



**BETON İLE DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLARIN
YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ**

İbrahim AYDIN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

2022

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BETON İLE DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLARIN YANGIN
PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ**

İbrahim AYDIN

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

29 / 04 / 2022

İbrahim AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

BETON İLE DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLARIN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE BELİRLENMESİ

İbrahim AYDIN

Erzurum Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI

Günümüz yapılarında kullanılan beton ile doldurulmuş çelik kolonlar, özellikle yüksek binalar ve geniş açıklıklı yapılardaki inşaatlarda popülerlik kazanmaktadır. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar, betonun yangına karşı çelikten daha iyi bir performans sergilemesinden dolayı beton ve çeliğin beraber kullanılmasıyla meydana gelmektedir. Bu şekilde yapılan uygulama ile sadece beton veya sadece çelik ile yapılan kolonlara nazaran daha iyi bir yangın dayanımı elde edilmektedir. Bunun yanı sıra geleneksel beton kolon veya çelik kolona göre yüksek mukavemet, süneklik, enerji emme kapasitesi, iyi yapısal yangın direnci, ısı izolasyonu gibi özelliklere de etkisinden dolayı yapıya önemli ölçüde avantaj sağlar. Bu özelliklerinden dolayı beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yeni binalarda olduğu kadar 1980'lerden kalma binalarda ve köprülerde de yoğun olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın etkisinde performanslarını etkileyecek potansiyel parametreler kesit şekli (kare, dairesel, dikdörtgen), enine kesit boyutları, çelik kalınlığı, pasif yangın koruma kalınlığı olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler farklı (Standart, Hızlı, Yavaş, Smouldering) yangın etkilerinde beton ile doldurulmuş çelik bir kolonun performansını hangi ölçülerde ne kadar etkilediği belirlenmiştir. Analizler yapılırken Eurocode dizayn eşitlikleri ve ANSYS programı kullanılarak matematiksel model geliştirilmiştir. Bu analizler sonucunda farklı parametrelerde beton ile doldurulmuş çelik kolonun mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

2022, 130 sayfa

Anahtar Kelimeler: Beton ile doldurulmuş çelik kolon, Yangın performansı, Isı transferi, Isı iletkenliği

ABSTRACT

MS. Thesis

DETERMINING THE FIRE PERFORMANCE OF CONCRETE FILLED STEEL (CFS) COLUMNS WITH VARIOUS PARAMETERS

İbrahim AYDIN

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Burak Kaan ÇIRPICI

Concrete-filled steel columns are becoming increasingly popular in today's construction, particularly in the construction of high-rise buildings and large-span structures. Concrete-filled steel columns are made by combining concrete and steel, as concrete is more fire resistant than steel. This application provides a higher level of fire protection than concrete or steel-only columns. Furthermore, when compared to typical concrete or steel columns, they provide a substantial benefit to the structure due to their effect on attributes such as high strength, ductility, energy absorption capacity, superior structural fire resistance, and heat insulation. Due to their qualities, concrete-filled steel columns were widely utilized in new buildings, as well as in buildings and bridges, beginning in the 1980s. In this study, the cross-section shape (square, circular, and rectangular), cross-section dimensions, steel thickness, and passive fire protection thickness are all potential parameters that might affect the performance of concrete-filled steel columns under fire. The impact of these characteristics on the performance of a steel column filled with concrete in various fire effects (Standard, Fast, Slow, Smouldering) has been determined. Using Eurocode design equations and the ANSYS application, a mathematical model was created throughout the analysis. The mechanical properties of the steel column filled with concrete were investigated in different parameters as a consequence of these analyses.

2022, 130 pages

Keywords: CFST columns, Fire performance, Heat transfer, Thermal conductivity

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Tez çalışması boyunca her türlü desteğini ve bilgisini esirgemeyen danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleri ile destek veren Erzurum İnşaat Mühendisleri Odası Başkanı Abdulkadir ORHAN'a, kıymetli meslektaşlarım ve kıymetli büyüklerim Ömer Faruk YARBA ve Mustafa ERCAN'a, iş yeri arkadaşlarım Sinan PEKEL ve Hasan DAĞ'a, Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Nazif ORHAN'a teşekkür ederim.

Son olarak hayatım boyunca her daim yanımda olan ve her zaman bana destek olan aileme ve Melike İŞLER'e teşekkür ederim.

İbrahim AYDIN
Nisan 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç ve Kapsam	3
1.2. Tezin Yapısı	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	5
3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR	9
3.1. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonların Kullanım Alanları.....	10
3.2. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonların Avantaj ve Dezavantajları	13
3.3. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolon Tipleri	16
3.3.1. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon	16
3.3.2. Spiral takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolon	18
3.3.3. Çelik uç takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolon	18
3.3.4. Pasif yangın korumalı beton ile doldurulmuş çelik kolon	19
3.3.5. Yüksek dayanımlı beton ile doldurulmuş çelik kolon.....	20
3.4. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonlarda Yangın Performansı	21
4. MATERYAL ve YÖNTEM	22
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	22
4.1.1. Sonlu elemanlarda analiz türleri.....	26
4.2. Yangına Karşı Tasarımda Genel İlkeler.....	28
4.2.1. İngiliz standartları BS 5950 bölüm 8 (BSI 1990)	28
4.2.2. Limit sıcaklık yöntemi ile moment kapasitesi yönteminin karşılaştırması.....	32
4.2.3. Eurocode 3 bölüm 1.2 metodu (CEN 2005b)	34
4.3. Eurocode 3 Yönteminde Yapılan Değişiklikler	40
4.4. Çelik Kolon ve Kirişlerde Sıcaklık Hesaplamaları	42

4.5. Kullanılan Malzemelerin Isıl (Termal) Özellikleri	43
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	52
5.1. Validasyon Model Çalışması	52
5.1.1. Validasyon modeli – 1	52
5.1.2. Validasyon modeli – 2	56
5.2. Model Özellikleri	60
5.2.1. Termal özellikler	60
5.2.2. Yangın eğrileri	62
5.2.3. Meş özellikleri.....	64
5.3. Pasif Yangın Koruyucu Boya Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi.....	71
5.4. Çelik Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi	81
5.5. Beton En Kesitinin Yangın Performansına Etkisi.....	91
5.6. En Kesit Şeklinin Yangın Performansına Etkisi	101
5.7. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi.....	111
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	124
KAYNAKLAR	128

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
T_{fi}	Yangın sıcaklığı (°C)
T_s	Çelik sıcaklığı (°C)
λ_c	Betonun ısı iletkenliği (W/mK)
λ_p	Yangından koruma sisteminin (malzemenin) ısı iletkenliği (W/mK)
ρ_p	Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi (kg/ m ³)
ρ_{st}	Çeliğin birim hacim kütlesi
Δt	Zaman adımı (sn)
ΔT_{fi}	Δt süresince ortam yangın sıcaklığındaki artış (K)
V	Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m ³ /m)
(A_m/V)	Kesit faktörü (1/m)
A_m	Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı (m ² /m)
C_c	Betonun özgül ısısı (J/kgK)
C_p	Yangından koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı (J/kgK)
C_{st}	Çeliğin özgül ısısı (J/kgK)
d_p	Yangından koruma malzemesinin kalınlığı (m)
f_{ck}	Betonun 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı
$f_{ctk\ 0.05}$	Betonun karakteristik çekme dayanımı
f_{ctm}	Betonun çekme dayanımı
f_{ts}	Donatı karakteristik çekme dayanımı
f_{ys}	Donatı karakteristik akma dayanımı
$\dot{h}_{net}$	Birim alana düşen net ısı akısının tasarım değeri (W/m ²)
k_{sh}	Gölgeleme etkisi için düzeltme faktörü
$k_{y,T}$	Çelik kirişin yüksek sıcaklıktaki etkin akma mukavemetindeki azalma faktörüdür
M_c	Plastik momentteki eğilme
M_f	Yangına maruz kirişteki maksimum eğilme momenti

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1. Beton ile doldurulmuş çelik kolon kesitleri.....	9
Şekil 3.2. Çin’de bulunan 121 m açıklığa sahip Liantou köprüsü (Anonymous 2022)..	11
Şekil 3.3. Canton Kulesinde kullanılan beton ile doldurulmuş çelik kolonlar (Anonymous 2010).....	11
Şekil 3.4. Beton ile doldurulmuş çelik kolondan oluşan köprü ayağı (Aydın 2008).....	12
Şekil 3.5. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlardan oluşan çok katlı yapı (Aydın 2008)	13
Şekil 3.6. İçi boş ve beton doldurulmuş çelik kolonun burkulma modları (Aymaz 2016)	14
Şekil 3.7. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon kesiti (Xiang et al. 2014).....	17
Şekil 3.8. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon detayı (Zhou and Han 2018).....	17
Şekil 3.9. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda spiral takviyesi (Krishan et al. 2017)	18
Şekil 3.10. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda çelik uç kullanımı (Shekastehband et al. 2017).....	19
Şekil 3.11. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda pasif yangın koruma kesiti (Song et al. 2020).....	20
Şekil 4.1 Sonlu elemanlar yöntemi çalışma prensibi.....	22
Şekil 4.2. Serbestlik derecesi şematik gösterimi.....	23
Şekil 4.3. Lineer tek boyutlu ve eğrisel boyutlu element gösterimi	24
Şekil 4.4. Meş örneği ve meşlemede kullanılan elementler.....	25
Şekil 4.5. Meş içinde düğüm noktalarının gösterimi	25
Şekil 4.6. Çelik kolon-kirişin sıcaklık-yük oranını durumlarının grafiği	30
Şekil 4.7. Çizelge 4.2’deki hesaplamalar için veriler	32
Şekil 4.8. Çeliğin yangındaki mukavemet azaltma faktörüne göre narinliği.....	36
Şekil 4.9. Yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulma modifikasyon faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.....	38
Şekil 4.10. İnce döşemeli çelik kirişteki sıcaklık dağılım gösterimi	42
Şekil 4.11. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi	45
Şekil 4.12. American Society Structural Fire Protection çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi (ASCE 1992)	46

Şekil 4.13. Çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi	47
Şekil 4.14. American Society Structural Fire Protection’da çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi (ASCE 1992)	47
Şekil 4.15. Betonun ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi	48
Şekil 4.16. American Society Structural Fire Protection’da sıcaklığın fonksiyonu olarak normal ve hafif betonda ısı iletkenlik (ASCE 1992).....	49
Şekil 4.17. Betonun sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi	49
Şekil 4.18. Betonun sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi (ASCE 1992)	50
Şekil 4.19. Pasif yangın koruyucu boyanın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi (Wang et al. 2013).....	51
Şekil 5.1. Birinci validasyon modelinin ANSYS’den görüntüsü	53
Şekil 5.2. Birinci validasyon modelinin ANSYS’den en kesiti	54
Şekil 5.3. Birinci validasyon modelinde kullanılan meş görüntüsü.....	54
Şekil 5.4. Birinci validasyon modelinde çelik sıcaklık dağılımı	55
Şekil 5.5. Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması.....	55
Şekil 5.6. Isıl iletkenliğin zamana bağlı değişimi (Song et al. 2020)	57
Şekil 5.7. İkinci validasyon modelinin ANSYS'den görüntüsü.....	57
Şekil 5.8. İkinci validasyon modelinin ANSYS'den alınan en kesiti.....	58
Şekil 5.9. İkinci validasyon modelinde kullanılan meş görüntüsü	59
Şekil 5.10. İkinci validasyon modelinde beton içi sıcaklık dağılımı	59
Şekil 5.11. Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık zaman karşılaştırması	60
Şekil 5.12. Dairesel kesitli kolon modellemesinin ANSYS'den görüntüsü	62
Şekil 5.13. Dairesel kesitli kolon modellemesinin ANSYS'den en kesit görüntüsü.....	62
Şekil 5.14. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması.....	64
Şekil 5.15. Dairesel modelde kullanılan 0,01 metre büyüklüğündeki meş görüntüsü....	66
Şekil 5.16. Skewness değerinin 0-1 aralığında değerlendirmesi	67
Şekil 5.17. Element quality değerinin 0-1 aralığında değerlendirmesi.....	68
Şekil 5.18. Aspect ratio değerinin 1-20 aralığında değerlendirmesi.....	68
Şekil 5.19. Dairesel kesitli bir kolonun skewness kriteri ile değerlendirilmesi.....	69
Şekil 5.20. Dairesel kesitli bir kolonun element quality kriteri ile değerlendirilmesi	69
Şekil 5.21. Dairesel kesitli bir kolonun aspect ratio kriteri ile değerlendirilmesi.....	70
Şekil 5.22. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_8)	72

Şekil 5.23. D_200_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	72
Şekil 5.24. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_16)	73
Şekil 5.25. D_200_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	73
Şekil 5.26. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_24)	74
Şekil 5.27. D_200_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	74
Şekil 5.28. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_8)	75
Şekil 5.29. D_200_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	75
Şekil 5.30. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_16)	76
Şekil 5.31. D_200_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	76
Şekil 5.32. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_24)	77
Şekil 5.33. D_200_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	77
Şekil 5.34. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_8)	78
Şekil 5.35. D_200_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	78
Şekil 5.36. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_16)	79
Şekil 5.37. D_200_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	79
Şekil 5.38. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_24)	80
Şekil 5.39. D_200_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	80
Şekil 5.40. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_0,8)	82
Şekil 5.41. D_250_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	82
Şekil 5.42. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_1,6)	83
Şekil 5.43. D_250_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	83
Şekil 5.44. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_2,4)	84
Şekil 5.45. D_250_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	84
Şekil 5.46. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_0,8)	85
Şekil 5.47. D_250_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	85
Şekil 5.48. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_1,6)	86

Şekil 5.49. D_250_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	86
Şekil 5.50. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_2,4).....	87
Şekil 5.51. D_250_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	87
Şekil 5.52. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_0,8).....	88
Şekil 5.53. D_250_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	88
Şekil 5.54. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_1,6).....	89
Şekil 5.55. D_250_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	89
Şekil 5.56. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_2,4).....	90
Şekil 5.57. D_250_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	90
Şekil 5.58. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_0,8)	92
Şekil 5.59. D_300_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	92
Şekil 5.60. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_0,8)	93
Şekil 5.61. D_300_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	93
Şekil 5.62. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_0,8)	94
Şekil 5.63. D_300_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	94
Şekil 5.64. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_1,6)	95
Şekil 5.65. D_300_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	95
Şekil 5.66. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_1,6)	96
Şekil 5.67. D_300_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	96
Şekil 5.68. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_1,6)	97
Şekil 5.69. D_300_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	97
Şekil 5.70. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_2,4)	98
Şekil 5.71. D_300_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	98
Şekil 5.72. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_2,4)	99
Şekil 5.73. D_300_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	99
Şekil 5.74. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_2,4)	100
Şekil 5.75. D_300_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	100
Şekil 5.76. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_8_0,8)	102
Şekil 5.77. K_200_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	102
Şekil 5.78. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_8_2,4)	103
Şekil 5.79. K_200_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	103
Şekil 5.80. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_16_2,4)	104
Şekil 5.81. K_200_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	104
Şekil 5.82. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_8_1,6)	105

Şekil 5.83. K_250_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	105
Şekil 5.84. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_16_1,6)	106
Şekil 5.85. K_250_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	106
Şekil 5.86. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_24_1,6)	107
Şekil 5.87. K_250_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	107
Şekil 5.88. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_16_0,8)	108
Şekil 5.89. K_300_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	108
Şekil 5.90. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_24_0,8)	109
Şekil 5.91. K_300_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	109
Şekil 5.92. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_24_2,4)	110
Şekil 5.93. K_300_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	110
Şekil 5.94. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (K_200_8_2,4)	112
Şekil 5.95. DD_300_24_2,4_slow en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	112
Şekil 5.96. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (K_300_24_2,4)	113
Şekil 5.97. DD_300_24_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	113
Şekil 5.98. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_8_2,4)	114
Şekil 5.99. DD_300_24_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı	114
Şekil 5.100. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_2,4)	115
Şekil 5.101. DD_200_8_2,4_slow en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	115
Şekil 5.102. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (DD_200_8_2,4)	116
Şekil 5.103. DD_200_8_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	116
Şekil 5.104. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (DD_300_24_2,4)	117
Şekil 5.105. DD_200_8_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı	117
Şekil 5.106. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_0,8)	118
Şekil 5.107. D_300_24_0,8_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı	118
Şekil 5.108. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_1,6)	119

Şekil 5.109. D_300_24_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı	119
Şekil 5.110. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_16_2,4)	120
Şekil 5.111. D_300_24_1,6_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı.	120
Şekil 5.112. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_24_2,4)	121
Şekil 5.113. D_300_24_0,8_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı	121
Şekil 5.114. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_250_24_2,4)	122
Şekil 5.115. D_300_24_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı.	122



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. Çelik sıcaklık sınırlamaları	28
Çizelge 4.2. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi için örnek hesaplamalar.	31
Çizelge 4.3. Plastik eğilme moment kapasitesi yönteminin kullanımı ve hesaplanması.	33
Çizelge 4.4. Yanal burulma burkulma için İngiliz Standardı (BSI 1990) ve Eurocode 3 (CEN 2005a) hesaplamalarının karşılaştırılması.	35
Çizelge 5.1. Meş özelliklerinin boyuta göre karşılaştırması.....	65



1. GİRİŞ

Ateş, insan uygarlığının gelişme sürecinde ilk önemli güç kaynağıydı. Ancak binlerce yıllık insanlık tarihi, yangının büyük felaketlerini de beraberinde getirdiğini göstermektedir. Yangın, en şiddetli çevre koşullarından birini temsil eder. Şimdiye kadar yangın hala ciddi afetlerin en yaygın nedenidir. Modern toplumda, insanoğlu barınma ihtiyacını karşılamak için binaları kullanmaktadır. Binalardan kaynaklı yangınların zararları giderek daha ciddi hale gelmektedir. Yangın güvenliği, insanların kamu güvenliği için hala en önemli konulardan biridir. Yapıların ömürleri boyunca karşılaşılabilecekleri yangın dolayısıyla yangından korunma amaçlı uygun bina tasarımı yapılması, yangın güvenliği önemleri alınması önemli bir husustur. Modern bina yapıları çoğunlukla beton ve çelikten inşa edilir ve yangının bu malzemeleri büyük ölçüde etkilediği bilinmektedir. Çelik, 600°C sıcaklığa ulaşan yangına maruz kaldığında mukavemetinin ve dayanımının çoğunu kaybeder ve betonun yangın etkisinde 900°C sıcaklıkta basınç dayanımı %10'a kadar düşer. Malzemenin mekanik performansının bozulması nedeniyle, çelik ve beton malzemeden yapılmış bir yapı, yangın durumunda bozulur ve çöker. Betonarme kolonlar, bir bina kabuğunun ana yük taşıyan bileşenini oluşturur ve bu nedenle kolonlar için uygun yangın güvenliği önemlerinin sağlanması en önemli güvenlik önlemlerinden biridir. Bu hükmün dayanağı şu gerçeğe atfedilebilir. Yangını kontrol altına almak için diğer önemler başarısız olursa, yapısal bütünlük son savunma hattıdır.

Şimdiye kadar, beton dolgululu çelik kolonlar yüksek taşıma kapasitesi, sismik direnç, yüksek mukavemet, enerji emme kapasitesi, süneklik, iyi yapısal yangın direnci, inşaat kolaylığı, düşük maliyeti gibi özellikleri nedeniyle köprülerde, mühendislik yapılarında ve yüksek bina yapılarında yaygın olarak kullanılmıştır. Son yıllarda beton ile doldurulmuş çelik kolonlar bu dizi avantajlar nedeniyle tasarımcılar ve yapı mühendisleri arasında popüler hale gelmiştir. Beton doldurulmuş çelik kolonların temel faydalarından biri ek kalıba ihtiyaç duyulmadan yük taşıma kapasitesinin artmasıdır. Ayrıca yerel burkulmaya karşı direnci de artırır. Beton çekirdek, kompozit kolon yangına maruz kaldığında çelik borunun sıcaklığını düşürmek için ısı emici görevi görür. Beton dolgunun kesitteki sıcaklık artışını geciktiren soğutucu etkisi ve beton çekirdeği doğrudan maruz kalmaktan koruyan çelik borunun kalkan etkisi sayesinde beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yüksek yangın dayanım sürelerine ulaşabilmektedir.

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar ilk olarak köprü inşaatında 1879'da İngiltere'de kullanılmıştır fakat gelişmemiş beton pompalama teknolojisi nedeniyle, inşaat sırasında beton dökümü çok karmaşıktı ve bu nedenle beton ile doldurulmuş çelik kolonun avantajları gerçekleştirilemedi ve uygulaması kapsamlı değildi. 1980'lerden beri beton pompalama teknolojisinin gelişmesi ve çelik borunun kırılabilirlik sorununun çözülmesiyle birlikte, beton ile doldurulmuş çelik kolonlar, geleneksel çelik yapıların kademeli olarak yerini almak için yaygın olarak kullanılmaya başlandı. Benzer şekilde, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangına dayanıklılık davranışı ve mekanik performansı incelenmeye başlanmıştır. Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangına dayanıklılığı 30 yıldır dünya çapında incelenmiştir. Çalışmalar, çelik profilin içi boş alanını betonla doldurarak çelik boşluklu kolonun yangın performansının iyileştirilebileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangına karşı tasarım ve genel olarak yangın performansı ile ilgili ve yüksek sıcaklıklar altında davranışı literatürde halen analitik yöntemlerle çok detaylı bir şekilde ortaya koyulamamış olduğu için yüksek sıcaklıklar altında dayanım ve davranışının matematiksel model geliştirilerek belirlenmesi hedeflenmektedir.

Bu çalışmada, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın etkisi altındaki performanslarını belirlemek amacı ile kullanılan parametreler;

- Kesit şekli (kare, dairesel, dikdörtgen),
- Enine kesit boyutu (beton),
- Çelik en kesit kalınlığı,
- Pasif yangın koruma kalınlığıdır.

Belirlenen bu parametreler Standart (ISO 834), hızlı (fast), yavaş (slow), Smouldering yangın etkilerinde beton ile doldurulmuş çelik bir kolonun performansını nasıl etkilediği belirlenmek istenmiştir. Analizlerin yapılması için Eurocode dizayn eşitlikleri kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve ANSYS programı kullanılarak matematiksel bir model geliştirilerek analizler yapılması amaçlanmıştır. Bu analizler

1. GİRİŞ

sonucunda farkı parametrelere sahip modellemelerin beton ile doldurulmuş çelik kolonun mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

1.1. Amaç ve Kapsam

Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın etkisinde performansını araştırmak amacıyla hazırlanan bu tez çalışmasında performansı etkileyecek birçok parametre araştırılmış ve incelenmiştir. Yapılan ön araştırma ve analizler sonucunda beton ile doldurulmuş çelik kolonların kesit şekli, enine kesit boyutları, çelik en kesiti, pasif yangın koruma kalınlığı en etken parametreler olarak belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır. Bu parametrelerin beton dolgulu çelik kolonların performansını nasıl etkilediği, Avrupa standartlarında kabul edilen standart (ISO 834), hızlı (fast), yavaş (slow), Smouldering yangınlarının etkisi altında incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan analizlerde Eurocode dizayn eşitlikleri, American Society dizayn eşitlikleri ve yeni bir matematiksel model geliştirilmeye çalışılmıştır. Beton ile doldurulmuş çelik kolon yüzeyine pasif yangın koruyucu malzeme uygulanarak farklı parametreler için farklı sıcaklıklarında analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda yüksek sıcaklıklarda beton ile doldurulmuş çelik kolonun yangın etkisi altındaki mekanik özelliklerinin nasıl değiştiği incelenmiştir.

1.2. Tezin Yapısı

Bu yüksek lisans tezi ana bölüm olarak toplam 7 bölümden oluşmaktadır. Bu bölümler;

1. Bölümde, tez konusu hakkında genel bir giriş, amaç ve kapsamından bahsedilmiştir.
2. Bölümde, beton ile doldurulmuş çelik kolonlar ile ilgili genel kaynak özetleri verilmiştir.
3. Bölümde, beton ile doldurulmuş çelik kolonlar hakkında genel bilgi ve özellikleri detaylıca verilmiştir.
4. Bölümde beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangına karşı dizayn metotları, farklı parametrelerde çelik sıcaklık hesaplamaları ve tezde verilen matematiksel modelde kullanılacak olan malzemelerin her türlü özellikleri detaylıca belirtilmiştir.

5. Bölümde geliştirilen matematiksel model sonucunda elde edilen bulgular ve sonuçlar gösterilmiş ve tartışılmıştır.
6. Bölümde bu tez çalışması sonucunda ulaşılan sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.
7. Bölümde bu tez çalışmasında kullanılan kaynaklar ve referanslar verilmiştir.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Önceki çalışmalarda, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansını belirlemeye yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Beton ile doldurulmuş çelik kolonların bilgisayar ortamında modellenmesi ile ilgili de çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda, çalışmamızın kapsamını da içeren literatür çalışmaları sunulmuştur.

Eksenel yüklü kolonların yangın tepkisini öngörmek için gerçekçi bir üç boyutlu sayısal model sunulmuştur. Bu model sayesinde, daha önce başka araştırmacılar tarafından test edilen bir dizi numunenin yangın davranışı tahmin edilmiştir. Sayısal model kabul edilebilir sonuçlar üreten testlerle iyi bir uyum göstermiştir. Daha düşük beton mukavemetine sahip betonlar için davranış etkileri belirlenebilirken yüksek mukavemetli betonlarda mikro çatlamalardan dolayı davranış etkileri daha zor elde edilmiştir (Espinós et al. 2010).

Toplam 36 yangın testinden oluşan, yüksek sıcaklıklara maruz kalan farklı kesit şekillerine sahip beton ile doldurulmuş çelik kolonları üzerinde kesit şekli, kesit boyutları, narinlik, yük eksantrikliği ve donatı oranı parametrelerinde deneyler yapılmıştır. Dairesel beton ile doldurulmuş çelik kolonların kare kolonlara göre daha iyi bir yangın performansı gösterdiği bulunmuştur. Ek olarak aynı kolon boyutları ve donatı oranı için yük eksantrik olarak uygulanırken yangına dayanıklılık süresi önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca aynı yük eksantrikliği için donatı oranının artması yangın performansını arttırmıştır (Espinós et al. 2015).

ISO-834 Standart yangına maruz kalan kare şeklindeki beton ile doldurulmuş çelik kolonun mekanik özellikleri deneysel araştırma ve nümerik simülasyon ile belirlenmiştir. Modelleme sonucunda en kesit genişliği yangın performansını önemli ölçüde arttırdığı görülürken beton basınç dayanımı ve çelik akma dayanımının yangın performansına etkisi sınırlı olmuştur (Lyu et al. 2017).

Farklı parametreler göz önünde bulundurularak beton ile doldurulmuş çelik kolonların yapısal yangın performansı incelenmiştir. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar oluşturulurken beton ile çelik yüzey arasında aderans ve sürtünmenin artırılması için

çelik uçlar kullanılmıştır. Çelik borunun iç kısmından betona gömülen çelik uçların yangın performansına etki ettiği gözlemlenmiştir (Shekastehband et al. 2017).

Kare ve dairesel kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonların performansları hakkında araştırmada ABAQUS programı kullanılmış ve kolonlara farklı yük oranları uygulanarak yangın performansları irdelenmiştir. Sonuç olarak beton ile doldurulmuş çelik kolonlara etkiyen yük oranları arttıkça yapısal yangın direncinin azaldığı görülmüştür (Zhou and Han 2018).

Dairesel kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonun dış yüzeyine çift katlı olacak şekilde dışına kare bir betonarme kolon eklenerek elde edilen çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon analiz edilmiştir. Analiz sonucunda çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonun geleneksel beton ile doldurulmuş çelik kolona göre yapısal yangın direncini yüksek derecede arttırdığı görülmüştür (Zhou and Han 2018).

Ultra yüksek dayanıma sahip beton ile doldurulmuş çelik kolonların ISO-834 standart yangın eğrisi etkisi altında yangın performansı incelenmiştir. Sonuç olarak beton dayanımının %15 artmasının yangın performansına etkisi %1, Çelik dayanımının %15 artmasının yangın performansına etkisi %2 olarak bulunmuştur. Ayrıca Yük oranının 0,3'den 0,4'e yükselmesi yangın dayanımını %15 azaltırken 0,7'den 0,8'e çıkması %7 oranında azalma sağlamaktadır (Lyu et al. 2017).

Dairesel ve kare kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansını incelemek için parametrik çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda elde edilen veriler, dairesel beton ile doldurulmuş kolonların kare kesitlere göre daha yüksek yapısal yangın direncine sahip olduğunu göstermiştir. Beton içinde donatı kullanılması özellikle daha yüksek yük seviyelerinde yangın performansına etki ettiği görülmüştür. Ayrıca pasif boya koruma kullanılmasının çeliğin sıcaklık gelişimini yavaşlattığı ve bu sayede yangına karşı direnç sağladığı görülmüştür (Rizalman et al. 2018).

Sonlu elemanlar temelli bilgisayar modeli ile yapılan çalışmada bulunan sonuçlara göre kare kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonlar dikdörtgen kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonlara göre daha iyi yangın direnci sağlarken dairesel kesitlere göre

daha az yapısal yangın direncine sahiptir. Yük oranının her %10 artışı için yangın dayanıklılığı 30 dakika düşer. Eğilme etkisiyle açığa çıkan yük eksantrikliğindeki her 25mm'lik artış için yangın direnci %20 azalır. Artan en kesit alanı her 100mm için %10 yangın dayanımı sağlar (Raut and Kodur 2012).

Beton ile doldurulmuş çift katlı çelik kolonların dayanıklılık, sağlamlık, süneklik ve yangına dayanıklılık açısından normal beton ile doldurulmuş çelik kolonlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucunda elde edilen sonuçlara göre tüm parametrelerde çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonun, beton ile doldurulmuş çelik kolona göre daha iyi performans verdiği elde edilmiştir (Sulthana and Jayachandran 2017).

Standart yangın etkisi altında 8 farklı beton ile doldurulmuş kolonun etriye aralıklarının yangın üzerine etkisi araştırılmıştır. Normal dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı betonlarda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre etriye aralığının %50 azaltılması normal dayanımlı betonda %12 yangın dayanıklılığı sağlarken yüksek dayanımlı betonda %3,5 arttırmıştır (Shah and Sharma 2017).

Spiral takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansını belirlemek için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda kolonların taşıma kapasitesi ve yangına dayanıklılığı üzerinde olumlu etkiye sahip olduğu anlaşılmıştır (Krishan et al. 2017).

Polipropilen ve çelik uçların yüksek mukavemetli beton ile doldurulmuş çelik kolonlar üzerindeki yangın performansını incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Çalışmalar sonucunda yüksek dayanımlı beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangına bağlı dağılma yaşamasından dolayı normal beton ile doldurulmuş çelik kolonlara göre yangın performansı daha düşük olabileceği ortaya koyulmuştur. Yangından dolayı ortaya çıkan dağılmalar, dökülmeleri en aza indirmek için yüksek dayanımlı beton ile doldurulmuş çelik kolonlara polipropilen liflerin eklenmesi önerilmiştir. Eklenen polipropilen liflerin erimesi sonucunda açığa çıkacak boşluklardan dolayı gözenekli hal alan beton, gözenek basıncını hafifleterek yangındaki dökülmeleri azaltacaktır. Ayrıca yüksek mukavemetli beton ile doldurulmuş çelik kolona eklenecek çelik uçların çekme

dayanımını arttırması ile dağılmaları engellemeye etki ettiği görülmüştür (Khaliq and Kodur 2018).

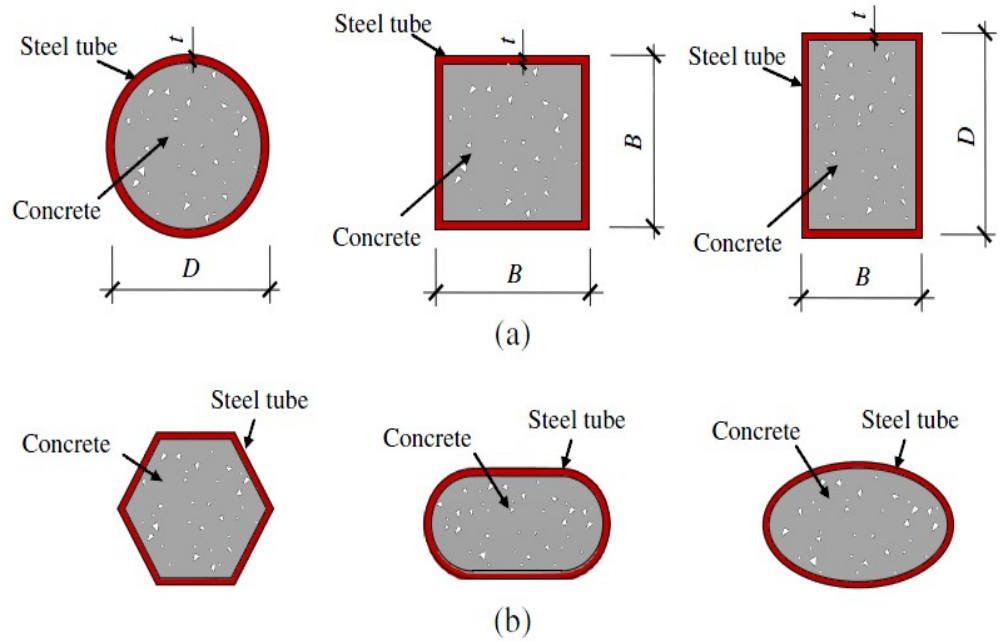
Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansını arttırmak için önerilen pasif boya koruma uygulaması araştırılmıştır. Yangın esnasında şişen pasif boya koruması beton ile doldurulmuş çelik kolon için etkin bir yangın koruması sağladığı görülmüştür ve çelik yüzeyin sıcaklığı önemli ölçüde azalmıştır. Korumasız, 1,16 mm kalınlığında ve 3,40 mm kalınlığında 3 numune üzerinde çalışmalar yapılmış ve sonuç olarak 180 dakikalık yangına maruz kalma süresi sonucunda çelik yüzey sıcaklıkları sırasıyla 1056°C, 592°C ve 418°C olmuştur (Song et al. 2020).

Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansını arttırmak için pasif boya koruması araştırılan diğer bir makalede beton ile doldurulmuş çelik kolon sıcaklıklarının önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Pasif boya koruma kalınlığı arttıkça beton ile doldurulmuş çelik kolonun yangın performansının arttığı gözlenmiştir. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar üzerinde kullanılan pasif boya korumasının nicel olarak daha iyi anlaşılması için daha fazla sayısal araştırma ve deney yapılması önerilmiştir (Song et al. 2020).

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar üzerinde birçok parametrede araştırmalar yapılmış ve şu sonuçlara ulaşılmıştır. Beton dayanımının beton ile doldurulmuş çelik kolonun yangın dayanımına etkisi konusunda fikir birliği yoktur. Bununla birlikte normal beton dayanımındaki artış yangın dayanımını azalttığı, yüksek beton dayanımının ise yangın dayanımına etki ettiği görülmüştür. Çift katlı beton ile doldurulmuş kolonlara çelik uç eklenmesi yangın dayanımını biraz arttırmıştır. Dairesel kesitli beton ile doldurulmuş çelik kolonlar diğer kesit şekillerine göre daha fazla yangına dayanıklılık kapasitesine sahiptir. En kesit boyutları bir kolonun yangın dayanımını önemli ölçüde artırır. Çeliğin akma dayanımı ve kalınlığının yangın dayanımı üzerinden önemli bir etkisi yoktur. Bununla birlikte çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonların iç kısmındaki çeliğin kalınlığı yangın dayanımını artırır. Yangın performansı narinlik ve uygulanan eksenel yük arttıkça azalır (Wang et al. 2019).

3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar, literatürde İngilizce olarak ‘Concrete Filled Steel Tube veya Concrete Filled Tube (CFT, CFST)’ olarak isimlendirilmektedir. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar dış çelik boru ve beton çekirdekten oluşur (Şekil 3.1). Kare, dairesel, eliptik, dikdörtgen ve çokgen şekilde dizayn edilebilir. Beton ile doldurulmuş çelik kolon taşıyıcı sistemler genellikle yüksek yapılarda ve geniş açıklıklı yapılarda kullanılmaya başlanmıştır. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar, sadece çelik veya sadece betonarme bir kolona göre daha üstün özellikleri barındırmaktadır. Yüksek taşıma kapasitesi, sismik direnç, yüksek mukavemet, enerji emme kapasitesi, süneklik, inşaat kolaylığı, düşük maliyet gibi özelliklerinin yanı sıra betonun yangına karşı çelikten daha iyi bir performans sergilemesinden dolayı beton ve çeliğin beraber kullanılmasıyla meydana gelir. Beton çekirdek, kompozit kolon yangına maruz kaldığında çelik borunun sıcaklığını düşürmek için ısı emici görevi görür. Beton dolgunun kesitteki sıcaklık artışını geciktiren soğutucu etkisi ve beton çekirdeği doğrudan maruz kalmaktan koruyan çelik borunun kalkan etkisi sayesinde beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yüksek yangın dayanım sürelerine ulaşabilmektedir. Bu şekilde yapılan uygulama ile sadece beton veya sadece çelik ile yapılan kolonlara nazaran daha iyi bir yangın direnci elde edilmektedir.



Şekil 3.1. Beton ile doldurulmuş çelik kolon kesitleri

3.1. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonların Kullanım Alanları

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar ülkemizde çok fazla kullanım alanına sahip olmasa da Amerika, Japonya, Avrupa gibi bölgelerde sahip olduğu avantajlar nedeni ile kullanım alanları artmaktadır. Bu tip kolonlar boru, çekirdek, perdeli uygulamalarda yatay ve dikey taşıyıcı eleman şeklinde kullanılmaktadır.

Yüksek binaların çoğu beton dolgulu çelik kolonlarla inşa edilir ve son yıllarda yüksek dayanımlı betonun yaygınlaşmasıyla kolonlardaki büyük eksenel yüklere ekonomik olarak yanıt verme yöntemleri de çeşitlenmiştir (Hajjar 2000).

160m. yükseklikte bulunan ve 43 katlı olan Avustralya Melbourne'daki yapı Casselden Place, 28 kat adetine sahip ve 110 m yüksekliğe sahip Perth'de bulunan Forrest Center, 220m. yüksekliğe sahip olan ve 56 kat adeti bulunan Amerika Seattle'daki Two Union Square, 270m yükseklikte yer alan ve 62 kat adeti bulunan Chicago'daki AT&T Gateway Tower yapıları hatırı sayılır derecede önemli sayılacak yapılardır (Uy 1998).

Avrupa kıtasından örnek vermek gerekir ise; Almanya'da yer alan Avrupa'da bulunan en yüksek binalar listesine giren 56 kat adetine sahip ve 259 m yüksekliği bulunan Frankfurt Commerzbank binası, beton ile doldurulmuş üç kolondan oluşmuş olup yapı uzunluğunca uygulaması yapılmıştır (Foster 1996).

Asya kıtasından örnekler gösterirsek; 509m yükseklikte bulunan ve Tayvan'da olan 101 kat adetli Taipei 101, 415 m yüksekliğe sahip Çin Shanghai şehrinde bulunan 88 kat adetli Jin Mao Kulesi, 68 kat adetine sahip ve 384 m yükseklikte bulunan Di Wang binası, 415m yükseklikte bulunan ve 88 kat adetine sahip Hong Kong şehrindeki İnternasyonal Finans Merkezi gibi yapılarda yüksek mukavemetli beton ile doldurulmuş çelik kolonlar kullanılmıştır (Ho and Sar 2007).

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar sadece fazla yüksekliğe sahip binalarda uygulama alanı bulurken ayrıca iskelelerde ve köprülerde, rafineri gibi farklı mühendislik uygulamalarında da yaygın olarak kullanılmaktadır (Shanmugam and Lakshmi 2001).

3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR

Şekil 3.2’de beton ile doldurulmuş çelik kolonlardan imal edilen Liantou köprüsü, Şekil 3.3’de Canton kulesi, Şekil 3.4’de beton ile doldurulmuş çelik kolondan oluşan bir köprü ayağı ve Şekil 3.5’de ise beton ile doldurulmuş çelik kolonla oluşturulmuş çok katlı yapı gösterilmektedir.



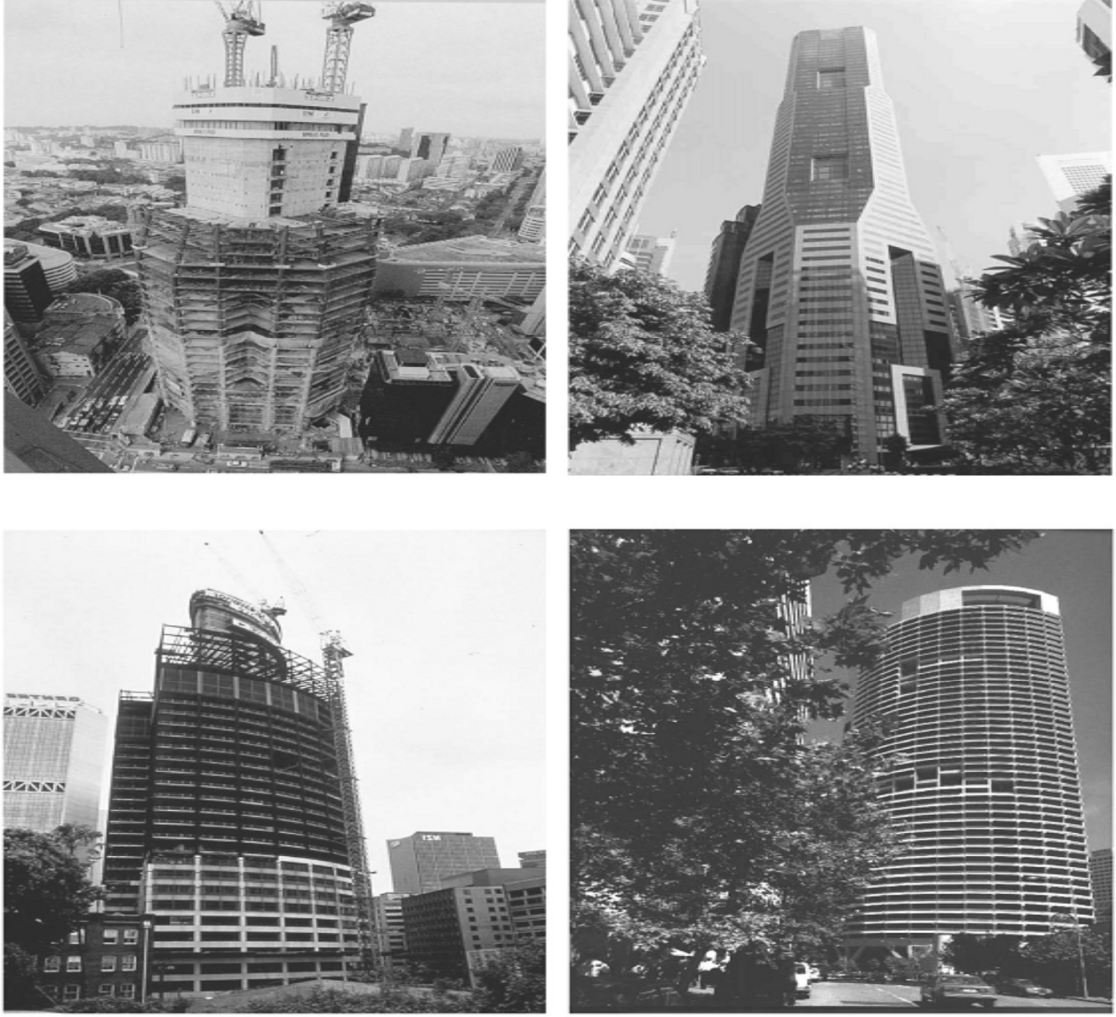
Şekil 3.2. Çin’de bulunan 121 m açıklığa sahip Liantou köprüsü (Anonymous 2022)



Şekil 3.3. Canton Kulesinde kullanılan beton ile doldurulmuş çelik kolonlar (Anonymous 2010).



Şekil 3.4. Beton ile doldurulmuş çelik kolondan oluşan köprü ayağı (Aydın 2008)



Şekil 3.5. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlardan oluşan çok katlı yapı (Aydın 2008)

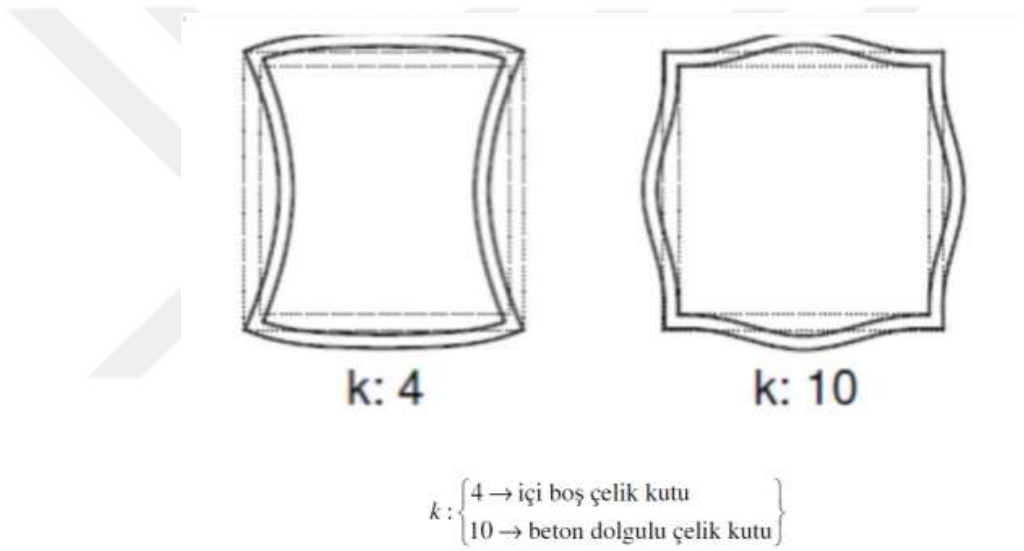
3.2. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonların Avantaj ve Dezavantajları

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar geleneksel beton/betonarme veya çelik kolonlara göre yapısal ve geometrik olarak birçok pozitif özelliğe sahiptir. Beton ve çeliğin kesit yapıları göz önüne alındığında kolonun rijitlik ve dayanım özelliklerini optimize edecek şekilde birbirleri ile birleştikleri görülmektedir. Bunun yanı sıra betonu saran çelik tüpün yerel burkulma dayanımını da (Şekil 3.6) arttırdığı görülmektedir. Dezavantaj olarak iki farklı malzemenin bir arada kullanılmasından dolayı oluşacak hesaplama zorlukları ve iki farklı malzemenin ara yüz bağlantısı söylenebilir.

Çelik boru beton çekirdeğin etrafını sarar ve çekirdek içinde üç eksenli bir gerilme elde edilmesini sağlar. Ayrıca çelik boru yüksek yükler nedeni ile beton çekirdeğin

3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR

parçalanmasını azaltan bir ceket görevi görür. Ana inşaat avantajı, sargıların etkisi altında betonun artan taşıma kapasitesi ve sünekliğidir. Ayrıca beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda kesitin kompozit çalışması, beton çekirdeğin yerel burkulmayı önlemesini sağlayarak çelik elemanlardan daha ince yapıli profillerin kullanılmasına izin verir. Yapısal avantajlarının yanı sıra ekonomik avantajları da vardır. Bunlardan en önemlisi beton ile doldurulmuş çelik kolonlar için kalıp maliyetinin ortadan kalkmasıdır. Çelik borular ayrıca inşaat sırasında kalıp görevi görerek önemli kalıp maliyeti üzerinden azalma sağlar. Ayrıca çelik boruların çok kat çıkılablmesinden dolayı beton pompa süresini beklemeyerek inşaatın ilerlemesini sağlar. Böylelikle fazla katlı binalarda iş süreci ve işçilik ücretleri azalmış olur (Aymaz 2016).



Şekil 3.6. İçi boş ve beton doldurulmuş çelik kolonun burkulma modları (Aymaz 2016)

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda çelik boru betonun çekirdeğini sararak çekirdek içinde üç eksenli gerilmeler ortaya çıkmasını sağlar. Sargılama davranışında olan betonun taşıma kapasitesi, ömrü ve sünekliği artar ve bununla birlikte, çelik boru ağır şekilde yüklenir ve beton çekirdeğin parçalanmasını azaltmak için bir kılıf görevi görür. Çelik boru inşaat sürecinde aynı zamanda kalıp olarak kullanıldığı için ciddi bir kalıp ihtiyacını ortadan kaldıracak ve maliyette bir azalma sağlayacaktır. Çelik boruların fazla katı beraber çıkabilmesi pompa süresini beklemeden inşaatın devam etmesi anlamına gelir ve bu şekilde çok katlı binalarda iş süreci ve işçilik azaltılmış olur. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda kesitin kompozit davranmasından ötürü beton

3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR

çekirdeklerde burkulmaların önüne geçmesinden dolayı çelik elemanlara göre daha zayıf profilli kesitler kullanılabilir (Aydın 2008).

Bu türlü elemanların binalarda ve diğer uygulamalarda yer almasının nedeni; malzeme ve işçilik kollarından tasarruf sağlıyor olması ve yüksek yapılarda ve binalarda daha fazla verim alınmasıdır. Beton dolgulu çelik kolonlar ve betonarme elemanlar karşılaştırıldığında, malzemeler arasındaki karşılıklı yapısal avantaj, yanal deformasyonun yerleştirildiği çelik boru ile sınırlandırılması, betonun mukavemetinin yüksek olması, betonun çelikten yapılmış olmasıdır. Kutu bölümü kesit içerisinde olduğundan yerel burkulmayı geciktirmektedir. (Susantha et al. 2001).

Yüksek mukavemet-ağırlık oranına ek olarak, önemli bir avantaj ise çelik kutu kesit bölümünde betonun çok az bakımının yapılması ve ihtiyaç olmasıdır. Mimari açıdan beton dolgulu çelik kolonlar kullanılarak daha geniş bir kullanım alanı elde edilebilir. Beton dolgulu çelik kolonların kullanımı da kalıp ihtiyacını büyük ölçüde azaltır. Bu, inşaat maliyetini ve süresini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Bu tip kolonların kullanılması iskele yapım maliyetini ve süresini azaltmakta ve bu süre içerisinde oluşabilecek imalat hatalarını da azaltmaktadır. Beton dolgulu çelik kolonların en önemli avantajlarından biri, yerel burkulma etkisini geciktirerek nispeten büyük deformasyon kapasitesi kazanmış kolonların sismik performansının artmasıdır. (Seçer ve Kural 2010).

Günümüzde altı kata kadar olan yükseklikteki bina ve yapılar yapılabilmekte ve kolonlar üretilebiliyor iken çelik boru kesit uygulamada kalıp olarak kullanılmakta ve bu şekilde davranarak betonun pompalanmasına ve yerleştirilmesine kolaylık sağlamaktadır. Bundan dolayı işçilik için ödenen ücretler azalırken inşaat yapım süresi ve hızı artmaktadır (Uy and Bradford 1996).

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar uygulamada ekonomik bakımdan da yarar sağlamaktadır. Betonun sarı çelik kolon kalıp görevi görerek işçilik ve malzeme maliyetini de azaltmaktadır. Geleneksel olarak uygulanan betonarme binalarda donatı yerleşimleri, hazırlanması, kalıp süreleri ve kalıp işçiliği uzun süre aldığından dolayı, yüksek katlı yapılarda beton ile doldurulmuş çelik kolonlar ile inşa edilen binalar daha hızlı yükselmektedir (Zhang et al. 2021; Morino et al. 1997).

Beton ile doldurulmuş çelik kolonların kullanım aşamasındaki en önemli dezavantajlara bakacak olursak, birbirinden farklı iki farklı malzemenin beraber ve bir arada kullanılmasından ötürü ortaya çıkan hesaplama zorlukları ve karmaşıklıklardır. Bununla beraber şu anda çelik ve betonarme ara yüzeylerindeki kuvvet aktarımları ve aderans kuvvetlerinin farklılıkları hakkındaki az bilgi beton ile doldurulmuş çelik kolonların bir diğer dezavantajı olarak göze çarpmaktadır (Aymaz 2016).

Beton dolgulu bir çelik kolonda iki farklı malzemenin bir araya gelmesi yani iki farklı davranışın olması hesabı zorlaştırmaktadır. Eylemsizlik momenti gibi geometrik özelliklerin hesaplanmasını zorlaştırır. Çelik-beton arayüzünde kuvvet aktarımı ve aderans hakkında sınırlı bilgi mevcuttur. Birçok yapısal ve davranışsal faktör, analiz ve tasarım sürecini uzatır. Kompozit profilin elastik modülünü hesaplamak zordur (Aydın 2008).

3.3. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolon Tipleri

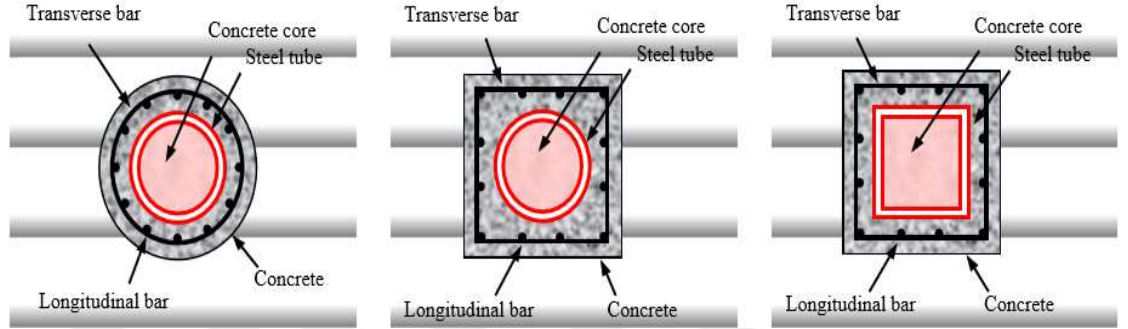
Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yapısal özelliklerinin ve sağladığı avantajların yanı sıra özelliklerini iyileştirmek için bir takım farklı şekillerde kullanılabilirler.

3.3.1. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon

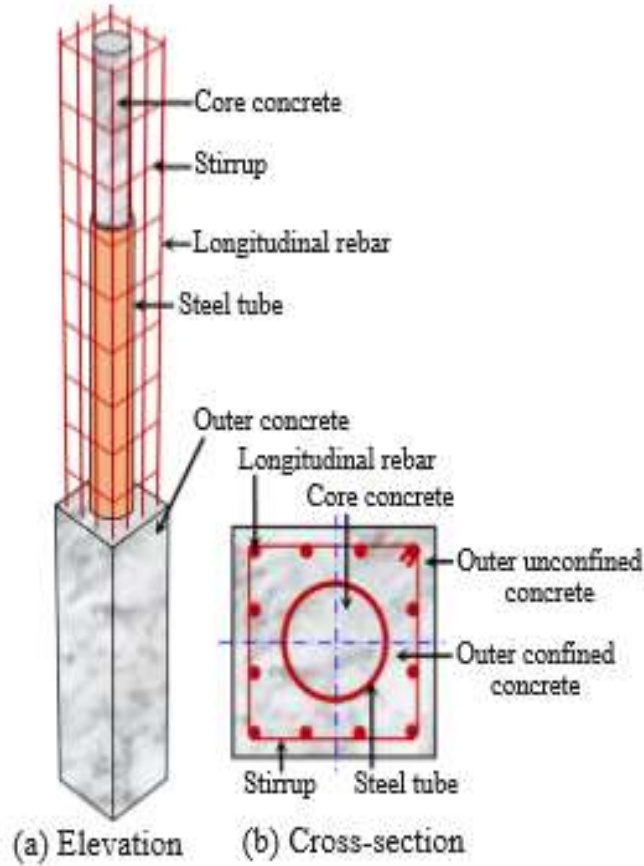
Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonlar iç beton çekirdek, iç çelik tüp ve dış beton çekirdekten oluşur (Şekil 3.7). Dış beton çekirdeğe enine ve boyuna donatı eklenebilir (Şekil 3.8). Eklenen donatı, kolonun taşıma kapasitesini, mukavemetini ve sünekliğini artırır. İç beton çekirdek, iç çelik tüp ve dış beton çekirdek kesitleri kare dairesel veya dikdörtgen şekilde biçimlendirilebilir. Betonla doldurulmuş çift katlı çelik kolonlar yüksek koridorlarda, köprü iskelelerinde ve ayrıca binalarda da uygulaması mevcuttur (Sulthana and Jayachandran 2017). Bu tip kolonlar geleneksel beton ile doldurulmuş çelik kolonlara göre daha yüksek yangın dayanımı sağlar (Zhou and Han 2018). Betonla doldurulmuş çift katlı çelik kolonlar dayanıklılık, sağlamlık, süneklik ve yangına dayanıklılık açısından iyi yapısal performansla sahiptir. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon, sahip olduğu dış beton çekirdek sayesinde iç çelik tüpe ve iç beton çekirdeğe ulaşacak maksimum sıcaklıkları düşürmektedir. Ayrıca beton dolgu

3. BETON ile DOLDURULMUŞ ÇELİK KOLONLAR

üzerinde donatı kullanılması taşıma kapasitesi, mukavemet, süneklik gibi özelliklerini arttırmasının yanı sıra yangına dayanıklılığı ve çelik kolonun kritik sıcaklığını iyileştirmektedir. Yangına maruz kaldıktan sonra iç beton dolgulu çelik kolonun dayanım ve mukavemetinde küçük bir bozulma olduğu ve çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonların orijinal mukavemetinin yüksek seviyesini koruduğu gözlemlenmiştir (Zhou and Han 2018).



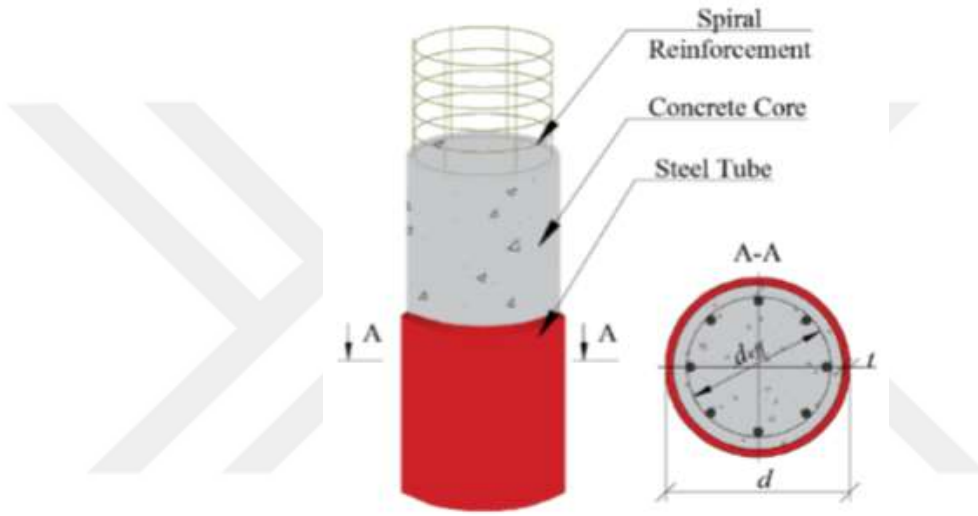
Şekil 3.7. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon kesiti (Xiang et al. 2014)



Şekil 3.8. Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolon detayı (Zhou and Han 2018)

3.3.2. Spiral takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolon

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlara geleneksel betonarme donatısı eklemek yerine spiral takviyesi yapılabilir. Geleneksel donatı takviyesi yapmak yerine bu tür bir takviye yapmak taşıma kapasitesini ve kullanım ömrünü uzatmanın yanı sıra kolonların yangına dayanıklılığı üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Ayrıca kolonların verimliliğini daha da arttırmak için yüksek mukavemetli donatı kullanılması önerilir (Krishan et al. 2017).

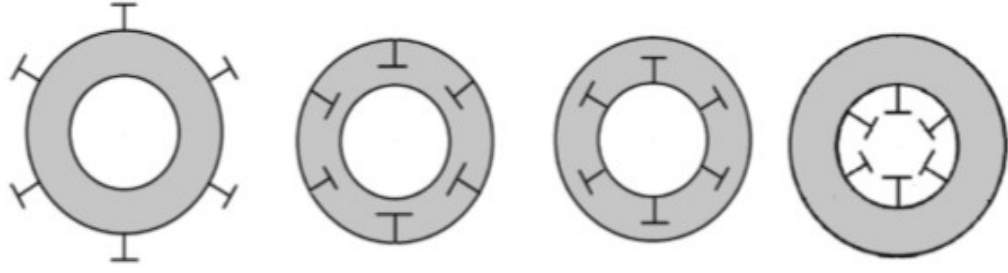


Şekil 3.9. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda spiral takviyesi (Krishan et al. 2017)

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda kullanılan spiral takviyesi, kolonun deforme olabilirliğini arttırdığı için yüksek mukavemetli boyuna donatı kullanılması daha doğrudur. Spiral takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolonların kullanım alanı şu an da sınırlıdır.

3.3.3. Çelik uç takviyeli beton ile doldurulmuş çelik kolon

Çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonların zayıflamaya maruz kalmasındaki en büyük etken, beton ile çelik yüzeylerinin yüksek sıcaklıklarda ayrılmaya ve kolonların burkulmasına neden olan yetersiz çelik-beton ara yüz aderansıdır. Bu yüzden çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda çelik uç kullanılması önerilmiştir (Shekastehband et al. 2017).

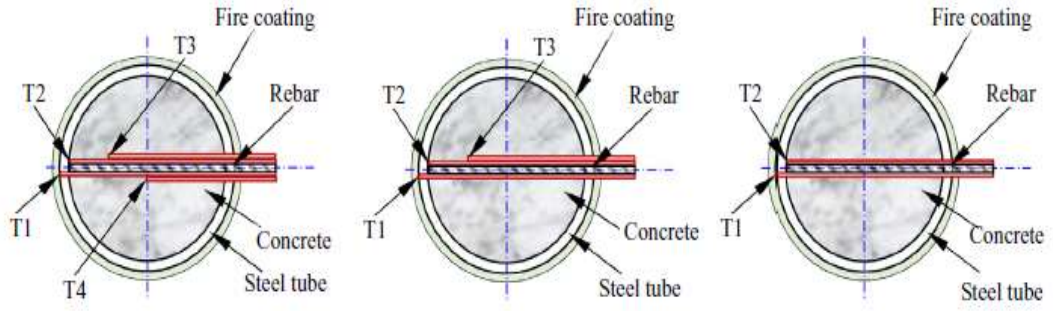


Şekil 3.10. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda çelik uç kullanımı (Shekastehband et al. 2017).

Çelik-beton ara yüz etkileşimini güçlendiren iç boruların dış yüzeyine ya da dış boruların iç yüzeyine gömülü olan çelik uçlar kolonun dayanıklılığını artırır. Bu da çekirdek beton ve çelik tüp arasındaki ara yüz aderansının artması nedeniyle dayanıklılığın arttığı anlamına gelmektedir. Betonun düşük ısı iletkenliği, çift katlı beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda dış borulardan iç borulara ısı transferini yavaşlatır ve dış boruda ısı birikmesine neden olur. Bununla birlikte, çelik uçların dış borunun iç yüzeyine veya iç borunun dış yüzeyine yerleştirilmesi ısı emmekte ve sıcaklığın iç borulara aktarılmasını zorlaştırmaktadır (Shekastehband et al. 2017). İç boruların dış yüzeyine eklenen çelik uçlar en etkin sonucu verir. Bu tip kolonlarda beton dayanımının yangın dayanımına etkisi minimum düzeydedir.

3.3.4. Pasif yangın korumalı beton ile doldurulmuş çelik kolon

Beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yangına karşı iyi bir dayanım gösterse de performansları artırılabilir. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda yangın dayanımını arttırmak için yangın anında şişerek ısıyı daha az ileten, geciktiren pasif boya koruması kullanmak yangın verimliliğini arttırmaktadır. Bu sayede yangın anında çeliğin ısıyı daha az iletmesi amaçlanarak çekirdek betona ısı akışı engellenir. Geleneksel beton ile doldurulmuş çelik kolonda dış çelik tüp üzerine uygulanan pasif boya koruması (Şekil 3.10.)’da gösterilmiştir. Yangın dayanımını doğrudan etkileyen faktör bu uygulamada pasif yangın koruma kalınlığıdır.



Şekil 3.11. Beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda pasif yangın koruma kesiti (Song et al. 2020).

3.3.5. Yüksek dayanımlı beton ile doldurulmuş çelik kolon

100 MPa'dan daha fazla basınç dayanımına sahip yüksek mukavemetli betonla doldurulmuş çelik kolonlar, yüksek binalarda kullanılmaktadır. Bu tip kolonlarda yük oranı arttıkça yangın dayanımı azalır. Kesit çapı arttıkça yangın dayanımı artar. Beton dayanımının %15 artması yangın performansında %1 artış sağlarken, çeliğin dayanımının %15 artması yangın performansını %2 artırır. Genel olarak yangın dayanımının narinlik ve yük oranının artması ile azaldığı; kesit çapının, beton ve çelik dayanımının artması ile arttığı görülmektedir (Lyu et al. 2017).

Yangın etkisiyle yüksek dayanımlı beton dağılır. Bu yüzden yüksek dayanımlı betonların yangın performansı normal dayanımlı betonların yangın performansına göre daha düşüktür. Bu dağılmanın üstesinden gelmek için polipropilen veya çelik liflerin eklenmesi önerilir. Yüksek dayanımlı betona eklenen polipropilen veya çelik liflerin erimesiyle oluşacak olan betondaki gözenekli yapı sıcaklıktan kaynaklı gözenek basıncını hafifleterek yangın anındaki dağılmayı engeller. Bu da yangın performansına katkı sağlar. Ayrıca eklenen bu çelik lifler çekme dayanımını artırarak gözenek basıncına bağlı çekme gerilmelerine karşı koyarak dayanımını artırır. Geleneksel betonarme kolonda olduğu gibi beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda da yüksek mukavemetli beton kullanımında bu tip eklemelerin yapılması yangın performansını arttırmaktadır.

3.4. Beton ile Doldurulmuş Çelik Kolonlarda Yangın Performansı

Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansı, geleneksel beton veya geleneksel çelik kolonların yangın performansına göre daha avantajlıdır. Beton dolgunun kesitteki sıcaklık artışını geciktiren soğutucu etkisi ve beton çekirdeği doğrudan maruz kalmaktan koruyan ve bütünlüğü koruyan çelik borunun kalkan etkisi sayesinde beton ile doldurulmuş çelik kolonlar yüksek yangın dayanım sürelerine ulaşabilmektedir. Beton çekirdek, kompozit kolon yangına maruz kaldığında çelik borunun sıcaklığını düşürmek için ısı emici görevi görür. Bu şekilde çelik profilin içi boş alanı betonla doldurularak çelik boşluklu kolonun yangın performansı artırılmaktadır.

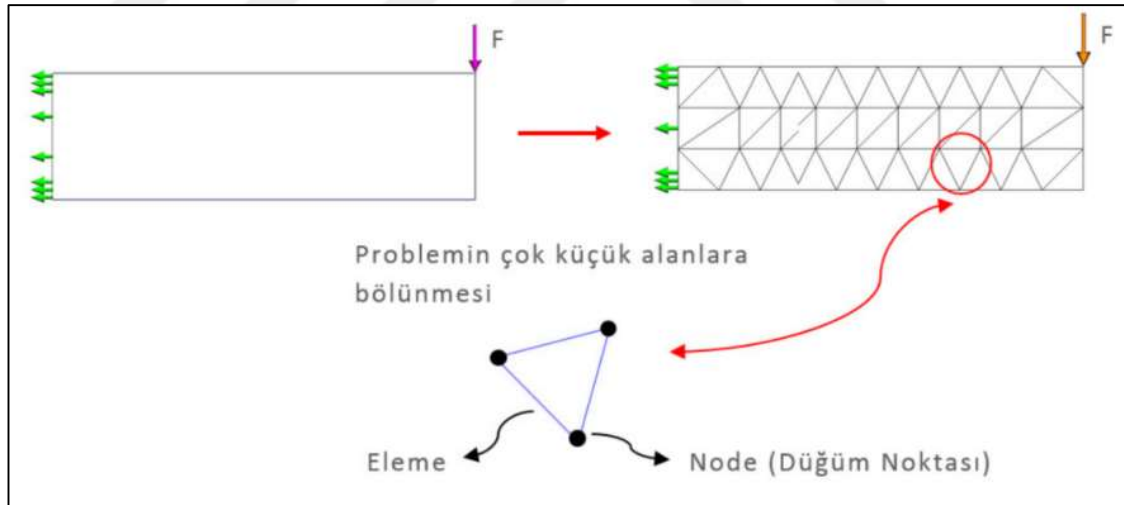
Beton ile doldurulmuş dairesel kolonlar, kare, dikdörtgen, eliptik kesitlere göre daha iyi bir yangın performansı gösterdiği bilinmektedir. Beton dayanımının, beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda yangın performansına etkisi üzerinde fikir birliği yoktur. Bununla birlikte yüksek dayanımlı betonun yangın dayanımına olumlu bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Kolonun enine kesitinin boyutları, beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın dayanıklılığını büyük ölçüde artırdığı bilinmektedir. Kolonun narinlik oranındaki artış, eksantirisite ve eksenel yük ile birlikte azaldığı bilinmektedir (Espinós et al. 2015; Wang et al. 2019).

4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi (FEA) ilk olarak 1956 yılında Turner ve arkadaşları (Turner et al. 1956) tarafından kompleks sınır şartlarına sahip gerçek mühendislik problemlerinin çözülmesinde kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde birçok mühendislik alanında gerçek modellerin tasarlanmasında kullanılmaya başlanmıştır. Sonlu elemanları mühendislik problemlerinin matematiksel olarak modellenmesi olarak tanımlanır.

Gerçekte fiziksel problemlerin çok karmaşık bir yapıya sahip olmasından dolayı teorik çözümler yetersiz kalmaktadır. Bunun yerine nümerik çözümlere ihtiyaç duyulmaktadır. Nümerik çözümlerde genel yaklaşım problemleri çok küçük (sonsuz sayıda) parçalara ayırma prensibi benimsenmektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Sonlu elemanlar yöntemi çalışma prensibi

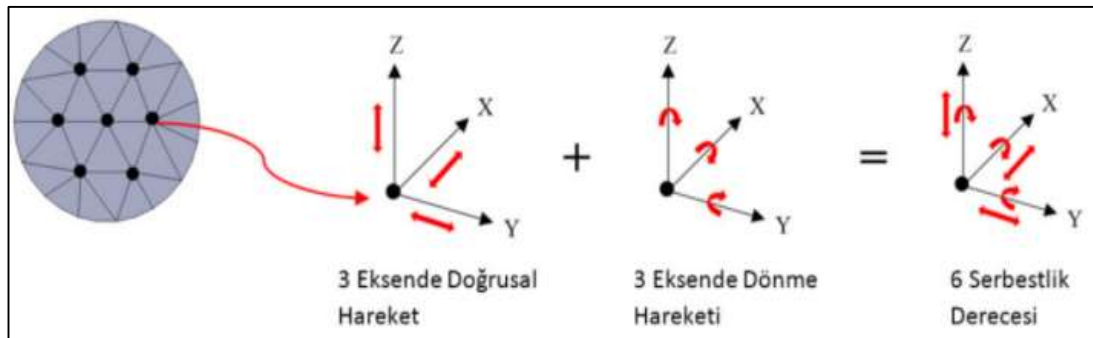
Problem çok küçük alanlara bölünür. Alanlara bölünürken farklı elementler kullanılır. Bu elementlerin birleşme noktalarına Node (Düğüm noktası) denir. Problemlerin çözümünde genel olarak iki yaklaşım kullanılır. Basit problemlerin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar yöntemi ve karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yönteminde sonlu farklar yönteminden

farklı olarak lineer denklemler yerine integral formülasyonları kullanılır. Her bir element için bir fonksiyon tasarlanır, daha sonra bu elementlerin çözümleri birleştirilerek tüm sistem çözümüne ulaşılır. Sonlu elemanlar yöntemi ile;

- Gerilme Analizleri
- Termal Analizler
- Dinamik Analizler
- Titreşim Analizleri
- Burkulma Analizleri
- Deformasyon Analizleri gerçekleştirilebilir.

Sonlu elemanlar yazılımlarının etkin kullanılabilmesi için sonlu elemanlar yönteminin nasıl çalıştığının bilinmesi gerekmektedir.

Serbestlik Derecesi: Elementlerin düğüm noktaları ile etkileşimlerinin tam olarak anlaşılabilmesi için serbestlik derecesinin bilinmesi gerekmektedir. Bir düğüm noktasının 6 adet serbestlik derecesi vardır (Şekil 4.2). Bir sonlu elemanlar modelinde bir düğüm noktasının serbestlik derecesi problemin çözülmesi için gerekli olan matematiksel denklemleri belirlemektedir. Özellikle modelin serbestlik derecesi sınır şartlarının tanımlanmasında önemlidir.



Şekil 4.2. Serbestlik derecesi şematik gösterimi

Sınır Şartları: Sonlu elemanlar modellerinin doğru olarak tanımlanmasında diğer bir kilit noktada sınır şartlarının doğru olarak tanımlanmasıdır. Modelde bilinmeyen

sayısının azaltılması ve çözümleme süresinin en aza indirilmesi için sınır şartlarının tam olarak bilinmesi gerekmektedir.

Elementler ve Element Türleri: Modelin küçük parçalara bölünmesinde elementler büyük önem taşımaktadır. Elementler sonlu elemanlar yönteminin matematiksel bir parçasıdır. Özellikler fiziksel özelliklerin bir düğüm noktasından diğerine nasıl bir enterpolasyonla aktarıldığını belirler. Element türleri genel olarak tek, iki, üç boyutlu elementler olarak sınıflandırılabilir. Tek boyutlu elementler çizgisel veya eğrisel elementlerden oluşmaktadırlar (Şekil 4.3). Bir çizgi elementi tanımlamak için minimum iki düğüme ihtiyaç vardır. Modelin hassasiyetini arttırmak için elementlerin orta noktalarına node (düğüm noktası) tanımlanır.



Şekil 4.3. Lineer tek boyutlu ve eğrisel boyutlu element gösterimi

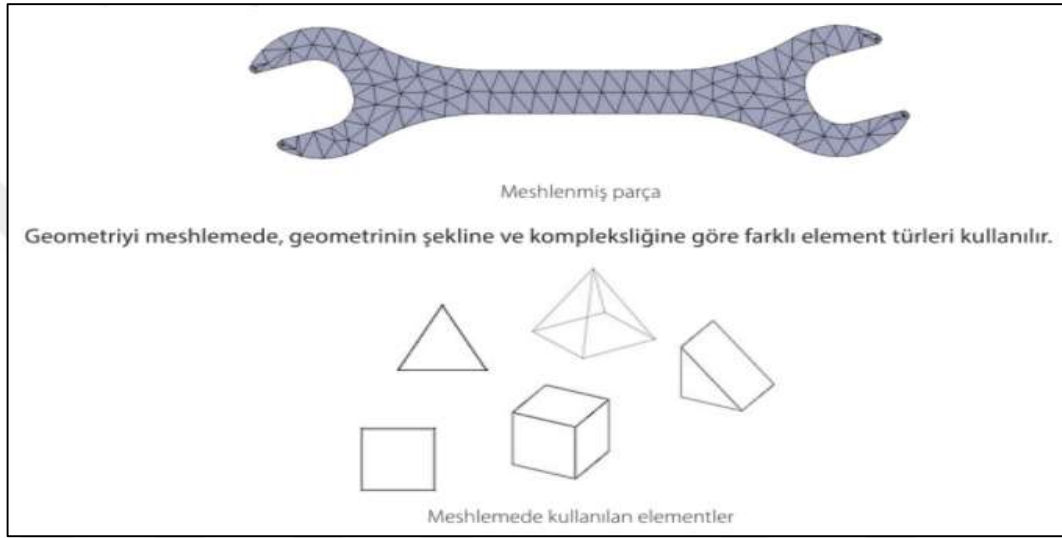
İki boyutlu yüzey modellerin meşlenmesinde iki boyutlu elementler kullanılmaktadır. İki boyutlu bir elementi tanımlamak için en az dört düğüm noktasına ihtiyaç vardır. Hacimlerin sonlu elemanlar modellerinin oluşturulmasında üç boyutlu elementler kullanılmaktadır.

Sonlu Elemanlar Metodunda Genel İşlem Basamakları:

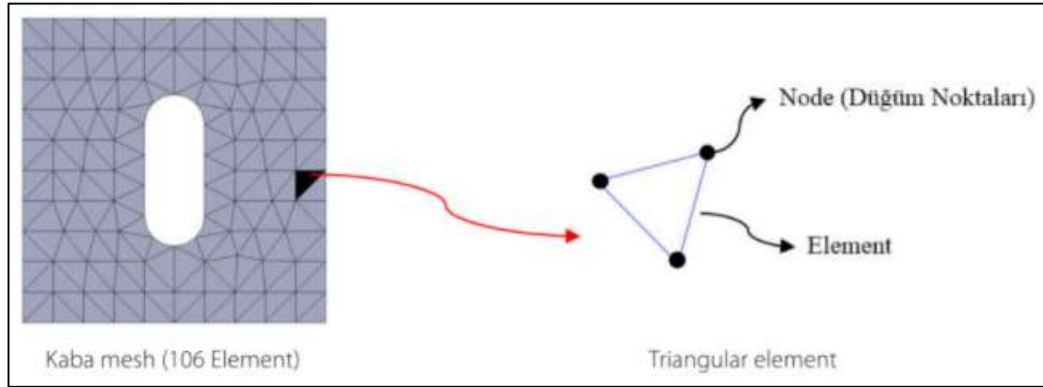
1. Uygulanacak analiz türünün belirlenmesi
2. Modelin oluşturulması (Katı, yüzey vb.)
3. Meşleme (Element türü, boyutu vb.)
4. Meşleme özelliklerinin tanımlanması
5. Matris formüllerinin ve denklemlerin hazırlanması
6. Düğüm noktalarındaki değişkenlerin hesaplanması
7. Sonuçların çözümlenmesi

Sonlu eleman analizlerinde en önemli aşamalardan biri elde edilen sonuçların değerlendirilmesi ve yorumlanmasıdır.

Meşleme: Sonlu elemanlar yönteminde problemlerinin çözümlenmesinde en önemli aşamalardan bir tanesi meşlemedir. Meşlemeyi, modelleri boyutları belirlenmiş elementler ile çok küçük alanlara bölme işlemi olarak tanımlayabiliriz (Şekil 4.4 ve Şekil 4.5).



Şekil 4.4. Meş örneği ve meşlemede kullanılan elementler



Şekil 4.5. Meş içinde düğüm noktalarının gösterimi

Meşlemenin hassasiyeti arttıkça daha net sonuçlar elde edilir. Diğer taraftan meşleme hassasiyeti arttıkça problemin çözülme süreside artmaktadır. Gereğinden fazla hassas meşleme yapmak gereksiz bir şekilde hesaplama süresini arttırır.

Mühendislik uygulamalarında genellikle tam çözüm olanaksız olup yaklaşık çözüm yapılarak sonuçlar elde edilir. Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşık problemlerin daha basite indirgenerek her birinin ayrı ayrı çözülmesiyle tüme vararak yapılan çözüm yöntemidir. Yöntem üç ana bölümde incelenir. İlk olarak, ele alınan geometrik model daha küçük parçalar halinde sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit parçalara ayrılır. İkinci olarak sürekli fonksiyonlar, cebirsel polinomların lineer kombinasyonu olarak tanımlanabileceği kabul edilir. Üçüncü olarak aranan değerlerin her eleman için düğüm noktalarındaki değerlerinin elde edilmesinin problemin çözümünde yeterli olmasıdır. Kullanılan bu yaklaşım interpolasyon yoluyla çözümlenmektedir.

Sonlu elemanlar yönteminin kullanılması ile birlikte sadece deneysel yöntemler ile incelenebilen birçok numune kolayca incelenebilmekte ve analizleri kısa süreler içerisinde yapılabilmektedir. Sonlu elemanlar yöntemini diğer sayısal yöntemlerden ayıran özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- Bir cismin geometrisi tam olarak temsil edilebilir.
- Geometrisi karmaşık olan cisimler incelenebilir.
- Değişik malzemeye sahip cisimler incelenebilir.
- Sınır koşulları kolayca uygulanabilir.
- Problemlerin anlaşılmasını ve çözülmesini basitleştirir.

Sonlu elemanlar analizleri farklı sınır koşullarında ve farklı yükleme şartlarına maruz kalan bir problemin çözümünde kullanılır. Sonlu elemanlar analizlerinin avantajları genel olarak, yeni sınır şartlarında tasarlanan ürünün görevini yerine getirip getirmediği belirlenebilmektedir. Tasarlanan ürünün imalatından önce sistemin verilen şartları karşıladığının kanıtlanmasında kullanılır. Deneysel çalışmalar yapmadan birçok tasarım değişkeninin parça servis özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilir. Ürün optimizasyon çalışmalarında birçok avantaj sağlar.

4.1.1. Sonlu elemanlarda analiz türleri

Sonlu elemanlar analiz türleri yük-zamana göre değişim ve yapıların yüke verdiği tepki türüne göre temel olarak iki gruba ayrılır.

- **Yük ve Zamana Göre Analiz Türleri**

Statik Analiz: Statik analiz, uygulanan yükün ve sınır şartlarının zamana bağlı olarak sabit kaldığı değişmediği durumlarda gerçekleştiren analiz olarak tanımlanır. Örnek olarak bir çelik yapıda kolonlarda oluşan gerilimin belirlenmesi gösterilebilir.

Dinamik Analiz: Dinamik analiz de ise statik analizden farklı olarak uygulanan yük ve sınır şartları zamana bağlı olarak değiştiği durumlarda gerçekleştirilen analiz türüdür. Örnek olarak bir motorda çalışan kola uygulanan yükün ve sıcaklığın zamana bağlı olarak değişmesi gösterilebilir.

Harmonik Analiz: Yük ve sınır şartlarının frekansa bağlı olarak değiştiği durumlardaki analiz türüdür. Örneğin Jet motorunun kanadı verilebilir. Artan devir ile birlikte kanatlarda biriken yük artmaktadır.

- **Yapıların Uygulanan Yüke Verdikleri Tepkilere Göre Analiz Türleri**

Lineer Analiz: Malzemelerde ve yapıda uygulanan yükün elastik sınırlar içinde kaldığı durumda gerçekleştirilen analiz türüdür. Örnek olarak açığa çıkan küçük elastik deformasyon gösterilebilir.

Lineer Olmayan Analiz: Uygulanan yükün daha çok plastik deformasyon bölgesinde olduğunda gerçekleştirilen analiz türüdür. Lineer olmayan bölgede malzemede kalıcı şekil değişikliği meydana gelir.

4.2. Yangına Karşı Tasarımda Genel İlkeler

4.2.1. İngiliz standartları BS 5950 bölüm 8 (BSI 1990)

Yangına karşı dayanıklı tasarım için İngiliz standartlarında önerilen iki yöntem vardır.

- Limit Sıcaklık Yöntemi
- Eğilme Momenti Kapasitesi Yöntemi

Çizelge 4.1. Çelik sıcaklık sınırlamaları

	<i>Yük oranında sınırlayıcı sıcaklıklar</i>						
	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
<i>Durum-1</i>	520	555	585	620	660	715	N/A
<i>Durum-2</i>	460	510	545	590	635	690	N/A
<i>Durum-3</i>	590	620	650	680	725	780	880
<i>Durum-4</i>	540	585	625	655	700	745	811

Limit Sıcaklık Yöntemi

Yük Oranı (R):

Eğilme altındaki bir çelik için, yük oranı (R) formülü;

$$R = \frac{M_f}{M_c} \quad (4.1)$$

M_f – Yangına maruz kirişteki maksimum eğilme momenti.

M_c – Plastik momentteki eğilme.

Çelik, eğilme altında burulmaya maruz kaldığında, M_c ikinci bölümdeki (Denklem 1)'deki çelik kesitin plastik bükme momenti kapasitesine eşit olur.

$$M_c = M_p = P_y S \quad (4.2)$$

Yanal burulma burkulma direnci ikinci bölümdeki (Denklemler 3)'e eşit olur.

$$M_b = M_p = P_b S_x \quad (4.3)$$

Çeliğin limit sıcaklığı; Limit sıcaklığı – Yük oranı Çizelge 4.1'den elde edilir. (Şekil 4.6)'de Limit sıcaklıkları – Yük oranları farklı gerinim seviyelerinde, çelik kolon ve kirişlerin sıcaklık düşürme mukavemeti ile karşılaştırılır. Bu yöntem uygulanırken dört durum dikkate alınmalıdır;

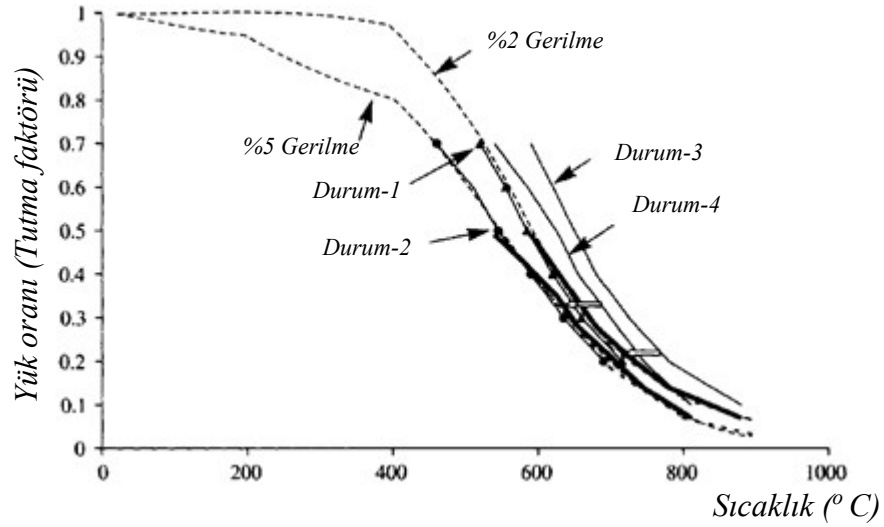
Durum – 1

Eşit derecede ısıtılan ve herhangi bir koruyucu kullanılmamış çeliğin bulunduğu duruma durum-1 adı verilmektedir. Sıcaklık – Çelik mukavemeti ilişkisinde kirişler %2 gerinim ile çalışmaktadır.

Durum – 2

Eşit derecede ısıtılan ve koruyucu kullanılmış çeliğin bulunduğu duruma durum-2 adı verilmektedir.

Bu durum yangın koruma malzemesi sayesinde %0,5 oranında bir gerinimi güvenle devam ettirebilir. Böylece Şekil 4.6'de Limit sıcaklık – Yük oranı ilişkisinden çelik %0,5 gerinimde çalışmaktadır.



Şekil 4.6. Çelik kolon-kirişin sıcaklık-yük oranını durumlarının grafiği

Durum – 3

Üç tarafı sadece üst kısmından ısı alan bir çelik için geçerli olan duruma durum-3 adı verilmektedir. Bu durumda başlık, başlık destekleyici ve beton döşemeler ile korunmaktadır. Dolayısıyla çelik kesitinde sıcaklık dağılımı düzensizdir. Üst başlık sıcaklığı kritik, alt başlık çok daha serindir. Çelik üniform varsayılarak hesaplanana göre daha yüksek bir bükülme moment kapasitesine sahiptir. Alt başlık sıcaklığı aynıdır.

Durum – 4

Üç tarafı sadece üst kısmından ısıtılan bir çelik için geçerlidir. Ancak çelik büyük yangınlardan yangın koruma malzemesiyle korunmaktadır. Yük oranında (Durum-3) ve (Durum-4)'deki kirişleri, (Durum-1) ve (Durum-2) kirişlerinin 0,7 katı ile ilişkilidir. Yani bir kirişin plastik bükme moment kapasitesi üniform olmayan sıcaklık dağılımı, düzgün olmayan sıcaklık dağılımının yaklaşık 0,7 katıdır. Alt başlık sıcaklığı aynı olduğunda Şekil 4.6'de (Durum-3) ve (Durum-4) kirişlerinin yük oranları 0,7 ile çarpılarak elde edilen üniform sıcaklık dağılımına sahip koyu renkli çizgiler (Durum-1) ve (Durum-2) kirişlerine çok yakın oldukları görülmektedir.

Çizelge 4.2. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi için örnek hesaplamalar

<i>Çelik Noktaları</i>	<i>Sıcaklık T_i (°C)</i>	<i>Bileşke kuvvet F_i $= p_y(T_i) \cdot A_i(kN)$</i>	<i>Mesafe $d_i(mm)$</i>	<i>Eğilme momenti $F_i \cdot d_i(kN.m)$</i>
<i>Üst başlık</i>	650×0,8=520	-565,81	8	-4,53
<i>Gövde 1</i>	528,13	-86,08	39,8	-3,43
<i>Gövde 2</i>	544,38	$\frac{-24,10}{55,96}$	$\frac{70,76}{94,56}$	$\frac{-1,71}{5,29}$
<i>Gövde 3</i>	560,63	73,93	135,0	9,98
<i>Gövde 4</i>	576,88	67,74	182,6	12,37
<i>Gövde 5</i>	593,13	61,56	230,2	14,17
<i>Gövde 6</i>	609,38	55,75	277,8	15,49
<i>Gövde 7</i>	625,63	50,21	325,4	16,34
<i>Gövde 8</i>	641,88	44,68	373,0	16,66
<i>Alt başlık</i>	650,0	266,16	404,8	107,74
<i>Total</i>	NA	0	NA	188,39

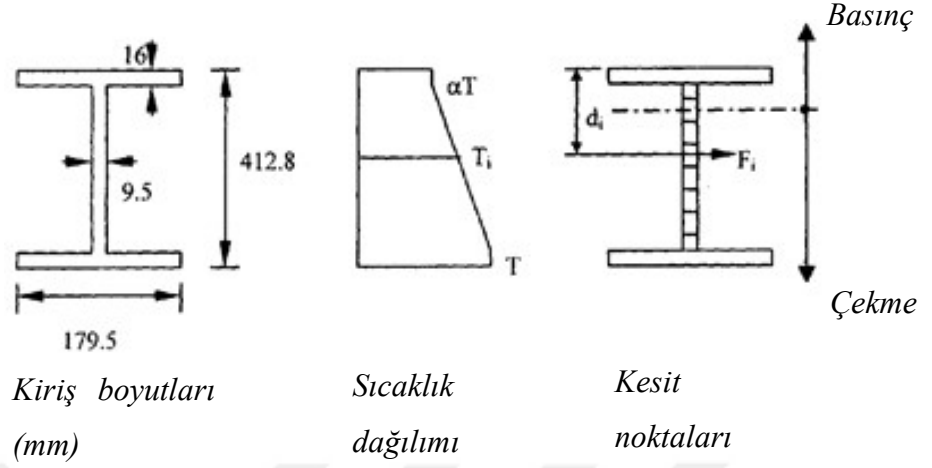
Limit sıcaklık yöntemi tamamlandığında yüksek sıcaklığa maruz çeliklerin veriminin bu metotta deforme olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklarda çeliğin dayanım ve sertliğinde azalmalar olduğu saptanmıştır (Yorgun 2005).

Eğilme Momenti Kapasitesi Yöntemi

Limit sıcaklık yönteminin kullanımı kolaydır, ancak çelik kiriş düzgün olmayan sıcaklık dağılımına maruz ve yanal burulma burkulmadan engelleniyorsa, eğilmeyi hesaplamak için daha doğru sonuçlar verebilecek yöntem kullanmak her zaman daha yararlıdır. O nedenle bükülme için, moment kapasitesi yöntemi kullanılarak hesaplanmalar yapılmalıdır. Metodun nasıl uygulandığına bakarsak, çelik kirişin kesit alanı yaklaşık olarak aynı sıcaklıktaki birkaç dilime bölünmüştür. Enine kesitlerin plastik bükme moment kapasitesi, bu dilimlerin sıcaklıklarında indirgenen çelik mukavemetine göre hesaplanır. Bu metodu göstermek için bir örnek verilmektedir.

Kesit bilgileri ise Şekil 4.7’de verilmektedir, bu bilgiler ile Çizelge 4.2’deki formüllerle hesaplanır. Moment kapasitesi yöntemi görüldüğü üzere birçok hesaplama gerektirir. Dolayısıyla bu daha ayrıntılı yöntemi kullanmanın faydası, çelik kirişin

kesitindeki düzensiz sıcaklık dağılımının olası yararlarını keşfetmektir. Özellikle korumasız çelik kirişlerin kullanımının doğruluğu için %2 çelik gerinim kullanılmaktadır.



Şekil 4.7. Çizelge 4.2'deki hesaplamalar için veriler

4.2.2. Limit sıcaklık yöntemi ile moment kapasitesi yönteminin karşılaştırması

Şekil 4.7'de boyutları (406 x 178 x 74)'lük bir kiriş boyutu göz önüne alındığında, plastik bükme momentini hesaplamak için moment kapasitesi yöntemi kullanılarak yük oranları 0.3, 0.5 ve 0.7 için kesitle yangın etki kapasitesi hesaplanır. Limit sıcaklık yönteminde kirişin alt başlık sıcaklığını sınırlamadan elde edilen değere eşittir. Farklı düzensiz sıcaklık dağılımları Şekil 4.7'da gösterilmiştir. S275 çelik kullanılmıştır.

Bir örnek yapacak olursak;

Yük oranı (R) - 0,5

Sıcaklık gradyan faktörü (α) - 0,8

- i. Limit sıcaklık yöntemi; Oda sıcaklığında kesitin plastik moment kapasitesini ikinci bölümdeki (Denklem 1)'den hesaplayalım.

$$M_c = P_b S = 0,275 \times 1481,4 = 408,1 \text{ kN.m}$$

$$R = 0,5 \Rightarrow M_c = 0,5 \times 408,1 = 204,05 \text{ kN.m}$$

- ii. Moment kapasitesi yöntemi; Çizelge 4.2 ve Durum 3’den alınacak değerlerden örnek yapacak olursak, 0,5’lik bir yük oranında kirişin limit sıcaklığı 650° C’dir. Bu daha başlık sıcaklığıdır. Metodu uygulamak için kiriş kesitini üst başlık, alt başlık ve gövdesini de sekiz parçaya bölerek toplam on parça elde edilir. Her parçanın sabit bir sıcaklığa sahip olduğunu kabul edelim ve kesitin merkezindeki değerlerle hesaplanan sonuçlar Çizelge 4.2’de sıralanmıştır. Kesit deki her bir kısmı için, merkez sıcaklık (T_i), sonuç kuvveti (F_i), kuvvetler arası mesafe (d_i) ve kesitin plastik bükme moment kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. Plastik nötr eksen ikinci gövdede olduğu için ve üst kısım basınç ile alt kısım çekme olarak iki katmana ayrılmıştır.

Çizelge 4.3. Plastik eğilme moment kapasitesi yönteminin kullanımı ve hesaplanması

<i>Yük Oranı (R)</i>	<i>T_{lim} (°C)</i>	<i>Limit sıcaklık yöntemi</i>	$\alpha = 0,6$	$\alpha = 0,7$	$\alpha = 0,8$	$\alpha = 1,0$
0,3	725	122,43	145,34 ($\Delta T = 290^\circ\text{C}$)	130,85 ($\Delta T = 218^\circ\text{C}$)	116,74 ($\Delta T = 145^\circ\text{C}$)	79,58 (üniform)
0,5	650	204,05	217,18 ($\Delta T = 260^\circ\text{C}$)	205,95 ($\Delta T = 195^\circ\text{C}$)	188,39 ($\Delta T = 130^\circ\text{C}$)	137,53 (üniform)
0,7	590	285,67	282,63 ($\Delta T = 236^\circ\text{C}$)	274,41 ($\Delta T = 177^\circ\text{C}$)	260,75 ($\Delta T = 118^\circ\text{C}$)	205,93 (üniform)

Aynı prosedür kullanılarak, farklı yük oranı kombinasyonları ve sıcaklık gradyan faktörü için kesitin plastik bükme moment kapasitesi hesaplanmış ve sonuçları Çizelge 4.3’de detaylı görülmektedir. $\alpha = 0,6, 0,7$ ve $0,8$ ’deki üç sıcaklık derecesi, üç tarafı yangına maruz kalan bir çelik kirişin düzgün olmayan sıcaklık dağılımına sahip olduğunun göstergesidir. Üst başlık ise beton döşeme levhası ile korunur. Alt başlık limit sıcaklık derecesinde, sıcaklık farkı üst ve alt başlıklar arasında yaklaşık 100°C – 300°C arasındadır. Aşağıdaki gözlemler Çizelge 4.3’deki sonuçlar neticesinde saptanmıştır.

- Bir çelik kirişte düzgün olmayan sıcaklık dağılımları altında, kiriş bükme moment kapasitesi, kirişin üst başlığındaki sıcaklığa karşı çokta hassas değildir.
- Limit sıcaklık yönteminden elde edilen sonuçlar tüm yük oranları için bükme moment kapasitesi içinde aynıdır.

- iii. Eğilme momenti kapasitesi yöntemi, alt başlık ve üst başlık arasında yaklaşık 250°C veya daha yüksek sıcaklık farkı verecek şekilde sıcaklık eğimi yüksek olduğunda kirişi arttırılmış bir bükme momenti kapasitesi sağlamak için kullanılabilir.

4.2.3. Eurocode 3 bölüm 1.2 metodu (CEN 2005b)

Plastik Eğilme Momenti Kapasitesi

Eurocode 3, bir çeliğin plastik bükme moment kapasitesini hesaplamak için iki yöntem sunar. Birinci yöntem Bölüm 4.2.1 kısımdaki bükme momenti kapasitesi yöntemi ile aynıdır. Çizelge 4.2'de gösterilmiştir. Bu yöntemdeki hesaplama adımları, Eurocode 3 kullanımı çok daha basit alternatif bir yöntem sunar. Bu basit yöntemde bir kirişin plastik bükme momenti kapasitesi şöyledir;

$$M_{p,fi} = k_{y,T} M_p / (k_1 k_2) \quad (4.4)$$

Formülde;

M_p – Ortamdaki kesitin bükme moment kapasitesidir.

$k_{y,T}$ – Çelik kirişin alt başlıktaki, maksimum sıcaklıktaki etkin akma mukavemetindeki azalma faktörüdür.

$k_{y,T} M_p$ – Çelik kirişin üniform bir T sıcaklıkta plastik bükme moment kapasitesini azaltan faktördür.

k_1, k_2 – Çelik kirişte, düzensiz sıcaklıklar da hesaba dahil edilen faktörlerdir.

Önceki örnek için, $k_1=0,7$ ve $k_2=1,0$ alınır. Üniform sıcaklık etkindir. M_p değerlerinin (113,69 kN.m, 196,47 kN.m ve 294,19 kN.m) sırasıyla $\alpha = 0,7$ 'ye bölünmesiyle sırasıyla üç yük oranı elde edilir. Bu değerlerin bükme momenti kapasitesi yönteminden hesaplanıp, oluşturulan Çizelge 5.5 sonuçlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle, üniform olmayan sıcaklık dağılımlarına sahip çelik kirişler için, limit sıcaklık yöntemi, her iki koddaki bükme momenti kapasitesi yöntemi ve Eurocode 3'teki basit alternatif yöntem, kesitin plastik bükme momenti kapasitesi için çok benzer sonuçlar verir. Bununla birlikte, eğilme momenti kapasitesi yöntemi, uygulamak

için en zahmetli yöntemdir. Bu nedenle, bükme momenti kapasite metodunu kullanmak için güçlü bir gerekçe olmadıkça (örneğin, yangından korunmanın ortadan kaldırılmasını haklı kılmak için), limit sıcaklık yöntemi ve Eurocode 3'te basit alternatif yöntem tercih edilir.

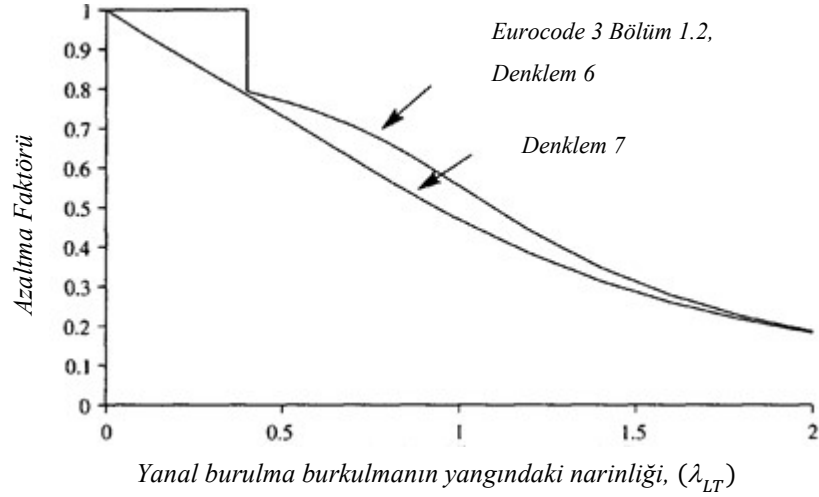
Çelik Kirişlerin Yanal Burulmalı Burkulması

Çelik kirişin eğilme direnci genellikle kesitin plastik bükme momenti kapasitesi tarafından kontrol edilmesine rağmen, bazen yangın anındaki bir çelik kirişin yanal burulma burkulma direncini değerlendirmek gerekir. Eurocode 3' te yanal burulma burkulma direncini değerlendirmek gerekir. Eurocode 3' te yanal burulma burkulma direnci çevre sıcaklığında olduğu gibi hesaplanır. Yüksek sıcaklıklardaki çelik kirişin narinlik derecesi aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\bar{\lambda}_{LT,fi} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,T,com}}{k_{E,T,com}}} \quad (4.5)$$

Çizelge 4.4. Yanal burulma burkulma için İngiliz Standardı (BSI 1990) ve Eurocode 3 (CEN 2005a) hesaplamalarının karşılaştırılması.

		0,208(20)		0,411(40)		0,606(60)		0,790(80)		0,962(100)		1,342(150)	
		BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC	BS	EC
0,7	(1)	0,7	0,716	0,698	0,556	0,606	0,507	0,5	0,435	0,412	0,354	0,265	0,213
	(2)		0,716		0,554		0,502		0,426		0,343		0,204
	(3)		0,716		0,553		0,498		0,418		0,333		0,197
	(4)	0,7	0,718	0,698	0,558	0,606	0,508	0,5	0,435	0,412	0,353	0,265	0,212
	(5)		0,718		0,554		0,499		0,420		0,334		0,197
	(6)	0,7	-	0,657	-	0,534	-	0,419	-	0,329	-	0,199	-
0,5	(1)	0,5	0,5	0,498	0,386	0,427	0,348	0,357	0,293	0,294	0,234	0,189	0,138
	(2)		0,5		0,389		0,355		0,306		0,249		0,150
	(3)		0,5		0,386		0,348		0,292		0,233		0,137
	(4)	0,5	0,517	0,498	0,398	0,427	0,358	0,357	0,300	0,294	0,238	0,189	0,140
	(5)		0,517		0,399		0,359		0,302		0,241		0,142
	(6)	0,5	-	0,469	-	0,381	-	0,299	-	0,235	-	0,142	-
0,3	(1)	0,3	0,191	0,199	0,149	0,171	0,135	0,143	0,116	0,118	0,094	0,076	0,0560
	(2)		191		0,147		0,131		0,108		0,085		0,049
	(3)		0,191		0,148		0,133		0,112		0,089		0,053
	(4)	0,3	0,212	0,199	0,161	0,171	0,141	0,143	0,113	0,118	0,087	0,076	0,050
	(5)		0,212		0,164		0,147		0,124		0,099		0,058
	(6)	0,3	-	0,188	-	0,152	-	0,120	-	0,094	-	0,057	-



Şekil 4.8. Çeliğin yangındaki mukavemet azaltma faktörüne göre narinliği

$\bar{\lambda}_{LT}$ – Çevre sıcaklığında kiriş yanal burulma burkulma narinliğidir. Eurocode 3 Part 1.1 (CEN 2005a) kullanılarak hesaplanmıştır.

$k_{y,T,com}$ ve $k_{E,T,com}$ üst başlıktaki basınç sıcaklığındaki çelik mukavemet ve elastik modülü için kalıcı faktörlerdir.

Üst başlıktaki basınç davranışı, bir kirişin yanal burulma burkulması kritik olduğu için, yüksek sıcaklıklarda kiriş narinliklerini değiştirmek için üst başlık basınç sıcaklığının kullanılmalıdır. Ancak, daha sonra gösterileceği gibi Çizelge 4.4 ve Eşitlik (4.5) için kullanılması beklenen sonuçlarda farklılıklara yol açabilir. Yangından dolayı değişmiş kiriş narinliklerini kullanarak, mukavemet azaltma faktörü;

$$\chi_{kt,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,fi} + \sqrt{\phi_{LT,fi}^2 - \bar{\lambda}_{LT,fi}^2}} \quad (4.6)$$

$$\phi_{LT,fi} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT,fi} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,fi}^2] \quad (4.7)$$

α_{LT} Başlangıçtaki hataların etkisini açıklayan bir sabittir ve $\alpha_{LT} = 0,21$

$$M_{b,fi} = \frac{\chi_{LT,fi}}{1.2} M_{p,fi} \quad (4.8)$$

$M_{b,fi}$ – Yangında kiriş kesitinin yanal burulma burkulma direnci.

Eşitlik kullanılarak veya moment kapasitesi yöntemi ile hesaplanır. Eşitlik (4.8)’deki değiştirme faktörü olan 1,2 yangın için düzeltme faktörüdür. Birtakım etkilere izin vermek için kullanılır. Örneğin sıcaklık artış ise gerilme – şekil değiştirme eğrisi (Şekil 4.8) artık doğrusal değildir. Kiriş narinliği($\bar{\lambda}_{LT,fi}$), 0.4’den az ise yanal burulma burkulmadan söz edilemez. Eşitlik (4.4) ve (4.5) kirişin alt başlık sıcaklığını, kesitin plastik bükme momenti kapasitesini ve üst başlık sıcaklığını, kirişin narinlik derecesini belirler. Böylece, çelik kirişin alt ve üst başlık sıcaklıkları verilirse yanal burulma burkulma direnci için hesaplamalar yapılabilir. Bu yöntemle çelik sıcaklıklar tahmin edilir ve kirişin yanal burulma burkulma direnci hesaplanır. Ardından sıcaklık farkı kabul edilebilir derecede küçük olana kadar, sonraki uygun sıcaklık değerlerini belirlemek için bu yangındaki uygulanan yüklerle karşılaştırılır (Wang 2002).

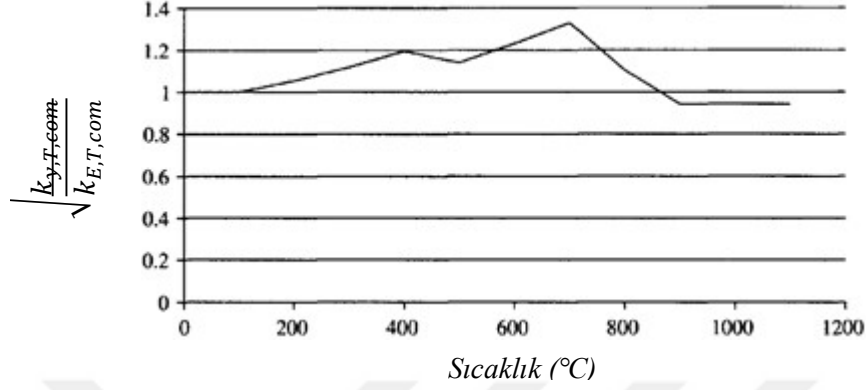
Yanal Burulma Burkulma için İngiliz Standardı (BS 5950) ile Eurocode 3 Karşılaştırması

Kiriş yangın sıcaklıklarının hesaplanmaları limit sıcaklık yöntemi kullanımı Eurocode 3’deki hesaplamadan daha kolaydır. Karşılaştırılması Çizelge 4.4’de kesiti 406x128x74 UB olan çelik kirişin yanal burulma burkulma direncini verir. Bu karşılaştırmada dikkate alınan değişkenler kiriş yanal burulma burkulma narinliği, alt başlık ve üst başlık sıcaklığıdır. Üç kiriş için alt başlık sıcaklığı, limit sıcaklık yöntemi kullanılarak 0.7, 0.5 ve 0.3 yük oranlarından elde edilmiştir. Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından daha düşüktür. (0°C, 150°C ve 250°C aradaki oluşabilecek farklar).

0°C’lik bir fark kirişte üniform bir sıcaklık verimi sağlar. 150°C ve 250°C arasındaki farklar, bir kirişin enine kesitindeki eşit olmayan sıcaklık dağılımının olası iki uç noktasıdır. Çizelge 4.4 yüksek sıcaklıktaki bir kirişin yanal burulma burkulma ve eğilme momenti direncini vermektedir, ortam sıcaklığında kesitin plastik bükme momenti direncine getirir. Her yük oranı için aşağıdaki altı durum göz önüne alınmıştır:

Durum – 1

Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından daha düşüktür, 250°C kadar düşürür ve Eurocode 3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.5)'ten elde edilmiştir.



Şekil 4.9. Yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulma modifikasyon faktörünün sıcaklığa bağlı değişimi.

Durum – 2

Üst başlık sıcaklığı, alt başlık sıcaklığından 150°C daha düşüktür ve EC3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.5)'ten elde edilmiştir.

$$\bar{\lambda}_{LT,fi} = \bar{\lambda}_{LT} \sqrt{\frac{k_{y,T,com}}{k_{E,T,com}}} \quad (4.9)$$

Durum – 3

Kiriş üniform olmayan bir şekilde ısıtılır ve kiriş narinliği, Denklem (4.5) yerine ortam sıcaklığı değerinin 1,2 katı ile çarpılarak elde edilir.

Durum – 4

Kiriş eşit şekilde ısıtılır ve Eurocode 3 hesaplamaları için kiriş narinliği Denklem (4.5)'ten elde edilir.

Durum – 5

Kiriş üniform şekilde ısıtılır ve kiriş narinliği, Denklem (4.5) yerine ortam sıcaklığı değerinin 1,2 katı ile çarpılarak elde edilir.

Durum – 6

Hesaplamalar Bölüm 0 denklemlerini takip eder; ancak, yangında kiriş narinlik derecesi, ortam sıcaklığında kiriş narinlik derecesinin 1.2 katına çıkarılarak elde edilir. 1-5 arasındaki durumlarda, Bölüm 0 hesaplamaları için kiriş narinlik derecesi değişmemiştir. Bölüm 0 hesaplamaları sıcaklığa bağlı değildir ve kiriş hassasiyeti değişmeden, Bölüm 3 hesaplamaları için 1-5 arasındaki durumlar için aynı değer elde edilir. Çizelge 4.4’de sunulan sonuçlardan bazı gözlemler yapılabilir:

- Alt başlık sıcaklığında, Eurocode 3’den (Durum 1) ve (Durum 2) gelen sonuçlar, kirişin üst (basınç) başlığındaki sıcaklıklara karşı hassaslığı, yüksek kiriş narinlik ve düşük yük oranı hariçtir.
- Eurocode 3 hesaplamasında, kiriş narinliği Denklem (4.5) kullanılarak değiştirilirse, aynı alt başlık sıcaklığında daha yüksek bir üst başlık sıcaklığı, kirişin yanal burulma burkulma direnci artışına Çizelge 4.4’deki sonuçlara neden olabilir. Bu, beklenilenle çelişkilidir ve tamamen, kiriş yanal burulma burkulma narinliğini değiştirmek için sadece üst (basınç) başlık sıcaklığının kullanılmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, b modifikasyon faktörü sıcaklık artışı ile monoton olarak artmaz. 400°C ve 500°C ’den daha büyük 700°C arasındaki sıcaklıklarda, bu modifikasyon faktörü sıcaklık arttıkça azalır. Böylece, eğer üst başlık sıcaklığı yukarıdaki bölgelerde ise, daha yüksek bir üst başlık sıcaklığı Denklem (4.5) kullanılarak azaltılmış kiriş narinliği verecektir. Kirişin alt başlık sıcaklığı ve plastik bükülme momenti kapasitesi aynı olduğunda, kirişin yanal burulma burkulma direnci üst başlık sıcaklığından daha yüksektir.
- Şekil 4.9’da gösterilen 300°C-800°C gerçekçilik bölgelerindeki sıcaklıklarda, Denklem (4.5)’te görülen narinlik modifikasyon faktörünün 1,2 sabitine çok yakın olduğunu göstermektedir. Denklem (4.5)’te değiştirme faktörü yerine bu sabit kullanılarak, (Durum 3)’ün sonuçlarının üniform olmayan ısıtma için (Durum 1), (Durum 2) ve (Durum 5)’in olguların sonuçlarını karşılaştırarak nihai sonuçlarda çok az fark olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 1,2 sabitini kullanmanın yararı, hesaplama işleminin basitleştirmesi ve yinelemelerin ortadan kalkmasıdır.
- Kesitin plastik verimi başarısızlığı yönettiği düşük kiriş açıklığında ($\bar{\lambda}_{LT} = 0,208$ veya $\lambda_{LT} = 20$), İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 çok benzer sonuçlar verir. Yanal burulma burkulmanın daha önemli hale geldiği daha narin kirişler için İngiliz

Standardı (BS 5950) Eurocode 3' den daha yüksek bir direnç verir. Ortam sıcaklığındaki farka ilaveten, yangında bu iki yöntem arasındaki farka iki faktör katkıda bulunur:

- (1) İngiliz Standardında (BS 5950), kiriş narinliği yüksek sıcaklıklarda artmamaktadır;
- (2) Eşitlik (4.8)'de Eurocode 3'teki direnç tarafında 1,2'lik bir azalma faktörü uygulanır. Bu örnekte incelenen kiriş için tesadüfen, ortam sıcaklığında ve yüksek narinlikte ($\bar{\lambda}_{LT} > 0,79$ veya $\lambda_{LT} > 80$), Eurocode 3 (Bölüm 2.1) kullanılarak hesaplanan kirişin yanal burulma burkulma direnci, BS 5950 Bölüm 1 kullanılarak hesaplanan yaklaşık 1,2 kat daha fazladır.

Bu, Eşitlik (4.8)'de azalma faktörü 1,2 olan kullanmanın etkisini iptal eder. Bu nedenle, farklı bir narinliğin kullanılması, İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 arasındaki hesaplanan sonuçların farklılığının tek nedeni haline gelir. İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3 hesaplamalarında aynı kiriş narinliği kullanıldığında Durum 6 ile Çizelge 4.1'deki Eurocode 3'teki Durum 1 ile Durum 5 arasındaki sonuçların karşılaştırılması, her iki yöntem de çok benzer sonuçlar verir. Bu karşılaştırmalı çalışmadan, İngiliz Standardı (BS 5950) ve Eurocode 3'ün yangında bir kirişin yanal burulma burkulma direnci için benzer sonuçlar verdiği sonucuna varılabilir. İki yöntemi kullanarak öngörülen sonuçların farkı, yalnızca yükseltilmiş sıcaklıklarda kiriş için farklı yanal burulma burkulma direnç değerlerini kullanmasıdır. İngiliz Standardı (BS 5950)'deki yanal burulma burkulma narinliğinin, yüksek sıcaklığa maruz çelikteki mukavemet ve sertlikteki değişiklikleri yansıtacak şekilde değiştirilmesi uygun görünüyor. Yaklaşık olarak, yangında kiriş narinliği ortam sıcaklığından 1,2 kat daha fazladır (Wang 2002).

4.3. Eurocode 3 Yönteminde Yapılan Değişiklikler

İngiliz Standardı (BS 5950) ve EC3 (Eurocode 3) hesaplamalarında ortam sıcaklığı tasarım metodu korunur. Kastedilen yükleme, çelik gerilme-gerinme ilişkisinin doğrusal elastik-plastik olmasıdır. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda, çeliğin gerilme-gerinme ilişkisi son derece doğrusal değildir ve uygulanan gerilme seviyesine bağlı olarak kirişin teğet sertliği başlangıç değerinden çok daha düşük olabilir. Kirişin narinlik derecesini üç

bölüme ayrılırsa, yüksek kiriş narinliğiyle uygulanan gerilme genellikle düşüktür ve kiriş teğet sertliği başlangıç değerine yakındır. Çelik veriminin tasarımı yönettiği durumlarda düşük narinlikte bir kiriş için kirişin eğilme direnci, teğet sertliğine duyarlı değildir. Bununla birlikte, uygulanan gerilmenin ve yanal burulma burkulmanın önemli olduğu, ortam sıcaklığındaki hassas bir kiriş için $(\bar{\lambda}_{LT,fi} - 1)$ tasarım yaklaşımı ve yanal burulma burkulma direncinin büyük olacağı yangında tahmin edilebilir. Eurocode 3, bunu hesaba katmak için Eşitlik (4.8)'de 1,2 sabiti getirirse de bu yaklaşım, yangına maruz çelik kirişin yanal burulma burkulmanın karmaşık davranışını yansıtmaz. Yangına maruz çelik kirişlerin yanal burulma burkulmaları incelendiğinde Bailey et al. (1996) ve Real and Franssen (2000), sonlu elemanlar teknikleri kullanılarak her iki araştırmacı da aynı sonuca varmışlardır.

Eurocode 3 yaklaşımındaki bir değişiklik olarak, Real and Franssen (2000) yanal burulma burkulma için mukavemet azaltma faktörünü hesaplamak için alternatif bir yöntem önerdi şöyle ki, Eşitlik (4.8) kullanılması yerine, yanal burulma burkulma direnci için değişime uğramış güç azaltma faktörü kullanılmıştır,

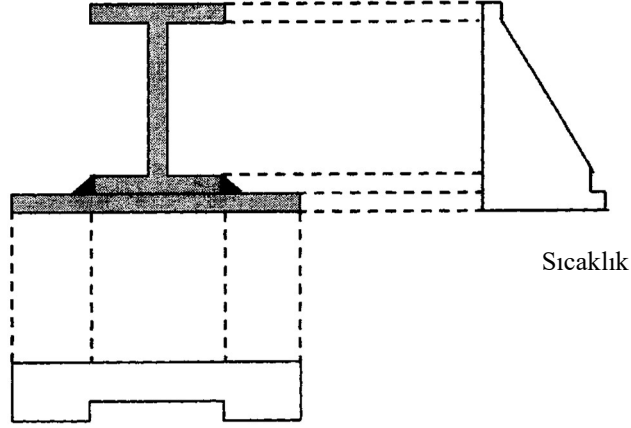
$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\phi_{LT,fi} + \sqrt{\phi_{LT,fi}^2 - \bar{\lambda}_{LT,fi}^2}} \quad (4.10)$$

$$\phi_{LT,fi} = \frac{1}{2} [1 + \alpha \bar{\lambda}_{LT,fi} + (\bar{\lambda}_{LT,fi})^2] \quad (4.11)$$

(4.10) ve (4.11)'de $\alpha = \beta \varepsilon$ bir kusur faktörü, $\beta = 0,65$ şiddet faktörü, eğri uydurma ile sunulan tahminler sayısal sonuçlara göre elde edilmiştir. Bilgisayar programı SAFIR kullanılarak, Eşitlik (4.8) ve Eşitlik (4.10) ve (4.11) kullanılarak elde edilen indirgeme faktörleri amaçlandığı gibi, yaklaşım Vila Real ve Franssen, hassas kirişler için daha düşük bir narinlikle, yanal burulma burkulma direnci sağlar.

Vila Real and Franssen tarafından önerilen değişiklik iki avantaja sahiptir:

- (1) Eurocode 3'deki aşırı tahmini ortadan kaldırır;
- (2) Adım değişimini ortadan kaldırır, $\bar{\lambda}_{LT,fi} = 0,4$



Şekil 4.10. İnce döşemeli çelik kirişteki sıcaklık dağılım gösterimi

4.4. Çelik Kolon ve Kirişlerde Sıcaklık Hesaplamaları

Önceki denklemlerde özetlendiği gibi hesaplamaları yapmak için, çelik kolon ve kirişlerdeki sıcaklıklar hakkında mevcut bilgilerin olması gerekir. Korumasız çelik kolon, kiriş veya yaklaşık olarak eşit sıcaklıktaki korunmuş bir çelik kolon, kiriş için aşağıda gösterilen şekilde Denklem (4.12) ve (4.13) kullanılabilir. Yangın koşulları altında sayısal yöntemler kullanılmalıdır.

Korumasız Çelik Yapı

$$\Delta T_{st} = k_{sh} \frac{A_m/V}{\rho_{st} C_{st}} \frac{A_s}{V} h_{net} \Delta t \quad (4.12)$$

k_{sh} - Gölgeleme etkisi için düzeltme faktörü

(A_m/V) – Kesit faktörü (1/m)

A_m – Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı (m²/m)

V – Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m³/m)

C_{st} – Çeliğin özgül ısısı (J/kgK)

ρ_{st} – Çeliğin birim hacim kütlesi

h_{net} – Birim alana düşen net ısı akısının tasarım değeri (W/m²)

Δt – Zaman adımı (sn)

- Standart yangın (ISO 834) etkisi altında I – kesitlerde gölge etkisi için düzeltme faktörü; $k_{sh} = 0,9[A_m/V]_b/[A_m/V]$
- Diğer tüm durumlarda; $k_{sh} = [A_m/V]_b/[A_m/V]$
- $\dot{h}_{net} = \varepsilon_f \varepsilon_m$ $\varepsilon_f = 1,0$ alınarak ε_m değeri EN 1991-1-2'den (CEN 2002) alınmalıdır.
- Δt değeri 5 saniyeden fazla alınmamalıdır.

Koruma Malzemesi ile Yalıtılmış Çelik Yapı

$$\Delta T_{st} = \frac{\lambda_p A_p / V (T_{fi} - T_{st})}{d_p \rho_{st} C_{st} (1 + \phi / 3)} \Delta t - (e^{\phi / 10} - 1) \Delta T_{fi} \quad (4.13)$$

$$\phi = \frac{C_p \rho_p}{C_{st} \rho_{st}} d_p A_p / V \quad (4.14)$$

A_p / V – Yangından koruma malzemesi ile korunmuş çelik yapı elemanlarının kesit faktörü

A_p – Birim uzunluktaki bir yapı elemanı için kullanılan yangından koruma malzemesinin alanı (m^2/m),

V – Yapı elemanı birim uzunluğunun hacmi (m^3/m)

C_p – Yangından koruma malzemesinin, sıcaklığa bağlı olmayan özgül ısısı (J/kgK)

d_p – Yangından koruma malzemesinin kalınlığı (m)

T_{fi} – Yangın sıcaklığı ($^{\circ}C$)

T_s – Çelik sıcaklığı ($^{\circ}C$)

$\Delta T_{fi} - \Delta t$ süresince ortam yangın sıcaklığındaki artış (K)

λ_p – Yangından koruma sisteminin (malzemenin) ısı iletkenliği (W/mK)

ρ_p – Yangından koruma malzemesinin birim hacim kütlesi (kg/m^3)

4.5. Kullanılan Malzemelerin Isıl (Termal) Özellikleri

Isı transfer analizlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilebilmesi için beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda kullanılan malzemelerin ısı (termal) özelliklerinin

bilinmesi gerekmektedir. Bunlar; ısıl geçirgenlik, özgül ısı ve yoğunluk olarak karşımıza çıkmaktadır.

Çelik Özellikleri

- **Yoğunluk** ($\rho_{st} - kg/m^3$)

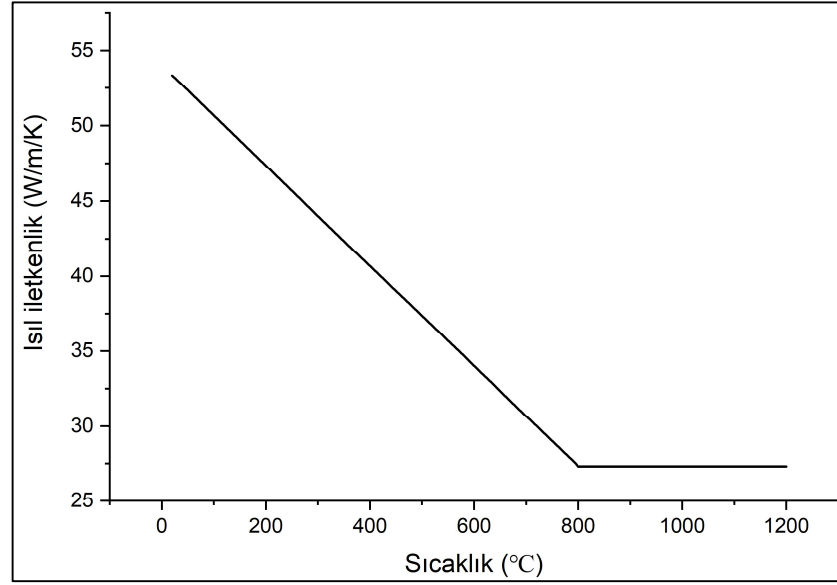
Yoğunluk çelik sıcaklığından bağımsız olarak ($\rho_{st} = 7850 kg/m^3$) alınabilir (CEN 2005b).

- **Isıl iletkenlik** ($\lambda_{st} - W/mK$)

CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin ısıl iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 4.11'de bu değişim gösterilmektedir.

$$20^\circ\text{C} \leq T_{st} < 800^\circ\text{C}$$
$$\lambda_{st} = 54 - 3.33 \times 10^{-2} T_{st} \quad (4.15)$$

$$T_{st} \geq 800^\circ\text{C}$$
$$\lambda_{st} = 27,3 \quad (4.16)$$



Şekil 4.11. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi

American Society Structural Fire Protection'da (ASCE 1992) belirtilen çelik elemandaki sıcaklık artışı ısı akışının bir sonucu olarak malzemenin termal iletkenliğinin bir fonksiyonudur. Aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 4.12'de bu değişim gösterilmektedir.

$$0^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 900^{\circ}\text{C}$$

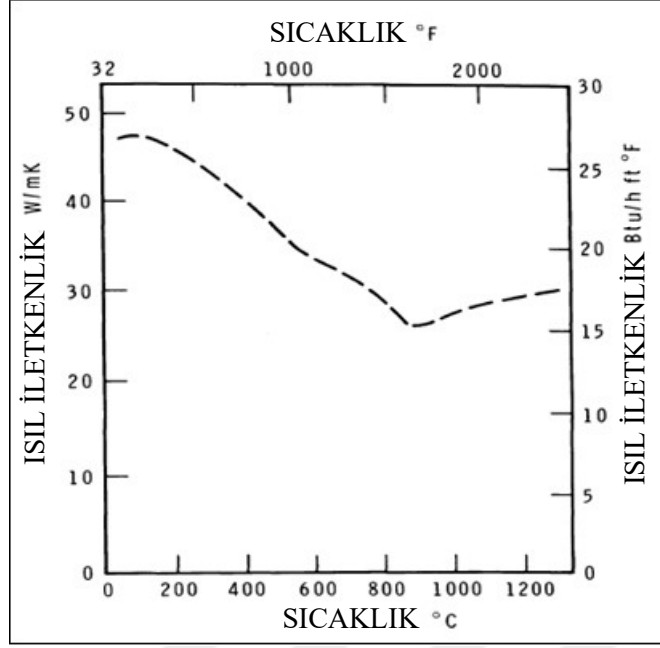
$$\lambda_{st} = -0,022T + 48$$

(4.17)

$$T_{st} > 900^{\circ}\text{C}$$

$$\lambda_{st} = 28,2$$

(4.18)



Şekil 4.12. American Society Structural Fire Protection çeliğin sıcaklığa bağlı ısı iletkenliğinin değişimi (ASCE 1992).

- **Özgül Isı (C_{st} – J/kgK)**

CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin özgül ısısı sıcaklığa bağlı olarak değişmekte ve aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmektedir. Şekil 4.13'de bu değişim gösterilmiştir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 600^{\circ}\text{C} \quad (4.19)$$

$$C_{st} = 425 + 7.73 \times 10^{-1}T_{st} - 1.69 \times 10^{-3}T_{st}^2 + 2.22 \times 10^{-6}T_{st}^3$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 735^{\circ}\text{C} \quad (4.20)$$

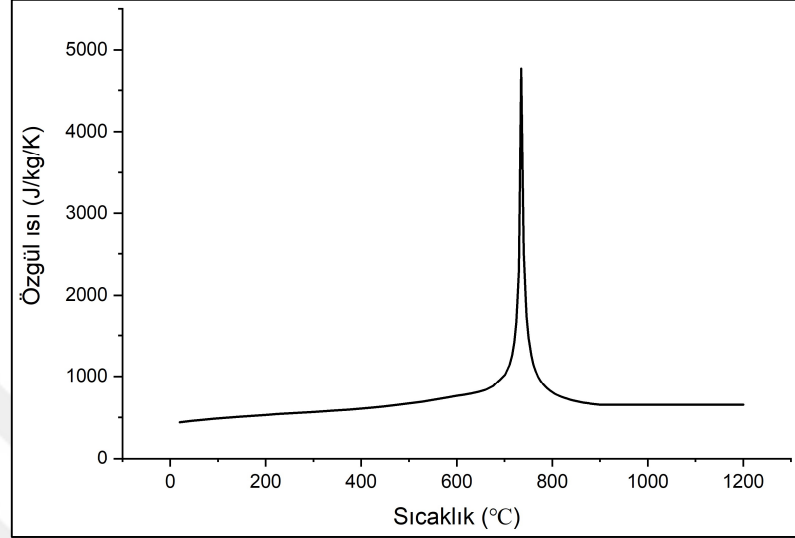
$$C_{st} = 666 + \frac{13002}{738 - T_{st}}$$

$$735^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 900^{\circ}\text{C} \quad (4.21)$$

$$C_{st} = 545 + \frac{17820}{T_{st} - 731}$$

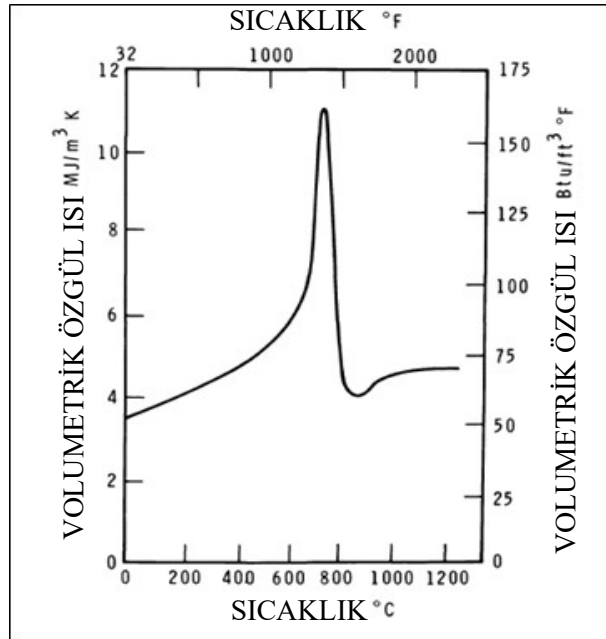
$$900^{\circ}\text{C} \leq T_{st} < 1200^{\circ}\text{C} \quad (4.22)$$

$$C_{st} = 650$$



Şekil 4.13. Çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi

American Society Structural Fire Protection'da (ASCE 1992) belirtilen çeliğin özgül ısısının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak Şekil 4.14'de gösterilmektedir.



Şekil 4.14. American Society Structural Fire Protection'da çeliğin özgül ısı-sıcaklık değişimi (ASCE 1992).

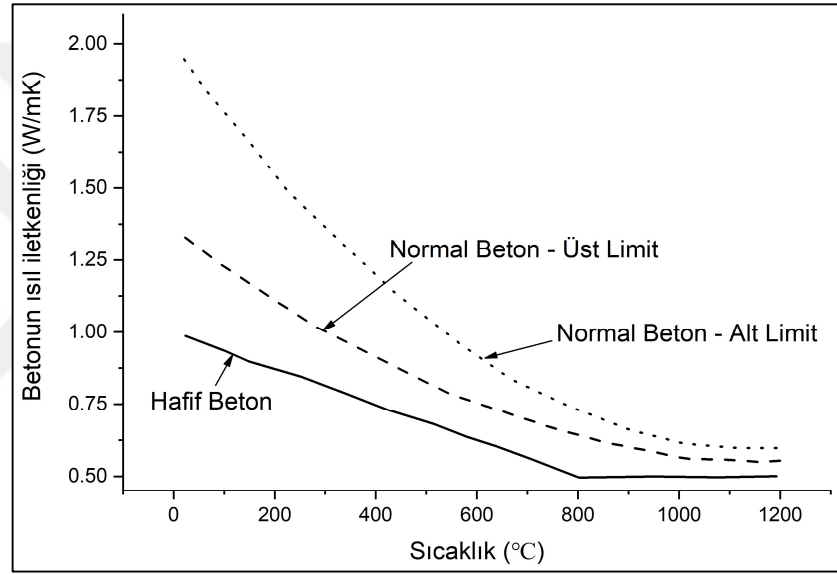
Beton Özellikleri

- **Yoğunluk ($\rho_c - kg/m^3$)**

Beton yoğunluğu, beton sıcaklığından bağımsız olarak $2300 kg/m^3$ alınabilir (CEN 2005c).

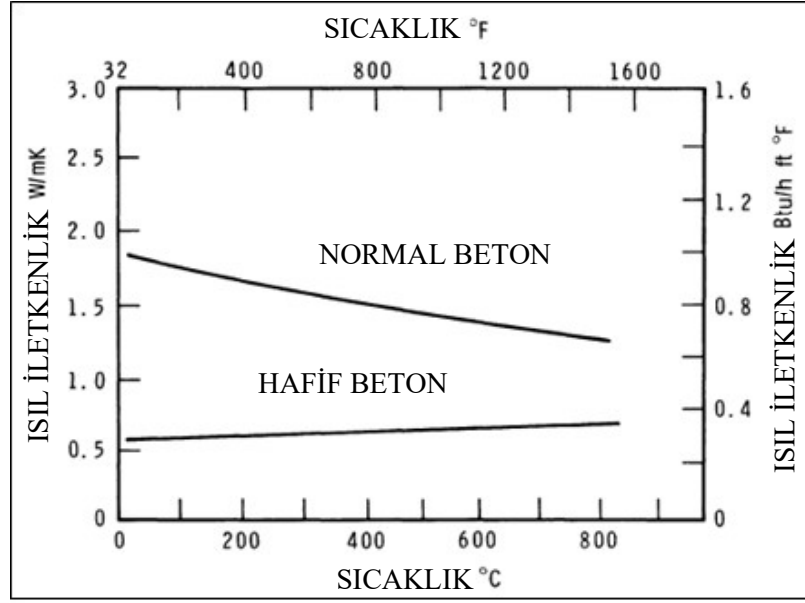
- **Isıl iletkenlik ($\lambda_c - W/mK$)**

CEN (2005c)'de belirtilen beton sınıfına göre (normal veya hafif beton) betonun alt ve üst limitlere göre ısı iletkenliği Şekil 4.15'de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Betonun ısı iletkenlik-sıcaklık değişimi

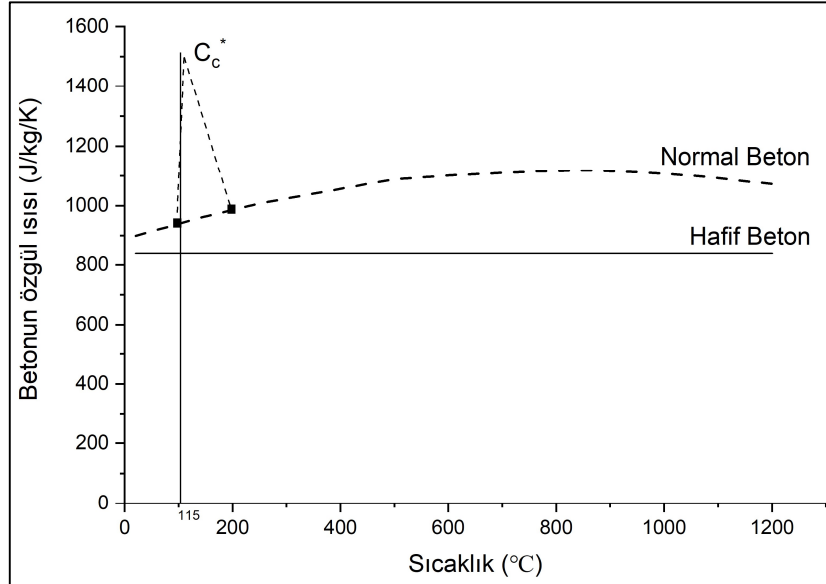
American Society Structural Fire Protection'da (ASCE 1992) belirtilen normal veya hafif betonun ısı iletkenliği Şekil 4.16.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. American Society Structural Fire Protection’da sıcaklığın fonksiyonu olarak normal ve hafif betonda ısı iletkenlik (ASCE 1992).

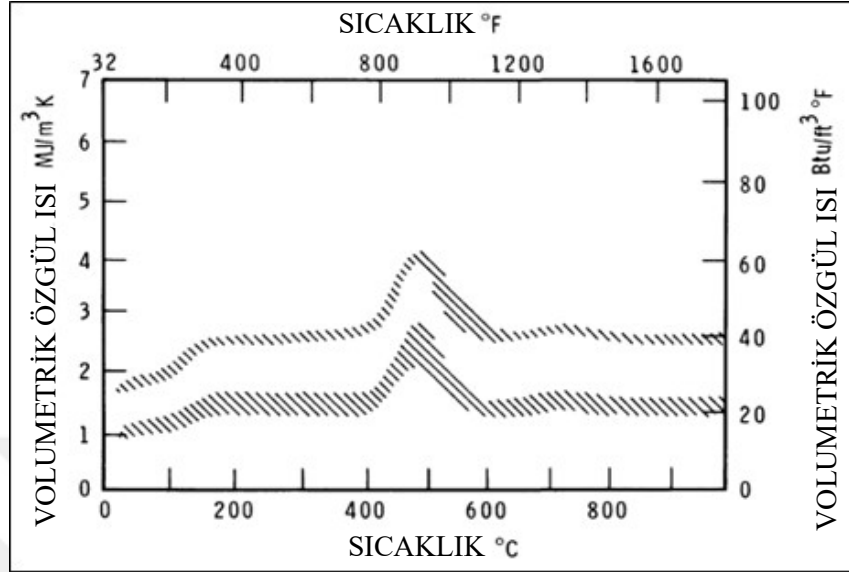
- **Özgöl ısı ($C_c - J/kgK$)**

CEN (2005c)’de belirtilen beton malzemenin sıcaklığa bağlı özgöl ısı değişimi Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.17. Betonun sıcaklığa bağlı özgöl ısı değişimi

American Society Structural Fire Protection'da (ASCE 1992) belirtilen normal veya hafif betonun özgül ısı değişimi Şekil 4.18'de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. Betonun sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi (ASCE 1992)

Pasif Yangın Koruma Malzemesinin (İntumesan Boya) Özellikleri

- **Yoğunluk ($\rho_p - kg/m^3$)**

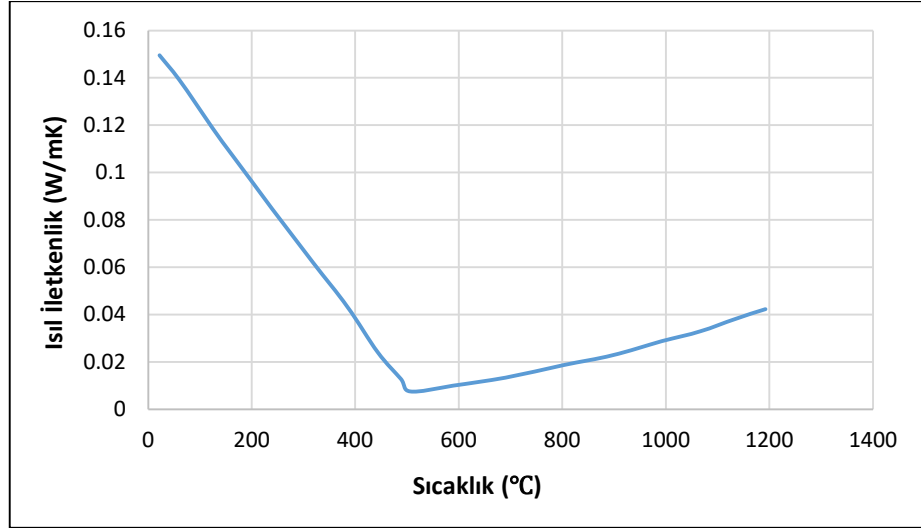
Pasif yangın koruma yoğunluğu, koruma sıcaklığından bağımsız olarak $100 kg/m^3$ alınabilir (CEN 2013).

- **Özgül ısı ($C_p - J/kgK$)**

Pasif yangın korumanın Özgül Isı değeri, koruma sıcaklığından bağımsız olarak $1000 J/kgK$ alınabilir (CEN 2013).

- **Isıl iletkenlik ($\lambda_p - W/mK$)**

Wang et al. (2013)'de belirtilen koruma malzemesinin (intumesan boya) Isıl iletkenlik değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 4.13'da bu değişim gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Pasif yangın koruyucu boyanın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi (Wang et al. 2013).

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

5.1. Validasyon Model Çalışması

Beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın tepkisini öngörmek için gerçekçi bir üç boyutlu sayısal model, ANSYS programı (ANSYS 18.2 ve ANSYS 19.0) yardımı ile elde edilmiştir. Bu model sayesinde daha önce başka araştırmacılar tarafından test edilen veya modellenen bir dizi kolon numunesinin yangın davranışı tahmin edilmiştir. Tez çalışmasında ANSYS programının Transient Thermal kısmında modellemeler yapılmıştır. Validasyon modeli olarak iki ayrı model benimsenmiştir.

5.1.1. Validasyon modeli – 1

Bu validasyon modeli Lyu et al. (2017) çalışması baz alınarak ve o çalışmada kullanılan termal özellikler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Termal özellikler olarak betonun, çeliğin ve pasif yangın koruyucu boyanın özgül ısı değerleri, ısı iletkenlik ve yoğunlukları aşağıda sunulmuştur.

- **Özgül ısı**

Bu validasyon modelinde beton ile doldurulmuş çelik kolonda beton için kullanılan özgül ısı değeri CEN (2005c)'de belirtilen beton malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Çelik için kullanılan Özgül ısı değeri, CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin sıcaklığa bağlı Özgül ısı değişimi Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın Özgül ısı değeri sıcaklıktan bağımsız olarak 1010 J/kg. K alınmıştır (Lyu et al. 2017).

- **Isıl iletkenlik**

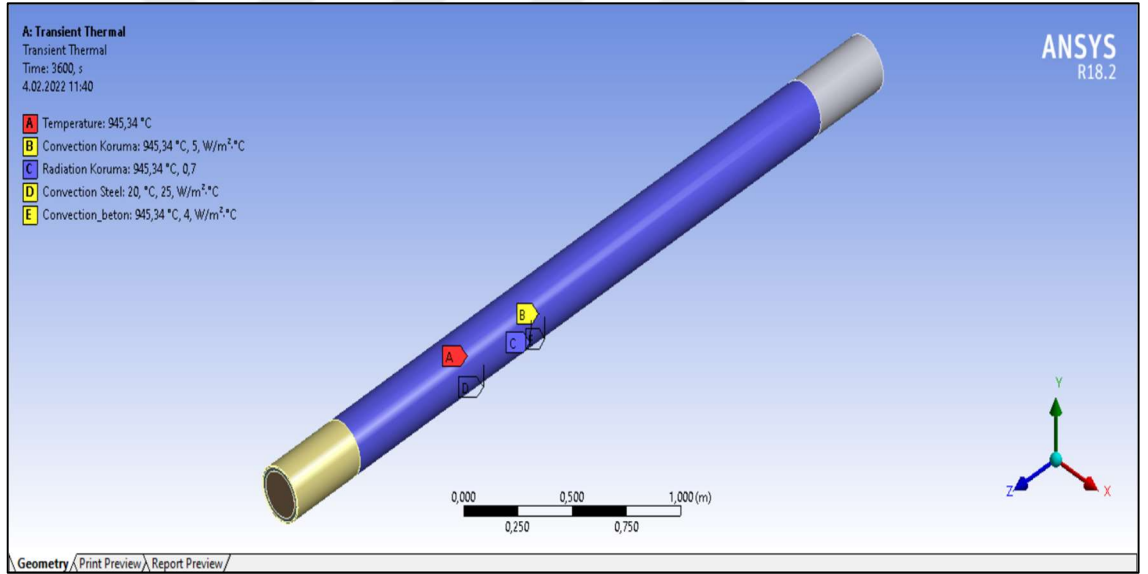
Yapılan çalışmada beton için kullanılan ısı iletkenlik değeri CEN (2005c)'de belirtilen beton sınıfına göre (normal veya hafif beton) betonun alt ve üst limitlere göre ısı iletkenliği Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Çelik için kullanılan Isıl iletkenlik değeri CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın Isıl iletkenlik değeri sıcaklıktan bağımsız olarak 0,116 W/m. K alınmıştır (Lyu et al. 2017).

Birinci validasyon modelinde kullanılan boya koruması ağırlıkça %40 portland çimentosu, %25 perlit, %20 vermikülit ve %15 sudan oluşmaktadır.

- **Yoğunluk**

Kullanılan yoğunluk değeri, beton sıcaklığından bağımsız olarak 2300 kg/m^3 alınmıştır. (CEN 2005b). Çelik için kullanılan yoğunluk değeri çelik sıcaklığından bağımsız olarak ($\rho_{st} = 7850 \text{ kg/m}^3$) alınmıştır. (CEN 2005b). Pasif yangın koruyucu boyanın yoğunluk değeri 305 kg/m^3 alınmıştır (Lyu et al. 2017).

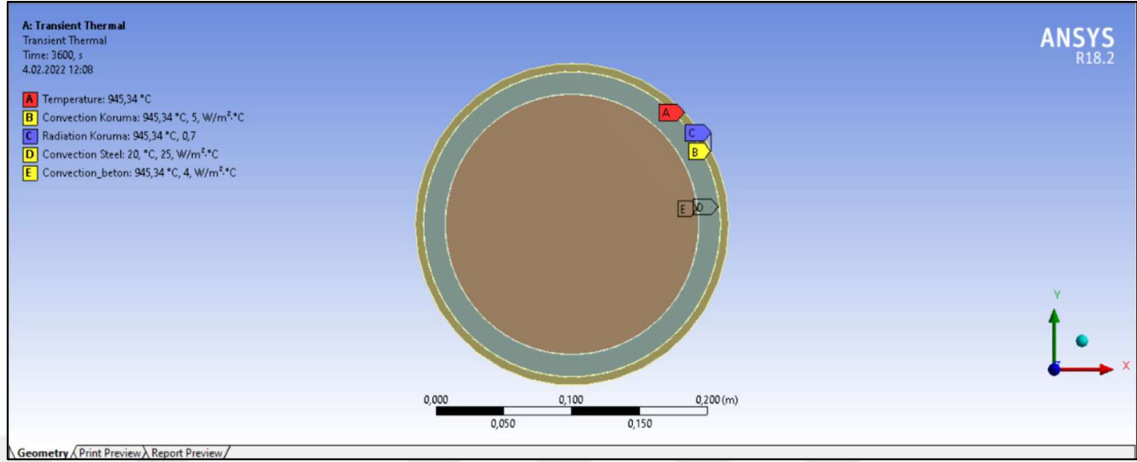
Modelde kullanılan kolon yüksekliği 3 metre, çelik kalınlığı 16 milimetre, boya koruma kalınlığı 5,9 milimetredir. Modelde yangın alan yüzey Şekil 5.1’de gösterilen mavi kısımdır. Uç bölgeleri validasyon model makalesinde kolonu sabitleme görevi gördüğünden yangın almamaktadır.



Şekil 5.1. Birinci validasyon modelinin ANSYS’den görüntüsü

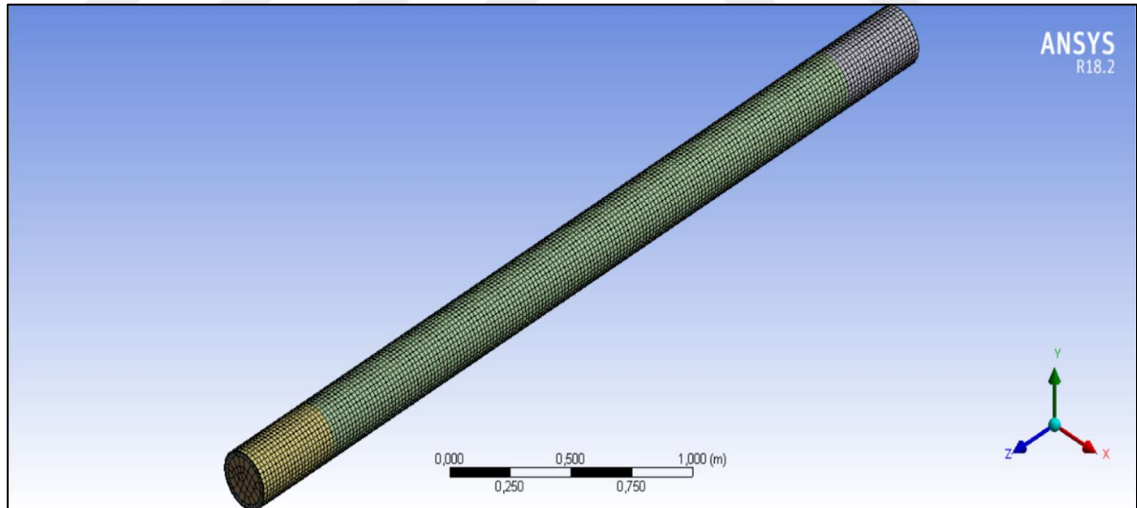
Validasyon modeli bir iç çekirdek beton, orta katmanda çelik ve dış katmanda boya korumasından (Şekil 5.2) oluşmaktadır. Modelde kullanılan konveksiyon boya koruma değeri $5 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon çelik değeri $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon beton değeri $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve radyasyon boya koruma değeri 0,7’dir ve bu termal sınır koşulları Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Konveksiyon boya koruma değeri boya koruma dış yüzeyine, konveksiyon çelik değeri çelik dış yüzeyine, konveksiyon beton değeri beton dış yüzeyine ve radyasyon boya koruma değeri boya koruma dış yüzeyine etki ettirilmiş ve Şekil 5.2’de

gösterilmiştir. Modelde kullanılan yangın eğrisi, Standart yangın (ISO 834) etkisidir ve bir saatlik yangına maruz kalma süresince modellenmiştir.



Şekil 5.2. Birinci validasyon modelinin ANSYS’den en kesiti

Validasyon modeli – 1 de kullanılan meş, bütün yüzeylerde 0,1-0,2 santimetre büyüklüğünde atılmıştır. Meş görüntüsü Şekil 5.3’de gösterilmiştir.

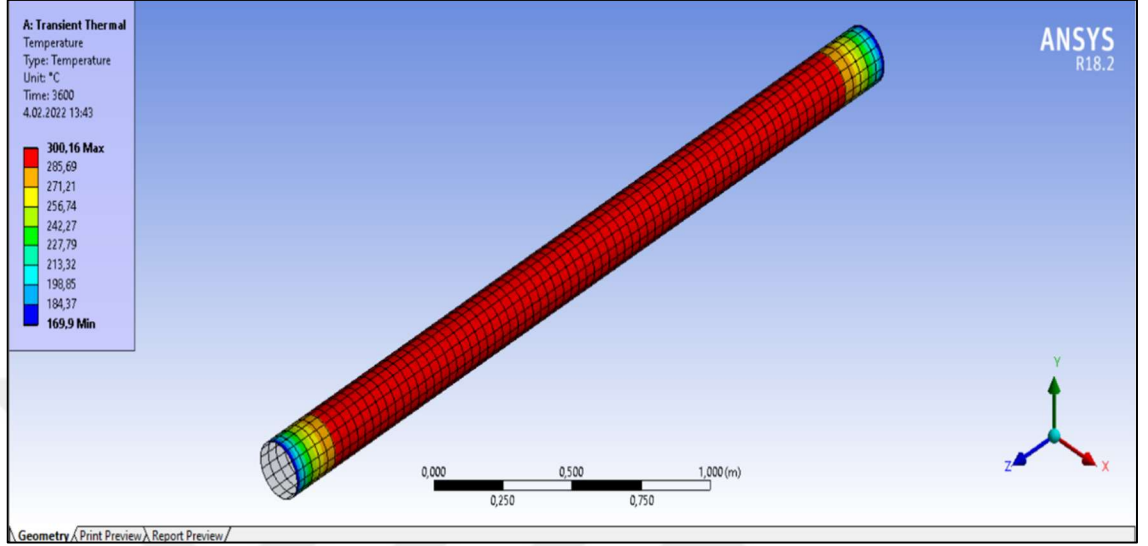


Şekil 5.3. Birinci validasyon modelinde kullanılan meş görüntüsü

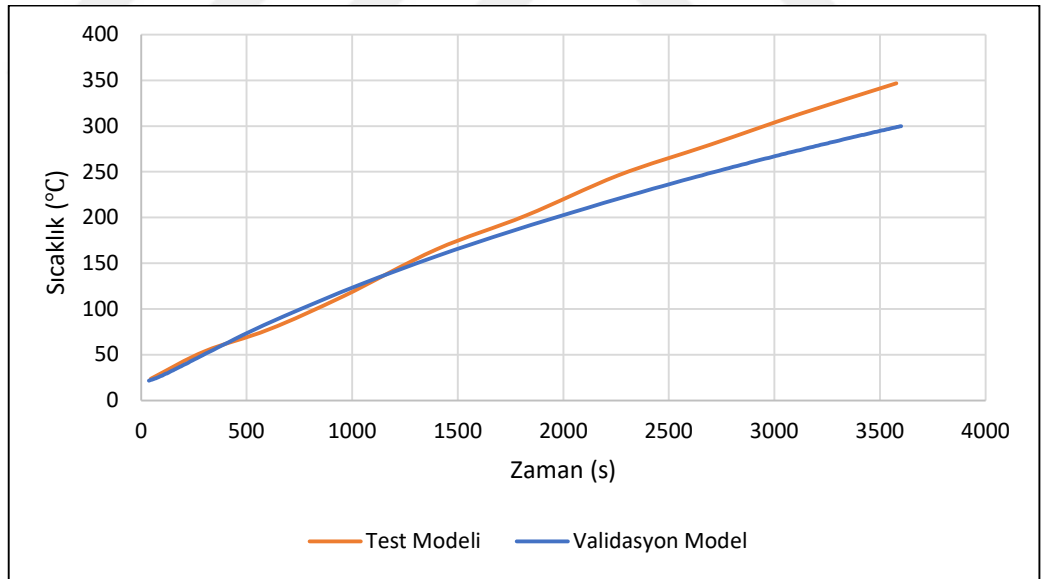
Validasyon modeli – 1’de oluşan bir saatlik yangına maruz kalma süresi sonucunda ortaya çıkan çelik sıcaklıklarının görüntüsü Şekil 5.4’de gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum çelik sıcaklığı 300,16°C olurken, minimum çelik sıcaklığı ise 169,9°C olduğu görülmektedir. Şekil 5.5’de görülen grafikte ise test modeli ile validasyon modelinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Sıcaklıklar 2000 saniyeye kadar çok iyi bir

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

uyum yakalarken 3600. saniyede maksimum sıcaklıkta 40°C'lik bir fark oluşmuştur. Bu da test modelinin konveksiyon ve radyasyon katsayılarının validasyon modeli için kullanılan makalede verilmemesinden dolayı yakınsama yoluyla bulunduğu içindir.



Şekil 5.4. Birinci validasyon modelinde çelik sıcaklık dağılımı



Şekil 5.5. Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması

5.1.2. Validasyon modeli – 2

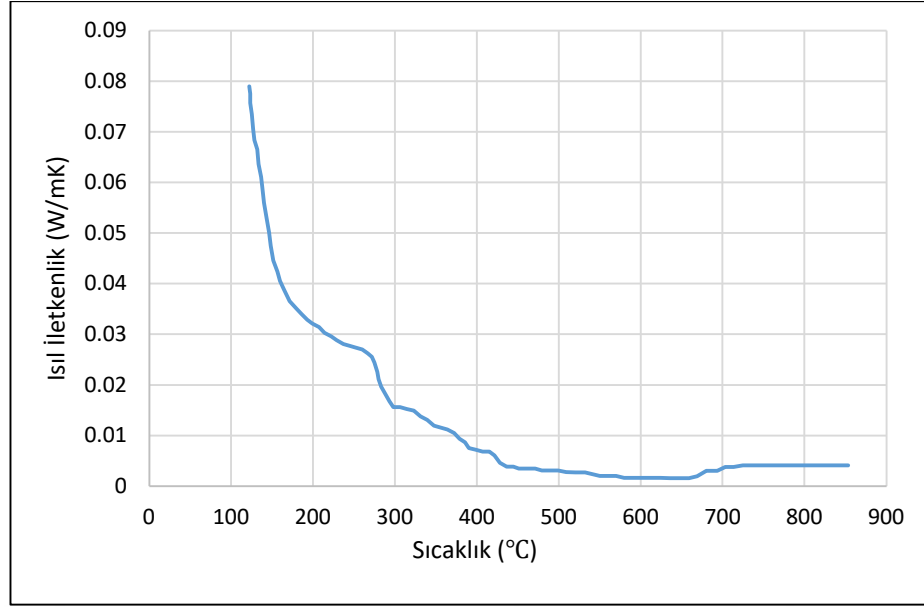
Bu validasyon modeli Song et al. (2020) çalışmasında sunulan model baz alınarak ve o çalışmada kullanılan termal özellikler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Termal özellikler olarak betonun, çeliğin ve pasif yangın koruyucu boyanın özgül ısı değerleri, ısı iletkenlik ve yoğunlukları aşağıda sunulmuştur.

- **Özgöl ısı**

Bu geliştirilen modelde kullanılan özgül ısı değeri CEN (2005c)'de ve ASCE (1992)'de belirtilen beton malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi sırasıyla Şekil 4.17'de ve Şekil 4.18'de gösterilmiştir. Çelik için kullanılan özgül ısı değeri, CEN (2005b)'da ve ASCE (1992)'de belirtilen çeliğin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın Özgül ısı değeri sıcaklıktan bağımsız olarak 1000 J/kg. K alınmıştır (Song et al. 2020).

- **Isıl iletkenlik**

Bu validasyon modelinde beton için kullanılan ısı iletkenlik değeri CEN (2005c)'de ve ASCE (1992)'de belirtilen beton sınıfına göre (normal veya hafif beton) betonun alt ve üst limitlere göre ısı iletkenliği Şekil 4.15 ve Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Çelik için kullanılan ısı iletkenlik değeri CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin ısı iletkenliği sıcaklığa bağlı olarak Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın ısı iletkenlik değeri sıcaklığa bağlı olarak Şekil 5.6'da gösterilmiştir (Song et al. 2020).

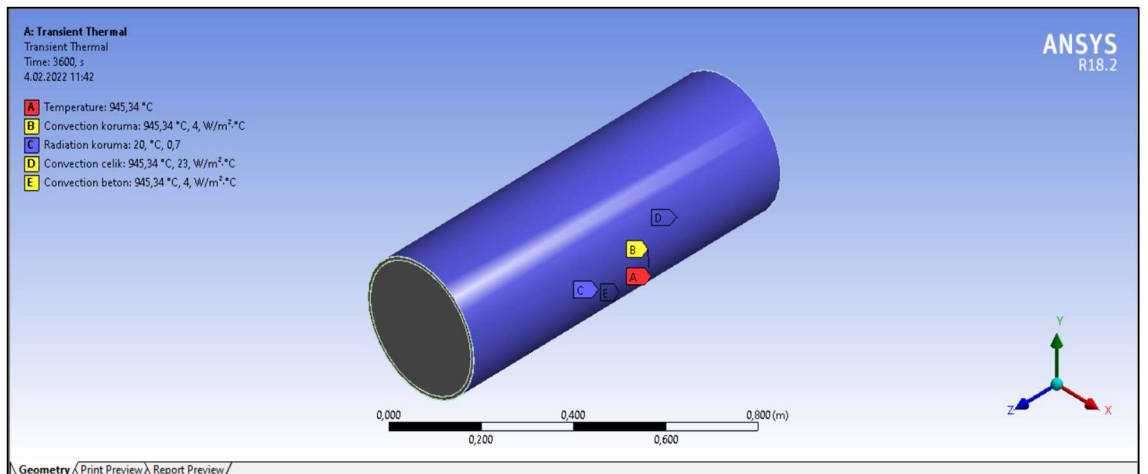


Şekil 5.6. Isıl iletkenliğin zamana bağlı değişimi (Song et al. 2020)

- **Yoğunluk**

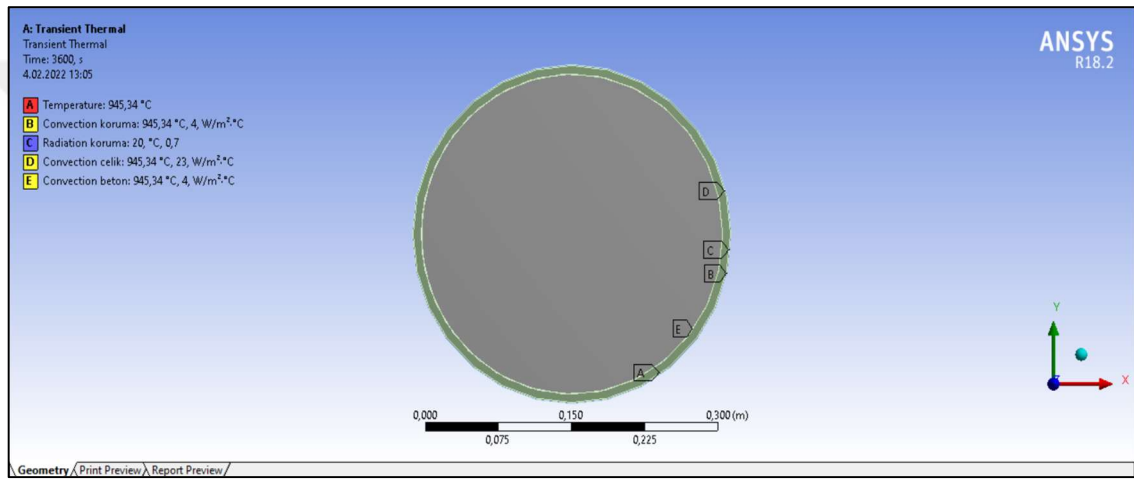
Bu modelde dikkate alınan yoğunluk değerleri, beton için sıcaklıktan bağımsız olarak 2300 kg/m^3 alınmıştır (CEN 2005c). Çelik için kullanılan yoğunluk değeri çelik sıcaklığından bağımsız olarak ($\rho_{st} = 7850 \text{ kg/m}^3$) alınmıştır (CEN 2005b). Pasif yangın koruyucu boyanın yoğunluk değeri 346 kg/m^3 alınmıştır (Song et al. 2020).

Bu validasyon modelinde kullanılan kolon yüksekliği 940 mm, çelik kalınlığı 8 mm ve boya koruma kalınlığı 1,16 mm'dir.



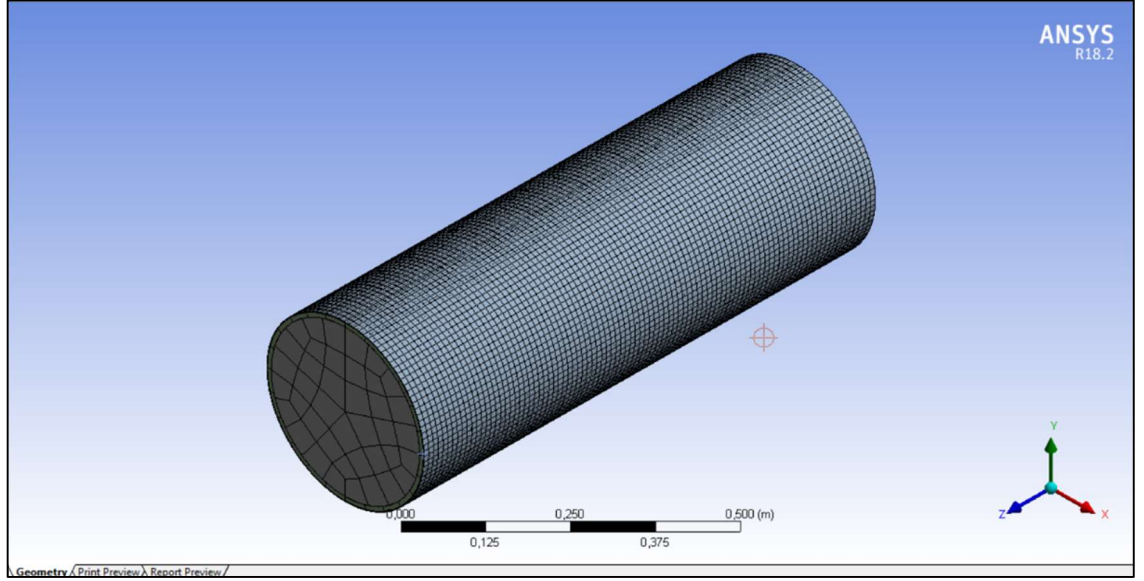
Şekil 5.7. İkinci validasyon modelinin ANSYS'den görüntüsü

İkinci validasyon modeli bir iç çekirdek beton, orta kısımda çelik ve dış kısımda boya korumasından Şekil 5.7 oluşmaktadır. Modelde kullanılan konveksiyon boya koruma değeri $4 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon çelik değeri $23 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon beton değeri $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve radyasyon boya koruma değeri 0,7'dir ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir. Konveksiyon boya koruma değeri boya koruma dış yüzeyine, konveksiyon çelik değeri çelik dış yüzeyine, konveksiyon beton değeri beton dış yüzeyine ve radyasyon boya koruma değeri boya koruma dış yüzeyine etki ettirilmiş ve Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Modelde kullanılan yangın eğrisi, Standart yangın (ISO 834) etkisidir ve bir saatlik yangına maruz kalma süresince modellenmiştir.

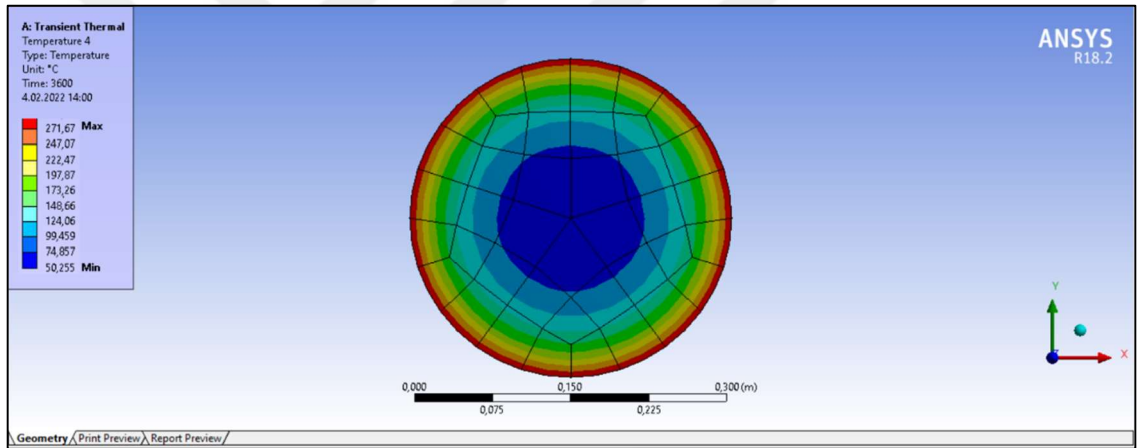


Şekil 5.8. İkinci validasyon modelinin ANSYS'den alınan en kesiti

Validasyon modeli – 2 de kullanılan meş, bütün yüzeylerde 0,1-0,4 santimetre büyüklüğünde atılmıştır. Meş görüntüsü Şekil 5.9'da gösterilmiştir.

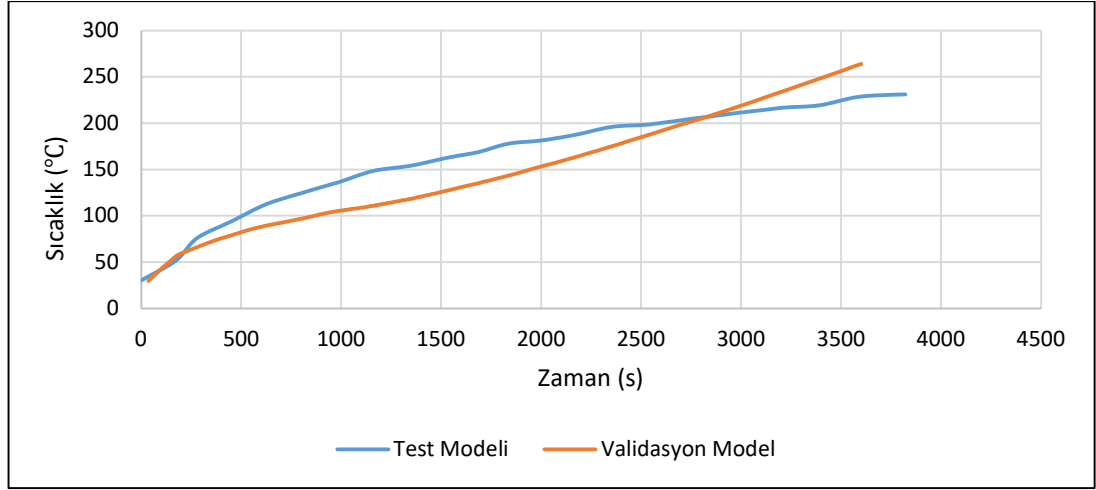


Şekil 5.9. İkinci validasyon modelinde kullanılan meş görüntüsü



Şekil 5.10. İkinci validasyon modelinde beton içi sıcaklık dağılımı

Validasyon modeli – 2’de oluşan bir saatlik yangına maruz kalma süresi sonucunda ortaya çıkan beton sıcaklıklarının görüntüsü Şekil 5.10’da gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum beton sıcaklığı 271,67°C olurken, minimum beton sıcaklığı ise 50,25°C olmuştur. Şekil 5.11’de görülen grafikte ise test modeli ile validasyon modelinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Sıcaklıklar 2900. saniyeye geldiğinde test modeli ile validasyon modelinin çakıştığı, 3600. saniyelerde ise 30°C bir fark olduğu görülmektedir. Bu da test modelinin konveksiyon ve radyasyon katsayılarının validasyon modeli için kullanılan makalede verilmemesinden dolayı yakınsama yoluyla bulunduğu içindir.



Şekil 5.11. Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık zaman karşılaştırması

5.2. Model Özellikleri

ANSYS programının (ANSYS 19.0) Transient Thermal kısmında ısı transferi modellemeleri yapılmıştır. Modellerde kullanılan kolon yüksekliği 3 metre alınmıştır. Modellemede kare, dairesel, dikdörtgen en kesit şekilleri, beton en kesitleri sırası ile 300, 250, 200 milimetre, çelik en kesitleri sırası ile 24, 16, 8 milimetre ve pasif yangın koruyucu boyanın en kesitleri sırası ile 2,4, 1,6, 0,8 milimetre alınarak belirlenen bu parametreler farklı (Standart, Hızlı, Yavaş, Smouldering) yangın etkilerinde araştırılmıştır. Modellemeler sonucunda 144 adet farklı parametrelere bağlı analiz yapılmıştır.

5.2.1. Termal özellikler

- **Özgül ısı**

Geliştirilen modelde beton ile doldurulmuş çelik kolonda beton için kullanılan özgül ısı değeri CEN (2005c)'de belirtilen beton malzemenin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimi kullanılmıştır ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir. Çelik için kullanılan özgül ısı değeri, CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin sıcaklığa bağlı özgül ısı değişimidir ve Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın Özgül ısı değeri sıcaklıktan bağımsız olarak 1000 J/kg. K alınmıştır (CEN 2013).

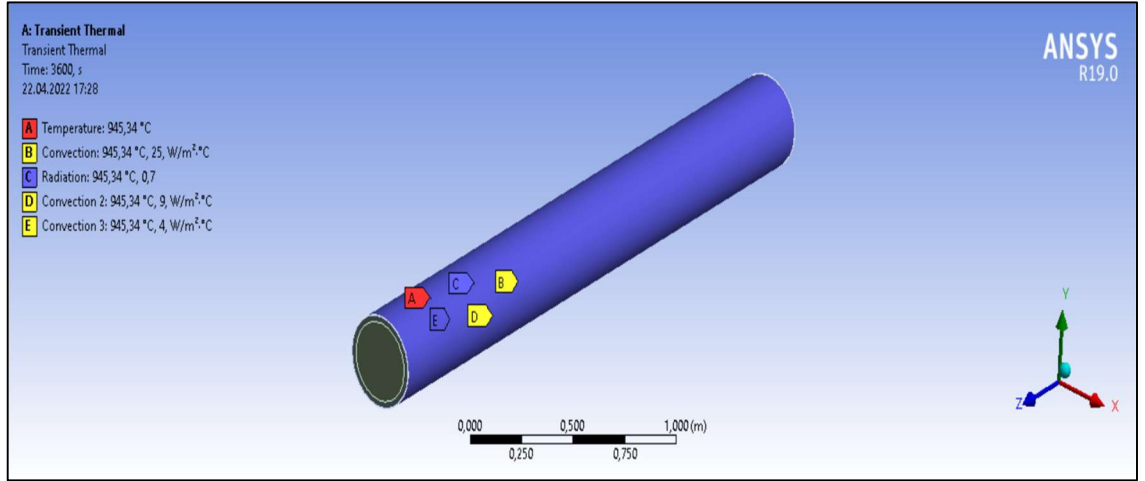
- **Isıl iletkenlik**

Modelde beton ile doldurulmuş çelik kolonda beton için kullanılan ısı iletkenlik değeri CEN (2005c)'de belirtilen beton sınıfına göre (normal veya hafif beton) betonun üst limit ısı iletkenliğidir ve Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Çelik için kullanılan ısı iletkenlik değeri CEN (2005b)'de belirtilen çeliğin ısı iletkenliğidir ve sıcaklığa bağı olarak Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Pasif yangın koruyucu boyanın ısı iletkenlik değeri sıcaklığa bağı değişmektedir ve Şekil 4.19'da bu değişim gösterilmiştir (Wang et al. 2013).

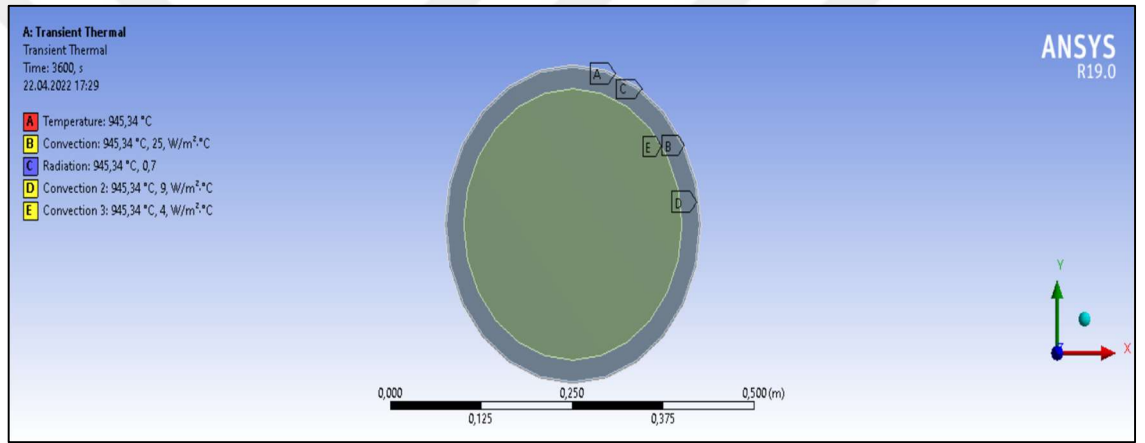
- **Yoğunluk**

Modelde beton ile doldurulmuş çelik kolonda beton için kullanılan yoğunluk değeri, beton sıcaklığından bağımsız olarak 2300 kg/m^3 alınmıştır (CEN 2005c). Çelik için kullanılan yoğunluk değeri çelik sıcaklığından bağımsız olarak ($\rho_{st} = 7850 \text{ kg/m}^3$) alınmıştır (CEN 2005b). Pasif yangın koruyucu boyanın yoğunluk değeri 100 kg/m^3 alınmıştır (CEN 2013).

Model iç kısımda beton en kesiti, orta kısımda çelik en kesiti ve dış kısımda boya en kesitinden oluşmakta olup termal sınır koşulları Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'de gösterilmiştir. Modelde kullanılan konveksiyon boya koruma değeri $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon çelik değeri $9 \text{ W/m}^2\text{K}$, konveksiyon beton değeri $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve radyasyon boya koruma değeri 0,7'dir. Konveksiyon boya koruma değeri $25 \text{ W/m}^2\text{K}$, boya koruması kesitinin dış yüzeyine, konveksiyon çelik değeri $9 \text{ W/m}^2\text{K}$, çelik kesitinin dış yüzeyine, konveksiyon beton değeri $4 \text{ W/m}^2\text{K}$, beton kesitinin dış yüzeyine ve radyasyon boya koruma değeri 0,7, boya koruma dış yüzeyine etki ettirilmiştir.



Şekil 5.12. Dairesel kesitli kolon modellemesinin ANSYS'den görüntüsü



Şekil 5.13. Dairesel kesitli kolon modellemesinin ANSYS'den en kesit görüntüsü

5.2.2. Yangın eğrileri

Modellemelerde kullanılan yangın eğrileri, Avrupa Standartlarında kabul görmüş Standart (ISO 834) ((ISO) 2014) ve Smouldering (CEN 2013) ve bunlarla birlikte yapılan çok yangın testlerinden sonra kabul görmüş hızlı (fast) ve yavaş (slow) (Zhang et al. 2012, Cırpıcı vd. 2020, Cırpıcı vd. 2019) yangın eğrileridir. Bu yangın eğrilerinin etkisinde, belirlenen parametreler doğrultusunda beton ile doldurulmuş çelik kolonun performansı araştırılmıştır.

Standart (ISO 834) Sıcaklık-Zaman Eğrisi ((ISO) 2014)

Standart (ISO 834) sıcaklık-zaman eğrisi şu şekilde elde edilmektedir (CEN 2002):

$$T_{fi,ISO834} = 20 + 345 \log (8t + 1) \quad (5.1)$$

$T_{fi,ISO834}$ – Yangın anındaki Gaz sıcaklığı (°C)

t – Zaman

Smouldering Sıcaklık-Zaman Eğrisi (CEN 2013)

Smouldering sıcaklık-zaman eğrisi şu şekilde elde edilmektedir (CEN 2013).

Eğer zaman (t) 0 ile 20 dakika arasında olduğunda;

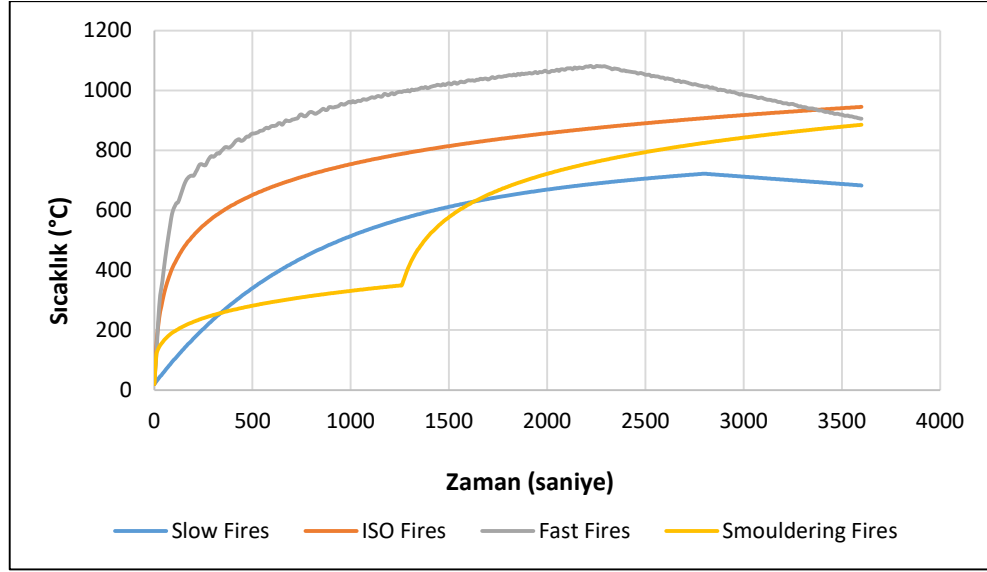
$$T_{fi,smouldering} = 154 \sqrt[4]{t} + 20 \quad (5.2)$$

21. dakikadan itibaren yangın eğrisinin değişimi;

$$T_{fi,smouldering} = 345 \log_{10}[8(t - 20) + 1] + 20 \quad (5.3)$$

$T_{fi,smouldering}$ – Yangın anındaki gaz sıcaklığı (°C)

t – Zaman



Şekil 5.14. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 5.14’de gösterilen grafikte modellemelerde kullanılan Avrupa Standartlarında kabul görmüş 4 farklı yangın eğrisinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Yavaş yangın etkisinde zamana bağlı olarak yangın sıcaklığı yavaş bir şekilde artmaktadır. Standart yangın durumunda sıcaklık zamana bağlı normal derecelendirilmiş bir yangın eğrisidir. Hızlı yangınlar ise, sıcaklığın aniden yükseldiği ve yüksek seyrettiği bir yangın eğrisidir. Smouldering yangın eğrisi de yangın sıcaklığının dalgalı seyrettiği bir yangın eğrisidir.

5.2.3. Meş özellikleri

Modellemelerde analiz için kullanılan meş boyutları genel olarak;

- 0,01-0,02 metre büyüklüklerinde,
- 100000-300000 boğum (nodes) aralığında
- 10000-50000 eleman sayısı aralığında kullanılmıştır.

Örnek olarak; Çizelge 5.1’de bir analiz için yapılan meşlemenin meş boyutu, boğum sayısı ve eleman sayısı gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Meş özelliklerinin boyuta göre karşılaştırması

Meş boyutu (m)	0,01	0,02
Boğum (Nodes)	312.627	114.865
Eleman sayısı	46.256	18.168
Skewness değeri	0,013-0,37	0,013-0,5
Aspect ratio değeri	1,06-1,73	1,05-3,28
Element quality değeri	0,77-0,99	0,52-0,99

Çizelge 5.1’de gösterilen tabloda görüldüğü üzere 0,01 metre ve 0,02 metre kullanılan meş boyutları ile elde edilen boğum (nodes) sayıları, eleman sayıları verilmiştir. Bu özelliklerin yanı sıra skewness, aspect ratio ve element quality değerlendirme kriterlerinin minimum ve maksimum değerleri de gösterilmiştir. Çizelge 5.1’den de görüldüğü gibi meş büyüklüğü ne kadar küçük veya ideale yakın atılırsa o kadar çok boğum noktası oluşmakta ve değerlendirme skalaları ideale o kadar çok yaklaşmaktadır. 0,01 metre büyüklüğündeki bir meş boyutunda dairesel kesitli bir kolonda boğum (nodes) sayısı 312.627 olurken, 0,02 metre büyüklüğündeki bir meş boyutunda 114.865 boğum (nodes) oluşmaktadır. Boğum sayısına bağlı olarak eleman sayıları da sırası ile 46.256 ve 18.168 olmaktadır.

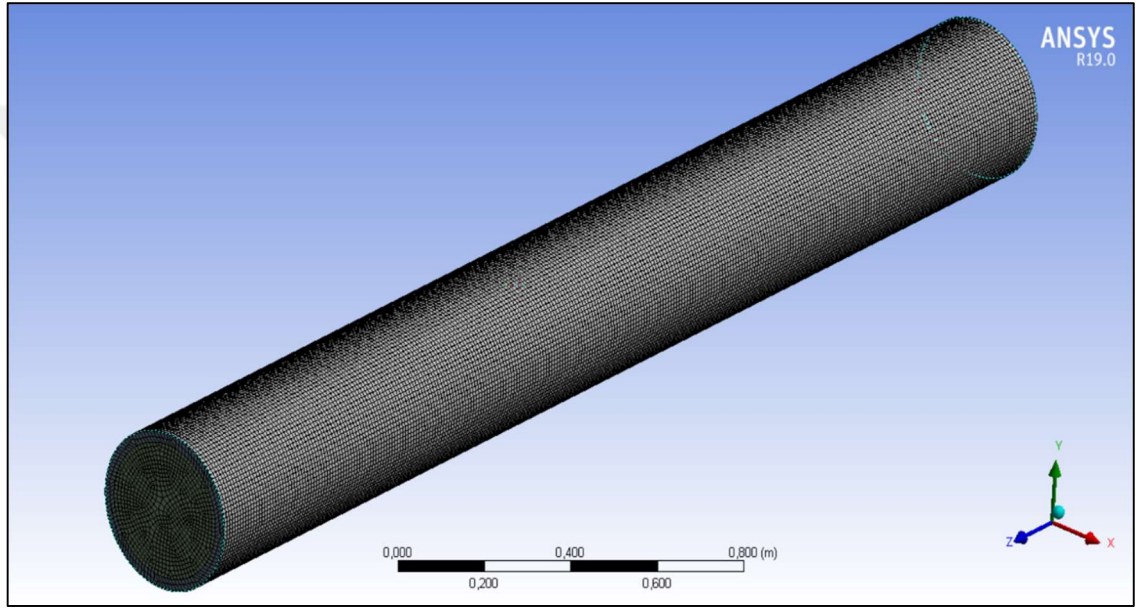
Bu değerlerin yanı sıra meş kalitesi için üç ayrı parametreye bakılmış ve değerlendirilmiştir. Meş kalitesinin kontrolü için ANSYS Transient Thermal programının Meş kısmında skewness, aspect ratio ve element quality değerleri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Üç ayrı değerlendirme kriteri için de iyi sonuçların ortaya çıkması hedeflenmiştir. Modellemelerin analizinde genel olarak;

- Skewness değeri 0,01-0,6 aralığında,
- Aspect ratio değeri 1-10 aralığında,
- Element quality değeri ise 0,5-1 aralığında kullanılmıştır.

Meş değerlendirme skalaları skewness için Şekil 5.16, element quality için Şekil 5.17 ve Aspect ratio için Şekil 5.18’de gösterilmiştir.

Genel değerlendirme olarak skewness değeri için 0-0,5 değerleri çok iyi bir meş kalitesini gösterirken, element quality değeri için 0,5-1 değerleri iyi bir meş kalitesini gösterir. Aspect ratio değerlendirme kriteri için ise 1-10 arası kabul edilebilir bir meş kalitesidir. Meş en kesit tipi olarak Multi-zone, hexa/prizma kullanılmıştır.

Şekil 5.15’de ise dairesel kesitli bir kolonun analizi için yapılan ve 0,01 metre büyüklüğünde atılan meş gösterilmektedir. Meş kalitesinin değerlendirilmesi element quality, skewness ve aspect ratio değerlendirme ölçütleri ile değerlendirilerek Şekil 5.19, Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de gösterilmiştir.



Şekil 5.15. Dairesel modelde kullanılan 0,01 metre büyüklüğündeki meş görüntüsü

Meş Modelinin Değerlendirilmesi

Modellerde boyuta göre meşleme yapılırken oluşan boğum (node) ve elementler çeşitli değerlendirmeler ile iyi veya kötü olarak derecelendirilebilmektedir. Bu derecelendirme gerçek modelin analiz için ayrıldığı parçaların tüm bir parçayı nasıl temsil ettiği ile alakalıdır. Meşleme ile elde edilen parçalar ideale ne kadar yakın ise meş o derece kaliteli ve iyi atılmış kabul edilir. Bu değerlendirmeler ANSYS Transient Thermal programında skewness değeri, aspect ratio değeri ve element quality değerleri ile yapılmıştır.

Şekil 5.16’da gösterilen tabloda skewness değerinin 0-0,25 değerleri arası mükemmel, 0,25-0,50 değerleri arası çok iyi, 0,50-0,80 değerleri arası iyi, 0,80-0,94 değerleri arası kabul edilebilir, 0,95-0,97 değerleri arası kötü ve 0,98-1,00 değerleri arası kabul edilemez olduğu gösterilmiştir. Skewness değerlendirme kriteri en çok kullanılan ve geçerli bir kriterdir. Bu kriter aşağıda verilen formül ile hesaplanır.

$$Skewness = \frac{\text{optimum element boyutu} - \text{aktif element boyutu}}{\text{optimum element boyutu}} \quad (5.4)$$

Bu formülde bir diğer ifade ile olması gereken element boyutu ile gerçek boyut arasındaki farka bakılarak bu değerlendirme yapılır. Şekil 5.16’da da görüldüğü gibi;

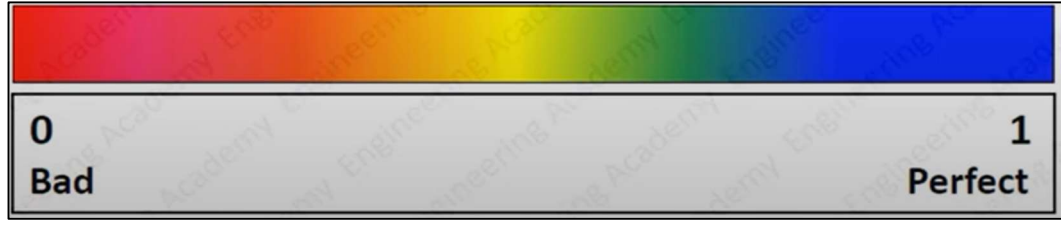
- 0,98-1 Kabul edilemez bir meş kalitesi
- 0,80-0,94 Kabul edilebilir bir meş kalitesi
- 0,25-0,50 İyi bir meş kalitesi olarak kabul edilir.

					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Şekil 5.16. Skewness değerinin 0-1 aralığında değerlendirmesi

Şekil 5.17’de gösterilen tabloda element quality değerinin 0 ile 1 aralığında 1’e ne kadar yaklaşırsa ise meşlemenin o kadar kaliteli olduğu, 0’a ne kadar yaklaşırsa meşlemenin o kadar kötü olduğu gösterilmiştir. Element quality ile bakılan değer bir meş elemanın hacminin o meş elemanın kenar uzunluğuna oranıdır. Element quality değerlendirme kriteri genellikle kullanılan bir kriterdir. Genel olarak bakacak olursak Şekil 5.17’de görüldüğü gibi;

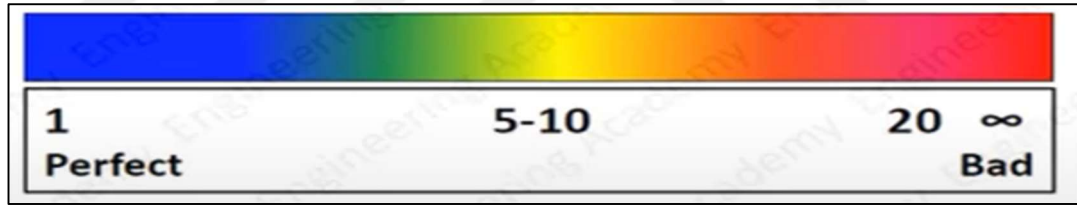
- 1 değerine doğru yaklaşan bir meş ideal elemana yaklaşıp.
- 0 değerine doğru yaklaşan bir meş ideal elemandan uzaklaşıp.



Şekil 5.17. Element quality değerinin 0-1 aralığında değerlendirmesi

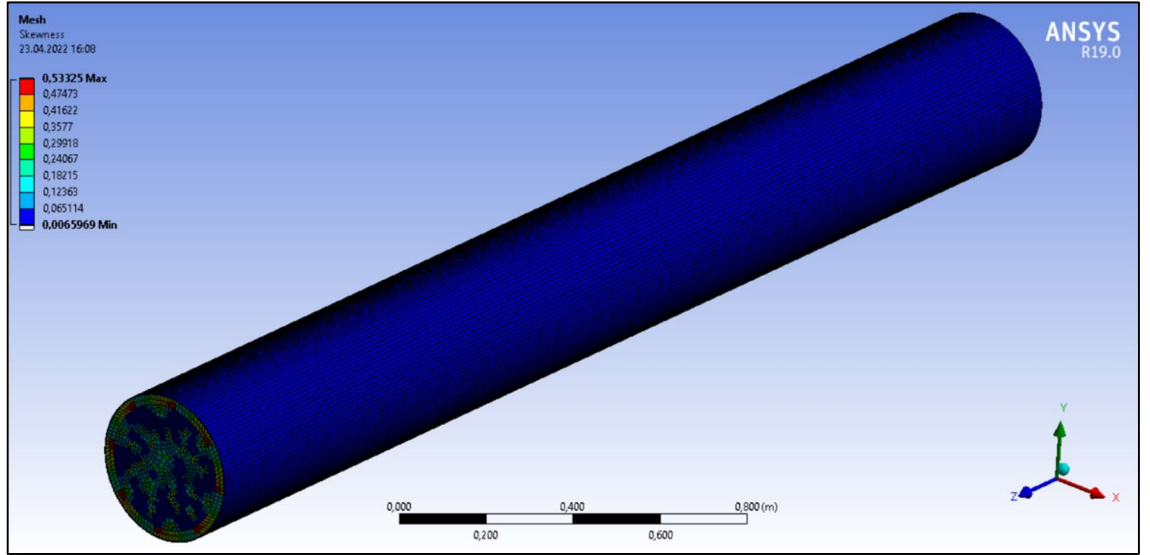
Şekil 5.18’de gösterilen tabloda Aspect ratio değerinin 1’e ne kadar yakın ise ideal elemana o derece yaklaşmış ve o kadar iyi bir meş kalitesinin olduğunu, 20’ye ne kadar yakın ise ideal elemana o derece uzak ve o kadar kötü bir meş kalitesinin olduğunu göstermektedir. Aspect ratio değeri için 1-10 arası kabul edilebilir, iyi derecelendirilmiş bir meş olarak varsayılır. Uzun kenar uzunluğunun kısa kenar uzunluğuna oranı olarak tanımlanır. Genel olarak bakılacak olursa Şekil 5.18’de de görüldüğü gibi;

- 1 değerine doğru yaklaşan bir meş ideal elemana yaklaşıp.
- 20 değerine doğru yaklaşan bir meş ideal elemandan uzaklaşıp.



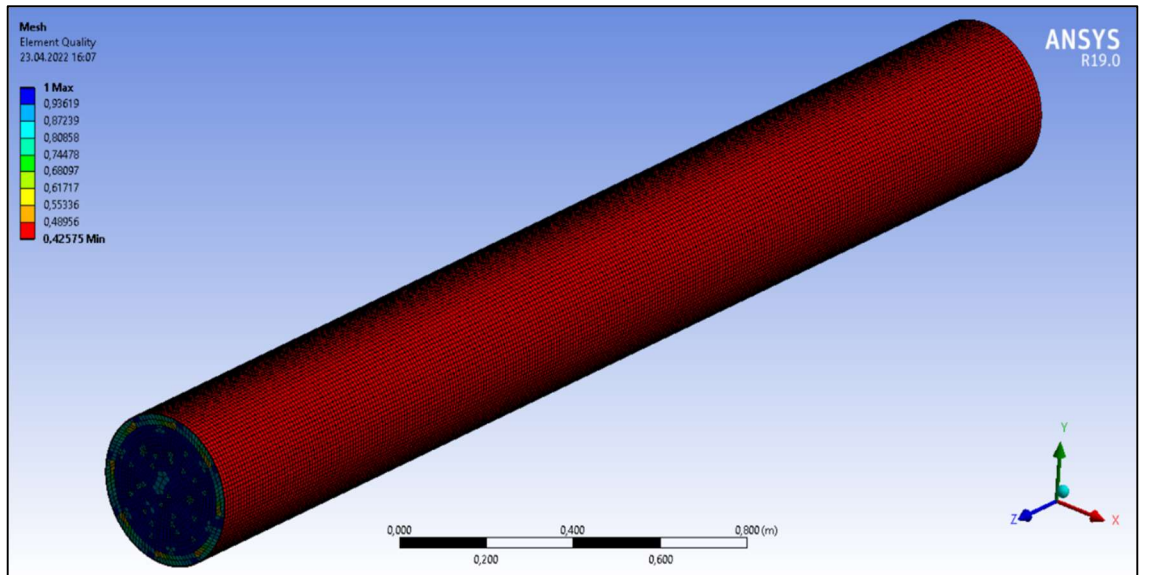
Şekil 5.18. Aspect ratio değerinin 1-20 aralığında değerlendirmesi

Şekil 5.19’da dairesel kesitli bir kolonun skewness değerlendirme kriteri ile değerlendirilmesi gösterilmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi 0,01 metre büyüklüğünde atılan meş’in beton iç kısım, çelik orta kısım ve pasif yangın koruma dış kısmında skewness değerleri gösterilmiştir. Pasif yangın koruma kısmında skewness kalitesi mavi renk ile gösterilmiş olup 0,006 değerlerinde olduğu görülmektedir. Bu da boya korumasına uygulanan meş kalitesinin çok iyi derecede olduğunu gösterir. Kolon en kesitine bakacak olursak beton iç kısımlarında ve çelik kesitinde renk skalasının yer yer kırmızıya döndüğü görülmektedir. Kırmızı renk ile gösterilen yerlerde skewness değeri maksimuma ulaşmış ve 0,53 değerindedir. Skewness değeri için 0-0,5 değerleri arası çok iyi bir meş kalitesi olduğunu gösterdiği için uygulanan meş çok iyi bir meştir.



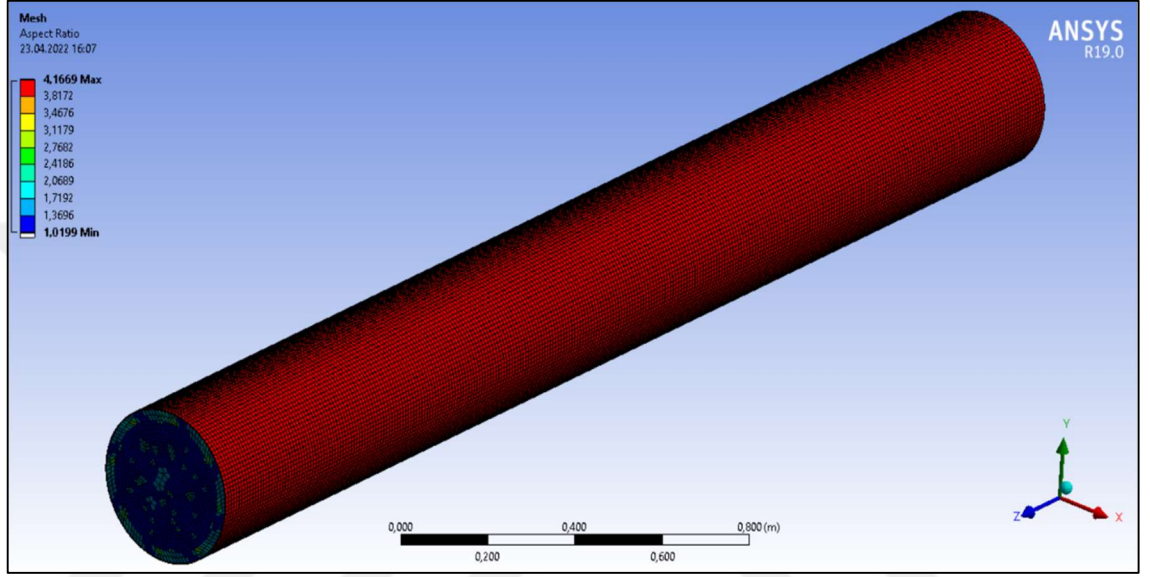
Şekil 5.19. Dairesel kesitli bir kolonun skewness kriteri ile değerlendirilmesi

Şekil 5.20’de gösterilen dairesel kesitli bir kolonun element quality kriterine göre değerlendirilmesi gösterilmiş olup Şekilde de görüldüğü gibi element quality değeri kolon kesitinde minimum 0,42 ve maksimum 1 değerlerindedir. Pasif yangın koruma kısmında renk skalası kırmızı yani 0,42 ye yaklaşmış iken iç kesitlerde beton kısmında 1 değerine ulaşmış ve çelik kesitinde 0,85 civarındadır. Element quality meş değerlendirilmesine göre 0,5-1 aralığı iyi bir meş uygulaması olduğundan yapılan meş iyi bir meştir.



Şekil 5.20. Dairesel kesitli bir kolonun element quality kriteri ile değerlendirilmesi

Şekil 5.21’de gösterilen dairesel kesitli bir kolonun aspect ratio kriterine göre değerlendirmesi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere pasif yangın koruma kısmında renk skalası kırmızı yani aspect ratio değeri 4,2 civarında maksimum iken iç kısımlarda beton kesitinin aspect ratio değeri 1,02 değerlerinde ve çelik kesitinde bu değer 2 değerlerindedir. Aspect ratio değer skalası Şekil 5.18’e göre, uygulanan meş çok iyi sayılabilecek şekilde yapılmış bir meştir.



Şekil 5.21. Dairesel kesitli bir kolonun aspect ratio kriteri ile değerlendirilmesi

Meş Boyutlarının Analiz Süresine Etkisi

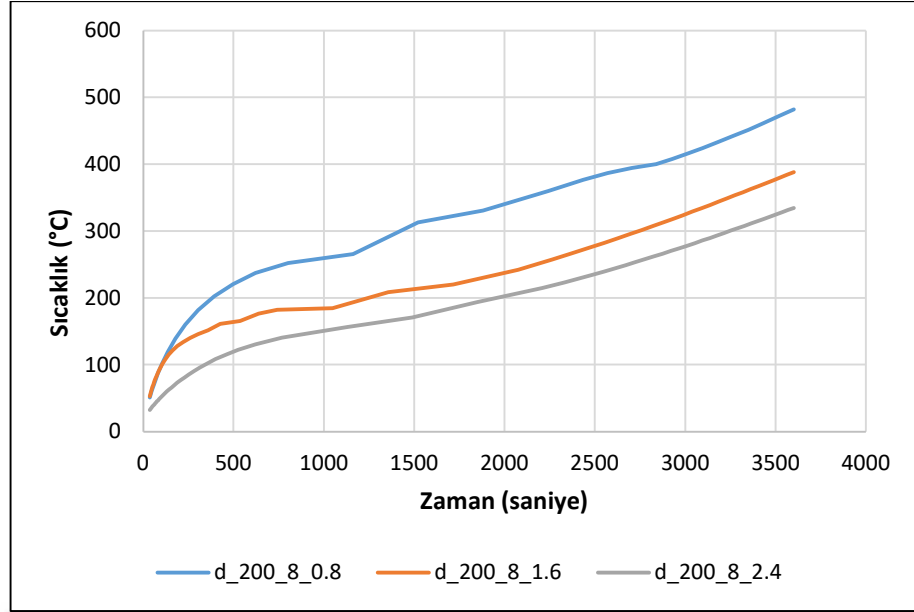
Çizelge 5.1’de de görüldüğü gibi modellemede kullanılan meş büyüklüğüne bağlı olarak boğum (nodes) sayısı ve eleman sayısı da artmakta ve azalmaktadır. Bu da direkt olarak analiz süresini etkilemektedir. Kullanılan bilgisayarın özelliklerinin yanı sıra kullanılan meş ile atılan boğum (nodes) sayısı da analiz süresinde önemli bir faktördür. Bu yüzden örnek verecek olursak skewness değeri minimum 0,1 maksimum 0,3 için atılacak meş ile elde edilecek boğum (nodes) sayısı, skewness değeri minimum 0,15 maksimum 0,5 için atılacak meş ile elde edilecek boğum (nodes) sayısından çok çok daha fazladır. Bu da bir analizi 30 dakikada bitirebilecek iken 60-90 dakikalara çıkarmak demektir. Meş atarken ideale yaklaşmak önemli bir ölçüt iken Şekil 5.16, Şekil 5.17 ve Şekil 5.18’de gösterilen skewness, element quality ve aspect ratio değer skalalarına göre idealden uzaklaşmadığımız sürece, ideale yeterince yaklaştıktan sonra meş boyutunu

küçültmek gereksiz bir zaman israfına dönüşebilmektedir. Bu da analizlerimizi daha zorlu ve yorucu kılmaktadır. Genel olarak değerlendirecek olursak;

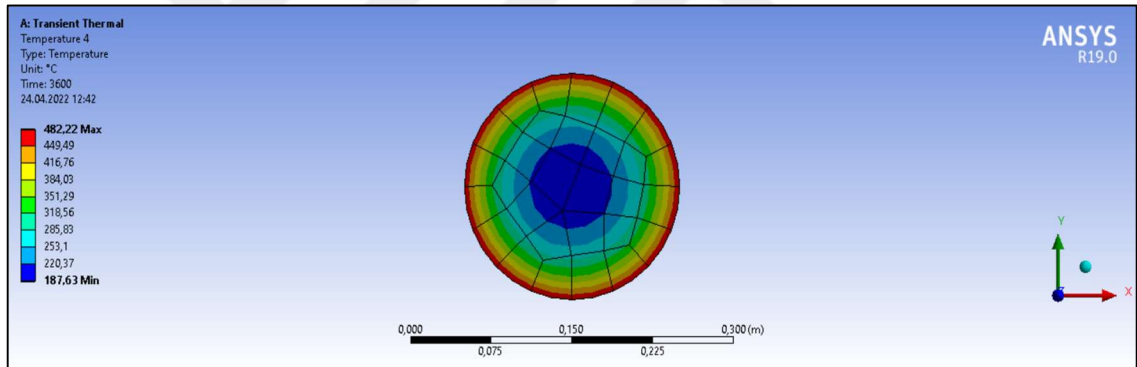
- Meş için önemli olan ideal elemana yaklaşımdır
- Meş büyüklüğü boğum (nodes) ve eleman sayısı için çok önemlidir
- Meş büyüklüğü analiz süresine doğrudan etki etmektedir
- İdeal elemana yakınlaştıktan sonra meş'i küçültmek gereksiz olabilir
- Analiz için meş boyutunun iyi seçilmesi gereklidir.

5.3. Pasif Yangın Koruyucu Boya Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi

Şekil 5.22'de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, çelik en kesit kalınlığının 8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, 200 sayısı beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 0,8, 1,6 ve 2,4 sayıları pasif yangın koruyucu boyanın kalınlığını ifade etmektedir. Kullanılan pasif yangın koruyucu intumesan boyanın kalınlığı arttıkça sıcaklık dağılımı düşmektedir ve son sıcaklık değeri olarak yaklaşık 100°C derecelik bir fark 0,8 mm ve 1,6 mm kalınlıklı boyalar arasında ve 50°C'lik fark da 1,6 mm ile 2,4 mm arasında oluşmuştur.

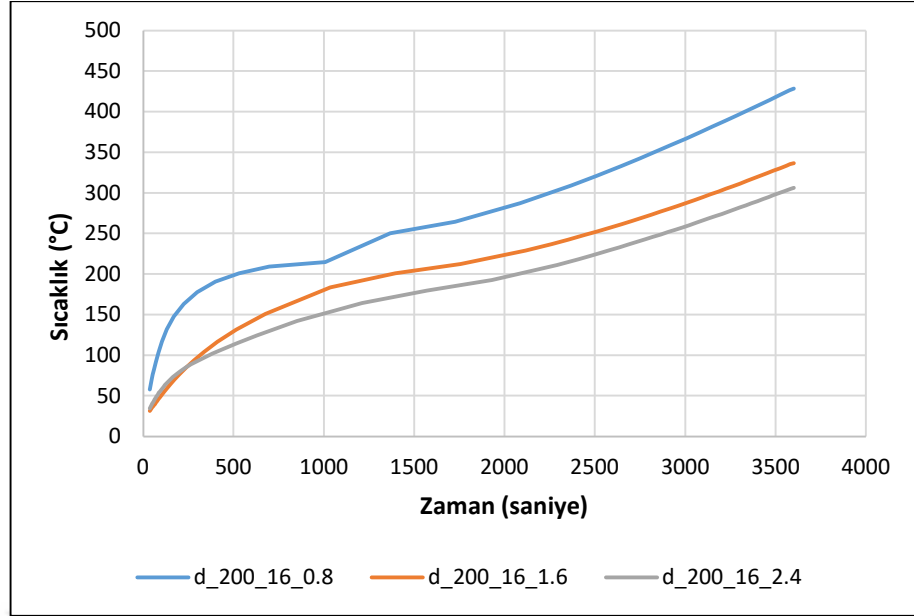


Şekil 5.22. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_8).

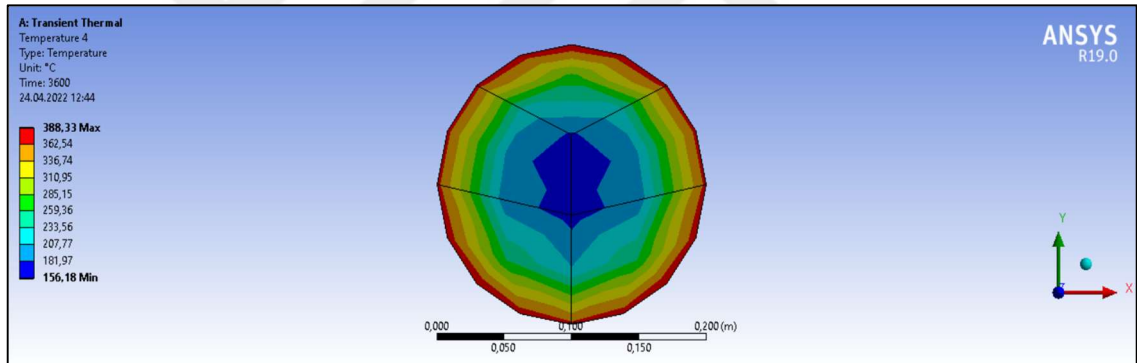


Şekil 5.23. D_200_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.24’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, çelik en kesit kalınlığının 16 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımını farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

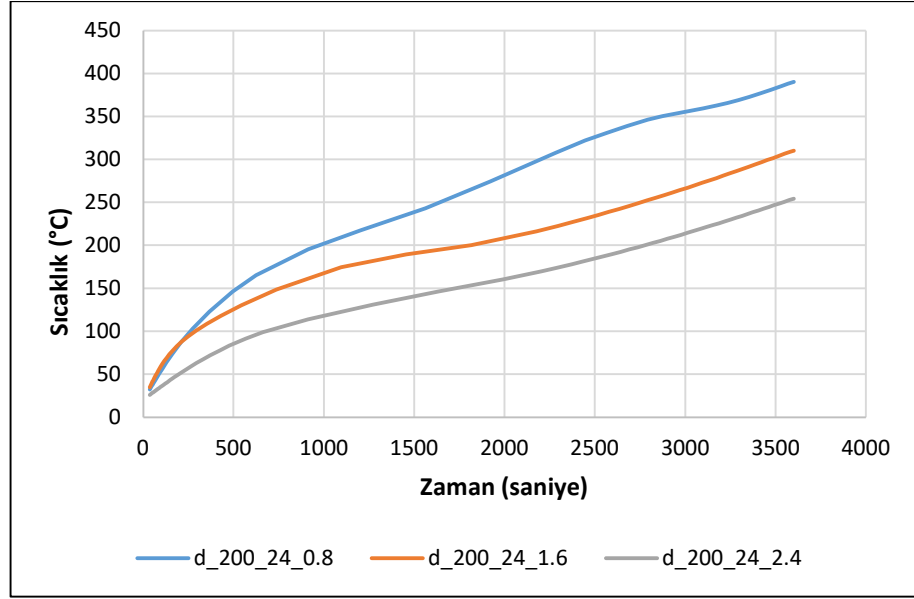


Şekil 5.24. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_16).

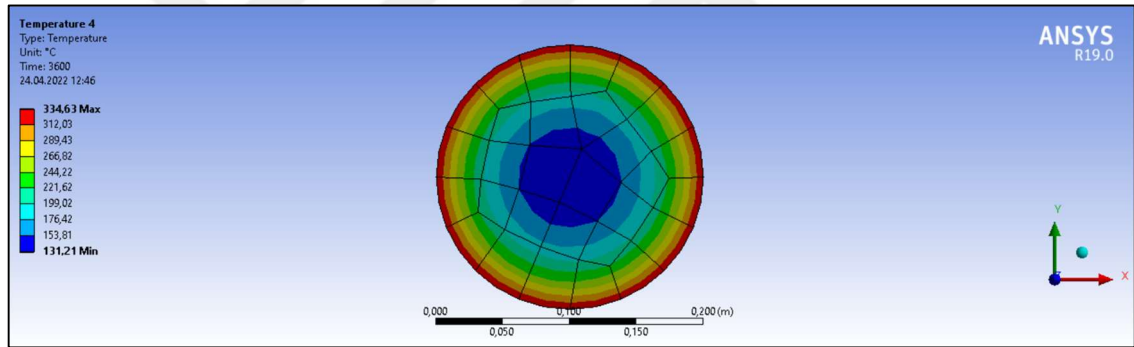


Şekil 5.25. D_200_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.26’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, çelik en kesit kalınlığının 24 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

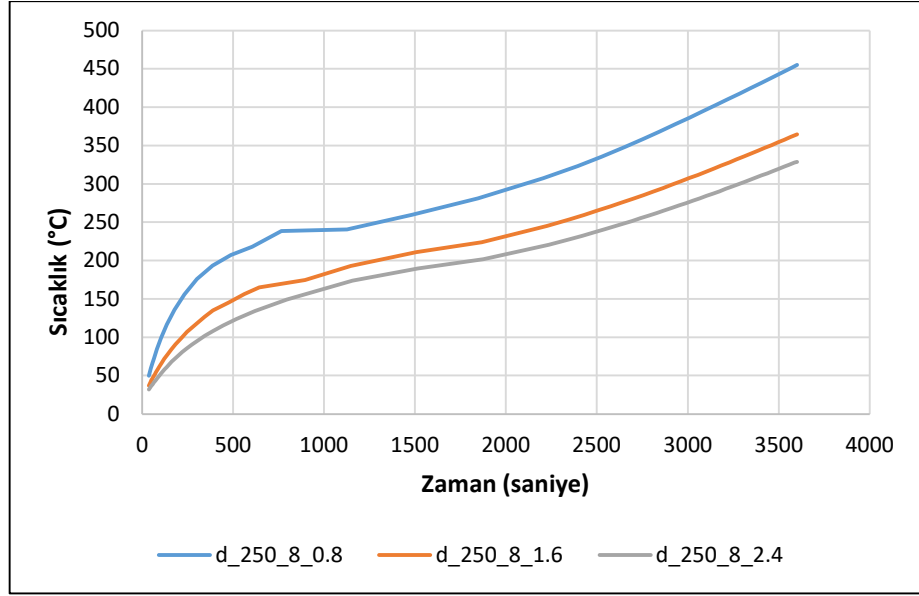


Şekil 5.26. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_24).

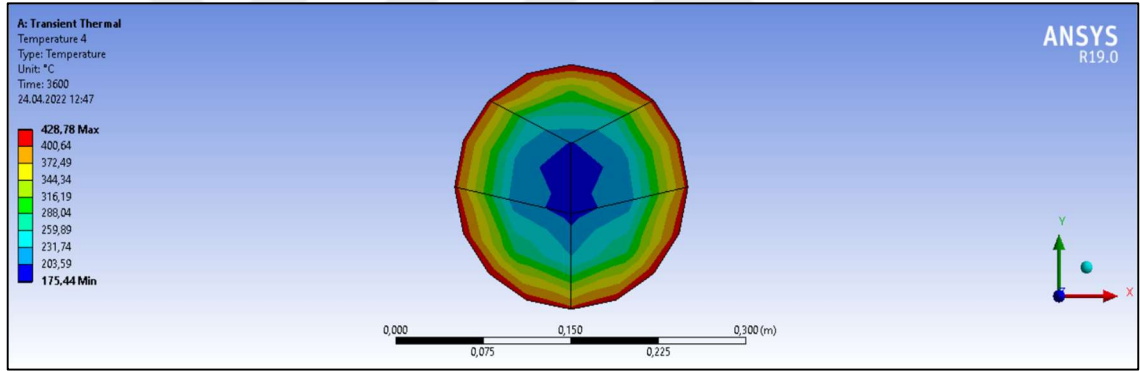


Şekil 5.27. D_200_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.28’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, çelik en kesit kalınlığının 8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

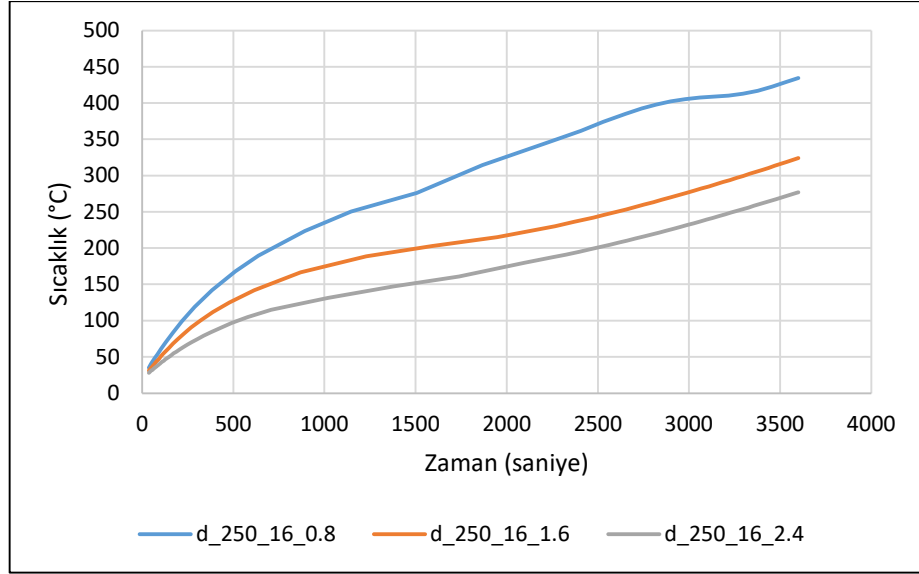


Şekil 5.28. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_8).

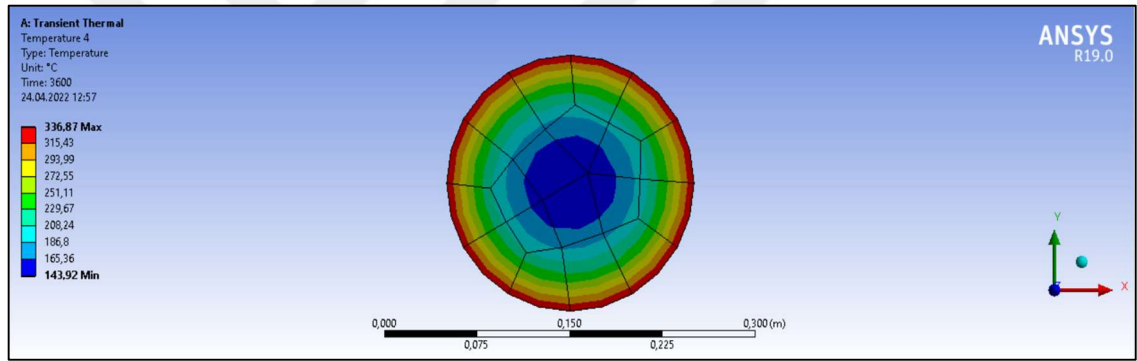


Şekil 5.29. D_200_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.30’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, çelik en kesit kalınlığının 16 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

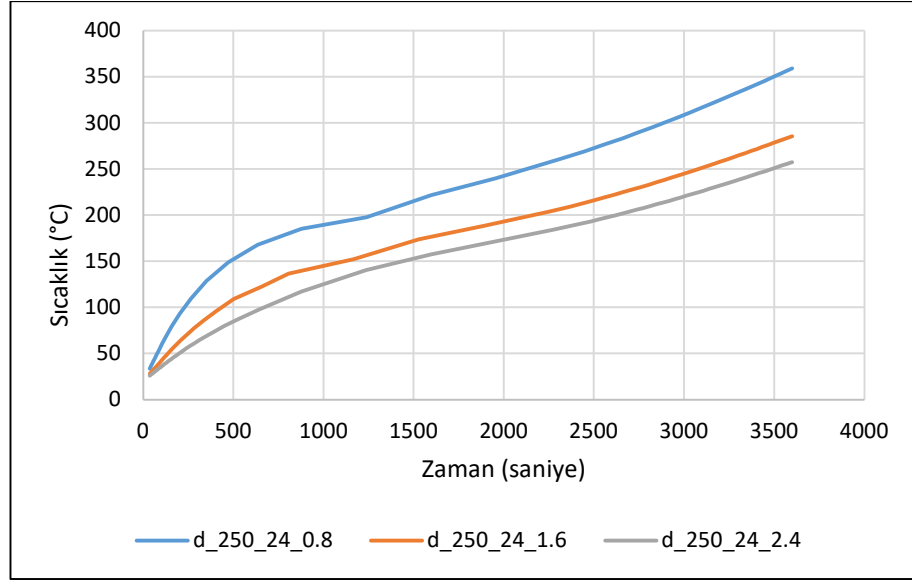


Şekil 5.30. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_16).

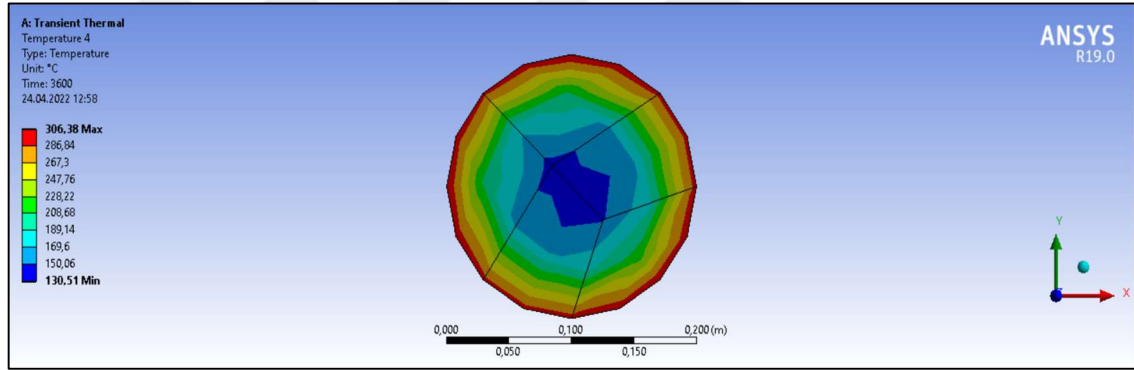


Şekil 5.31. D_200_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.32’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, çelik en kesit kalınlığının 24 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.



Şekil 5.32. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_24).

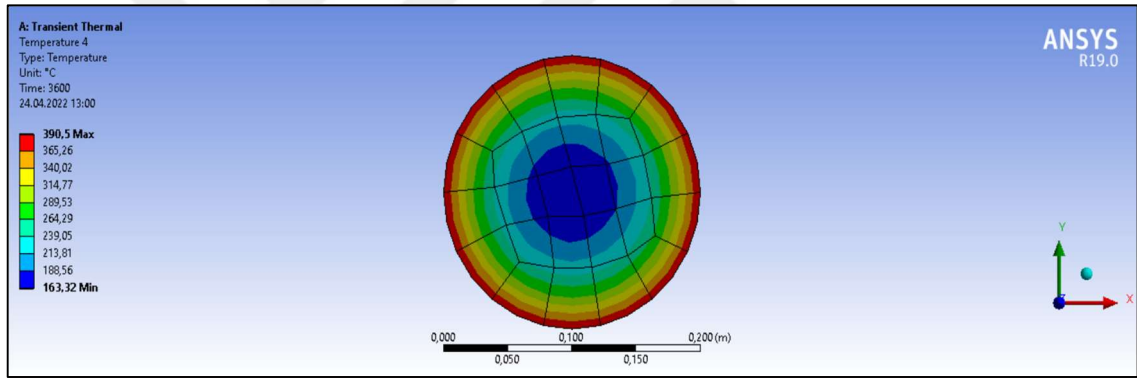


Şekil 5.33. D_200_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.34’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, çelik en kesit kalınlığının 8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımını farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

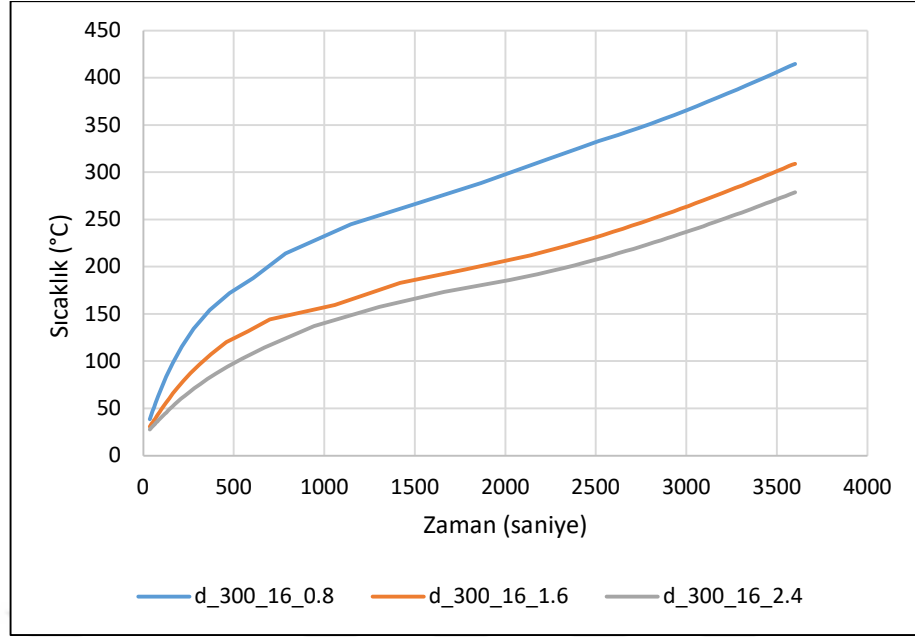


Şekil 5.34. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_8).

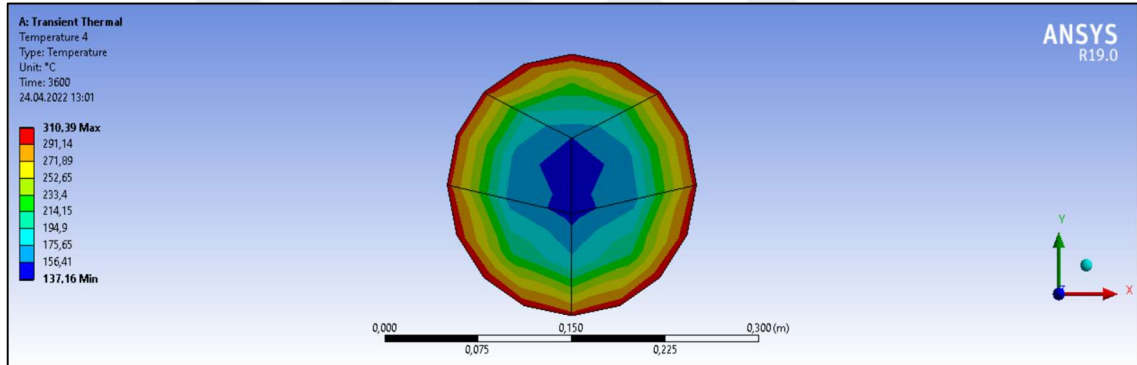


Şekil 5.35. D_200_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.36'da gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, çelik en kesit kalınlığının 16 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımını farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.

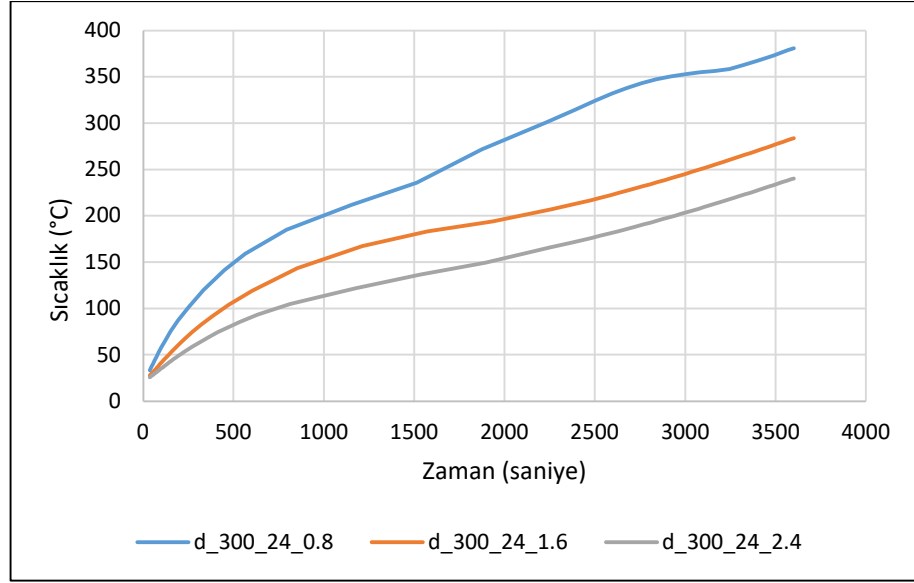


Şekil 5.36. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_16).

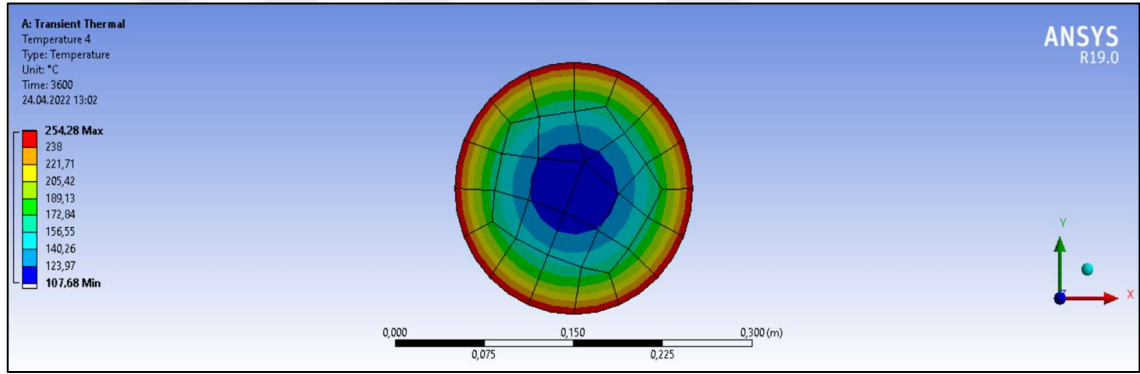


Şekil 5.37. D_200_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.38’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, çelik en kesit kalınlığının 24 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı boya kalınlıkları için gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Farklı pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_24).



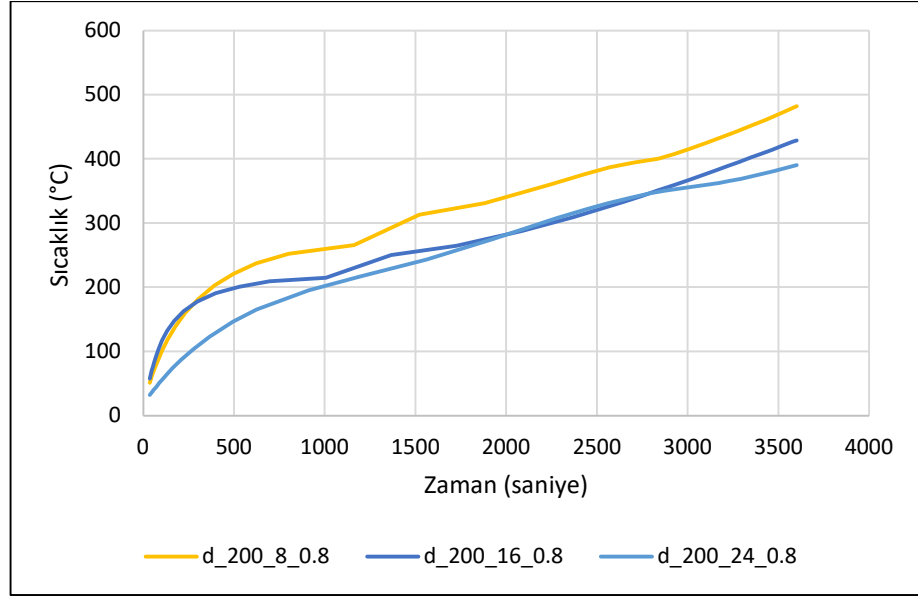
Şekil 5.39. D_200_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.22’de görülen grafikte dairesel kesitli bir kolonda 200 milimetre en kesit kalınlığına sahip beton ile 8 milimetre en kesit kalınlığına sahip çelik üzerinde 0,8, 1,6 ve 2,4 milimetre en kesit kalınlıklarındaki pasif yangın koruma boyası değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiştir ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda dairesel kesitli 200 milimetre beton en kesit kalınlığına, 8 milimetre çelik kalınlığına ve 2,4 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip 3 metre yüksekliğindeki kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık 334°C olurken, 1,6 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık 388°C, 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık 482°C olduğu

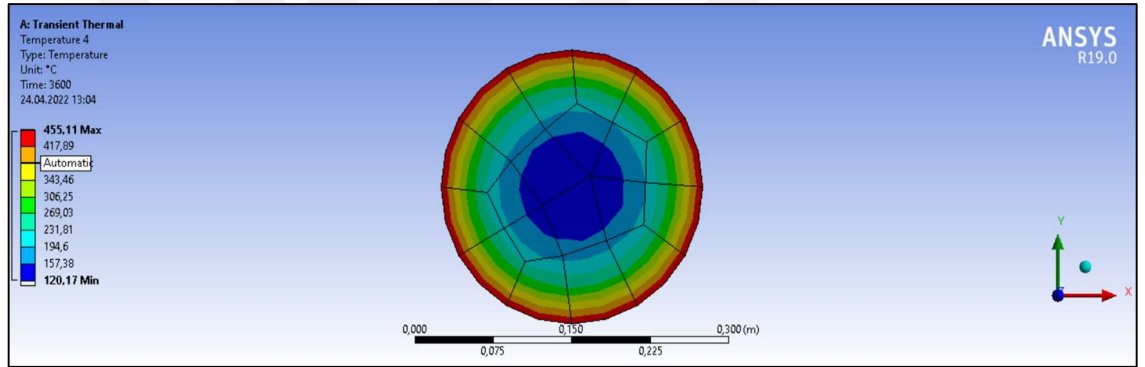
görülmektedir. 2,4 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 1,6 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık farkı 55°C olurken, 1,6 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına sahip kolonda 3600 saniyedeki maksimum sıcaklık arasındaki fark 100°C olmuştur. Bu da dairesel kesitli bir kolonda 200 milimetre beton en kesit kalınlığını ve 8 milimetre çelik en kesit kalınlığını sabit tutup, pasif yangın koruyucu boyanın 0,8 milimetre olan en kesitinin 0,8 milimetre artarak 1,6 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 100°C fark oluşturduğunu ve daha sonra tekrar 200 milimetre beton en kesit kalınlığını ve 8 milimetre çelik en kesit kalınlığını sabit tutup, pasif yangın koruyucu boyanın 1,6 milimetre olan en kesitinin 0,8 milimetre artarak 2,4 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 55°C fark oluşturduğunu göstermektedir. Benzer özellikleri göstererek Şekil 5.24, Şekil 5.26, Şekil 5.28, Şekil 5.30, Şekil 5.32, Şekil 5.34, Şekil 5.36 ve Şekil 5.38’de temsil edilen 8 farklı kolon numunesinin de beton en kesit kalınlıkları 200, 250 ve 300 milimetre, çelik en kesit kalınlıkları 8, 16, 24 milimetre olarak alınarak pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlıkları 0,8, 1,6, 2,4 milimetre alınmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince ve analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda Şekil 5.22’de olduğu gibi 0,8 milimetre olan en kesitinin 0,8 milimetre artarak 1,6 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 100°C civarlarında farklar oluşturduğu ve daha sonra tekrar pasif yangın koruyucu boyanın 1,6 milimetre olan en kesitinin 0,8 milimetre artarak 2,4 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 50°C farklar oluşturduğu görülmektedir.

5.4. Çelik Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi

Şekil 5.40’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.



Şekil 5.40. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_0,8)

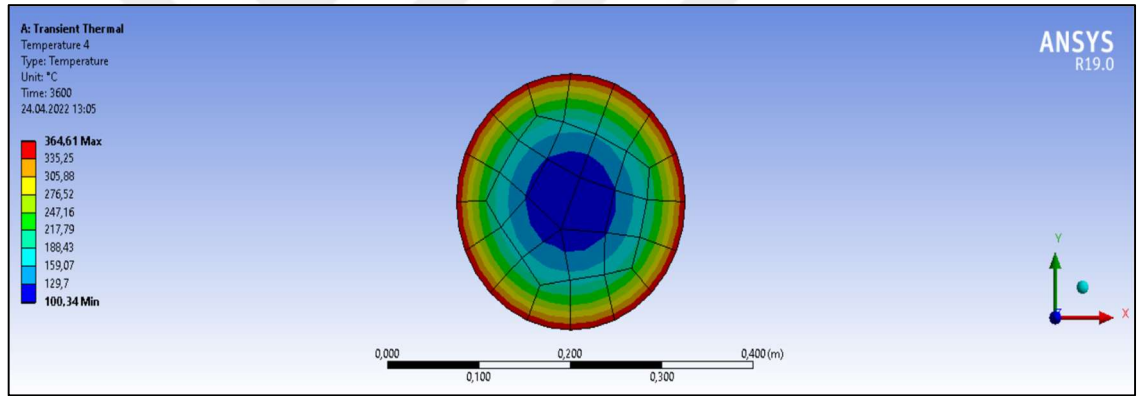


Şekil 5.41. D_250_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.42’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.



Şekil 5.42. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_1,6)

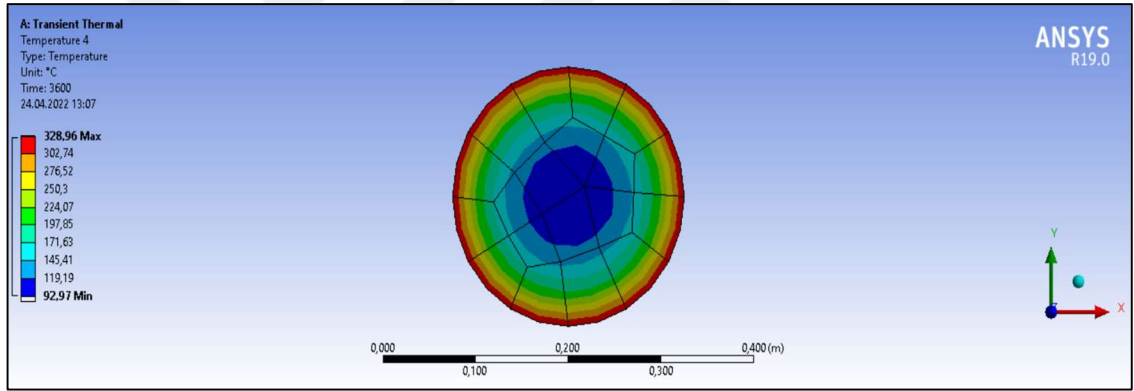


Şekil 5.43. D_250_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.44’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

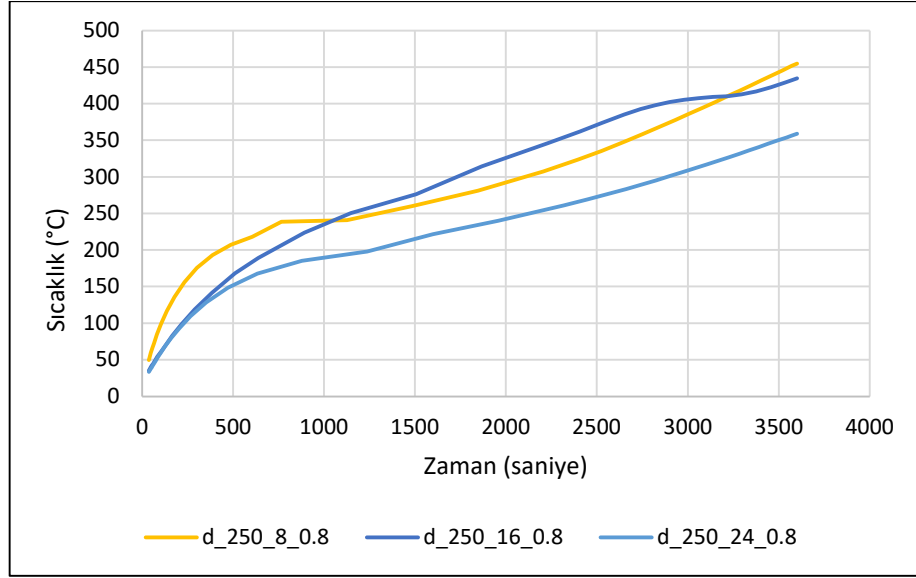


Şekil 5.44. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D200_2,4)

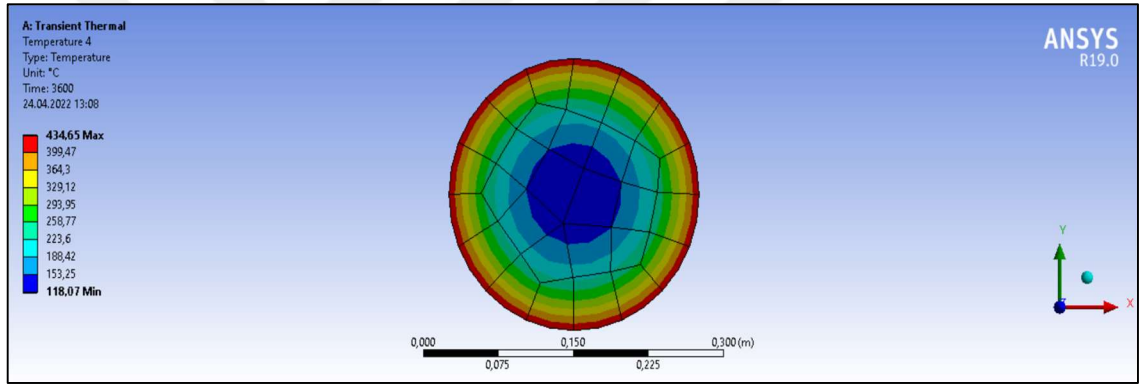


Şekil 5.45. D_250_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.46’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

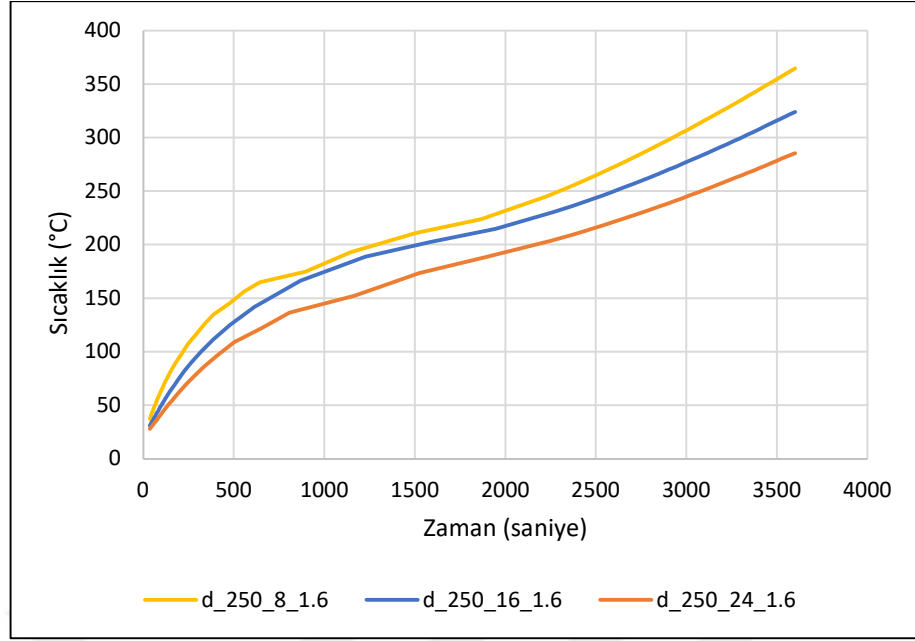


Şekil 5.46. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_0,8)

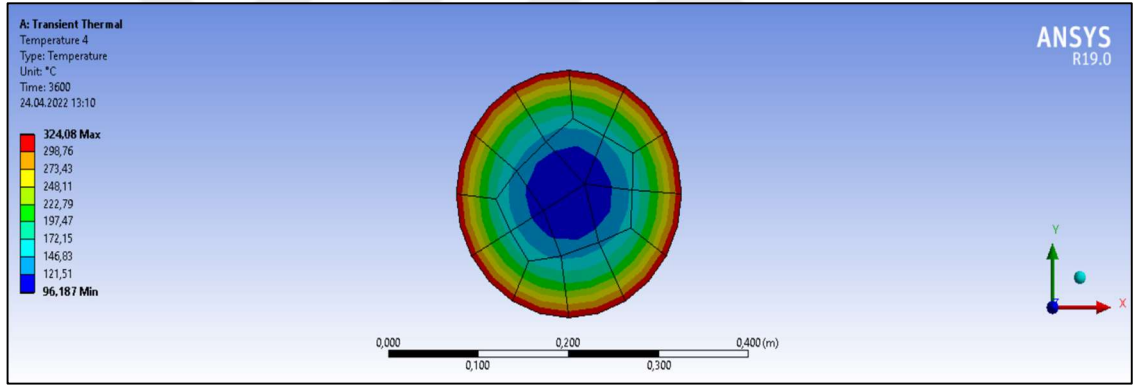


Şekil 5.47. D_250_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.48’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

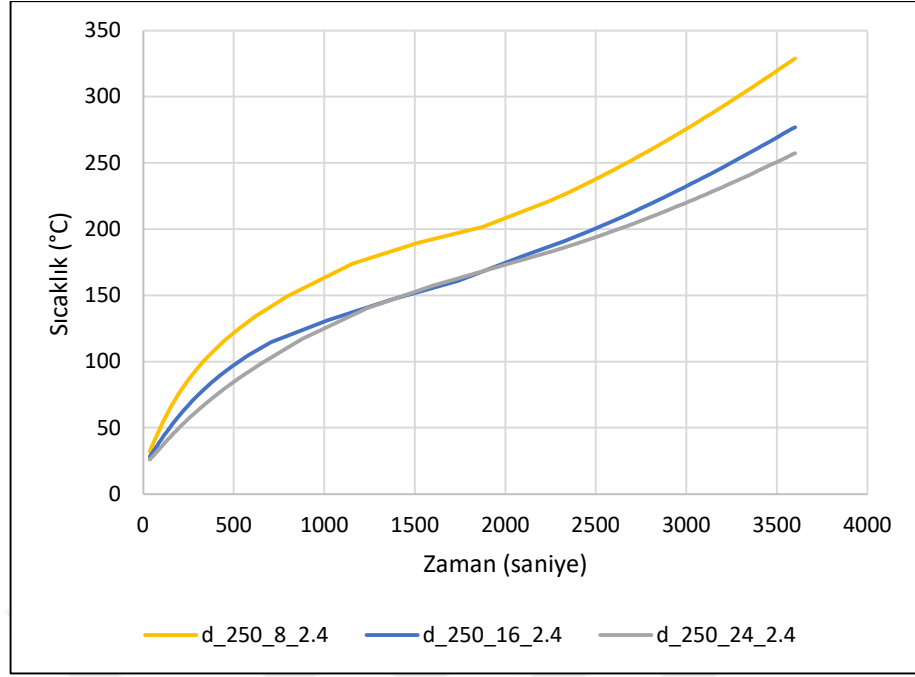


Şekil 5.48. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_1,6)

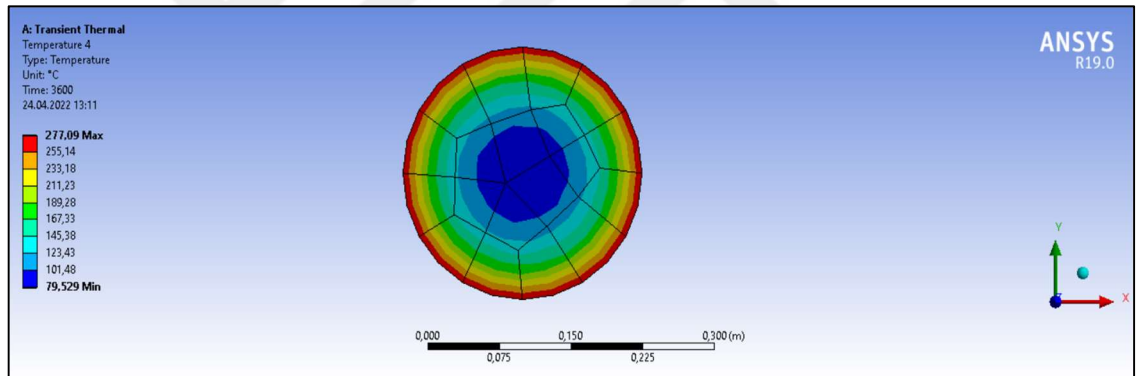


Şekil 5.49. D_250_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.50’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

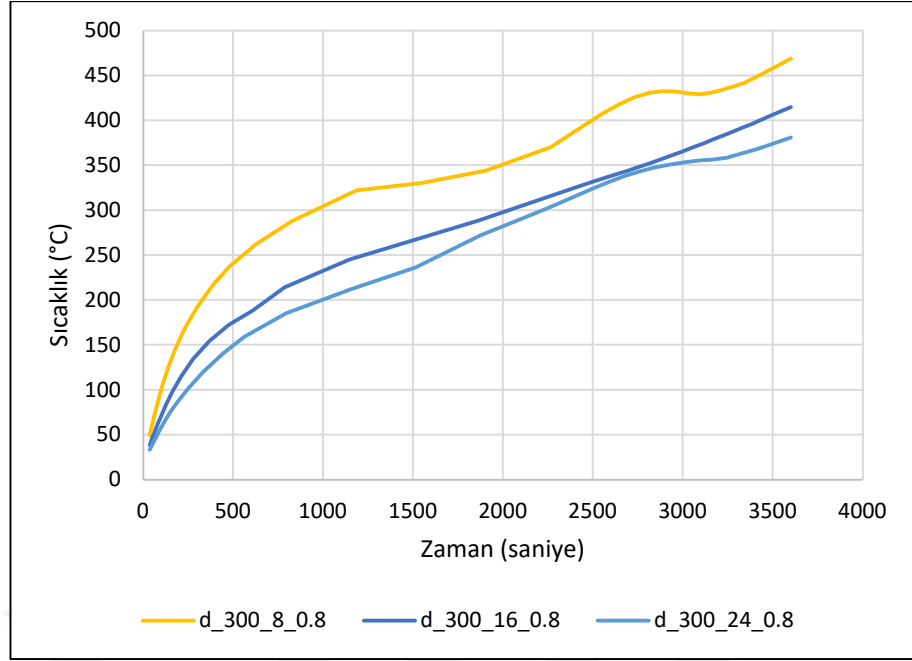


Şekil 5.50. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D250_2,4)

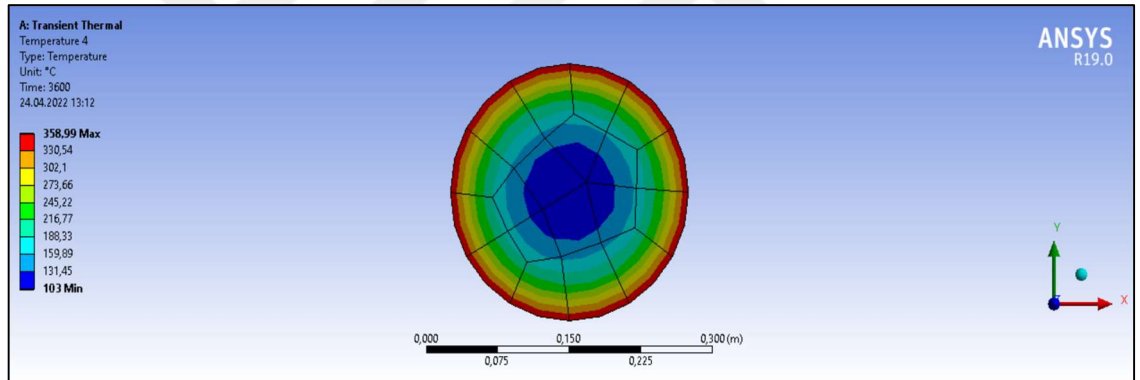


Şekil 5.51. D_250_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.52’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

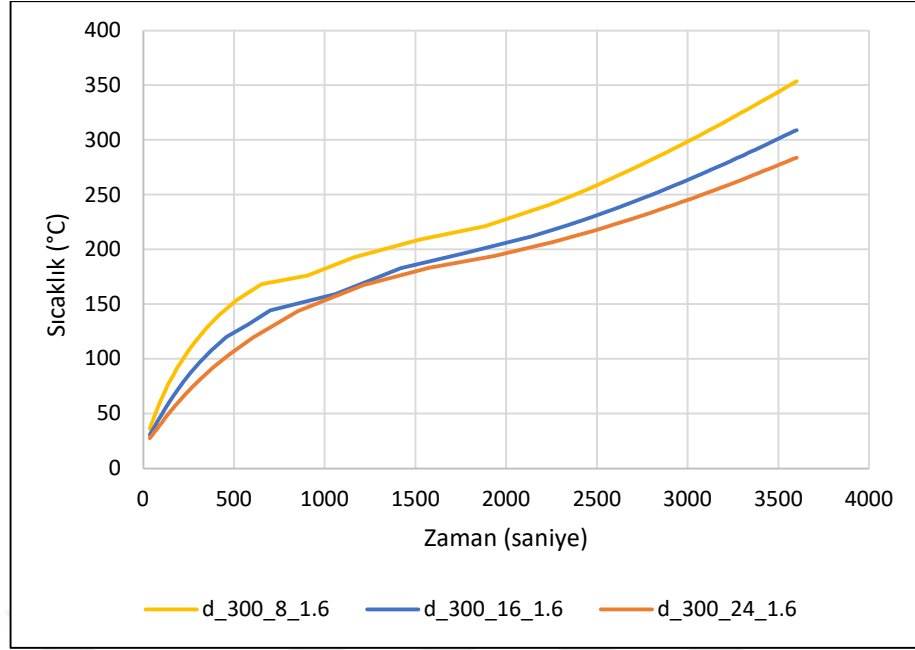


Şekil 5.52. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_0,8)

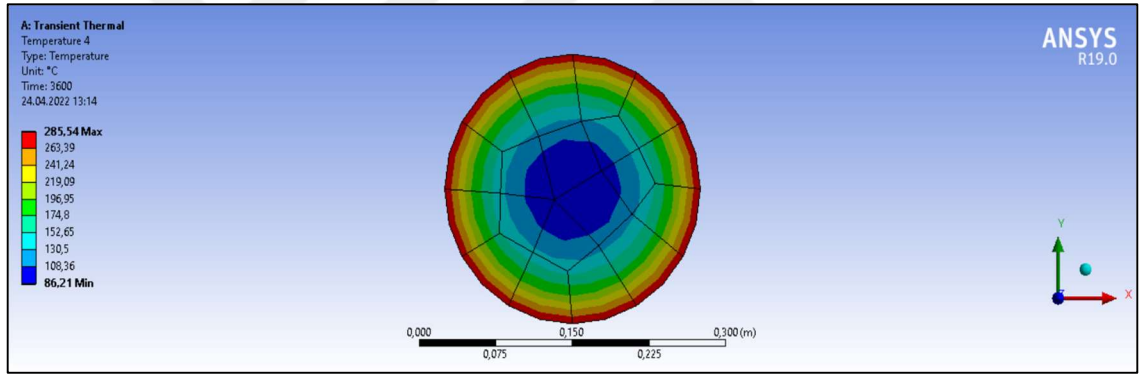


Şekil 5.53. D_250_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.54’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir.

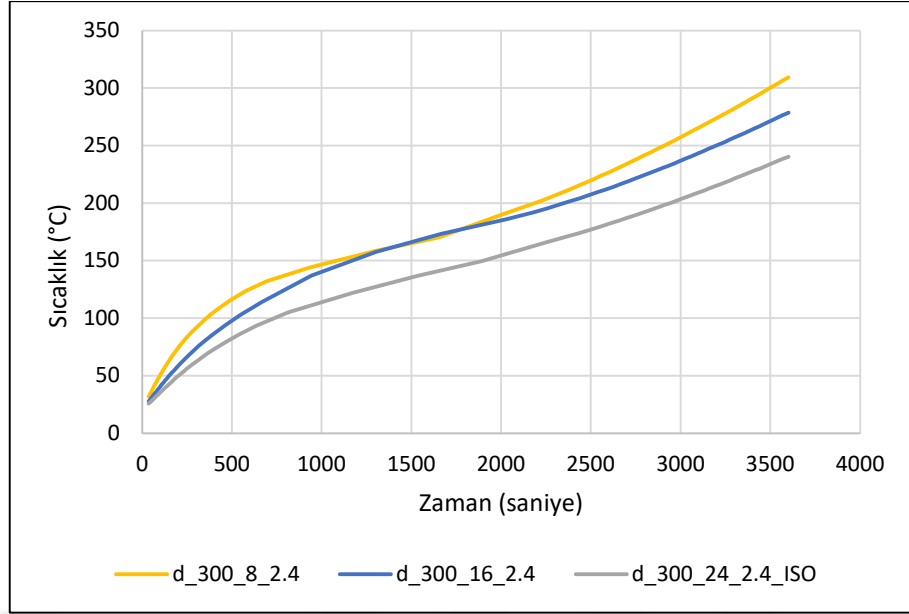


Şekil 5.54. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_1,6)

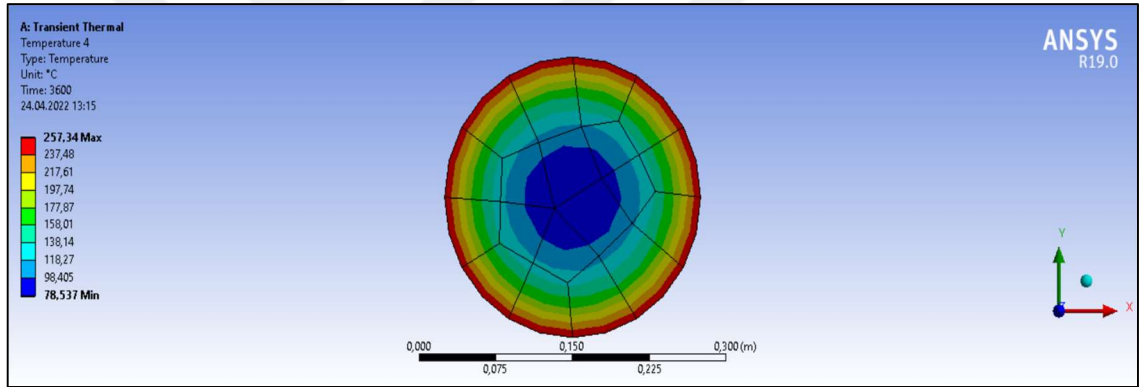


Şekil 5.55. D_250_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.56’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı çelik kalınlıkları için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, 300 sayısı beton en kesit genişliğini, 8, 16, 24 sayıları çelik en kesit genişliğini ve 2,4 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın en kesit genişliğini ifade etmektedir.



Şekil 5.56. Farklı çelik kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (D300_2,4)



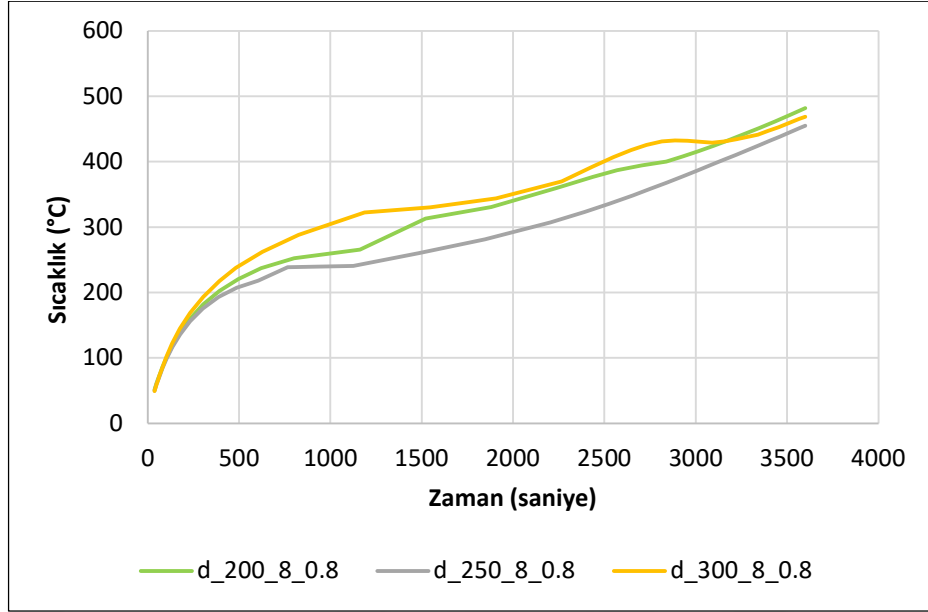
Şekil 5.57. D_250_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.40’da görülen grafikte dairesel kesitli bir kolonda 200 milimetre en kesit kalınlığına sahip beton ile 0,8 milimetre en kesit kalınlığına sahip pasif yangın koruma boyası üzerinde 8, 16 ve 24 milimetre en kesit kalınlıklarındaki çelik değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiştir ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda dairesel kesitli 200 milimetre beton en kesit kalınlığına, 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına ve 24 milimetre çelik kalınlığına sahip 3 metre yüksekliğindeki kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 390,5°C olurken, 16 milimetre çelik kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 428°C, 8 milimetre çelik kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 482°C olduğu görülmektedir. 24 milimetre çelik kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 16 milimetre çelik kalınlığına sahip

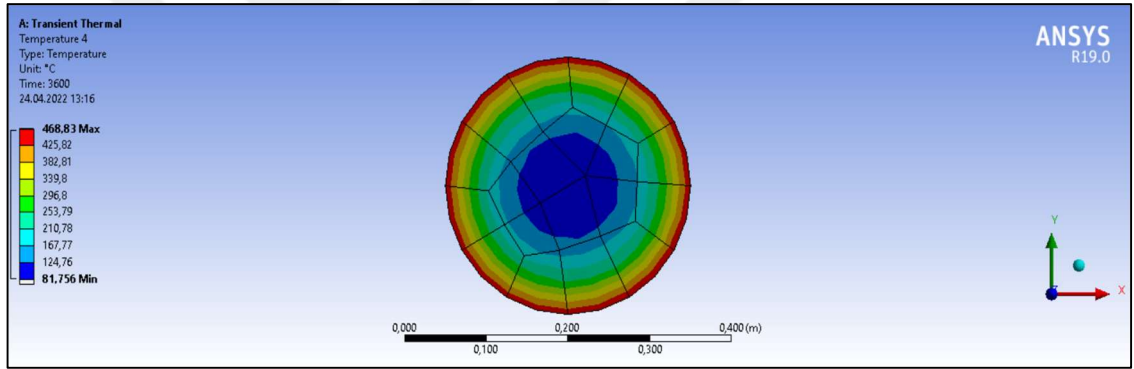
kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık farkı 40°C olurken, 16 milimetre çelik kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 8 milimetre çelik kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık arasındaki fark 50°C olmuştur. Bu da dairesel kesitli bir kolonda 200 milimetre beton en kesit kalınlığını ve 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlığını sabit tutup, çeliğin 8 milimetre olan en kesitinin 8 milimetre artarak 16 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 50°C fark oluşturduğunu ve daha sonra tekrar 200 milimetre beton en kesit kalınlığını ve 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlığını sabit tutup, çeliğin 16 milimetre olan en kesitinin 8 milimetre artarak 24 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 50°C fark oluşturduğunu göstermektedir. Benzer özellikleri göstererek Şekil 5.42, Şekil 5.44, Şekil 5.46, Şekil 5.48, Şekil 5.50, Şekil 5.52, Şekil 5.54 ve Şekil 5.56'da temsil edilen 8 farklı kolon numunesinin de beton en kesit kalınlıkları 200, 250 ve 300 milimetre, pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlıkları 0,8, 1,6, 2,4 milimetre olarak alınarak çelik en kesit kalınlıkları 8, 16, 24 milimetre alınmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince ve analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda Şekil 5.40'da olduğu gibi 8 milimetre olan en kesitinin 8 milimetre artarak 16 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 40-50°C civarlarında farklar oluşturduğu ve daha sonra tekrar çeliğin 16 milimetre olan en kesitinin 8 milimetre artarak 24 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 40-50°C farklar oluşturduğu görülmektedir.

5.5. Beton En Kesitinin Yangın Performansına Etkisi

Şekil 5.58'de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, 200, 250, 300 sayıları beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 0,8 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın en kesit genişliğini ifade etmektedir.

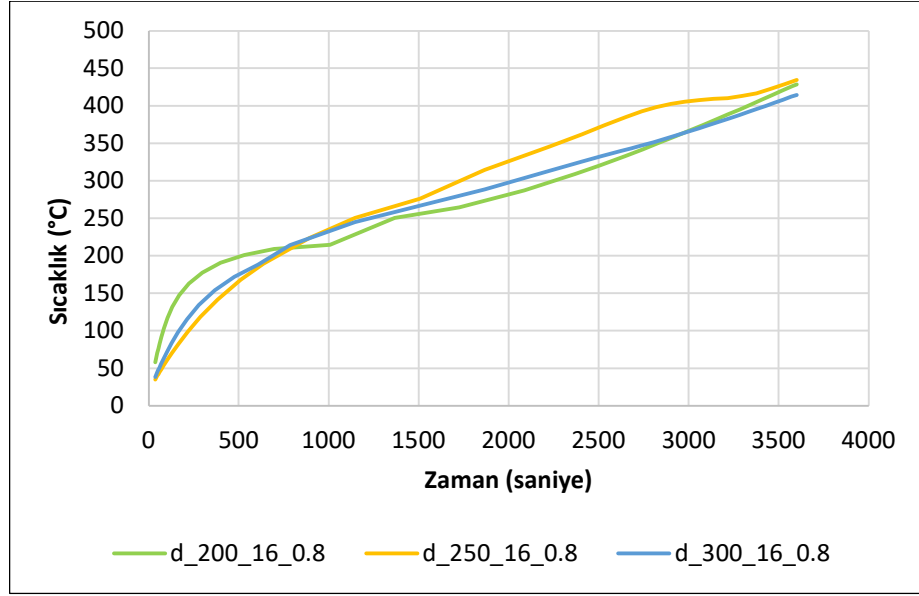


Şekil 5.58. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_0,8)

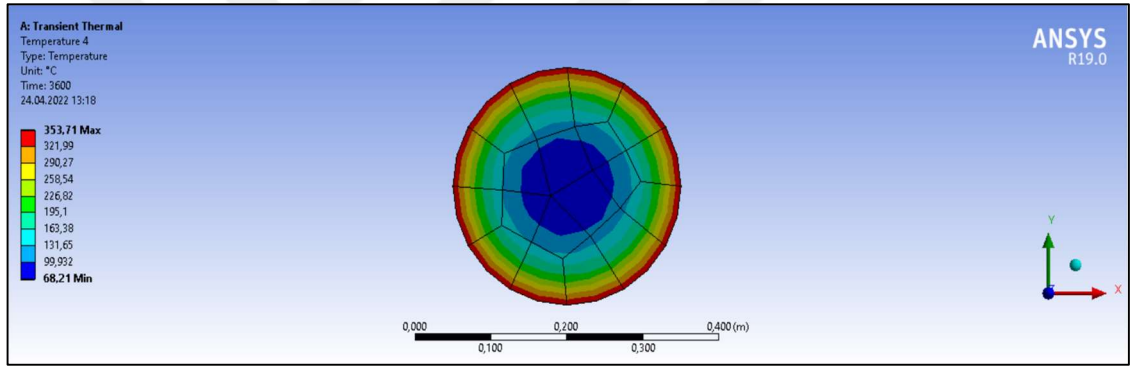


Şekil 5.59. D_300_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.60’da gösterilen çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

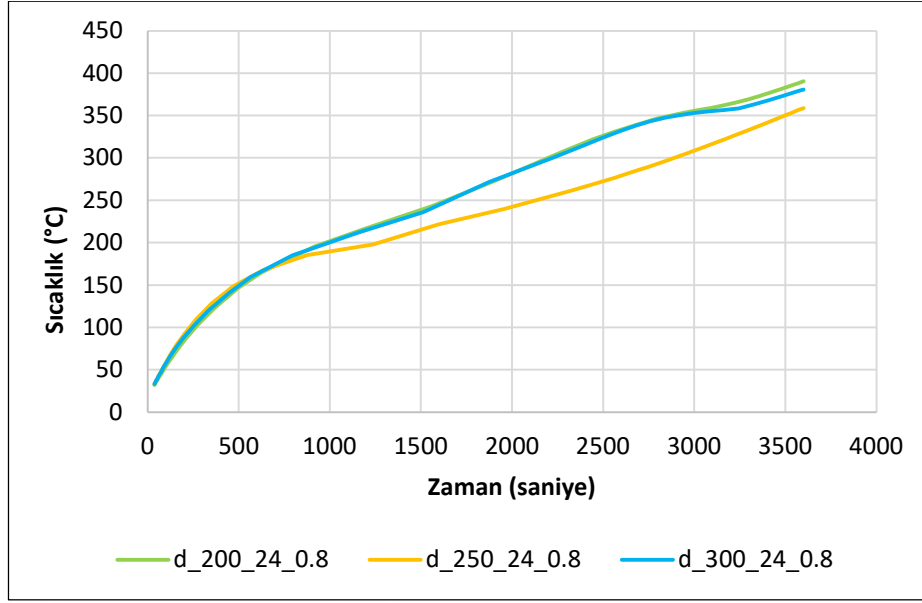


Şekil 5.60. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_0,8)

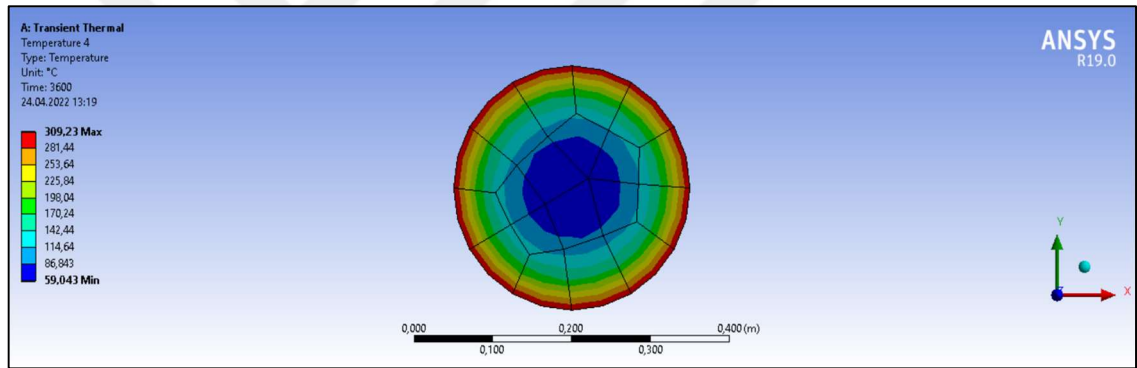


Şekil 5.61. D_300_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.62’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

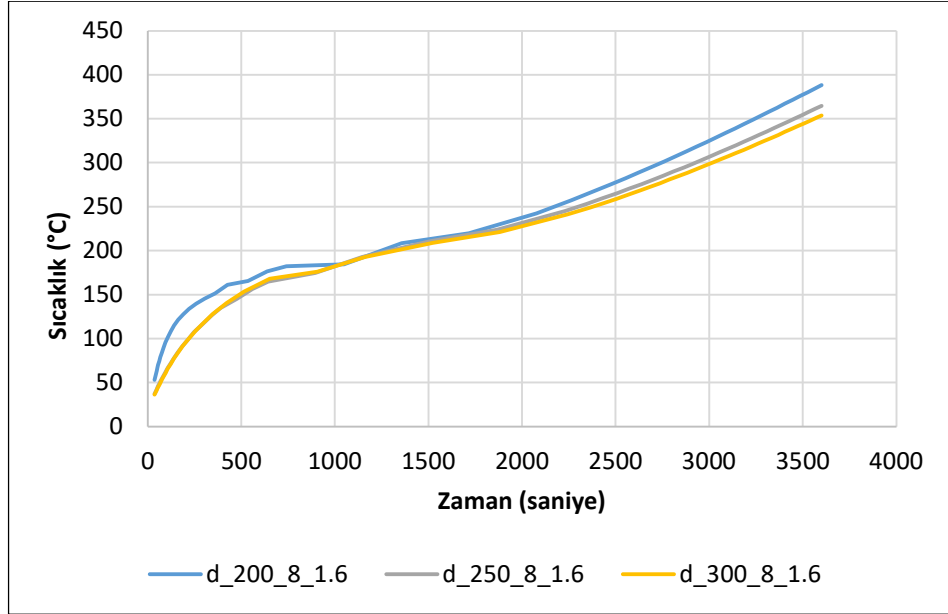


Şekil 5.62. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_0,8)

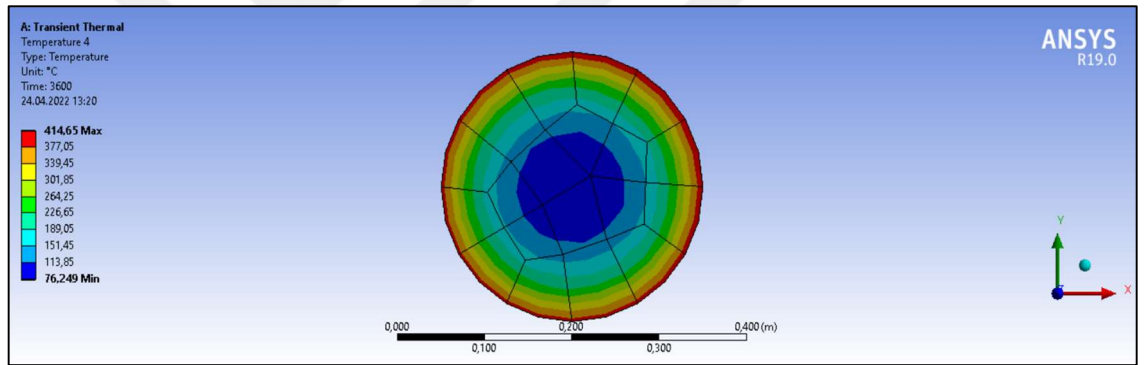


Şekil 5.63. D_300_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.64’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

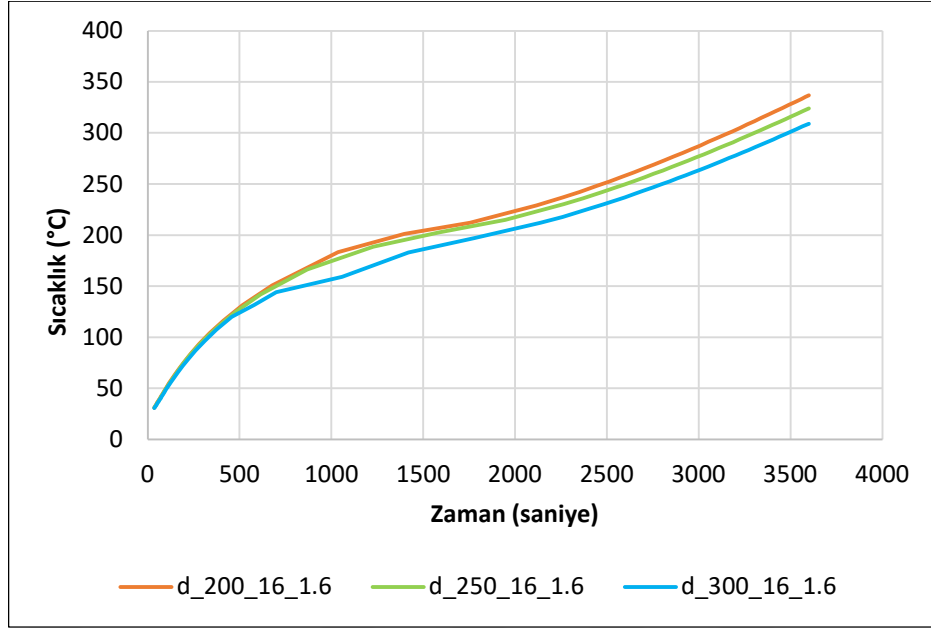


Şekil 5.64. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_1,6)

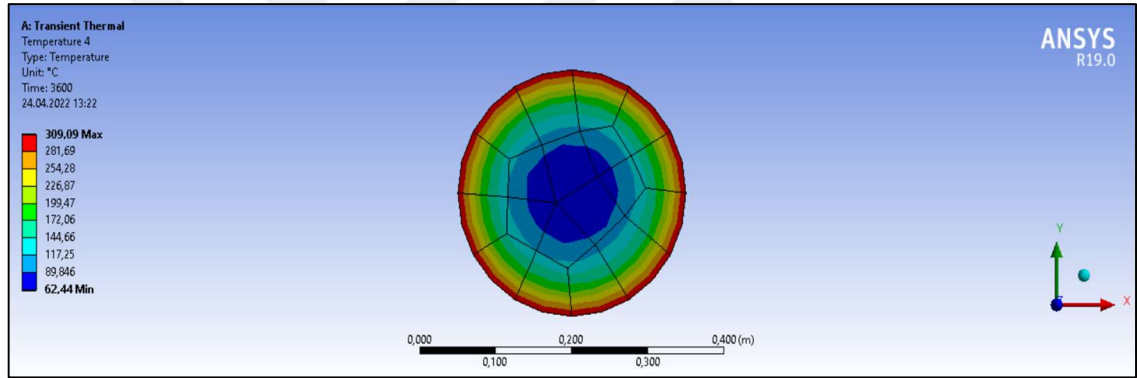


Şekil 5.65. D_300_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.66’da gösterilen çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

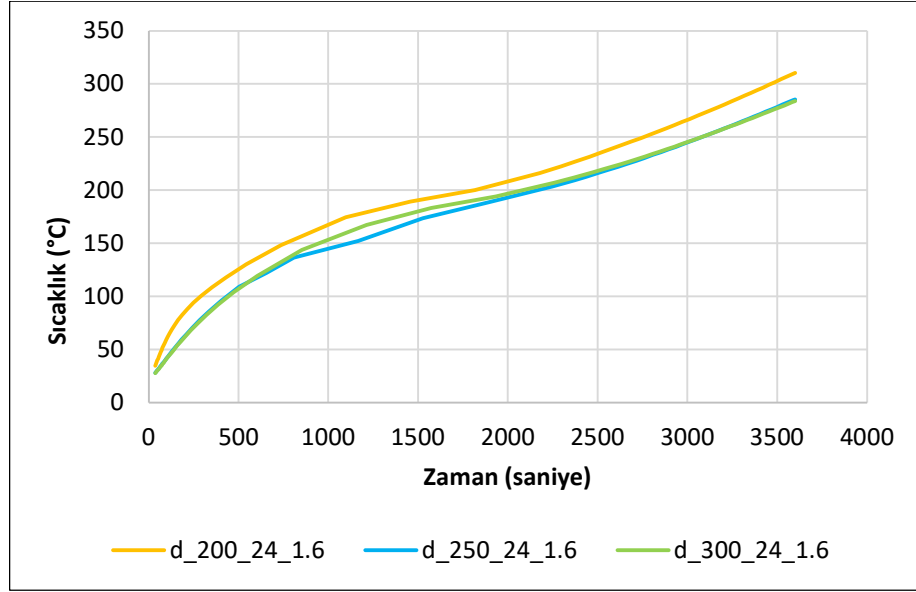


Şekil 5.66. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_1,6)

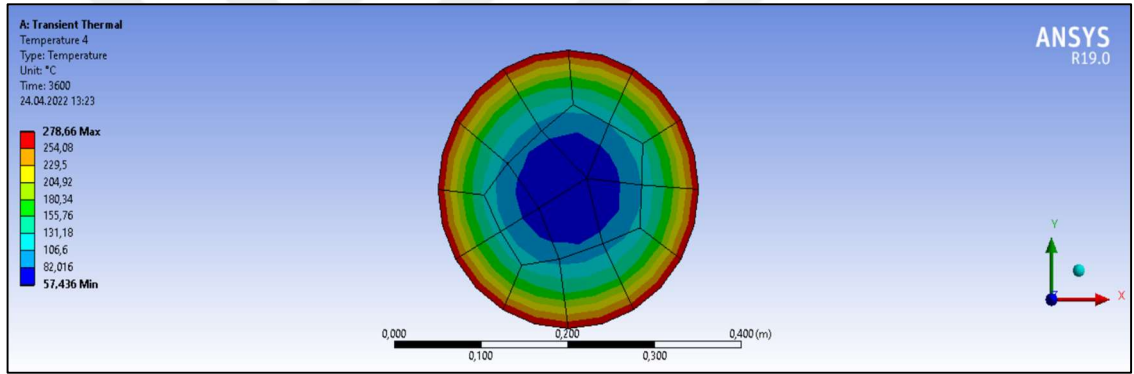


Şekil 5.67. D_300_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.68’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

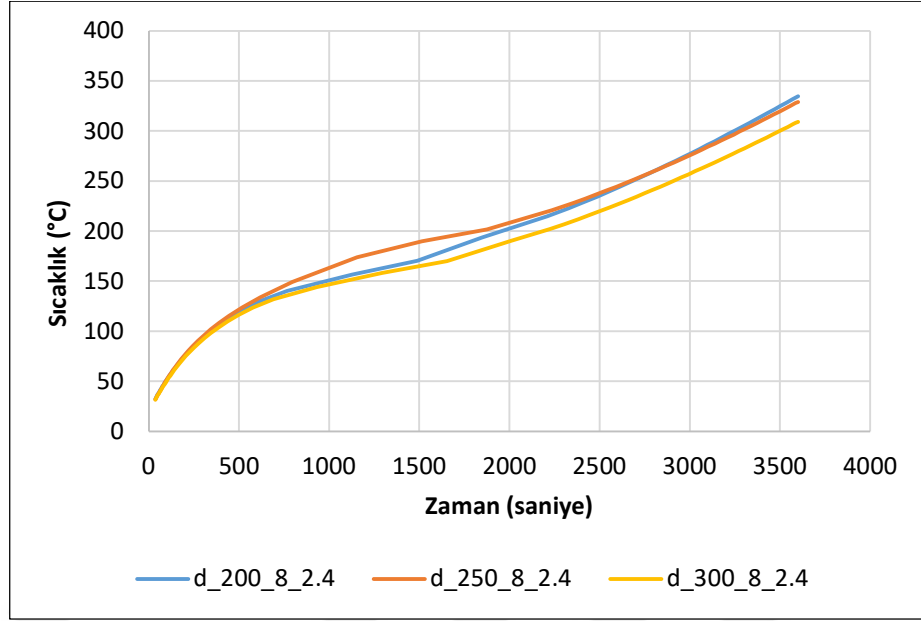


Şekil 5.68. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_1,6)

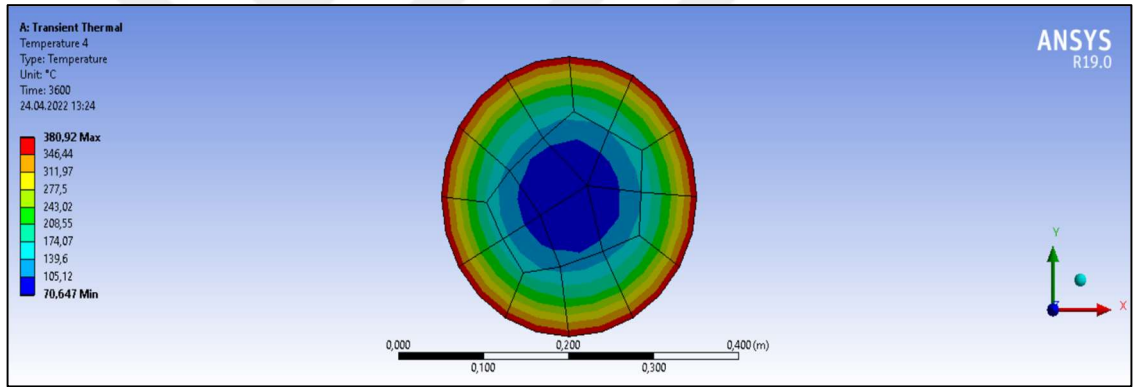


Şekil 5.69. D_300_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.70’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

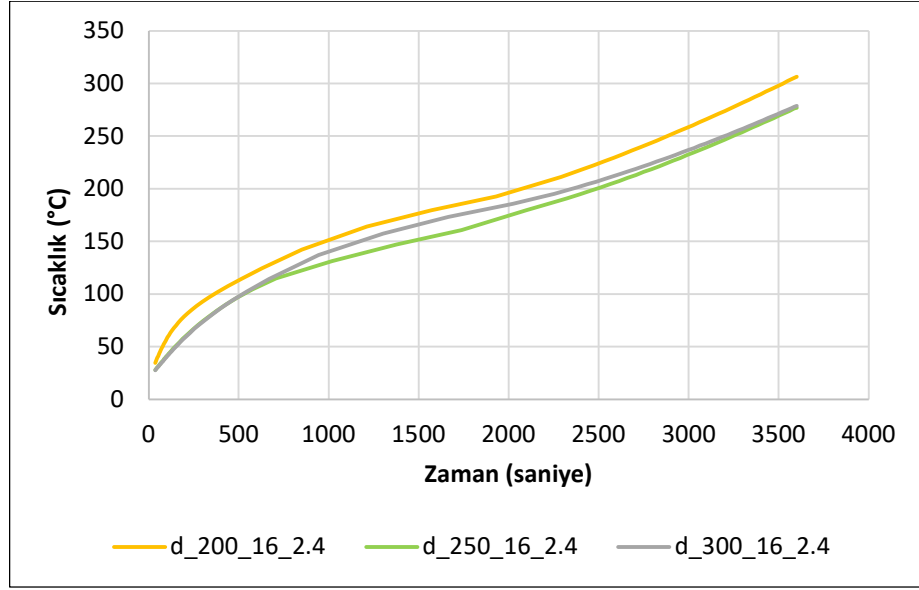


Şekil 5.70. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (8_2,4)

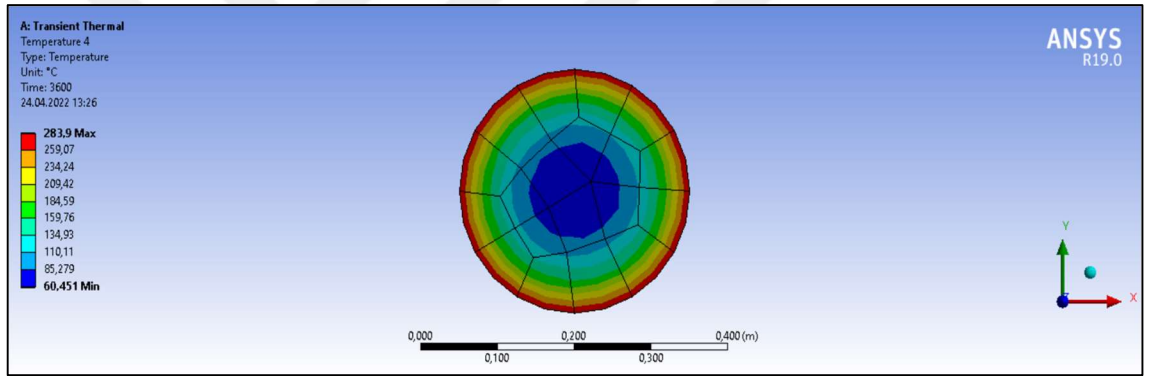


Şekil 5.71. D_300_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.72’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.

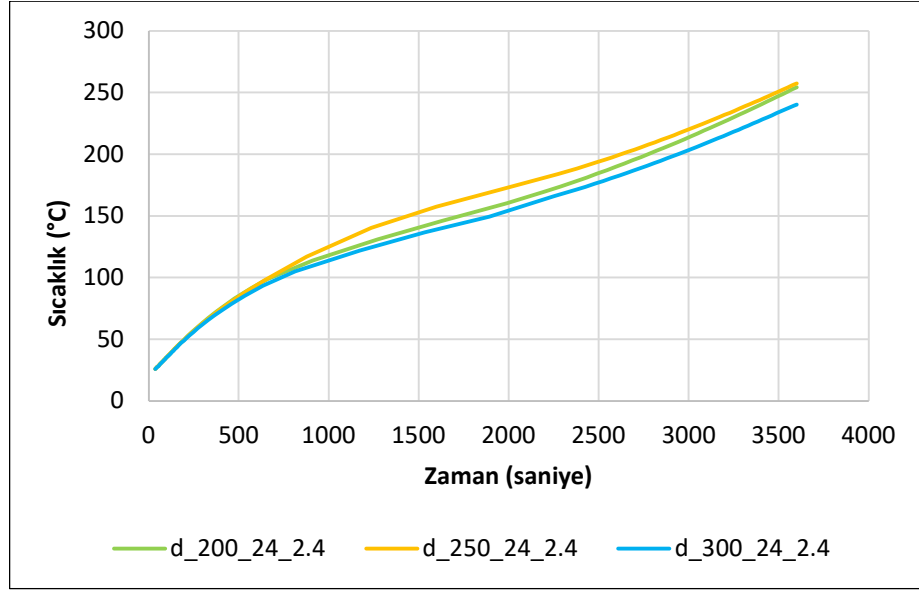


Şekil 5.72. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (16_2,4)

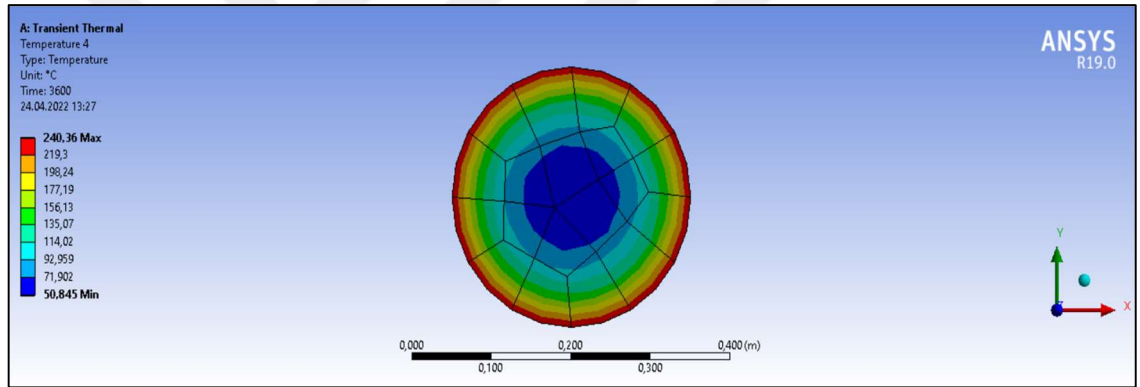


Şekil 5.73. D_300_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.74’de gösterilen çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu dairesel bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı beton en kesit kalınlıkları için gösterilmiştir.



Şekil 5.74. Farklı beton en kesit kalınlıklarının beton sıcaklığına etkisi (24_2,4)



Şekil 5.75. D_300_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.58’de görülen grafikte dairesel kesitli bir kolonda 8 milimetre en kesit kalınlığına sahip çelik ile 0,8 milimetre en kesit kalınlığına sahip pasif yangın koruma boyası üzerinde 200, 250 ve 300 milimetre en kesit kalınlıklarındaki beton değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda dairesel kesitli 8 milimetre çelik en kesit kalınlığına, 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına ve 200 milimetre beton kalınlığına sahip 3 metre yüksekliğindeki kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 482°C olurken, 250 milimetre beton kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 455°C, 300 milimetre beton kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 468°C olduğu görülmektedir. 300 milimetre beton kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 250 milimetre beton

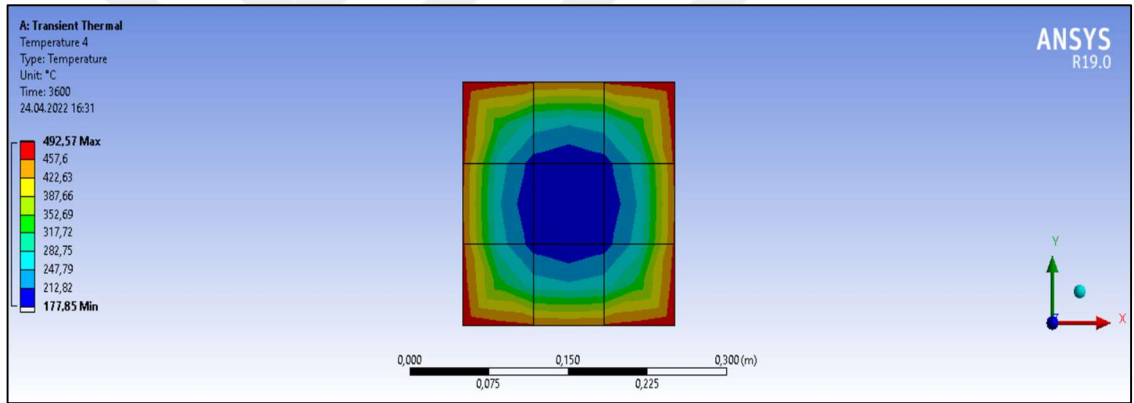
kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık farkı 15°C olurken, 250 milimetre beton kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile 300 milimetre beton kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık arasındaki fark 25°C olmuştur. Bu da dairesel kesitli bir kolonda 8 milimetre çelik en kesit kalınlığını ve 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlığını sabit tutup, betonun 200 milimetre olan en kesitinin 50 milimetre artarak 250 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 25°C fark oluşturduğunu ve daha sonra tekrar 0,8 milimetre çelik en kesit kalınlığını ve 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlığını sabit tutup, betonun 250 milimetre olan en kesitinin 50 milimetre artarak 300 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 15°C fark oluşturduğunu göstermektedir. Benzer özellikleri göstererek Şekil 5.60, Şekil 5.62, Şekil 5.64, Şekil 5.66, Şekil 5.68, Şekil 5.70, Şekil 5.72 ve Şekil 5.74’de temsil edilen 8 farklı kolon numunesinin de çelik en kesit kalınlıkları 8, 16 ve 24 milimetre, pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlıkları 0,8, 1,6, 2,4 milimetre olarak alınarak beton en kesit kalınlıkları 200, 250, 300 milimetre alınmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince ve analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda Şekil 5.58’de olduğu gibi 200 milimetre olan en kesitinin 50 milimetre artarak 250 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 10-30°C civarlarında farklar oluşturduğu ve daha sonra tekrar betonun 250 milimetre olan en kesitinin 50 milimetre artarak 300 milimetreye gelmesiyle maksimum sıcaklıkta 10-30°C farklar oluşturduğu görülmektedir. Beton en kesitinin artmasının beton en kesitinde oluşan maksimum sıcaklıklara pek bir katkısı olmasa da beton çekirdeğindeki sıcaklığı da 30-50°C düşürdüğü (Şekil 5.57 ve Şekil 5.75) görülmüştür.

5.6. En Kesit Şeklinin Yangın Performansına Etkisi

Şekil 5.76’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, K harfi kare kolonu, DD harfleri dikdörtgen kolonu, 200 sayısı beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 0,8 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın en kesit genişliğini ifade etmektedir.

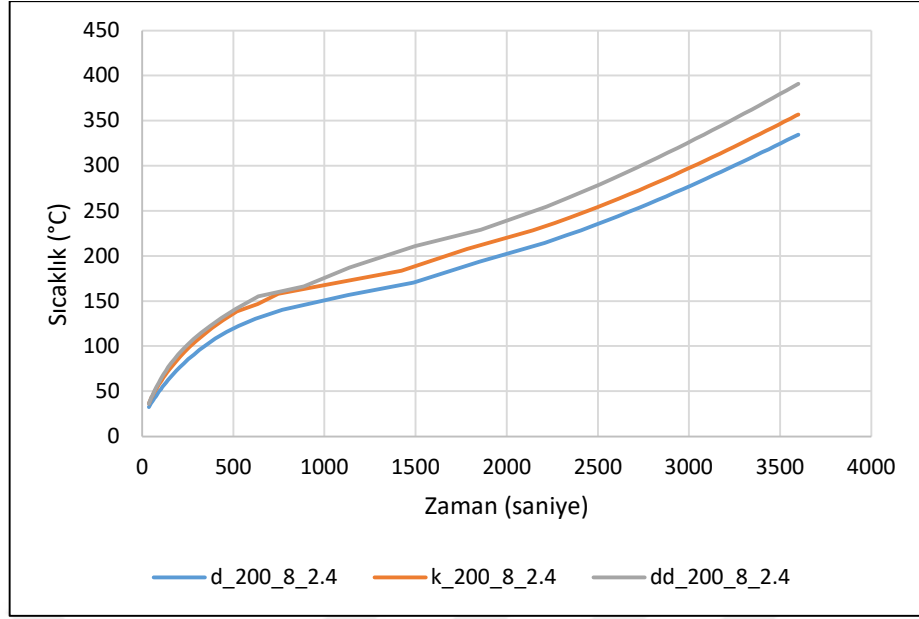


Şekil 5.76. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_8_0,8)

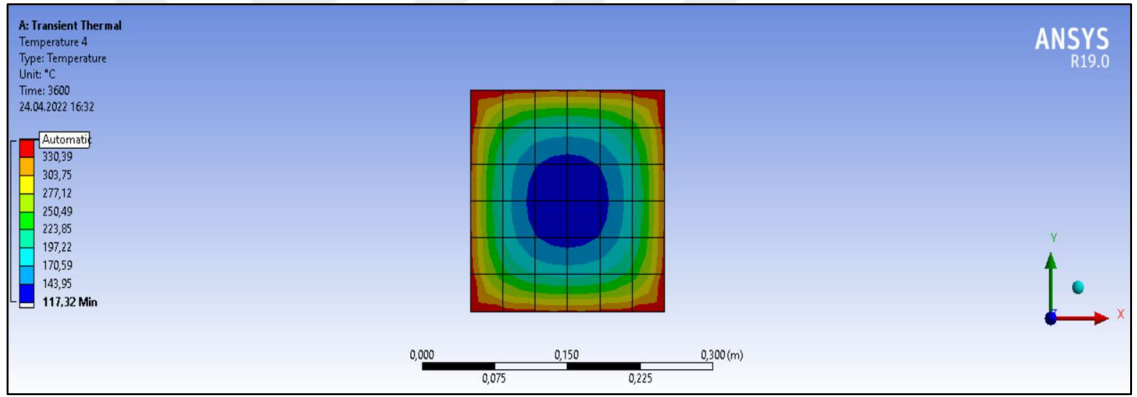


Şekil 5.77. K_200_8_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.78’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

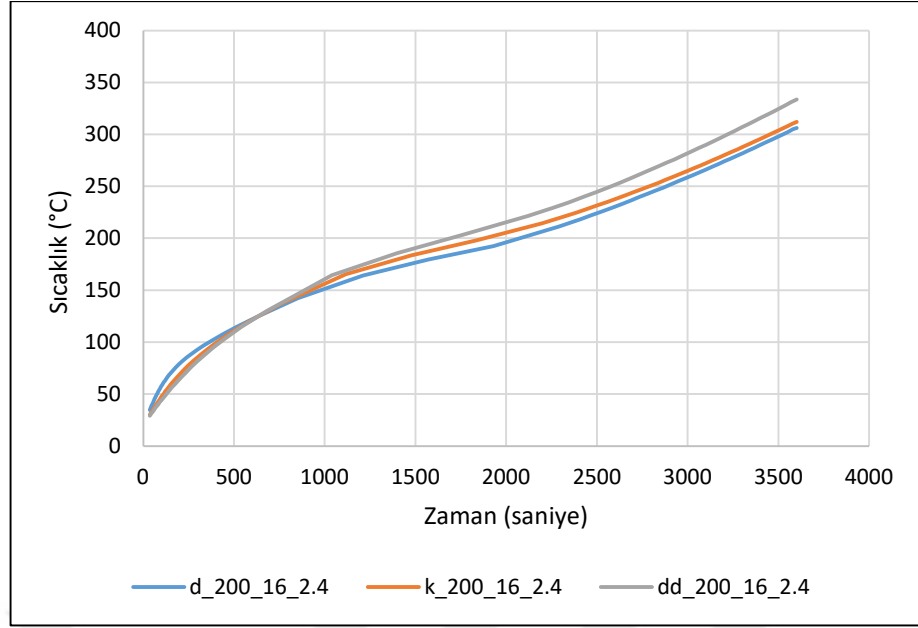


Şekil 5.78. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_8_2,4)

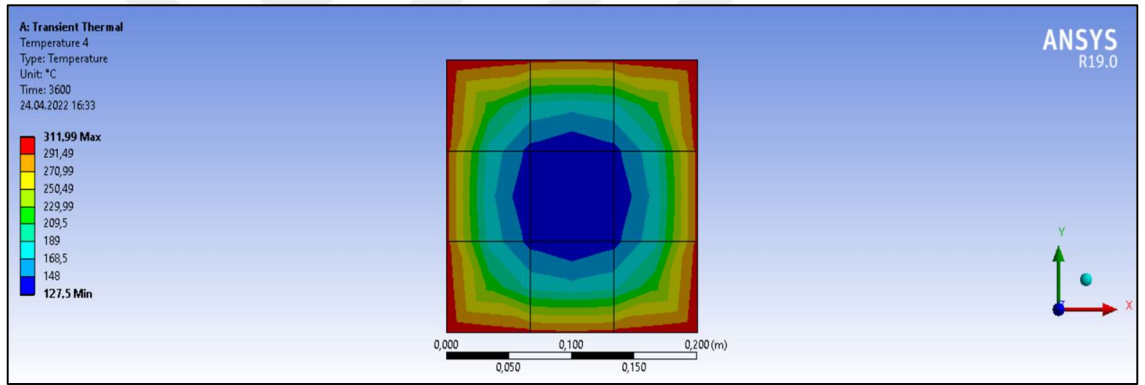


Şekil 5.79. K_200_8_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.80’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

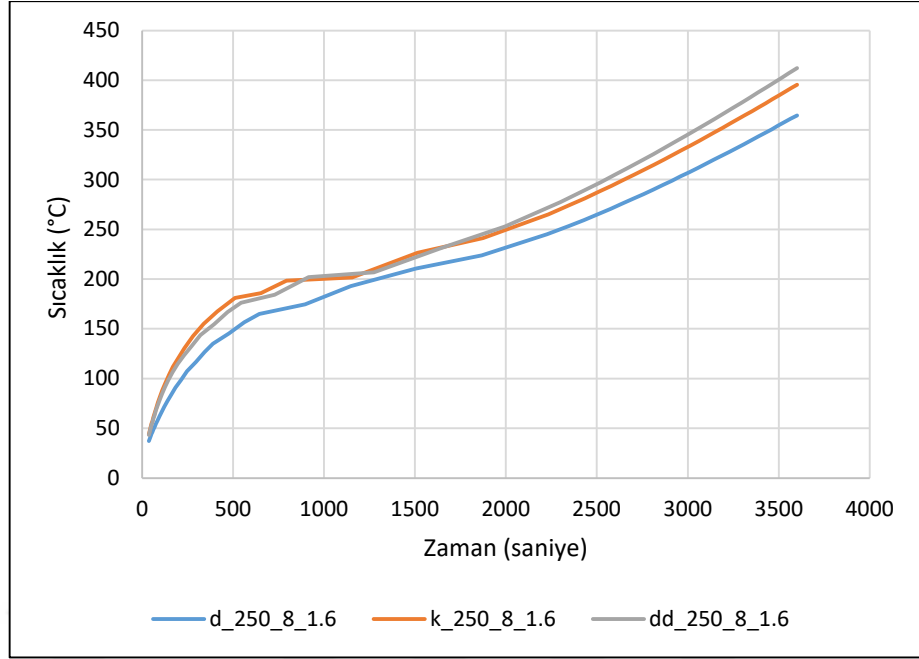


Şekil 5.80. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (200_16_2,4)

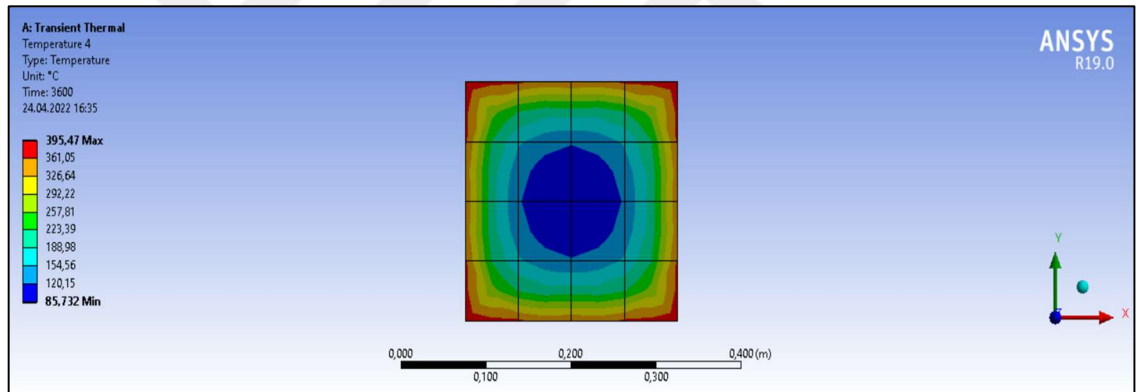


Şekil 5.81. K_200_16_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.82’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.



Şekil 5.82. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_8_1,6)

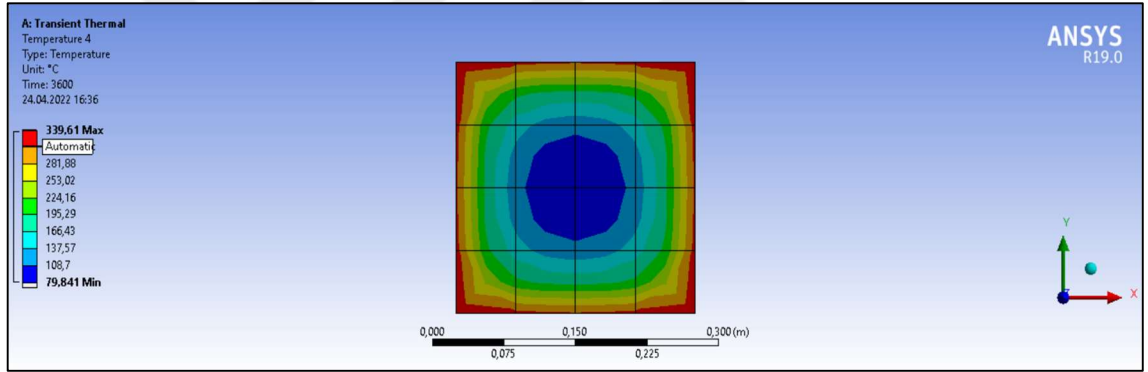


Şekil 5.83. K_250_8_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.84’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

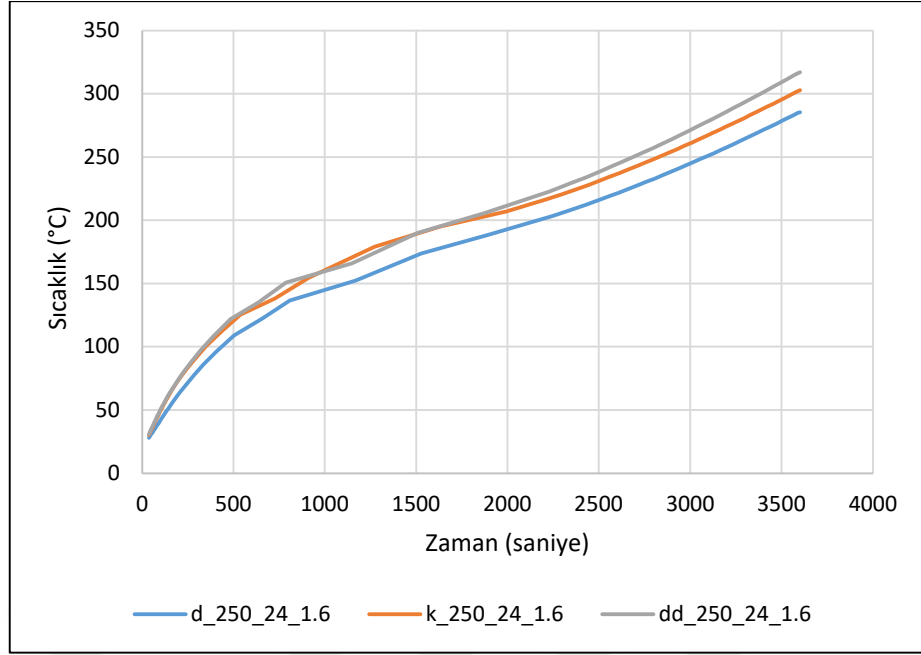


Şekil 5.84. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_16_1,6)

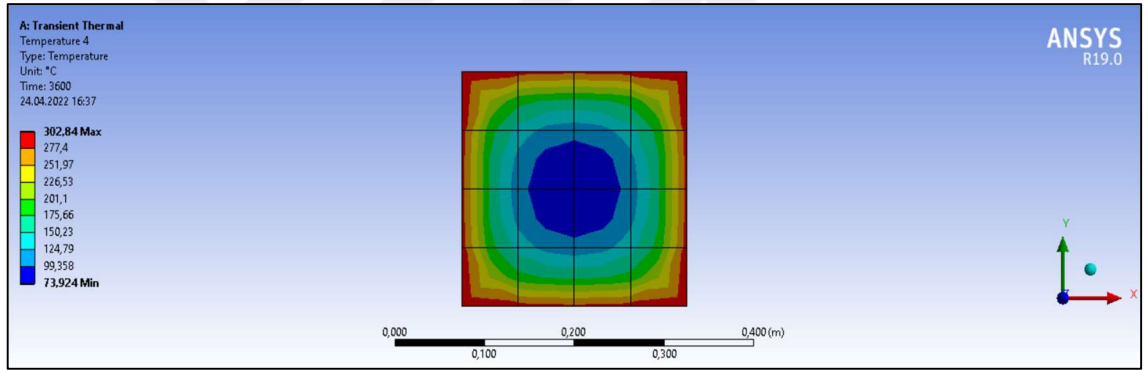


Şekil 5.85. K_250_16_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.86’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

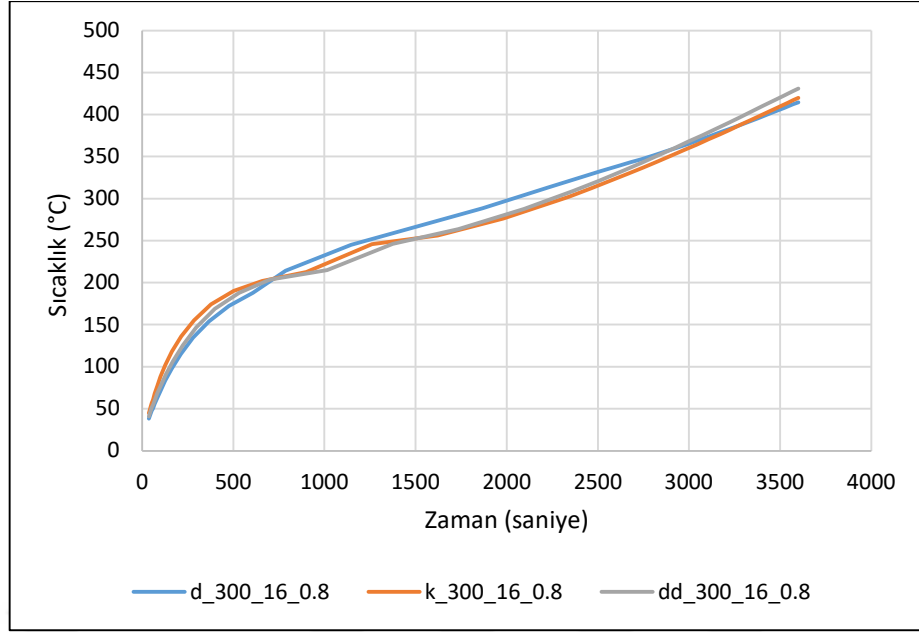


Şekil 5.86. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (250_24_1,6)

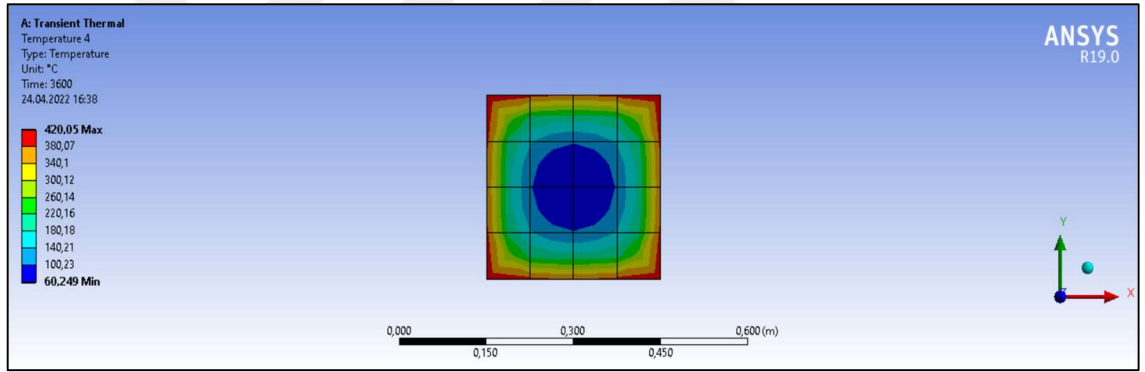


Şekil 5.87. K_250_24_1,6 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.88’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

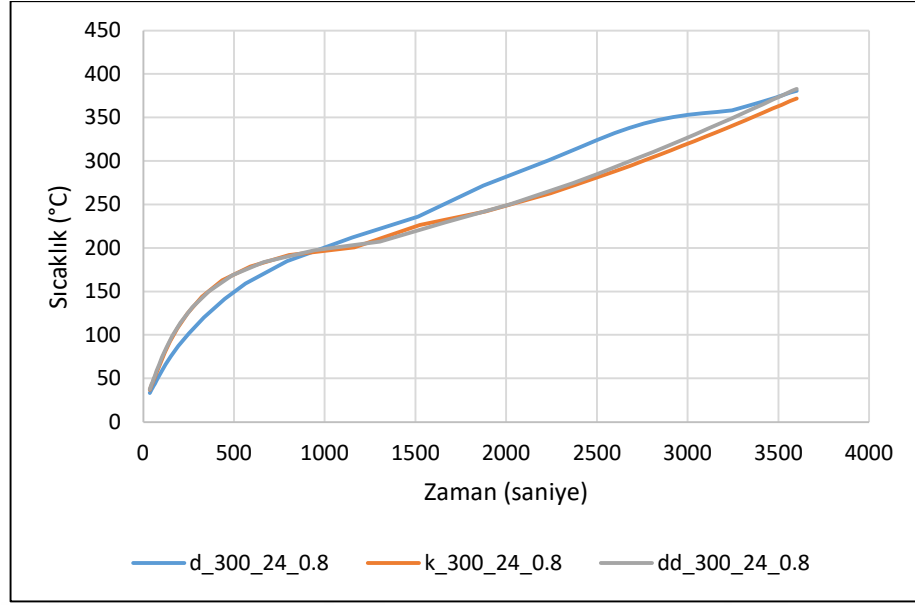


Şekil 5.88. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_16_0,8)

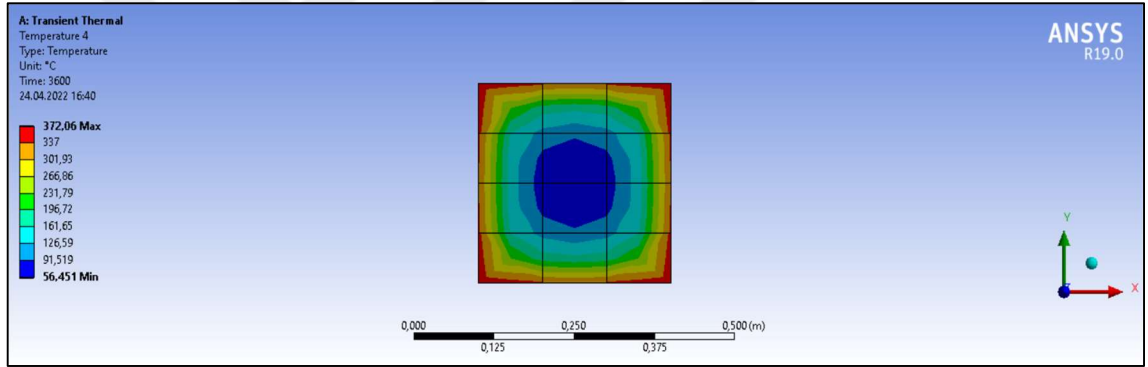


Şekil 5.89. K_300_16_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.90’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.

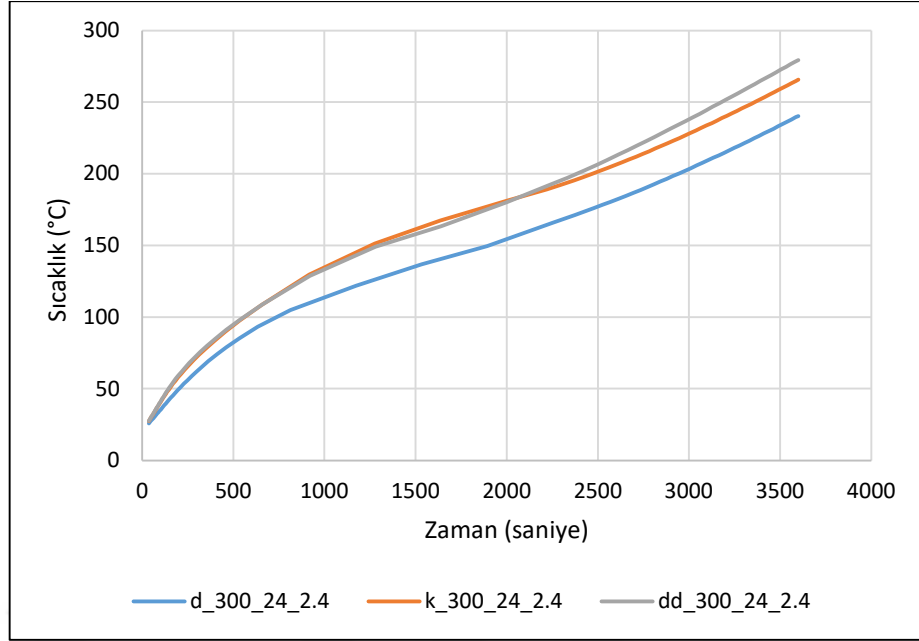


Şekil 5.90. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_24_0,8)

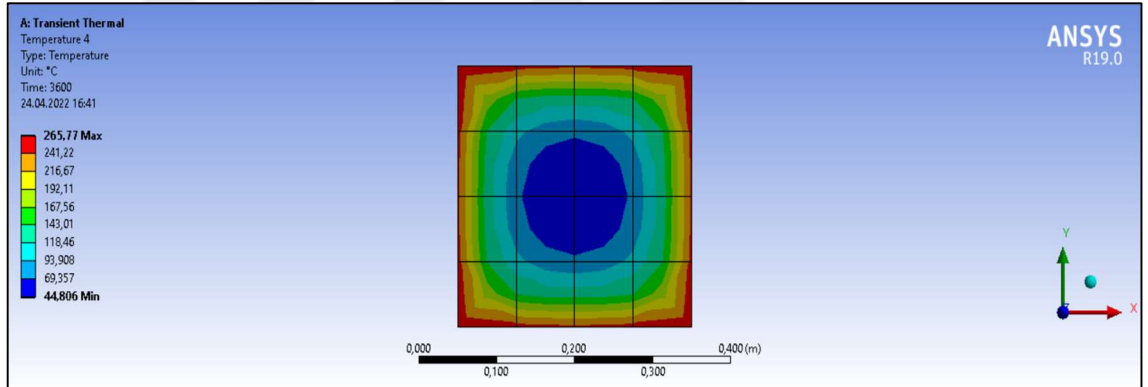


Şekil 5.91. K_300_24_0,8 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.92’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm olduğu bir kolonda ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı kesit şekilleri için gösterilmiştir.



Şekil 5.92. Farklı kesit şekillerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (300_24_2,4)



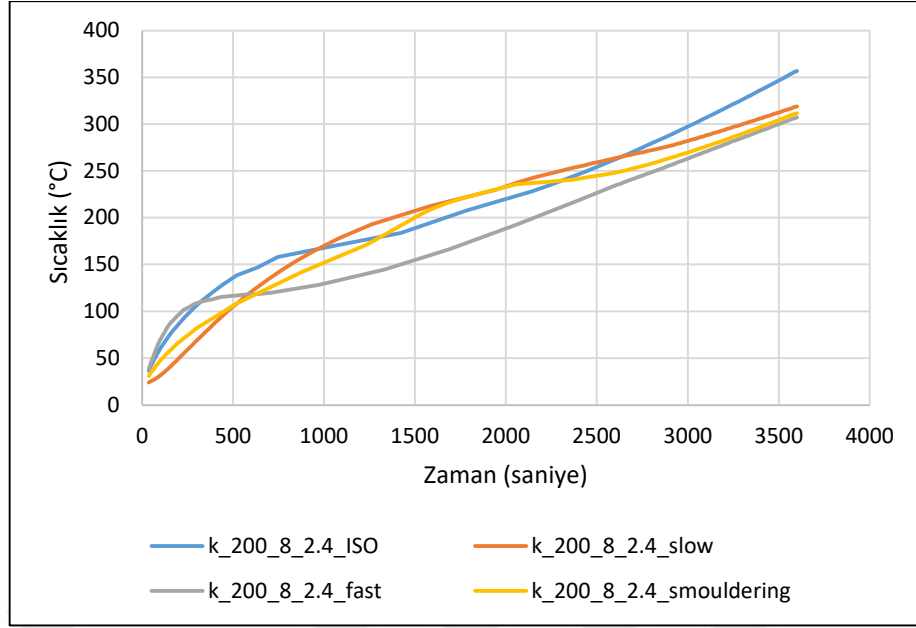
Şekil 5.93. K_300_24_2,4 en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.76’da görülen grafikte bir kolonda 8 milimetre en kesit kalınlığına sahip çelik, 0,8 milimetre en kesit kalınlığına sahip pasif yangın koruma boyası ile 200 milimetre en kesit kalınlığındaki beton sabit tutulup en kesit şekilleri dairesel, dikdörtgen ve kare değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda dairesel kesitli 8 milimetre çelik en kesit kalınlığına, 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası kalınlığına ve 200 milimetre beton kalınlığına sahip dikdörtgen 3 metre yüksekliğindeki kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 534°C olurken, kare en kesite sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 492°C, dairesel en kesite sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık 482°C olduğu görülmektedir. Dikdörtgen en kesit kalınlığına sahip

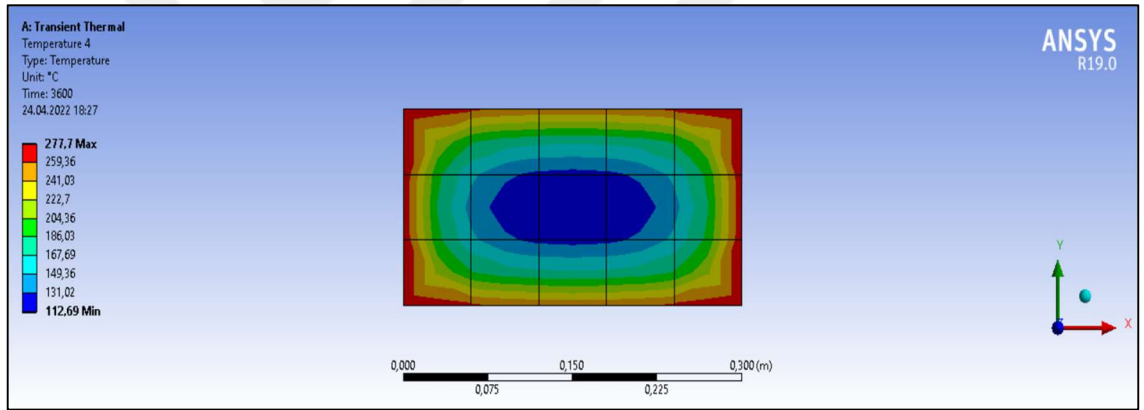
kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile kare en kesit kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık farkı 40°C olurken, kare en kesit kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık ile dairesel en kesit kalınlığına sahip kolonda 3.600 saniyedeki maksimum sıcaklık arasındaki fark 10°C olmuştur. Bu da bir kolonda 8 milimetre çelik en kesit kalınlığını, 0,8 milimetre pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlığı ve 200 milimetre beton en kesit kalınlığını sabit tutup, dikdörtgen kesitin kare kesit olarak kullanılmasıyla maksimum sıcaklıkta 40°C fark oluşturduğunu ve daha sonra tekrar kare en kesiti sabit tutup, dairesel kesit kullanılmasıyla maksimum sıcaklıkta 10°C fark oluşturduğunu göstermektedir. Benzer özellikleri göstererek Şekil 5.78, Şekil 5.80, Şekil 5.82, Şekil 5.84, Şekil 5.86, Şekil 5.88, Şekil 5.90 ve Şekil 5.92’de temsil edilen 8 farklı kolon numunesinin de çelik en kesit kalınlıkları 8, 16 ve 24 milimetre, pasif yangın koruma boyası en kesit kalınlıkları 0,8, 1,6, 2,4 milimetre ve beton en kesit kalınlıkları 200, 250, 300 milimetre olarak alınarak kare, dairesel ve dikdörtgen kesitler kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 1 saatlik yangına maruz kalma süresince ve analizleri yapılmıştır. Analizler sonucunda Şekil 5.76’da olduğu gibi dikdörtgen kesitin kare kesit olarak kullanılması ile maksimum sıcaklıkta 5-20°C civarlarında farklar oluşturduğu ve daha sonra tekrar karenin dairesel en kesit olarak kullanılması ile maksimum sıcaklıkta 10-40°C farklar oluşturduğu görülmektedir. Yapılan analizler sonucu dairesel kesitin kare ve dikdörtgen kesite göre daha iyi bir yangın performansı verdiği gözlemlenmiştir. En iyi performansı dairesel en kesit verirken daha sonra kare ve ondan sonra ise dikdörtgen kesit vermiştir. Şekil 5.75 ve Şekil 5.93’e bakacak olursak beton en kesitindeki maksimum sıcaklık dairesel kolonda daha düşükken beton çekirdeğindeki maksimum sıcaklık ise kare kolonda 10°C daha azdır.

5.7. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi

Şekil 5.94’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin kare olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir. K harfi kare kolonu, 200 sayısı beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 2,4 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın en kesit genişliğini, ISO, Fast, Slow ve Smouldering tanımlamaları ise Şekil 5.14’de gösterilen yangın eğrilerini temsil etmektedir.

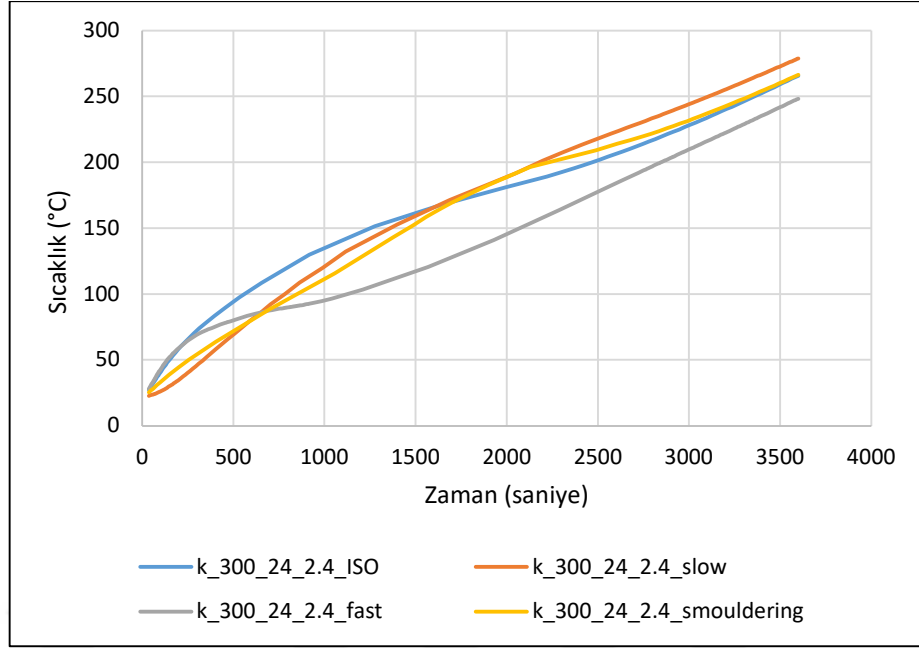


Şekil 5.94. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (K_200_8_2,4)

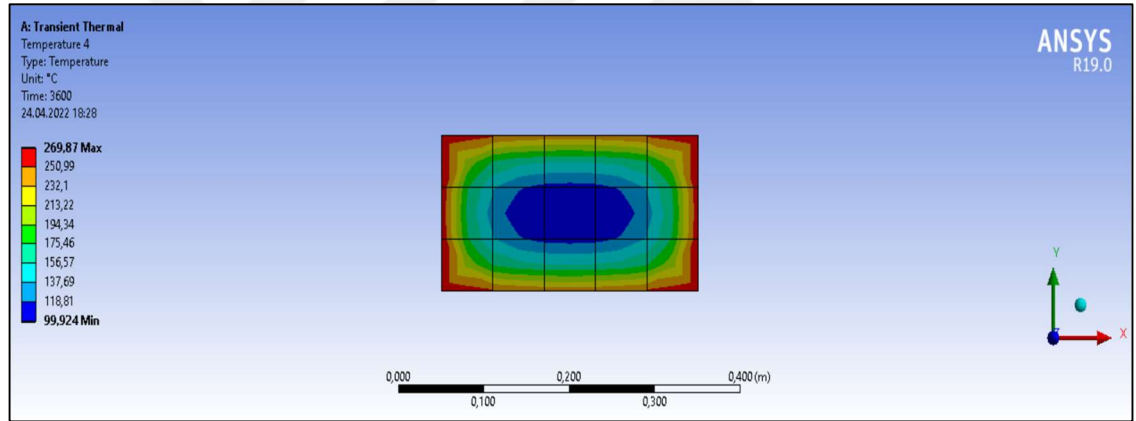


Şekil 5.95. DD_300_24_2,4_slow en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.96’da gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin kare olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.

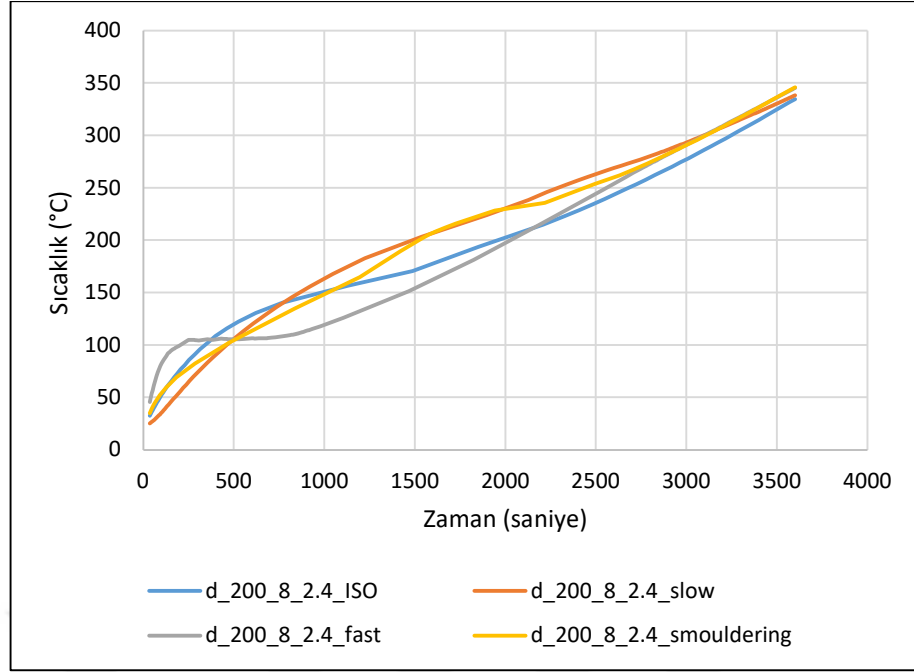


Şekil 5.96. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (K_300_24_2,4)

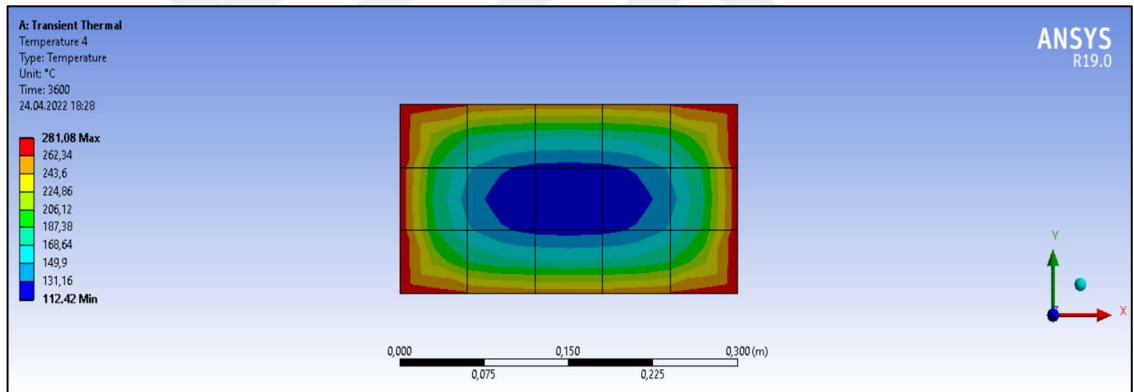


Şekil 5.97. DD_300_24_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.98’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, 200 sayısı beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 2,4 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın kalınlığını temsil etmektedir.

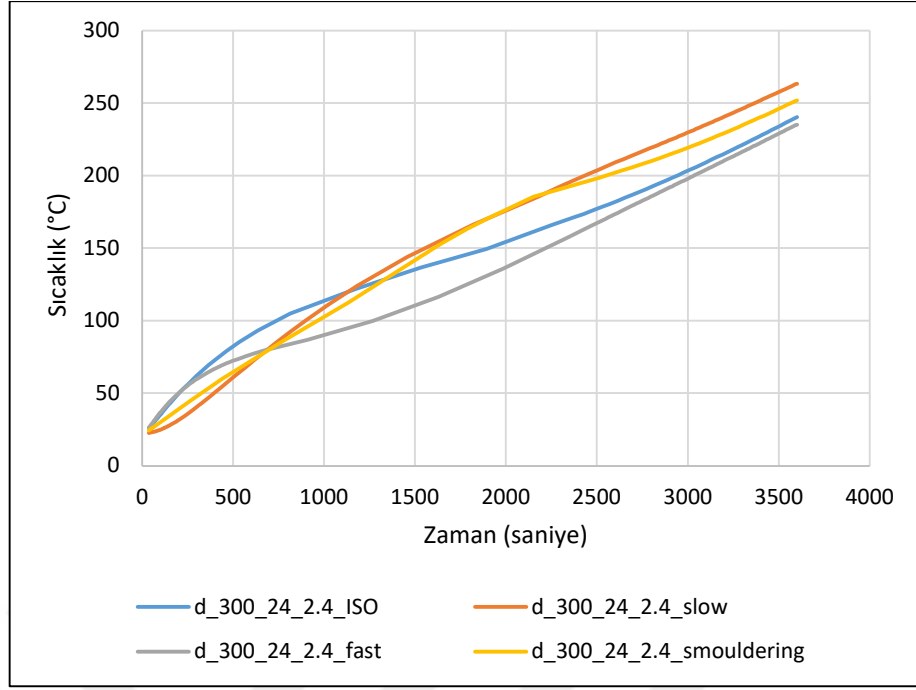


Şekil 5.98. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_8_2,4)

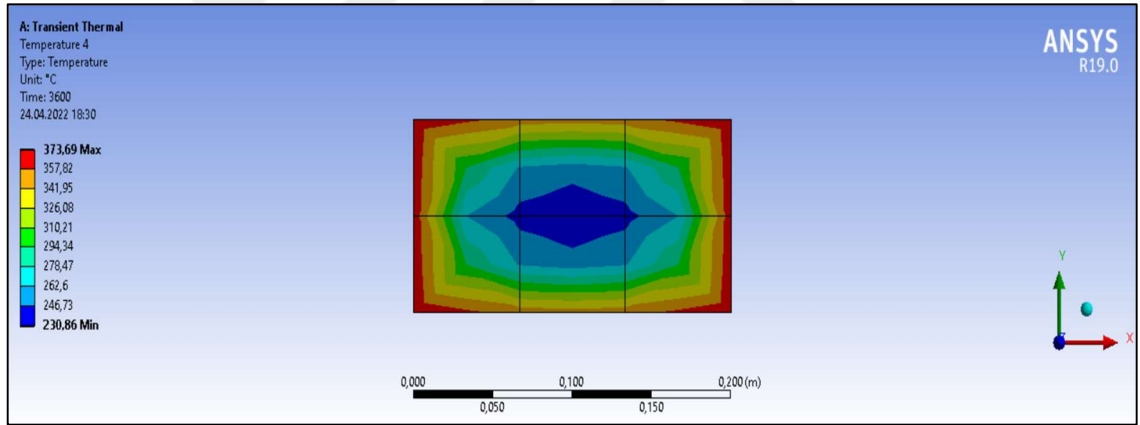


Şekil 5.99. DD_300_24_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 5.100’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.

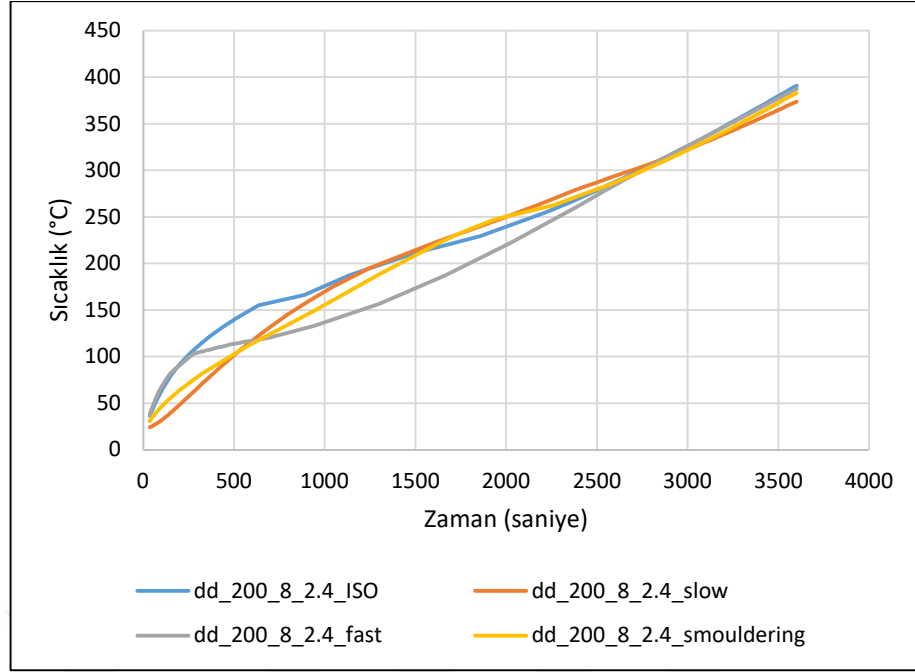


Şekil 5.100. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_2,4)

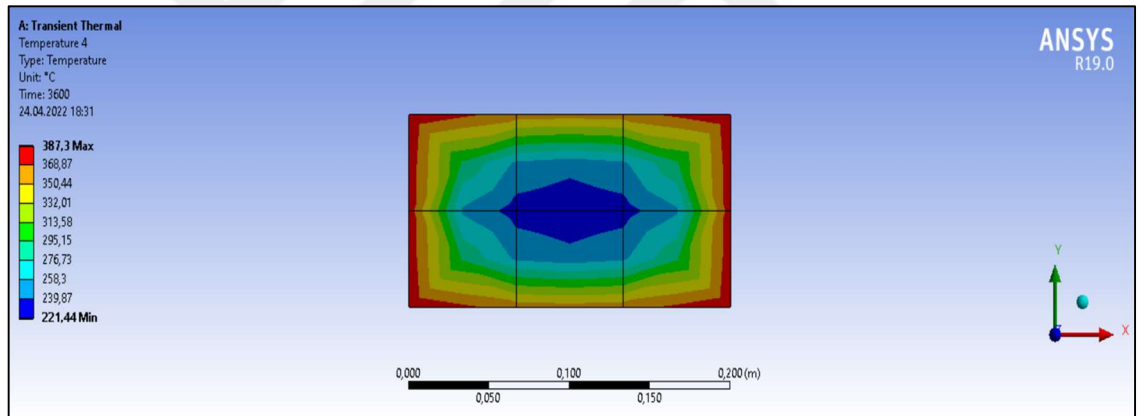


Şekil 5.101. DD_200_8_2,4_slow en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.102’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 8 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dikdörtgen olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir. dd harfleri dikdörtgen kolonu, 200 sayısı beton en kesit genişliğini, 8 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 2,4 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın en kesit genişliğini temsil etmektedir.

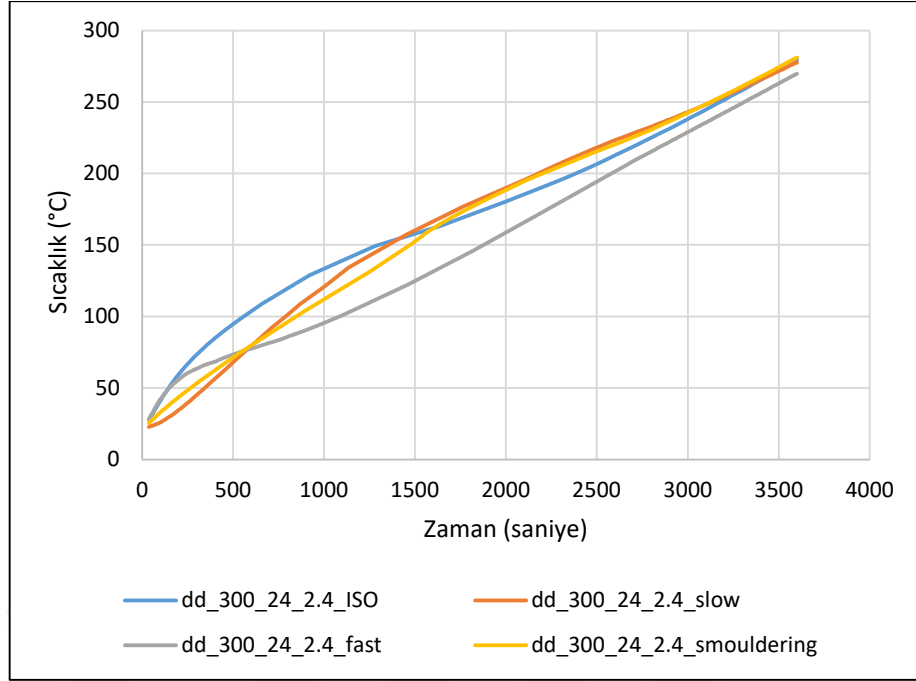


Şekil 5.102. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (DD_200_8_2,4)

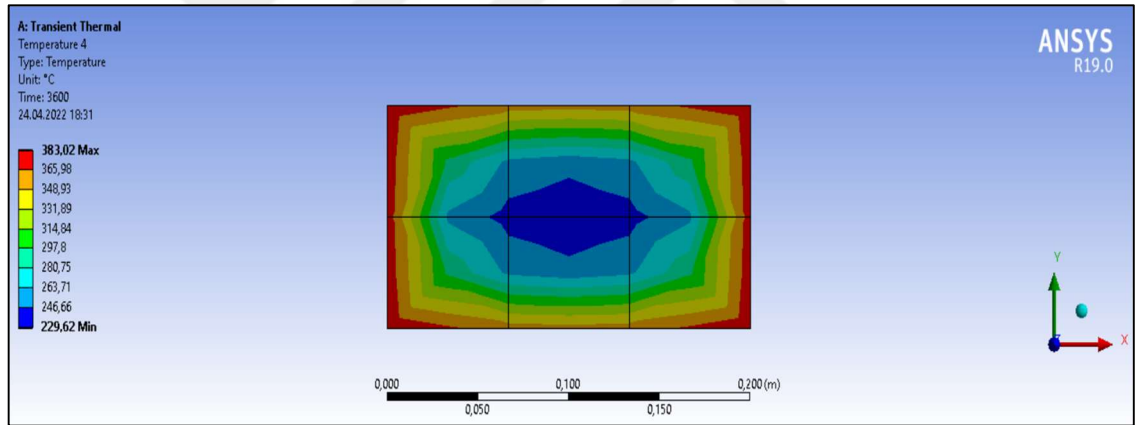


Şekil 5.103. DD_200_8_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.104’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dikdörtgen olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.

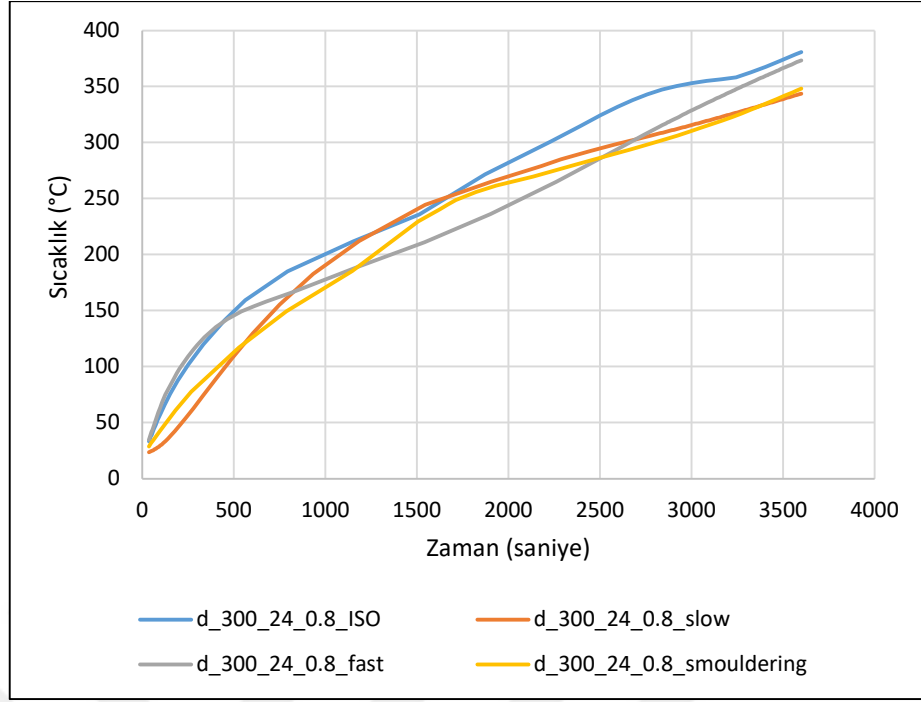


Şekil 5.104. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (DD_300_24_2,4)

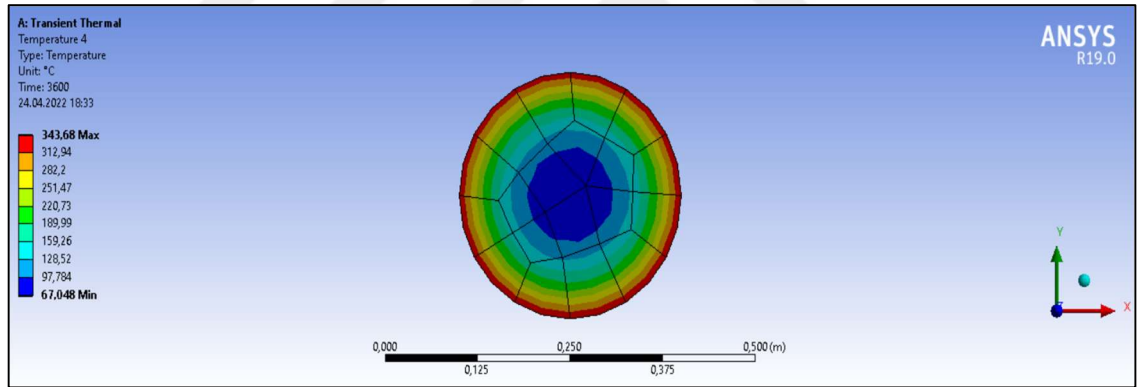


Şekil 5.105. DD_200_8_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 5.106'da gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 0,8 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir. D harfi dairesel kolonu, 300 sayısı beton en kesit genişliğini, 24 sayısı çelik en kesit genişliğini ve 0,8 sayısı pasif yangın koruyucu boyanın kalınlığını temsil etmektedir.

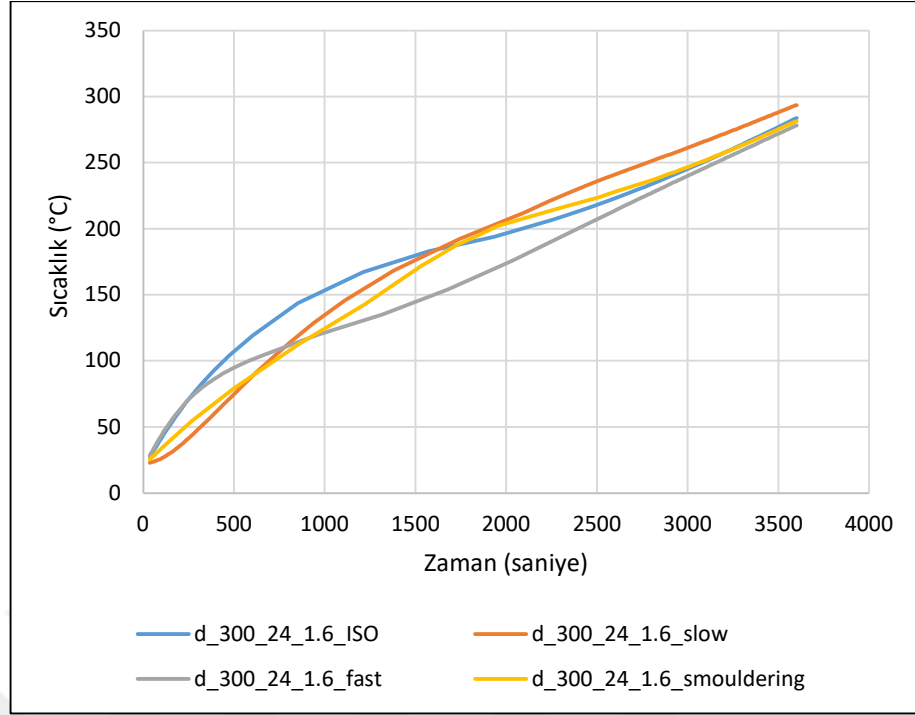


Şekil 5.106. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_0,8)

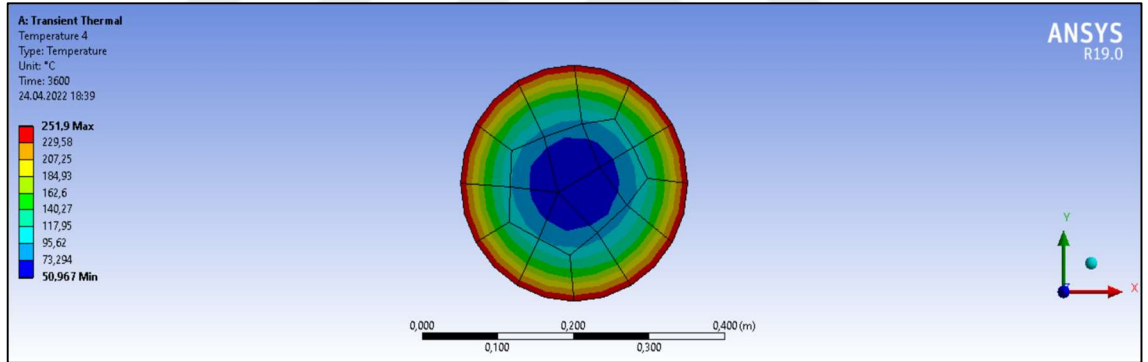


Şekil 5.107. D_300_24_0,8_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.108’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 300 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 1,6 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.

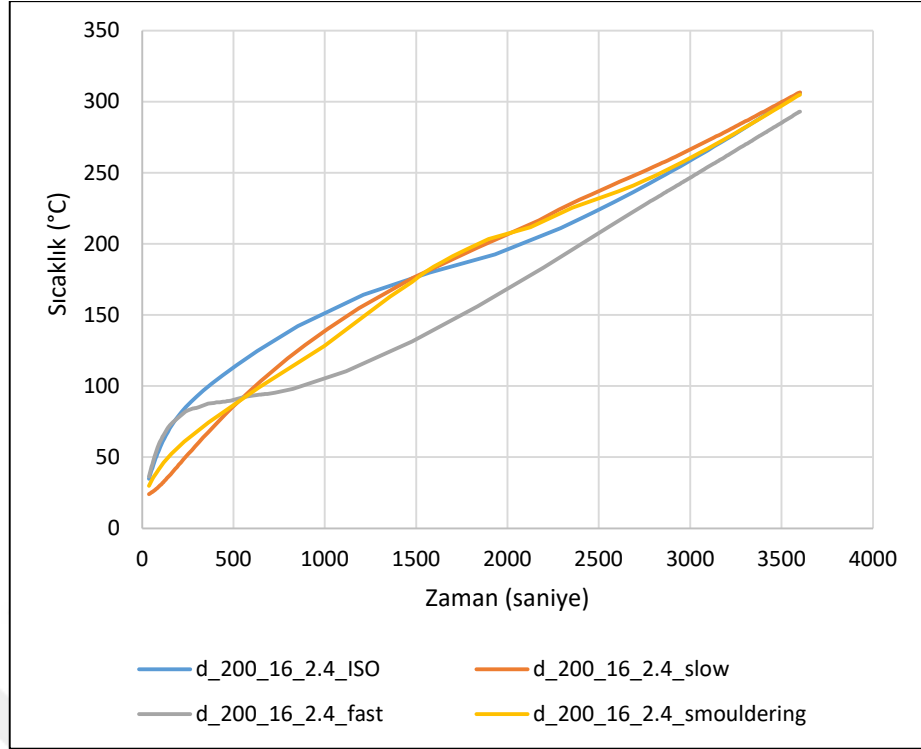


Şekil 5.108. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_300_24_1,6)

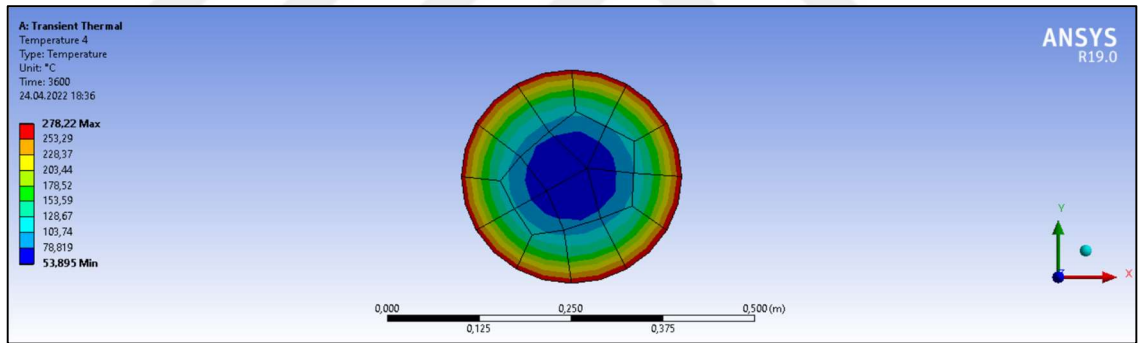


Şekil 5.109. D_300_24_2,4_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 5.110'da gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 16 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.

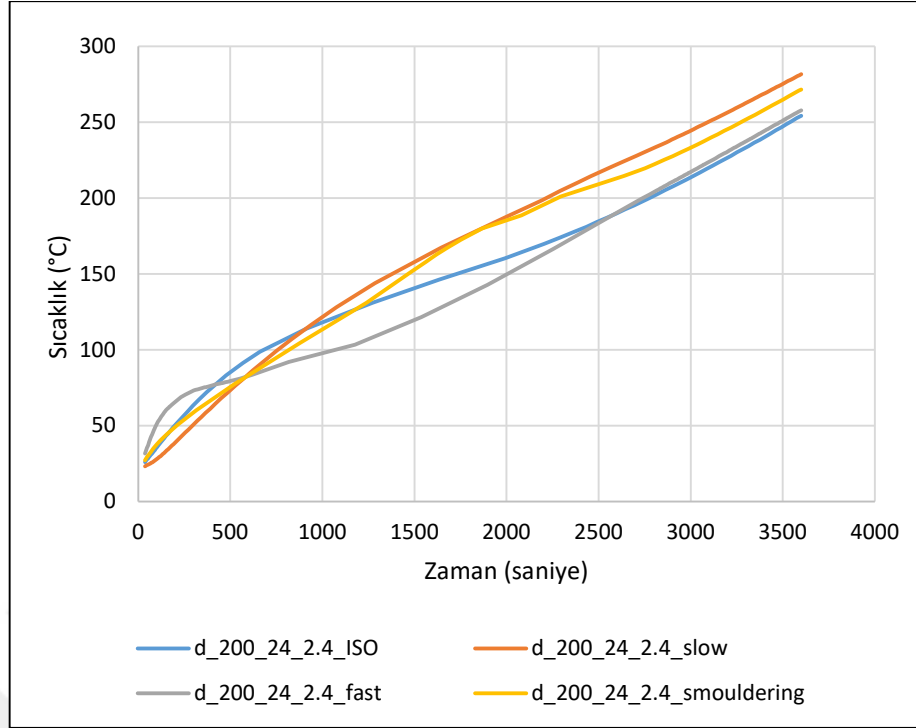


Şekil 5.110. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_16_2,4)

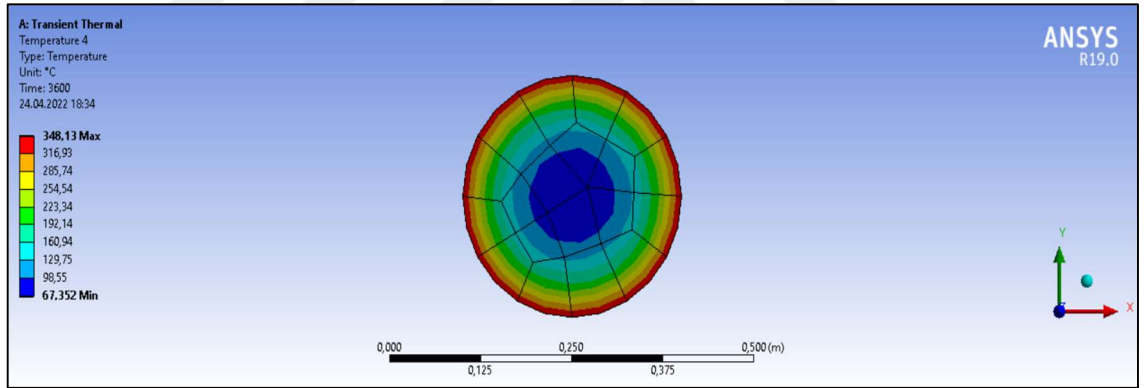


Şekil 5.111. D_300_24_1,6_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Şekil 5.112’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 200 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.



Şekil 5.112. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_200_24_2,4)

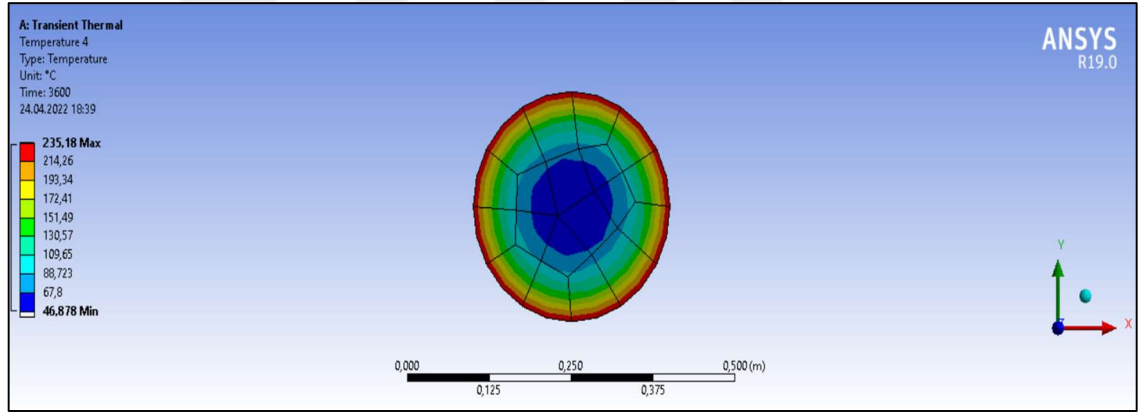


Şekil 5.113. D_300_24_0,8_smouldering betonunun en kesit sıcaklık dağılımı

Şekil 5.114’de gösterilen beton en kesit kalınlığının 250 mm çelik en kesit kalınlığının 24 mm, pasif yangın koruyucu boya en kesit kalınlığının 2,4 mm, kesit şeklinin dairesel olduğu bir kolonda farklı yangın etkilerinde elde edilen beton en kesitindeki sıcaklık dağılımı farklı yangın eğrileri için gösterilmiştir.



Şekil 5.114. Farklı yangın eğrilerinin beton en kesit sıcaklığına etkisi (D_250_24_2,4)



Şekil 5.115. D_300_24_2,4_fast en kesit büyüklüğündeki betonun sıcaklık dağılımı

Genel olarak beton en kesit kalınlığı, çelik en kesit kalınlığı, pasif yangın koruma boya en kesit kalınlığı ve en kesit şekilleri ile bir değerlendirme yapılacak olursa pasif yangın koruma boyasında 0,8 milimetrelik bir artış ile maksimum sıcaklıklar göz önüne alınarak yangın performansına 50-100 bir katkı sağlandığı, çelik en kesitindeki 8 milimetrelik bir artış ile maksimum sıcaklıklar göz önüne alınarak yangın performansına 40-60°C bir katkı sağladığı, beton en kesitinde 50 milimetrelik bir artış ile maksimum sıcaklıklar göz önüne alınarak yangın performansına 10-30°C bir katkı sağladığı ve bunun yanı sıra beton çekirdeğindeki maksimum sıcaklığı da 20-30°C düşürdüğü, kolon en kesitinin dikdörtgen yerine kare olarak kullanılması maksimum sıcaklıklar göz önüne

alınarak yangın performansına 10-20°C, kare kesitin dairesel olarak kullanılması maksimum sıcaklıklar göz önüne alınarak yangın performansına 20-40°C etki ettiği, ayrıca dairesel kesit yerine kare ve dikdörtgen kesitlerin kullanılması beton çekirdek sıcaklığında 10-20°C katkı sağladığı analiz sonuçlarınca anlaşılmıştır. O halde beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda kare veya dikdörtgen kesit yerine dairesel kesit kullanmak, beton en kesitlerinin arttırılması yerine çelik en kesitlerinin arttırılması, çelik en kesitlerinin arttırılması yerine pasif yangın koruyucu boyanın en kesitlerinin arttırılması yangın performansı açısından daha avantajlıdır.



6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, beton ile doldurulmuş çelik kolonların; çelik kolonların en kesit şekli, enine kesit boyutları (beton kalınlığı), çelik en kesit boyutu (kalınlığı) ve pasif yangın koruma malzemesi olarak kullanılan intumesan boyanın kalınlığı gibi önemli parametreler ele alınarak Avrupa Standartlarında belirtilen Standard (ISO 834) ve Smouldering yangın etkileriyle birlikte hızlı (fast) ve yavaş (slow) yangın etkileri altında yangın performansı numerik modeller geliştirilerek incelenmiştir. Yapılan tüm analizler ANSYS programı Transient Thermal modülü yardımıyla yapılmıştır ve beton en kesitinde (çekirdek bölgesinden çelik bölgesine kadar olan bölgede) sıcaklık sonuçları ve sıcaklık gradyanı (dağılımı) elde edilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar 5 grup olarak verilmiştir. Bunlar;

- 1- 0,8 mm, 1,6 mm ve 2,4 mm olmak üzere 3 farklı pasif yangın koruyucu kalınlığı kullanılmıştır.
- 2- Çelik kalınlığı olarak, 8 mm, 16 mm ve 24 mm olmak üzere 3 farklı kalınlık değerlendirmeye alınmıştır.
- 3- Beton en kesiti olarak, 200 mm, 250 mm ve 300 mm olarak 3 farklı kalınlık düşünülmüştür.
- 4- Kolon en kesit şekli olarak en yaygın kullanılan dairesel kesit olmakla birlikte, kare ve dikdörtgen kesitler de modellemede dikkate alınmıştır.
- 5- Farklı yangın eğrilerinin kolonun yangın performansını ne ölçüde etkileyeceğini görmek için 4 farklı yangın etkisinde modellemeler yapılmıştır. Bu yangın senaryoları olarak; Standard (ISO 834), Smouldering, Hızlı ve Yavaş yangınlar geliştirilen modellere etki ettirilmiştir.

Belirtilen tüm parametrelere göre geliştirilen ANSYS modellerinden elde edilen sonuçlara göre;

- Geliştirilen 144 farklı model için optimum meşî saptayabilmek için meşî çalışmaları ve analizleri yapılmıştır. Model analizlerinde meşî boyutları 0,01-0,02 metre büyüklüğünde kullanılmıştır. 100.000-300.000 node sayısı

aralığında ve 10.000-50.000 eleman sayısı aralığında nodelar ve elemanlar kullanılmıştır.

- Meş kalitesini belirlemek için skewness, aspect ratio ve eleman kalitesi (element quality) değerleri incelenmiştir. Üç ayrı değerlendirme kriteri için de iyi sonuçlar ortaya çıkması hedeflenmiştir. Skewness değer aralığı 0,01-0,6 aralığında, aspect ratio değeri 1-10 aralığında ve eleman kalitesi değeri 0,5-1 aralığında kullanılmıştır.
- Meş en kesit tipi olarak multi-zone, hexa/prizma kullanılmıştır.
- Pasif yangın koruyucu (intumesan boya) kalınlığının kolonun yangın performansına etkisi incelendiğinde; 200 mm beton en kesit kalınlığına ve 8 mm çelik kalınlığına 2,4 mm kalınlığına sahip kolonlarda 1 saatlik ISO 834 Standard yangın etkisi sonucunda beton bölgesindeki maksimum sıcaklık 334°C olurken, 1,6 mm boya kalınlığı uygulanan kolonlarda 388°C ve 0,8 mm boya kalınlığında 482°C civarı bulunmuştur. Benzer sıcaklık farkları 250 mm ve 300 mm beton kalınlığına ve 16 mm ve 24 mm çelik kalınlığına sahip kolon modelleri için de bulunmuştur.
- Çelik kalınlığının beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansına etkisi incelendiğinde; 200 mm beton en kesit kalınlığına ve 0,8 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip kolonlarda yapılan 1 saatlik Standard yangın etkisi sonucunda 24 mm çelik kalınlığına sahip kolonlarda 1 saatlik yangın etkisi sonucunda beton bölgesinde elde edilen maksimum sıcaklık 390,5°C olurken 16 mm çelik kalınlıklı numunelerde bu sıcaklık 428°C ve 8 mm çelik kalınlığına sahip kolonlarda 482°C bulunmuştur. Benzer sıcaklık farkları (40-50°C) farklar 250 mm ve 300 mm beton en kesit kalınlığına ve 1,6 mm ve 2,4 mm boya kalınlığına sahip kolon numuneleri için de elde edilmiştir.
- Beton en kesit kalınlığının kolonun yangın performansına etkisi incelendiğinde; 8 mm çelik en kesitine ve 0,8 mm pasif yangın koruma boya kalınlığı olan kolonlarda 1 saatlik Standard yangın etkisi sonucunda 200 mm beton en kesit kalınlığına sahip kolonlarda beton bölgesinde elde edilen en yüksek sıcaklık 482°C olurken 250 mm beton en kesiti olan kolonlarda bu değer 455°C ve 300 mm kalınlığında beton kolonlarda da 468°C bulunmuştur. Bu sonuç her ne kadar beton kalınlığı artsa da (250 mm'den 300 mm'ye) maksimum sıcaklığın arttığı gibi düşünülse de çelik kalınlığı 16 mm ve özellikle de 24 mm olduğu zaman elde edilen maksimum sıcaklıklar beton kalınlığıyla ters orantılı olarak

değişmektedir. Ayrıca, boya kalınlığı da diğer bir etkileyen parametre olduğu için, 1,6 mm ve üzerindeki boya kalınlığı kullanılması direk olarak beton en kesit kalınlığı parametresinin sonuçlarını ciddi oranda etkilemiştir.

- En kesit şeklinin modellenen kolonların yangın performanslarına etkileri incelendiğinde, 8 mm çelik en kesitine, 200 mm beton kalınlığına ve 0,8 mm boya kalınlığına sahip kolonlarda, dikdörtgen kesitli kolonlarda elde edilen maksimum sıcaklık 534°C olurken, kare kesitli de 492°C ve dairesel kesitli de 482°C olmuştur. Benzer farklar çelik en kesiti, beton kalınlığı ve boya kalınlığı değiştiği zamanda elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlara göre, dairesel kesitin kare ve dikdörtgen kesitlere göre beton ile doldurulmuş çelik kolonlarda daha iyi bir yangın performansı sergilediği sonucuna varılmıştır. Kare kesitin de dikdörtgen kesite göre yangın performansı açısından az da olsa avantajlı olduğu sonucuna da varılmıştır. Isı transferinin uniform olarak kararlı bir halde dairesel kesitlerde olduğu durumu göz ardı edilmemelidir. Ayrıca, sivri uçlarda ve kesitlerde (kare ve dikdörtgen gibi) termal gerilmelerin ve sıcaklık yığılmalarının olacağı durumu da bir kez daha gösterilmiştir ve sonucuna varılmıştır.
- Farklı yangın eğrilerinin (ISO 834, Smouldering, Hızlı ve Yavaş) beton doldurulmuş çelik kolonların yangın performansına etkisi incelendiğinde; yangın doğalarının tamamen birbirlerinden farklı olmasından ötürü kolonlarda beton bölgelerinde elde edilen sıcaklıklar özellikle çelik kalınlığı ve boya kalınlığı arttığında belirtilen yangın senaryoları için yakın sonuçlar elde edilirken, düşük çelik ve boya kalınlıklarında biraz farklı sıcaklık sonuçları özellikle de son sıcaklık olarak elde edilmiştir.

Tüm bu sonuçlara göre genel bir değerlendirme yapılırsa; pasif yangın koruma boya kalınlığında 0,8 mm'lik bir artış maksimum sıcaklıklarda 50-100°C'lik bir fark yaratırken çelik en kesitindeki 8 mm'lik artış 40-60°C gibi iyi yönde bir katkı sağlamıştır. Beton en kesitindeki 50 mm'lik artış kolonların yangın performansına 10-30°C'lik bir katkı sağladığı ve beton çekirdeğindeki maksimum sıcaklıkları da 20-30°C düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Ayrıca, kare ve dikdörtgen yerine dairesel kesitin kullanılması yangın performansını artırdığı saptanmıştır.

Ayrıca, bu tez çalışması sonucunda, beton en kesitlerinin artırılması yerine çelik en kesitlerinin artırılması; çelik en kesitlerinin artırılması yerine de uygulanacak olan pasif yangın koruyucu boya kalınlıklarının artırılması beton ile doldurulmuş çelik kolonların yangın performansı açısından daha avantajlı olacağı sonucuna varılmıştır. Yani, değerlendirmeye alınan parametrelerin önem sırası, intumesan boya kalınlığı, çelik en kesit kalınlığı, beton en kesit kalınlığı ve kolon kesit şeklidir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların ve değerlendirmeye alınan parametrelerin gerçek ölçekli kolon yangın testleri yapılması ve sonuçların numerik sonuçlarla karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, yine bu tez çalışmasında değerlendirmeye alınmayan, çift katmanlı çelik kullanımı, beton içerisinde aderansı artırmak için kullanılabilecek bağ elemanlarının numerik modeller içerisine dahil edilmesi bu tür kolonların yangın performansını hangi ölçüde ne kadar etkileyeceğinin belirlenmesi ve irdelenmesi önerilmektedir. Bunlara ilaveten, yangın etkisiyle beraber yükleme analizlerinin deneysel ve numerik olarak yapılması bu tez kapsamında önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonymous, 2010. Web Sitesi: <https://www.arup.com/>, Erişim Tarihi: 15.02.2021.
- Anonymous, 2022. Web Sitesi: <https://www.highestbridges.com/>, Erişim Tarihi: 16.02.2021.
- Asce, ASOCE 1992. Structural Fire Protection.
- Aydın, Ç. 2008. Beton dolgulu çelik kutu kolonlar ve dolu gövdeli çelik (I) kirişlerden oluşan çerçevelerin yapı davranış katsayısının (R) irdelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.
- Aymaz, O. 2016. Çok katlı çelik yapıların deprem performansının belirlenmesi ve beton dolgulu kutu kesitli kolonların deprem performansına etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Anabilim Dalı, İstanbul.
- Bailey, C. G., Burgess, I. W. and Plank, R. J. 1996. Analyses of the effects of cooling and fire spread on steel-framed buildings. *Fire Safety Journal*, 26(4), 273-293.
- Cen 2005a. EN 1993-1-1: Eurocode 3. Design of Steel Structures. *Part 1-1: General rules and rules for buildings*. BSI: London.
- Cen 2005b. EN 1993-1-2: Eurocode 3. Design of Steel Structures. *Part 1.2: General Rules - Structural fire design*. BSI: London.
- Cen 2005c. EN 1994-1-2:2005, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. *Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design*. BSI: London.
- Cen 2013. EN 13381-8:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. *Part 8: Applied reactive protection to steel members*. BSI: London.
- Cirpici, B. K., Orhan, S. N. and Kotan, T. 2019. Numerical modelling of heat transfer through protected composite structural members. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 5(3), 96-107.
- Cirpici, B. K., Orhan, S. N. and Kotan, T. 2020. Finite element study on composite slab-beam systems under various fire exposures. *Steel and Composite Structures*, 37(5), 589-603.
- Espinos, A., Romero, M. L. and Hospitaler, A. 2010. Advanced model for predicting the fire response of concrete filled tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 66(8), 1030-1046.
- Espinós, A., Romero, M. L., Mercé, E. S. and Hospitaler, May 2015. A. Fire performance of innovative slender concrete filled steel tubular columns. 15th International Symposium on Tubular Structures, Rio de Janeiro, Brazil.

- Foster, N. 1996. Commerzbank Headquarters, Frankfurt. *Journal of the College of Architecture, Planning and Design Kansas State University*, (18), 41-47.
- Hajjar, J. F. 2000. Concrete-filled steel tube columns under earthquake loads. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(1), 72-81.
- Ho, P. H. K. and Sar, H. K. Economics Planning of Super Tall Buildings in Asia Pacific Cities. *Fédération Internationale des Géomètres*, 2007 Seoul, Republic of Korea. International Federation of Surveyors.
- Iso, IOFS 2014. ISO 834-11:2014 Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements.
- Khaliq, W. and Kodur, V. 2018. Effectiveness of polypropylene and steel fibers in enhancing fire resistance of high-strength concrete columns. *Journal of Structural Engineering*, 144(3), 04017224.
- Krishan, A. L., Troshkina, E. A. and Astafyeva, M. A. 2017. Strength of Short Concrete Filled Steel Tube Columns with Spiral Reinforcement. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering (Online)*, 262(1), 7.
- Lyu, X., Shu, G. P., Liew, J. Y. R. and Du, E.-F. 2017. Fire resistance of steel tubular columns infilled with ultra-high strength concrete. *Advanced Steel Construction*, 14(3), 23.
- Morino, S., Kswaguchi, J. and Cao, Z.-S. Creep Behavior of Concrete-Filled Steel Tubular Members. 1997.
- Raut, N. and Kodur, V. 2012. Behavior of circular reinforced concrete columns under fire conditions. *Journal of Structural Fire Engineering*, 3(1), 37-56.
- Real, P. M. M. V. and Franssen, J.-M. 2000. Lateral Torsional Buckling of Steel I-Beams in Case of Fire@ Numerical Modelling, (64), 1302-1309.
- Rizalman, A. N., Md Tahir, N. S. Y. M. and Mohammad, S. 2018. Parametric Study of Fire Performance of Concrete Filled Hollow Steel Section Columns with Circular and Square Cross-Section. *E3S Web Conference*, (34), 01011.
- Seçer, M. ve Kural, M. E. 2010. İçerisi beton ile doldurulmuş çelik kutu kesitli kolonların gerilme-şekil değiştirme-zaman ilişkilerinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16(1), 11-19.
- Shah, A. H. and Sharma, U. K. 2017. Fire resistance and spalling performance of confined concrete columns. *Construction and Building Materials*, (156), 161-174.
- Shanmugam, N. E. and Lakshmi, B. 2001. State of the art report on steel-concrete composite columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(10), 1041-1080.
- Shekastehband, B., Taromi, A. and Abedi, K. 2017. Fire performance of stiffened concrete filled double skin steel tubular columns. *Fire Safety Journal*, (88), 13-25.

- Song, Q.-Y., Han, L.-H., Yuan, F. and Zhou, K. 2020. Temperature rise distribution of circular concrete-filled steel tubular cross-sections with intumescent coating. *Journal of Constructional Steel Research*, (168), 105869.
- Sulthana, U. M. and Jayachandran, S. A. 2017. Axial compression behaviour of long concrete filled double skinned steel tubular columns. *Structures*, (9), 157-164.
- Susantha, K. a. S., Ge, H. and Usami, T. 2001. Uniaxial stress–strain relationship of concrete confined by various shaped steel tubes. *Engineering Structures*, 23(10), 1331-1347.
- Turner, M. J., Clough, R. W., Martin, H. C. and Topp, L. J. 1956. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 23(9), 805-823.
- Uy, B. 1998. Concrete-filled fabricated steel box columns for multistorey buildings: behaviour and design. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 1(2), 150-158.
- Uy, B. and Bradford, M. A. 1996. Elastic local buckling of steel plates in composite steel-concrete members. *Engineering Structures*, 18(3), 193-200.
- Wang, J. H., He, J. and Xiao, Y. 2019. Fire behavior and performance of concrete-filled steel tubular columns: Review and discussion. *Journal of Constructional Steel Research*, (157), 19-31.
- Wang, L. L., Wang, Y. C., Yuan, J. F. and Li, G. Q. 2013. Thermal conductivity of intumescent coating char after accelerated aging. 37(6), 440-456.
- Wang, Y. C. 2002. *Steel and Composite Structures - Behaviour and Design for Fire Safety*, Spon Press, London.
- Xiang, K., Wang, G. and Pan, Y. Thermal Properties and Heat Transfer in Concrete Filled Steel Tube Reinforced Concrete Columns Exposed to Fire. 2014 7th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 25-26 October 2014. 869-874.
- Yorgun, C. 2005. Çelik sac-beton kompozit döşeme sistemlerinin uygulamalarına yönelik değerlendirmeler. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, (435), 60-64.
- Zhang, N., Zheng, C. and Sun, Q. 2021. Creep behavior of reinforced concrete-filled steel tubular columns under axial compression. *Plos One*, 16(9), e0255603.
- Zhang, Y., Wang, Y. C., Bailey, C. G. and Taylor, A. P. 2012. Global modelling of fire protection performance of an intumescent coating under different furnace fire conditions. *Journal of Fire Sciences*, 31(1), 51-72.
- Zhou, K. and Han, L.-H. 2018. Experimental performance of concrete-encased CFST columns subjected to full-range fire including heating and cooling. *Engineering Structures*, (165), 331-348.