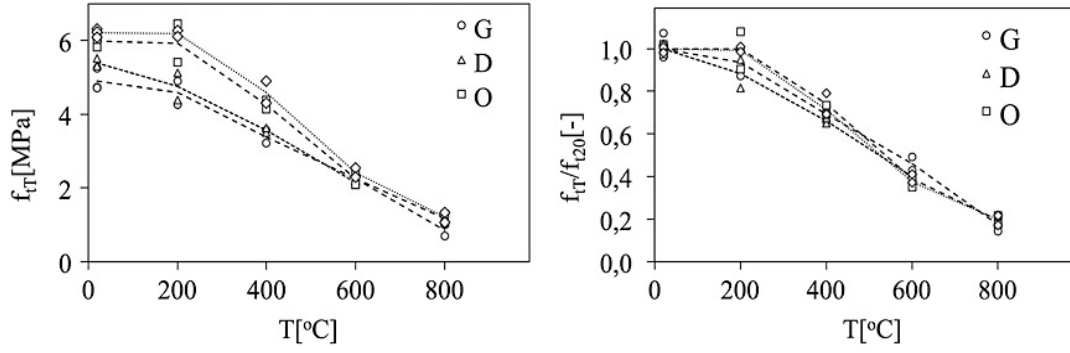


Şekil 2.13 : Farklı agregalara sahip betonun basınç dayanımı (solda) ve bu dayanımın oda sıcaklığındaki dayanıma oranı (sağda) (Hager ve diğ., 2016)

Şekil 2.13'de kübik numuneler üzerinde test edilen basınç dayanımının tekil ve ortalama değerleri sunulmaktadır. Isıtılmamış betonların basınç dayanımı birbirine yakındır ve 80 MPa civarında gidip gelmektedir (değerler 71,1 ila 85,7 MPa arasındadır). 200 °C'de, sadece granit beton için dayanımda hafif bir artış gözlenmiştir. Bazalt, nehir yatağı çakılı ve dolomit beton dayanımı %5-20 oranında azalmıştır. Isıtma sıcaklığının artmasıyla birlikte dayanımda kademeli bir değişim gözlenmiştir. 600 °C'de tüm betonlar neredeyse aynı dayanımı göstermiştir. Ayrıca, daha yüksek ısıtma sıcaklığı aralıkları için benzer malzeme hasarı gözlenmiştir.

Literatürde yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı için çok sayıda test verisi bulunabilirken, bu genellikle ihmal edilebilecek kadar küçük kabul edildiğinden çekme dayanımı için geçerli değildir. Schneider'e (1988) göre, yüksek sıcaklıklarda çekme mukavemeti için aşağıdaki ifadeler kullanılabilir. Çekme alanındaki yüksek sıcaklık dayanımı $f_{ct,\theta}$ büyük ölçüde betonun çimento/agrega karışım oranı tarafından belirlenir ve grobeton daha düşük dayanım kayıpları sergiler. Beton agrega, çekme dayanımı üzerinde en büyük etkiye sahiptir, kuvarslı agregalar çekme dayanımını kalkerli agregalara göre daha az düşürür (Harada ve diğ., 1972). Kalkerli agregalarda çekme dayanımı kaybının kuvarslı agregalara göre neredeyse iki kat daha fazla olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımındaki azalma $f_{c,\theta}$ ile karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklık çekme dayanımı $f_{ct,\theta}$ 'daki nispi azalma daha büyük olma eğilimindedir.

2016 yılında Hager ve diğ.'nin yaptığı betonda kullanılan agrega tipi ve betonun çekme mukavemeti arasındaki ilişkiyi de araştıran bir çalışmada test edilen betonların her biri için yarmada çekme dayanımının ortalama ve tekil değerleri ile yarmada çekme dayanımının bağıl değerleri Şekil 2.14'de sunulmuştur. Isıtılmamış malzemelerin yarmada çekme dayanımı bazalt, kırmataş, granit ve dolomit agregalı betonlar için sırasıyla 6.9, 6.0, 4.9 ve 5.4 MPa'dır. Isıtma, kademeli olarak mukavemet azalmasına neden olmuştur. Basınç dayanımı test sonuçlarına benzer şekilde, 600 °C'ye ısıtıldıktan sonra yarmada çekme dayanımı değerleri hemen hemen aynı olmuştur.

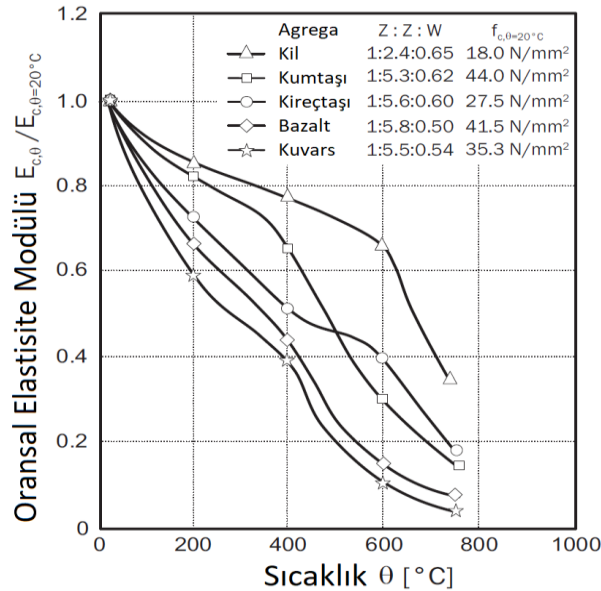


Şekil 2.14 : Farklı agregalara sahip betonun çekme dayanımı (solda) ve bu dayanımın oda sıcaklığındaki dayanıma oranı (sağda) (Hager ve diğ., 2016)

Çekme dayanımının göreceli değerleri sadece 200 °C sıcaklıkta belirgin farka sahiptir. 200 °C'nin üzerinde, agrega türünün test edilen betonların çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi yoktur.

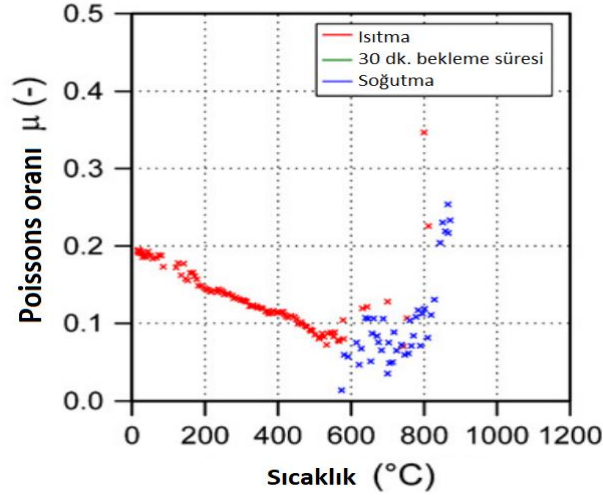
Elastisite modülü ve poisson oranı

Artan sıcaklıkla elastisite modülünde belirgin bir azalma gözlemlenebilir (bkz. Şekil 2.15). Agrega türü, yine azalma üzerinde en büyük etkiye sahiptir. Kireçtaşı içeren agregalarda kayıplar kuvarslı veya bazaltlı agregalara göre daha düşüktür. Zhang ve Bicanic'e (2002) göre, 300°C'ye kadar düşük sıcaklık aralığında elastisite modülünün azalması esas olarak buharlaşan kılcal suyun hacmindeki azalmadan ve 300°C'den itibaren tek tek bileşenlerin yapısal özelliklerinin bozulmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.15 : Sıcaklığın ve çeşitli agregaların elastisite modülü üzerindeki etkisi (Schneider, 1988)

Normal betonun normal sıcaklıklardaki durumu için 0,15 ile 0,2 arasında olan poisson oranı (ν) değeri Bahr ve diğ. (2013) tarafından irdelenmiştir. Şekil 2.16’da görüleceği üzere 600°C’ye kadar doğrusal bir eğilimde azalma görülmüştür. Bu noktadan sonraki değerlerde tekrardan artış gözlemlenmiştir.



Şekil 2.16 : Betonun yüksek sıcaklıklardaki poisson oranı değerleri (Bahr ve diğ., 2013)

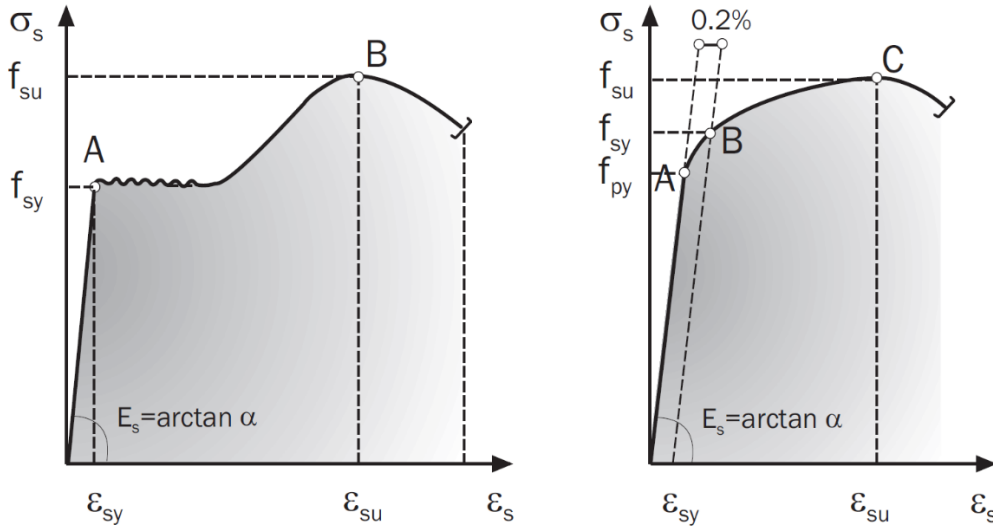
2.3.3 Çelik

Standart donatı çeliği, çelik lifli, plastik lifli veya cam lifli beton fiber teknolojisi gibi modern güçlendirme tekniklerinin yanı sıra beton bileşenlerin güçlendirilmesi için klasik bir malzemedir. Bu çalışma bağlamında, donatı çeliği bulunan bileşenlere odaklanılmaktadır. Donatı çeliği, elastisite modülünün yaklaşık 200000N/mm² olduğu akma noktası f_{sy} 'ye kadar doğrusal-elastik malzeme davranışı ile karakterize edilir. Genel olarak, takviye çeliği üretim süreci açısından soğuk şekillendirilmiş ve sıcak haddelenmiş çelik olarak ayrılır. Bu nedenle her iki çelik türü de kuvvet ve deformasyon davranışlarında önemli ölçüde farklılık gösterir. Donatı çeliği üzerindeki gerilimler ağırlıklı olarak tek eksenli olduğundan, yalnızca tek eksenli gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ilgi çekicidir.

2.3.3.1 Normal Sıcaklık Altında Yapı Çeliğinin davranışı

Şekil 2.17, tek eksenli çekme yüklemesi altındaki karakteristik noktalarla birlikte farklı üretim çeliklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrilerini şematik olarak göstermektedir. Sıcak haddelenmiş takviye çeliğinde, f_{sy} akma noktasından (bkz. Şekil 2.17; solda A noktası) f_{su} nihai gerilmesine (B noktası) kadar pekleşme ile belirgin bir

akma platosu vardır. Sabit bir gerilme seviyesinde, deformasyonlar keskin bir şekilde artar, yani f_{su} kopma gerilmesi, yaklaşık %20 olan yüksek bir ϵ_{su} kırılma şekil değiştirmesi anlamına gelir. Donatı çeliği için çekme ve basınç aralığı neredeyse aynıdır. Akma gerilmeleri f_{sy} 220 ile 420 N/mm² arasındaki değerlerdeyken, kopma gerilmeleri f_{su} 340 ile 500 N/mm² arasındaki değerlere ulaşır. Soğuk şekillendirilmiş çeliklerde ise lineer bir gerilme-şekil değiştirme eğrisi mevcuttur ve f_{sy} akma noktasından itibaren sadece hafif bir sertleşme meydana gelir (bkz. Şekil 2.17; sağda, B noktası).



Şekil 2.17 : Tek eksenli çekme yükü altında donatı çeliğinin idealleştirilmiş gerilme-şekil değiştirme eğrisi. Sol tarafta sıcak haddelenmiş, sağ tarafta soğuk şekillendirilmiş çelik

Takviye çeliği döngüsel yüklemeye maruz kaldığında, yükleme yönü tersine çevrildiğinde takviye çeliğinin sertleşmesinden sonra mikroskobik artık gerilmeler nedeniyle akma noktasının orijinal akma noktasından daha düşük olduğunu belirten Bauschinger etkisi meydana gelir.

Avrupa standartlarında, donatı çeliği genel olarak deformasyon özellikleriyle, bir yandan elastisite modülüyle, diğer yandan da sünekliğiyle tanımlanır. Süneklik A, B ve C olmak üzere üç sınıfa ayrılır. A Sınıfı, çekme mukavemeti f_{st} 'nin akma noktası f_{sy} 'ye oranının en az 1,05 ve maksimum %2,5'lik bir çelik uzamasına izin veren normalde sünek çeliklere atanır. B Sınıfı, f_{st}/f_{sy} 1,08 oranına ve maksimum %5,0 çelik uzamasına sahip oldukça sünek çelikleri içerir. Üçüncü süneklik sınıfı olan C, f_{st}/f_{sy} oranı 1.15 ve maksimum uzaması %8 olan oldukça sünek sismik çeliği ifade eder.

Bunun yanından, bu çelik kalitesi $f_{sy} = 450 \text{ N/mm}^2$ değerinde azaltılmış akma gerilmesine sahiptir.

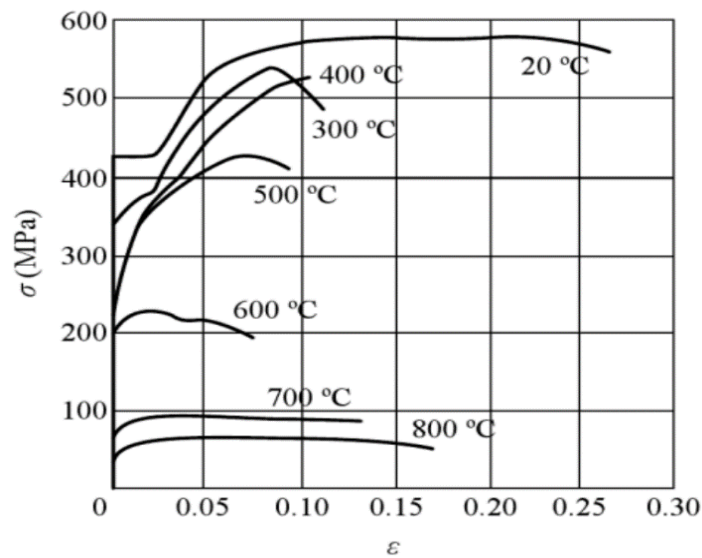
2.3.3.2 Yüksek sıcaklık altında yapı çeliğinin davranışı

Beton çeliğinin çekme ve basınç dayanımı

Çelik, normal sıcaklık aralığında olduğu gibi, yüksek sıcaklık aralığında da yüksek basınç ve çekme dayanımı sergiler. Betonla kombinasyon halinde, esas olarak çekme kuvvetlerini üstlenir. Bölüm 2.3.3'te açıklandığı gibi, sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş çelik arasında bir ayrım yapılır.

Sıcak haddelenmiş çelikler, güçlerini erimiş demirdeki karbon karışımına borçludur. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, tek tek kristaller arasındaki bağlantılar gevşer ve 200°C sıcaklıktan itibaren mukavemet yavaş yavaş düşer. Bu yumuşamanın başlamasıyla birlikte sürekli bir mukavemet kaybı gözlenebilir. Soğuk şekillendirilmiş donatı çeliğinin davranışı, sıcak haddelenmiş çeliğinkine benzer. Burada termal etkilerle kristaller gevşer ve kristal dönüşümü gerçekleşir.

Yapı çeliğinin yüksek sıcaklıktaki davranışıyla ilgili Guo ve Shi'nin (2011) yaptığı çalışmada normal sıcaklıklardaki akma dayanımı 426 MPa olan 12 mm çapındaki yapı çeliğinin dayanımında sıcaklığa bağlı olarak yüzde 80 'i aşan bir dayanım kaybı görülmüştür (bkz. Şekil 2.18). Burada dikkat edilmesi gereken husus bu sıcaklığın yapı elemanı olan kolonun bütün noktalarına aynı zamanda ulaşmadığı ve bu dayanım kaybının elemanın bütününde olmadığıdır.



Şekil 2.18 : Yüksek sıcaklıklardaki yapı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme grafiği (Guo ve Shi, 2011)

Donatı eliklerinin ve betonun deformasyon davranışlarına göre bu alt bölüme ek olarak, Bölüm 3’te Eurocode’a göre malzemenin yüksek sıcaklıklarda nasıl davranacağı, tasarımda ne şekilde ele alınacağına dair bilgiler açıklanmıştır.

2.4 Yapı Elemanlarının Yangın Etkisi Altındaki Davranışı

2.4.1 Betonarme elemanlarda yangın kaynaklı dökülmenin önemi ve alınabilecek nlemler

Beton rts betonarme elemanların servis edebilmesi için en önemli hususlardan biridir. Liu ve diğ. (2018) betonun dökülmesini, beton yapıların yangına dayanıklılığı için büyük bir potansiyel tehdit olarak tanımlamıştır. Altta yatan mekanizmayı anlamak, bu olumsuz olguyu tahmin etmek ve hafifletmek için önemlidir. Ayrıca Khoury ve Anderberg'e (2000) göre, en genel haliyle dökülme, yangınlarda olduğu gibi yüksek ve hızla yükselen sıcaklıklara maruz kaldığında bir yapı elemanının yüzeyinden beton katmanlarının veya parçalarının şiddetli veya şiddetsiz bir şekilde kopması olarak tanımlanmaktadır. Termal dökülme, yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonda meydana gelen en karmaşık ve dolayısıyla en az anlaşılan olaylardan biridir. Bunun en temel sebebi bu mekanizmanın betonun içindeki akışkan olan suyun akış davranışının her elemanda ayrı ve belirsiz olmasıdır.

Betondaki su, betonun kendisinden çok daha fazla genişler. Suyun genişlemesi (buharlaşma) nedeniyle, beton kesitinin en fazla ısınan kısmının gözeneklerinde yüksek bir basınç birikecektir. Bu yüksek basınç nedeniyle, gözeneklerdeki su betondan daha düşük basınç yönünde akacaktır. Alçak basınç bölgesi yangına maruz kalan yüzeyde oluşacağı gibi enkesitin i bölgesindeki daha soğuk kısımda da olabilir. Bu şekilde, suyun bir kısmı betondan dışarıya çıkarken, diğerkısım betonun derinliklerine itilir. Yangın sırasında yüksek sıcaklık betonun derinliklerine nüfuz ettiğinde, bu gözenekler de ısıtılacaktır. Yüksek doygunluk ve sıcaklık nedeniyle, bu gözeneklerdeki basınç daha da artacaktır. Betonun yeterli geçirgenliği varsa, bu herhangi bir soruna yol açmaz. Ancak su her iki yönde de yeterince kolay taşınamazsa, yani sıcaklık artışının hızına ayak uyduramayacağı noktaya gelebilir. Bu noktada dökülmenin meydana gelmesi olasıdır.

Uzun yıllardır, hangi faktörlerin dökülmeyi tetiklediğı, dökülmenin şiddetini neyin etkilediğı ve nihayetinde dökülmenin nasıl işlediğı konusunda araştırmalar

yapılmaktadır. Günümüze dek altta yatan mekanizmanın hala tam manasıyla anlaşılamamış olması birçok bilim insanının ilgisini çekmiştir. Termal dökülme, yangın sırasında normal dayanımlı betona göre dökülmeye daha yatkın olduğu ortaya çıkan yüksek dayanımlı betonla ilgili yeni gelişmeler nedeniyle yakın zamanda tekrar gündeme gelmiştir. Ayrıca Avrupa'da meydana gelen birkaç ciddi tünel yangını da bu olgunun altını çizmiştir. Sonuç olarak, yeni beton türlerinin yangına dayanıklılığı yeniden gözden geçirilmelidir.

2.4.1.1 Dökülmenin önemi

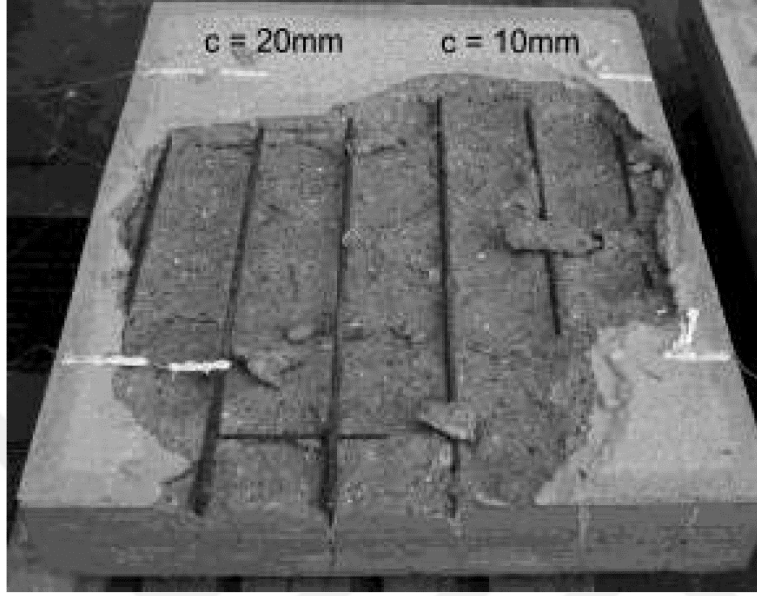
Dökülmenin boyutu büyük ölçüde değişebilir. Hasar çok yüzeysel olabileceği gibi ciddi sonuçlara ve nihayetinde yapısal çökmeye de yol açabilir. Dökülme, bir elemanın kesitini azaltarak betonun kalan alanında daha yüksek gerilmelere ve tasarlanandan önce göçmesine neden olur. Ayrıca, kolonlar gibi basınç elemanlarının burkulma nedeniyle erken çökme yaşayabileceğini de unutulmamalıdır. Bununla beraber dökülme donatı çeliği veya tendonlar üzerindeki koruyucu beton örtüsünü önemli ölçüde azaltabilir hatta ortadan kaldırabilir. Çelik çok daha yüksek sıcaklıklarla karşılaşarak mukavemetini ve dolayısıyla bir bütün olarak beton yapının mukavemetini azaltacaktır. Bir yapının yük taşıma kapasitesinin azalmasının yanı sıra, dökülme, yangının yayılmasını sağlayan döşeme veya panellerde deliklere neden olarak ayırma işlevini de etkileyebilir. Khoury ve Anderberg'e (2000) göre, ince döşemeler bu tür 'bütünlük' göçmelerine karşı özellikle hassastır. Bunların yanı sıra bir beton parçası koptuğunda, yüksek bir hızla fırlayabilir ve muhtemelen canlılara veya bitişik yapılara zarar verebilir.

2.4.1.2 Dökülme türleri

Amran ve diğ. (2022) dökülme tipleri olarak 5 farklı türe dikkat çekmiştir. Bunlar:

- Agregada dökülmesi: Patlama sesi çıkaran krater şeklinde dökülme
- Şiddetli dökülme: Özellikle basınç altındaki duvarlarda, çatlama sesi çıkaran büyük veya küçük parçaların kesitten dökülmeler
- Kademeli gelişen dökülme: Beton çok yüksek sıcaklıklara çıktığında görülen dökülmeler
- Patlayıcı dökülme: Şekil 2.19'da da görülebilen yüksek bir patlama ile çok şiddetli dökülmeler

- Köşe dökülmesi: ilk olarak şiddetli olarak tanımlanan, daha sonraki araştırmacılar tarafından şiddet içermeyen olarak görülen dökülmeler (bkz. Şekil 2.20)



Şekil 2.19 : 834-1-1999'e (2002) göre 119 dakikalık yangın ile ani patlama sonucunda 60 mm'lik beton örtüsü kaybı (Klingsch ve diğ., 2013)



Şekil 2.20 : Köşe dökülmesi (Connolly, 1994)

Thomas dışında çoğu araştırmacı da bazı değişikliklerle birlikte bu sınıflandırmayı benimsemiştir. Örneğin, Khoury ve Anderberg (2000) iki tür dökülmeden daha bahseder: beton 'mukavemeti kendi ağırlığını taşıyamayacak kadar düşük olduğunda meydana gelen dökülme' ve nem emilimi üzerine soğuma sırasında ve sonrasında

meydana gelen ‘soğuma sonrası dökülme’. Her iki türü de doğası gereği şiddet içermeyen ancak olası ciddi etkilere sahip olarak tanımlamaktadır. Bu geniş tip yelpazesi, çok çeşitli koşullarda birçok farklı dökülme gözlemiyle sonuçlanır. Ayrıca her bir türün farklı şekillerde etkilenmesi de konunun karmaşıklığını artırmaktadır.

Bu metin esas olarak en çok korkulan ve dolayısıyla en çok araştırılan dökülme türü olan patlayıcı dökülmeye odaklanacaktır. Diğer birçok yazar patlayıcı dökülmeyi dökülmenin 'ana' şekli olarak görmekte ve genellikle basitçe dökülme olarak adlandırmaktadır. Burada, bölüm 2.4.1.3 ve 2.4.1.4 yalnızca patlayıcı dökülme ile ilgilidir ve dökülme terimine yapılan atıflar patlayıcı dökülme anlamına gelmektedir.

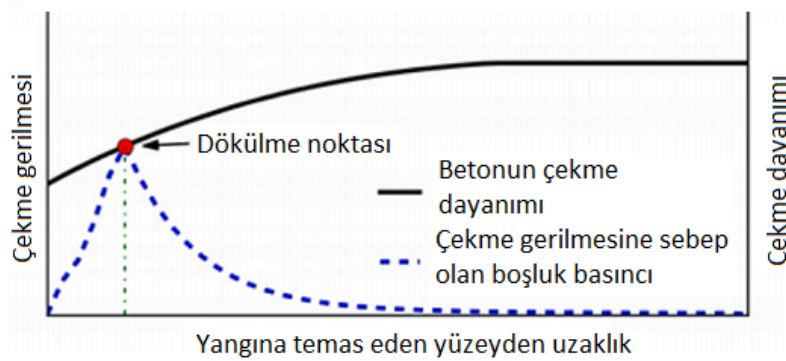
2.4.1.3 Patlayıcı dökülmeyi etkileyen faktörler

Patlayıcı dökülmeyi etkileyen ve uzun yıllar boyunca yapılan kapsamlı testler sonucunda tespit edilen çok sayıda faktör bulunmaktadır. Bu faktörler malzeme, jeolojik, yapısal veya çevresel temelli olabilir. Farklı yazarların raporlarındaki çelişkiler nadir değildir. Bunun nedeni konunun karmaşıklığı, patlayıcı dökülmeyi etkileyen çok sayıda parametre olması ve numunelerin ve koşulların testten teste önemli ölçüde farklılık göstermesi olabilir. Ayrıca, patlayıcı dökülme stokastik bir süreçtir (Khoury ve Anderberg, 2000). Aynı anda üretilen ve aynı şekilde hazırlanıp test edilen numunelerin bazıları dökülürken bazıları dökülmeyebilir. Aşağıda, genel bir görüş birliği bulmaya çalışılmıştır. Bugün çoğu araştırmacı aşağıdaki faktörler üzerinde hemfikir, ancak bunların patlayıcı dökülmeyi neden etkilediği hala tartışılmaktadır. Amran ve diğ. (2022), Fu ve diğ. (2011), Majorana ve diğ. (2010) ve Khoury ve Anderberg’in (2000) çalışmalarından, farklı faktörlerin dökülmeyi nasıl etkilediğine dair bir özetleme yapılacak olursa aşağıdaki birçok etmen görülebilir.

Yapı elemanının geometrisi özelinde ilk olarak kesit şeklinin etkisi düşünülebilir. Bir elemanın ne kadar çok yüzü ateşe maruz kalırsa, dökülme meydana gelme olasılığı o kadar artar. Örneğin döşemeler dökülmeye (tek yüz maruziyeti) kirişlerden (3 ila 4 yüz maruziyeti) genellikle daha iyi tepki verir. Bunun yanında yüzeylerin ısınma hızının da etkisi önemlidir.

Betonun mukavemeti ile dökülme arasında beklenmedik bir şekilde ters orantı mevcuttur. Geçirgenliğin artması bu duruma vesile olmaktadır. Bu da düşük basınç dayanımına sahip betonları dökülme açısından kaliteli bir hale getirmektedir. Liu ve diğ. (2018) çalışmalarında boşluk basıncı ile dökülme arasındaki ilişkiyi göstermiştir

(bkz. Şekil 2.21). Dayanım üzerinden gidilecek olursa bir eleman üzerindeki basınç gerilimi dökülme olasılığını artırır. Kesit boyutunun küçülmesi ya da yüklemenin artmasıyla basınç gerilmesinde meydana gelen artış patlayıcı dökülmeyi teşvik eder.



Şekil 2.21 : Boşluk basıncı tarafından tetiklenen dökülme anındaki bir çekme gerilmesi profili

Bir başka önemli faktör ise nem içeriğidir. Genel olarak, ağırlıkça %2'den fazla (hacimce %5) neme sahip normal dayanımlı betonda patlayıcı dökülme mümkündür. Ağırlıkça %2'den daha az nem mevcut olduğunda, dökülme olasılığı düşüktür, ancak bu nem içeriğine pratikte ulaşmak zordur. Bunun yanında çok yoğun yüksek dayanımlı betonlarda düşük nem içeriklerinde (ağırlıkça %2,3 ila 3) dökülme yaşanmıştır. Bu durumun düşük gözeneklilik ve geçirgenlikten kaynaklandığı, nemin kaçmasını zorlaştırdığı, bunun da daha yüksek gözenek basınçlarına neden olduğu ve dökülme riskini artırdığı düşünülmektedir.

Betonun nem içeriğinin yaşla birlikte azaldığı bilinmektedir. Binalardaki betonların ortalama nem içeriğinin inşaatın iki yıl sonra ağırlıkça yaklaşık %3 olduğu tespit edilmiştir, bu da bu süreden sonra dökülme olasılığının düşük olacağını göstermektedir. Ayrıca, bir beton elemanın nem içeriği büyük ölçüde bulunduğu ortama ve iklime bağlıdır. Örneğin, binaların içindeki beton elemanları otoparklar veya tünellerle karşılaştırılabilir.

Diğer bir etmen olan agrega türünü dikkate alan deneysel veriler bazen tutarsızdır; ancak genel olarak, düşük ısı genleşmeli agregalar kullanıldığında dökülme olasılığının azaldığı belirtilebilir. Ayrıca yangın testleri agrega boyutu büyüdükçe patlayıcı dökülmenin meydana gelme olasılığının arttığını göstermektedir.

Donatı ve donatı örtüsü değerlendirilecek olursa genellikle patlayıcı dökülme beton kesitin donatısız kısmıyla sınırlıdır ancak donatının dökülme nedeniyle açığa

çıkabileceği konusunda dikkatli olunmalıdır. Örneğin, ana donatı köşelere yerleştirilirken, köşelerin düz yüzeylere göre daha hızlı ısındığına dikkat edilmelidir. Bu nedenle, belki de tüm ana donatı köşelere yerleştirilmemeli veya mümkünse, ana çeliğin daha içeride bulunduğu yerlerde sadece nominal donatı yerleştirilmelidir.

Yapılan deneyler beton örtüsü ne kadar büyükse dökülme olasılığının da o kadar büyük olduğunu göstermektedir. Nominal örtü (yani en dıştaki çeliğe kadar olan örtü) yoğun agregalı beton için 40 mm'den veya hafif agregalı beton için 50 mm'den büyükse dökülmeden korkulması gerektiği bulunmuştur. Yapılan çalışmalarda ilave donatının patlayıcı dökülmeyi engellemesi ile bir bağlantı bulunamamıştır. Ancak verilen hasarı sınırladığı görülmüştür.

2.4.1.4 Patlayıcı dökülmeye karşı tasarım



Şekil 2.22 : Sol tarafta 180 ve sağ tarafta 120 dakikalık yangına maruz kalmış polipropilen lifle imal edilmiş termal bariyerli yapı elemanları

Dökülme etkisi bir yana, beton yapılar yangına oldukça iyi dayanabilir. Çoğunlukla, yangına karşı direnci kontrol etmek için çok basit hesaplama yöntemleri yeterlidir ve birçok yapı normal sıcaklık tasarımına ek olarak ekstra ölçümlere ihtiyaç duymaz. Ancak, beklenmedik bir şekilde dökülme meydana geldiğinde, bu yangın güvenliği tasarım hesaplamalarının çok hızlı bir şekilde güvensiz hale gelebileceği kolayca görülebilir. Ne yazık ki, günümüzde dökülme olayının ve şiddetinin tahmin edilmesi zor olmaya devam etmekte ve yangına maruz kalan beton yapılar için sağlam modeller geliştirilmesinde sınırlı bir faktör oluşturmaktadır.

Literatürde bulunabilecek çözümlerden biri termal bariyer kullanımıdır. Boström (2006) yaptığı deneylerde 18 mikrometre çapa sahip 2kg/m^3 yoğunluklu polipropilen lifle imal edilmiş termal bariyerlerin 120 dakikalık bir yangında dökülmeden

durabildiğini göstermiştir (bkz. Şekil 2.22). Beton elemanların yangına maruz kalan taraflarına bir çeşit kaplama olarak uygulanır. Faydaları açıktır, betona ısı akışını sınırlayarak yangının eleman üzerindeki herhangi bir etkisini, yani dökülmeyi ve aynı zamanda örneğin mukavemet azalmasını azaltır. Muhtemelen bu ölçümün en büyük dezavantajı fiyatıdır. Diğer çözümler arasında hava sürükleyici bir malzeme kullanmak (ancak bu durumda mukavemet azalır), nem içeriğini azaltmak (kıyı yapılarında veya ne oranının yüksek olduğu şehirlerdeki inşaatlarda zordur), geçirgenliği azaltmak (ve dolayısıyla dayanıklılığı azaltmak), düşük termal genleşmeli agrega kullanmak (termal gerilmeleri azaltmak için), daha kalın kesitler uygulamak veya çelik lifler eklemek gibi çözümler gösterilebilir (Khoury, 2008). Uygun bir takviye kullanımı dökülme hasarını sınırlandırabilir ancak meydana gelme olasılığını azaltmaz. Yine de en iyi bilinen çözüm şüphesiz beton karışımına polipropilen liflerin dahil edilmesidir.

Polipropilen lifler

Genellikle yüksek dayanımlı betonların (YDB) dökülme problemine karşı kullanılan efektif çözümlerin başında gelen polipropilen lifler (PP-lifler) 1990'ların başlarından beri çimento matrisine dahil edilerek kullanılmaktadır. Ancak, polipropilen-beton kompozitinin davranışının altında yatan süreçler ve patlayıcı dökülme üzerindeki olumlu etkisi tam olarak anlaşılamamıştır. Birçok araştırmacı şu anda PP-liflerin ne zaman uygulanması gerektiğini, hangi türün en iyi performansı gösterdiğini, hangi boyutların kullanılması gerektiğini vb. belirleyen kılavuzlar üzerinde çalışmaktadır. Lura ve Terrasi (2014) yaptıkları çalışmada PP-liflerin eridiklerinde su buharının tahliye edildiği kanallar oluşturarak yüksek buhar basınçlarının oluşmasını önledikleri için genellikle YDB'ye eklendiğini belirtmiştir. Ancak kendiliğinden yerleşen YDB'de kendiliğinden yerleşme özelliklerini korumak için PP-liflerinin miktarının sınırlandırılması gerekir ve bu durum yangın direncini azaltabilir.

PP liflerinin rolünün anlaşılması, betonda tasarımının optimize edilmesinde kilit öneme sahiptir. PP liflerinin yangına maruz kalan betonun patlayıcı dökülmesini nasıl sınırladığına dair çeşitli teoriler mevcuttur. McNamee (2013) halihazırda literatürde tartışılan farklı teorileri özetlemiştir.

- Lifler eridiğinde ve yandığında kılcal gözeneklerin oluşması
- Liflerin yakınında difüzyona açık geçiş bölgelerinin gelişmesi

- Beton karışımına liflerin eklenmesi ve karıştırılması sırasında ilave mikro gözeneklerin gelişmesi
- PP liflerinin ucunda ısıtma ve eritme sırasında gelişen ilave mikro çatlakların oluşması gibi teoriler, artan geçirgenlik nedeniyle nem taşınımının kolaylaştığını böylelikle dökülmenin azaldığını varsaymaktadır.





3. EUROCODE'A GÖRE BETONARME ELEMANLARIN YANGIN TASARIMI VE HESAP ADIMLARI

3.1 Eurocode ve Tasarımın Temelleri

Bu çalışmanın bir kısmı, yangın güvenliği için beton bir yapı elemanının yapısal olarak nasıl tasarlanacağını açıklamaktır. Bu, tasarım standartları kullanılarak yapılır ve günümüzde yapısal yönetmeliklerde öncülerden olan Avrupa standartları veya Eurocode (EN)'dir. Bu standartlar, 27 Avrupa Birliği ülkesi, Birleşik Krallık, Kuzey Makedonya Cumhuriyeti ve Sırbistan'ın yanı sıra üç Avrupa Serbest Ticaret Birliği ülkesinin (İzlanda, Norveç ve İsviçre) ulusal standart kuruluşları olan CEN'in (Comité Européen de Normalisation veya Avrupa standardizasyon komitesi) tüm Üye Devletleri için geçerlidir (CEN, 2021).

3.1.1 Kapsam

Eurocode'lar tüm ana yapı malzemelerini (beton, çelik, ahşap, duvar ve alüminyum), yapı mühendisliğinin tüm ana alanlarını (yapısal tasarımın temeli, yükleme, yangın, geoteknik, deprem, vb) ve çok çeşitli yapı ve ürün türlerini (binalar, köprüler, kuleler ve direkler, silolar, vb) kapsamlı bir şekilde deşinmektedir. Her biri genellikle birkaç Bölümden oluşan on farklı standart bulunmaktadır (EN 1992-1-2, 2004). Bunlar:

- EN 1990: (Eurocode) Yapısal tasarımın temelleri
- EN 1991: (Eurocode 1) Yapılar üzerindeki eylemler
- EN 1992: (Eurocode 2) Beton yapıların tasarımı
- EN 1993: (Eurocode 3) Çelik yapıların tasarımı
- EN 1994: (Eurocode 4) Kompozit çelik ve beton yapıların tasarımı
- EN 1995: (Eurocode 5) Ahşap yapıların tasarımı
- EN 1996: (Eurocode 6) Yığma yapıların tasarımı
- EN 1997: (Eurocode 7) Geoteknik tasarım
- EN 1998: (Eurocode 8) Depreme dayanıklılık için yapıların tasarımı

- EN 1999: (Eurocode 9) Alüminyum yapıların tasarımı

Yangına dayanıklılık talimatları özel bir Eurocode'da belirtilmemiştir, ancak her Eurocode'da (Eurocode 0, 7 ve 8 hariç) özel bir bölümde, Bölüm 1.2'de yer almaktadır.

3.1.1.1 Birincil hedefler

Eurocode, dayanıklılık ve ekonomi unsurları da dahil olmak üzere mekanik direnç, stabilite ve yangına karşı direnç için gerekli gereklilikleri karşılamak üzere kullanılabilecek tasarım kriterleri ve yöntemleri sağlamak üzere tasarlanmıştır (Guidance Paper L, 2003). Amaç, yapıların tasarım ve inşasında rolü olan mal sahipleri, işletmeciler ve kullanıcılar, tasarımcılar, müteahhitler ve inşaat ürünleri üreticileri gibi tüm taraflar arasında ortak bir anlayış oluşturmaktır. Eurocode'lar araştırma ve geliştirme için de ortak bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

3.1.1.2 Uygulama alanları

İlk olarak, Eurocode'lar bina ve inşaat mühendisliği işlerinin temel gereksinimlerini karşılamak için bir araç olarak kullanılabilir. Ayrıca, inşaat işleri ve ilgili mühendislik hizmetleri için sözleşmelerin belirlenmesinde temel teşkil edebilirler. Üçüncü olarak, inşaat ürünleri için uyumlaştırılmış teknik şartnamelerin hazırlanmasında bir referans çerçevesi olarak hizmet vermektedir. Alternatif tasarım kullanılabilir ancak EN Eurocode çözümüne teknik olarak eşdeğer olduğu kanıtlanmalıdır.

3.1.2 Tasarımın temelleri

Yangın durumunda mekanik dayanım gerekli olduğunda, betonarme yapılar, gerekli yangına maruz kalma süresi boyunca yük taşıma işlevini sürdürecektir şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Bölümlendirmenin (kompartımanlama) gerekli olduğu durumlarda, ek yerleri dahil yangın bölmesinin sınırlarını oluşturan elemanlar, gerekli yangına maruz kalma süresi boyunca ayırma işlevlerini sürdürecektir şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir (EN 1991-1-2, 2002). Bu durum, gerekli olduğu durumlarda Bölüm 2.2.3'te de anlatılan R - yük taşıma fonksiyonu, E - bütünlük özelliği ve I - yalıtım işlevi gereksinimlerinin karşılanmasının önemini gösterir.

Koruma araçları veya ayırma elemanları için tasarım kriterleri, yük taşıyan yapının deformasyonunun dikkate alınmasını gerektirdiğinde, deformasyon kriterleri

uygulanacaktır. Ancak EN'ye göre ilgili olduğu şekilde, aşağıdaki durumlarda yük taşıyıcı yapının deformasyonunun dikkate alınması;

- koruma araçlarının etkinliği 4.7'ye göre değerlendirilmişse ve
- ayırma elemanları, nominal yangın maruziyetine göre gereksinimleri karşılıyorsa

gerekli değildir.

3.1.2.1 Malzeme özelliklerinin tasarım değerleri

Dayanım ve deformasyon gibi mekanik malzeme özelliklerinin ($X_{d,fi}$) tasarım değerleri aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$X_{d,fi} = \frac{k_{\theta} X_k}{\gamma_{M,fi}} \quad (3.1)$$

Burada X_k , EN 1992-1-1'e göre normal sıcaklık tasarımı için bir mukavemet veya deformasyon özelliğinin (genellikle f_k veya E_k) karakteristik değeridir. k_{θ} ise malzeme sıcaklığına bağlı olarak bir mukavemet veya deformasyon özelliği için azaltma faktörüdür (bkz. Şekil 3.15). $\gamma_{M,fi}$, yangın durumunda ilgili malzeme özelliği için kısmi güvenlik faktörüdür.

3.1.2.2 Doğrulama yöntemleri

Eurocode'lardaki doğrulama prosedürü, kısmi güvenlik faktörleri ile kullanılan limit durum kavramına dayanmaktadır. Eurocode'lar olasılıksal yöntemlere dayalı tasarımın yanı sıra test destekli tasarıma da izin vermekte ve bu yöntemlerin kullanımı için rehberlik sağlamaktadır.

Genel hesaplama yöntemlerinde, yangın yükü altındaki bileşenlerin, kısmi veya tam yük taşıyan yapıların gerçek yük taşıma ve deformasyon davranışları, çeşitli sayısal yöntemler kullanılarak bilgisayar programları yardımıyla belirlenebilir. Sıcaklık yayılımı, kesit geometrisi ile bileşen veya yapı analizinin tek bir hesaplama çalışmasında gerçekleştirildiği sonlu elemanlar yöntemi (FEM) gibi yöntemler kullanılarak yapılır. Malzeme özelliklerindeki sıcaklıkla ilgili değişiklikleri dikkate alıp termal analizi ve mekanik analizi ayrıştırılmış bir şekilde gerçekleştirerek doğrulamaların yapılması mümkün olacaktır.

3.2 Yangın Durumunda EN 1'e Göre Yükler

3.2.1 Nominal yangın maruziyeti

EN, standart yangına maruz kalma durumunda yapı elemanları için R, E ve I kriterlerine uyma zorunluluğunu getirmiştir. "R" kriterinin, gerekli yangına maruz kalma süresi boyunca yük taşıma işlevinin sürdürüldüğü durumlarda karşılandığı varsayılır. Maruz kalmayan yüzeyin tamamı üzerindeki ortalama sıcaklık artışının 140 K ile sınırlı olduğu ve bu yüzeyin herhangi bir noktasındaki maksimum sıcaklık artışının 180 K'yi geçmediği durumlarda "I" kriterinin karşılandığı varsayılabilir. Harici yangına maruz kalma eğrisi (bkz. EN 1991-1-2) ile yapılan tasarımlarda da aynı kriterler (R, E, I) sağlanmalıdır ancak bu özel eğriye yapılan atıf "ef" harfleriyle tanımlanmalıdır. Aynı şekilde hidrokarbon yangın eğrisine maruz kalındığında da kriterler (R, E, I) sağlanmalı ve bu özel eğriye yapılan atıf "HC" harfleriyle tanımlanmalıdır. Yük taşıma işlevi olan veya olmayan dikey bir ayırıcı elemanın darbeye dayanıklılık gerekliliğine uyması gerektiğinde, kriter M'yi sağlamalıdır. Bir başka ifadeyle yatay bir yoğunlaşmış yüke dayanmalıdır.

3.2.2 Nominal yangın eğrileri

Yangın durumu, diğer bağımsız istisnai olaylarla üst üste bindirilmesi gerekmeyen istisnai bir olay (kaza durumu) olarak kabul edilir. Yangın meydana gelmeden önce yük taşıma davranışı üzerinde etkili olan zamana ve yüke bağlı etkilerin dikkate alınması gerekmez. Kural olarak, yangının soğuma aşamasının da dikkate alınması gerekli değildir. Eurocode 1 kısım 1-2'de (EN 1991-1-2, 2002) yapı bileşenleri üzerine yangın etkisini simüle edebilmek adına sıcaklığı θ 'ın bir fonksiyonu olarak 3 farklı yangın eğrisi şeklinde tanımlanmıştır. Bunlardan ilki:

$$\theta_g(t) = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) [^{\circ}\text{C}] \quad (3.2)$$

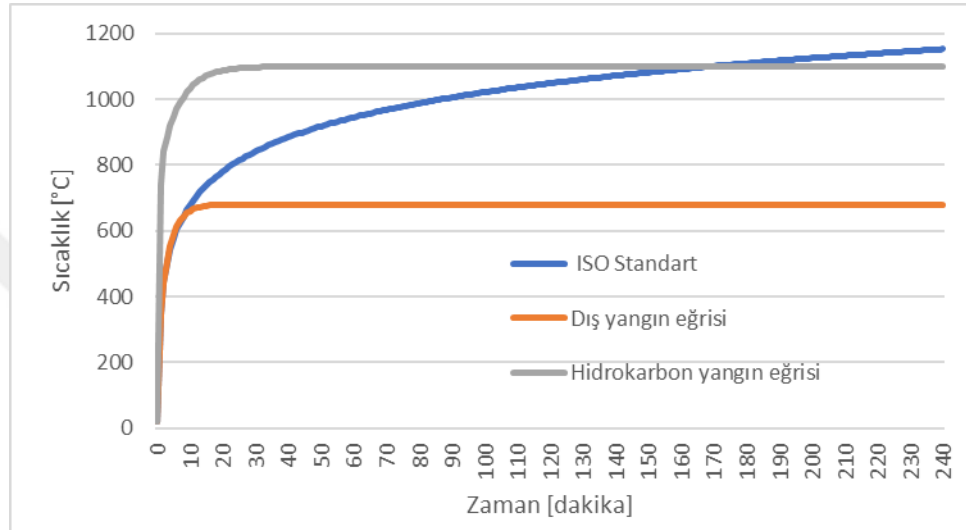
olarak t'nin diğer denklemlerde de olacağı gibi dakika cinsinden tanımlandığı ISO 834 standart yangın eğrisidir. EN 1-1-2 taşıyıcı yapılar için yapılacak yangından korunma tasarımlarında bu eğriyi önermektedir. Konvektif ısı transfer katsayısı $\alpha = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ 'dır. Aynı katsayıya sahip diğer eğri ise harici yangın eğrisidir (bkz. denklem 3.3). Yük taşımayan dış duvarların ve ekli parapetlerin oda kapamasının yangın tasarımları için, harici yangın eğrisi dışarıdan yangın yükü olarak ve standart yangın eğrisi ise içeriden kullanılabilir.

$$\theta_g(t) = 660(1 - 0,687e^{-0,32t} - 0,313e^{-3,8t}) + 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.3)$$

Sıvı yangınları için, hidrokarbon yangın eğrisi olarak adlandırılan eğri önerilmektedir. Bu eğrinin denklemi:

$$\theta_g(t) = 1080(1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \text{ [}^{\circ}\text{C]} \quad (3.4)$$

olarak verilmiştir. Bu durumda konvektif ısı transfer katsayısı $\alpha = 50 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ 'dir. Bahsedilen üç nominal sıcaklık-zaman eğrisi Şekil 3.1 grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Nominal sıcaklık-zaman eğrileri (EN 1991-1-2, 2002)

3.2.3 Parametrik yangın maruziyeti

EN'ye göre yük taşıma işlevi, sönme fazı da dahil olmak üzere yangının tüm dayanıklılığı boyunca veya belirli bir süre boyunca sürdürülmelidir. Ayırma fonksiyonunun doğrulanması için, normal sıcaklığın 20°C olduğu varsayılarak aşağıdaki şartlar uygulanır:

- Yapının maruz kalmayan tarafındaki ortalama sıcaklık artışı 140 K ile sınırlandırılmalı ve maruz kalmayan tarafındaki maksimum sıcaklık artışı, yangın bölmesindeki maksimum gaz sıcaklığına ulaşılan kadar ısıtma aşamasında 180 K'yi geçmemelidir.
- Yapının maruz kalmayan tarafındaki ortalama sıcaklık artışı $\Delta\theta_1$ ile sınırlandırılmalı ve bozulma fazı sırasında maruz kalmayan tarafın maksimum sıcaklık artışı $\Delta\theta_{12}$ 'yi geçmemelidir.

3.2.4 Mekanik yükler

EN 1-1-2 yangın durumunda yapı üzerine gelebilecek mekanik etkileri düzenler ve de doğrudan ve dolaylı etkiler arasında ayrım yapar. Yangın gerilimine bağlı dolaylı etkiler, termal genleşmeler, deformasyonlar ve eğriliklerin neden olduğu kuvvetler ve momentlerdir. Yük taşıma davranışı üzerinde sadece küçük bir etkiye sahiplerse ve/veya mesnetlerin uygun tasarımı ile sönmömlenebiliyorlarsa dikkate alınmaları gerekmez. Ayrıca, her bir bileşenin yangından korunma tasarımında ayrı ayrı dikkate alınmaları gerekmez. Dolaylı etkilerin dikkate alınması gerekiyorsa, bunlar yapı malzemesiyle ilgili Eurocode'lardaki termal ve mekanik malzeme parametreleri kullanılarak belirlenmelidir. Doğrudan etkiler ise normal sıcaklık için tasarımda dikkate alınan yüklerdir (ölü ağırlık, rüzgâr, kar yükü vb.). Burada kar ve rüzgâr yüklerinin yanı sıra işletmeden kaynaklanan yüklerin (örneğin vinç hareketinden kaynaklanan yatay kuvvetler) dikkate alınması için genel kurallar da verilmiştir. Yanma nedeniyle yükün azalması dikkate alınmaz. Yangın durumundaki etkiler EN 1990'deki (2002) kombinasyon kurallarına göre aşağıdaki şekilde derlenmiştir.

$$E_{fi,d,t} = \sum \gamma_{GA} G_k + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum \Psi_{2,i} Q_{k,i} + \sum A_d(t) \quad (3.5)$$

Burada;

G_k , kalıcı etkilerin karakteristik değeri

$Q_{k,1}$ baskın değişken etkilerin karakteristik değeri

$Q_{k,i}$ diğer değişken etkilerin karakteristik değeri

$A_d(t)$ dolaylı etkilerin tasarım değeri

γ_{GA} kalıcı etkiler için kısmi güvenlik faktörü (= 1.0)

$\Psi_{1,1}$, $\Psi_{2,i}$ kombinasyon katsayıları.

EN 1991-1-2 bölüm 4.3.1'de (2002) yangın durumunda, belirleyici değişken eylem için de sık değer $\Psi_{1,1}Q_{k,1}$ yerine yarı kalıcı değer $\Psi_{2,1}Q_{k,1}$ kullanılması önerilir.

3.2.5 Eleman analizi

Eleman analizinde yüklerin etkisi, EN 1991-1-2 Bölüm 4'e göre $\Psi_{1,1}$ veya $\Psi_{2,1}$ kombinasyon faktörleri kullanılarak $t = 0$ zamanı için belirlenmelidir. Durumu

basitleştirmek için, $E_{d,fi}$ yangın durumundaki mekanik etkiler, η_{fi} faktörü ile indirgenerek doğrudan normal sıcaklıktaki E_d etkilerinden türetilir:

$$E_{d,fi} = \eta_{fi} E_d \quad (3.6)$$

Burada:

E_d , temel bir yük kombinasyonu için normal sıcaklık tasarımına karşılık gelen kuvvet veya momentin tasarım değeridir (bkz. EN 1990);

η_{fi} ise yangın durumu için tasarım yük seviyesi için azaltma faktörüdür. Bu faktörün hesabı için EN 1992 1-2 (2002) aşağıdaki denklemi önermiştir.

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \Psi_{fi} Q_{k,1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q,1} Q_{k,1}} \quad (3.7)$$

Burada;

$Q_{k,1}$ temel değişken yük,

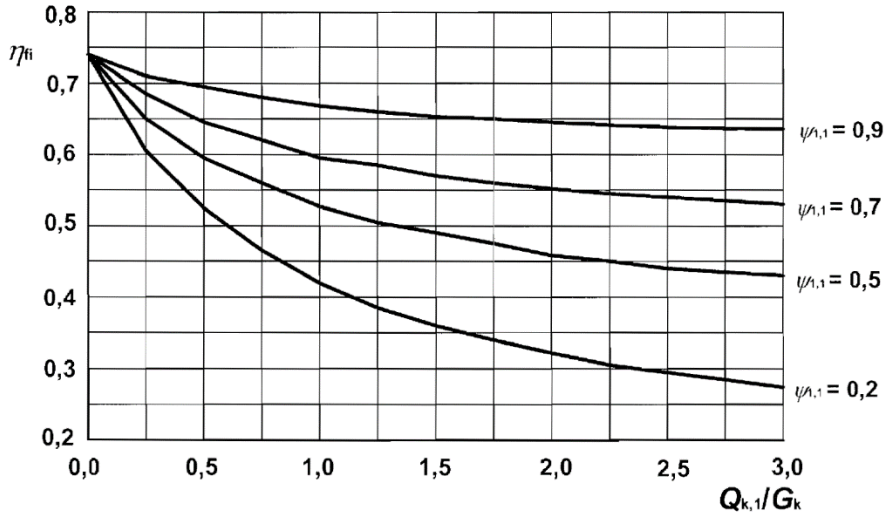
G_k , kalıcı yüklerin karakteristik değeri,

γ_G , kalıcı yükler için kısmi güvenlik faktörü,

$\gamma_{Q,1}$ kalıcı yükler için kısmi güvenlik faktörü (= 1.0)

Ψ_{fi} , $\Psi_{1,1}$, sık veya $\Psi_{2,1}$, yarı kalıcı kombinasyon katsayıları.

Denklem 3.7'ye alternatif olarak kombinasyon faktörü $\Psi_{1,1}$ 'in farklı değerleri için $Q_{k,1}/G_k$ yük oranına karşı η_{fi} azaltma faktörünün değişimine ilişkin örnekler, $\gamma_{GA} = 1,0$, $\gamma_G = 1,35$ ve $\gamma_Q = 1,5$ katsayıları kullanılarak Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 : Azaltma faktörü η_{fi} 'nin $Q_{k,1}/G_k$ yük oranı ile değişimi

EN 1992 1-2 (2002) bir basitleştirme olarak önerilen $\eta_{fi} = 0,7$ değeri kullanılabileceğini de belirtir.

3.3 Malzeme Özellikleri

Bölüm 2.3'te değinilen malzeme özellikleri daha çok literatürde yapılan çalışmalar üzerinden yüksek sıcaklıklar altındaki malzeme davranış felsefesini göstermeyi amaçlamıştır. Çalışmanın bu bölümünde ise Eurocode'a göre (EN 1992-1-2, 2004) yangına karşı tasarımda yapı malzemelerinin yüksek sıcaklık etkisi altındaki malzeme özellikleri anlatılacaktır. Ayrıca normal (20 °C) sıcaklıktaki malzeme özellikleri EN 1992-1-1'de (2002) bulunmaktadır.

Eurocode bölüm 3'te beton ve yapı çeliğine dair bilgi ve limitasyonlar verilmiştir. Bu bilgiler hem basitleştirilmiş hem de genel hesap yöntemlerinde malzeme bilgisinin tanımlanması için izlenecek yolu sunmaktadır. Basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi yalnızca mukavemet özelliklerini gerektirirken, gelişmiş bir hesaplama yöntemi termal özellikleri ve deformasyon özelliklerini de kullanır. Tablolaştırılmış verileri kullanan tasarım yöntemi, bu özelliklerin kullanılmasını gerektirmez. Çünkü halihazırda yapılan deneylere dayandığından kesit ebadı gibi temel birkaç bilgi yeterli olmaktadır.

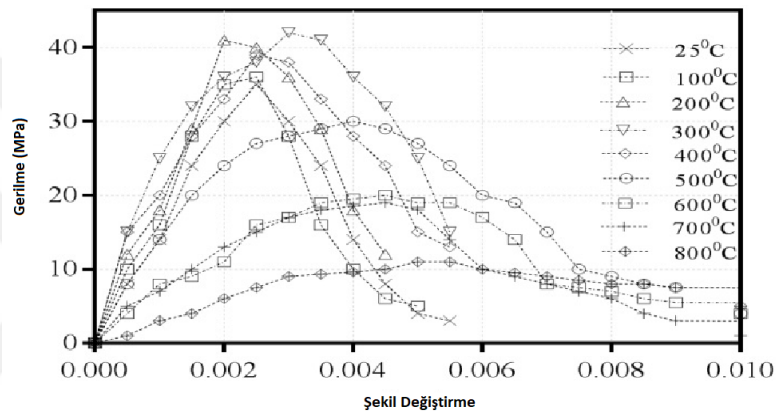
Bu başlık altındaki değerler karakteristik malzeme özelliği değerleri olarak ele alınacak olup tasarım değerlerinden 3.1.2'de bahsedilmiştir. Ayrıca bu değerler Bölüm 3.4 ila 3.7 arasında anlatılacak olan yöntemlerde kullanılacaktır.

3.3.1 Yüksek sıcaklıklardaki dayanım ve deformasyon

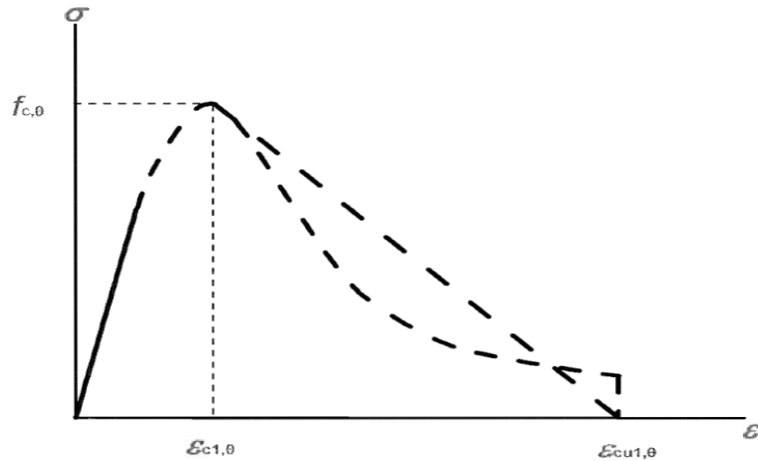
Bu bölümde verilen dayanım ve deformasyon özelliklerine ilişkin sayısal değerler hem kararlı durum hem de geçici durum testlerine ve bazen her ikisinin bir kombinasyonuna dayanmaktadır. EN sünme etkisini dikkate almadığından, sunulacak malzeme özellikleri 2 ile 50 K/dk arasındaki ısıtma hızlarındaki yangınlar için uygulanabilmektedir. Yukarıdaki aralığın dışındaki ısıtma oranları için, mukavemet ve deformasyon özelliklerinin güvenilirliği açıkça gösterilmelidir.

3.3.1.1 Beton

Basınç etkisi altındaki beton



Şekil 3.3 : Betonda sıcaklık ve gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (Krishna ve diğ., 2019)



Şekil 3.4 : Basınç ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi (EN 1992-1-2, 2004)

Tek eksenli gerilme altındaki betonun hem basınç dayanımı hem de rijitliği, sıcaklık arttığında azalır (bkz. Şekil 3.3). EN'de basınç etkisi altındaki betonun yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve deformasyon özellikleri ise Şekil 3.4'teki gerilme-şekil

değiştirme grafiğinde sunulmuştur. Bu grafikteki değerlerin hesabı ise Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Basınç ve yüksek sıcaklık etkisi altındaki betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkisi için matematiksel model

Aralık	Gerilme $\sigma (\theta)$
$\varepsilon \leq \varepsilon_{c1,0}$	$\frac{3\varepsilon f_{c,\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left(2 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c1,0}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1(\theta)} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	Bu bölgedeki matematiksel değerler azalan bir eğilimde olmalıdır. Lineer veya lineer olmayan modellere izin verilmektedir.

Gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, Şekil 3.4’te de gösterilen aşağıdaki üç değişkenle karakterize edilir:

- $f_{c,\theta}$, betonun θ sıcaklığındaki basınç dayanımının karakteristik değeri,
- $\varepsilon_{c1,\theta}$, $f_{c,\theta}$ değerine bağlı şekil değiştirme değeri,
- $\varepsilon_{cu1,\theta}$ değeri ise kopma şekil değiştirmesi değeridir.

EN yukardaki üç değeri hem silisli agregalı hem de kalkerli agregalı (en az %80 kalkerli agregalı) normal ağırlıklı betonlar için ayrı ayrı sunmuştur (bkz. Çizelge 3.2).

Çizelge 3.2 : Silisli ve kalkerli agregalı normal ağırlıklı betonun yüksek sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin ana parametreleri için değerler

Betonun Sıcaklığı, θ [°C]	Silisli agregalar			Kalkerli agregalar		
	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$	$f_{c,\theta} / f_{ck}$	$\varepsilon_{c1,\theta}$	$\varepsilon_{cu1,\theta}$
1	2	3	4	5	6	7
20	1	0,0025	0,02	1	0,0025	0,02
100	1	0,004	0,0225	1	0,004	0,0225
200	0,95	0,0055	0,025	0,95	0,0055	0,025
300	0,85	0,007	0,0275	0,85	0,007	0,0275
400	0,75	0,01	0,03	0,75	0,01	0,03
500	0,6	0,015	0,0325	0,6	0,015	0,0325
600	0,45	0,025	0,035	0,45	0,025	0,035
700	0,3	0,025	0,0375	0,3	0,025	0,0375
800	0,15	0,025	0,04	0,15	0,025	0,04
900	0,08	0,025	0,0425	0,08	0,025	0,0425
1000	0,04	0,025	0,045	0,04	0,025	0,045

Bu değerler belirli sıcaklıklar için verilmiş olup EN bu değerler arasında lineer iterasyon yapılabilmesine izin vermiştir.

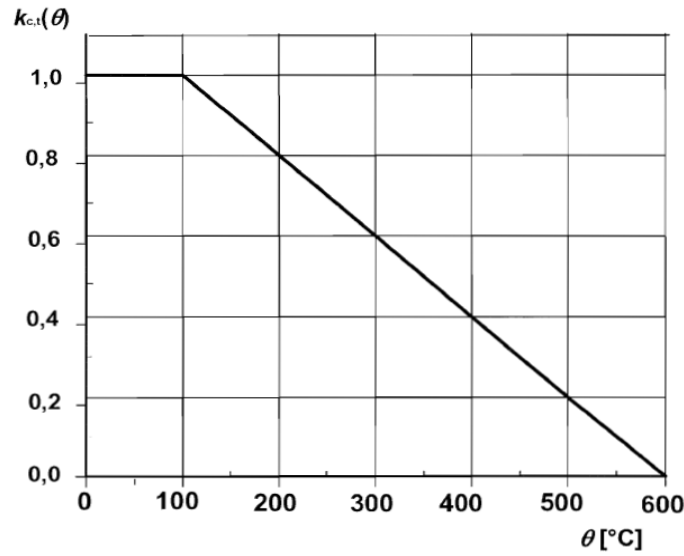
Çekme dayanımı

EN birçok yönetmelikte de olduğu gibi güvenli tarafta kalmak adına betonun çekme dayanımının göz ardı edilmesi gerektiğini söyler. Bununla birlikte, çekme mukavemeti gerekli görünüyorsa, aşağıdaki model kullanılabilir. Bu modelde sıcaklığın etkisi $k_{c,t}(\theta)$ katsayısı ile dikkate alınmaktadır (bkz. Şekil 3.5).

$$f_{ck,t}(\theta) = k_{c,t}(\theta)f_{ck,t} \quad (3.8)$$

$$20\text{ °C} \leq \theta \leq 100\text{ °C} \quad k_{c,t}(\theta) = 1,0$$

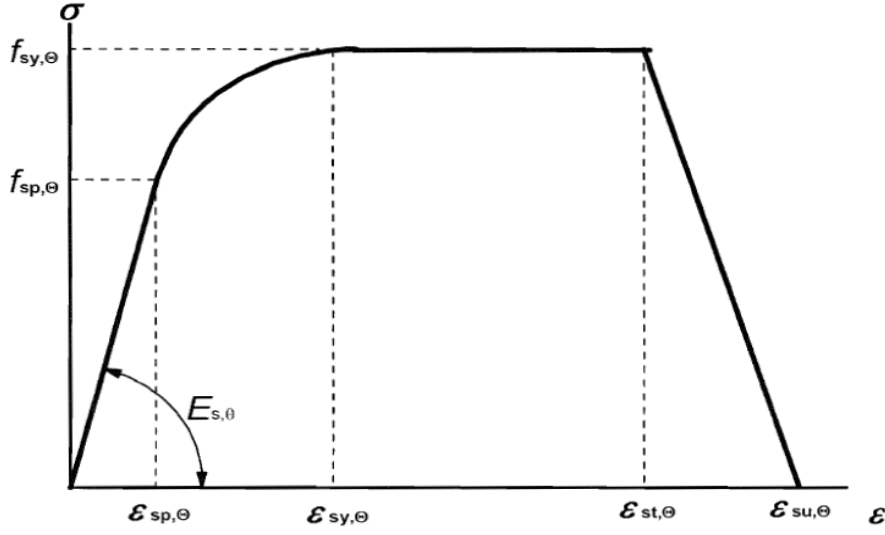
$$100\text{ °C} \leq \theta \leq 600\text{ °C} \quad k_{c,t}(\theta) = 1,0 - 1,0(\theta - 100)/500$$



Şekil 3.5 : Yüksek sıcaklıklarda betonun çekme dayanımı azaltma katsayısı

3.3.1.2 Donatı çeliği

Eurocode (EN 1992-1-2, 2004) yalnızca çeliğin mukavemeti, deformasyon özellikleri ve termal uzaması ile ilgili özellikleri verir. Termal özellikler genellikle gerekli değildir. Çünkü çoğu beton yapıdaki donatı çeliği miktarı o kadar düşüktür ki toplam sıcaklık dağılımını neredeyse hiç etkilemez. Ancak EN'nin çelik yapılarla alakalı 3. bölümünde özgül ısı ve termal iletkenlik gibi diğer termal özellikler bulunabilmektedir.



Şekil 3.6 : Yüksek sıcaklıklarda yapı çeliği için gerilme-şekil değiştirme modeli

Tıpkı beton gibi çeliğin de sıcaklığı yükseldikçe dayanım ve rijitliğinde önemli azalmalar olmaktadır (bkz. Çizelge 3.4). Yapı çeliğinin herhangi bir sıcaklık noktasındaki gerilme-şekil değiştirme grafiğini elde edebilmek adına EN aşağıda verilen denklemlerin kullanılmasını söylemektedir. Şekil 3.6 ve Çizelge 3.3'te verilen gerilme-şekil değiştirme ilişkileri üç parametre ile tanımlanır:

- Doğrusal elastik bölgenin eğimi $E_{s,\theta}$
- Orantılılık limiti $f_{sp,\theta}$
- Azami gerilme seviyesi $f_{sy,\theta}$

Çizelge 3.3 : Yüksek sıcaklıklardaki donatı için matematiksel model

Aralık	Gerilme $\sigma(\theta)$	Tanjant modülü
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,0}[1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta})/(\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parametre	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta} \quad \varepsilon_{sy,\theta} = 0,02 \quad \varepsilon_{st,\theta} = 0,15 \quad \varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ <i>A sınıfı donatı:</i> $\varepsilon_{st,\theta} = 0,05 \quad \varepsilon_{su,\theta} = 0,10$	
Fonksiyonlar	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c/E_{s,\theta})$ $b^2 = c(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta})E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

Gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinin formülasyonu, aynı zamanda basınç altındaki donatı çeliği için de uygulanabilir. Yüksek sıcaklıklarda, sıcak ve soğuk haddelenmiş donatı için Çizelge 3.3'teki parametre değerleri Çizelge 3.4'te verilmiştir. Sıcaklığın ara değerleri için lineer iterasyon kullanılabilir.

Çizelge 3.4 : Yüksek sıcaklıklarda sıcak haddelenmiş ve soğuk şekillendirilmiş donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme ilişkisinin parametreleri için Sınıf N değerleri

Yapı Çeliğinin Sıcaklığı, θ [°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$		$f_{sp,\theta} / f_{yk}$		$E_{s,\theta} / E_s$	
	Sıcak Haddelenmiş	Soğuk Şekillendirilmiş	Sıcak Haddelenmiş	Soğuk Şekillendirilmiş	Sıcak Haddelenmiş	Soğuk Şekillendirilmiş
1	2	3	4	5	6	7
20	1	1	1	1	1	1
100	1	1	1	0,96	1	1
200	1	1	0,81	0,92	0,9	0,87
300	1	1	0,61	0,81	0,8	0,72
400	1	0,94	0,42	0,63	0,7	0,56
500	0,78	0,67	0,36	0,44	0,6	0,4
600	0,47	0,4	0,18	0,26	0,31	0,24
700	0,23	0,12	0,07	0,08	0,13	0,08
800	0,11	0,11	0,05	0,06	0,09	0,06
900	0,06	0,08	0,04	0,05	0,07	0,05
1000	0,04	0,05	0,02	0,03	0,04	0,03
1100	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02
1200	0	0	0	0	0	0

3.3.2 Termal ve fiziksel özellikler

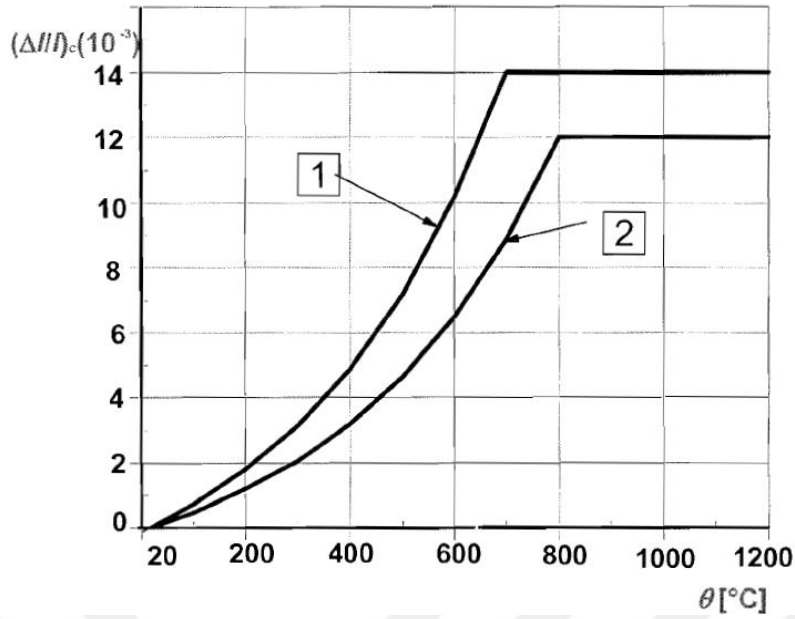
Sıcaklık değişimi malzemelerin dayanımında değişimlere sebep olduğu gibi malzemelerin yapısında değişime sebep olmasıyla termal özelliklerinde de değişime sebep olmaktadır. EN bu bölümdeki termal ve fiziksel (termofiziksel) özellikleri gelişmiş hesap metodu ve basitleştirilmiş hesap metodunda kullanmak üzere vermiştir. Malzemenin hangi sıcaklıkta hangi çekme veya basınç dayanımı, özkütle gibi özelliklere sahip olduğu buradaki bilgiler ışığında öğrenilebilir. Ayrıca herhangi bir yapı elamanının zamana bağlı sıcaklık yayılma profilinin tespiti için Bölüm 3.6’te anlatılacak olan ANSYS – Transient Thermal ile termal analiz hesap adımlarında, bu bölümdeki termofiziksel özellikler baz alınacaktır.

3.3.2.1 Betonun termal uzaması

θ betonun sıcaklığı olacak şekilde betonun termal şekil değiştirmesi $\varepsilon_c(\theta)$, 20°C'deki uzunluğa göre Çizelge 3.5'teki denklemlerle belirlenebilir. EN ayrıca bu değerleri 1 numaralı eğride silisli ve 2 numaralı eğride kalkerli agregalar için grafik (Şekil 3.5) olarak sunmaktadır.

Çizelge 3.5 : Betonun termal uzaması ile alakalı denklemler

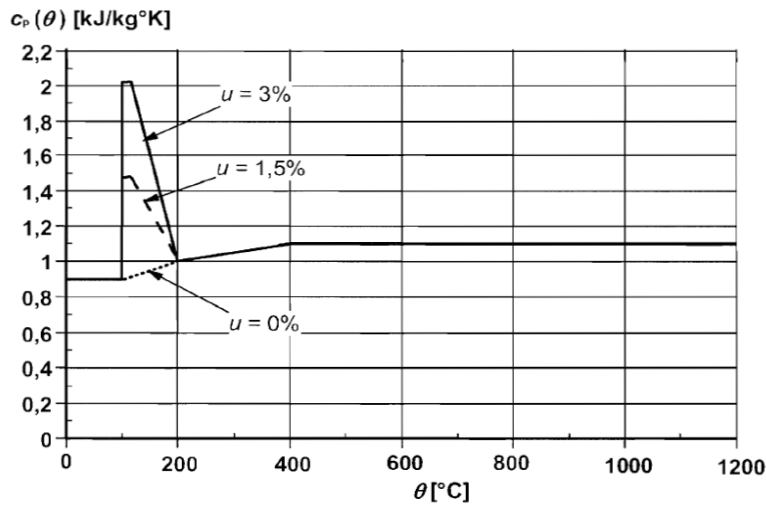
Agrega Tipi	Sıcaklık Aralığı	Önerilen Denklem
Silisli	$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 700^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_c(\theta) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6}\theta + 10^{-11}\theta^3$
	$700^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3}$
Kalkerli	$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 805^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_c(\theta) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6}\theta + 10^{-11}\theta^3$
	$805^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$	$\varepsilon_c(\theta) = 12 \times 10^{-3}$



Şekil 3.7 : Betonun toplam termal uzaması

3.3.2.2 Betonun özgül ısısı

Özgül ısı malzemenin 1 gramının 1 °C arttırabilmek için gereken enerji miktarıdır. Bu durumda tezde incelenen durumda hâkim yapı malzemesi olan betonun özgül ısısı gelişmiş hesap yöntemi için önemli bir girdidir. Silisli ve kalkerli betonun özgül ısısı $c_p(\theta)$, beton sıcaklığının bir fonksiyonu olarak, üç nem içeriği değeri (%0, %1,5 ve %3) için Şekil 3.8'de verilmiştir. 100 °C ile 200 °C arasındaki azami değer, betonun içindeki suyu buharlaştırmak için gereken ısıya karşılık gelir. Vassart ve diğ.'e (2014) göre bu zirve gözenek boyutu ve boşluk basıncının bir sonucu olarak suyun kaynama noktasının değişken olması nedeniyle belirli bir genişliğe sahiptir.



Şekil 3.8 : Sıcaklığa bağlı olarak betonun özgül ısısı $c_p(\theta)$, silisli beton için ağırlıkça %0, 1,5 ve 3 olmak üzere 3 farklı nem içeriğinde

Ayrıca yukardaki grafikteki %0 nem içeriğini oluşturan çizginin denklemleri de aşağıda verilmiştir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad c_p(\theta) = 900 \text{ (J/kg K)} \quad (3.9a)$$

$$100^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)} \quad (3.9b)$$

$$200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ (J/kg K)} \quad (3.9c)$$

$$400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad c_p(\theta) = 1100 \text{ (J/kg K)} \quad (3.9d)$$

Hesaplama yönteminde nem içeriği dikkate alındığı durumlarda, silisli veya kalkerli agregalı betonun özgül ısısı için verilen fonksiyon, 100°C ile 115°C arasında aşağıda verilen sabit değerle ($C_{p,azami}$) ve 115°C ile arasında 200°C doğrusal azalma ile modellenebilir. Diğer nem oranları için lineer iterasyona EN tarafından izin verilir.

$$u = \%1,5' \text{ luk nem değeri için } C_{p,azami} = 1470 \text{ J/kg K} \quad (3.10)$$

$$u = \%3,0' \text{ lük nem değeri için } C_{p,azami} = 2020 \text{ J/kg K}$$

Hacimsel özgül ısı $c_v(\theta)$ da EN'de tanımlanmıştır. Betonun yoğunluğunun $\rho(\theta)$ ve özgül ısısının $c_p(\theta)$ ürünüdür. Yoğunluğun sıcaklıkla değişimi su kaybından etkilenir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

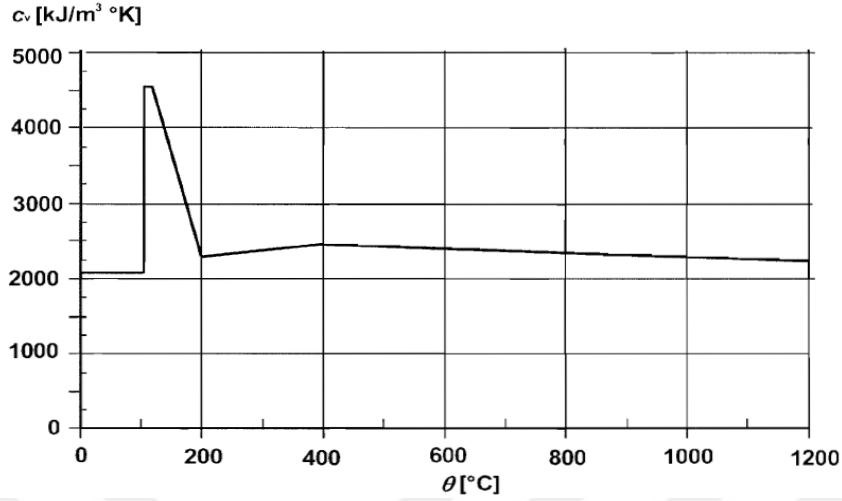
$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \quad (3.11a)$$

$$115^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) (1 - 0,02(\theta - 115)/85) \quad (3.11b)$$

$$200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) (0,98 - 0,03(\theta - 200)/200) \quad (3.11c)$$

$$400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \text{için} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) (0,95 - 0,07(\theta - 400)/800) \quad (3.11d)$$

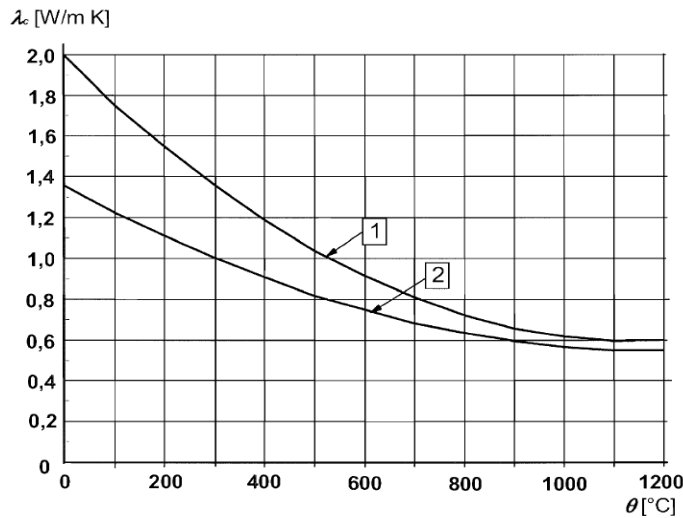
%3 nem içeriğine ve 2300 kg/m^3 yoğunluğa sahip bir beton için hacimsel özgül ısı örneği Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9 : %3 nem içeriğine ve 2300 kg/m^3 yoğunluğa sahip silisli agregalı bir beton için hacimsel özgül ısı $c_{v(\theta)}$

3.3.2.3 Betonun termal iletkenliği

EN betonun termal iletkenliği (λ_c) için yalnızca bir alt (2) ve bir üst (1) sınır belirler (bkz. Şekil 3.10). EN'de termal iletkenliğin alt sınırının, farklı beton türleri üzerinde yapılan yangın testlerinde ölçülen sıcaklıkların karşılaştırılması yoluyla elde edildiği okunabilir. Bu sınır, kompozit çelik/beton yapılar üzerinde yapılan testlerden elde edilen üst sınırdan daha gerçekçi sıcaklıklar verir.



Şekil 3.10 : Betonun termal iletkenlik katsayısı

Yukardaki grafikte de gösterilen limitler için θ normal ağırlıklı betonun sıcaklığı olmak üzere, üst limit;

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0107 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \frac{W}{m} K \quad (3.12)$$

alt limit;

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \left(\frac{\theta}{100} \right) + 0,0057 \left(\frac{\theta}{100} \right)^2 \frac{W}{m} K \quad (3.13)$$

olarak tanımlanmıştır.

Son iki materyal özelliğini incelersek sıcaklıktaki bir artış termal iletkenliği azaltacak ve özgül ısıyı arttıracaktır. Sonuç olarak artan sıcaklıkla termal yayılma azmaktadır.

3.3.2.4 Donatı çeliğinin termal uzaması

EN donatı çeliğinin termal uzaması $\varepsilon_s(\theta)$ 'yı 20°C'teki normal uzunluğuna referans olarak;

$$\begin{array}{ll} 20^\circ C \leq \theta \leq 750^\circ C & \text{için} \quad \varepsilon_s(\theta) = -2,416 \times 10^{-4} + 1,2 \times 10^{-5} \theta + 10^{-8} \theta^2 \end{array} \quad (3.14a)$$

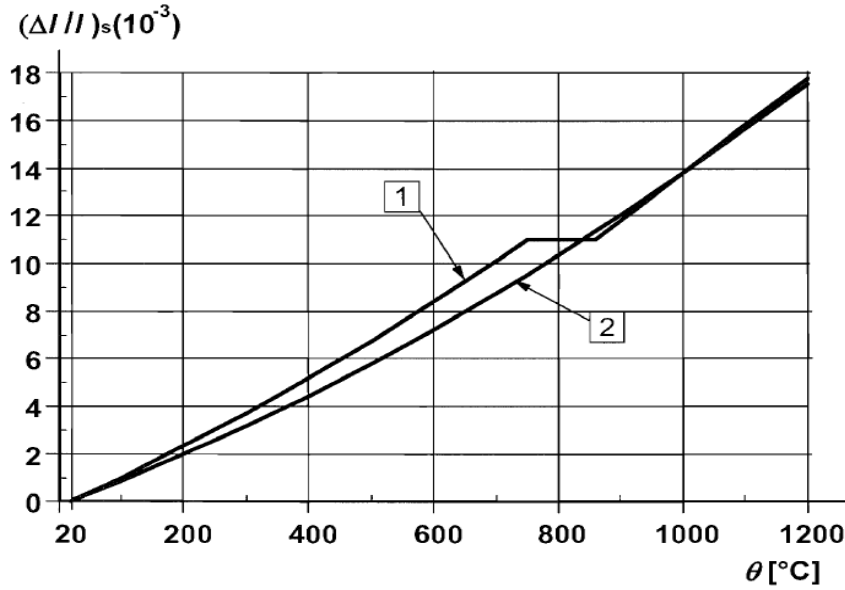
$$\begin{array}{ll} 750^\circ C \leq \theta \leq 860^\circ C & \text{için} \quad \varepsilon_s(\theta) = 11 \times 10^{-3} \end{array} \quad (3.14b)$$

$$\begin{array}{ll} 860^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C & \text{için} \quad \varepsilon_s(\theta) = -6,2 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-5} \theta \end{array} \quad (3.14c)$$

öngermeli çeliğinkini de 20°C'den 1200 °C'ye tüm sıcaklık değerleri için;

$$\varepsilon_p(\theta) = -2,016 \times 10^{-4} + 10^{-5} \theta + 0,4 \times 10^{-8} \theta^2 \quad (3.15)$$

denklemleriyle tanımlar. Bu denklemlerin, 1 donatı çeliği ve 2 öngermeli çelik olmak üzere, grafik üzerindeki gösterimi şekil 3.11'da görülmektedir.



Şekil 3.11 : Çeliğin toplam termal uzaması

3.4 Basitleştirilmiş Hesap Metodu

EN 2-1-2'de (2004) yer alan basitleştirilmiş hesaplama yöntemleri, yangına maruz kalan yapı elemanlarının yük taşıma kapasitesinin yeniden hesaplanmasını amaçlar. Buradaki temel motivasyon beton kesitinin doğrudan yangına maruz kalan dış beton alanlarının aşındığını (dökülme) ve artık yüke katkıda bulunmadığını dikkate almak, ayrıca malzeme dayanımlarının sıcaklığa bağlı olarak azalmasını göz ardı etmemektir. Yöntemler çoğunlukla sadece elemanlara hizmet eder, ancak bazı durumlarda yapıların bazı kısımları da kapsanabilir. Yüklemenin ağırlıklı olarak düzgün yayılı olduğu ve normal sıcaklıktaki tasarımın doğrusal analize dayandığı kiriş ve döşemelerin, aksenal yük ve moment etkisi altındaki kolonların yangın tasarımı için bu yöntem kullanılabilir.

Basitleştirilmiş hesap metodu normal sıcaklık tasarımı ile aynı prosedürü kullanır ancak yüksek sıcaklıklar nedeniyle hem beton hem de çelikteki mukavemet kaybını dikkate alır. Beton ve donatı çeliğinin mukavemetleri herhangi bir zamandaki sıcaklığa bağlı olarak $k_c(\theta)$ veya $k_s(\theta)$ katsayıları ile azaltılır. Yangın koşulları altında bir kesitin nihai yük taşıma kapasitesi belirlenir ve bu kapasite ilgili yük kombinasyonu ile karşılaştırılır. Tasarım hem nominal hem de parametrik yangınlara dayanabilir, ancak çoğunlukla standart yangın eğrisi kullanılır.

EN 2-1-2'de (2004) basitleştirilmiş hesap yöntemine yönelik birçok ek mevcuttur. Birim sıcaklık-zaman eğrisine göre yangına maruz kalan duvarların ve döşemelerin,

kirişlerin ve ortak kesit şekillerine sahip kolonların kesit sıcaklıklarını belirlemek için, bilgilendirici Ek A'da derlenen sıcaklık profillerine sahip diyagramlar kullanılabilir. Bilgilendirici Ek B, eğilme momentlerine ve eksenel kuvvetlere karşı direncin hesaplanması için B.1 "500°C izoterm yöntemi" ve B.2 "Bölge yöntemi" olmak üzere iki alternatif yöntem sunmaktadır. İkinci dereceden etkiler her iki modele de dahil edilebilir. Her iki yöntem de standart bir yangına maruz kalan yapılara uygulanabilir. 500 °C'nin altında sıcaklığa sahip betona tam dayanım atayan ve 500 °C'nin üzerinde sıcaklığa sahip betona hiç dayanım atamayan 500 °C izoterm yöntemi hem standart hem de parametrik yangınlarla birlikte kullanılabilir. Dikkat edilmesi gereken bir husus, izoterm sıcaklığının seçiminin kullanılan beton türüne bağlı olarak 500°C'den farklı olabileceğidir. Bazı betonlar için izoterm sıcaklığı 500°C'nin çok altında, hatta 400°C'nin altında olabilir (Anderberg, 2004).

Yöntem B.2'nin küçük kesitler ve ince kolonlarla kullanılması tavsiye edilir ancak sadece standart yangınlar için geçerlidir. Bilgilendirici Ek C, önemli ikinci derece etkilere sahip kolon kesitlerinin analizi için bir bölge yöntemi sağlar. Bilgilendirici Ek D kesme, burulma ve ankraj için basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi sağlar. Bilgilendirici Ek E, kirişlerin ve döşemelerin tasarımı için basitleştirilmiş bir hesaplama yöntemi sunmaktadır.

3.4.1 Bölge yöntemi

Bölge yöntemi beton kesitini maruz kalan yüzeye paralel eşit kalınlıkta bir dizi bölgeye ayırır. Daha sonra her bölge ortalama bir sıcaklık ve buna karşılık gelen bir mukavemet ve rijitlik azaltma faktörü alır. Bu yöntem küçük kesitlerin ve ince kolonların tasarımı için tavsiye edilir, ancak yalnızca standart yangın maruziyeti için geçerlidir. Ayrıca eksenel yük, eğilme momenti ve bunların kombinasyonları (örneğin eksantrik yük) açısından betonarme ve öngerilmeli beton kesitlere uygulanabilir. İkinci dereceden etkiler de dahil edilebilir.

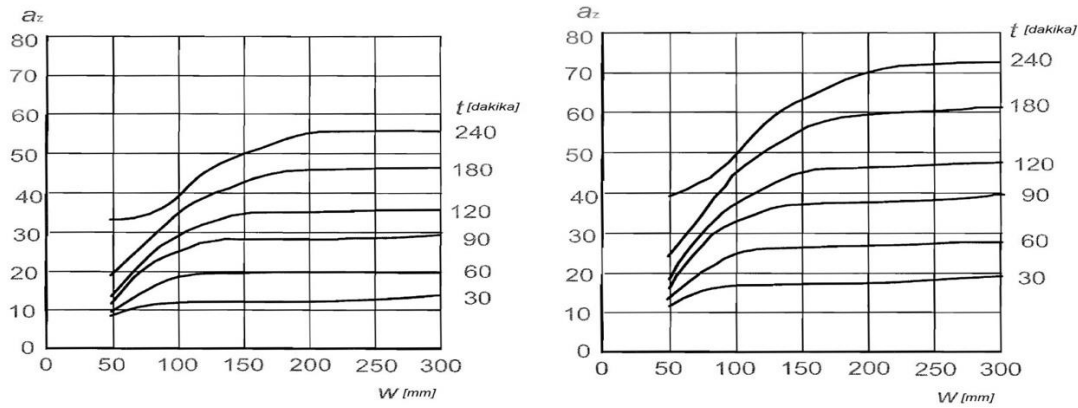
Ek B.2'ye göre basitleştirilmiş hesaplama yöntemi, özellikle mevcut donatı merkez mesafesinin veya kesit boyutunun tasarım tablosundaki ilgili minimum değerden daha küçük olduğu ve aynı zamanda yük taşıma kapasitesinin normal sıcaklıkta tam olarak kullanılmadığı yapı bileşenleri için uygundur. Bunun için ayrıntılı olarak aşağıdaki tasarım adımları gerçekleştirilmelidir:

- EN 2-1-2 Ek B.2'de verilen denklemler veya diyagramlar kullanılarak beton kesitinin a_z boyutunun (bkz. Şekil 3.13) sıcaklığa bağlı azalmasının hesaplanması. Tasarım diyagramlarının kullanılması tavsiye edilir.
- EN 2-1-2 Ek B.2'de verilen denklemleri veya Şekil B.5a'daki diyagramı kullanarak azaltılmış beton kesitinin basınç dayanımının sıcaklığa bağlı azalması için $k_c(\theta_M)$ katsayısını belirleyin. Kuvarslı beton için verilen değer diğer agregaların çoğu için koruyucu niteliktedir.
- EN 2-1-2 Ek A'daki diyagramlar ve EN 2-1-2'den Şekil 4.2a ile takviye çeliği $k_s(\theta)$ veya öngerme çeliği $k_p(\theta)$ için karşılık gelen katsayılar kullanılarak her bir takviye çubuğundaki sıcaklıkların belirlenmesi.
- Yapı elemanının yük taşıma kapasitesi $R_{fi,d,t}$ 'nin, EN 1991-1-2 uyarınca belirleyici yük eylemleri $E_{fi,d,t}$ için EN 1992-1-1 uyarınca normal sıcaklık için doğrulamaya benzer şekilde artık kesit ile doğrulanmasının.

Yöntemin uygulanması, bir örnek kullanılarak bölüm 4.3.2'de ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

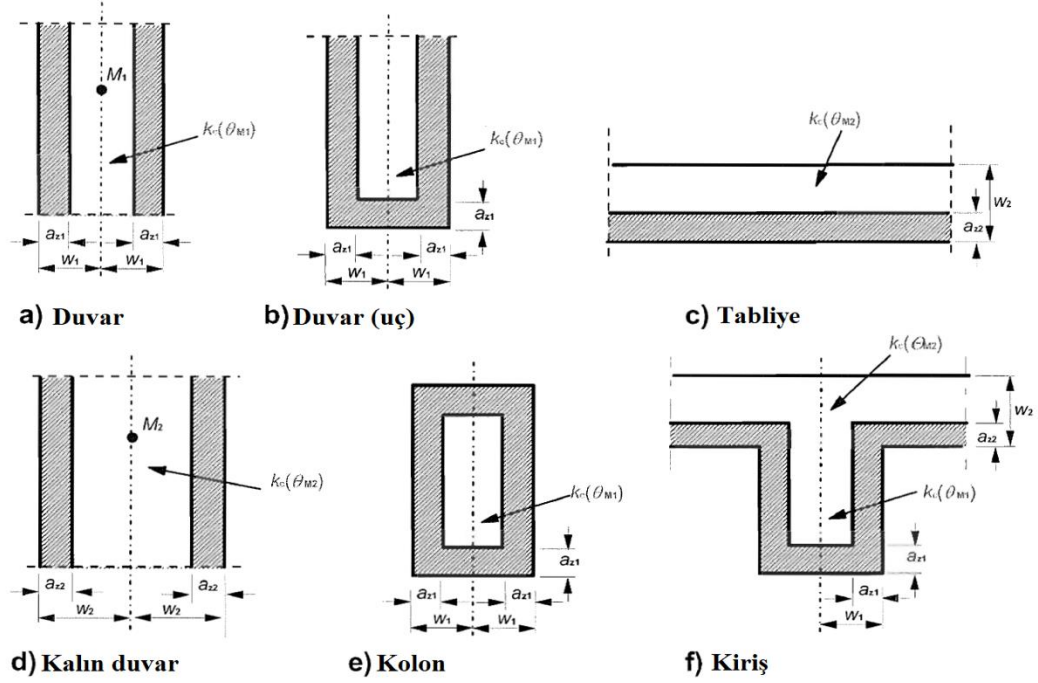
3.4.1.1 Kesit küçültme

EN 2-1-2, Ek B.2'de yapı elemanının yangın etkisi altındaki efektif alanını belirlemek adına a_z değeri için denklemler (3.16 ve 3.17) ve grafik (bkz. Şekil 3.13) verilmiştir. Denklem 3.16 ve Şekil 3.12 (bkz. soldaki), kirişler ve döşemeler gibi eğilme halindeki yapı elemanları için geçerlidir. Denklem 3.17 ve Şekil 3.12 (bkz. sağdaki) ise 2. mertebe teorisinden kaynaklanan etkilerin dikkate alınması gereken basınç halindeki yapı elemanları için geçerlidir.



Şekil 3.12 : Silika agregalı betonlar için kesit küçültme katsayısı (Soldaki, kiriş veya tabliye için; sağdaki, kolon veya duvar için)

Eğilme ve basınç etkisi altındaki bileşenler arasındaki hesap ayrımı, a_z değerinin mekanik bir anlamı olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Aşağıda da görüldüğü gibi yangın etkisi altında olan yüzeylerde a_z değerini belirleyerek işlevsiz basınç bloğunun alanını da belirlenmektedir (bkz. Şekil 3.13).



Şekil 3.13 : EN Şekil B.3 - Yangına maruz kalan bölümler için mukavemet ve kesit azalması

a_z değerinin hesabında EN 2-1-2 eğilme elemanları için kullanılacak denklem:

$$a_z = w \left[1 - \frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_m)} \right] \quad (3.16)$$

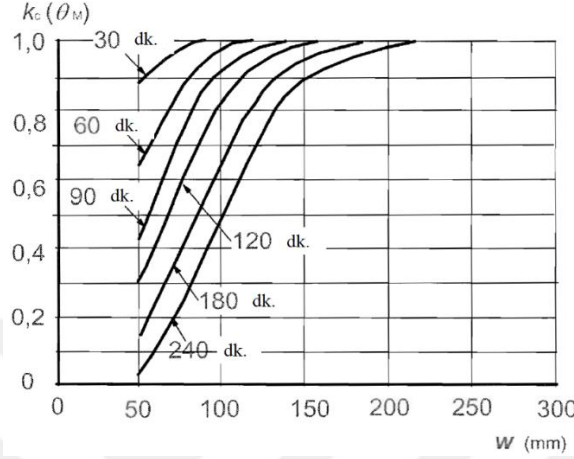
ikincil derece etkilerin de hesaba dahil edilebileceği basınç elemanlarında kullanılacak denklem:

$$a_z = w \left[1 - \left(\frac{k_{c,m}}{k_c(\theta_m)} \right)^{1,3} \right] \quad (3.17)$$

olarak verilmiştir. Burada n değeri w genişliğindeki paralel bölgelerin sayısı, w toplam genişliğin yarısı ve m bölge numarasıdır. $k_{c,m}$ teriminin hesabı için ise aşağıdaki

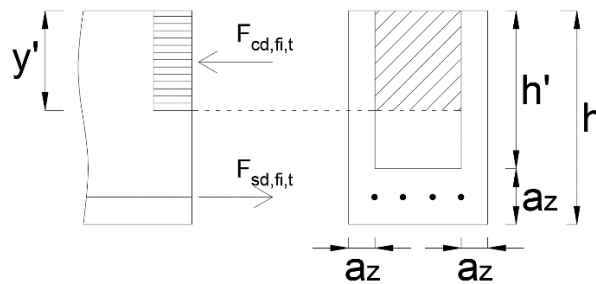
$$k_{c,m} = \frac{\left(1 - \frac{0,2}{n}\right)}{n} \sum_{i=1}^n k_c(\theta_i) \quad (3.18)$$

denklemleri kullanılmaktadır. $k_c(\theta_M)$ değeri w (mm) ile tespiti adına ise Şekil 3.14 sunulmuştur. w değeri tabliye için yükseklik, tek tarafı yangına maruz kalan kolon için genişlik, kiriş gövdesinin yarısı, 2 taraftan yangına maruz kalan duvar veya kolonun genişliğinin yarısı ve dört tarafı yangına maruz kalmış kolonun en kısa ayrıt uzunluğudur (bkz. Şekil 3.13)



Şekil 3.14 : Silisli agregalı beton kullanılarak küçültülmüş bir kesit için basınç dayanımının azaltılması.

Hosser ve Zehfuß (2017) üç tarafı yangına maruz kalan bir kesit için ortaya çıkan beton basınç kuvveti $F_{c,fi,d,t}$, 'yi, yangın durumunda beton için kısmi güvenlik faktörü $\gamma_{c,fi} = 1.0$ ve betonun karakteristik basınç dayanımının sıcaklığa bağlı olarak azalması için $k_c(\theta(z))$ katsayısı ile kesitin basınç bölgesi üzerinde entegrasyon yoluyla denklem 3.19'a göre hesaplanabildiğini söyler.



Şekil 3.15 : Yangında plastisite teorisine göre yük kapasitesi hesabı

Kural olarak, beton basınç bölgesi alanındaki izotermi kesitin yan yüzeylerine paraleldir, böylece ortaya çıkan beton basınç kuvveti $F_{c,fi,d,t}$, denklem 3.19 ile yaklaşık olarak hesaplanabilir.

$$F_{c,fi,d,t} = y' b' k_c \left(\theta_M \frac{f_{ck,20^\circ C}}{\gamma_{c,fi}} \right) \quad (3.19)$$

Burada basınç bloğunun genişliği olan b' değeri $(b - 2a_z)$ eşitliği ile hesaplanabilir.

3.4.2 Ek E'ye göre kiriş ve tabliyeler için basitleştirilmiş hesap yöntemi

Bu basitleştirilmiş hesaplama yöntemi, tablo verileri ile üç tarafı açık kirişler ve döşemeler için yapılan hesaplama yöntemin bir uzantısıdır. Alt donatıya olan eksen mesafesinin (a) tablolarda istenenden daha az olduğu durumlar için eğilme direnci üzerindeki etkiyi belirler. Bu yöntemle eğilme yükü kapasitesi, açıklık donatısının merkez mesafesi a'nın tabloya göre gereken değerden daha küçük olduğu durumlar için de belirlenebilir. Çizelge 3.9 ila Çizelge 3.15'te verilen minimum kesit boyutları (b_{min} , b_w , h_s) aşılmamalıdır.

Bu basitleştirilmiş yöntem sadece yüklemenin ağırlıklı olarak düzgün yayılı olduğu ve ortam sıcaklığındaki tasarımın EN 1992-1-1 Bölüm 5'te açıklandığı gibi doğrusal analize veya sınırlı yeniden dağılımlı doğrusal analize dayandığı durumlarda uygulanır. Bu yöntem, gerekli yangına maruz kalma koşulları için mesnetlerde yeterli dönme kapasitesi sağlanmışsa, moment yeniden dağılımının %15'ten yüksek olduğu sürekli kirişler veya döşemeler için uygulanabilir. Yöntem hem basit mesnetlenmiş hem de sürekli kiriş ve tabliyelerde kullanılmak üzere ikiye ayrılmıştır.

3.4.2.1 Basit mesnetlenmiş kiriş ve tabliyeler

$M_{Ed,fi} \leq M_{Rd,fi}$ koşulunun sağlanması ile tasarım için kullanılabilecek yöntemde, yangın durumundaki yayılı yük değeri olan $w_{Ed,fi}$ ve etkili uzunluk olan l_{eff} kullanılarak yapı elamanının üzerine gelen moment:

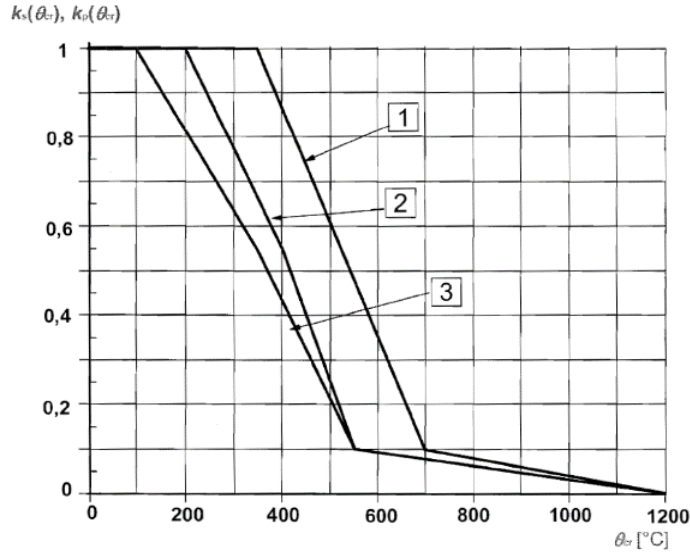
$$M_{Ed,fi} = \frac{w_{Ed,fi} l_{eff}^2}{8} \quad (3.20)$$

denklemini ile hesaplanır. Yapı elamanının dayanım momenti $M_{Rd,fi}$ ise:

$$M_{Rd,fi} = \frac{\gamma_s}{\gamma_{s,fi}} k_s(\theta) M_{Ed} \frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \quad (3.21)$$

denklemini ile belirlenir. Burada hesaplanan bileşen direnci artar çünkü yangın durumunda çelik için kısmi güvenlik faktörü γ 1,15'ten 1,0'a düşürülür. Ayrıca mukavemet azaltma faktörü olan $k_s(\theta)$ değeri Şekil 3.15 üzerinden belirlenir. Ek olarak kesitte kullanılan donatı alanı $A_{s,prov}$ değerinin, dayanım için gereken donatı alanı olan $A_{s,req}$ değerine oranının 1,3 geçmemesi gerekmektedir. Şekil 3.16'ta EN 2-1-2(2004)

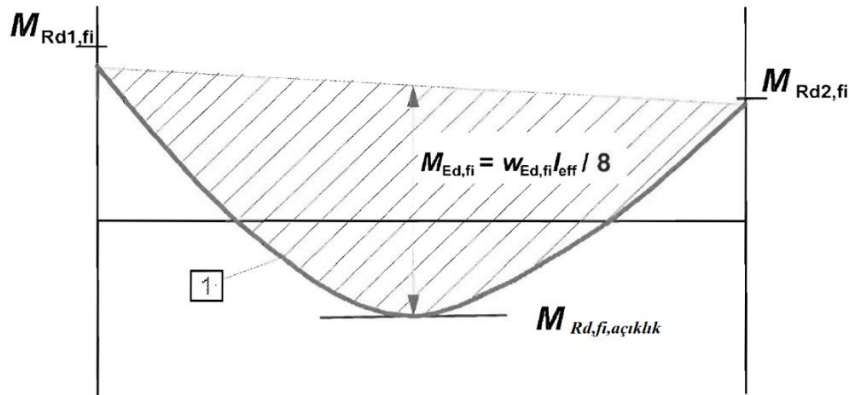
tarafından sunulan 1 numaralı eğride beton çeliği, 2 ve 3 numaralı eğrilerde ise öngermeli çelikler için küçültme faktörü için grafik görülebilir.



Şekil 3.16 : Küçültme faktörü $k_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fi}/f_{yk}(20^\circ\text{C})$ veya $k_p(\theta_{cr}) = \sigma_{p,fi}/f_{pk}(20^\circ\text{C})$ 'ye karşılık gelen donatı ve öngermeli çeliğinin kritik sıcaklığı θ_{cr} için referans eğrileri

3.4.2.2 Sürekli kiriş ve tabliyeler

Eğilme momentlerinin ve kesme kuvvetlerinin statik dengesi, tasarım yangın koşulları altında sürekli kirişlerin ve döşemelerin tüm uzunluğu boyunca sağlanmalıdır. Yangın tasarımı için bu dengeyi sağlamak amacıyla, tasarım yangın yükünü karşılamak için mesnetler üzerinde yeterli donatı alanı sağlandığında, momentin açıklıktan mesnetlere yeniden dağıtılmasına izin verilir. Bu donatı, güvenli bir eğilme momenti alanı sağlamak için açıklığın içine doğru yeterli bir mesafe boyunca uzanmalıdır.



Şekil 3.17 : Denge oluşturmak için serbest eğilme momenti diyagramı $M_{Ed,fi}$ 'nin konumlandırılması (1 - Yangın koşulları altında düzgün yayılı yük için serbest moment diyagramı)

Açıklık konumundaki azami moment değeri $M_{Rd,fi,Span}$ ve yangın durumunda düzgün yayılı yükler tarafından uygulanan maksimum serbest eğilme momenti, $M_{Ed,fi}$ 3.4.2.1 anlatıldığı gibi hesaplanmalıdır. Bu, bir uçta taşınacak momentin o mesnetteki dayanım momentine eşit veya daha az olarak belirlenmesi (denklem 3.22 kullanılarak hesaplanır) ve ardından diğer mesnette gerekli momentin belirlenmesi yoluyla gerçekleştirilebilir. Daha ayrıntılı hesaplamaların olmadığı durumlarda, yangın durumuna yönelik tasarım için mesnetlerdeki dayanım momenti denklem 3.22 kullanılarak hesaplanabilir.

$$M_{Rd,fi} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{s,fi}} \right) M_{Ed} \left(\frac{A_{s,prov}}{A_{s,req}} \right) \frac{(d - a)}{d} \quad (3.22)$$

Bir önceki bölümde tanımlanan terimlere ek olarak, a kirişler için Çizelge 3.9, Sütun 5'te ve döşemeler için Çizelge 3.12, Sütun 3'te verilen gerekli ortalama alt eksen mesafesi ve d kesitin etkin derinliğidir. Aynı şekilde $A_{s,prov}$ değerinin $A_{s,req}$ değerine oranının 1,3 geçmemesi gerekmektedir.

Denklem 3.22 mesnetler üzerindeki üst çeliğin sıcaklığının normal donatılar için 350 °C'yi ve öngerme tendonları için 100 °C'yi aşmadığı durumlarda geçerlidir. Yangının aşağıdan etki etmesi durumunda sıcaklık genellikle 350 °C'den önemli ölçüde düşüktür, böylece çeliğin mukavemetinin azaltılması gerekmez. Ancak daha yüksek bir sıcaklığın olması durumunda Şekil 3.16'daki azaltma katsayısı ile $M_{Rd,fi}$ değeri küçültülmelidir.

Yangın koşulları altında gerekli olan ek donatıların uzunluğu $l_{bd,fi}$ kontrol edilmelidir. Bu değer denklem 3.23 kullanılarak hesaplanabilir. Mevcut donatının uzunluğu, mesnetin dışında denklem 3.21'de hesaplandığı gibi ilgili karşı esneme noktasına artı $l_{bd,fi}$ 'ye eşit bir mesafeye kadar uzanmalıdır.

$$l_{bd,fi} = \left(\frac{\gamma_s}{\gamma_{s,fi}} \right) \left(\frac{\gamma_{c,fi}}{\gamma_c} \right) l_{bd} \quad (3.23)$$

3.5 Gelişmiş hesap metotları

Genel hesaplama yöntemi, yangına maruz kalmış tekil bileşenlerin, kısmi ve tam yük taşıyan yapıların, tam veya yerel sıcaklık yükü altında her tür ve şekilde kesite sahip yük taşıma ve deformasyon davranışının sayısal simülasyonu için kullanılır. Ayrıca hesabın yapılabilmesi adına yapı malzemelerinin termo-mekanik özelliklerinde

sıcaklığa bağlı değişim hakkında bilgi gereklidir. Isıl iletkenlik, mukavemet, ısıl genleşme gibi malzeme özelliklerinin hesaba katılması için bu özellikler EN’de verilmiştir. Bölüm 3.3 malzeme özelliklerinde de önerilen değerler bulunabilmektedir. Tablo ve basitleştirilmiş hesaplama yöntemi ile karşılaştırıldığında, bileşen sıcaklıklarını belirlemek için genellikle bir termal analiz ve ardından yük taşıma ve deformasyon davranışını belirlemek için mekanik bir analiz yapılması gerektiğinden en fazla çabayı gerektirir.

3.5.1 Termal analiz

Termal analiz çerçevesinde, bileşen kesitindeki sıcaklıklar, yangın alanındaki sıcak gaz sıcaklıkları temel alınarak hesaplanır. Bu sıcaklığı simüle etmek adına önceki bölümlerde de anlatılan yangın eğrileri kullanılır. Bileşen kesitinin ve herhangi bir koruyucu tabakanın mevcudiyeti durumunda bu elemanın da sıcaklığa bağlı termal malzeme özellikleri dikkate alınmalıdır. Bu analiz sonucunda yapı elemanlarının herhangi bir zaman diliminde herhangi bir noktadaki ısı değeri hesaplanabilir. Başka bir ifadeyle ısı transferi teorisinin bilinen prensipleri ve varsayımları aracılığıyla elemanların içindeki sıcaklığın gelişimi ve dağılımı belirlenir. Bu tez kapsamında incelenen yapı elemanları betonarme olduğundan ana iki malzemeye odaklanılabilir. Çoğu betonarme yapıdaki çelik miktarı sıcaklık dağılımını neredeyse hiç etkilemeyecek kadar düşük olduğundan, sıcaklık profili belirlenirken donatı genellikle ihmal edilir. İhmal edilebilecek bir diğer unsur da nem ve nem geçişinin etkisidir. Bu tezde termal analiz ile alakalı ANSYS ile termal haritaları çıkarılan kesitlerin olduğu Bölüm 3.6’da daha detaylı bir anlatım mevcuttur.

3.5.2 Mekanik analiz

Mekanik analiz kapsamında, yangına maruz kalan elemanların veya taşıyıcı yapıların yük taşıma ve gerekirse deformasyon davranışları, yapı mekaniği teorisinin kabul edilmiş ilkeleri ve varsayımları uygulanarak belirlenir. Hareket tarafında, yükten, önlenmiş termal deformasyonlardan (kısıtlayıcı kuvvetler/momentler) ve varsa doğrusal olmayan geometrik etkenler dikkate alınmalıdır. Dayanım tarafında, yapı malzemelerinin sıcaklığa bağlı termo-mekanik özellikleri ve ısıl genleşmeler dikkate alınır. Yapı soğuduktan sonraki yük taşıma davranışı, yani soğumuş durumdaki artık yük taşıma kapasitesi genellikle dikkate alınmaz.

3.6 ANSYS ile Termal Analiz

Yangın modellerinde enerji denklemi nümerik yollarla çözülerek yangın süresinde veya sonrasında incelenilecek bölgelerin yaklaşık sıcaklık değerleri elde edilir. Enerji denklemi uygun koşullarda indirgenerek ikinci dereceden lineer parabolik 3 boyutlu kısmi diferansiyel denklem (bkz. Denklem aşağıdaki) elde edilir. Bu denklem sonlu elemanlar yöntemiyle çözülür. ANSYS programı Transient Thermal modülü aracılığıyla indirgenmiş diferansiyel denklem hızlı bir şekilde çözülür.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + q \quad (3.24)$$

Bu denklemde:

T	Sıcaklık [K]
t	Zaman [s]
k	Isı iletkenliği [W/(mK)]
ρ	Yoğunluk [kg/m ³]
c_p	Özgül ısı [J/(kgK)]
x,y,z	İncelenecek noktanın koordinatlarıdır [m]
q	Isı akısı [W]

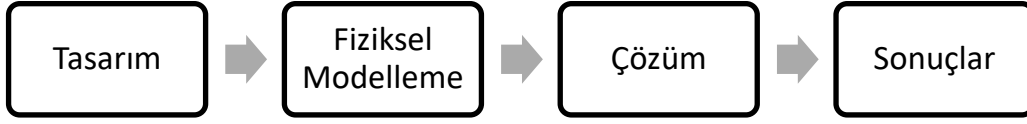
Elde edilen denklem 3 boyutta olup önceki çalışmalara dayanılarak 2 boyuta indirgenir. Ayrıca incelenen sistemde iç ısı tüketimi veya üretimi olmadığı için q elemine edilir. Böylelikle elde edilen 2 boyutlu denklem aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (3.25)$$

Zamana bağlı indirgenmiş 2 boyutlu enerji denklemi nümerik yöntemlerle çözülür.

3.6.1 Tasarım adımları

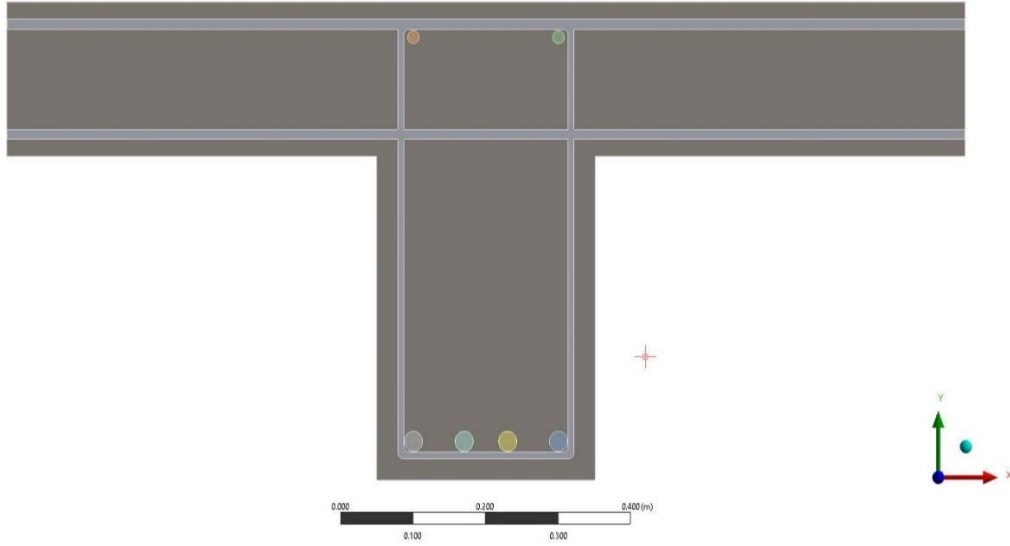
Bir yangın modellemesinin bilgisayar ortamındaki adımları (bkz. Şekil 3.18) uygun tasarımın elde edilmesi ve sonrasında sanal ortamda fiziksel etkilerin modellenmesiyle çözüm ve sonuçlar elde edilebilir. Bu adımlar takip edilerek incelenmek istenen değerler hesaplanır.



Şekil 3.18 : Bir numerik analizin genel adımları

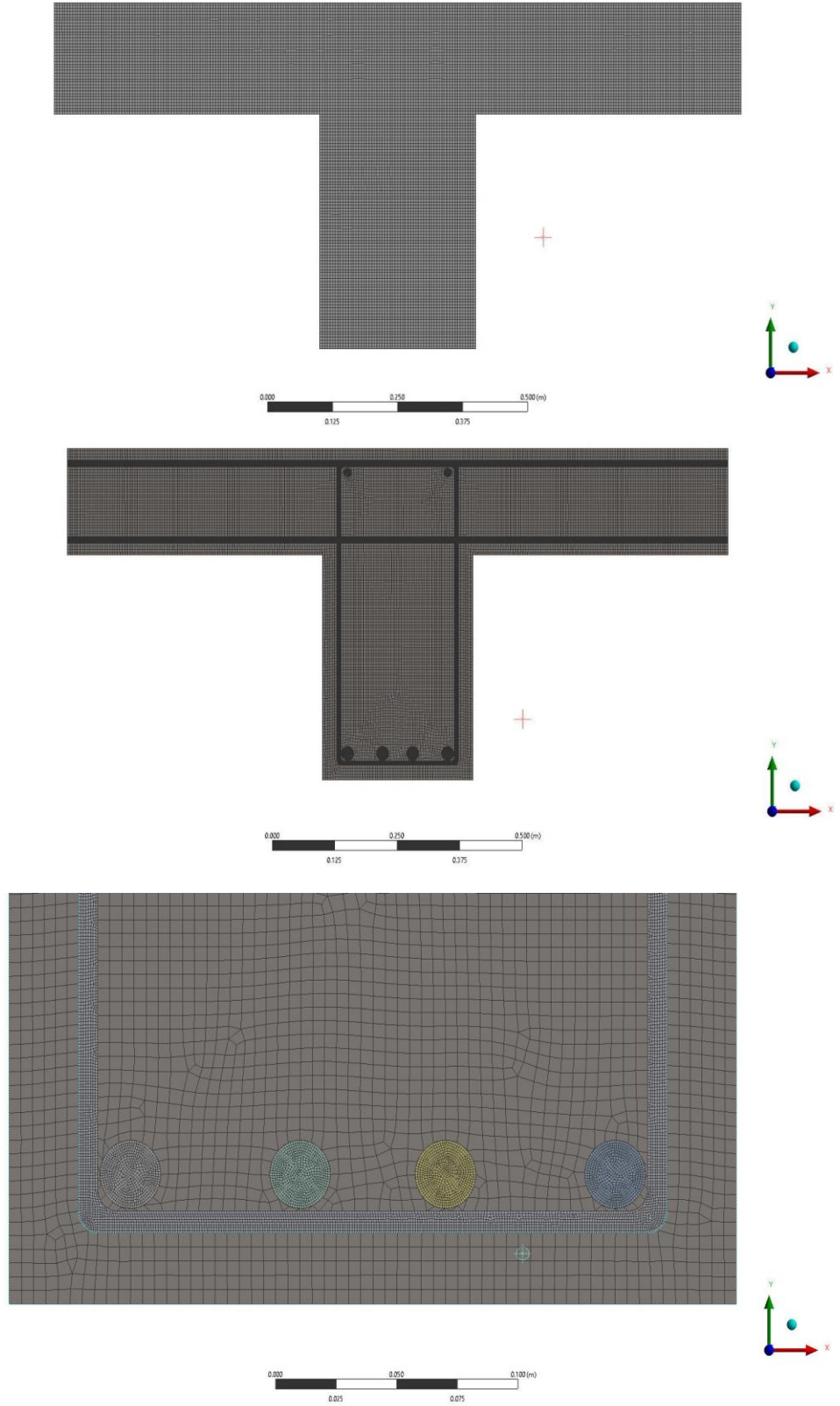
3.6.2 Geometrinin ve *mesh*'lerin belirlenmesi

Daha önceki çalışmalarda 2 boyutlu analizin deneysel çalışmalarla uygulanabilirliği gösterilmiştir. Bu kısımda da incelenecek elemanların geometrileri 2 boyuta indirgenerek ANSYS'te tasarlanmıştır. Aşağıda Şekil 3.19'da ANSYS DesignModeller modülünde tasarlanmış enkesitlerden donatılı olan enkesitin tasarımı gösterilmiştir. Bu tasarımda farklı 2 malzeme olduğu için beton ve çelik arasındaki temas dikkate alınmıştır.



Şekil 3.19 : Tasarımdaki farklı malzemelerin teması

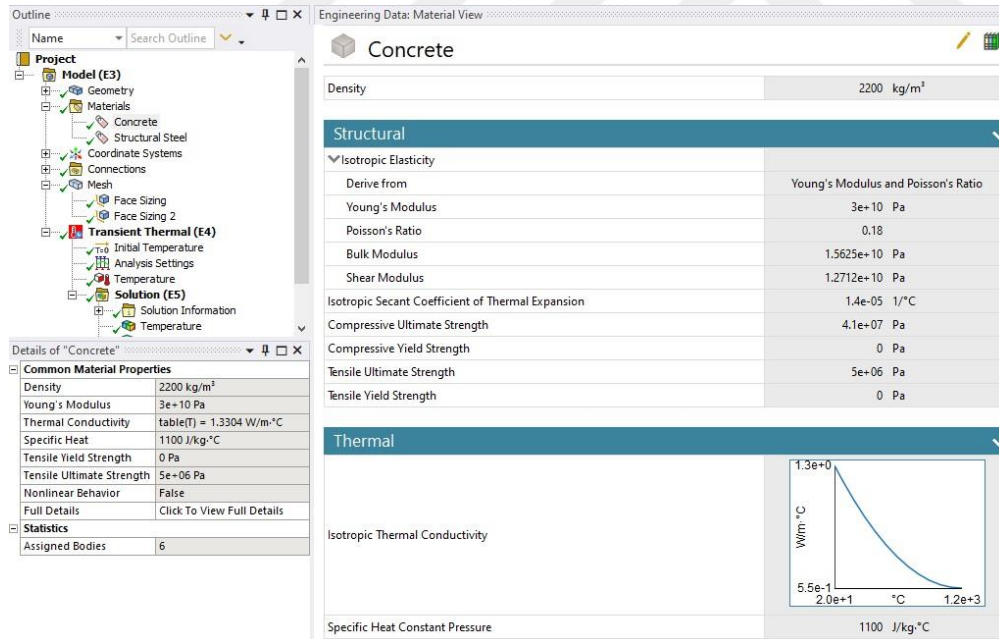
Şekil 3.20'de ise incelenen kiriş enkesitinin 2 farklı tasarım olan donatılı T ve donatısız T kesitin mesh tasarımı gösterilmektedir. Daha fazla detayın olduğu donatılı T enkesitte daha fazla mesh atılarak analizin sonuçlarının gerçek değerlere daha fazla yakınsaması sağlanmıştır (bkz. Bölüm 4.1).



Şekil 3.20 : Donatısız ve donatılı T kesit ile donatı bölgesinin detaylı *mesh* dağılımı

3.6.3 Malzemelerin ve termofiziksel özelliklerinin tayin edilmesi

Malzemeler sistemin termal özelliklerini belirlemede en önemli etkidir. Yangın esnasında ısı iletimi malzemenin özellikleri ile değişkenlik gösterebilir. Malzemelerin ısı iletim katsayısı k [$W/(m \cdot K)$], ısı kapasitesi c_p [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] ve yoğunluğu ρ [$kg \cdot m^{-3}$] termal ısı iletimini etkiler. Bundan dolayı analiz adımına geçilmeden önce malzemelerin termofiziksel özellikleri belirlenir ve programa girilir (bkz. Şekil 3.21). EN 2-1-2 (2004) betonarme elemanlardaki yapı çeliği ve beton malzemelerinin termofiziksel özellikleri için önerilerde bulunmuştur. Ancak yapı çeliğinin miktarı 3 boyutlu incelenecek elemanda hacimsel, 2 boyutlu incelenecek elemanda ise alansal olarak düşük oranlarda mevcut olduğu için tasarımlarda çeliğin ihmal edilebileceğinden EN sadece beton yapı malzemesi için sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bu özellikleri sunmuştur (bkz. bölüm 3.3.2). Bu malzeme özellikleri sıcaklığa bağlı değişmesine rağmen alanda yapılan çalışmalarda malzemelerin bu özellikleri sabit kabul edildiğinde sonuçlarda dramatik bir değişim görülmemiştir (Burnaz, 2010). Bu çalışmada da bu özellikler sabit kabul edilerek analiz yapılmıştır.

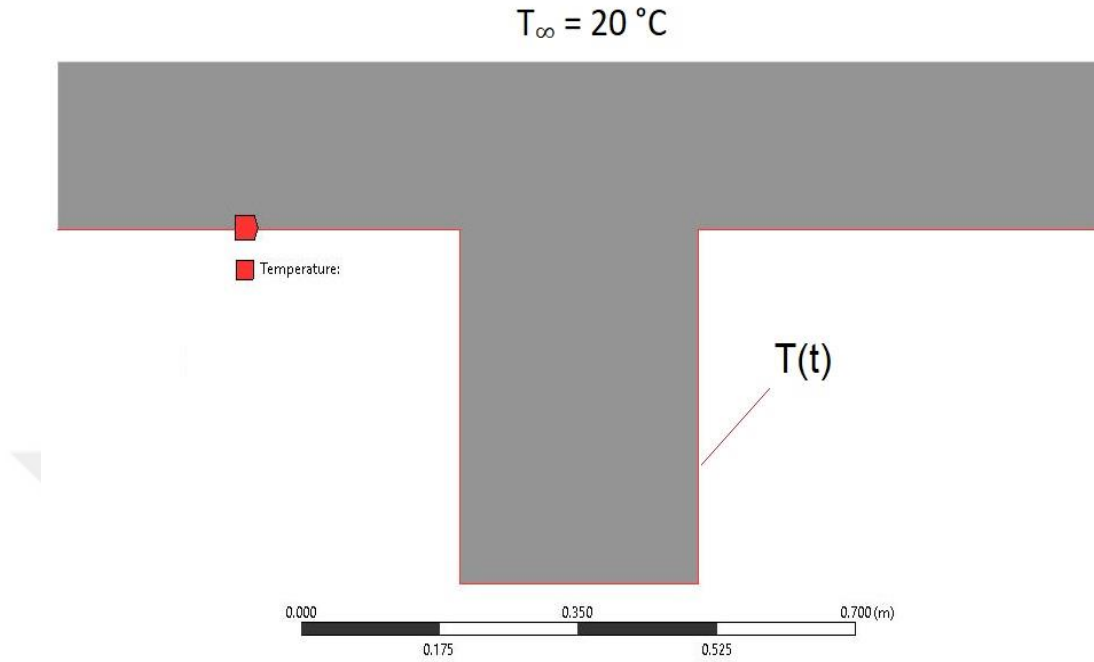


Şekil 3.21 : Malzemelerin termofiziksel özelliklerinin programa tanımlanması

3.6.4 Başlangıç ve Sınır koşullarının belirlenmesi

Yapılacak olan analizde ayrıklaştırılmış denklemlerin numerik çözümü için başlangıç ve sınır koşulları mutlaka verilmelidir. Başlangıç koşulu olarak $T_{\infty} = 20$ °C, sınır koşulu olarak sıcaklık zamana bağlı logaritmik bir fonksiyonu olarak ifade edilir (bkz.

Denklem 3.2). Yangının eleman yüzeylerine etkisi bu fonksiyon ile hesaplanır (bkz. Şekil 3.22).



Şekil 3.22 : Ortam sıcaklığı $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ve sınır şartı $T(t)$

3.6.5 Analizin çalıştırılması

Diferansiyel denklemlerin ayrıklaştırılması sonrasında çok boyutlu lineer denklem takımı elde edilir. Bu matrisin boyutları mesh sayısı ile artmakta bundan dolayı çözümün güçlü hesaplayıcılarla yapılması gereklidir. Bundan dolayı hızlı sonuç elde etmek adına bu analizde ANSYS – Transient Thermal ticari bilgisayar yazılımı kullanılmıştır.

3.6.6 Analizin Doğrulanması

Nümerik çözümlerde sonuçların güvenilir olabilmesi için modelin meshten bağımsız stabil sonuçlar vermesi gerekmektedir. Elde edilen analiz sonuçları deneysel çalışmalar ve referans kaynaklarla karşılaştırılarak doğrulama süreci tamamlanmıştır. Bu çalışmada EN 2-1-2 referans alınarak çözüm yapılan sonuçlar doğrulanmıştır.

3.7 Tablolaştırılmış Veri ve Denklemlerle Tasarım

Bu tasarım yöntemi, deneyim ve test sonuçlarının teorik değerlendirmesi ile ampirik verilere dayanan kabul görmüş tasarım çözümleri sunar. Veriler güvenli varsayımlar

kullanılarak daha yaygın yapı elemanları için elde edilmiştir. Tasarım tablolarında, yangına dayanıklılık sınıfına bağlı olarak kesit boyutları ve donatı merkez mesafeleri için minimum değerler verilmektedir. Betonarme kolonlar ve yüklü betonarme perdeler için yük kullanım faktörü de tablolara dahil edilmiştir. EN bir veya daha fazla taraftaki yangın yükleri için dikdörtgen veya dairesel kesitli kolonlar, yük taşımayan ve yük taşıyan duvarlar, üç veya dört taraflı yangına maruz an dikdörtgen ve I kesitli kirişler ve tek veya çift eksenli açıklıklı döşemeler, sürekli döşemeler, düz döşemeler ve nervürlü döşemeler için tasarım tabloları içermektedir.

3.7.1 Uygulama alanları ve tabloların kullanımı

3.7.1.1 Uygulama alanları

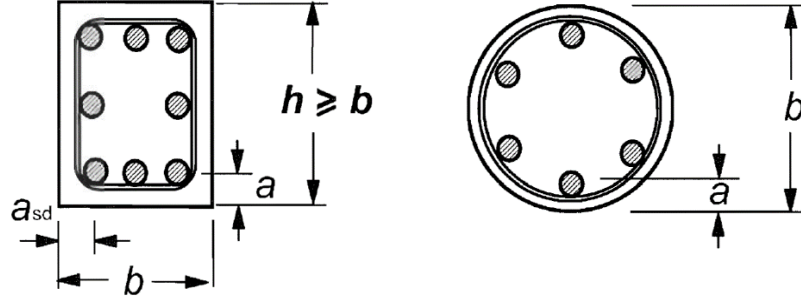
Bu yöntemin uygulama alanı sınırlıdır. Tablolardaki değerler sadece 240 dakikaya kadar maruz kalınan standart yangına dayanmaktadır ve eleman analizinin sınırlamaları geçerlidir. Ayrıca, veriler silisli agregalarla yapılan normal ağırlıktaki beton (2000 ila 2600 kg/m³) için elde edilmiştir. Kirişlerde veya döşemelerde kireçli veya hafif agregalar kullanıldığında, kesitin minimum boyutuna ilişkin değerler %10 oranında azaltılabilir. Yüksek dayanımlı beton kullanılması durumunda, tabloların kullanımı için bazı ekstra kuralların geçerli olduğuna dikkat edilmelidir (bkz. EN 2-1-2 - Bölüm 6.10). Ayrıca, her bir eleman tipi, tablolarla birlikte verilen kendi özel uygulama alanına sahiptir.

Bu yöntemin bir avantajı da çok az ekstra çalışma gerektirmesidir. Kesme ve burulma kapasitesi ve ankraj bağlantıları ile ilgili başka kontroller yapılmasına gerek yoktur. Ayrıca, yüzey donatıları hariç, dökülme zaten tasarıma dahil edilmiştir. Ancak derzlerin yine de kontrol edilmesi gerekir.

3.7.1.2 Tabloların kullanımı

Tablolar, gerekli yangın direncinin ve muhtemelen yük seviyesinin bir fonksiyonu olarak x/y şeklinde yazılan değer çiftlerini vermektedir. İlk sayı, elemanın kesitinin gerekli minimum boyutunu temsil eder (b_{min}). İkinci sayı, donatı veya öngerme çeliğinin en yakın açıktaki kalan yüzeyden eksen mesafesini a verir. Minimum boyut ve eksen mesafesinin çeşitli kombinasyonları verilmiştir. Daha büyük bir kesit daha küçük bir eksen mesafesine karşılık gelebilir veya bunun tersi de geçerlidir. Bu durum, daha büyük bir kesitte, ısıyın donatının bulunduğu çevresel bölgede yığılmak yerine

elemanın çekirdeğine aktarılabilceği gözlemine dayanmaktadır. Eksen mesafesi a nominal bir değerdir. İlgili nominal örtü, eksen mesafesi eksi donatı çapının yarısı eksi olası etriye çapı değerine eştir. Bir hatırlatma olarak, planlarda bulunabilen beton örtüsü nominal örtüdür ve ara parçaların yüksekliğine karşılık gelir. Tablolarda kullanılan semboller şekil 3.23'te gösterilmiştir.



şekil 3.23 : Nominal eksen mesafesini a gösteren yapı elemanlarından kesitler

Tablolarda verilen değerler, EN 1992-1-1'in gerektirdiği boyutlandırma kurallarına ek olarak yangın dayanımı için minimum boyutları sağlamaktadır. Tablolarda verilen değerler arasında doğrusal iterasyon yapılabilir.

3.7.2 Genel tasarım kuralları

Duvarların veya döşemelerin minimum kalınlığının izelge 3.7'ye uygun olduğu durumlarda ayırma işlevine ilişkin gerekliliklerin (Kriter E ve I (bkz. Bölüm 3.2.1)) karşılandığı kabul edilebilir. Yük taşıma fonksiyonu (Kriter R) için ise tablolardaki kesit boyutları ve elik eksen mesafesi ile ilgili minimum gereklilikler aşağıdaki gibidir:

$$\frac{E_{d,fi}}{R_{d,fi}} \leq 1,0 \quad (3.27)$$

burada:

$E_{d,fi}$ yangın durumundaki eylemlerin tasarım etkisidir.

$R_{d,fi}$ yangın durumundaki tasarım yük taşıma kapasitesidir (dayanım).

Basit mesnetli kiriş ve döşemelerin çekme bölgelerinde gerekli eksen mesafesini sağlamak için, izelge 3.9, 3.10 ve 3.11, Sütun 3 (tek yönlü), $\theta_{cr} = 500$ °C'lik bir kritik elik sıcaklığına dayanmaktadır. Ayrıca bu bölümdeki tablo verileri, ilgili maddelerde aksi belirtilmedikçe, $\eta_{fi} = 0,7$ referans yükleme oranına dayanmaktadır. Bunun anlamı,

diğer faktörlerin eşit kalması durumunda, çeliğin normal sıcaklıkta (soğuk durum) izin verilen maksimum gerilimin yalnızca %70'i ile yüklendiğidir. Yangın durumundaki güvenlik katsayısının 1,0'dan 1,15 yükseltilmesi soğuk durumdaki ilgili gerilmeden 1,15 kat daha büyük bir gerilme ile çalışabildiği olarak yorumlanabilir. Bütün verilerin ışığında yangın durumunda izin verilen gerilmenin $\sigma_{s,fi}$ normal durumdakine f_{yk} oranını hesaplar isek $0,7/1,15 = 0,61$ sonucunu buluruz.

Bu bölümdeki tablolarda kullanılmak üzere donatı ve öngerme çeliğinin Çizelge 3.3'te de görüleceği gibi karakteristik dayanımının θ sıcaklığının bir fonksiyonu olarak azalması Şekil 3.16'daki referans eğrileriyle gösterilmiştir. Bu grafiğin oluşturulmasında kullanılan denklemlerden normal donatı çeliği için olanları (öngerilmeli olanlar için bkz. EN 2-1-2) aşağıda verilmiştir. Bu denklemler vasıtasıyla, grafik ile daha hızlı bir şekilde, çeliğin yüksek sıcaklıklardaki akma dayanımı azaltma faktörü $k_s(\theta)$ ve f_{yk} 'nın çarpılmasıyla hesaplanabilmektedir.

$$k_s(\theta) = 1,0 \quad 20^\circ C \leq \theta \leq 350^\circ C \quad (3.27a)$$

$$k_s(\theta) = 1,0 - 0,4 \cdot \frac{\theta - 350}{150} \quad 350^\circ C < \theta \leq 500^\circ C \quad (3.27b)$$

$$k_s(\theta) = 0,61 - 0,5 \cdot \frac{\theta - 500}{200} \quad 500^\circ C < \theta \leq 700^\circ C \quad (3.27c)$$

$$k_s(\theta) = 0,1 - 0,1 \cdot \frac{\theta - 700}{500} \quad 700^\circ C < \theta \leq 1200^\circ C \quad (3.27d)$$

Kritik sıcaklığın $500^\circ C$ 'den farklı olduğu eğilmeye maruz kalan çekme ve basit mesnetli elemanlar için (bağlanmamış tendonlu olanlar hariç), tablo 5.5, 5.6 ve 5.9'da verilen eksen mesafesi aşağıdaki şekilde değiştirilebilir:

a) Denklem 3.28'i kullanarak yangın durumundaki etkiler ($E_{d,fi}$) için çelik gerilmesi $\sigma_{s,fi}$ 'yi hesaplanır.

$$\sigma_{s,fi} = \frac{E_{d,fi}}{E_d} \frac{f_{yk}(20^\circ C)}{\gamma_s} \frac{A_{s,req}}{A_{s,prov}} \quad (3.28)$$

burada:

γ_s takviye çeliği için kısmi güvenlik faktörü (EN 1992-1-1 Bölüm 2'ye bakınız),

$A_{s,req}$ EN 1992-1-1'e göre nihai sınır durum için gerekli donatı alanı,

$A_{s,prov}$ mevcut donatı alanıdır.

$E_{d,fi}/E_d$ yani η_{fi} 0,7 olarak alınabilir, daha detaylı hesap için Bölüm 3.2.5 kullanılabilir.

b) Donatı için Şekil 3.15'i (Referans Eğrisi 1) kullanarak $k_s(\theta_{cr})$ azaltma faktörüne karşılık gelen kritik donatı sıcaklığı θ_{cr} 'yi hesaplanır.

c) Δ_a 'nın milimetre cinsinden eksen mesafesindeki değişiklik olduğu denklem 3.29'u kullanarak yeni kritik sıcaklık θ_{cr} için tablolarda verilen minimum eksen mesafesini belirlenir

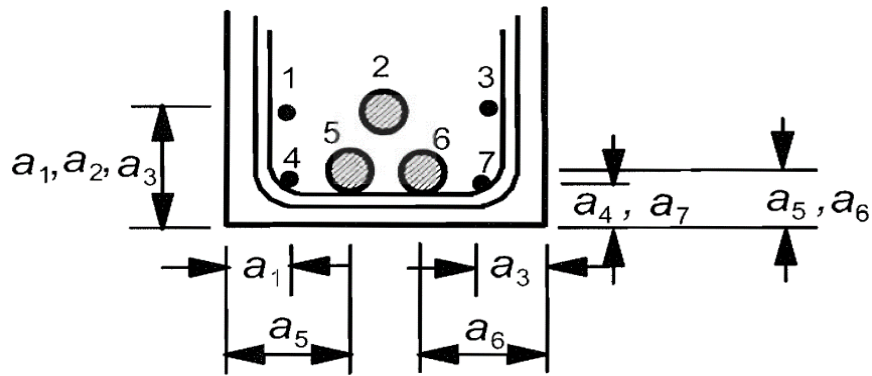
$$\Delta_a = 0,1 (500 - \theta_{cr})(mm) \quad (3.29)$$

Yukarıdaki yaklaşım $350^\circ C < \theta_{cr} < 700^\circ C$ için ve sadece tablolarda verilen eksen mesafesinin değiştirilmesi için geçerlidir. Bu sınırların dışındaki sıcaklıklar ve daha doğru sonuçlar için sıcaklık profilleri kullanılmalıdır.

θ_{cr} 'in $400^\circ C$ 'nin altında olmasını gerektirdiği tasarımlarda çekme elemanları veya kirişler için kesit boyutları, çekme elemanının veya kirişin çekme bölgesinin minimum genişliği denklem 3.30'a göre artırılmalıdır.

$$b_{mod} \geq b_{min} + 0,8 (400 - \theta_{cr})(mm) \quad (3.30)$$

Burada b_{min} , gerekli standart yangın direnciyle ilgili olarak tablolarda verilen minimum b boyutu, b_{mod} ise modifiye edilen değerdir. Denklem 3.30'a göre genişliği artırmanın bir alternatifi, gerçek gerilme için gereken sıcaklığı elde etmek amacıyla donatı eksen mesafesini ayarlamak olabilir. Bu, Ek A'da verildiği gibi daha doğru bir yöntemin kullanılmasını gerektirir.



Şekil 3.24 : Ortalama eksen mesafesini (a_m) hesaplamak için kullanılan boyutlar

Donatı Şekil 3.24'te gösterildiği gibi birkaç katman halinde yerleştirildiğinde ve sırasıyla aynı f_{yk} ve f_{pk} karakteristik mukavemetine sahip donatı veya öngerme

çeliğinden oluştuğunda, ortalama eksen mesafesi a_m Tablolarda verilen eksen mesafesi a 'dan az olmamalıdır. Ortalama eksen mesafesi Denklem 3.31 ile belirlenebilir.

$$a_m = \frac{A_{s1}a_1 + A_{s2}a_2 + \dots + A_{sn}a_n}{A_{s1} + A_{s2} + \dots + A_{sn}} = \frac{\sum A_{si} a_i}{\sum A_{si}} \quad (3.31)$$

burada:

A_{si} , "i" donatısının (tendon, tel) kesit alanıdır.

a_i , "i" donatısının (tendon, tel) açıkta kalan en yakın yüzeye (yangına maruz kalan) olan eksen uzaklığıdır.

Donatı farklı karakteristik mukavemete sahip çeliklerden oluştuğunda, denklem 3.31'de A_{si} yerine $A_{si} f_{yki}$ yazılmalıdır.

Donatı ve öngerme çeliğinin aynı anda kullanıldığı durumlarda (örneğin kısmen öngerilmeli bir elemanda), takviye ve öngerme çeliğinin eksen mesafeleri ayrı ayrı belirlenmelidir. Sıcaklık grafiklerinin ve basitleştirilmiş hesaplama yöntemlerinin kullanılması tavsiye edilir.

3.7.3 Kolonların Boyutlandırılması

Bu başlıkta kolonların boyutlandırılması için belli başlı enkesitlerin bulunduğu 'Tablo 5.2a' mevcuttur (bkz. Çizelge 3.6). Franssen'in (2000) yaptığı çalışmada 'Tablo 5.2a'nın oluşturulduğu veri tabanı kullanılarak kolonlar üzerinde 82 adet yangın testi yapıp bu testlerin sonuçlarından elde edilen regresyon analizleriyle 'Denklem 5.7' (bkz. denklem 3.42) türetilmiştir. Bundan dolayı bu formül EN'ye tablolaştırılmış veriler başlığı altında girmiştir. Bu çalışmada 'Tablo 5.2a' ve 'Denklem 5.7' anlatılacak olup konuyla alakalı örnekler bölüm 4'te verilmiştir.

3.7.3.1 Tablo Yöntemi

Tablo yöntemiyle kolonların yangın esnasında belirli yüklenme durumlarında ($\mu_{fi} = 0,2$, $\mu_{fi} = 0,5$ ve $\mu_{fi} = 0,7$) R30'dan R240'a kadar olan yangın sürelerinde minimum enkesit ve beton örtüsü değerleri elde edilebilir. Tabloda olmayan ara değerler için lineer iterasyon yapılabilir. Bu değerler elemanın bir veya daha fazla yüzeyinin yangına maruziyetine bağlı olarak değişiklik göstermektedir (bkz. Çizelge 3.6). EN kolonların yangın tasarımında bu tablonun ancak yanal ötelenmesi engellenmiş

yapılarda kullanılabileceğini söyler. Tablo 5.2a'nın kullanılabilmesi ve değerlerin elde edilmesi için kolonların aşağıdaki:

- Yangın durumundaki kolonun efektif uzunluğu: $l_{0,fi} \leq 3 \text{ m}$,
- Yangın durumundaki 1. derece dış merkezlik değeri: $e = M_{0Ed,fi} / N_{0Ed,fi} \leq e_{max}$; önerilen e_{max} değeri = $0,15h$,
- Donatı alanı oranı: $A_s < 0,04 A_c$

şartlarını sağlamalıdır. Burada kolonun yangın etkisi altındaki efektif uzunluğu $l_{0,fi}$, yangınsız durumdaki uzunluk l ile eşit kabul edilmektedir. l değeri kolonların kirişlerle birleştiği akslar arasındaki mesafe olmak üzere; kolonun bulunduğu kat ara kat ise $l_{0,fi}$ değeri 0,5l, üst kat ise 0,5l ile 0,7l arasında alınır. Aynı şekilde yangınsız durumdaki dış merkezlik değeri yangın durumundaki hesapta da kullanılabilmektedir.

Çizelge 3.6 : Dikdörtgen ve dairesel kolonlar için minimum boyutlar ve aks mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Minimum ebat (mm)			
	Kolon genişliği b_{min} /ana donatının aksından kenara olan mesafe a			
	Birden fazla tarafı maruz kalan kolon		Bir tarafı maruz kalan kolon	
	$\mu_{fi} = 0.2$	$\mu_{fi} = 0.5$	$\mu_{fi} = 0.7$	$\mu_{fi} = 0.7$
R 30	200/25	200/25	200/32 300/27	155/25
R 60	200/25	200/36 300/31	250/46 350/40	155/25
R 90	200/31 300/25	300/45 400/38	350/53 450/40**	155/25
R 120	250/40 350/35	350/45** 450/40 **	350/57** 450/51**	175/35
R 180	350/45**	350/63**	450/70**	230/55
R 240	350/61**	450/75**	-	295/70
**Minimum 8 donatı				

Tablodaki ana belirleyici unsur olan μ_{fi} , yangın durumundaki yük kullanım faktörü, kolonun yangın durumundaki eksenel yük oranı $N_{Ed,fi}$ 'nin yangınsız durumdaki eksenel yük dayanımı N_{Rd} 'ye oranıdır. N_{Rd} 1992-1-1'e (2004) göre hesaplanabilir.

$$\mu_{fi} = N_{Ed,fi}/N_{Rd} \quad (3.32)$$

EN azaltma faktörü olan η_{fi} 'nin μ_{fi} yerine kullanılabileceğini belirtir. Bunun sebebi tasarım kuvveti olan N_{Ed} değerinin eksenel yük dayanımı N_{Rd} 'ye eşit olduğunu varsaymak başka bir değişle kolonun tam kapasite çalıştığını varsayıp güvenli tasarım yapmaktır. EN basitleştirmek adına η_{fi} değerini 0,7 olarak alınabileceğini belirtir ancak detaylı hesabı için aşağıdaki:

$$\eta_{fi} = \frac{N_{Ed,fi}}{N_{Ed}} \quad (3.33)$$

$$N_{Ed,fi} = G_k + \psi_{fi} Q_{k,1} \quad (3.34)$$

$$N_{Ed} = \gamma_G G_k + \gamma_{Q,q} Q_{k,1} \quad (3.35)$$

denklemlerini verir. Hareketli yük değeri $Q_{k,1}$ ve sabit yük değeri G_k iken güvenlik katsayıları olarak $\gamma_{Q,1}=1,5$ ve $\gamma_G=1,35$ alınır.

3.7.3.2 Denklem 5.7

Tablo 5.2a ile hızlı bir tasarım yapmak mümkündür. Bununla beraber halihazırda var olan birçok kesitin yangına dayanım süresi net olarak tespit edilemez. Denklem 3.42, Tablo 5.2a'da da olduğu gibi hem dikdörtgen hem de dairesel geçerli olmak üzere, yük seviyesi etkisi $R_{\eta_{fi}}$, akslar arası mesafenin etkisi R_a , kolon uzunluğunun etkisi R_l , enkesit ebadının etkisi R_b ve donatının etkisi R_n 'yi hesaba katarak belirli bir kesitin yangına dayanım süresini verebilir. Bu etkiler:

$$R_{\eta_{fi}} = 83 \left(1,00 - \mu_{fi} \left(\frac{1 + \omega}{0,85\alpha_{cc}} + \right) \omega \right) \quad (3.36)$$

$$R_a = 1,60(a - 30) \quad (3.37)$$

$$R_l = 9,60(5 - l_{0,fi}) \quad (3.38)$$

$$R_b = 0,09b' \quad (3.39)$$

$$R_n = 0 \text{ (4 donatı)} \quad (3.40)$$

$$R_b = 12 \text{ (4'ten daha fazla donatı)} \quad (3.41)$$

formülleriyle hesaplanmaktadır. Yukardaki etkilerin bir arada bulunmasıyla denklem 5.7 (bkz. Denklem 3.42),

$$R = 120 ((R_{\mu_{fi}} + R_a + R_l + R_b + R_n)/120)^{1,8} \quad (3.42)$$

olarak düzenlenmiştir. R kolon elemanının yangın dayanım süresini vermekte olup yukardaki denklemlerdeki girdiler aşağıda gösterilen kısıtlılıklara ve formüllere tabidir.

- a boyuna donatıların aksları arasındaki mesafe; $25\text{mm} \leq a \leq 80\text{mm}$,
- $l_{0,fi}$ kolonun yangın durumundaki efektif uzunluğu; $2\text{m} \leq l_{0,fi} \leq 6\text{m}$ (2 m'den küçük olan $l_{0,fi}$, 2 olarak alınacaktır.)
- b' dikdörtgen enkesitler için $= A_c/(b+h)$, dairesel kolonlar için $= \Phi_{\text{kolon}}$;
 $200\text{ mm} \leq b' \leq 450\text{ mm}$; $h \leq 1,5b$,
- ω normal sıcaklık koşullarındaki mekanik donatı oranı $= (A_{sfyd})/(A_{cfd})$,
- α_{cc} basınç dayanımında uzun vadeli etkiler için katsayı; $\alpha_{cc} = 0,85$

3.7.4 Duvarlar

Basınç elemanlarından diğer önemli olan elemanı perde duvarların da yangına karşı tasarımında tablo verileri ile tasarım mümkündür. Bunun dışında EN, yük taşımayan mimari duvarlar ve yangın için imal edilen duvarlara yönelik de tablo çözümleri sunmuştur.

3.7.4.1 Yük taşımayan bölme duvarlar

Bir duvarın yangın dayanımının sadece ısı yalıtımını karşılamak için gerekli olan kriter I ve bütünlük için gereken kriter E'nin sağlanmasından ibaret olan durumlarda minimum duvar kalınlığı Çizelge 3.7'de verilen değerden daha az olmamalıdır. Eksen mesafesine ilişkin gereklilikler bu tür durumlar için geçerli değildir. Kalkerli agregaların kullanılması durumunda Çizelge 3.7'de verilen asgari duvar kalınlığı yüzde 10 oranında azaltılır. Aşırı termal deformasyondan ve bunun sonucunda duvar ile döşeme arasındaki bütünlüğün bozulmasından kaçınmak için duvarın net yüksekliğinin duvar kalınlığına oranı 40'ı geçmemelidir.

Çizelge 3.7 : Yük taşımayan duvarların asgari duvar kalınlığı

Standart yangın dayanımı	Asgari duvar kalınlığı (mm)
EI 30	60
EI 60	80
EI 90	100
EI 120	120
EI 180	150
EI 240	175

3.7.4.2 Yük taşıyan duvarlar

Çizelge 3.8 : Taşıyıcı beton duvar için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Minimum ebat (mm)			
	Duvar et kalınlığı/ana donatısının aksından kenara olan mesafe a			
	$\mu_{fi} = 0.35$		$\mu_{fi} = 0.7$	
	Bir tarafı maruz kalan	Birden fazla tarafı maruz kalan	Bir tarafı maruz kalan	Birden fazla tarafı maruz kalan
REI 30	100/10*	120//10*	120//10*	120//10*
REI 60	110/10*	120//10*	130//10*	140/10*
REI 90	120/20*	140//10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60
* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği örtü kontrol edilecektir.				

Çizelge 3.8'de verilen veriler ve aşağıdaki kurallar uygulandığında, taşıyıcı betonarme duvarlar ve yük taşıyan masif duvarların yeterli yangın dayanımına sahip olduğu varsayılabilir. Çizelge 3.8'de verilen minimum duvar kalınlığı değerleri düz beton duvarlar için de kullanılabilir. Kolonlardaki gibi eksenel yük etkisi altındaki duvarlarda da bu tablo sadece yanal ötelenmesi engellenmiş yapılarda kullanılabilir. Bununla beraber kolonlardaki gibi yangın durumundaki yük kullanım faktörü μ_{fi} , tablo kullanımı için gerekli unsurlardan olup hesabı Bölüm 3.7.3.1 anlatılmıştır.

3.7.4.3 Yangın duvarları

Bir yangın duvarının önceki 2 bölümdeki gerekliliklere ek olarak bir darbe dayanımı gerekliliğine, kriter M, (bkz. Bölüm 3.2.1) uyması gerektiğinde, normal ağırlıktaki beton için minimum kalınlık aşağıdakilerden az olmamalıdır:

Donatısız duvar için 200 mm, donatılı taşıyıcı duvar için 140 mm ve güçlendirilmiş taşıyıcı olmayan duvar için 120 mm. Bununla beraber taşıyıcı duvarın donatılarının eksen mesafesi 25 mm'den az olmamalıdır.

3.7.5 Çekme elemanları

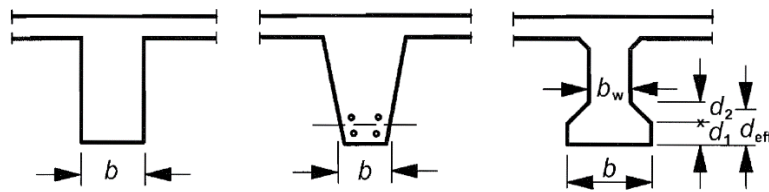
Basit mesnetli kirişlerin boyutlandırılması için verilen Çizelge 3.9'daki değerler:

- Bir çekme elemanının aşırı uzamasının yapının yük taşıma kapasitesini etkilediği durumlarda, çekme elemanındaki çelik sıcaklığının 400°C'ye düşürülmesi gerekebilir. Bu gibi durumlarda Tablo 5.5'teki eksen mesafeleri denklem 3.29 kullanılarak arttırılmalıdır.
- Çekme elemanlarının kesiti $2b_{\min}^2$ 'dan az olmamalıdır, burada $b_{\min}$ Çizelge 3.9'da verilen minimum eleman genişliğidir.

Yukardaki kurallar uygulandığında, betonarme veya öngerilmeli beton çekme elemanlarının yangın dayanımı için yeterli kabul edilebilir.

3.7.5.1 Kirişler

EN'de kirişlerin boyutlandırılması için sunulan Çizelge 3.9 ila 3.11'deki verilen veriler kullanılıp, aşağıdaki kurallarla birlikte tasarım yapılması durumunda EN betonarme ve öngerilmeli beton kirişlerin yeterli yangın dayanımı olduğunu varsayar. Gövde kalınlığı WA, WB veya WC sınıfı olarak verilir. Bu sınıfların seçimi her ülkenin Ulusal Ekinde bulunabilir. Tablolar, üç tarafı yangına maruz kalabilen kirişler için geçerlidir, yani üst taraf, tüm yangına dayanıklılık süresi boyunca yalıtım işlevini sürdüren döşeme veya diğer elemanlarla yalıtılmıştır. Her tarafı yangına maruz kalan kirişler için yapılması gerekenler EN 1992-1-2 Bölüm 5.6.4'te anlatılmıştır.



Şekil 3.25 : Farklı kiriş kesit tipleri için boyutların tanımı. Sol: sabit genişlik, orta: değişken genişlik, sağ: I profil

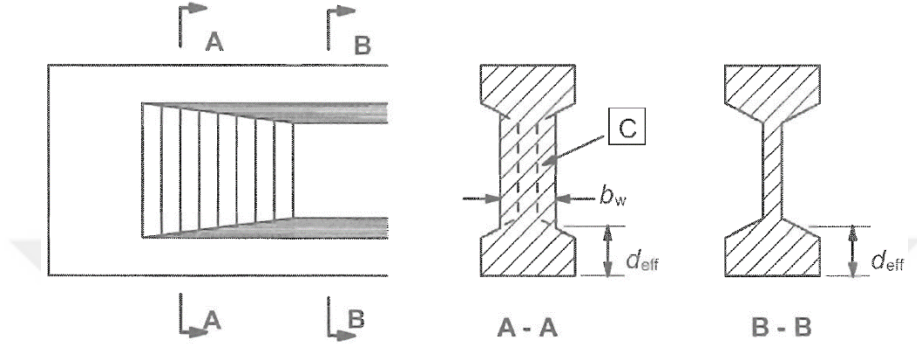
Tablolardaki değerler Şekil 3.25'te gösterilen kesitler için aşağıdaki şartların sağlanması koşuluyla geçerlidir.

- Değişken genişliğe sahip kirişler için (bkz. Şekil 3.25) minimum b değeri çekme donatısının merkez noktasını temsil etmektedir. I-şekilli kirişlerin (bkz.

Şekil 3.25) alt başlığının etkin yüksekliği d_{eff} , aşağıdaki değerden az olmamalıdır:

$$d_{eff} = d_1 + 0,5d_2 \geq b_{min} \quad (3.43)$$

Burada b_{min} , Çizelge 3.9'e göre kiriş genişliğinin minimum değeridir. Eğer yangına dayanıklılıkla ilgili asgari gereklilikleri karşılayan ve tüm donatıyı içeren hayali bir kesit c (bkz. Şekil 3.26) gerçek kesitin içine çizilebiliyorsa bu kural uygulanmaz.



Şekil 3.26 : Hayali bir kesitin gerekliliklerini karşılayan, genişliği b_w artan I-şekilli kiriş

- Alt başlığın gerçek genişliği b , $1,4 b_w$ (gerçek gövde genişliği) sınırını aştığında (bkz. Şekil 3.25, sağ) ve $b.d_{eff} < 2b_{min}^2$ olduğunda, donatı veya öngerme çeliğine olan eksen mesafesi a_{eff} 'e artırılmalıdır.

$$a_{eff} = a \left(1,85 - \frac{d_{eff}}{b_{min}} \sqrt{\frac{b_w}{b}} \right) \geq a \quad (3.44)$$

d_{eff} denklem 3.43 ile tanımlanmıştır. b_{min} ise Çizelge 3.9'da verilen asgari kiriş genişliğidir.

- Çekme bölgesinde elemanın kalan kesit alanının $A_c = 2b_{min}^2$ değerinden az olmaması koşuluyla, kirişlerin gövde kısımlarındaki delikler yangın dayanımını etkilemez; burada b_{min} değeri Çizelge 3.9'da verilmiştir.
- Kirişlerin alt köşelerinde sıcaklık yoğunlaşmaları meydana gelir. Bu nedenle, sadece bir kat donatıya sahip kirişlerin altındaki köşe donatısı (tendon veya tel) için kiriş kenarına olan a_{sd} eksen mesafesi (bkz. Şekil 3.28), ilgili standart yangın dayanımında basit mesnetli kirişler için Çizelge 3.9'un 4. sütununda ve sürekli kirişler için Çizelge 3.10'un 3. sütununda verilene göre kiriş genişlikleri için 10 mm artırılmalıdır.

3.7.5.2 Basit mesnetli kirişler

Çizelge 3.9, R30 ila R240 standart yangın dayanımları için kiriş genişliğinin minimum değerleri ile basitçe mesnetlenmiş kirişlerin taban ve kenarlarına olan eksen mesafesinin minimum değerlerini vermektedir.

Çizelge 3.9 : Betonarme ve öngerilmeli beton ile yapılan basit mesnetli kirişler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar						
	a ve b_{min} 'in kombinasyonları				Gövde kalınlığı b_w		
					WA Sınıfı	WB Sınıfı	WC Sınıfı
R 30	$b_{min} = 80$ $a = 25$	120 20	160 15*	200 15*	80	80	80
R 60	$b_{min} = 120$ $a = 40$	160 35	200 30	300 25	100	80	100
R 90	$b_{min} = 150$ $a = 55$	200 45	300 40	400 35	110	100	100
R 120	$b_{min} = 200$ $a = 65$	240 60	300 55	500 50	130	120	120
R 180	$b_{min} = 240$ $a = 80$	300 70	400 65	600 60	150	150	140
R 240	$b_{min} = 280$ $a = 90$	350 80	500 75	700 70	170	170	160
$a_{sd} = a + 10mm$							

a_{sd} , sadece bir kat donatıya sahip kirişlerin köşe donatıları (veya tendon veya tel) için kiriş kenarına olan eksen mesafesidir. Sütun 4'te verilen değerden daha büyük b_{min} değerleri için a_{sd} 'nin artırılmasına gerek yoktur.

* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği örtü kontrol edilecektir.

3.7.5.3 Sürekli kirişler

Bundan önceki elemanlarda da olduğu gibi Çizelge 3.10 R 30 ila R 240 standart yangın dayanımı için kiriş genişliğinin minimum değerleri ile sürekli kirişlerin taban ve kenarlarına olan eksen mesafesinin minimum değerleri verilmektedir. Çizelge 3.10'daki veriler yalnızca verilen boyutlandırma kurallarına uyulduğunda ve normal sıcaklık tasarımı için eğilme momentinin yeniden dağılımı %15'i aşmadığında geçerlidir. Moment yeniden dağılımının %15'ten fazla olduğu sürekli kirişler için, gerekli yangına maruz kalma koşulları için mesnetlerde yeterli dönme kapasitesi olması koşuluyla kullanılabilir. Aksi takdirde kirişler basit mesnetli olarak ele alınmalıdır.

R90 ve üzeri standart yangın dayanımı için her bir ara mesnet üzerindeki üst donatı alanı, mesnetin merkez hattından $0,3l_{eff}$ mesafeye kadar (bkz. Şekil 3.27) aşağıdaki alandan daha az olmamalıdır.

$$A_{s,req}(x) = A_{s,req}(0) \left(1 - \frac{2,5x}{l_{eff}} \right) \quad (3.45)$$

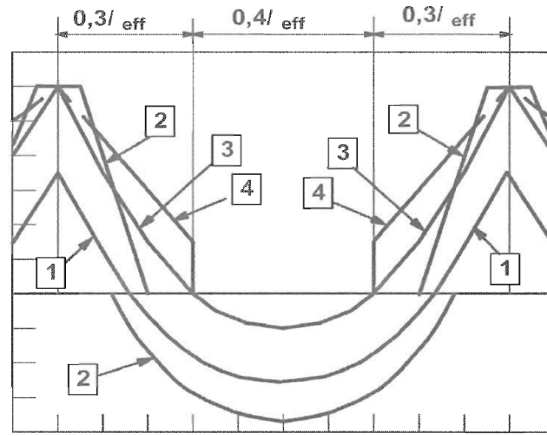
Burada:

x , $x \leq 0,3l_{eff}$ olduğu durumlarda, dikkate alınan kesitten mesnetin merkez hattına olan mesafe,

$A_{s,req}(0)$, EN 1992-1-1'e göre mesnet üzerinde gerekli olan üst donatı alanı,

$A_{s,req}(x)$, EN 1992-1-1'in gerektirdiği $A_s(x)$ değerinden az olmamak kaydıyla, göz önünde bulundurulan mesnetin merkez hattından (x) uzaklıkta kesitte gerekli minimum üst donatı alanı ve

l_{eff} açıklığın etkin uzunluğudur. Bitişik açıklıkların etkin uzunluğu daha büyükse bu değer kullanılmalıdır.



Şekil 3.27 : Yangın koşulları için mesnetler üzerindeki eğilme momentlerine direnç zarfı.

EN'nin yangın durumundaki eğilme momentleri ile ilgili verdiği Şekil 3.27'de:

- 1- $t = 0$ anında yangın durumundaki etkilerden kaynaklı eğilme momentlerinin diyagramı,
- 2- EN 1992-1-1'e göre çekme donatısı tarafından gösterilecek etkili eğilme moment dayanımlarının zarf çizgisi,
- 3- Yangın koşullarında eğilme momentleri diyagramı ve

- 4- Denklem 3.45'e göre eğilme momenti dayanım zarf çizgisini temsil etmektedir.

Çizelge 3.10 : Güçlendirilmiş ve öngerilmeli beton ile yapılan sürekli kirişler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar					Gövde kalınlığı b_w	
	a ve b_{min} 'in kombinasyonları				WA Sınıfı	WB Sınıfı	WC Sınıfı
R 30	$b_{min} = 80$ $a = 15^*$	160 12*	-	-	80	80	80
R 60	$b_{min} = 120$ $a = 25$	200 12*	-	-	100	80	100
R 90	$b_{min} = 150$ $a = 35$	250 25	-	-	110	100	100
R 120	$b_{min} = 200$ $a = 45$	300 35	450 35	500 30	130	120	120
R 180	$b_{min} = 240$ $a = 60$	400 50	550 50	600 40	150	150	140
R 240	$b_{min} = 280$ $a = 75$	500 60	650 60	700 50	170	170	160
$a_{sd} = a + 10\text{mm}$							
a_{sd} , sadece bir kat donatıya sahip kirişlerin köşe donatıları (veya tendon veya tel) için kiriş kenarına olan eksen mesafesidir. Sütun 4'te verilen değerden daha büyük b_{min} değerleri için a_{sd} 'nin artırılmasına gerek yoktur.							
* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği örtü kontrol edilecektir.							

Çizelge 3.10, ankrajsız donatıların kullanıldığı sürekli kirişler için sadece yangın koşulları altında ara mesnetler üzerindeki toplam mesnet momentinin bağlı donatı tarafından karşılanması durumunda geçerlidir. I-şekilli sürekli kirişlerin ağ kalınlığı b_w (bkz. Şekil 3.25), patlayıcı dökülmenin meydana gelmeyeceği gösterilmedikçe, bir ara mesnetten 2h mesafe için Tablo 5.6, Kolon 2'deki minimum b_{min} değerinden az olmamalıdır.

İlk ara mesnette sürekli kirişin beton basınç veya kesme göçmesini önlemek için, aşağıdaki koşulların her ikisi de mevcutsa, kiriş genişliği ve ağ kalınlığı Çizelge 3.11'e uygun olarak standart yangın dirençleri R120 - R 240 için artırılmalıdır:

- Uç mesnette bağlantı veya kiriş tarafından hiçbir eğilme dayanımı sağlanmıyor ve

- ilk ara mesnette $V_{Ed} > 2/3V_{Rd,max}$ durumu var ise. Burada V_{Ed} ortam sıcaklığında uygulanan tasarım kesme kuvveti ve $V_{Rd,max}$ EN 1992-1-1 Bölüm 6'ya göre basınç payandalarının tasarım kesme dayanımıdır.

Çizelge 3.11 : Güçlendirilmiş ve öngerilmeli beton sürekli I-kirişler için artırılmış kiriş genişliği ve gövde kalınlığı

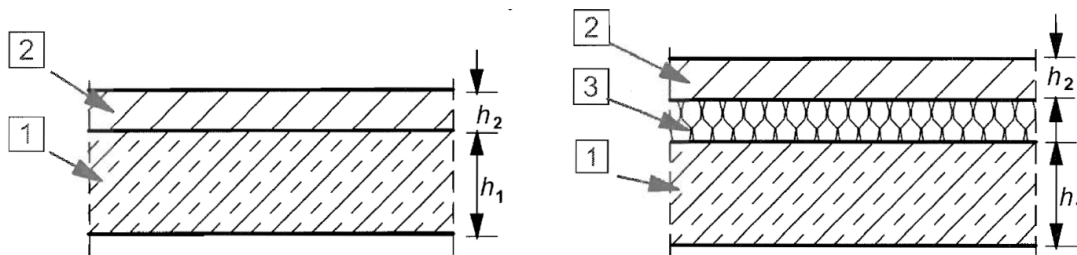
Standart yangın dayanımı	Minimum kiriş genişliği b_{min} (mm) ve gövde kalınlığı b_w (mm)
R 120	220
R 180	380
R 240	480

3.7.5.4 Tüm yüzleri yangına maruz kalan kirişler

Bütün yüzeyleri yangına maruz kalacak bir kirişin yangın dayanımı için Çizelge 3.9, 3.10 ve 3.11 uygulanabilir. Ancak kirişin yüksekliği, ilgili yangın dayanım süresi için gereken minimum genişlikten az olmamalıdır. Ayrıca kirişin enkesit alanı A_c , Çizelge 3.9 ila 3.11 arasında tanımlanan b_{min} değerinin karesinin 2 katından az olmamalıdır.

3.7.6 Tabliye tasarımı

Betonarme ve öngerilmeli beton döşemelerin yangın dayanımı, Çizelge 3.12'deki değerlerin aşağıdaki kurallarla birlikte uygulanması halinde yeterli kabul edilebilir. Çizelge 3.12'de verilen minimum döşeme kalınlığı h_s yeterli ayırma işlevini sağlar (Kriter E ve I). Döşeme kaplamaları ayırma işlevine kalınlıklarıyla orantılı olarak katkıda bulunacaktır (bkz. Şekil 3.28). Sadece yük taşıma fonksiyonu (Kriter R) gerekli ise, EN 1992-1-1'e göre tasarım için varsayılan gerekli döşeme kalınlığı alınabilir. 3.6.6.1 ve 3.6.6.2'de verilen kurallar T veya TT biçimli kirişlerin başlıkları (flanş) için de geçerlidir. Şekil 3.28'de temsil edilen tabliye kesitinde 1 numaralı bölüm betonarme tabliye, 2 numaralı bölüm yanmaz döşeme kaplaması ve 3 numaralı bölüm ise yanma ihtimali olan ses yalıtım malzemesini temsil etmektedir.



Şekil 3.28 : Kaplamalı betonarme döşeme

3.7.6.1 Basit mesnetli tabliyeler

Çizelge 3.12, R 30 ila R 240 standart yangın dayanımı için basitçe mesnetlenmiş döşemelerin alt tabanına olan eksen mesafesinin minimum değerlerini vermektedir. İki yönlü çalışan döşemelerde a, alt donatının yangına maruz kalan alt yüzeye olan eksen mesafesini gösterir. l_x ve l_y , l_y 'nin daha uzun açıklık olduğu iki yönlü bir döşemenin (dik açılı iki yön) açıklıklarını temsil etmek üzere Tablo 5.8 (bkz. Çizelge 3.12) aşağıdaki gibi verilmiştir.

Çizelge 3.12 : Betonarme ve öngerilmeli beton basit mesnetli tek ve çift yönlü dolu döşemeler için asgari boyutlar ve eksen mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar			
	Tabliye kalınlığı h_s (mm)	Eksen mesafesi a		
		Tek yönlü	İki yönlü	
			$l_y / l_x \leq 1,5$	$2 \geq l_y / l_x > 1,5$
REI 30	60	10*	10*	10*
REI 60	80	20	10*	15*
REI 90	100	30	15*	20
REI 120	120	40	20	25
REI 180	150	55	30	40
REI 240	175	65	40	50

* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği paspayı kontrol edilecektir.

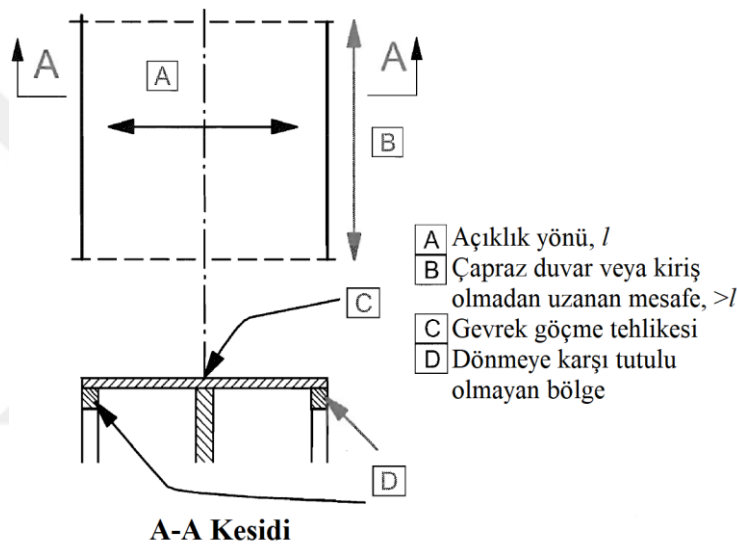
İki yönlü döşemeler için Sütun 4 ve 5'teki a eksen mesafesi dört kenarından da desteklenen döşemelerle ilişkilendirilmiştir. Aksi takdirde, tek yönlü yayılan döşeme olarak değerlendirilmelidir.

3.7.6.2 Sürekli tabliyeler

Çizelge 3.12 sütun 2 ve 4'te verilen değerler tek yönlü veya iki yönlü sürekli döşemeler için de geçerlidir. Çizelge 3.12 ve ilgili kuralları uygun sıcaklık tasarımı için moment yeniden dağılımının %15'i aşmadığı döşemeler için uygulanabilir. Daha titiz bir hesaplamanın olmadığı ve yeniden dağılımın %15'i aştığı durumlarda, sürekli bir döşemenin her bir açıklığı Çizelge 3.12 (sırasıyla 2, 3, 4 veya 5. kolonlar) kullanılarak basit mesnetli bir döşeme olarak değerlendirilmelidir. Sürekli kirişler için 3.7.5.3'te yer alan kurallar sürekli döşemeler için de geçerlidir. Bu kurallara uyulmadığı takdirde, sürekli döşemenin her bir açıklığı yukarıdaki gibi basit mesnetli döşeme olarak değerlendirilmelidir.

Aşağıdaki koşullardan herhangi birinin geçerli olması durumunda, ara mesnet üzerinde minimum negatif donatı $A_s \geq 0,005 A_c$ sağlanmalıdır.

- Soğuk işlenmiş donatı kullanılıyorsa,
- iki açıklıklı sürekli döşemelerde, EN 1992-1-1'e göre tasarım hükümleri ve/veya yeterli detaylandırma ile uç mesnetlerde eğilmeye karşı herhangi bir sınırlama sağlanmamışsa,
- açıklık yönüne enine yük etkilerinin yeniden dağıtılmasına imkân verilmiyorsa, örneğin ara duvarlar veya açıklık yönündeki diğer mesnetler tasarımda dikkate alınmamışsa (bkz. Şekil 3.29).



Şekil 3.29 : Minimum donatı alanlarının sağlanması gereken döşeme sistemleri

3.7.6.3 Düz tabliyeler

Çizelge 3.13 : Donatılı ve öngerilmeli betonarme masif düz döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafeleri

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar (mm)	
	Tabliye kalınlığı h_s	Eksen mesafesi a
REI 30	150	10*
REI 60	180	15*
REI 90	200	25
REI 120	200	35
REI 180	200	45
REI 240	200	50

* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği paspayı kontrol edilecektir.

Aşağıdaki kurallar EN 1992-1-1 Bölüm 5'e göre moment yeniden dağılımının %15'i aşmadığı düz döşemeler için geçerlidir. %15'i aşan durumlarda ise eksen mesafeleri tek yönlü döşeme için olduğu gibi Çizelge 3.12'deki Sütun 3'ten, minimum kalınlık ise Çizelge 3.13'ten alınmalıdır. REI 90 ve üzeri yangın sınıfları için, EN 1992-1-1'in gerektirdiği ara mesnetler üzerinde her yönde toplam üst donatının en az %20'si tüm açıklık boyunca sürekli olmalıdır. Bu donatı kolon şeridine yerleştirilmelidir. Örneğin zemin kaplamaları dikkate alınarak minimum döşeme kalınlıkları azaltılmamalıdır. Eksen mesafesi a , alt katmandaki donatının eksen mesafesini gösterir.

3.7.6.4 Dişli tabliyeler

EN tek yönlü donatılı ve öngerilmeli dişli döşemelerin yangın dayanımının değerlendirilmesinde, dişler için Bölüm 3.6.4.2, 3.6.4.3 ve başlıklar için Bölüm 3.6.6.2, Çizelge 3.12, sütun 2 ve 5'e uyulmasını söyler. iki yönlü donatılı ve öngerilmeli nervürlü döşemeler için ise aşağıdaki kurallarla birlikte Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15 değerlerin uygulanması halinde yeterli yangın dayanımı varsayılabilir.

Çizelge 3.14 : Donatılı veya öngerilmeli betondan iki yönlü, basit mesnetli dişli döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafesi.

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar (mm)			
	eksen mesafesi a ve dişli genişliği b_{min} 'in kombinasyonları			Tabliye kalınlığı h_s ve Eksen mesafesi a
REI 30	$b_{min} = 80$ $a = 15^*$	-	-	$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 60	$b_{min} = 100$ $a = 35$	120 25	≥ 200 15*	$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 90	$b_{min} = 120$ $a = 45$	160 40	≥ 250 30	$h_s = 100$ $a = 15^*$
REI 120	$b_{min} = 160$ $a = 60$	190 55	≥ 300 40	$h_s = 120$ $a = 20$
REI 180	$b_{min} = 220$ $a = 75$	260 70	≥ 410 60	$h_s = 150$ $a = 30$
REI 240	$b_{min} = 280$ $a = 90$	350 75	≥ 500 70	$h_s = 175$ $a = 40$
$a_{sd} = a + 10$				

a_{sd} donatı eksenini ile nervürün yangına maruz kalan yanal yüzeyi arasında ölçülen mesafeyi ifade eder.

* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği paspayı kontrol edilecektir.

Çizelge 3.14 ve 3.15'teki değerler, ağırlıklı olarak düzgün yayılı yüke maruz kalan dişli döşemeler için geçerlidir. Sürekli dişli döşemelerde üst donatı, başlığın üst yarısına yerleştirilmelidir. Tablo 5.10 basit mesnetli, iki yöne yayılan nervürlü döşemeler için geçerlidir. Ayrıca, üst donatı tasarımının 3.7.5.3'teki gereklilikleri karşılamadığı durumlarda, en az bir sınırlandırılmış kenarı ve REI 180'den daha düşük standart yangın dayanımı olan iki yönlü çalışan dişli döşemeler için de geçerlidir.

Çizelge 3.15 ise en az bir sınırlandırılmış kenarı olan iki yönlü açıklıklı dişli döşemeler için geçerlidir. Üst donatının detaylandırılması için, tüm standart yangın dayanımları için Bölüm 3.7.5.3 geçerlidir.

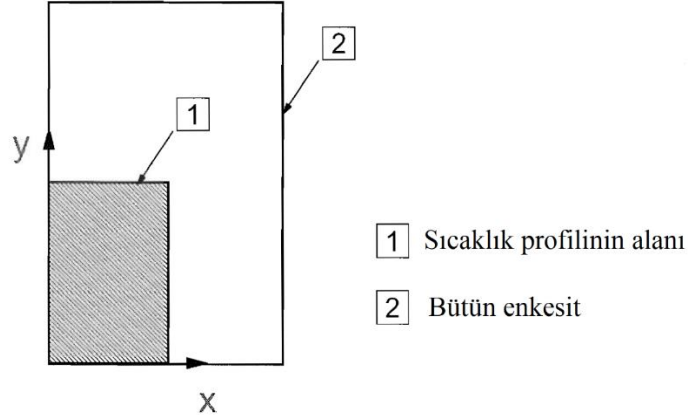
Çizelge 3.15 : En az bir kenarı sınırlandırılmış, donatılı veya öngerilmeli betondan iki yönlü dişli döşemeler için minimum boyutlar ve eksen mesafeleri.

Standart yangın dayanımı	Asgari boyutlar (mm)			
	eksen mesafesi a ve dişli genişliği b_{min} 'in kombinasyonları			Tabliye kalınlığı h_s ve Eksen mesafesi a
REI 30	$b_{min} = 80$ $a = 10^*$	-	-	$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 60	$b_{min} = 100$ $a = 25$	120 15*	≥ 200 10*	$h_s = 80$ $a = 10^*$
REI 90	$b_{min} = 120$ $a = 35$	160 25	≥ 250 15*	$h_s = 100$ $a = 15^*$
REI 120	$b_{min} = 160$ $a = 45$	190 40	≥ 300 30	$h_s = 120$ $a = 20$
REI 180	$b_{min} = 310$ $a = 60$	600 50	-	$h_s = 150$ $a = 30$
REI 240	$b_{min} = 450$ $a = 70$	700 60	-	$h_s = 175$ $a = 40$
$a_{sd} = a + 10$				
a_{sd} donatı eksenini ile nervürün yangına maruz kalan yanal yüzeyi arasında ölçülen mesafeyi ifade eder.				
* Normalde EN 1992-1-1'in gerektirdiği paspayı kontrol edilecektir.				

3.8 Tasarım grafikleri yöntemi

Bu bölümde EN'nin Ek A kısmında sunduğu belirli kesitler için sıcaklık profillerini (eş sıcaklık haritalarını) ve bunların kullanılması için gereken yeterlilikler anlatılacaktır. Şekil 3.31, 32, 33 ve 34'te de birer örneğinin görüldüğü gibi bu ekte tabliyeler, dikdörtgen kirişler, kare ve daire enkesitli kolonların belli başlı kesitlerinin

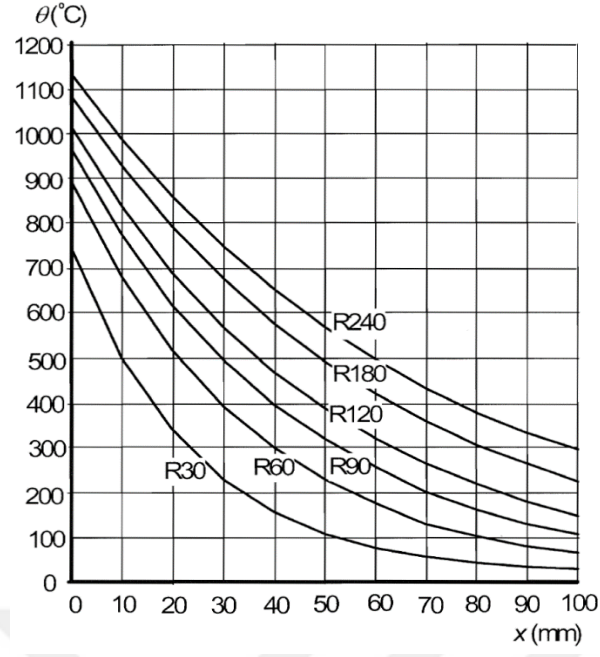
değerleri mevcuttur. EN Şekil 3.31'deki tabliyeler için verilen sıcaklık profilinin, bir yüzü yangına maruz kalan duvarlar için de uygulanabileceğini söyler. Grafiklerle, kesitlerin içindeki donatıların farklı yangın başarım sürelerindeki (R30, R60, R90, R120, R180 ve R240) sıcaklık değeri belirlenebilmektedir. Ek A kolon ve kirişler için bu değerleri simetriklik esasıyla bir enkesitin çeyrek alanında vermektedir (bkz. Şekil 3.25).



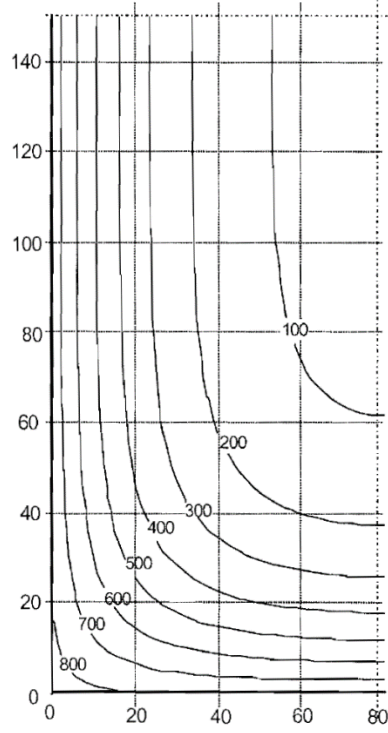
Şekil 3.30 : Sıcaklık profillerinin sunulduğu enkesit alanı

Bu sıcaklık profillerinin kullanılabilmesi için gereken şartlar aşağıdaki değerlere dayanmaktadır.

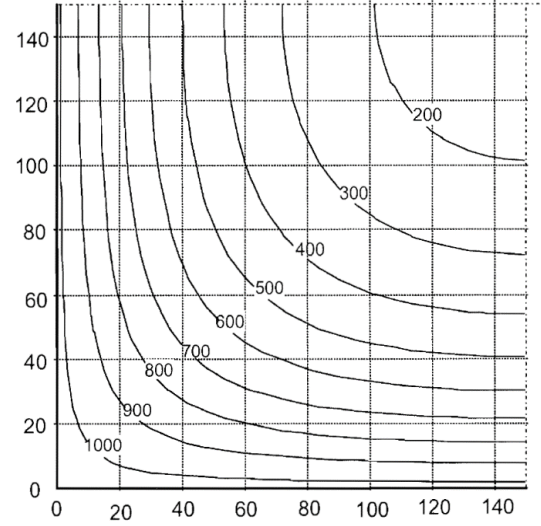
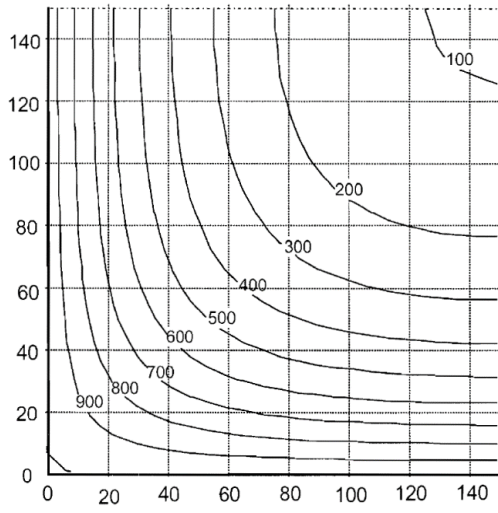
- Betonun özgül ısısı %1,5'luk nem içeriği ile EN Bölüm 3.3.2'de verildiği gibidir. Sıcaklık grafikleri, %1,5'ten büyük nem içerikleri için güvenli tarafta kalmaktadır.
- Termal iletkenlik değeri olarak EN Bölüm 3.3.3'teki en düşük değer alınmıştır.
- Beton yüzeyine ilişkin emisivite değeri: 0,7
- Konveksiyon faktörü: 25 W/m²K



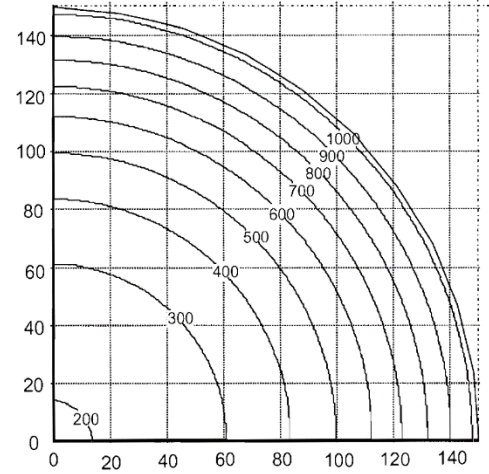
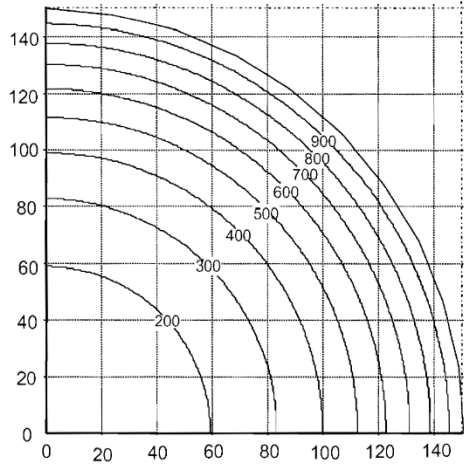
Şekil 3.31 : 200 mm yüksekliğindeki tabliyeler için sıcaklık profili (x: maruz kalan yüzeyden uzaklık) R30'dan R240'a



Şekil 3.32 : $h \times b = 300 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ olan bir kirişin R30 anındaki sıcaklık profili



Şekil 3.33 : $h \times b = 300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ olan kolonların R90 (soldaki grafik) ve R120 (sağdaki grafik) anındaki sıcaklık profili



Şekil 3.34 : $R = 300 \text{ mm}$ olan kolonların R90 (soldaki grafik) ve R120 (sağdaki grafik) anındaki sıcaklık profili



4. NUMERİK ANALİZLER

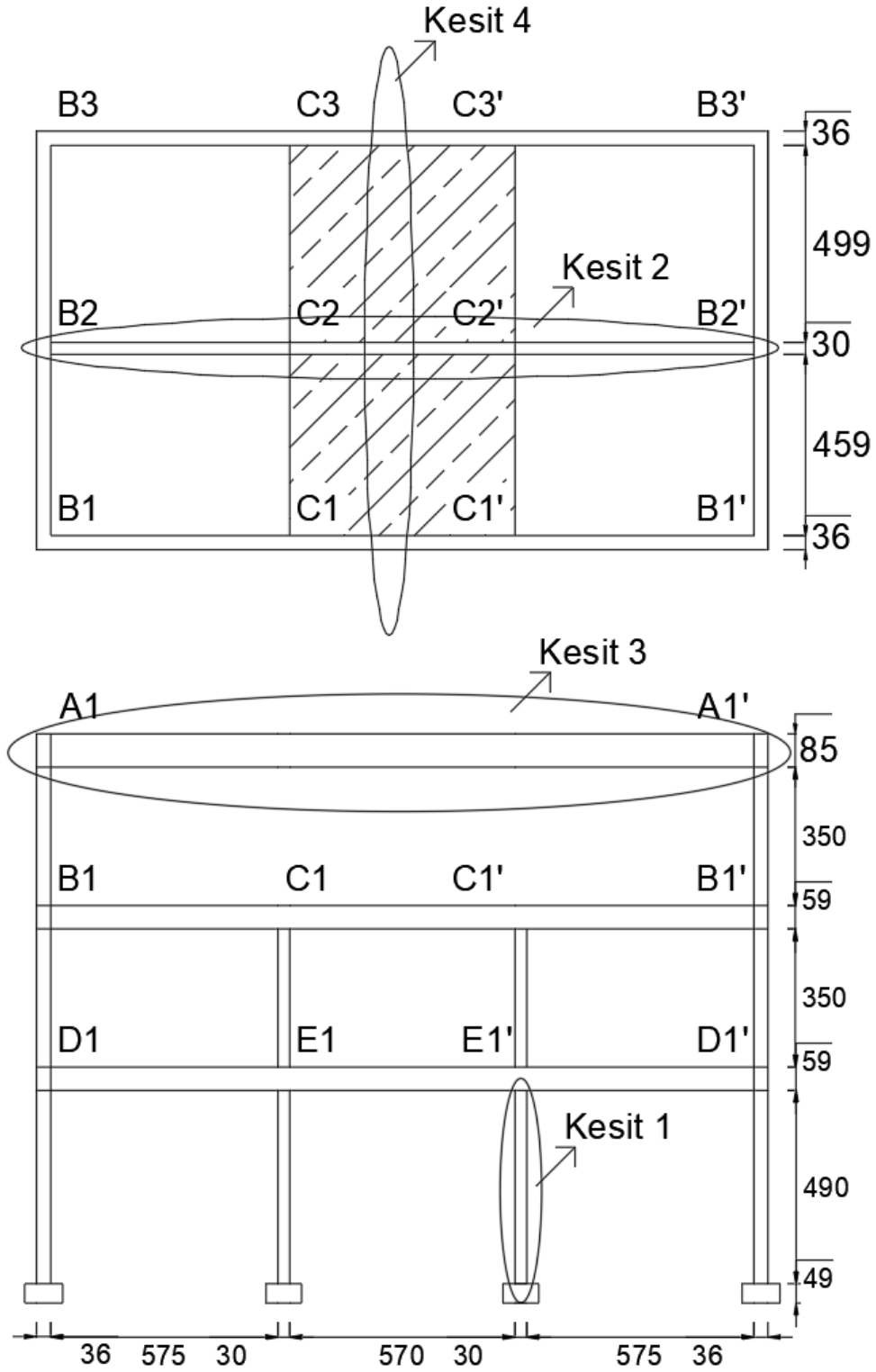
Bu bölümde bölüm 3'te detaylı bir şekilde bahsedilen EN'ye göre yangın tasarım esaslarını kabul eden yöntemlerle, yapı elemanlarının yangına karşı tasarım yöntemlerini göstermeye yardımcı olacak bazı hesaplamaları göstermektedir. İncelenen örneklerde, her ne kadar EN bu konuda hesaplama yöntemleri sunsa da betonun çekme dayanımı sıfır olarak kabul edilmiştir. Bazı bileşenler, 500°C'nin üzerindeki beton için sıfır dayanımlı basitleştirilmiş hesaplama yöntemi kullanılarak tasarlanmıştır. İncelenen elemanlar baskın olarak basınç etkisi altındaki kolon ve duvarlar ile baskın olarak eğilme etkisi altındaki basit mesnetlenmiş ve sürekli kiriş, öngermeli kiriş ve tabliyelerdir.

Bölüm 4.1'de ise bölüm 3.6'da teorisi ve detayları anlatılan termal analiz ile alakalı yapılan çözümler gösterilmektedir. ANSYS paket programı Tansient Thermal modülü kullanılarak yapılan analizlerde bölüm 4.3.2'te yapılan basitleştirilmiş hesap metodunda kullanılan termal profillerin üretilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca bu bölümde anlatılan hesaplardan bazılarında (bkz. Bölüm 4.2, Bölüm 4.3 ve Bölüm 4.4) Litzner'in (1995) bir deponun taşıyıcı yapısının parçalarını (bkz. Şekil 4.1) incelediği çalışma dikkate alınmıştır. Ayrıntılı olarak, yangına dayanıklılık sınıfı REI 90 için betonarme bir sürekli döşemenin yanı sıra betonarme bir sürekli kiriş, yüksek dayanımlı betondan yapılmış bir öngerilmeli beton kiriş ve yangına dayanıklılık sınıfı R 90 için betonarme bir iç kolon kontrol edilmektedir. Yangından korunma tasarımının anlaşılması için gerekli olan destekleyici yapıya ilişkin bilgiler aşağıda verilmiştir; daha fazla bilgi Litzner'in (1995) çalışmasında bulunabilir.

Şekil 4.1 depoyu planda ve boylamasına kesitte göstermektedir. Kesit 1 betonarme iç kolon, kesit 2 betonarme sürekli kiriş, kesit 3 öngermeli betonarme kiriş ve kesit 4 betonarme sürekli döşeme olarak teşkil edilmiştir. Yapının aynı zamanda yatay yükleri emen ve bunları zemine aktaran çaprazlarla yanal ötelenmesi engellenmiştir. Yapı malzemesi olarak C20/25 dayanım sınıfında beton ve B500B takviye çeliği kullanılmıştır. Öngermeli betonarme kiriş de ise C60/75 sınıfı beton kullanılmıştır. Yangın yükü altında yapı malzemelerinin mekanik özellikleri için kısmi güvenlik

katsayısı $\gamma_{M,fi} = 1.0$ 'dır. Hesap adımlarının ilgili noktalarında bilgiler verilmeye devam edilecektir.



Şekil 4.1 : İncelenecek elemanların bulunduğu yapının kesitleri

4.1 ANSYS ile termal analiz

Her kesit 2 boyutta tasarlanmış olup bu elemanlar aynı malzemelerden üretilmiş olduğundan termofiziksel özellikleri de aynı olup bu değerler çizelge 4.1’de verilmiştir.

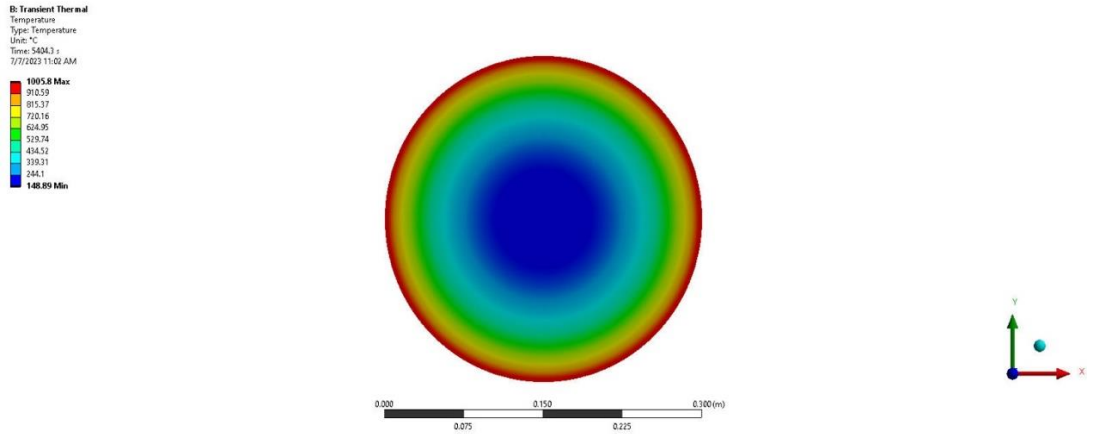
Çizelge 4.1 : Yüksek sıcaklıkta kullanılan yapı malzemelerinin termofiziksel özellikleri (sabit kabulü ile)

	k [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	c_p [J/(kgK)]
C20/25 Beton	1,2	2200	1100
B500B Çelik	45	7850	630

İncelenen kesitlerden dairesel profil 25445, donatılı T kesit 173292, donatısız T kesit 45261 ve dikdörtgen kesit 21597 adet node sayısına sahiptir. Yangına temas eden yüzeyler ISO 834 standart yangın eğrisine, yangından etkilenmeyecek yüzeyler ise $T_{\infty} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Bu koşullarla 4 farklı kesit incelenmiştir.

4.1.1 Dairesel kolon enkesiti

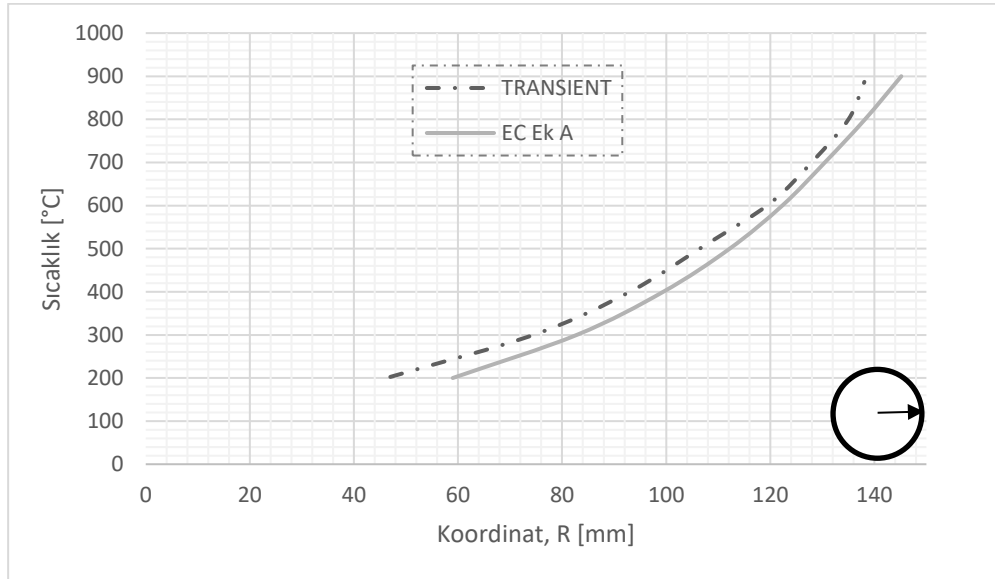
Yangın modeli, dairesel kesitin tüm yüzeyinde T fonksiyonu ile tanımlanmış olup 90 dakika boyunca yangının etkisi kesitte incelenmiştir. Şekil 4.2’de 90. dakikadaki sıcaklık profili kesit üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.2 : 300 mm çaplı dairesel enkesitin 90 dakikalık analiz sonundaki ısı profili

Analiz sonucu elde edilen sıcaklık profili EN (bkz. Şekil 3.34) ile Şekil 4.3’de görüldüğü gibi kıyaslanmıştır. Kıyaslamada radyal yönler referans alınarak her 100 °

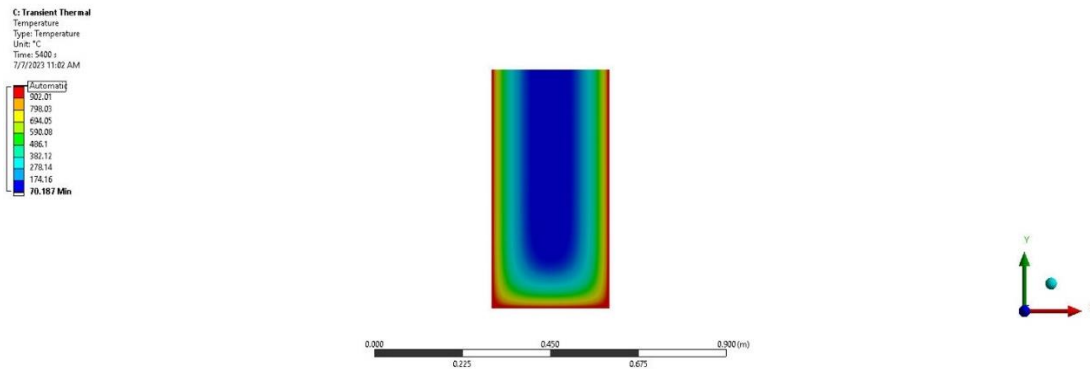
C'lık izoterm çizgisinden alınan koordinat değerleri karşılaştırılmış sonuçların azami %5 hata ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Alınan sonuçlarla analiz sonuçları doğrulanmıştır.



Şekil 4.3 : Sıcaklığın koordinatla değişiminin analiz ve EN sonuçlarının karşılaştırılması – dairesel kesit

4.1.2 Donatısız dikdörtgen kiriş enkesiti

Yangın modeli, dikdörtgen kesitin üç yüzeyinde T fonksiyonu (bkz. Denklem 3.2) ile tanımlanmış olup 90 dakika boyunca yangının etkisi kesitte incelenmiştir. Şekil 4.4'te 90. dakikadaki sıcaklık profili kesit üzerinde gösterilmiştir.

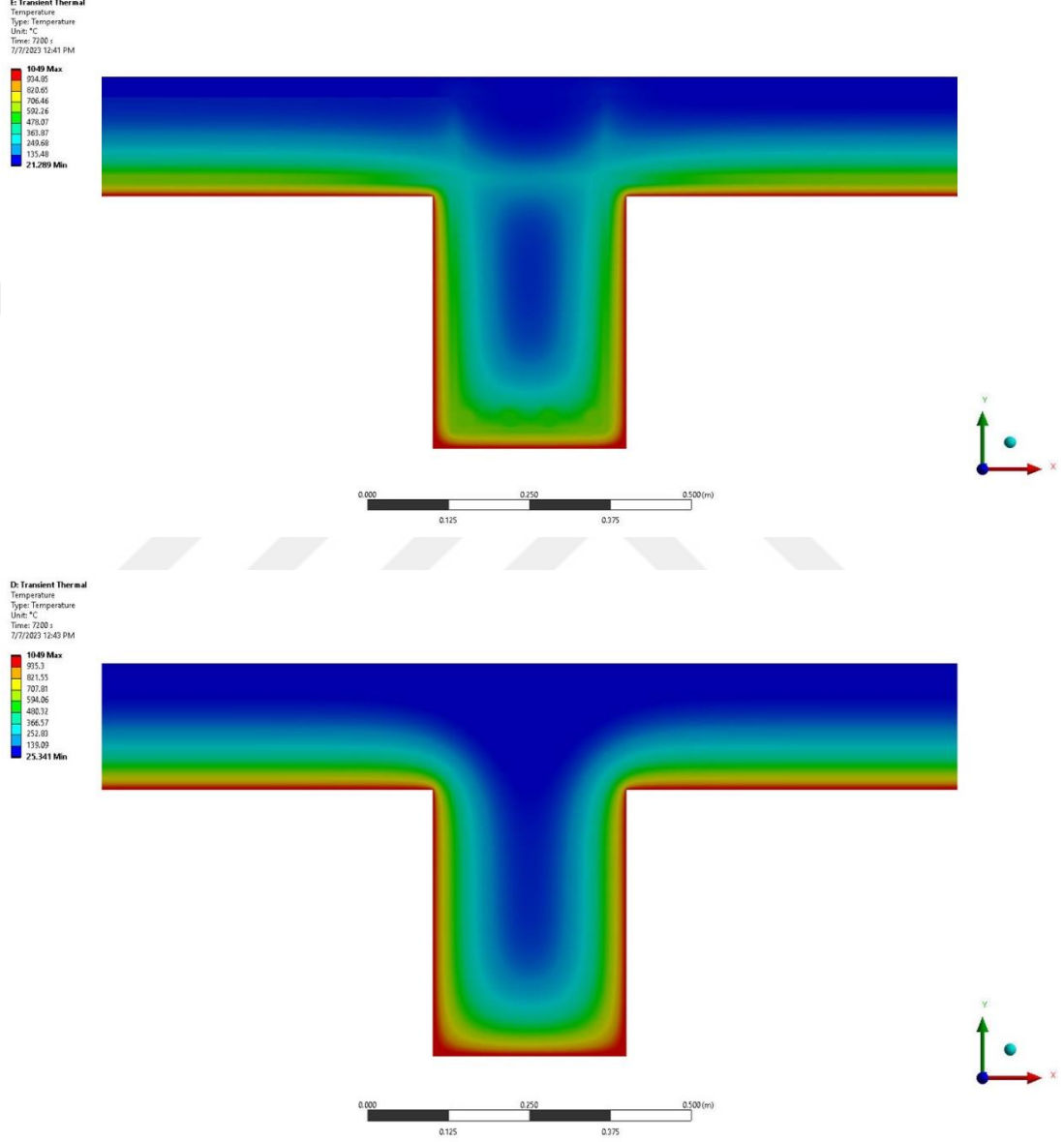


Şekil 4.4 : Dikdörtgen kesit 90. dakikadaki sıcaklık profili

İncelenen enkesitin EN 2-1-2 Ek-A'daki yaklaşık karşılığı olan 300 mm * 600 mm ebadındaki enkesit ile sonuçları kıyaslanmıştır. Bu kesit aşağıda incelenen tabliyeli T kirişin gövde kısmını temsil ettiğinden doğrulama ve sonuçlar şekil 4.6'da kıyaslanmıştır.

4.1.3 Donatılı ve donatısız kiriş T enkesiti

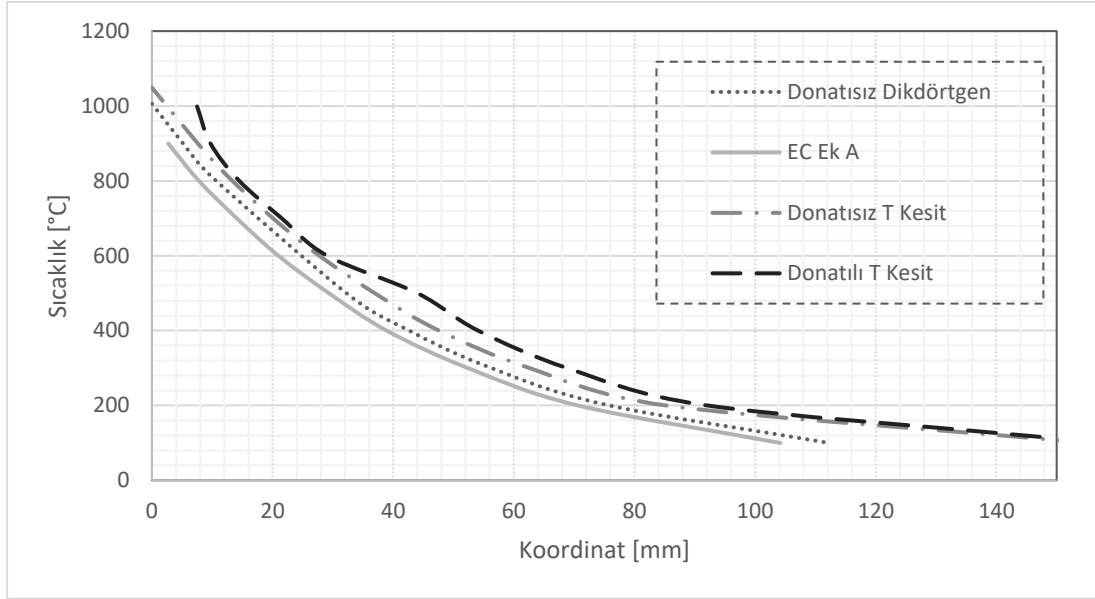
Yangın modeli, tabliyeli T kiriş kesitinin yangına temas eden yüzeylerine (bkz. Şekil 3.22, ortam sıcaklığı $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ve sınır şartı $T(t)$) T fonksiyonu ile tanımlanmış olup 90 dakika boyunca yangının etkisi kesitte incelenmiştir. Şekil 4.5'te 90. dakikadaki sıcaklık profili kesit üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4.5 : Donatılı ve donatısız T kesitlerin 90. dakikadaki sıcaklık profili

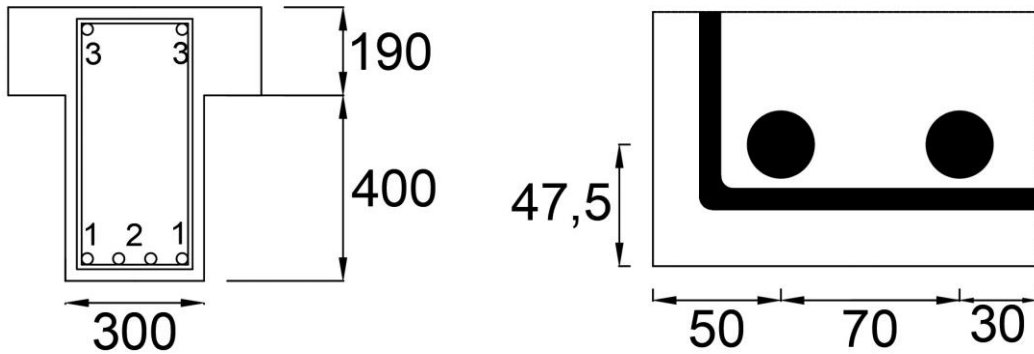
Analiz sonucu elde edilen aynı kirişin farklı 3 versiyonunun (donatılı ve donatısız T ile donatısız dikdörtgen) sıcaklık profili sonuçları ile EN Ek-A'da yakın boyutlara (300mm*600mm) sahip enkesitin termal profili Şekil 4.6'da görüldüğü gibi kıyaslanmıştır. Kıyaslamada radyal yönler referans alınarak her 100°C 'lık izoterm

çizgisinden alınan koordinat değerleri karşılaştırılmış sonuçların azami %5 hata ile oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Alınan sonuçlarla analiz sonuçları doğrulanmıştır.



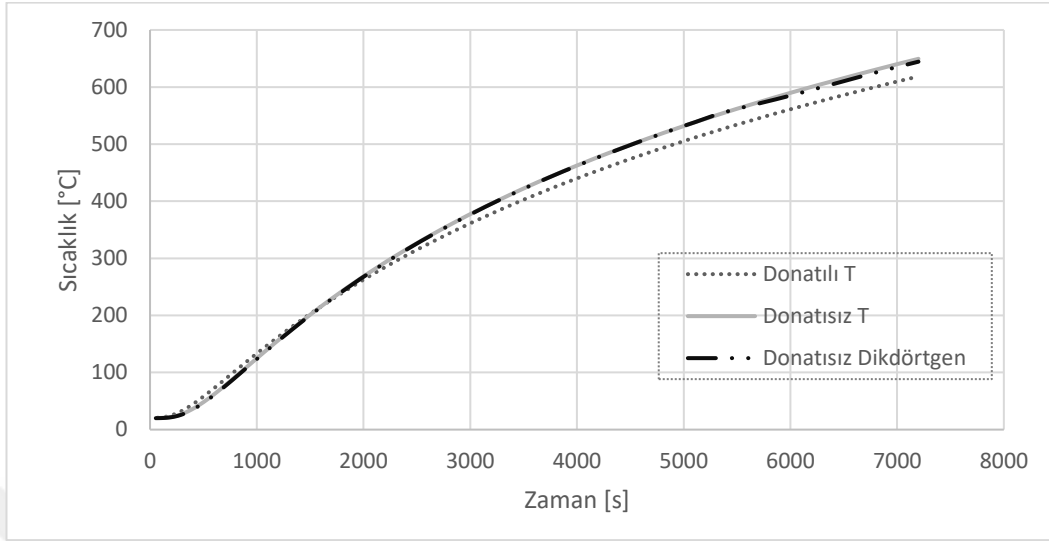
Şekil 4.6 : Sıcaklığın koordinatla değişiminin analiz ve EN sonuçlarının karşılaştırılması – T ve dikdörtgen kesit

Betonarme elemanların eğilmeye karşı dayanımda enerjiyi absorbe eden elemanların dayanımı en önemli rolü oynar ve bu çelik elemanlar sıcaklık değişimiyle dayanımda da değişime sebep olur. Bölüm 4.3.2’te basitleştirilmiş hesap yöntemiyle irdelenen kiriş baz alınarak oluşturulmuş donatılı ve donatısız T ile donatısız dikdörtgen profillerin üzerindeki donatıların koordinatlarının enkesit geometrisine ve malzeme değişkenliğinden nasıl etkilendiği incelenmiştir. İncelenen koordinatlar bu hesaptaki donatıların koordinatlarıdır (bkz. Şekil 4.7).

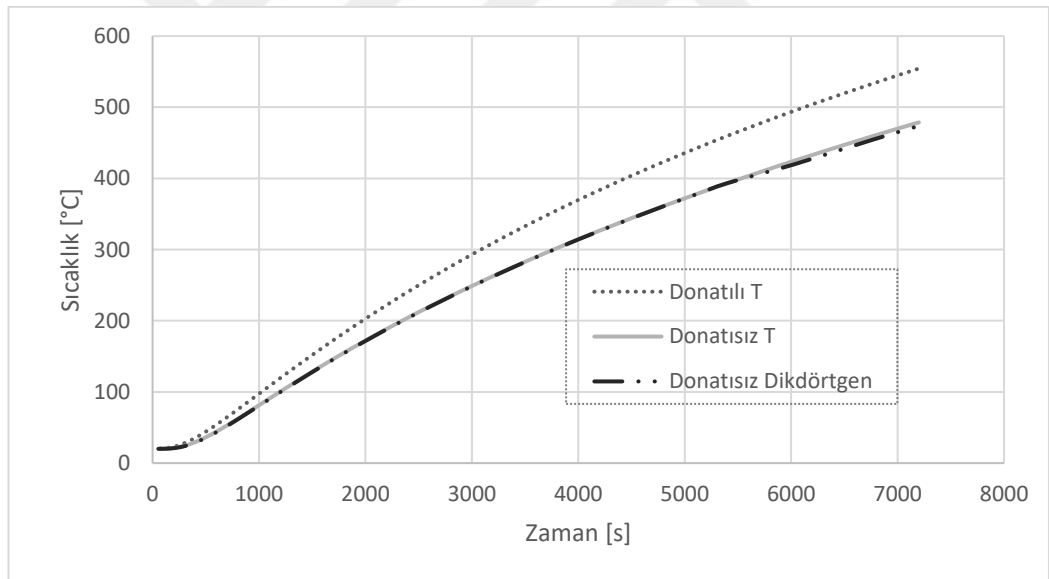


Şekil 4.7 : İncelenen kesitteki donatıların koordinatları ve isimlendirilmesi

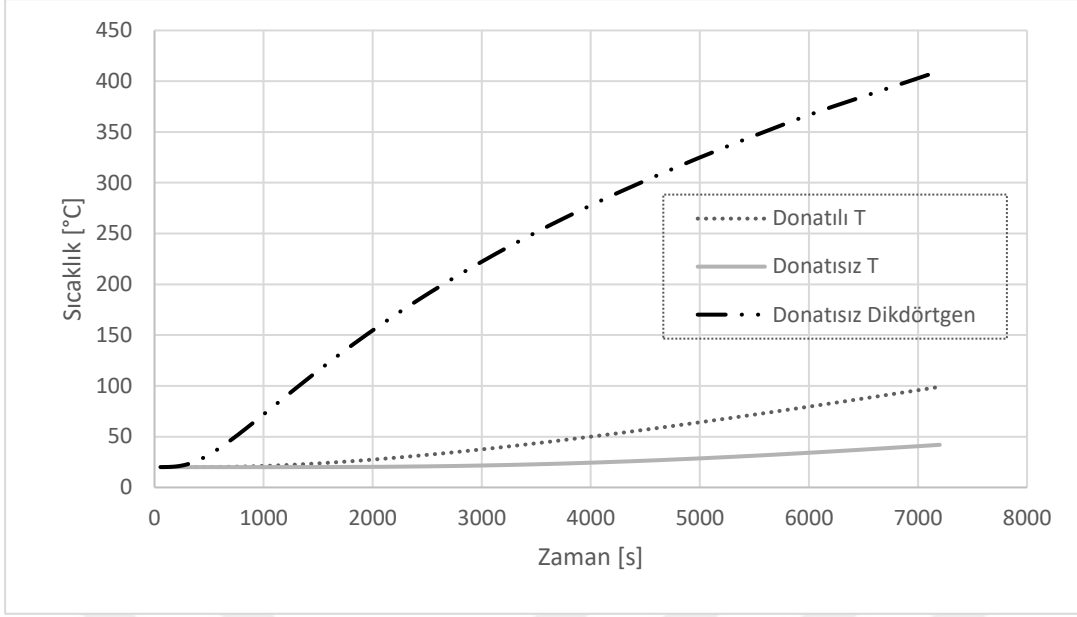
Yukarıda koordinatları verilen noktaların (donatı koordinatları) 120 dakika boyunca zamana bağlı sıcaklık değişimini veren grafikler şekil 4.8, 4.9 ve 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.8 : 1 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi



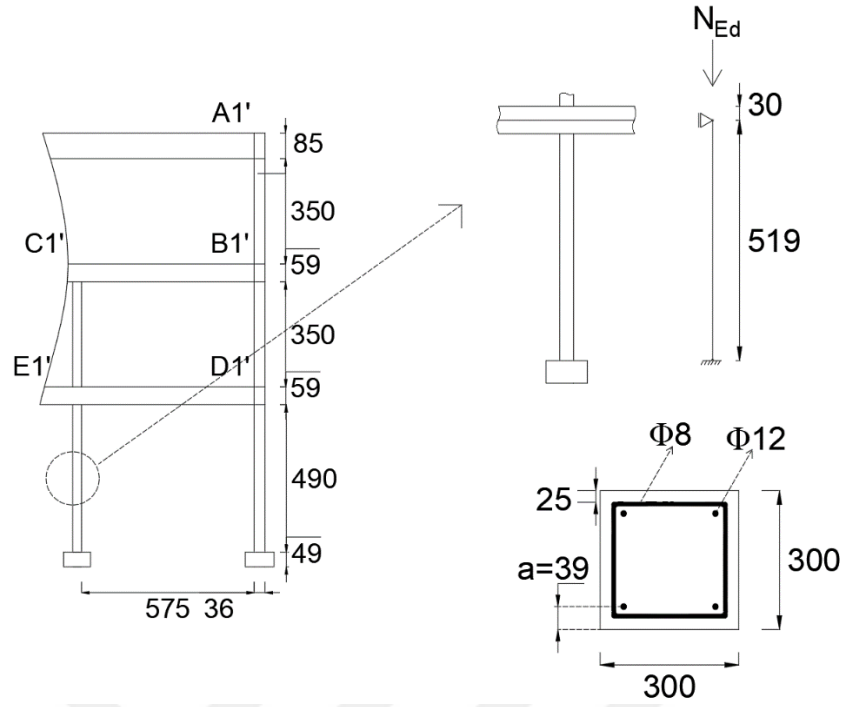
Şekil 4.9 : 2 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi



Şekil 4.10 : 3 no'lu donatının sıcaklığının donatılı T, donatısız T ve dikdörtgen kesitte zamana bağlı değişimi

4.2 Kolonlar

EN 2-1-2 bölüm 5.3.2'de kolonların yangına karşı korunma doğrulamasını A yöntemi olarak tablo verileri (Tablo 5.2a) ve alternatif olarak bir denklem (EN 2-1-2; Eşitlik (5.7)) aracılığıyla sunmaktadır. Her iki doğrulama yöntemi de Bölüm 3.7.3'te açıklanmış ve sınır koşulları derlenmiştir. Bu kısımda eksenel yükleme altında istenmeyen bir dış merkezliğe sahip kolon elemanı hem tablo yöntemi ve ona müteakip denklem yöntemi, hem basitleştirilmiş hesap metodu hem de gelişmiş hesap metodu ile incelenecektir. İncelenecek kolona dair bilgiler aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.11 : İncelenecek kolona ait bilgiler

Kolonların 90 dakikalık bir yangına dayanıp dayanmayacakları incelenmiştir. İncelenen kolonun yangınsız durumda üzerine gelen yük N_{Ed} 720 kN ($N_{Gk} = 338$ kN ve $N_{Qk} = 176$ kN) ve istenmeyen dışmerkezliği 1,3 cm olarak alınmıştır.

4.2.1 Tablo Yöntemi ve Denklem ile inceleme

İncelenen eleman her iki yöntemin de kullanılabilmesi için gereken sınır koşullarını sağlamaktadır (bkz. Bölüm 3.7.3). EN 2-1-2 Tablo 5.2.a'da, minimum kesit boyutları ve merkez mesafeleri yangın dayanım sınıfı ve yük kullanım faktörü μ 'nün bir fonksiyonu olarak verilmiştir. Denklem (5.7), diğer şeylerin yanı sıra, mevcut yangın dayanım süresini yük kullanım faktörünün bir fonksiyonu olarak hesaplar.

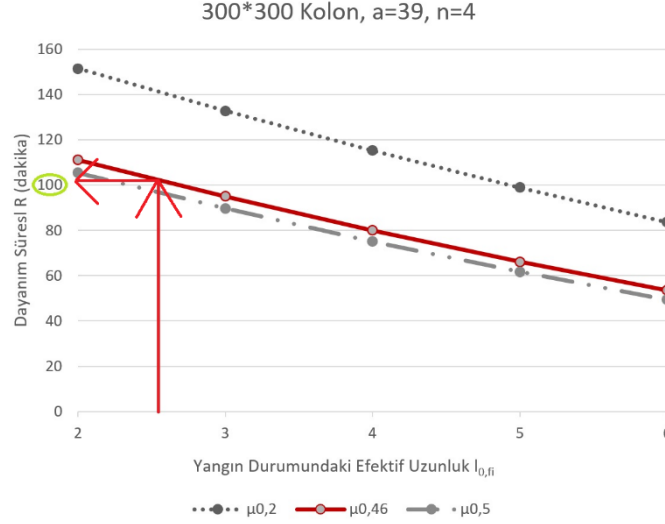
4.2.1.1 Tablo ile inceleme

İlk olarak, hızlı bir hesap yapmak ve güvenli bölgede kalmak adına, kolonun tam kapasitede çalıştığı varsayılmıştır. Böylelikle N_{rd} değeri, kolonun üzerindeki yük olan 720 kN değerine eşit kabul edilmiş ve EN'nin hızlı ve güvenli tasarım için önerdiği yük azaltma faktörü η_{fi} değeri 0,7 olarak alınıp $N_{Ed,fi}$ değeri 504 kN ve bu değerler ile μ_{fi} 0,7 bulunmuştur. Tablo okuması için gerekli diğer değer boyuna donatı aksı ile kolon kenarındaki mesafe olan a değeri; beton örtüsü 25 mm, etriye çapı 8 mm ve boyuna donatının yarıçapı 6 mm olmak üzere 39 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 3).

$\mu_{fi} = 0,7$ ve $a = 39$ mm değerleri ile tablo üzerinden okuma yapıldığında 90 dakikalık bir yangın için iki asgari seçenek sunulmuştur. Kolon genişliği b_{min} 350 mm için a değeri en az 53 mm, 450 mm için ise a değeri 40 mm olarak alınabilmektedir. Her iki seçenekte de mevcut ebadın 90 dakikalık yangına karşı dayanım ihtiyacını karşılamadığı görülmüştür. İncelenen örnekte güvenli tarafta kalmak adına en başta kolonun tam kapasite çalıştığı farz edilip N_{rd} değeri N_{Ed} değerine eşit alınmıştı. Ancak kolonun gerçek eksenel yük taşıma kapasitesi olan 1025 kN 1992-1-1'e (2004) göre hesaplanıp bu değere göre μ_{fi} 0,46 bulunmuştur. Tabloda bu değer için direkt bir değer olmadığından $b_{min} = 300$ mm değeri için $\mu_{fi} = 0,2$ ve $\mu_{fi} = 0,5$ değerleri arasında doğrusal iterasyon yapılmıştır. Yine de gereken a değeri 42 mm çıkararak kolonun 90 dakikalık yangını karşılamadığını göstermiştir.

4.2.1.2 Denklem 5.7 ile inceleme

Aynı kolonun denklem 5.7'e göre hesabı yapılacak olup basınç dayanımı için önerilen katsayı α_{cc} , 0,85 olarak alınmıştır. EN'de bu değer 1 olarak önerilmiş ve tablo 5.2a da bu değere göre oluşturulmuştur. Ancak bu değer patlama gibi ani ve şiddetli olaylara karşı dayanım öngörüldüğünde 1 olarak önerilirken Türk bina deprem yönetmeliği veya İngiliz ve Alman EN ulusal eklerinde 0,85 olarak önerilmiştir (Bamforth ve diğ., 2008). Ayrıca güvenli tarafta olmak adına $l_{0,fi}$ normal sıcaklıktaki l_0 ile aynı alınmış olup incelenecek kolon iç kolon olduğu için bu değer 0,51 olarak alınmıştır. Yapılan hesaplamada $R_{\eta fi}$ α_{cc} 'nin 0,85 alınmasından dolayı ω 'nın hesabına gerek kalmadan ve de μ_{fi} değeri tablo 5.2a hesabındaki 0,46 değeri alınarak hesaplanıp sonuç 44 çıkmıştır. Ayrıca sadece 4 adet boyuna donatı olduğu için $R_n = 0$ alınarak sonuca etki etmemiştir. Diğer etkiler olan R_a , R_l ve R_b de hesaplanarak 300x300'lük iç kolonun toplam yangın dayanımı 100,03 dakika olarak ölçülmüştür. Ayrıca oluşturulan tablodan hızlı bir ölçüm yapılarak yaklaşık olarak 100 dakika değeri saptanmıştır (bkz. Şekil 4.12).



Şekil 4.12 : İncelenen kolonun denklem 5.7'ye göre oluşturulmuş yangın dayanım grafiği

4.3 Kirişler

4.3.1 Sürekli bir kirişin tablo yöntemi ile tasarımı

Bu bölümde tablo yöntemiyle sürekli bir kirişin (bkz. Şekil 4.3) yangın dayanımı hesaplanacaktır. Bu betonarme sürekli kirişin tasarımı Litzner, H. U.'nun (1995) incelemesinden alınmış olup nihai sınır durumdaki iç kuvvetlerle gerçekleştirilmiş ve mesnet momenti elastisite teorisine kıyasla %25 oranında azaltılmıştır. Bu azaltma sonuçlarına göre yapılmış soğuk tasarıma göre yapılan kiriş boyutlandırması Çizelge 4.2'de özetlenmiştir. Ayrıca bir sonraki bölümde basitleştirilmiş hesaplama yöntemiyle de aynı örnek incelenecektir.

Çizelge 4.2 : Kirişin boyutlandırılması

Moment (kNm)	Gereken donatı alanı (cm ²)	Seçilen donatı alanı (cm ²)
Mesnet (üst) -305,22	16,19	16,1 (8 Ø 16)
1 No'lu açıklık 383,18	17,48	19,63 (4 Ø 24)

İncelenen kiriş elemanına ait bilgiler ve dış etkiler ise aşağıda sunulmuştur.

Etkili açıklık uzunluğu: $l_1 = l_2 = l_3 = 6,0$ m

Beton örtüsü: $c = 25$ m

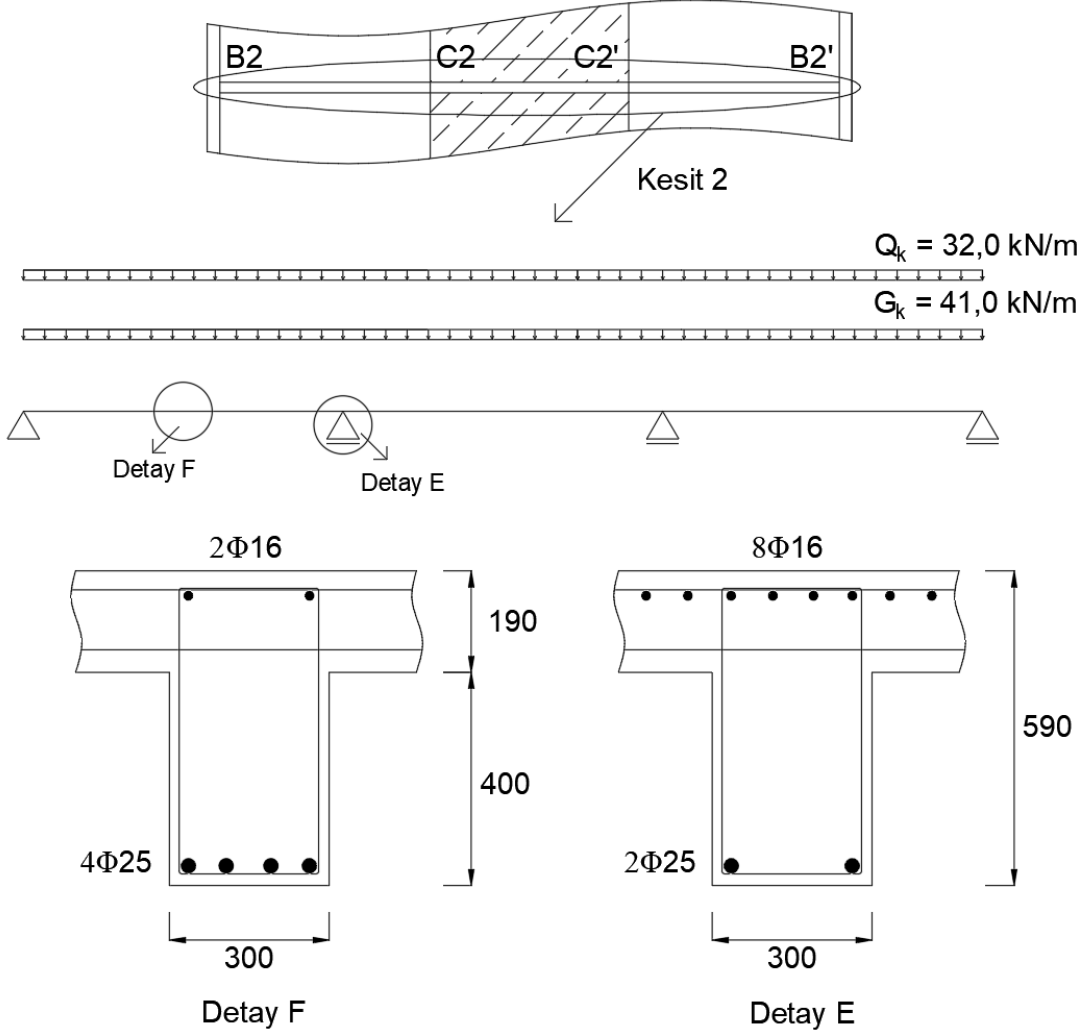
Kiriş boyutları: $b / h / h_f = 300 / 590 / 190$ mm

Sabit (ölü) yükler: $G_k = 41 \text{ kN/m}$

$$F_G = 100 \text{ kN}$$

Hareketli yükler: $Q_k = 32 \text{ kN/m}$

$$F_Q = 30 \text{ kN}$$



Şekil 4.13 : İncelenen kirişin detayları

Statik olarak belirsiz şekilde mesnetlenmiş kirişlerin tablo halinde yangından korunma tasarımı için EN 2-1-2, Tablo 5.6 (bkz. Bölüm 3.10), amaçlanan yangına dayanıklılık süresi R 90'a ulaşmak için gereken kiriş genişliği ve merkez mesafeleri için minimum boyutları içerir. Ancak normal sıcaklık için tasarımdaki moment yeniden dağılımı %15'ten fazla olduğu için Tablo 5.6'daki değerler mevcut durumda kullanılamaz. Sürekli kirişin her bir bölmesi Tablo 5.5'e (bkz. Çizelge 3.9) göre basit mesnetli bir kiriş olarak ele alınmalıdır.

Mevcut eksen mesafesi: $a = \text{nom } c + \varnothing_{\text{etr.}} + \varnothing_{\text{boy.}} = 25 + 10 + 25/2 = 47,5 \text{ mm}$

Mevcut yanıl eksen mesafesi: $a_{\text{sd}} = (b - 6 * \varnothing_{\text{boy}}) / 2 = (300 - 625) / 2 = 75 \text{ mm}$

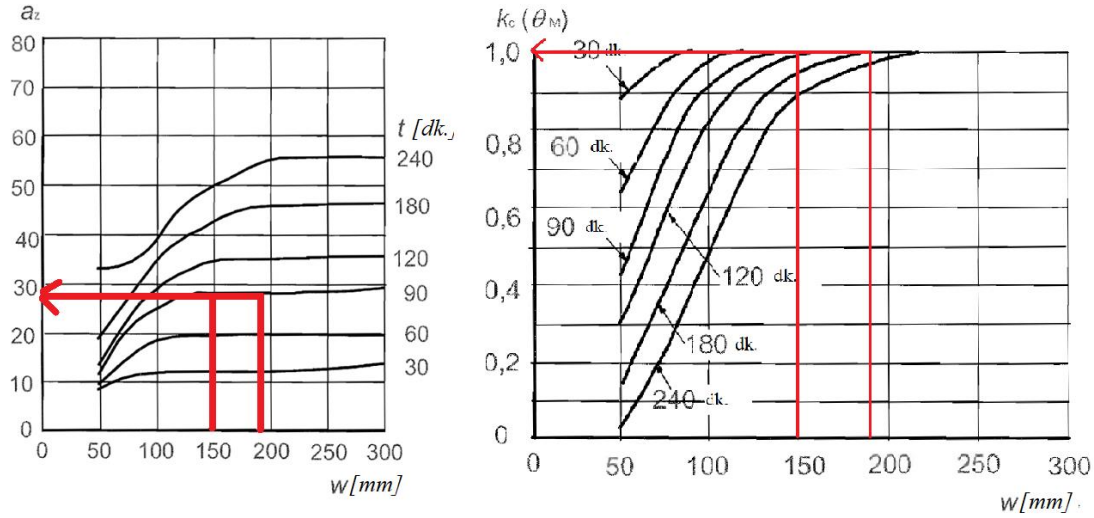
Asgari eksen mesafesi: $a = 40 \text{ mm} < a_{\text{mev.}} = 75 \text{ mm}$

Asgari yanıl eksen mesafesi: $a_{\text{sd}} = 40 \text{ mm} < a_{\text{sd,mev.}} = 75 \text{ mm}$

4.3.2 Sürekli bir kirişin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile tasarımı

Diagram of a T-shaped cross-section. The top flange has a total width of 190. The vertical stem has a width of w_1 . The distance from the left edge of the stem to the center of mass θ_{M1} is 150. The distance from the center of mass θ_{M1} to the right edge of the stem is w_1 . The distance from the center of mass θ_{M1} to the center of mass θ_{M2} is a_{zi} . The distance from the center of mass θ_{M2} to the right edge of the flange is a_{z1} . The distance from the center of mass θ_{M2} to the left edge of the flange is w_2 . The distance from the center of mass θ_{M2} to the center of mass θ_{M1} is a_{z2} .

105

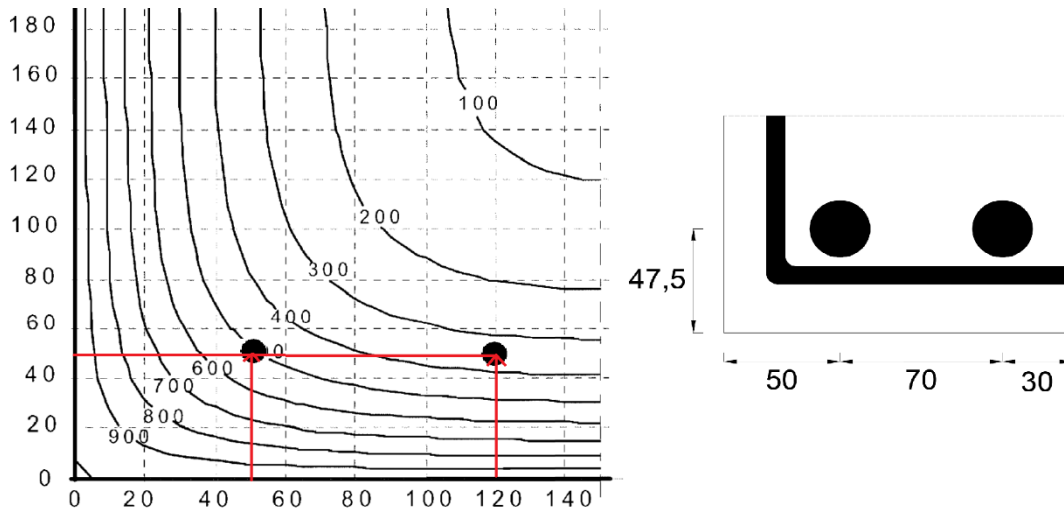


Şekil 4.15 : Beton kesitinin azaltılması (solda: a_z 'nin belirlenmesi; sağda: $k_c(\theta_M)$ 'nin belirlenmesi)

Bölge metodunda etkili beton alanının (bkz. Şekil 4.14) bulunması için a_z , betonun dayanım etkisini yitirdiği derinlik ve $k_c(\theta_M)$, basınç dayanımı azaltma katsayısı değerleri, w değerleri vasıtasıyla bulunur.

$w_1 = 300/2 = 150$ mm değeri ile tablo'dan a_{z1} yaklaşık olarak 28 mm,

$w_2 = 190$ mm değeri ile de a_{z2} yaklaşık olarak 28 mm olarak okunur. Ayrıca $k_c(\theta_M)$ değerleri her iki ayırık için de yaklaşık 1 olarak okunur.



Şekil 4.16 : Açıklık 1'deki donatılar için 90 dakika sonundaki sıcaklığın belirlenmesi

İncelenen elemanın enkesit değerlerine karşılık EN 2-1-2 Ek-E'de bulunamayacak bir profil olmaması durumunda Bölüm 3.6'da anlatılan tasarım adımları ve 4.1'de

anlatılan örnek üzerinden sıcaklık profili oluşturulabilir. Ancak bu enkesitin sıcaklık profili Ek-E'deki bulunması ile açıklıktaki momenti karşılayacak olan alt donatıların (bkz. Şekil 4.13) 90 dk sonunda ulaşacağı sıcaklık değerleri bu profil (bkz. Şekil 4.16) yardımıyla okunmuştur. Okuma ile 90 dakika sonucunda köşe alt donatı yaklaşık olarak 500 °C ve alt orta ise 350 °C değerine ulaşmıştır. E mesnedinin olduğu noktada negatif momenti karşılayacak üst donatıların sıcaklığı, hesaplamayı basitleştirmek amacıyla, tüm donatı barları için döşeme içindeki donatı barlarının sıcaklığı kullanılmıştır. Donatının yangına maruz kalan döşemenin alt tarafından uzaklığı: $x = 190 - 47,5 = 142,5$ mm olduğundan o noktadaki donatıların sıcaklığı yaklaşık 100 °C olarak belirlenmiştir. Donatıların sıcaklıkları 90 dakikalık standart ISO834 yangın eğrisine maruz kalmasıyla belirlenmiş olup aşağıdaki hesaplamalarla bu elemanın yeni dayanımı saptanmıştır.

4.3.2.1 Hesap adımları

Açıklık bölgesindeki pozitif momenti karşılayan alt donatıların yüksek sıcaklık etkisiyle karakteristik dayanımı f_{yk} 'nin azalmasını dikkate almak için $k_s(\theta)$ katsayısı Şekil 4.2a'dan okunur. Sıcak haddelenmiş çekme donatısı için 1 numaralı eğri ($\epsilon_{s,fi} \geq \%2$) ile köşe donatılar için $k_s(500 \text{ °C})$ değeri 0,78, orta donatılar için ise $k_s(350 \text{ °C})$ değeri 1,00 olarak saptanır.

Bölge yöntemi ile kalan azalmış kesitteki donatıların ($\emptyset 25$: $A = 491 \text{ mm}^2$) çekme donatılarının 90 dakika sonundaki yeni toplam dayanımı, $F_{s,fi,d,90}$:

$$F_{s,fi,d,90} = 491 [\text{mm}^2] * 500 [\text{N/mm}^2] * (2 * 0,78 + 2 * 1,0) * 10^{-3} = 874 \text{ kN}$$

olarak bulunur. İç kuvvet dengesinin sağlanması gerekliliğinden $F_{c,fi,d,90}$ değeri de 874 kN olarak bulunur. Ayrıca soğuk boyutlandırmadan bulunan etkili basınç bölgesi genişliği 1320 mm, 100 °C sıcaklıktaki betonun basınç dayanımı azaltma katsayısı 1,0 ile basınç bölgesi yüksekliği y' :

$$y' = 874 [\text{kN}] / (1320 [\text{mm}] * y' * 1,0 * 20,0 [\text{N/mm}^2] * 10^{-3}) = 33,11 \text{ mm}$$

olarak bulunur. Böylece basınç bölgesinin tabliye içinde olduğu görülür. Elde edilen kuvvet dengesi ve kuvvetlerin etki ettiği noktaların bilgisi ile yangın etkisi altındaki tasarım moment dayanımı :

$$M_{R,fi,d,F1} = F_{s,fi,d,90} * (h_{fi} - y'/2) = 874 [\text{kN}] * (542,5 - 33/2) [\text{mm}] * 10^{-3} = 460 \text{ kNm}$$

olarak bulunur.

90 dakika sonundaki yangının etkisiyle azalmış olan moment dayanımı $M_{R,fi,d,F1}$, azaltma faktörü η_{fi} ile azaltılan kirişin üzerindeki moment değeri $M_{Ed,F1}$ (bkz. Çizelge 4.1) kıyaslandığında:

$$M_{R,fi,d,F1} = 460 \text{ kNm} > \eta_{fi} * M_{Ed,F1} = 0,7 * 383,18 \text{ kNm} = 268,23 \text{ kNm}$$

dayanımın açıklık için yeterli olduğu görülmüştür. Ayrıca çelikteki şekil değiştirme yüzdesi $\varepsilon_{s,fi}$ %4,25 değeri ile başta kabul edilen %2'lik uzamadan fazla olma durumunu sağlamıştır. Aşağıda mesnet bölgesindeki hesaplar aynı sıralamayla gösterilecektir. Negatif moment etkisi altında olduğu ve dolayısıyla üst bölgedeki 8 adet donatının sıcaklıkla mukavemetinin düşmeden çekmeye karşı çalıştığı unutulmamalıdır. Ayrıca basınç bölgesi olarak kirişin alt bölgesinin çalıştığı ve sıcaklık etkisi ile kesit kaybının dikkate alınması gereklidir. Donatılarda toplam çekme mukavemeti:

$$F_{s,fi,d,90} = 8 * 201 [\text{mm}^2] * 500 [\text{N/mm}^2] * 1,0 * 10^{-3} = 804 \text{ kN}$$

olarak bulunmuştur. Dengeleyici basınç kuvvetinin hesabını yapmak adına etkili alanın genişliği her iki taraftan da a_{z1} (bkz. Şekil 3.13) değeri düşülerek hesaplanmıştır. Böylelikle basınç bölgesinin etkili yüksekliği:

$$y' = 804 [\text{kN}] / ((300 - 2*28)[\text{mm}] * y' * 1,0 * 20,0 [\text{N/mm}^2] * 10^{-3}) = 164,75 \text{ mm}$$

olarak saptanmıştır. Bu denklik dolayısı ile mesnette oluşan dayanım momenti değeri ise:

$$M_{R,fi,d,E} = F_{s,fi,d,90} * (h_{fi} - a_{z1} - y'/2) = 804 * (542,5 - 28 - 165/2) * 10^{-3} = -347 \text{ kNm}$$

olarak bulunur. Mesnetteki mevcut moment $M_{Ed,E}$ ile kıyaslandığında:

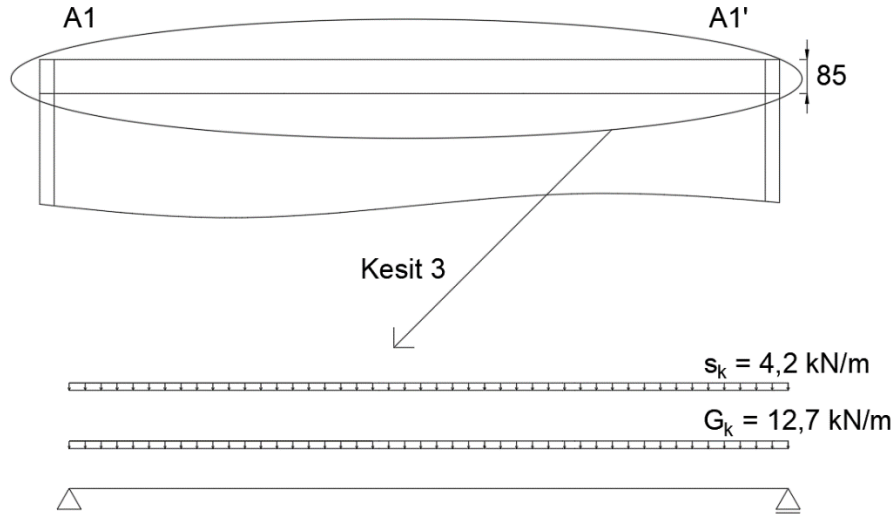
$$M_{R,fi,d,F1} = |-347 \text{ kNm}| > \eta_{fi} * M_{Ed,E} = |0,7 * -305,21 \text{ kNm}| = |-268,23 \text{ kNm}|$$

yeterli dayanım olduğu görülmüştür. Bununla beraber çekme donatısındaki gerilmeyi kontrol etmek gerekli değildir çünkü 100 °C altındaki çelikte herhangi bir azaltma yapma gerekliliği yoktur.

4.3.3 Basit mesnetlenmiş öngermeli tek açıklıklı bir kirişin tablo yöntemi ile tasarımı

Öngermeli izostatik ve hiperstatik mesnetlenmiş kirişler için EN 2-1-2'te bulunan sırasıyla Tablo 5.5 ve 5.6 sunulmuştur (bkz. Çizelge 9 ve 10). Bu tablolar yangın dayanımı doğrulaması için ortalama donatı merkez mesafeleri a ve minimum kiriş genişliği b_{min} için değerler sunar. Bu minimum değerler gerekli yangın dayanım

sınıfının elde edilmesini sağlar. Bu tabloların kullanımı için patlayıcı beton dökülmesinin meydana gelmemesi koşulu gereklidir. Aşağıda İncelenecek tek açıklıklı basit mesnetlenmiş öngermeli kirişin boyutları ve yüklemeleri görülmektedir (bkz. Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Öngermeli kirişin üzerindeki yüklemeler

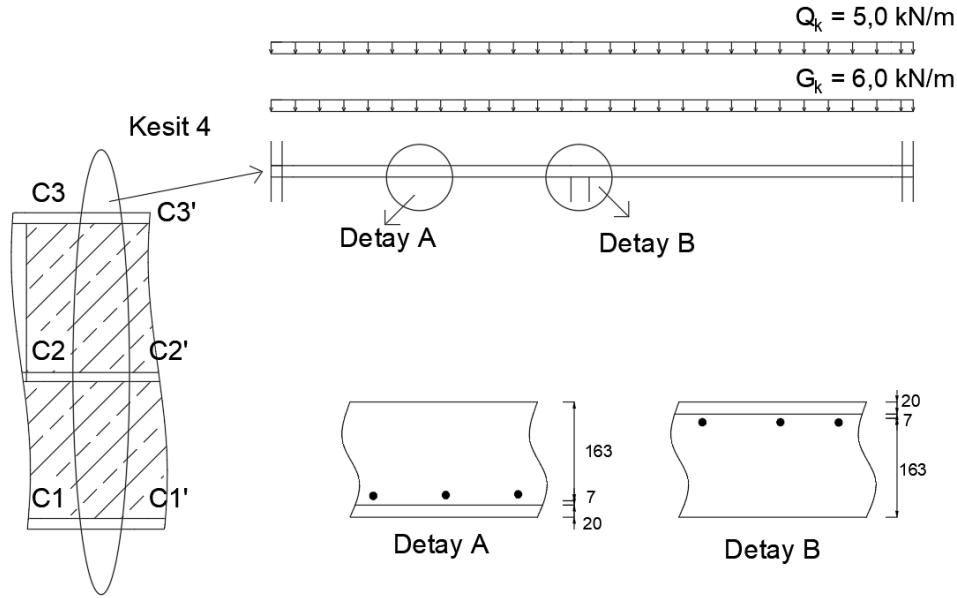
Öncelikle gerekli kiriş genişliği b_{ger} 'i elde etmek için kiriş genişliğinin minimum kesit boyutu b_{min} , $2 * (k-1) * a$ faktörü kadar artırılmalıdır. EN 2-1-2 bölüm 7.2'ye göre k faktörü beton basınç dayanım sınıfına bağlıdır ve burada kullanılan C60/75 betonu için 1,1 olduğu varsayılmaktadır. Merkez mesafesinin a değeri ($a_{Tab} + \Delta a$) toplamından oluşur. Burada Δa , sıcaklığa daha duyarlı öngerme çelik tellerinin kullanıldığını dikkate alarak 15 mm olarak verilmiştir. Ayrıca a_{Tab} değeri 50 mm olarak alınmıştır. b_{min} değeri ise 90 dakikalık yangın başarımı için Çizelge 3.9'dan iterasyon ile 175 mm olarak okunmuştur. Bu değerlerle gerekli b_{ger} uzunluğu:

$b_{ger} = 175 + 2 * (1,1 - 1) * (50 + 15) = 188 \text{ mm} < 190 \text{ mm}$ (mevcut b değeri) ile sağlanmaktadır. Gerekli a değeri ise:

$a_{ger} = (a_{Tab} + \Delta a) * k = (50 + 15) * 1,1 = 71,5 \text{ mm}$ olarak bulunmuştur. Bu değer mevcut a değeri 55 mm'den büyük olduğu için 90 dakikalık yangını sağlamamaktadır. Burada kritik sıcaklık değeri 350°C olduğu ve tablonun bu değere göre kabul edildiği (EN 1992-1-2, 2004) unutulmamalıdır. Böylelikle Δa bölüm 3.7.2'de de hesap adımlarının anlatıldığı gibi kritik sıcaklık ile modifiye edilip gerekli a uzunluğu tekrardan bulununca gerekli a değeri 65 mm değerine indirilmiş ancak mevcut olan değer altına indirilemediği için 90 dakikalık yangını sağlamadığı görülmüştür.

4.4 Tabliyeler

Bu bölümde Şekil 4.18’de gösterilen sürekli kirişin iki farklı yöntemle 90 dakika boyunca yangına karşı dayanımı incelenmiştir. Kesit üzerindeki yükleme durumu ise Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.18 : İncelenen tabliyeye ait detaylar

Kesitle alakalı verilen bilgiler aşağıda verilmiştir.

Etkili açıklıklar: $l_1 = 5,20$ m ve $l_2 = 4,8$ m

Beton kaplama: $c = 20$ mm

Döşeme kalınlığı: $h_s = 190$ mm

Sabit yükler: $G_k = 6.0$ kN/m²

Hareketli yükler: $Q_k = 5.0$ kN/m²

Kombinasyon katsayısı $\Psi_1 = 0.8$

Çizelge 4.3 : Tabliyelerin üzerindeki Moment değerleri ve donatı miktarları

	Moment (kNm/m)	Gereken donatı alanı (cm ² /m)	Seçilen donatı alanı (cm ² /m)
Mesnet (üst)	-31,56	4,7	5,13
1 No'lu açıklık	36,98	5,56	5,89

4.4.1 Sürekli bir tabliyenin tablo yöntemi ile tasarımı

Heperstatik ve basit (izostatik) mesnetlenmiş döşemelerin tablo halinde yangından korunma tasarımı ve doğrulaması için Tablo 5.8 (Çizelge 3.12), amaçlanan yangın dayanımı süresi REI 90'a ulaşmak için gereken döşeme kalınlığı ve merkez mesafeleri için minimum boyutları içerir. Tablo 5.8'deki sayısal değerlerden sütun 2 ve 4, normal sıcaklıktaki moment yeniden dağılımının %15'ten az olması koşuluyla, tek ve iki yönlü çalışan hiperstatik mesnetlenmiş tabliyeler için de geçerlidir. Normal sıcaklıktaki tasarım için, elastisite teorisine kıyasla taşıyıcı momentin %30'u yeniden dağıtılmıştır. Bu nedenle, EN 2-1-2'ye göre, betonarme sürekli döşemenin her bir bölmesi, yangına dayanıklılık sınıfı REI 90 için Tablo 5.8, sütun 2 ve 3'e göre basit mesnetlenmiş bir döşeme olarak doğrulanmalıdır. 90 dakikalık ve tek açıklıklı çalışan tabliye kabulü ile gereken h_s ve a değerlerinin tablodan okunmasıyla h_s için en az 100 mm ve a için en az 30 mm gerekli olduğu görülmüştür. Mevcut h_s değeri 190 mm olduğu için gerekliliği sağlamaktadır. Gerekli aks mesafesi olan a değerinin hesabı:

$$a = 20 + 7,5/2 \approx 23,7 \text{ mm}$$

olarak bulunmuştur. Bu değer gereken değer 30 mm'den az olduğu için betonarme sürekli döşeme yangına dayanıklılık sınıfı REI 90'ı sağlamaz.

500 °C değeri için oluşturulan bu tablolardaki merkez mesafesi a değeri, kritik sıcaklığın 500 °C olmadığı basit mesnetli eğilme bileşenleri için Δa boyutuyla değiştirilebilir. Bölüm 3.7.2'de de açıklandığı gibi Δa değerinin hesabı için kritik sıcaklık değeri olan θ_{cr} ve dolayısıyla $k_s(\theta_{cr}) = \sigma_{s,fi}/f_{yk}$ hesabı:

$$E_{d,fi} = 1,0 * 6,0 + 0,8 * 5,0 = 10,0 \text{ kN/m}^2$$

$$E_d = 1,35 * 6,0 + 1,5 * 5,0 = 15.6 \text{ kN/m}^2$$

$$\gamma_s = 1,15$$

$$A_{s,req} = 5,56 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (bkz. Çizelge 4.2)}$$

$$A_{s,prov} = 5,89 \text{ cm}^2/\text{m} \text{ (bkz. Çizelge 4.2)}$$

değerleri ile:

$$k_s(\theta_{cr}) = (E_{d,fi} / E_d) * (1 / \gamma_s) * (A_{s,req} / A_{s,prov}) = 0,526$$

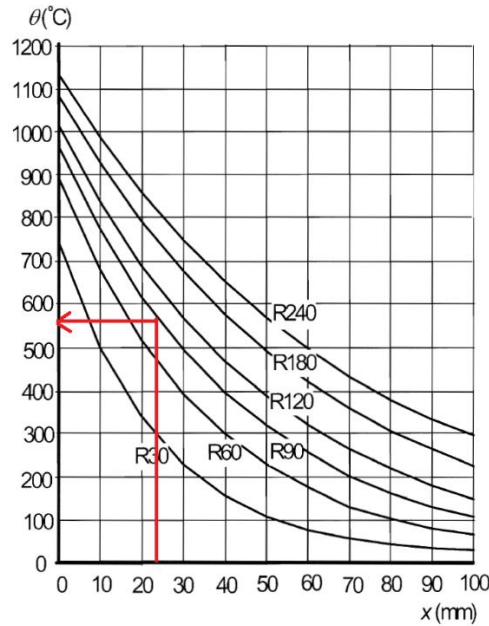
olarak hesaplanır. Şekil 3.16 üzerinden $k_s(\theta_{cr}) = 0,526$ değerine karşılık gelen donatının kritik sıcaklığı θ_{cr} değeri yaklaşık olarak 530 °C olarak okunmuştur. Bu değerle birlikte Δa değeri:

$$\Delta a = 0,1 * (500 - 530) = -3\text{mm}$$

olarak hesaplanır. Böylece gereken a değeri 30 mm'den 27 mm'ye düşürülmüştür. Ancak mevcut a değeri yaklaşık olarak 23,7 mm olduğu için hala bu gereklilik sağlanmamakta bu tabliyenin tablo yöntemiyle yapılan hesapta 90 dakikalık yangına dayanımının olmadığı görülmektedir.

4.4.2 Sürekli bir tabliyenin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile tasarımı

Basitleştirilmiş hesaplama yöntemi, tablo yöntemindeki ikilikten farklı olarak, normal sıcaklıktaki tasarımda %15'ten daha fazla bir moment yeniden dağılımı kullanılmışsa da kullanılabilir. Aks mesafesi tabliye tasarımının gerekliliklerini karşılamıyorsa, Ek E'ye göre basitleştirilmiş hesaplama yönteminin uygulanması avantajlıdır. Uygulama için ön koşullar ise yükün ağırlıklı olarak düzgün dağılmış olması, mesnetlerde yeterli dönme kapasitesinin bulunması, tabliyenin minimum kesit boyutlarına uyulması, $A_{s,prov}/A_{s,req} \leq 1.3$ olması ve mesnet üzerindeki mesnet donatısının 350 °C'yi aşmamasıdır. Mesnet üzerindeki üst donatıdaki sıcaklığı kontrol etmek için EN 2-1-2 Ek A'daki (2004) sıcaklık profilleri (bkz. Şekil 4.19) kullanılabilir.



Şekil 4.19 : 200 mm'ye kadar kalınlığa sahip tabliyeler için sıcaklık profilleri

1 numaralı açıklık ($M_{Rd,fi,F1}$) ve B ($M_{Rd,fi,B}$) mesnedindeki yangın durumundaki tasarım dayanım momenti bölüm 3'te anlatıldığı üzere aşağıda hesaplanmıştır.

Verilen $M_{Ed,F1} = 36,98$ kNm/m ve $M_{Ed,B} = -31,56$ kNm/m değerleri ile,

$a = 23,7$ mm değeri ile okunan $\theta = 560$ °C ve $k_s(560$ °C) = 0,46 değeri hesaplanmış,

$A_{s,prov} / A_{s,req} = 5,98/5,56 = 1,06 < 1,13$ gerekliliğinin sağlandığı görülmüştür.

Mesnetteki moment değerini hesaplamak için gereken:

$d = 190 - 20 - 7/2 = 166,5$ mm ve tablodan 90 dakikalık yangın dayanımı için okunan

$a = 30$ mm değerleri hesaba katılmıştır. Böylece:

$M_{Rd,fi,F1} = (1,15/1,0) * 0,45 * 36,98 * (5,89/5,56) = 20,27$ kNm/m ve

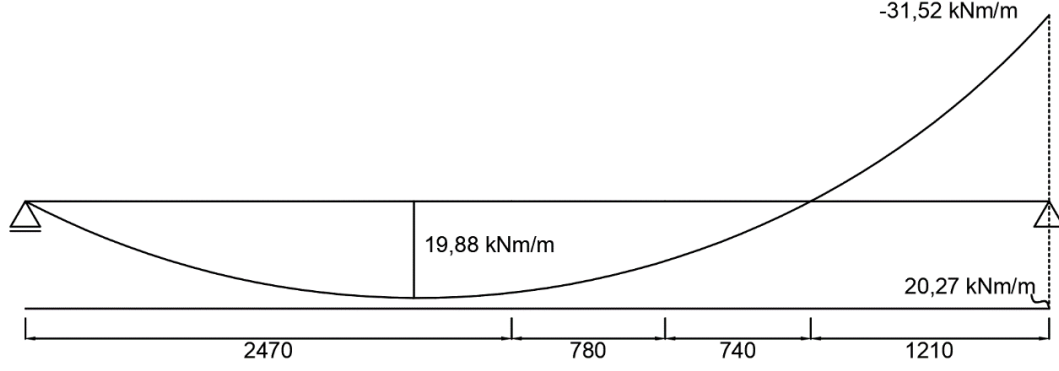
$M_{Rd,fi,B} = (1,15/1,0) * (-31,56) * (5,89/5,56) * ((166,5 - 30) / 166,5) = -31,52$ kNm/m

olarak bulunmuştur. EN 2-1-2'ye göre yukarda hesaplanan dayanım momentinin geçerli olması için donatıların sıcaklığı 350 °C'nin altında olmalıdır. Donatının konumu yukarıda hesaplanan d değeri ile eşdeğer olup 162,5 mm'deki donatının 90 dakika sonundaki sıcaklığı 100 °C olarak okunur ve bu değer limit değerinin altındadır, böylelikle hesaplanan dayanım momenti değerleri geçerlidir.

Dayanım değerinin hesabından sonra yangın durumundaki etki eden moment değerinin ($M_{Ed,fi,F1}$) hesaplanıp dayanım momentinden az olup olmadığı dolayısı ile 90 dakikalık yangın sonunda tablo yöntemi ile dayanımı sağlanamayan tabliyenin basitleştirilmiş hesap metodu ile sağlayıp sağlamadığı kontrol edilecektir. Yangın durumundaki $G_k + \Psi_1 * Q_k$ yük kombinasyonu 10,0 kN/m² olarak hesaplanır. Böylece yangın durumunda etki eden moment değeri:

$$maksM_{Ed,fi,Açıklık} = M_{Rd,fi,Mesnet} \left(0,5 + \frac{M_{Rd,fi,Mesnet}}{2q_{Ed,fi}l^2} \right) + \frac{q_{Ed,fi}l^2}{8} \quad (4.1)$$

denklemiyle 19,88 kNm/m olarak hesaplanır. Ve bu hesap sonucunda açıklıktaki dayanım momenti değerinin küçük bir farkla altında kalarak REI 90 dayanım sınıfını sağladığı görülmüştür. Mevcut moment değerleri ve moment sıfır noktası Şekil 4.8'de gösterilmiştir.



Şekil 4.20 : 90 dakikalık yangın sonundaki etki eden moment değeri ve dayanım momenti değeri

EN 2-1-2 (2004) yangın durumundaki ankraj uzunluğun $l_{bd,fi}$ 'nin de kontrol edilmesini söyler. Normal sıcaklıktaki tasarımdan alınan ankraj uzunluğu değeri $l_{bd} = 0,17$ değeri ile hesaplanır. Yangın durumunda B mesnedi üzerindeki gerekli ankraj uzunluğu l_{fi} değeri ise $l_{0,fi}$ (bkz. Şekil 4.8) ile $l_{bd,fi}$ 'nin toplanması sonucunda bulunur.

$$l_{bd,fi} = (1,15/1,0) * (1,0/1,5) * 0,17 = 0,13 \text{ m}$$

$$l_{fi} = 1,21 + 0,13 = 1,34 \text{ m}$$

Normal sıcaklıktaki tasarımda, B mesnedinin üzerindeki $x = 1,95$ m'ye kadar olan donatı açıklık 1'e doğru ankrajlanır. Bu $l_{fi} = 1,34$ m ile yangındaki çekme kuvveti hattının yeterince kapsanmış olduğu anlamına gelmekte ve tabliyenin 90 dakikalık yangına karşı dayanımının geçersiz olmadığını göstermektedir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde önceki bölümlerde edinilen bilgiler, betonarme yapıların yangın durumu için nasıl tasarlandığına eleştirel bir gözle bakmak için kullanılmaktadır. Ayrıca EN 2-1-2'ye (2004) göre yapılan analizler ve aynı şekilde bu yönetmeliğin çerçevelediği sınır koşullarıyla yapılan gelişmiş analizlerin sonuçları sunulmaktadır. Bu sonuçların kıyaslanması yapılmış olup elde edilen çıkarımlarla öneriler sunulmaktadır. Ek olarak, araştırmanın durumu tartışılmakta ve nihayetinde hem malzemeyi hem de yapısal davranışı gerçekçi bir şekilde temsil edebilecek bir beton modeli oluşturmak için nerede daha fazla çalışma yapılması gerektiğine dair önerilerde bulunmaktadır. Burada açıklanan fikirler, bu çalışmanın yazılması ve çok sayıda kitap ve makalenin incelenmesi sürecinde oluşmuştur.

5.1 EN 2-1-2'ye Göre Yapılan Analizler ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

- EN 2-1-2'ye göre kolon elemanlarının yangına karşı tasarımı Tablo 5.2a ile her ne kadar hızlı olsa da ekonomik kesitler elde etmek pek mümkün olmamaktadır. Bunun sebeplerinden biri tablodaki değerlerin $l_{o,fi}$ değerleri 3 metre olan kolonlar için hazırlanmış olması bir diğeri ise α_{cc} 'nin 1 olarak kabul edilmiş olmasıdır. Bu aynı zamanda $E_{d,fi}$ için daha yüksek değerler ve dolayısıyla aynı kullanım derecesi ile daha kısa yangına dayanıklılık sürelerine neden olur. İncelenen kolon örneğinde bu durum görülmüş olup Tablo ile R90 dayanım sınıfı sağlanmazken, denklem 5.7 ile yapılan hesapta bu değer sağlandığı görülmüştür. Denklemin bir başka tercih edilme sebebi ise dikdörtgen enkesitli kolonlarda 12 metre uzunluğundaki ($l_{o,fi} < 6$) kolonlara kadar tasarıma izin verilmesidir. Bu değer tablo yönteminde 6 metre ile sınırlı kalmaktadır. Ayrıca Hauer'e (2015) göre Tablo 5.2a'daki $\mu_{fi} = 0,2$ ($b' = 200$ mm) und $\mu_{fi} = 0,5$ ($b' = 300$ mm) değerleri $A_s < 0,04 A_c$ gerekliliği nedeniyle kolon kesitine yerleştirilemeyen nispeten büyük donatı alanı ihtiyacına yol açmaktadır.
- Bununla birlikte Hosser ve Zehfuss'un (2017) genel hesaplama metoduyla aynı kolonu incelemesiyle elde ettiği dayanım süresi yaklaşık 126 dakika olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlara dayanarak basınç etkisi altındaki elemanların

gelişmiş hesaba göre R120 sınıfını sağlayabilecek tablo yöntemi ile aynı tasarım yapıldığında R90 sınıfını dahi sağlamadığı görülmüştür.

- Sonuç olarak kolon elemanlarında denklem 5.7 veya gelişmiş hesap metodu ile yangın dayanım hesabı tercih edilmeli, tablo 5.2a halihazırda kullanımda olan yapıların kolon elemanlarının istenilen yangın dayanımını sağlayıp sağlamadığını tespit etmek adına hızlı bir seçenek olarak görülmelidir.
- Basınç elemanları gibi eğilme elemanlarının da EN 2-1-2'ye göre tablo ile tasarımı veya yangın doğrulaması mümkündür. Ancak talep edilen dayanım sınıfına yakın dayanıma sahip elemanlarda tablolar ile yapılan değerlendirmeler yetersiz kalırken, kirişlerde Ek-B'deki ve de tabliyelerde Ek-E'deki basitleştirilmiş hesap metoduna göre yapılan hesaplamalarla dayanımların sağlandığı, sınırdaki elemanların yangına karşı direncinin olduğu görülmüştür.
- Bunun sonucunda basınç elemanlarının hesabındaki durumla paralel olarak basitleştirilmiş veya gelişmiş hesap metodu ile yangın dayanım hesabı tercih edilmeli, tablolarda sunulan değerler halihazırda kullanımda olan yapıların eğilme elemanlarının istenilen yangın dayanımını sağlayıp sağlamadığını tespit etmek adına hızlı bir seçenek olarak görülmelidir.
- EN 2-1-2'nin yangına karşı önerdiği tablolar, denklemler ve basitleştirilmiş hesap yöntemleri ile de tasarım yapılsa da; oluşturulan tabloların ve denklemlerin belli bir örnekteki elemanların test verileri sonucunda üretilmesinden dolayı yapılan analizler ekonomik açıdan verimli olmamaktadır. Bununla birlikte basitleştirilmiş hesap yöntemleri için Ek-A'da sunulan sıcaklık profilleri üretilirken baz alınan kesitlerde donatı etkisi göz önünde bulundurulmamıştır. Şekil 4.6'da da görüldüğü gibi tasarlanacak kesitte donatının bulunması, çelik malzemesinin betona göre daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olmasından dolayı termal profilleri etkilemiştir. Böylelikle yapılacak hesapta donatı koordinatlarında daha (bkz. 4.8, 4.9 ve 4.10) yüksek bir sıcaklığın mevcut olduğu ve dolayısıyla malzemenin dayanımının daha düşük olacağı unutulmamalıdır.
- Ayrıca EN 2-1-2 yangının simülasyonu için birkaç farklı denklem önerse de üretilen sıcaklık profilleri ISO834 standart yangın eğrisine göre üretilmiştir.

Yangın eğrilerinin ortam şartları, yanıcı maddenin cinsi, yapının türü gibi birçok değişkenden etkilendiği unutulmamalı standart yangınlar için sunulan bu profiller her yangına uygulanmamalıdır.

- Bundan dolayı ANSYS gibi bilgisayar tabanlı programlarla termal ve mekanik analiz yapılarak, her eleman için en efektif boyutlandırma tespit edilmelidir.

5.2 Yangına Karşı Tasarım

Eurocode, yangın durumu için beton yapıların tasarlanması amacıyla hem kuralcı hem de performansa dayalı bir dizi prosedür sunmaktadır. Bununla birlikte, ikincisinde sadece temel ilkeler verilmiştir ve araştırma yoluyla hala bazı boşlukların doldurulması gerekmektedir. Bu nedenle, pratik tasarımda en yaygın kullanılan yöntemler ya tablolastırılmış veriler ya da azaltılmış kesitli elemanların basitleştirilmiş hesaplama yöntemi ve nominal bir ısı eğrisine dayalı sıcaklık profilleri olarak görülmektedir.

Bu nominal yangınların kullanımının kesinlikle avantajları vardır. Basit sıcaklık-zaman ilişkileri nedeniyle benimsenmeleri kolaydır. Ayrıca standart yangın, yaygın olarak kullanılan ve ampirik olarak geliştirilmiş birçok tasarım yöntemi ve modeli için bir temel sağlar. Malzeme özellikleri, tablolastırılmış veriler, sıcaklık dağılımlarını gösteren grafikler gibi girdiler Eurocode'da verilmiş ve standart yangın testleri ile geliştirilmiştir. Ancak gerçekçi yangınlar standart yangın tarafından düzgün bir şekilde temsil edilebilir mi sorusuna cevap hayırdır. Çünkü gerçekçi yangın yüklerinde yakıt miktarı, kompartımanın boyutları, havalandırma koşulları ve daha pek çok faktör rol oynarken, standart yangın eğrisi sadece zamana bağlıdır. Tasarımcılar başka bir nominal yangın eğrisi seçebilirler, ancak Eurocode'da verilen üç seçenek geniş bir aralık oluşturmamaktadır. Nominal yangınlar ayrıca kompartıman içinde tekdüze bir sıcaklık alanı olduğunu varsayar, dolayısıyla tam gelişmiş bir yangını temsil eder. Parlama evresi sonrası yangın, bir yapının yangın davranışının değerlendirilmesinde kesinlikle çok önemlidir, ancak can güvenliği göz önünde bulundurulduğunda parlama öncesi davranış çok önemlidir. Bu aşama tahliyenin mümkün olduğu tek aşamadır. Unutulmamalıdır ki parlama sadece kapalı bir bölmede meydana gelebilir ve böyle olsa bile, büyük bölmelerde meydana gelmeden önce önemli miktarda zaman geçebilir. Dolayısıyla lokalize yangınların örneğin büyük salonlarda veya açık yapılarda hasara yol açma olasılığı daha yüksektir. Nominal yangınların bir diğer

eksikliği de monoton bir şekilde artması ve yangının soğumasını modellememesidir. Söndürme nedeniyle yavaşça veya aniden soğuyan betonun davranışı bu nedenle tasarıma dahil edilmemektedir, oysa bu aşamada ek hasar meydana gelebileceği iyi bilinmektedir.

Eurocode büyük ölçüde, elemanların yangın dayanımına ve daha spesifik olarak yangın nedeniyle elemanların göçmesine odaklanmaktadır. Yapının bütününe ve davranışına daha fazla dikkat edilmelidir. En önemli olgu, şüphesiz ki elemanların termal genişmesi ve bununla birlikte gelen tüm etkilerdir. Bir elemanın eksenel genişmesi yeniden yüklendiğinde, bu elemanın mukavemetini büyük ölçüde azaltabilir. Termal genişme serbest olarak meydana gelebildiğinde, önemli ikinci dereceden etkilere neden olabilir. Bu aynı zamanda beton yapıların tasarımında her türlü göçme modunun hesaba katılması gerektiğini göstermektedir. Bu çok çeşitli hata modlarında yangın güvenliği söz konusu olduğunda, betonun sadece basınç dayanımıyla tanımlanamayacağı açıkça ortaya çıkmaktadır. Süneklik, termal genişme, geçici şekil değiştirme gibi özellikler de önemli bir rol oynamaktadır. Bu durum, dökülmeye bakıldığında daha da netleşmektedir. Böylelikle geçirgenlik, nem taşınımı gibi özellikler beton yapıların sınır durum tasarımı için son derece önemli hale gelir. Bu özelliklerin birçoğu, örneğin beton karışım tasarımı, üretim süreci, kürlenme koşulları veya uygulama gibi temel faktörlerden de etkilenir. Bu da yangın söz konusu olduğunda beton tipinin belirleyiciliğini gösterir. Sonuç olarak, ideal bir yapısal yangın tasarımı, EN'nin önerdiğinin aksine her bir beton türü için ayrı tasarım kuralları içermelidir.

Günümüzde uygulamacı mühendisler tarafından kullanılan tasarım kurallarının gerçek bir yangında beton bir yapının gerçek davranışını yeterince yansıtmadığı giderek daha açık hale gelmektedir. Ya performansa dayalı bir yaklaşım gereklidir ya da yeni kurallar geliştirilmelidir. Her halükârda daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır ve aşağıda daha fazla araştırma yapılması gereken bazı alanlar tartışılmaktadır.

5.2.1 Malzeme Özellikleri

Isıtılmış betondaki çeşitli fiziksel ve kimyasal dönüşümlerin ve bunun sonucunda mekanik ve termal özelliklerin sıcaklığa bağımlılığının anlaşılması iyi bir tasarımın anahtarıdır. Yıllar boyunca birçok araştırma yapılmıştır ancak hala daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir. Tüm bu etkiler karakteristik kapsamlı yangın testleri ile

incelenmiştir. Bununla birlikte, çoğu test önceden belirlenmiş belirli sıcaklıklara göre gerçekleştirilmiştir ve bu testlerin gerçekleştirildiği test fırınları tek tip bir ısıtma ortamı geliştirmeye odaklanmaktadır. Mekânsal tekdüzeliğin beton malzeme ve sonuç olarak beton yapı üzerindeki etkisi bu nedenle yeterince bilinmemektedir. Bununla birlikte, bu tekdüze olmayan ısıtma, elemanlarda ek termal gerilmelere neden olabilir ve dökülme olgusunda bir rol oynayabilir.

5.2.2 Patlayıcı Dökülme

Yangının en önemli etkilerinden olan patlayıcı dökülme bu çalışmada Bölüm 2.4.1 başlığı altında anlatılmış ve bu anlatı burada özetlenmiştir. Onlarca yıldan bu yana birçok çalışma yapılmış ve buna rağmen patlayıcı dökülmenin altında yatan mekanizma hala bilinmemektedir. Patlayıcı dökülmeyi etkileyen çok sayıda faktör ve bunların karmaşık bağlantıları konunun karmaşıklığına katkıda bulunmaktadır. Ayrıca bu faktörlerden bazılarının, nemin taşınması veya gözenek basıncı gibi, ölçülmesi özellikle zordur. Şu anda popüler bir konu olduğunu alanda yapılan yüksek sayıdaki araştırma göstermektedir. Bunun nedeni özellikle yüksek mukavemetli beton kullanılan tünellerle ilgili olarak koruyucu ölçümlerin geliştirilmesi için sektörden gerçek zamanlı bir talep olmasıdır. En iyi bilinen çözüm polipropilen liflerdir. Olumlu etkileri iyi tespit edilmiştir ve birçok araştırmacı şu anda bu malzemenin kullanımı için kılavuzlar geliştirmektedir. Bununla birlikte, mekanizmaları tam olarak anlaşılmadığı sürece, bu basit bir tahminden ve kapsamlı yangın testlerinden öteye geçmeyecektir. Bu konu için Eurocode'da verilen tasarım kuralları oldukça basittir ve patlayıcı dökülme üzerinde etkisi olduğu bilinen birçok faktörü göz ardı etmektedir. Dökülmeye karşı koruyucu önlemler çok az rehberlik sağlamaktadır. Bu da yönetmeliklerin bu gibi koruyucu önlemler ile güncellenip geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

5.2.3 Yeni Tür Betonlar ve Beton Modelleri

Yapı malzemeleri alanındaki araştırmacılar her gün yeni beton türlerinin veya yeni çimentolu malzemelerin geliştirilmesi üzerinde çalışmaktadır. Çok iyi bilinen bazı örnekler arasında yüksek dayanımlı beton ve kendiliğinden yerleşen betonun yanı sıra son derece yenilikçi çimentolu kompozitler de yer almaktadır. Çelik yerine cam veya karbon fiber ile donatı gibi diğer donatı türleri de incelenmektedir. Bu yeni gelişmelerin yangın durumundaki davranışları açısından incelenmesi de unutulmamalıdır. Karşılaşılan bileşenlerin sayısı artmaktadır ve bunların birbirleri

üzerindeki davranışlarının yanı sıra betonun mikro yapısı ve termo-mekanik özellikleri üzerindeki etkileri de araştırılmalıdır.

Modelleme düzeyinde geçici gerilmenin ortaya çıkarılması gibi pek çok ilerleme kaydedilmiştir. Ancak özellikle dökülme gibi ayrıntılı davranışlarla ilgili pek çok sorun hala cevap beklemektedir. Önceki modelleme çalışmaları genellikle betonun termo-mekanik davranışını aşırı basitleştirmiş ve bu nedenle kabul edilebilir sonuçlar vermemiştir. Birçoğu termal bağımlılığı dahil etmek için izotermal modelleri genişletmiştir. Termal etkilere betonun mukavemet ve rijitlik gibi termo-mekanik malzeme özelliklerinde sıcaklığa bağımlılığı eklenerek dahil edilmiştir. Ancak bu durum betonun karmaşık termo-mekanik davranışını yakalamakta başarısız olmaktadır. Ayrıca bu yaklaşım, malzeme özelliklerinin geçirdiği geri döndürülemez değişiklikleri hesaba katmamaktadır. Yapısal betonu gerçekçi bir şekilde simüle etmek için, mekanik, termal ve hidral etkileri ve bunların birbirleri üzerindeki etkilerini birleştiren tam birleştirilmiş bir modelin yanı sıra geçici şekil değiştirmenin de dahil olduğu sofistike bir yapısal analiz kullanılmalıdır.

5.3 Öneriler ve Gelecek Çalışmalar

Birçok durumda, uygulamada kullanılan tasarım yöntemleri beton yapıların yangın sırasındaki gerçek davranışlarını tam olarak yansıtmamaktadır. Uygun bir tasarım, gerçekçi ve fiziksel parametrelere dayalı bir yangın tasarımını içermeli ve yapı, elemanlar arasındaki tüm etkileşimler dikkate alınarak bir bütün olarak incelenmelidir. Ancak bu unsurları pratik bir tasarım aracına dahil etmek için hala çok fazla çalışmaya ihtiyaç vardır.

İlk olarak daha gerçekçi termal maruziyetlerin beton malzeme üzerindeki etkilerinin sistematik bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Bu aynı zamanda yangının soğuma aşamasındaki davranışı da kapsamaktadır. Oluşumunu doğru bir şekilde tahmin edebilmek ve böylece güvenli bir tasarım üretebilmek için karmaşık olan dökülme olgusunun anlaşılması gerekmektedir. Bu nedenle, uygun test yöntemleriyle elde edilen büyük miktarda deneysel veriye hala ihtiyaç duyulmaktadır. Eurocode'daki patlayıcı dökülme ile ilgili tasarım kuralları çok basittir. Ancak bu aşamada ek kurallar geliştirmek, altta yatan mekanizma bilinmediğinden ve bu kuralların deneysel olarak geliştirilmesi gerektiğinden zordur. Bununla birlikte, Eurocode, örneğin belirli bir beton türünün dökülmesini önlemek için ne miktarda PP lifine ihtiyaç duyulduğunu

hesaplamak adına belirli bir test prosedürü de belirleyebilir. Ayrıca, yeni geliştirilen beton türlerinin yangın davranışlarının incelenmesi de unutulmamalıdır.

Malzemenin daha iyi anlaşılmasının yanı sıra, uygun bir yapısal analize de ihtiyaç vardır. Yangın sırasında ve sonrasında farklı göçme modlarının araştırılması için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ayrıca, kısıtlanmış termal genişlemenin etkileri tasarım kodlarına dahil edilmelidir. Aynı durum, yapısal davranış üzerindeki etkileri hala daha derinlemesine incelenmesi gereken termal geçici stres için de geçerlidir. Beton yapıların davranışını bir bütün olarak anlamak ve küçük ölçekli olayların etkisini tam incelemek için depreme karşı tasarımda olduğu gibi pahalı olan büyük ölçekli bina testleri gereklidir. Bir başka büyük bilgi kaynağı da gerçek yangın olaylarında bulunabilir. Ancak bu sonuncusu için daha iyi dokümantasyon gerekmektedir.

Bilgisayar destekli non-lineer analizler ile yapılabilecek çalışmaları dikkate aldığımızda araştırılacak birçok konu başlığı mevcuttur. Bu çalışmada da araştırılmış olan yapı elemanlarının kritik enkesitlerinin termal analizi ANSYS ile yapılmış olup mekanik yüklemeler analize dahil edilmemiştir. İleriki çalışmalarda termal ve mekanik yükler analiz paket programlar vasıtasıyla birlikte çözdürülerek termal etkilerin mekanik yüklemelere karşı davranışları eş zamanlı hesaplanabilir.

Sıcaklık sınır koşulunun yangından dolayı zamana bağlı olması mekanik yüklemedeki nümerik çözümün hem zaman hem konum değişkenleri eş zamanlı hesaba katılması gerekir. Ayrıca malzemenin mekanik özelliklerinin sıcaklığa bağlı bir fonksiyon olması da (Bkz. Çizelge 3.1 ve 3.3) sayısal çözümlemeyi oldukça zorlaştırır. Çözüme yakınsamak daha hassas hesaplama gerektirdiği için daha yüksek işlemci gücüne sahip bilgisayarlar ve daha fazla süre gerektiği göz ardı edilmemelidir.

Son olarak amaç, betonarme yapıların hem malzeme hem de yapısal açıdan yangına maruz kaldığında gerçek davranışını yansıtan bir bünye modeli geliştirmektir. Bu, daha önce tartışılan unsurlar ne kadar iyi anlaşılırsa, beton modellerin gerçekliğe o kadar iyi yaklaşabileceği anlamına gelir. Bu modeller daha sonra betonarme yapıların davranışını tam olarak araştırmak ve tahmin etmek, yeni tasarım kodları ve yöntemleri sağlamak için sonlu eleman analizi ile birlikte kullanılabilir. Yapısal betonu gerçekçi bir şekilde simüle etmek için, mekanik, termal ve hidral etkileri ve bunların birbirleri

zerindeki etkilerini ve ayrıca geçici gerilmeyi de içeren sofistike bir yapısal analizi bir araya getiren tamamen birleştirilmiş bir model kullanılmalıdır.



KAYNAKLAR

- Adam, L.** (2006). *Fire performance of reinforced concrete slabs*. (Yüksek lisans tezi), Worcester Polytechnic Institute, ABD.
- Ali, F., Nadjai, A., Silcock, G., & Abu-Tair, A.** (2004). Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns. *Fire safety journal*, 39(6), 433-445.
- Aliş, B., Yazici, C., & Mehmet Özkal, F.** (2022). Investigation of fire effects on reinforced concrete members via finite element analysis. *ACS omega*, 7(30), 26881-26893.
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Murali, G., & Abdelgader, H. S.** (2022). Fire spalling behavior of high-strength concrete: A critical review. *Construction and Building Materials*, 341, 127902.
- Anderberg, Y.** (2004). The effects of the constitutive models on the prediction of concrete mechanical behaviour and on the design of concrete structures exposed to fire. In *Workshop Fire Design Of Concrete Structures: What Now* (pp. 37-47).
- ASTM E119-18c** (2018) Standard test methods for fire tests of building construction and materials. ASTM International, Standard
- Bamforth, P., Chisholm, D., Gibbs, J., & Harrison, T.** (2008). Properties of concrete for use in Eurocode 2.
- Bahr, O., Schaumann, P., Bollen, B., & Bracke, J.** (2013). Young's modulus and Poisson's ratio of concrete at high temperatures: Experimental investigations. *Materials & Design*, 45, 421-429.
- Banerji, S., & Kodur, V.** (2022). Effect of temperature on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *Fire and Materials*, 46(1), 287-301.
- Boström, L., Larsen, C. K.** (2006). Concrete for tunnel linings exposed to severe fire exposure. *Fire Technology*, 42, 351–362. <https://doi.org/10.1007/s10694-006-0006-0>
- Buch, S. H., & Sharma, U. K.** (2019). Fire resistance of eccentrically loaded reinforced concrete columns. *Fire technology*, 55, 1517-1552.
- Buchanan, A. H., & Abu, A. K.** (2017). Structural design for fire safety. John Wiley & Sons.
- Burnaz, O.** (2016). *Betonarme yapılarda yangın ve bu yapıların yangın etkisi altında doğrusal olmayan davranışlarının incelenmesi* (Doctoral dissertation, Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Campbell, R., Evarts, B., & Molis, J. L.** (2019). Firefighter Injuries in the United States – 2018, Report, National Fire Protection Association, Quincy, MA.
- Connolly, R. J.** (1994). *The spalling of concrete in fires*. (Doktora tezi). University of Aston, Birmingham.
- Cortés, D., Gil, D., Azorín, J., Vandecasteele, F., & Verstockt, S.** (2020). A review of modelling and simulation methods for flashover prediction in confined space fires. *Applied Sciences*, 10(16), 5609.
- Denoël J. F.** (2007). Fire Safety and Concrete Structures, FEBELCEM - Federation of Belgian Cement Industry, 90 pp.
- Dong, H., Cao, W., Bian, J., & Zhang, J.** (2014). The fire resistance performance of recycled aggregate concrete columns with different concrete compressive strengths. *Materials*, 7(12), 7843-7860.
- EN 1992-1-2** (2004). Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- EN 1991-1-2** (2002). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- EN 1990** (2002). Eurocode - Basis of structural design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]
- Franssen, J. M.** (2000). Design of concrete columns based on EC2 tabulated data—a critical review. In *1st int. Structures in Fire workshop*.
- Fu, Y., & Li, L.** (2011). Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. *Materials and structures*, 44, 361-376.
- Guidance Paper L** (2003). Application and use of the Eurocodes. European commission services, Brussels, 27 November 2003, pp. 39.
- Guo, Z., & Shi, X.** (2011). *Experiment and calculation of reinforced concrete at elevated temperatures* (pp.56-66). Elsevier.
- Günay, U., Ulusoy, S., Bekdaş, G., and Nigdeli, S. M.** (2023). Optimum Design of Reinforced Concrete Columns in Case of Fire. In *Hybrid Metaheuristics in Structural Engineering: Including Machine Learning Applications* (pp. 35-48). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Hager, I., Tracz, T., Śliwiński, J., & Krzemień, K.** (2016). The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. *Fire and materials*, 40(5), 668-682.

- Haksever, A., & Anderberg, Y.** (1982). Comparison between measured and computed structural response of some reinforced concrete columns in fire. *Fire Safety J.*, 4(4), 293-297.
- Harada, T., Takeda, J., Yamane, S., & Furumura, F. J. S. P.** (1972). Strength, elasticity and thermal properties of concrete subjected to elevated temperatures. *Special Publication*, 34, 377-406.
- Hauer, I. M.** Tech-News Nr. 2015/03 Folge 1 Massivbau.
- Hosser, D., & Zehfuss, J.** (2017). *Brandschutz in Europa-Bemessung nach Eurocodes: Erläuterungen und Anwendungen zu den Brandschutzteilen der Eurocodes 1 bis 6*. Beuth Verlag.
- ISO 834-1-1999.** (2002). *Fire-resistance test - elements of building construction*. International Organization for Standardization.
- Khoury, G. A.** (2008). Passive fire protection of concrete structures. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 161(3), 135-145.
- Khoury, G.A.** (2000), Effect of fire on concrete and concrete structures. *Prog. Struct. Engng Mater.*, 2:429-447. <https://doi.org/10.1002/pse.51>
- Khoury, G. A., & Anderberg, Y.** (2000). Concrete spalling review. *Fire Safety Design*, 60, 5-12.
- Kılıç, M.** (2018). Gelişmiş ülkelerde ve Türkiye’de yangın istatistikleri. *Yangın ve Güvenlik Dergisi*, 199, 8-10.
- Klingsch, E., Frangi, A., & Fontana, M.** (2013). Explosive spalling of concrete - Test report. IBK Tests report No. 352, Institute of Structural Engineering (IBK), ETH Zurich, Switzerland.
- Kodur, V. K. R., & Sultan, M. A.** (1998). Structural behaviour of high strength concrete columns exposed to fire.
- Krishna, D. A., Priyadarsini, R. S., & Narayanan, S.** (2019). Effect of elevated temperatures on the mechanical properties of concrete. *Procedia Structural Integrity*, 14, 384-394.
- Kupfer, H. B.** (1973). Das Verhalten des Betons unter mehrachsiger Kurzzeitbelastung unter besonderer Berücksichtigung der zweiachsigen Beanspruchung. *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 229, 1-105.
- Kupfer, H. B. & Gerstle, K. H.** (1973). Behavior of concrete under biaxial stresses. *Journal of Engineering Mechanics Division (ASCE)* 99 (EM4), 852–866.
- Lackner, R. & Mang, H. A.** (2007). Kapitel VIII Mehrskalenmodelle für die Berechnung von Flachentragwerken. *Betonkalender 2007*, 21–68.
- Lie, T. T.** (1989). Fire resistance of reinforced concrete columns: a parametric study. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1(4), 121-129.

- Lin, T. D., Zwiers, R. I., Burg, R. G., Lie, T. T., & McGrath, R. J.** (1992). *Fire resistance of reinforced concrete columns* (No. RD101B).
- Litzner, H. U.** (1995). Grundlagen der Bemessung nach Eurocode 2–Vergleich mit DIN 1045 und DIN 4227. *Beton-Kalender 1995*, 519-727.
- Liu, J. C., Tan, K. H., & Yao, Y.** (2018). A new perspective on nature of fire-induced spalling in concrete. *Construction and Building Materials*, 184, 581-590.
- Lura, P., & Terrasi, G. P.** (2014). Reduction of fire spalling in high-performance concrete by means of superabsorbent polymers and polypropylene fibers: Small scale fire tests of carbon fiber reinforced plastic-prestressed self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*, 49, 36-42.
- Majorana, C. E., Salomoni, V. A., Mazzucco, G., & Khoury, G. A.** (2010). An approach for modelling concrete spalling in finite strains. *Mathematics and Computers in Simulation*, 80(8), 1694-1712.
- McNamee, R.** (2013). *Fire Spalling of Concrete: Theoretical and Experimental Studies*.
- Onaran, K.** (1999). *Malzeme bilimi*. Bilim ve Teknik Kitabevi.
- Schneider, U.** (1988). Concrete at high temperatures—a general review. *Fire safety journal*, 13(1), 55-68.
- Seręga, S.** (2015). Effect of transverse reinforcement spacing on fire resistance of high strength concrete columns. *Fire Safety Journal*, 71, 150-161.
- Takagi, J.** (2007). *Collapse performance assessment of steel-framed buildings under fires*. (Doktora tezi). Stanford University, ABD.
- Van Mier, J. G. M.** (1984). *Strain-softening of concrete under multiaxial loading conditions* (pp. 32-39). Eindhoven: Technische Hogeschool Eindhoven.
- Vassart, O., Zhao, B., Cajot, L. G., Robert, F., Meyer, U., Frangi, A., ... & Pinto, A.** (2014). Eurocodes: background & applications structural fire design. *JRC Scientific and Policy Reports EUR*, 36698.
- Wade, C., Spearpoint, M., Bittern, A., & Tsai, K.** (2007). Assessing the Sprinkler Activation Predictive Capability of the BRANZFIRE Fire Model. *Fire Technology*, 43, 175-193. 10.1007/s10694-007-0009-5.
- Xu, Y. Y., & Wu, B.** (2009). Fire resistance of reinforced concrete columns with L-, T-, and +-shaped cross-sections. *Fire Safety Journal*, 44(6), 869-880.
- Zehfuss, J., & Hosser, D.** (2007). A parametric natural fire model for the structural fire design of multi-storey buildings. *Fire safety journal*, 42(2), 115-126.
- Zhang, B., & Bicanic, N.** (2002). Residual fracture toughness of normal-and high-strength gravel concrete after heating to 600 C. *Materials Journal*, 99(3), 217-226.

Zhou, J., & Wang, L. (2019). Repair of fire-damaged reinforced concrete members with axial load: a review. *Sustainability*, 11(4), 963.

Url-1 <<https://standards.cencenelec.eu/dyn/www/f?p=CEN:5>>, erişim tarihi 25.06.2023.





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Uğur Günay

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2016, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019 yılından beri Türk-Alman Üniversitesinde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.