



**MODÜLER DUVAR PANELLERİNİN YANGIN
PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE
İNCELENMESİ**

Nurdan Ceren ERSOY

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI**

**2025
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MODÜLER DUVAR PANELLERİNİN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERLE İNCELENMESİ**

Nurdan Ceren ERSOY

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ ONAY FORMU

**MODÜLER DUVAR PANELLERİNİN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ
PARAMETRELERLE İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI danışmanlığında, Nurdan Ceren ERSOY tarafından hazırlanan bu çalışma 24 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Merve MAALI	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

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.

24 / 01 / 2025

İmzası

Nurdan Ceren ERSOY

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MODÜLER DUVAR PANELLERİNİN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE İNCELENMESİ

Nurdan Ceren ERSOY

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

2023 yılında ülkemizde meydana gelen 7,6 ve 7,7 büyüklüğündeki Kahramanmaraş depremleri sonucunda çoğu insan hayatını kaybetmiş, birçoğu da evsiz kalmıştır. Bu talihsiz olay, Türkiye'nin deprem kuşağında yer aldığını ve hatalı uygulanan her yapı tekniğinin insanlar üzerinde çok ciddi olumsuz etkileri olabileceğini gözler önüne sermiştir. Bundan yıllar önce yaşanan depremler de bunu kanıtlar niteliktedir. Aynı şekilde Covid-19 virüsü çıktığı yıllarda hastanelerin yetersiz olduğu görülmüş, kısa sürede ve dayanıklı sağlık merkezlerinin kurulması amaçlanarak yapımı sadece günler süren modüler hastaneler yapılmıştır. Modüler yapıların hayatımıza getirdiği birçok kolaylık vardır. İnsanların konforlu yaşamı için doğru ve uygun teknikler araştırılmalıdır. Özellikle böyle zamanlarda dayanıklılığı, ucuzluğu, seri üretimi ve hızlı kurulumu ile modüler hafif çelik yapı sistemleri akıllara gelmektedir. Bu çalışmada, modüler duvar panellerinin yangın etkisinde performanslarını etkileyecek olan potansiyel parametreler çelik elemanın kesit şekli (kare (SHS), CC), çelik eleman et kalınlıkları, modüler elemanın içindeki yangına karşı dayanıklı malzeme türü, modüler elemanın dış kısımlarındaki yangına karşı dayanıklı kaplamaların türleri ve kalınlıkları değişkenler olarak belirlenmiştir. Belirlenen bu parametreler farklı (Standart, Hızlı (FAST), Yavaş (SLOW), Smouldering) yangın etkilerinde modüler çelik yapı elemanının performansını hangi ölçülerde ne kadar etkilediği belirlenmiştir. Analizler yapılırken Eurocode'dan bazı termal özellikler alınarak ve ANSYS programı kullanılarak optimum numerik modeller geliştirilmiştir.

2025, 116 sayfa

Anahtar Kelimeler: Modüler yapılar, Modül, Modüler Duvar Sistemleri, Soğukta şekillendirilmiş çelik, Yangın performansı, Yangın koruması

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF FIRE PERFORMANCE OF MODULAR WALL PANELS WITH VARIOUS PARAMETERS

Nurdan Ceren Ersoy

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

The 7.6 and 7.7 magnitude earthquakes that occurred in Kahramanmaraş, Turkey, in 2023 resulted in significant loss of life and left many people homeless. This unfortunate event highlighted Turkey's position within a seismic zone and underscored the severe negative impacts that can result from improper construction techniques. Earthquakes that occurred in previous years have also proven this point. Similarly, during the initial outbreak of the Covid-19 virus, the inadequacy of hospital facilities became evident, leading to the construction of modular hospitals in just a few days, aimed at quickly establishing durable healthcare centers. Modular structures bring numerous conveniences to our lives. It is essential to explore proper and appropriate techniques to ensure comfortable living for people. Particularly during such challenging times, modular light steel structural systems come to mind due to their durability, cost-effectiveness, mass production capabilities, and rapid installation. In this study, potential parameters that could affect the performance of modular wall panels under fire conditions were identified. These parameters include the cross-sectional shape of the steel element (square hollow section (SHS) or C type section (CC)), steel element thickness, the type of fire-resistant material within the modular element, and the types and thicknesses of fire-resistant coatings on the exterior parts of the modular element. The impact of these parameters on the performance of modular steel structural elements was assessed under different fire conditions (Standard, Fast, Slow, and Smouldering). During the analysis, thermal properties from Eurocode standards were utilized, and optimum numerical models were developed using the ANSYS software.

2025, 116 pages

Keywords: Modular buildings, Module, Modular wall panels, Cold-formed steel, Fire performance, Fire protection

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Tez çalışması boyunca her türlü desteğini ve bilgisini esirgemeyen, sunduğu fırsatlarla geleceğime ışıkla bakmamı sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI 'ya teşekkürlerimi sunarım.

Manevi destekleriyle destek veren kardeşlerim Nursu Canan ERSOY ve Nurcan Cansu ERSOY'a, babam Abdullah ERSOY'a, Erkardem Metal A.Ş. Başkanı Nevzat Kırmacı'ya teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte devam etmemi sağlayan ve desteklerini esirgemeyen arkadaşlarım Muhammed KÖÇ, Zehra Nur YAVUZ ve Yunus YAVUZ'a teşekkür ederim.

Son olarak benim için her zaman iyisini isteyen ve bugünlere gelmemi sağlayan teyzem Emine KALKAN'a, dedem İsmet KALKAN'a, rahmetli anneannem Muhabbet KALKAN'a ve biricik annem Hacer ERSOY'a teşekkür ederim.

Nurdan Ceren ERSOY
Ocak 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Yangın ve Yangının Oluşumu.....	4
1.1.1. Yangının gelişim evreleri.....	5
1.1.2. Standart yangın.....	7
1.1.3. Yangından korunma yöntemleri.....	8
1.2. Amaç ve Kapsam	9
1.3. Tezin Yapısı	10
2. KAYNAK ÖZETLERİ	11
3. HAFİF ÇELİK ve MODÜLER YAPILAR	17
3.1. Hafif Çelik.....	17
3.2. Modüler Yapılar	17
3.2.1. Modüler yapı türleri ve modüler duvar elemanları	18
3.2.2. Modüler yapıların avantajları ve dezavantajları.....	18
4. MATERYAL ve YÖNTEM	20
4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi	20
4.2. ANSYS Yazılımı.....	22
4.2.1. ANSYS Workbench	24
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	25
5.1. Validasyon Model Çalışması	25
5.1.1. Validasyon modeli – 1	25
5.1.2. Validasyon modeli – 2	29
5.2. Model Özellikleri	32
5.2.1. Kutu (SHS) profillerden oluşturulan modeller.....	33

5.2.2. C Profillerden (CC) oluşturulan modeller.....	35
5.3. Modellerde Kullanılan Malzemelerin Termal Özellikleri.....	38
5.3.1. Çelik	38
5.3.2. Alçı levha (Plasterboard).....	39
5.3.3. Kontrplak levha (Plywood)	41
5.3.4. Fibercement.....	42
5.3.5. Taşyünü (Rockwool).....	43
5.3.6. Mineral yünü (Mineralwool).....	44
5.4. Modele Uygulanan Termal Özellikler	45
5.5. Yangın Eğrileri.....	46
5.5.1. Standart (ISO 834) sıcaklık-zaman eğrisi ((ISO) 2014)	47
5.5.2. FAST (Hızlı) yangın eğrisi	47
5.5.3. SLOW (Yavaş) yangın eğrisi	47
5.5.4. Smouldering sıcaklık-zaman eğrisi (CEN 2013)	47
5.6. Modellerde Sıcaklık Ölçümü ve İsimlendirme	49
5.7. Mesh Özellikleri.....	50
5.8. Farklı Yalıtım Malzemelerinin Yangın Performansına Etkisi	53
5.9. Çelik Elemanların Et kalınlığının Yangın Performansına Etkisi	57
5.9.1. SHS (Kutu) elemanların et kalınlığının yangın performansına etkisi.....	57
5.9.2. CC çelik profil elemanlarının et kalınlığının yangın performansına etkisi.....	63
5.10. Çelik Elemanın Enkesitinin Yangın Performansına Etkisi	70
5.11. Yalıtım Kaplama Malzemesinin Yangın Performansına Etkisi	80
5.12. Yalıtım Kaplamasının Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi	89
5.13. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi.....	100
6. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	110
KAYNAKLAR	114

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
(A_m/V)	Kesit faktörü (1/m)
A_m	Birim uzunluktaki bir elemanın yüzey alanı (m ² /m)
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)
$\dot{h}_{net}$	Birim alana düşen net ısı akısının tasarım değeri (W/m ²)
M_c	Plastik momentteki eğilme
M_f	Yangına maruz kirişteki maksimum eğilme momenti
T_{fi}	Yangın sıcaklığı (°C)
T_s	Çelik sıcaklığı (°C)
$k_{y,T}$	Çelik kirişin yüksek sıcaklıktaki etkin akma mukavemetindeki azalma faktörüdür
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)

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Coalbrookdale Köprüsü	2
Şekil 1.2. Yangın üçgeni (Tama, 2012)	5
Şekil 1.3. Yangının gelişim evreleri	6
Şekil 1.4. Standart yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014), ISO 834-11:2014)	8
Şekil 4.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sistem ve meshleme işlemi (Anonim)	22
Şekil 4.2. ANSYS yalıtım malzemesi sıcaklık analizi (Cirpici et al., 2020)	23
Şekil 4.3. ANSYS çelik sıcaklık analizi (Cirpici et al, 2020).....	23
Şekil 4.4. ANSYS Workbench programında sıcaklık analizi (Cirpici et al, 2020)	24
Şekil 5.1. Birinci validasyon modelinin ANSYS (2019)'den görüntüsü.....	26
Şekil 5.2. Birinci validasyon modelinin ANSYS' den en kesiti	27
Şekil 5.3. Birinci validasyon modelinde kullanılan mesh görüntüsü.....	27
Şekil 5.4. Birinci validasyon modelinde sıcaklık dağılımı	28
Şekil 5.5. 1.Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması.....	28
Şekil 5.6. İkinci validasyon modelinin ANSYS (2019)'den görüntüsü	30
Şekil 5.7. İkinci validasyon modelinin ANSYS'den en kesiti.....	30
Şekil 5.8. İkinci validasyon modelinde kullanılan mesh görüntüsü	31
Şekil 5.9. İkinci validasyon modelinde sıcaklık dağılımı	31
Şekil 5.10. İkinci validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması.....	32
Şekil 5.11. SHS50×5 mm kutu profillerden oluşan duvar modelleri.....	34
Şekil 5.12. SHS50×5 mm kutu profillerden oluşan duvar modelleri.....	34
Şekil 5.13. CC100×45×19×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri.....	35
Şekil 5.14. CC400×90×24×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri.....	36
Şekil 5.15. CC140×75×19×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri.....	37
Şekil 5.16. CC140×70×16×1,5 mm C profillerden oluşan duvar modelleri.....	37
Şekil 5.17. Çeliğin sıcaklık- özgül ısı grafiği (En, 1993)	38
Şekil 5.18. Çeliğin Sıcaklık- Isıl İletkenlik Grafiği (En, 1993)	39
Şekil 5.19. Alçıpanın Sıcaklık-Yoğunluk İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013).....	40
Şekil 5.20. Alçıpanın Sıcaklık- Özgül Isı İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013).....	40

Şekil 5.21. Alçıpanın Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013) .	41
Şekil 5.22. Kontrplak levhanın sıcaklık- ısı iletkenlik ilişkisi (Perera et al., 2022)	42
Şekil 5.23. Fibercement Levhanın Sıcaklık- Özgöl Isı İlişkisi (Gnanachelvam et al., 2022).....	43
Şekil 5.24. Fibercement Levhanın Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Gnanachelvam et al., 2022).....	43
Şekil 5.25. Taşyününün sıcaklık- ısı iletkenlik ilişkisi (Perera et al., 2022)	44
Şekil 5.26. Mineral Yünün Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Yu et al., 2021)	45
Şekil 5.27. Sonlu elemanlar modelindeki etkileşimler ve sınır koşulları (Perera, Upasiri, Poologanathan, O’Grady, et al., 2022).....	46
Şekil 5.28. C Profilden oluşan validasyon modelinin ANSYS’den en kesit görüntüsü ve sınır koşulları(Perera et al., 2022).	46
Şekil 5.29. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması	48
Şekil 5.30. SHS elemanlarla oluşturulan model üzerinde okunan sıcaklık değerlerinin noktalarının belirtilmesi.	49
Şekil 5.31. C elemanlarla oluşturulan model üzerinde okunan sıcaklık değerlerinin noktalarının belirtilmesi.	49
Şekil 5.32. k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,05 metre büyüklüğündeki mesh görüntüsü.....	52
Şekil 5.33. k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,02 metre büyüklüğündeki mesh görüntüsü.....	52
Şekil 5.34. Mesh boyutlarına göre bilgisayarın analiz süresi ve ölçülen model sıcaklıklarının hassasiyeti.....	53
Şekil 5.35. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_20f_m, k_50_2_20f_r).	54
Şekil 5.36. k_50_2_20f_r modelinin sıcaklık dağılımı	54
Şekil 5.37. k_50_2_20f_m modelinin sıcaklık dağılımı	55
Şekil 5.38. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_12f_m, k_50_2_12f_r).	56
Şekil 5.39. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_32f_m, k_50_2_32f_r).	56
Şekil 5.40. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	57

Şekil 5.41. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	58
Şekil 5.42. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	58
Şekil 5.43. k_50_2_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 5.44. k_50_5_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı.....	59
Şekil 5.45. k_50_2_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	60
Şekil 5.46. k_50_5_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	60
Şekil 5.47. k_50_2_12pl_m ve k_50_5_12pl_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	60
Şekil 5.48. k_50_2_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 5.49. k_50_5_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	61
Şekil 5.50. k_50_2_32f_m ve k_50_5_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	62
Şekil 5.51. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	64
Şekil 5.52. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	64
Şekil 5.53. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	65
Şekil 5.54. CC_140_1,5_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı	65
Şekil 5.55. CC_140_4_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı	65
Şekil 5.56. CC140_1,5_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	66
Şekil 5.57. CC140_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	66
Şekil 5.58. CC_140_1,5_20ply_m ve CC_140_4_20ply_m modellerinin ISO834 Standart yangın eğrisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	67
Şekil 5.59. CC_140_1,5_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	67
Şekil 5.60. CC_140_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	68
Şekil 5.61. CC_140_1,5_32f_m ve CC_140_4_32f_m modellerinin FAST yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	68
Şekil 5.62. CC_100_4_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	70
Şekil 5.63. CC_100_4_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	71

Şekil 5.64. CC_140_4_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	71
Şekil 5.65. CC_100_4_12ply_m ve CC_140_4_12ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	72
Şekil 5.66. CC_100_4_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	72
Şekil 5.67. CC_140_4_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	72
Şekil 5.68. CC_100_4_20f_m ve CC_400_4_20f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	73
Şekil 5.69. CC_100_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	73
Şekil 5.70. CC_400_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	74
Şekil 5.71. CC_100_4_20ply_m ve CC_400_4_20ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	74
Şekil 5.72. CC_100_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	75
Şekil 5.73. CC_400_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	75
Şekil 5.74. CC_140_4_32f_m ve CC_400_4_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	76
Şekil 5.75. CC_140_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	76
Şekil 5.76. CC_400_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	76
Şekil 5.77. CC_140_4_32ply_m ve CC_400_4_32ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.....	77
Şekil 5.78. CC_140_4_32ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	77
Şekil 5.79. CC_400_4_32ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	78
Şekil 5.80. CC100_4_12f_m, CC_140_4_12f_m ve CC_400_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	78
Şekil 5.81. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	80
Şekil 5.82. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	81
Şekil 5.83. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	81
Şekil 5.84. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T5 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	82
Şekil 5.85. k_50_5_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	82
Şekil 5.86. k_50_5_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	82
Şekil 5.87. k_50_5_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı.....	83

Şekil 5.88. k_50_5_12pl_m, k_50_5_12_ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.	83
Şekil 5.89. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	85
Şekil 5.90. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	85
Şekil 5.91. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	86
Şekil 5.92. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T5 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.	86
Şekil 5.93. cc_100_4_20pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı	87
Şekil 5.94. cc_100_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı	87
Şekil 5.95. cc_100_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı	87
Şekil 5.96. cc140_4_12pl_m, cc140_4_12ply_m ve cc140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.	88
Şekil 5.97. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20_pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	90
Şekil 5.98. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20_pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	90
Şekil 5.99. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20_pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	91
Şekil 5.100. k_50_5_12pl_m modelinin sıcaklık dağılımı	91
Şekil 5.101. k_50_5_20pl_m modelinin sıcaklık dağılımı	91
Şekil 5.102. k_50_5_32pl_m modelinin sıcaklık dağılımı	92
Şekil 5.103. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	93
Şekil 5.104. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	93
Şekil 5.105. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.....	94
Şekil 5.106. cc100_4_12ply_m modelinin sıcaklık dağılımı.....	94
Şekil 5.107. cc100_4_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı.....	95
Şekil 5.108. cc100_4_32ply_m modelinin sıcaklık dağılımı.....	95

Şekil 5.109. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.	96
Şekil 5.110. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.	97
Şekil 5.111. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.	97
Şekil 5.112. cc140_4_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı	98
Şekil 5.113. cc140_4_20f_m modelinin sıcaklık dağılımı	98
Şekil 5.114. cc140_4_32f_m modelinin sıcaklık dağılımı	98
Şekil 5.115. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.	100
Şekil 5.116. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.	101
Şekil 5.117. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.	101
Şekil 5.118. k_50_2_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı	102
Şekil 5.119. k_50_2_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı	102
Şekil 5.120. k_50_2_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı	102
Şekil 5.121. k_50_2_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	103
Şekil 5.122. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.	103
Şekil 5.123. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.	104
Şekil 5.124. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.	104
Şekil 5.125. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	105
Şekil 5.126. cc_140_1,5_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	105

Şekil 5.127. cc_140_1,5_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	105
Şekil 5.128. cc_140_1,5_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	106
Şekil 5.129. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.	106
Şekil 5.130. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.	107
Şekil 5.131. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.	107
Şekil 5.132. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	108
Şekil 5.133. cc_400_4_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı	108
Şekil 5.134. cc_400_4_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı	108
Şekil 5.135. cc_400_4_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.	109

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1. Mesh özelliklerinin düğümler ve eleman sayılarına göre karşılaştırması..	50
Çizelge 5.2. Mesh özelliklerinin Skewness, Aspect Ratio ve Element Quality Değerlerine göre karşılaştırılması.	51
Çizelge 5.3. k_50_2_12pl_m ve k_50_5_12pl_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.	63
Çizelge 5.4. k_50_2_32f_m ve k_50_5_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.	63
Çizelge 5.5. CC_140_1,5_20ply_m ve CC_140_4_20ply_m modellerinin ISO834 Standart yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları. .	69
Çizelge 5.6. CC_140_1,5_32f_m ve CC_140_4_32f_m modellerinin Hızlı (Fast) Yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.....	70
Çizelge 5.7. k_50_5_12pl_m ve k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.	84
Çizelge 5.8. cc140_4_12pl_m, cc140_4_12ply_m ve cc140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.	89
Çizelge 5.9. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20_pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin sıcaklık değerleri.	92
Çizelge 5.10. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin sıcaklık değerleri	96
Çizelge 5.11. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin sıcaklık değerleri	99

1. GİRİŞ

Çelik, insanlık tarihinin en eski ve en işlevsel alaşımlarından biri olarak mühendislik alanında da önemli bir yer edinmiştir. Demir ve karbonun belirli oranlarda birleştirilmesiyle oluşan çelik, antik dönemlerden itibaren bilinse de, seri üretim teknolojilerinin bulunmaması nedeniyle uzun bir süre boyunca kullanım alanı sınırlı kalmıştır. Antik çağlarda çelik, genellikle silah yapımında ve küçük ölçekli araçların üretiminde kullanılmış, ancak büyük yapısal elemanlarda kullanılmamıştır. Bunun temel sebebi hem üretim süreçlerinin sınırlı olması hem de o dönemlerde çeliğin maliyetli bir malzeme olmasıdır.

18. yüzyıla gelindiğinde, Sanayi Devrimi ile çelik üretiminde köklü değişiklikler meydana gelmiş, bu durum mühendislik uygulamalarında çeliğin kullanımına olanak tanımıştır. İngiltere, bu dönemde demir ve çelik endüstrisinin öncüsü olmuştur. Dökme demirin üretimi, özellikle köprü ve diğer mühendislik yapılarının inşasında yeni bir dönemin başlangıcı olmuştur. Bu süreçte inşa edilen ve demir-çelik kullanımının ilk örneklerinden biri olan İngiltere'deki Coalbrookdale Köprüsü (The Iron Bridge) (Şekil 1.1), inşaat mühendisliğinde çelik malzemenin kullanılmasının önemini göstermiştir. Bu köprü, Abraham Darby tarafından inşa edilmiştir ve günümüzde bu yapı hala ayakta. Ancak o dönemde üretilen dökme demir, mukavemet ve dayanıklılık açısından yetersiz olduğu için geniş çaplı mühendislik uygulamalarına uygun değildir.

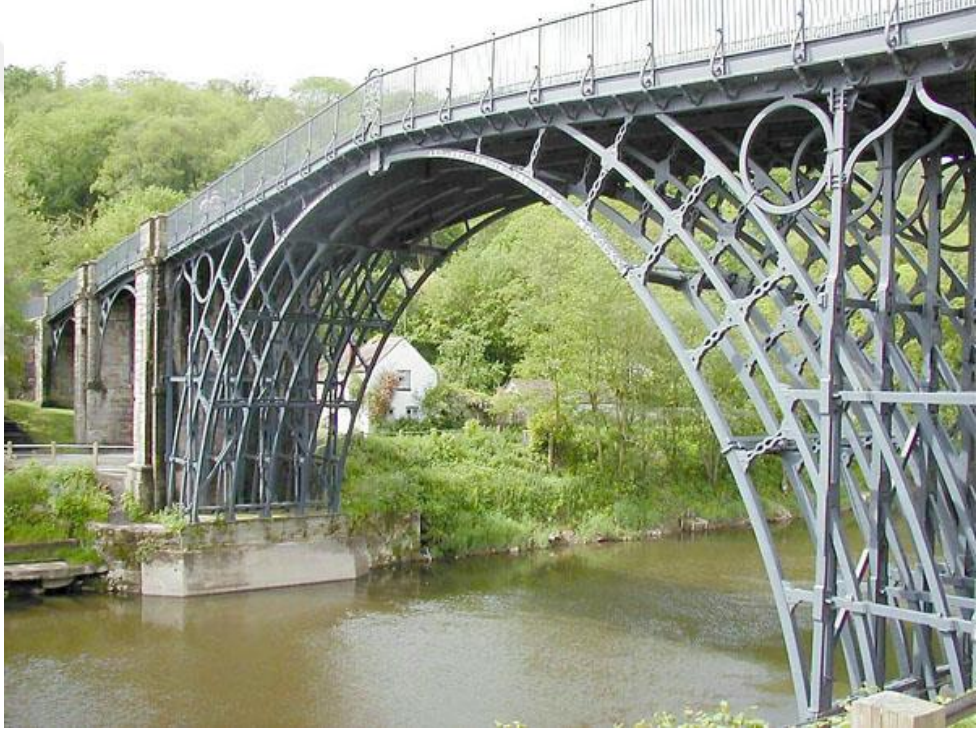
1784 yılında İngiliz mühendis Henry Cort, çelik üretiminde devrim niteliği taşıyan pudralama yöntemini geliştirmiştir. Bu yöntem ile demir cevherinin karbon içeriğini kontrol ederek daha yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahip çelik üretimini mümkün kılmıştır. Cort'un bu yeniliği, çeliği büyük ölçekli mühendislik projeleri için kullanılabilir hale getirmiştir. Bu süreç, çeliğin mühendislik uygulamalarında yaygınlaşmasını sağlamış ve özellikle köprü, bina ve diğer altyapı projelerinde vazgeçilmez bir malzeme haline gelmesine sebep olmuştur.

Çeliğin yüksek mukavemeti, esnekliği ve dayanıklılığı, inşaat mühendisliği projelerinde geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Sanayi Devrimi sonrası dönemde, çelik sadece taşıyıcı elemanlarda değil, aynı zamanda yenilikçi tasarımların

1. GİRİŞ

gerçekleştirilmesinde de kritik bir rol oynamıştır. İnşaat mühendisliğinde çelik malzeme, daha büyük açıklıklara sahip köprüler, gökdelenler ve diğer karmaşık yapısal sistemlerin inşa edilmesine olanak tanımıştır. Çelik, aynı zamanda montaj kolaylığı ve geri dönüştürülebilirliği ile sürdürülebilir mühendislik uygulamalarında da önemli bir bileşen haline gelmiştir.

Günümüzde, çeliğin üretim ve işleme teknolojilerindeki gelişmeler, inşaat mühendisliğinde daha dayanıklı, ekonomik ve estetik çözümler sunmaktadır. Köprülerden yüksek yapılara, endüstriyel tesislerden altyapı projelerine kadar geniş bir yelpazede çelik, modern mühendisliğin temel taşlarından biri olmaya devam etmektedir.



Şekil 1.1. Coalbrookdale Köprüsü

Hafif çelik, 20. yüzyılın ikinci yarısında Almanya'da geliştirilen, çelik malzemeler arasında özel bir yere sahip bir türdür. İlk olarak otomotiv ve havacılık endüstrilerindeki hafif ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalar için tasarlanan bu çelik türü, zamanla özellikleri sayesinde farklı mühendislik disiplinlerinde de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Hafif çeliğin temel üretim yöntemi olan soğuk şekillendirme, malzemeye yüksek dayanıklılık kazandırırken aynı zamanda hafif yapısını korumasını sağlar.

Hafif çelik yapı sistemleri, genellikle yük taşıyan duvar panelleri, zemin elemanları ve çerçeveleme sistemlerinden oluşur. Bu paneller, korozyona karşı dayanıklılık sağlamak amacıyla sıcak daldırma galvanizleme yöntemiyle kaplanır ve sonrasında soğuk şekillendirme işlemiyle son haline getirilir. Bu üretim yöntemi, hafif çeliğin hem yapısal dayanıklılığını artırır hem de uzun ömürlü kullanım avantajı sunar. Özellikle prefabrike yapılar, konteyner sistemleri ve modüler inşaat çözümlerinde hafif çelik yaygın olarak tercih edilmektedir.

Özellikle konteyner yapılarında popüler olan hafif çelik, esnekliği, dayanıklılığı ve çevre dostu özellikleri ile dikkat çeker. Deprem bölgelerinde hafif çelik yapılar, esnekliği sayesinde sismik yüklere karşı daha iyi performans gösterir ve güvenli bir yapı sistemi sunar. Aynı zamanda, hafif çeliğin geri dönüştürülebilir olması, sürdürülebilir inşaat çözümlerinde de önemli bir rol oynamaktadır.

Mühendislik açısından bakıldığında, hafif çelik, taşıyıcı sistemlerde yüksek mukavemet-ağırlık oranı sayesinde birçok avantaj sağlar. Geleneksel çelik sistemlere kıyasla daha düşük ağırlığa sahip olması, yapısal elemanların taşınmasını ve montajını kolaylaştırırken, aynı zamanda daha az enerji tüketimi ve daha düşük maliyetle üretim imkânı sunar. Bunun yanı sıra, hafif çelik sistemlerin modüler yapısı, farklı tasarım ve inşaat projelerine kolayca adapte edilebilmesini sağlar.

Hafif çelik yapılara yönelik araştırmalar 2. Dünya Savaşı'ndan sonra özellikle Japonya, Almanya ve İskandinav ülkelerinde artış göstermiştir. Hafif çelik uygulamasına ilişkin ilk deneyler 1950'li yılların sonunda Almanya'da yapılmış ve bu sistem Türkiye'de 17 Ağustos 1999 Adapazarı depreminden sonra yaygınlaşmaya başlamıştır.

Hafif çelikten yapılan yapıların birçok avantajı olmasına rağmen, çeliğin yapısal özelliklerinden dolayı yangın etkisine karşı güçsüzdür. Üretilen bu yapıların yangından korunarak daha güvenilir hale getirilmesi için bazı önlemlerin alınması gerekmektedir.

Bu çalışma, prefabrik yapılarda kullanılan modüler duvarların yangına karşı tasarımı ve yangın performansını analiz edip bu verilere göre en uygun yalıtım sistemini

1. GİRİŞ

elde etmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, modüler duvar sistemlerinin yangın etkisi altındaki performanslarının belirlemek amacı ile kullanılan parametreler;

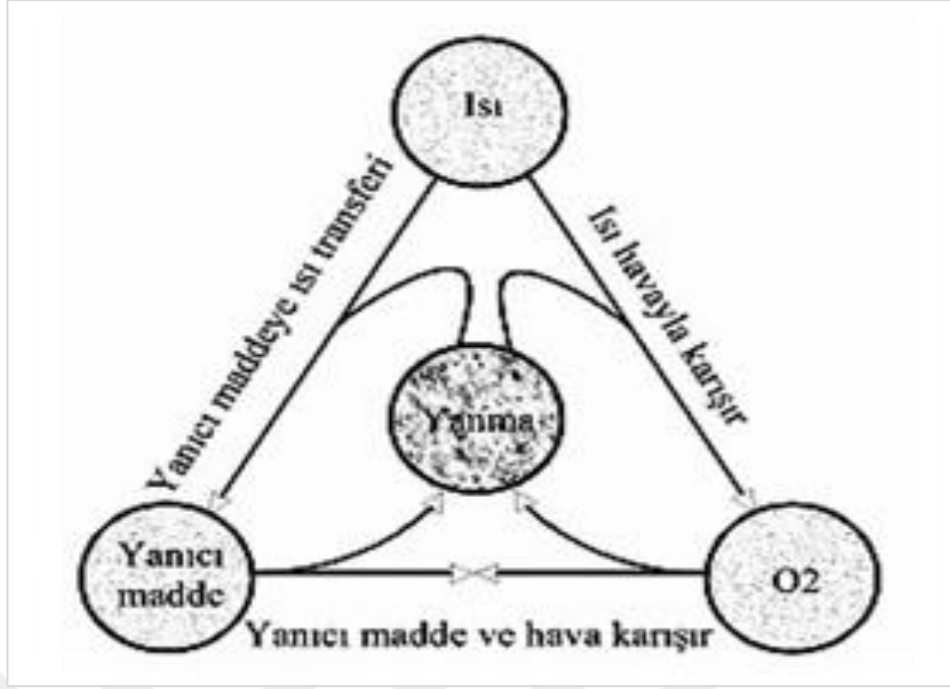
- Çelik eleman (kutu profil, C profil)
- Profil enkesitleri
- Profil kalınlıkları
- Yangın koruma türü
- Yangın koruma kalınlıkları

Belirlenen bu parametrelerle hazırlanan izolasyonlu modüler duvar sistemine Standart (ISO834), Hızlı (Fast), Yavaş (Slow) ve Smouldering yangın eğrileri ANSYS sonlu elemanlar programı ile etkilerek sistemin yangın esnasında gösterdiği davranış analiz edilmeye çalışılmıştır. Analiz sürecinde Eurocode tasarım eşitlikleri kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu analizler sonucunda farklı parametrelerde yangın etkisi incelenen modeller yardımıyla ideal bir model oluşturulması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında kutu profiller için “Kare Boşluklu Kesit” anlamına gelen SHS (Square Hollow Sections) ve C profilleri belirtirken de CC kısaltması kullanılmıştır.

1.1. Yangın ve Yangının Oluşumu

Yangın, dumanın, alevin veya her ikisinin birlikte ısı yaymasıyla karakterize edilen kontrolsüz bir yanma olayıdır. Yanma, yanıcı bir maddenin oksijenle ekzotermik (ısı veren) bir reaksiyona girerek ısı ve ışık üretmesidir. Bu reaksiyonun başlangıcı, maddenin tutuşma sıcaklığına ulaşmasıyla gerçekleşir. Tutuşma için ısı, oksijen ve yakıtın bir arada bulunması gerekir; bu üç unsurdan biri eksik olduğunda yanma durur. Bu durumu açıklamak için Şekil 1.2’deki "Yangın Üçgeni" kavramı kullanılır. (Tama, 2012)



Şekil 1.2. Yangın üçgeni (Tama, 2012)

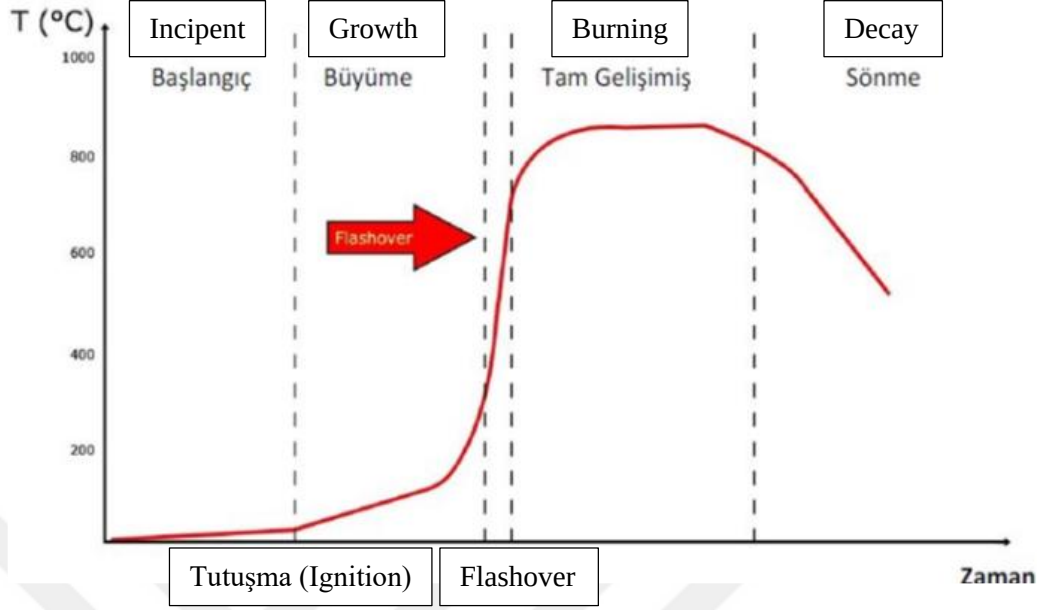
Yanıcı Madde: Yangının başlatılabilmesi için gerekli olan enerji, yanıcı maddelerden elde edilir. Bu maddeler, katı (örneğin ahşap, kâğıt), sıvı (benzin, alkol) veya gaz (doğalgaz, metan, propan) formunda olabilir. Yakıtın fiziksel ve kimyasal bileşenleri, yanma hızını, ısı yayılımını ve yangının yayılma şeklini belirler.

Isı: Yanıcı bir maddenin tutuşması için belirli bir sıcaklığa ulaşması gerekir ve bu, bir enerji kaynağı aracılığıyla sağlanır. Isı kaynakları, örneğin açık alevler, elektriksel kıvılcımlar, sürtünme etkisi veya kimyasal reaksiyonlar gibi çeşitli faktörlerden olabilir.

Oksijen: Yanma reaksiyonunun sürdürülebilmesi için atmosferde bulunan oksijen hayati bir bileşendir. Hava, yaklaşık %21 oksijen içerir ve bu genellikle yangının gelişmesi için yeterlidir. Ancak oksijen seviyesi %15'in altına düştüğünde, yanma reaksiyonu durur.

1.1.1. Yangının gelişim evreleri

Şekil 1.3, tipik bir oda yangınının gelişim aşamalarını göstermektedir.



Şekil 1.3. Yangının gelişim evreleri

Yangın başlangıç periyodu (Incipient): potansiyel yanıcı maddenin ilk olarak ısınmasıdır. (Sıcaklık artması).

Tutuşma (Ignition): Yangının ilk aşaması olarak tanımlanan tutuşma, yangının başlangıcıdır. Bu aşamada alevler henüz büyümemiştir, ancak ortamda belirgin bir duman birikimi başlamaktadır. Tutuşma aşamasında oksijen seviyesi genellikle yeterli düzeydedir; ancak, sıcaklık hala yeterli seviyeye ulaşmadığı için yanıcı maddeler tamamen yanmaya başlamamıştır. Bu evrede, ortamın sıcaklığı hızla artmaya başlar, ancak yanma sadece sınırlı bir alanda gerçekleşmektedir.

Büyüme (Growth): Yangının büyümeye başlaması, çevresel faktörlere ve yangına neden olan maddelerin özelliklerine bağlıdır. Büyük hacimlerdeki mekanlar, bol miktarda yanıcı madde ve ısının mekânda yayılması, yangının hızlı bir şekilde gelişmesine yol açar. Küçük alanlarda ise, ışıma etkisiyle ısı, mekânın duvar ve tavanlarına yansır, bu da yangının hızla yayılmasına ve gelişmesine neden olur. Bu aşama, yangının büyüklüğüne bağlı olarak ortamın sıcaklık profilinde önemli değişiklikler meydana gelir.

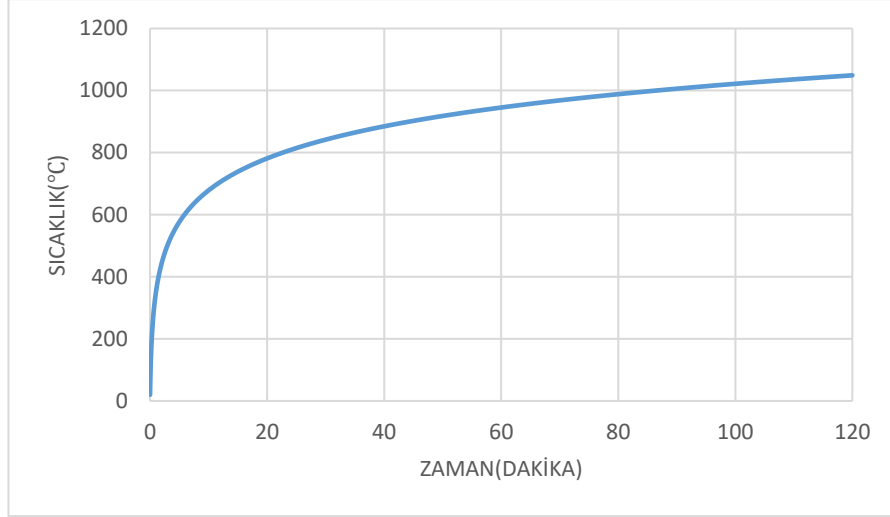
Ani Alevlenme (Parlama-Flashover): Flashover, ortamda bulunan tüm yanıcı malzemelerin ve gazların, ani ve eş zamanlı şekilde tutuştuğu kritik bir aşamadır. Yangının başlamasıyla büyüme aşaması arasındaki süre, özellikle tahliye ve kurtarma operasyonları için hayati öneme sahiptir. Flashover aşamasında, ortamda yeterli miktarda yanıcı madde ve oksijen bulunduğu için yangın hızla büyür ve tüm mekân içinde etkili bir şekilde yayılmaya başlar. Bu aşama, yangının kontrol edilemez bir seviyeye ulaşabileceği, dolayısıyla erken müdahale ve tahliye stratejilerinin kritik olduğu bir süreçtir. Eğer malzemenin en üst katmanı 600 °C'ye ulaşır, yanma hızı aniden artar ve patlama periyoduna geçer. Patlama periyodu da yanma periyodu veya tam gelişen yangın anlamına gelir. (Tucsa,2012)

Tam Büyüme/Yanma (Burning): Bu evrede, ortamda oksijen seviyesi %15'in altına düşer. Bu durumda, yangının sürdürülebilmesi için gerekli olan oksijenin seviyesi yetersizdir. Ancak, ortamda yeterli miktarda yanıcı madde ve ısı bulunduğu için yanma süreci devam eder. Oksijenin dışarıdan kontrolsüz bir şekilde girmesi, yangının patlamasına yol açabilir. Eğer malzemenin en üst katmanı 600 °C'ye ulaşır, yanma hızı aniden artar ve patlama periyoduna geçer. Patlama periyodu da yanma periyodu veya tam gelişen yangın anlamına gelir. (Tucsa,2012)

Sönme (Decay): Yangının son evresidir. Bu aşamada yanıcı maddeler tükenmeye başlar ve ortamda yalnızca çok az miktarda alev kalır. Alevlerin yerini zamanla korlaşma alır. Yangına müdahale ekiplerinin yangını kontrol altına almadan alandan ayrılmamaları durumunda, yangın sönme aşamasına geçebilir ve son bulur.

1.1.2. Standart yangın

Yangın, ortaya çıktığı ortama bağlı olarak farklı şekillerde gelişebilir. Ancak özellikle yangın hakkında yapılan çalışmalarda baz alınan bir standart yangın oluşumu vardır. ISO834 olarak adlandırılan bu yangın grafiği uluslararası düzeyde kabul görmüş bir grafikdir ve yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının yangına dayanıklılığını test etmek için referans alınır. ISO 834'te de belirtilen standart yangın eğrisi Şekil 1.4' deki gibidir:



Şekil 1.4. Standart yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014), ISO 834-11:2014)

1.1.3. Yangından korunma yöntemleri

Günümüzde çelik yapılarda yangın koruması iki şekilde yapılmaktadır.

Aktif Koruma Yöntemleri

Aktif yangın korunumu; yapının inşası sonrasında yapının kullanım ve tehlike sınıfına göre tasarlanan, sadece yangın çıktığı zaman çalışan belirli hedefe yönelmiş önlemlerdir. Aktif yangın koruyucuları;

- Algılama sistemleri, (sprinkler vb.)
- Yangın İhbar Sistemleri,
- Yangın söndürme sistemleri,
- Duman Kontrol sistemleri (Basınçlandırma ve havalandırma sistemleri) olarak karşımıza çıkmaktadırlar.

Yangın sırasında zaman kritik öneme sahiptir; çünkü koruma sistemlerinin devreye girmesi zaman alabilir ve bu süreçte yangın hızla yayılabilir. İtfaiyeciler, büyük çaplı yangınlarda yeterli su kaynağına sahip olmayabilirler; bu durumda yangını söndürmek yerine yangının başka alanlara sıçramasını engellemeye veya soğutma sürecini hızlandırmaya odaklanırlar.

Pasif Koruma Yöntemleri

Pasif koruma yöntemleri yangın esnasında değil, yangın olmadan önce malzeme için uygulanan koruma yöntemleridir. Genelde binaların yapım aşamasında uygulanan bu yöntemler yangın esnasında herhangi bir insan müdahalesi gerektirmeden malzemeyi korumayı amaçlar. Genel olarak 3 çeşittir.

- Yangına Dayanıklı (İntümesan) Boyalar: Yangın esnasında genişerek malzemenin yangın esnasında zarar görmesini engellemeyi amaçlarlar.
- Yalıtım Malzemeleri: Çelik yapı elemanının ısıdan etkilenen kısımlarına yerleştirilerek ısı iletimini yavaşlatan yangına dayanıklı malzemelerdir.
- Yangına Dayanıklı Kaplamalar: Çelik yapı elemanlarının yüzeylerinin çimento veya alçı bazlı kaplama malzemeleriyle kaplanarak yangına karşı korunmasını sağlarlar.

Bu tez kapsamında modüler elemana pasif koruma yöntemleri uygulanarak yangın esnasındaki performansları incelenecektir.

1.2. Amaç ve Kapsam

Yangına karşı yalıtımlı modüler duvar panellerinin yangın etkisinde performansını araştırmak ve incelemek amacıyla hazırlanan bu tez çalışmasında

- Yalıtım Malzemesi Çeşidi
- Çelik Profil Türü
- Çelik Profil Enkesiti
- Yalıtım Kaplaması Çeşidi ve
- Yalıtım Kaplaması Kalınlığı ve
- Farklı Yangın Eğrileri etken parametreler olarak belirlenmiş ve analizlerde kullanılmıştır.

Bu parametrelerin modüler duvar panellerinin performansını nasıl etkilediği, Avrupa standartlarında kabul edilen standart (ISO 834), hızlı (fast), yavaş (slow) ve Smouldering yangınlarının etkisi altında incelenmiştir. Bu kapsamda yapılan sonlu eleman analizlerinde amaçlanan, farklı çeşit ve enkesitlerde olan çelik profillerle hazırlanan modellere çeşitli yangın yalıtım malzemeleri kullanılarak en doğru modüler modeli ve yangına karşı en etkili koruma malzemesini ve tespit etmektir. Modüler yapıdaki çelik elemanın yüzeyine pasif yangın koruyucu malzeme uygulanarak belirtilen parametreler için farklı sıcaklıklar etki ettirilerek analizler yapılmıştır. Bu analizler sonucunda yüksek sıcaklıklarda modüler yapı çeliğinin yangın etkisi altındaki mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

1.3. 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, modüler duvar panellerinde yangın etkisi ile ilgili genel kaynak özetleri verilmiştir.
3. Bölümde, modüler duvar panelleri hakkında genel bilgi ve özellikleri detaylıca verilmiştir.
4. Bölümde modüler duvar panellerinin yangına karşı tasarım metotları, farklı parametrelerde çelik sıcaklık hesaplamaları ve tezde verilen matematiksel modelde kullanılacak olan malzemelerin her türlü özellikleri detaylıca belirtilmiştir.
5. Bölümde ortaya çıkan ideal sonlu elemanlar modeli 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

Daha önceki çalışmalarda, modüler duvar panellerinin yangın performansını belirlemeye yönelik çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Aynı zamanda bilgisayar ortamında çeşitli programlar yardımıyla modüler yapı elemanlarının modellenmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Aşağıda, çalışmamızın kapsamını da içeren literatür çalışmaları sunulmuştur.

(Chen et al., 2020) dıştan yalıtımlı duvar numuneleri üzerinde sekiz adet orta ölçekli yük taşımayan yangın testi yapmıştır. Bu numuneler üzerinde; ISO 834 standart yangını, dış (external) yangın, hidrokarbon yangını ve tipik gerçekçi tasarım yangını dahil olmak üzere 4 farklı yangın koşulu test edilmiştir. Sonuç olarak dış yangına maruz kalmanın son aşamasında, yarı kararlı bir ısı transfer durumu gözlemlenmiştir. Soğuk şekillendirilmiş çelik duvarlarının yangın direncini artırmak için dış yalıtımın boşluk yalıtımından daha makul bir konfigürasyon olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ek olarak yangında yük taşımayan duvarlar için tüm cıvata bölümünün yerel burkulmasını ve cıvata sıcak flanşının ve bitişik gövdenin yerel burkulmasını içeren iki tür cıvata burkulması tanımlanmış ve buna karşılık gelen neden ve koşullar açıklanmıştır.

(Perera, Upasiri, Poologanathan, O'Grady, et al., 2022) araştırmasında modüler inşaat endüstrisinde yangın güvenliğini ve optimum tasarım tekniklerini teşvik etmek için Sonlu Elemanlar Modellemesi (ABAQUS CAE) ve Isı Transferi metotlarını kullanarak 48 adet geleneksel hafif çelik çerçeve ve modüler yapı sistemi zemininin yapısal ve yalıtım yangına direnç seviyelerini araştırmıştır. Tek alçı panel kaplamalı zeminlerde üzerine ilave 12,5 mm kalınlıkta alçı panel kaplamanın, yapısal ve yalıtım yangına direnç seviyelerinde 30 dakikalık bir iyileşme gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca modüler zemin sistemlerinde, iki katlı hafif çelik çerçeve, geleneksel hafif çelik çerçeve zemin tasarımına göre gelişmiş yangına direnç seviyeleri sergilemiştir. Taş yünü izolasyonu ve izolasyon miktarlarının artırılması yapısal ve yangından korunma özelliklerini iyileştirmiştir. Fakat modüler yapılarda yalıtım kaplaması malzemesi daha etkili olmuştur.

(Shan & Pan, 2022) modüler çelik yapıların yangından kaynaklanan çökme davranışını sayısal olarak ABAQUS yazılımından yardım alarak incelemiştir. Altı katlı

modüler bir bina tasarlanmıştır. Yangına mazur kalan yapıların küresel deformasyonu, yük aktarım şekilleri, yapısal direnç mekanizmaları ve çökme süreçleri incelenmek için sonlu elemanlar yönteminden yararlanılmıştır. Yük oranı, kolon kesit boyutları ve yangın konumu etkilerini incelemek için parametrik analizler yapılmıştır. Bunun sonucunda, Hong Kong Yapı Yönetmeliği'ne göre tasarlanan modüler yapının tek modülün yangınına karşı dayanıklı olduğu fakat yangın ilerledikçe çöktüğü tespit edilmiştir. Ek olarak yangın senaryoları incelenerek devrilme hareketi, destek etkisi ve çift kiriş sistemi geliştirilmiştir.

(Yu et al., 2021) pratik yangına dayanıklılık performansını elde etmek için modüler çelik bir binanın kritik kolonlarının, taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan duvarlarının yangına dayanıklılığı üzerine deneysel çalışmalar yapmıştır. Yangın hasarının ilerlemesini belirlemek için duvar ve kolon alanlarındaki sıcaklık değişiklikleri ölçülüp analiz edilmiştir. Çeşitli yangından korunma önlemlerinin yangına dayanıklılık dereceleri değerlendirilmiştir. Çift katmanlı bölme duvar sistemi ve taşıyıcı duvar sistemi bütünlük hatası kriterine göre başarısız olmuştur. Duvar numunelerinin hepsinde, yangın tarafındaki alçıpanların düşmesi ve mineral yün yalıtımının ciddi miktarda aşınması sorun olarak belirlenmiştir. Aynı zamanda, tek kat alçıpan ve mineral yün izolasyonlu gruptandırılmış kolonlarda erken alçıpan bozunması ve yangına dayanıklılık derecelerinde kısılma meydana gelmiştir. Yapılan test sonuçları ve kaynak taramalarına istinaden alçıpan ve mineral yün yalıtımı için optimum termal özellikler belirlenmiş, hata modelleme yöntemleri tanımlanmıştır. Sonuç olarak modüler çelik binalardaki yapısal duvarların ve kolonların yangına dayanıklı tasarımı için yararlı yangın testi verileri sağlanıp genel olarak kullanılan yangına dayanıklı yalıtım malzemelerinin başarısızlığı çerçevesinde yapısal elemanlar için rasyonel ısıl modelleme yöntemleri önerilmiştir.

(Perera, Upasiri, Poologanathan, Perampalam, et al., 2022) çalışmasında kutu profil kolonlu yük taşıyan modüler duvarların yangın performansını önemli bir araştırma açığı olarak belirleyerek orijinal modüler duvar, hafif ahşap çerçeve duvar ve bazı hafif çelik çerçeve duvarlar için sonlu eleman modelleri geliştirilmiştir. Bu modeller ABAQUS CAE yazılımı ile analiz edilirken analiz sonuçları, tam ölçekle oluşturulan deneysel sonuçlarla çok iyi bir şekilde eşleşmiştir; böylece sonlu eleman modelleri teknikleri, malzeme kullanılabilirliği seçenekleri, maliyet azaltma ve inşaat uygulamasına dayalı

olarak seçilen değişkenlerin etkisini incelemek için çalışmada güvenle kullanılmıştır. Çalışmada incelenen modüler duvar paneli, yapısal ve yalıtımlı yangına dayanıklılık derecesini dikkate alan çeşitli tasarım yönergelerini talep etmektedir. Yük taşımayan bir civate bölümünün seçimi, yapısal veya yalıtım yangına dayanıklılık derecesi üzerindeki etkiden muaf olup, enerji verimliliği, maliyet ve üretim kolaylığı yönetilebildiği görülmüştür. SHS kolon yalıtımının kalınlığının, gerekli yapısal yangına dayanıklılık derecesi dikkate alınarak seçilebildiği ve yalıtım yangına dayanıklılık derecesine dikkat edilmesi gerekmediği sonucuna varılmıştır. Ancak, maliyet, enerji, üretim ve inşaat aşamalarındaki etkinin dikkate alınması gerekebildiği vurgulanmıştır. Son olarak, yapısal yangına dayanıklılık derecesi göz ardı edilirken yalıtım oranının, yangına dayanıklılık derecesinin gereksinimi açısından seçilmesi gerektiği belirtilmiştir.

(Perera et al., 2021) farklı konfigürasyonlara sahip modüler hafif çelik duvar panellerinin yangın davranışını sayısal analiz yoluyla araştırmıştır. Zaman-sıcaklık tepkisini karşılaştıran tam ölçekli yangın testi sonuçları kullanılarak sayısal bir ısı transferi modeli geliştirilmiş ve doğrulanmıştır. Doğrulanmış sayısal model daha sonra geleneksel ve modüler hafif çelik çerçeveli duvar panellerinin yangın davranışını analiz etmek üzere genişletilmiştir. Tek ve çift yangına dayanıklı alçı levha kaplamalı 16 modüler duvar konfigürasyonunu ve taş yünü, fiberglas ve mineral yün olmak üzere üç farklı yalıtımı içermektedir. Yapısal yangına dayanıklılık süresi, belirlenen yük değeri ve sıcak flanş kritik sıcaklık uyumuna göre belirlenmiştir. Modüler konfigürasyon ile karşılık gelen geleneksel hafif çelik duvar konfigürasyonu arasında yapısal yangına dayanıklılık süreleri bakımından kayda değer bir fark olmadığı görülmüştür. Bununla birlikte; modüler duvar panellerinin ısı yangın dayanımının, tek katlı alçıpan modellerinde %170'e, çift katlı alçıpan modellerinde ise %80'e kadar artırılabilirdiği tespit edilmiştir. Aynı zamanda taş yünü, fiberglas ve mineral yün yalıtımı seçiminin yapısal yangın direncini önemli ölçüde etkilemediği gösterilmiştir.

(Liu et al., 2017) araştırmasında yangına maruz kalan hafif çelik profil duvarların performansı üzerine deneysel ve sayısal çalışmalar sunulmuştur. 4 adet tam ölçekli hafif çelik profil duvar, ISO 834 yangın yüklemesi altında deneye tabi tutulmuştur. Dış yüzeydeki, iç yüzeydeki ve çelik profilin kesitindeki sıcaklıklar ölçülmüştür. Deney sırasında zamanla ısınan alçıpanın dökülmesi araştırılmıştır. Duvarı etkileyen önemli

faktörlerden olan, et kalınlığı, alçıpan katmanları ve yangına maruz kalmayan yüzeylerde harç kullanımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Deney sonuçlarına istinaden hafif çelik profilli duvarların yangın performansını analiz etmek için ABAQUS Programı kullanılarak sonlu eleman modellemesi oluşturulmuştur. Deney sırasında incelenen parametreler 3 boyutlu modelde de incelenmiştir. Kolon kesitinin yüksekliğinin, alçıpan katmanlarının ve çelik profil sıralarının arttıkça kesit sıcaklıklarının azaldığı görülmüştür. Yangına maruz kalan yüzeydeki yalıtım katmanının artışı, yangına maruz kalmayan yüzeyi ve duvarın genel sıcaklığını büyük ölçüde azaltacağı tespit edilmiştir. Alçıpanın zamanla dökülmesinin, açıkta kalan alanlar ve kolonlar için olumsuz bir etki oluşturduğu gözlemlenmiştir.

(Gnanachelvam et al., 2020) çeşitli duvar levhalarının termal özellikleri ve alçıpan, magnezyum sülfat levha, vermiculu× levha ve fiber çimento levha gibi farklı tipteki duvar levhalarıyla kaplanmış yük taşımayan hafif çelik çerçeveli duvar sistemlerinin yangına direncini ve biyo-bazlı yüksek faz değiştiren malzemeler kullanılarak termal kütleyle geliştirilmiş hafif çelik çerçeveli duvar sistemi üzerinde standart yangın deneylerini uygulayarak araştırmıştır. Bulgular, alçı levhanın en yüksek yangın dayanımını verdiğini, fiber çimento levhanın ise en düşük değeri verdiğini ortaya koymuştur. Daha da önemlisi, termal kütlesi iyileştirilmiş hafif çelik çerçeve duvar sisteminin, biyobazlı yüksek faz değiştiren malzemelerin kullanılması nedeniyle yangına dayanımında herhangi bir azalma görülmemiştir.

(Tao et al., 2021a) yangına maruz kalan soğuk şekillendirilmiş çelik dikme duvarların performansını araştırmak için dört adet tam ölçekli yük taşıyan standart yangın testi gerçekleştirmiştir. Deney sonuçları soğuk şekillendirilmiş çelik dikme duvarlarının yüksek sıcaklıktaki üstün mekanik özellikleri nedeniyle daha yüksek bir yangına dayanıklılık seviyesi, sıcaklık gelişiminin ise aynı duvar konfigürasyonundaki yalıtımsız C kesitli duvarlarla benzerliğinin iyi olduğu gözlemlenmiştir. Ancak boşluklu yalıtımlı duvarlarda kare/dikdörtgen kesitli kolonlar kullanıldığı zaman, içi boş kolonun sıcak ve soğuk flanşları arasındaki sıcaklık farkını azalttığından farklı bir termal davranış gözlemlenmiştir. Bu, termal eğilme deformasyonlarının neden olduğu yangın direncindeki azalmayı ortadan kaldırıp boşluk yalıtımlı C kesitli kolonlu duvarlarına göre daha iyi bir yangın performansı sağladığı gözlemlenmiştir.

(Tao et al., 2021b) hem ortam sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda kare/dikdörtgen profillerden yapılmış hafif çelik çerçeve duvarlarının geliştirilen modellerinin ayrıntılarını ve deneysel sonuçlarını karşılaştırmıştır. Doğrulanmış modeller, boşluklu yalıtımlı profil duvarlarda kare/dikdörtgen kullanılmasının avantajını vurgulamak, çelik kalitesi ve profil derinliği gibi hafif çelik çerçeve duvarlarının yangın direncini etkileyebilecek faktörleri daha iyi anlamak için kullanılmıştır. Kare/dikdörtgen profilli duvarların sayısal bir çalışması sunulmuştur.

(Moura Correia et al., 2014) ISO834 yangın etkisi altında üç tam ölçekli dış yalıtımlı soğuk şekillendirilmiş çelik taşıyıcı duvar numunesi üzerinde ayrıntılı bir deneysel araştırma sunmuştur. Dış yalıtım olarak otoklavlanmış hafif beton levha kullanmanın, yangın koşulları altında taş yünü boşluk yalıtımı ve taş yünü dış yalıtım konfigürasyonundan daha makul olduğu sonucuna varmıştır. Boşluk yalıtımlı olmayan soğuk şekillendirilmiş çelik duvarlar için, yangın tarafı mantolamanın çatlaması ve düşmesinden kaynaklanan olası ısı transfer yolu değişikliği dikkate alınmazsa, artan boşluk derinliğinin; duvar boşluğu, duvar profilleri ve ortam yüzeyinin sıcaklık artışı üzerinde önemsiz bir etkisi olduğu bulunmuştur.

(Dodangoda et al., 2019) bu çalışmasında malzeme karakterizasyonu, termofiziksel özellikler ve sonlu elemanlar ısı transferi modellemesine dayalı olarak hafif çelik çerçeveli duvar uygulamalarında kullanılan yangına dayanıklı alçıpanlar için minimum standartları belirlemeyi amaçlamıştır. Bu konuyu ele almak için en yaygın kullanılan yangın koruyucu levha olan alçıpan kullanılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında Avustralya’da üretilen üç alçı levhanın termofiziksel özellikleri ölçülmüş ve kimyasal birleşimler ile karşılaştırılmıştır. Bu üç alçı levha ile kaplanmış hafif çelik çerçeveli duvar sistemlerinin yangına dayanıklılık seviyeleri bu çalışmada geliştirilen ve doğrulanan hafif çelik çerçeveli duvar sistemlerinin üç boyutlu sonlu elemanlar ısı transfer modelleri kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ABAQUS CAE sonlu elemanlar yazılımından faydalanılmıştır. Alçıpan kaplı hafif çelik çerçeveli duvarların yangın performansının genel bir ölçüsünü verebilen, alçıpanın termofiziksel özelliklerine ve kalınlığına dayalı bir “k-faktörü” önerilmiştir. Sayısal analizlerden elde edilen zaman-sıcaklık profilleri ile hesaplanan k-faktörleri arasındaki korelasyon dikkate alınarak 60, 120, 180 ve 240 dakikalık yangına dayanıklılık seviyelerine sahip yük taşımayan hafif çelik çerçeveli

duvar sistemleri için standart k-faktörü profilleri oluşturulmuştur. Önerilen bu standart k-faktörü profilleri, alçıpanların yangın performansının genel bir ölçüsünü vermiştir.

(Keerthan & Mahendran, 2013) hafif çelik çerçeve duvar panellerinin yangın performansını artırmak için iki alçı levha arasında ayrıca bir yalıtım katmanının kullanıldığı kompozit bir hafif çelik çerçeve duvar paneli sistemi geliştirmiştir. Yeni kompozit panellerin sonlu eleman termal modelleri hem standart hem de Eurocode tasarım yangın eğrileri altında termal performanslarını test etmek için bir sonlu eleman programı olan SAFIR kullanılarak geliştirilmiştir. Hem alçı levha hem de yalıtım malzemelerinin uygun görünür termal özellikleri önerilmiş ve sayısal modellerde kullanılmıştır. Geliştirilen modellerin sonuçları, daha sonra kompozit panellerin mevcut standart yangın testi sonuçlarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu çalışma, kompozit panellerin sonlu eleman modellerinin ayrıntılarını, standart ve Eurocode tasarım yangın eğrileri altında zaman-sıcaklık profilleri şeklindeki termal analiz sonuçlarını ve bunların yangın testi sonuçlarıyla karşılaştırmalarını sunmaktadır. Farklı kalınlık ve yoğunluklarda taş yünü, cam elyafı ve selüloz elyafı yalıtım malzemelerinin kullanımının etkileri de araştırılmış ve sonuçlarını sunmuştur. Hafif çelik çerçeve duvar sistemlerinde kompozit panel kullanımının yangın derecelerini artıracak ve Eurocode tasarım yangınlarının hafif çelik çerçeve duvarlarda standart yangınlara göre daha ciddi hasara neden olabileceği tespit edilmiştir.

3. HAFİF ÇELİK ve MODÜLER YAPILAR

3.1. Hafif Çelik

Hafif çelik, diğer adıyla soğukta haddelenen çelik, ince ebat çelik levhanın preslenerek ya da haddelenerek üretilen ürünler için kullanılan yaygın bir tabirdir. Bu elemanlar İngilizce Cold Formed Steel” teriminin baş harfleri alınarak oluşturulan CFS kısaltması ile tabir edilebilir ve bu ifade sıkça karşılaşılan bir ifadedir.

Soğukta şekil verilmiş çelik yapılar diğer genel kullanım adıyla hafif çelik yapılar ilk olarak Amerika’da artan ahşap fiyatına karşı alternatif olarak kullanılmaya başlanmış ve giderek artan kullanımıyla disipline edilerek şartnamelerle desteklenmiştir. Son yıllarda adından çok söz ettiren hafif çelik yapı sistemi yıllarca ülkemizde çelik prefabrik ve modüler yapıların ana yapısal elemanı olarak kullanılmıştır.

Çelik Prefabrik yapı olarak adlandırılan sistem, hafif çelik elemanları bir araya getirilerek duvar panelleri ve/veya döşeme çatı panellerinin fabrika ortamında oluşturulduğu (2 boyutlu) ve sahadan başka bir ortamda hazırlanmış olan bina sistemleridir. Modüler hafif çelik yapılar (3 boyutlu) ise bazen konteyner olarak da adlandırılan ve çeşitli amaçlarla kullanılabilen ve çoğu elemanın soğukta şekillendirilmiş çelik saçlardan oluşan yapı sistemidir.

3.2. Modüler Yapılar

Modüler yapılar, inşaat için gerekli olan taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan elemanların fabrikalarda önceden üretilip şantiyede birleştirilmesiyle oluşturulan yapı sistemleridir. Bu sistem, prefabrikasyon olarak da bilinir ve modern inşaat sektöründe sıklıkla tercih edilir. Sistem elemanları çelik, ahşap veya betonarme elemanlar olabilirler.

3.2.1. Modüler yapı türleri ve modüler duvar elemanları

Çelik elemanlarla yapılan modüler yapılar, kalıcı ve geçici olmak üzere iki ana türe ayrılır. Kalıcı modüler yapılar, uzun süreli kullanımlar için tasarlanırken, geçici modüler yapılar genellikle şantiyelerde, etkinliklerde veya acil durum barınma ihtiyaçlarında kullanılır. Uygulama esnekliği bakımından açık, yarı açık ve kapalı sistemler olarak 3'e ayrılırlar. Açık sistemlerde fabrikadan çıkan malzemenin şantiye içinde değiştirilerek diğer elemanlarla kolayca birleşebilir. Yarı açık sistemde sistemin bir kısmı fabrikada üretilirken bir kısmı şantiyede tamamlanır. Kapalı sistemler tamamen fabrikada tamamıyla hazır olarak üretilip şantiye sahasında uygulama esnekliği olmayan sistemlerdir. Bir modül kabaca 3 bölümden oluşur.

- Modüler Duvar Elemanları
- Modüler Çatı Elemanları
- Modüler Zemin Elemanları

Modüler duvar sistemleri, inşaat sektöründe esnek çalışma olanakları, üretim, iş bitirme hızı ve verimlilik sağlamak amacıyla önceden üretilmiş bileşenlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan yapılardır. Bu sistemler, taşınabilir (demontabl) duvarlar, sabit modüler duvarlar ve yapısal taşıyıcı modüler duvarlar gibi çeşitli türlere ayrılır. Demontabl duvarlar, iç mekânlarda esneklik sağlamak için kullanılır ve ofis, hastane ve eğitim binalarında tercih edilir. Sabit modüler duvarlar, genellikle konut ve ticari yapılar için üretilen, fabrikada hazırlanarak sahada birleştirilen duvar sistemleridir. Yapısal taşıyıcı modüler duvarlar ise, yük taşıma kapasitesine sahip olup özellikle prefabrik ve çelik yapılarda kullanılır.

3.2.2. Modüler yapıların avantajları ve dezavantajları

Modüler yapıların en büyük avantajı, zamandan tasarruf ederek hızlı bir şekilde üretim ve kurulum olanağı sağlamalarıdır. Fabrika ortamında üretim, kalite kontrolünü artırırken, şantiyedeki iş yükünü ve atık miktarını azaltır. Bu yapıların taşınabilir ve yeniden kullanılabilir olması, sürdürülebilirlik açısından çok önemlidir. Ancak, modüler yapılar bazı dezavantajlara da sahiptir. Tasarım esnekliğinin sınırlı olması, yüksek katlı

3. HAFİF ÇELİK ve MODÜLER YAPILAR

ve karmaşık yapıların inşasında modüler yapıların tercih edilmemesine sebep olmuştur. Ayrıca, büyük modüllerin taşınması esnasında lojistik problemler doğurabilir. Yine de doğru planlama ile bu dezavantajlar minimize edilebilir.

Genel anlamda modüler yapılar, özellikle afet bölgelerinde hızlı barınma çözümü sağlaması nedeniyle önemli bir yere sahiptir. Endüstriyel tesisler, askeri yapılar ve geçici altyapı tesisleri de modüler yapılar kullanarak oluşturulurlar.



4. MATERYAL ve YÖNTEM

4.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method- FEM), karmaşık mühendislik ve fizik problemlerini çözmek için kullanılan sayısal bir analiz yöntemidir. Bu yöntem, genellikle karmaşık geometrilere, değişken malzeme özelliklerine ve karmaşık sınır koşullarına sahip problemlerin çözümünde kullanılır. FEM'in temeli, problem alanının küçük, daha yönetilebilir alt bölgelere (elemanlara) ayrılmasına dayanır. (Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. 2013)

Mühendislik uygulamalarında karşılaşılan problemler genellikle oldukça karmaşık ve çözümü zor yapılar sergiler. Bu tür problemlerin üstesinden gelmek, yalnızca teknik bilgi ve deneyimle sınırlı kalmaz; aynı zamanda dikkatli bir analiz, titiz bir yaklaşım ve detaylara hakimiyet gerektirir. Problemin karmaşıklığı arttıkça, çözüm süreci daha karmaşık hale gelir ve dolayısıyla hata yapma riski yükselir. Bu durumlarda, karmaşık sistemleri anlamak ve çözmek için matematiksel modelleme ve bilgisayar destekli analiz yöntemlerine başvurmak büyük bir öneme sahiptir.

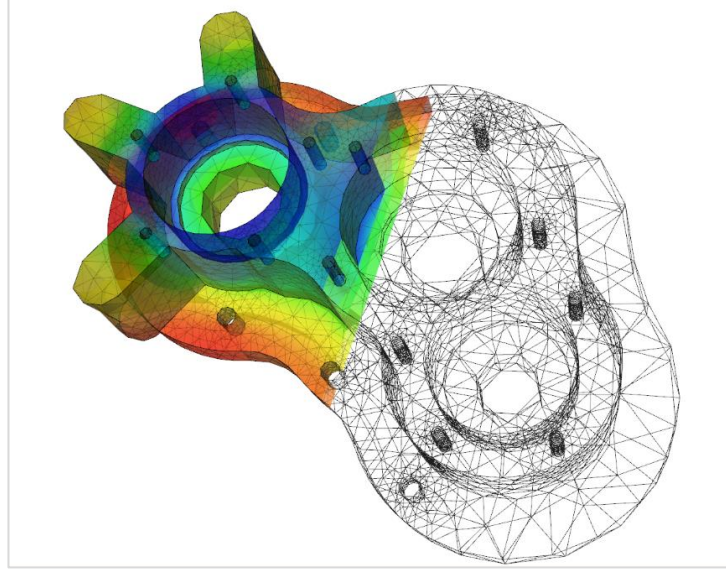
Sonlu elemanlar yöntemi, bu noktada devreye giren en etkili araçlardan biridir. Bu yöntem, fiziksel bir sistemi matematiksel denklemlerle temsil ederek çözüm aşamasını büyük ölçüde kolaylaştırır. Karmaşık geometrilere, değişken malzeme özelliklerine ve farklı sınır koşullarına sahip problemlerin, FEM sayesinde doğruluğu yüksek bir şekilde analiz edilebilmesi mümkündür. Çözumsuz gibi görünen veya klasik yöntemlerle çözümü çok zaman alan birçok problem, sonlu elemanlar yaklaşımıyla kısa sürede ve güvenilir bir şekilde çözülebilir.

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde mühendislik ve uygulamalı bilimlerin alanında en yaygın kullanılan analiz tekniklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu yöntem ilk kez 1956 yılında, uçak gövdelerinin gerilme analizi problemlerine çözüm bulmak amacıyla geliştirilmiştir. Başlangıçta sınırlı bir alanda kullanılan bu yöntem, sonraki on yıl içerisinde hızlı bir gelişim göstermiş ve mühendislikte karşılaşılan çeşitli problemlerin çözümünde uygulanmaya başlanmıştır.

FEM, mühendislik tasarımlarında yalnızca sonuç elde etmeyi değil, aynı zamanda sistemin davranışını anlamayı ve optimize etmeyi de sağlar. Bu yöntem, özellikle yapısal analiz, termal analiz, akışkanlar dinamiği ve elektromanyetik alan problemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Karmaşık mühendislik problemlerini sadeleştirerek çözüm yolları sunması, sonlu elemanlar yönteminin mühendislik dünyasında vazgeçilmez bir araç haline gelmesini sağlamıştır.

Yapısal bir analizde sonlu elemanlar metodunun uygulanışı aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- **Problem Tanımı:** Analiz edilecek sistemin amacı, geometrisi, malzemesi, malzeme özellikleri, yükleme ve sınır koşulları belirlenir.
- **Geometrik Modelleme:** Yapının fiziksel modeli CAD ortamında oluşturulur ve CAD yazılımından FEM yazılımına aktarılır.
- **Meshleme:** Geometri, küçük elemanlara bölünerek çözüm yapılacak ağ yapısı oluşturulur. Meshleme işlemi analiz için kritik önem taşır. Mesh aralığı ne kadar küçük olursa alınacak sonuç o kadar doğru ve gerçeğe yakın olacaktır. Şekil 4.1’de sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sistem ve meshleme işlemi örneği görülmektedir.
- **Malzeme Özelliklerinin Tanımlanması:** Her elemanın sahip olduğu malzeme özellikleri (elastisite, özgül ısı, yoğunluk, ısı iletkenliği vb.) tanımlanır.
- **Sınır Koşulları ve Yüklerin Uygulanması:** Sistemin yükleme koşulları ve desteklenme noktaları tanımlanır.
- **Çözüm Aşaması:** Yazılım, matematiksel denklemleri çözerek gerilme, deformasyon gibi sonuçları hesaplar.
- **Sonuçların Analizi:** Çözüm sonuçları grafiklerle incelenir ve kritik bölgeler değerlendirilir.



Şekil 4.1. Sonlu elemanlar yöntemi ile oluşturulan sistem ve meshleme işlemi (Anonim)

Son olarak sistemin fiziksel olarak uygunluğu ve analiz sonuçlarının doğruluğu kontrol edilir. Eğer istenirse sistem veya geometri üzerinde iyileştirmeler yapılarak FEM yazılımı tekrar çalıştırılabilir. Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) analizleri için en fazla kullanılan 2 yazılım şunlardır:

- **ABAQUS:** Özellikle karmaşık malzeme modelleri ve doğrusal olmayan analizler için tercih edilen güçlü bir FEM yazılımıdır.

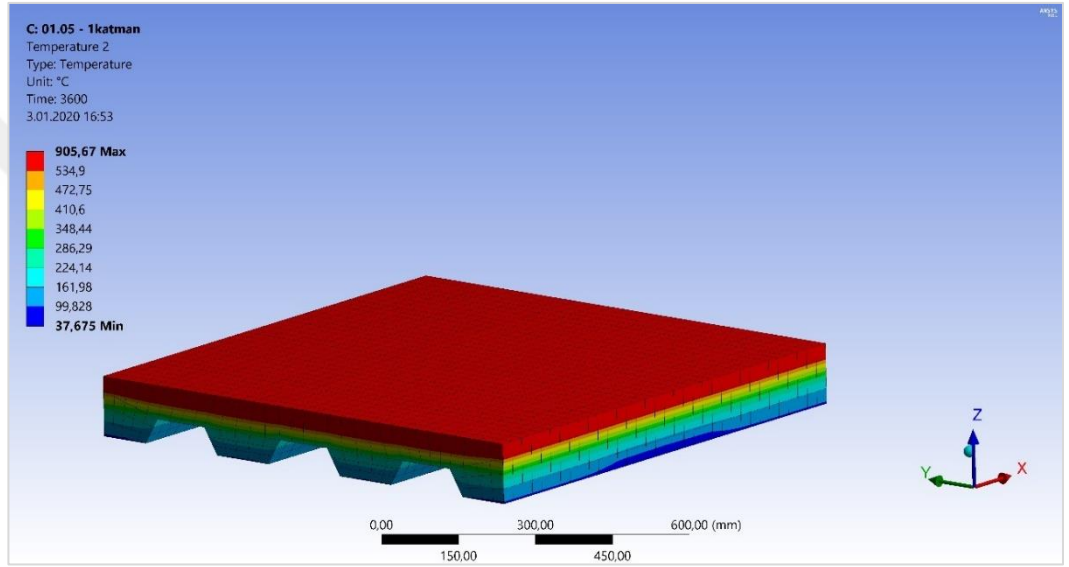
ANSYS: ANSYS, çoğunlukla mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılan, analiz ve simülasyon yapabilme yeteneği olan gelişmiş bir bilgisayar destekli programdır. ANSYS temel olarak sonlu elemanlar yöntemi ile problemleri çözüme kavuşturmaya çalışmaktadır. Yaklaşık 50 yıldır kullanılan bu program ile birçok mühendislik problemine kısa sürede ve gerçeğe uygun çözümler bulunabilmektedir. (Şen 2023)

4.2. ANSYS Yazılımı

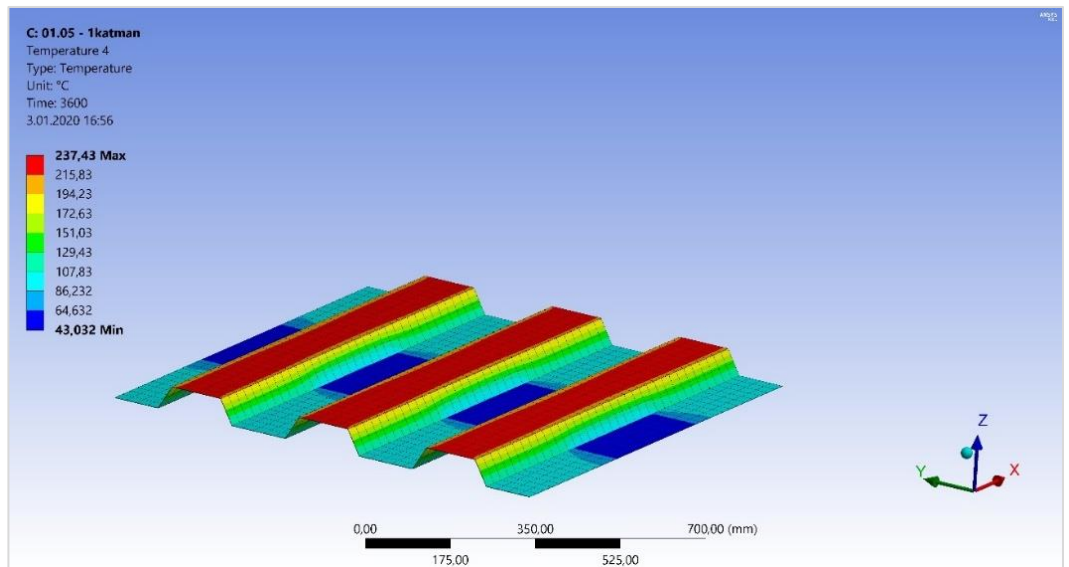
ANSYS, 1970 yılından bu yana geliştirilen ve mühendislik problemlerinin analizine ve simülasyonuna olanak tanıyan bir bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. Bu yazılım, mekanik, yapısal analiz, akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi çeşitli mühendislik çalışmalarında etkili bir şekilde kullanılmaktadır. ANSYS, sonlu

4. MATERYAL ve YÖNTEM

elemanlar yöntemini temel alarak, karmaşık geometrilere sahip yapıların küçük alt elemanlara bölünmesi ve bu elemanların ayrı ayrı analiz edilmesi yoluyla çözüm üretir. Daha sonra, her bir elemandan elde edilen veriler birleştirilerek, sistemin genel davranışı hakkında doğru ve güvenilir sonuçlar elde edilir. Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'te ANSYS programı ile sıcaklık analizi yapılan yapı malzemeleri görülmektedir. Bu yöntem, özellikle tek parça olarak analiz edilmesi zor olan sistemlerin çözümünde önemli bir avantaj sağlar. Bu tez için ANSYS Workbench programı kullanılmış olup yangına karşı yalıtılmış çelik malzemenin yangın dayanımı hakkında bilgi edinmek için kullanılmıştır.



Şekil 4.2. ANSYS yalıtım malzemesi sıcaklık analizi (Cirpici et al., 2020)



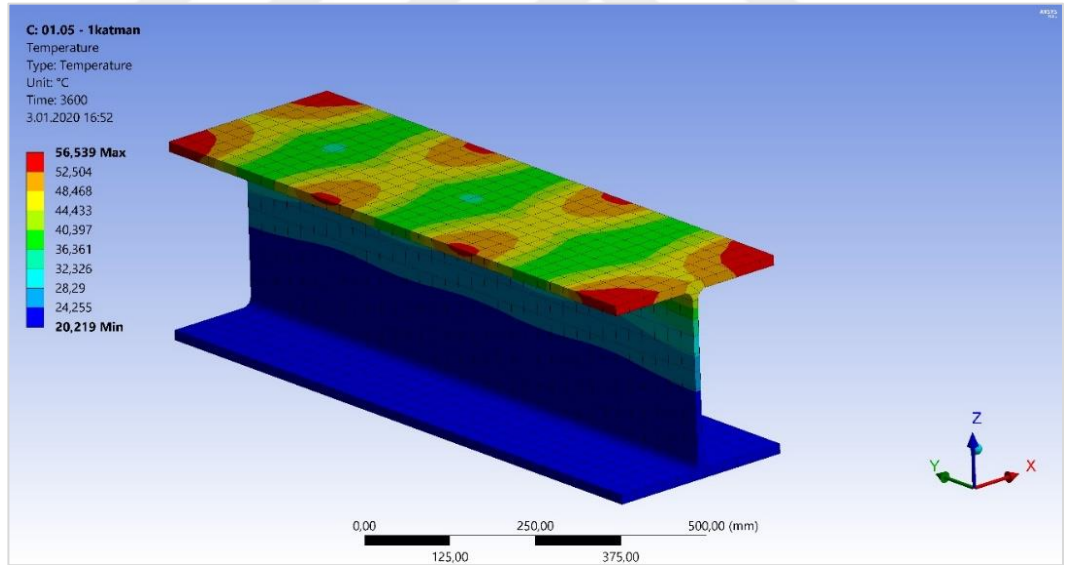
Şekil 4.3. ANSYS çelik sıcaklık analizi (Cirpici et al, 2020)

4.2.1. ANSYS Workbench

Workbench platformu sayesinde birbirinden farklı mühendislik problemleri bir yapı üzerinden arayışa tabi tutulabilir. Şekil 4.4'te ANSYS Workbench programında yapılan bir sıcaklık analizi gösterilmiştir. ANSYS Workbench platformu ile;

- İki katlı yanal yüklemeye maruz betonarme yapı analizi,
- Bir musluktaki sıcak ve soğuk su akışının ortaya çıkardığı basınç, sıcaklık ve hız gibi değişkenlerin davranışı,
- Tozaltı kaynak yöntemi ile birleştirilen bir çeliğin termal analizi,

Kompozit malzemelerin farklı sıcaklıklar altındaki elastik durumlarının incelenmesi gibi oldukça farklı alanlardaki problemlere çözüm aranabilmektedir. (Taşkaya, S., & Taşkaya, S. (2019))



Şekil 4.4. ANSYS Workbench programında sıcaklık analizi (Cirpici et al, 2020)

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

5.1. Validasyon Model Çalışması

Modüler duvar panellerinin yangın tepkisini öngörmek için gerçekçi bir üç boyutlu sayısal model, ANSYS programı (ANSYS 19.0) yardımı ile elde edilmiştir. Bu model sayesinde daha önce başka araştırmacılar tarafından test edilen veya modellenen bir dizi modüler elemanın 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 Yu et al., (2021) çalışması baz alınarak ve o çalışmada kullanılan termal özellikler dikkate alınarak geliştirilmiştir. Çalışmada modüler duvar numunelerine yer verilmiştir. Termal özellikler olarak dış yalıtım malzemesi olan alçıpanın, çeliğin ve iç yalıtım malzemesi olan mineral yünün özgül ısı değerleri, ısı iletkenlik ve yoğunlukları aşağıda sunulmuştur.

Yoğunluk

Geliştirilen bu modelde alçıpanın yoğunluğu Chen et al. (2014) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak 800 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Mineral yünün yoğunluk değeri üretici firmanın önerdiği biçimde 120 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Son olarak çeliğin yoğunluğu EN-1993-1-2 de belirtildiği üzere 7850 kg/m^3 olarak alınmıştır. (Yu et al., 2021)

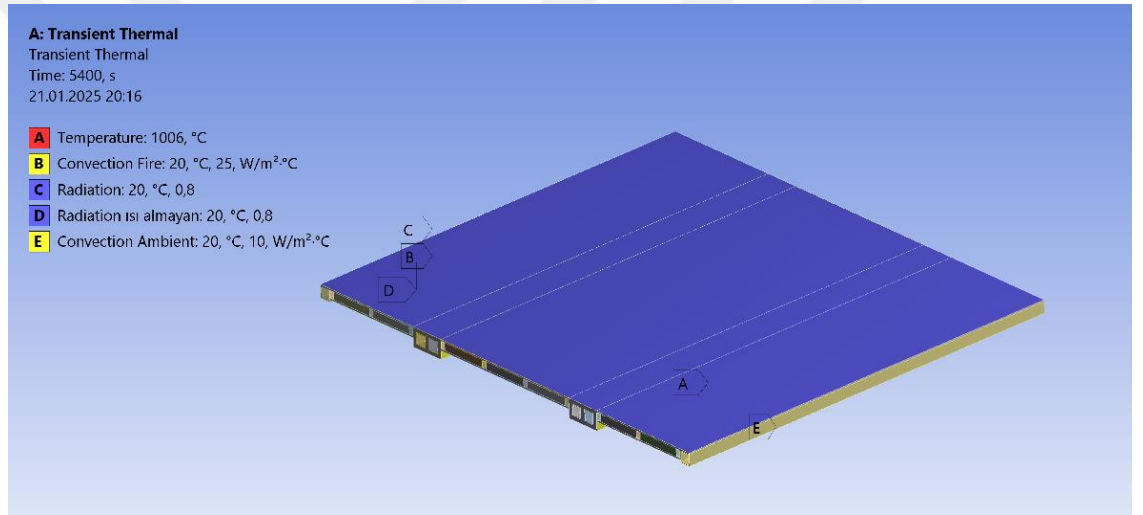
Özgül ısı

Geliştirilen bu modelde alçıpanın özgül ısısı Mahendran et al. (2013) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Yine mineral yünün özgül ısı değeri aynı şekilde Mahendran et al. (2013) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak 840 J/kg.K

olarak ele alınmıştır. Son olarak çeliğin özgül ısı EN-1993-1-2 de belirtilen parametrelere göre hesaplanarak numuneler üzerinde kullanılmıştır. (Yu et al., 2021)

Isıl İletkenlik

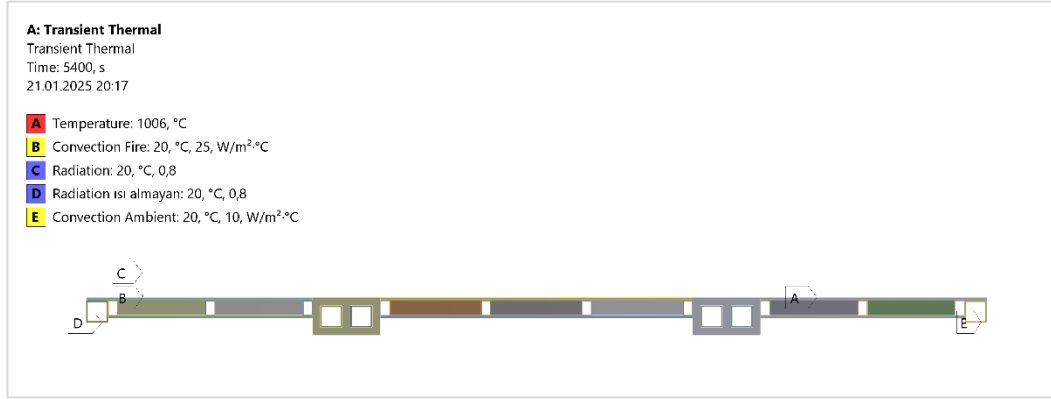
Bu modelde alçıpanın ısı iletkenlik değeri Mahendran et al. (2013) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak hesaplanmıştır. Mineral yünün ısı iletkenlik değeri Chen et al. (2014) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak elde edilen değerler kullanılmıştır. Son olarak çeliğin ısı iletkenlik değeri EN-1993-1-2 de belirtilen parametrelere göre hesaplanarak numuneler üzerinde kullanılmıştır. (Yu et al., 2021)



Şekil 5.1. Birinci validasyon modelinin ANSYS (2019)’den görüntüsü

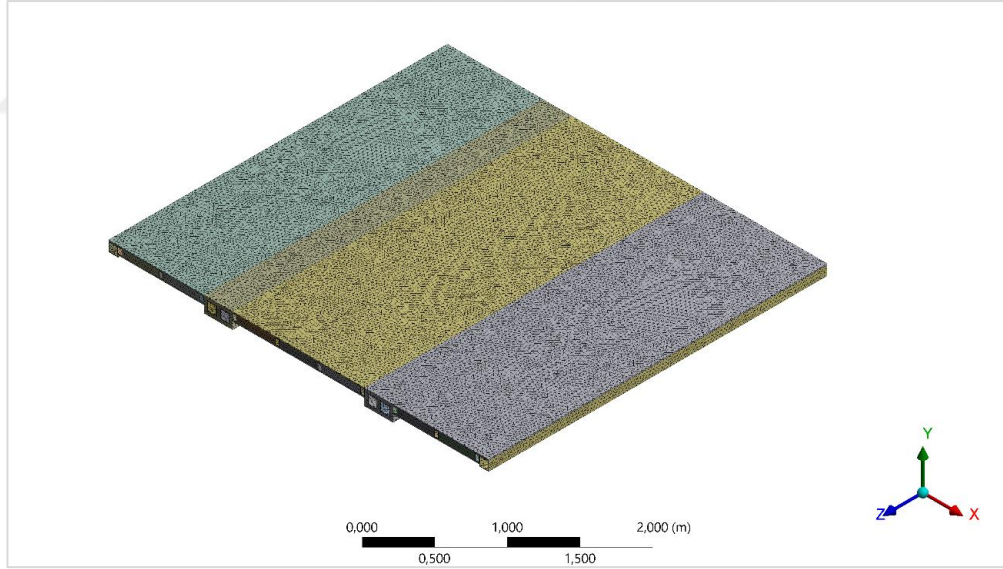
Şekil 5.1’de gösterilen ikinci validasyon modeli çelik bir çerçeve, Çerçevenin arasına mineral yünü ve dış katmanda bütün çerçeveyi kapatan ve yerine göre farklı kalınlıklarda kullanılan alçıpanlardan oluşmaktadır. Ortam tarafındaki alçıpanın dış yüzündeki yüzey sıcaklığı 20°C olarak belirlenmiştir. Yangın ve ortam tarafındaki alçıpan için yüzey emisyon faktörleri 0,9 olarak atanmıştır. Isı konveksiyon davranışlarını kontrol eden yüzey tabaka katsayısı yangın tarafı yüzeyi için 25 W/ (m² · °C) ve ortam tarafı yüzeyi için 10 W/ (m² · °C) olarak belirlenmiştir. SHS kolonlarının iç boşluğu gibi test edilen numunelerin boşluğundaki ısı transferi, sadece boşluk yüzeylerinde boşluk ışıınımına sahiptir. Modelde, çeliğin boşlukta kalan kısımları için emisyon katsayısı 0,8 olarak alınmıştır ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Modelde kullanılan yangın eğrisi, Standart

yangın (ISO 834) etkisidir ve doksan dakikalık yangına maruz kalma süresince modellenmiştir.



Şekil 5.2. Birinci validasyon modelinin ANSYS’ den en kesiti

Validasyon modeli – 1 de kullanılan mesh, bütün yüzeylerde 0,3 santimetre büyüklüğünde atılmıştır. Mesh görüntüsü Şekil 5.3’te gösterilmiştir.

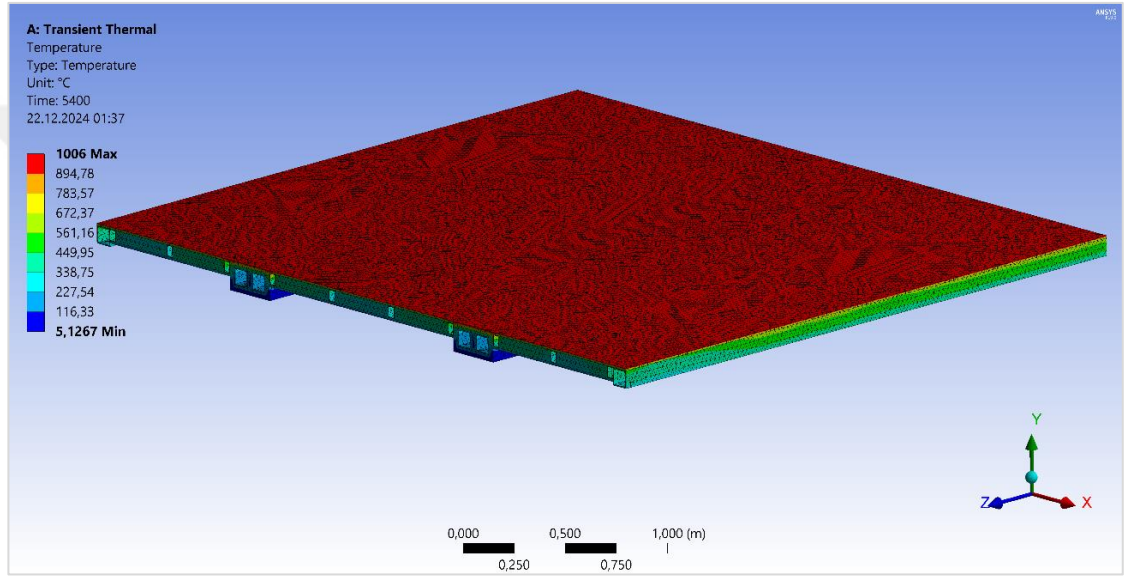


Şekil 5.3. Birinci validasyon modelinde kullanılan mesh görüntüsü

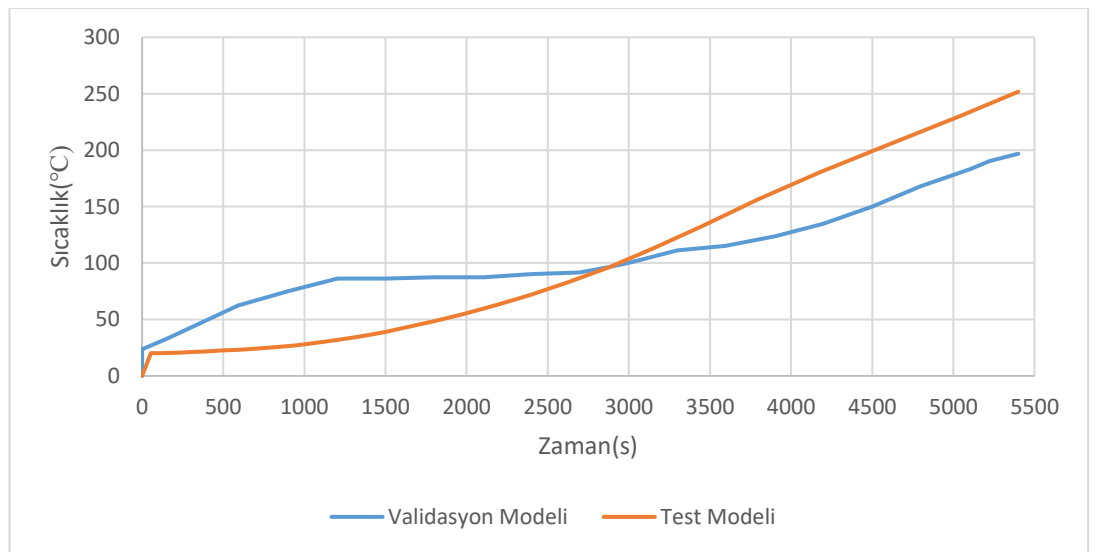
Validasyon modeli – 1’de oluşan doksan dakikalık yangına maruz kalma süresi sonucunda ortaya çıkan çelik sıcaklıklarının görüntüsü Şekil 5.4’te gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum çelik sıcaklığı 848,72°C olurken, minimum çelik sıcaklığı ise yaklaşık olarak 48,12°C olduğu görülmektedir. Şekil 5.5’te görülen grafikte ise test modeli ile validasyon modelinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Validasyon

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

modelinde sıcaklık yavaşça artıp yaklaşık 1200.saniyeden sonra 2800.saniyeye kadar stabil devam etmiştir. Daha sonra yavaşça artmaya devam etmiştir. Test modelinde ise yanmanın başından beri parabolik olarak artış gösterdiği görülmektedir. Sıcaklıklar yaklaşık 2800.saniyeye kadar birbirinden farklı sonuçlar verse de iki model de 2800.saniyede 96°C'lik sıcaklığa eriştikten sonra iki model arasında iyi bir uyum yakalanarak sürenin sonunda 60°C'lik bir fark oluşmuştur. Bu da test modelinin taşıyıcı eleman olduğu ve yangın esnasında model üzerine yükleme yapılması sonucu test numunesi zarar görüp deformasyona uğradığı içindir.



Şekil 5.4. Birinci validasyon modelinde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.5. 1.Validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması

5.1.2. Validasyon modeli – 2

Bu validasyon modeli (Keerthan & Mahendran, 2013) çalışmasında sunulan model baz alınarak geliştirilmiştir. Keerthan bu çalışmasında sonlu elemanlar analizini yaparken SAFIR programından faydalanmıştır. Termal özellikler olarak dış yalıtım malzemesi olan alçı levhanın, çeliğin ve iç yalıtım malzemesi olan mineral yünün özgül ısı değerleri, ısı iletkenlik ve yoğunlukları aşağıda sunulmuştur.

Yoğunluk

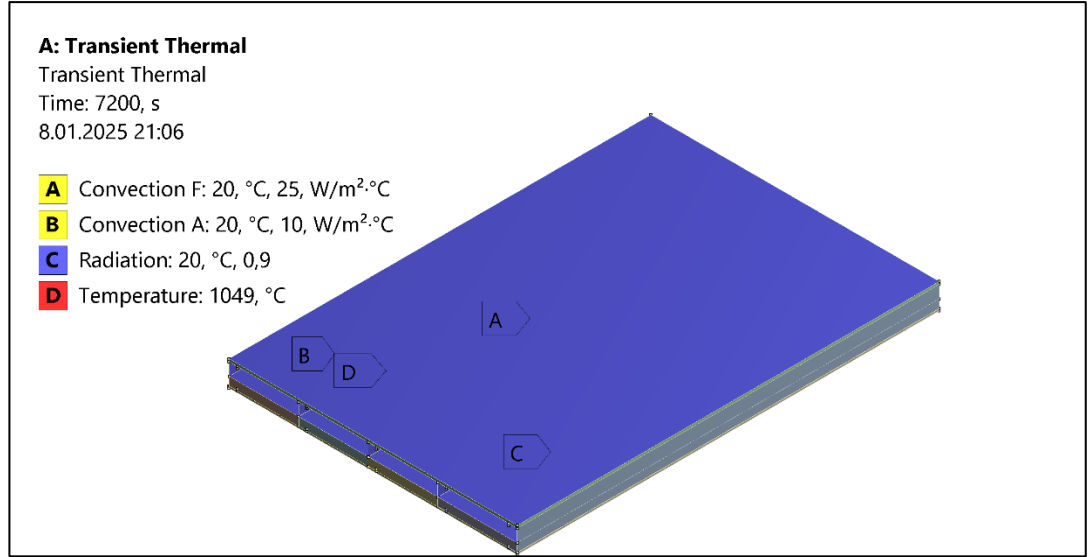
Geliştirilen bu modelde alçı levhanın yoğunluğu Rusthi et al. (2017) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Taş yününün yoğunluk değeri Rusthi et al. (2017) çalışmasından yararlanılarak 100 kg/m^3 olarak kullanılmıştır. Son olarak çeliğin yoğunluğu EN-1993-1-2 de belirtildiği üzere 7850 kg/m^3 olarak alınmıştır. (Keerthan & Mahendran, 2013)

Özgül ısı

Geliştirilen bu modelde alçı levhanın özgül ısısı Rusthi et al. (2017) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Yine taş yünün özgül ısı değeri aynı şekilde Rusthi et al. (2017) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak 840 J/kg.K olarak ele alınmıştır. Son olarak çeliğin özgül ısısı EN-1993-1-2 de belirtilen parametrelere göre hesaplanarak numuneler üzerinde kullanılmıştır. (Keerthan & Mahendran, 2013)

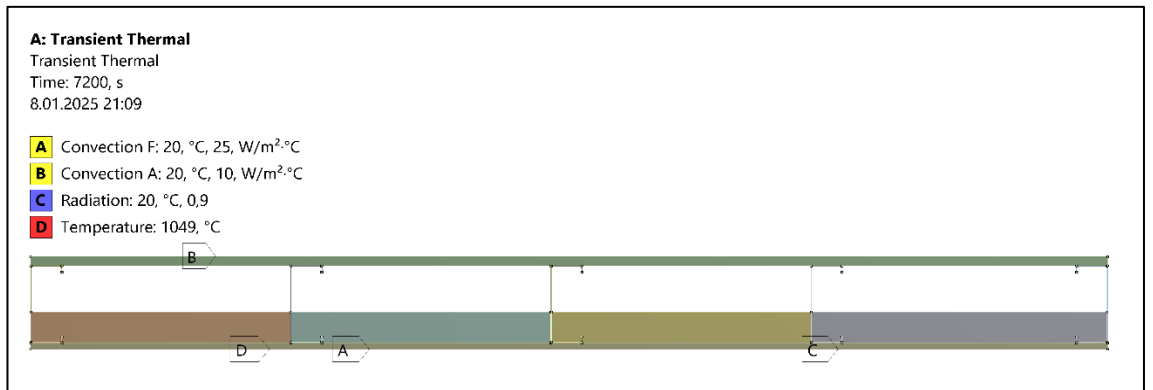
Isıl İletkenlik

Bu modelde alçı levhanın ısı iletkenlik değeri Rusthi et al. (2013) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak hesaplanmıştır. Taş yünün ısı iletkenlik aynı şekilde Rusthi et al. (2017) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak elde edilen değerler kullanılmıştır. Son olarak çeliğin ısı iletkenlik değeri EN-1993-1-2 de belirtilen parametrelere göre hesaplanarak numuneler üzerinde kullanılmıştır. (Keerthan & Mahendran, 2013)



Şekil 5.6. İkinci validasyon modelinin ANSYS (2019)’den görüntüsü

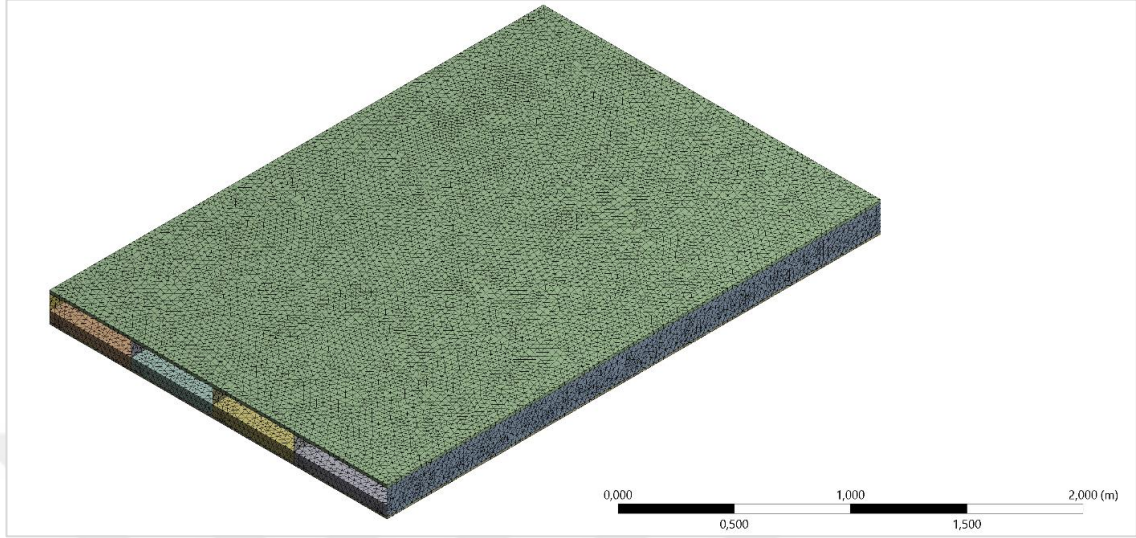
Validasyon modeli çelik bir çerçeve, Çerçevenin arasına mineral yünü ve dış katmanda bütün çerçeveyi kapatan ve yerine göre farklı kalınlıklarda kullanılan alçıpanlardan oluşmaktadır. Ortam tarafındaki alçıpanın dış yüzündeki yüzey sıcaklığı 20°C olarak belirlenmiştir. Yangın ve ortam tarafındaki alçıpan için yüzey emisyon faktörleri 0,9 olarak atanmıştır. Isı konveksiyon davranışlarını kontrol eden yüzey tabaka katsayısı yangın tarafı yüzeyi için 25 W/ (m² · °C) ve ortam tarafı yüzeyi için 10 W/ (m² · °C) olarak belirlenmiştir. C profillerden oluşan kolonların iç boşluğu gibi test edilen numunelerin boşluğundaki ısı transferi, sadece boşluk yüzeylerinde boşluk ışıınımına sahiptir. Modelde, modüler elemanın boşlukta kalan kısımları için emisyon katsayısı 0,9 olarak alınmıştır ve Şekil 5.6 ve Şekil 5.7’de gösterilmiştir. Modelde kullanılan yangın eğrisi, Standart yangın (ISO 834) etkisidir ve doksan dakikalık yangına maruz kalma süresince modellenmiştir.



Şekil 5.7. İkinci validasyon modelinin ANSYS’den en kesiti

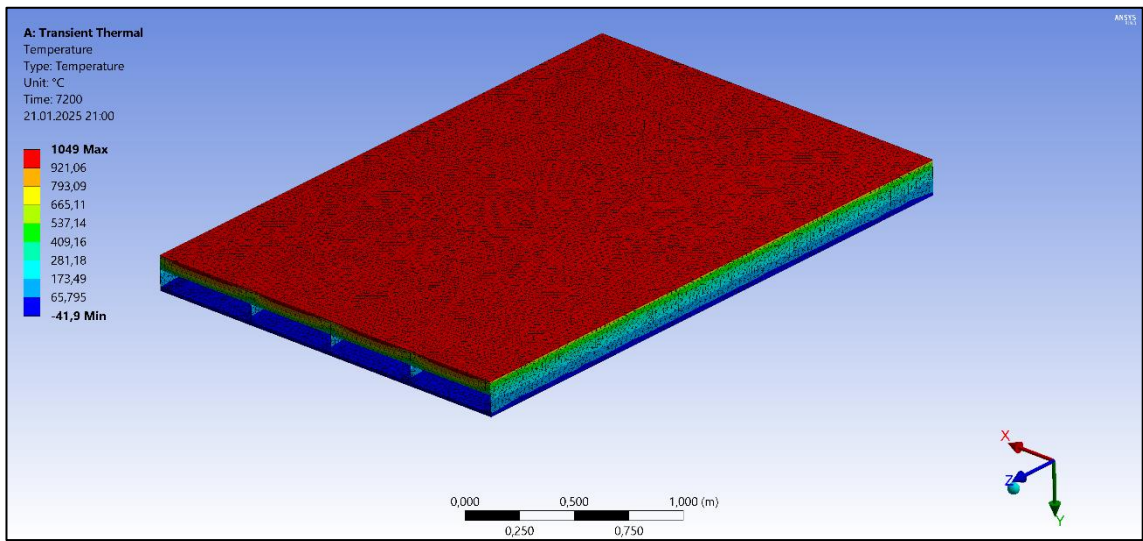
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Validasyon modeli – 2 de kullanılan mesh, bütün yüzeylerde 0,3 santimetre büyüklüğünde atılmıştır. Mesh görüntüsü Şekil 5.8’de gösterilmiştir.

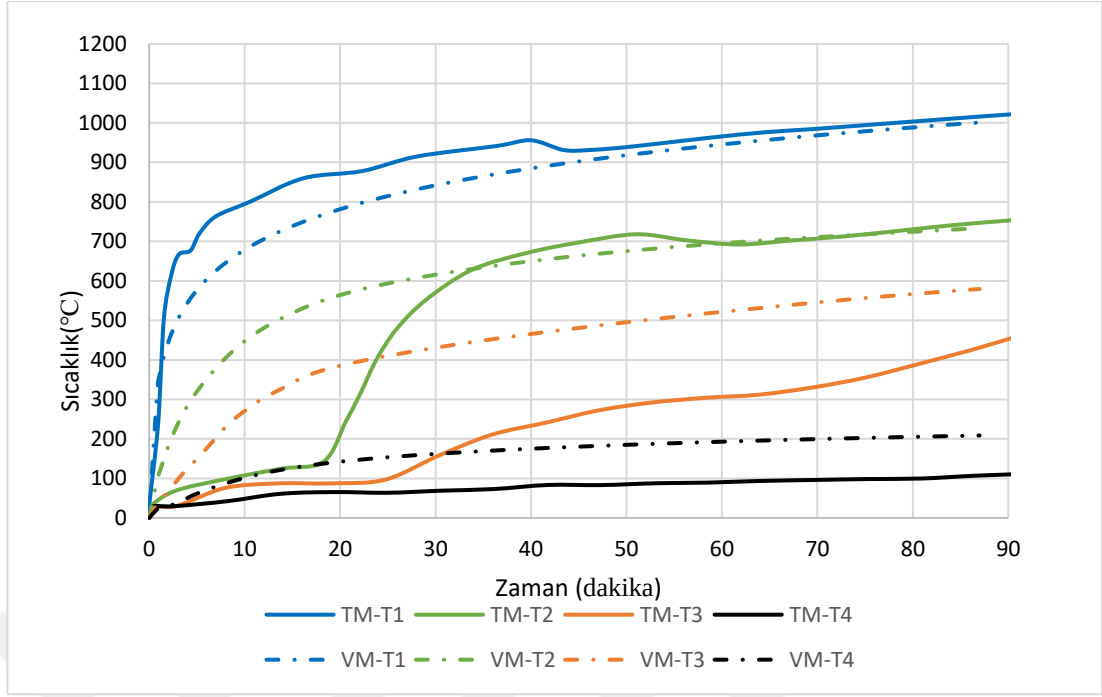


Şekil 5.8. İkinci validasyon modelinde kullanılan mesh görüntüsü

Validasyon modeli – 2’de oluşan doksan dakikalık yangına maruz kalma süresi sonucunda ortaya çıkan çelik sıcaklıklarının görüntüsü Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Validasyon modeli ile test modelinin sıcaklık değerlerini karşılaştırırken test modelinde baz alınan noktalara göre ölçüm yapılmış, sonuçlar Şekil 5.10’da gösterilmiştir. (VM: Validasyon Modeli, TM: Test Modeli)



Şekil 5.9. İkinci validasyon modelinde sıcaklık dağılımı



Şekil 5.10. İkinci validasyon modeli ile test edilen numunenin sıcaklık-zaman karşılaştırması.

Validasyon modeli – 2’de oluşan doksan dakikalık yangına maruz kalma süresi sonucunda ortaya çıkan çelik sıcaklıklarının görüntüsü Şekil 5.9’da gösterilmiştir. Sonuçlara göre maksimum çelik sıcaklığı 710,9°C olurken, minimum çelik sıcaklığı ise yaklaşık olarak 34,35°C olduğu görülmektedir. Şekil 5.10’da görülen grafikte ise test modeli ile validasyon modelinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Grafığe bakıldığında validasyon modeli ile test modelinden alınan noktalardaki sıcaklık değerlerinin birbirlerine çok yakın olduğu sonucuna varılmıştır. T1 noktası modelin yangın alan yüzeyinden, T2 ve T3 noktaları modelin iç kısımlarından ve T4 noktası da yangın almayan yüzeydeki sıcaklık değerini vermektedir. T1 noktasındaki sıcaklık farkı 32,95°C, T2 noktasındaki sıcaklık farkı 18,90°C, T3 noktasındaki sıcaklık farkı 153,58°C, ve T4 noktasındaki sıcaklık farkı 101,75°C’dir. Validasyon modelinden alınan sonuçlar test modeliyle örtüşmektedir.

5.2. Model Özellikleri

ANSYS programının (ANSYS 19.0) Transient Thermal kısmında ısı transferi modellemeleri yapılmıştır. Bu araştırmada, farklı kesit ve yalıtım özelliklerine sahip toplam 18 model incelenmiştir. Modeller, SHS50×5 mm (Şekil 5.11) ve SHS50×2 mm

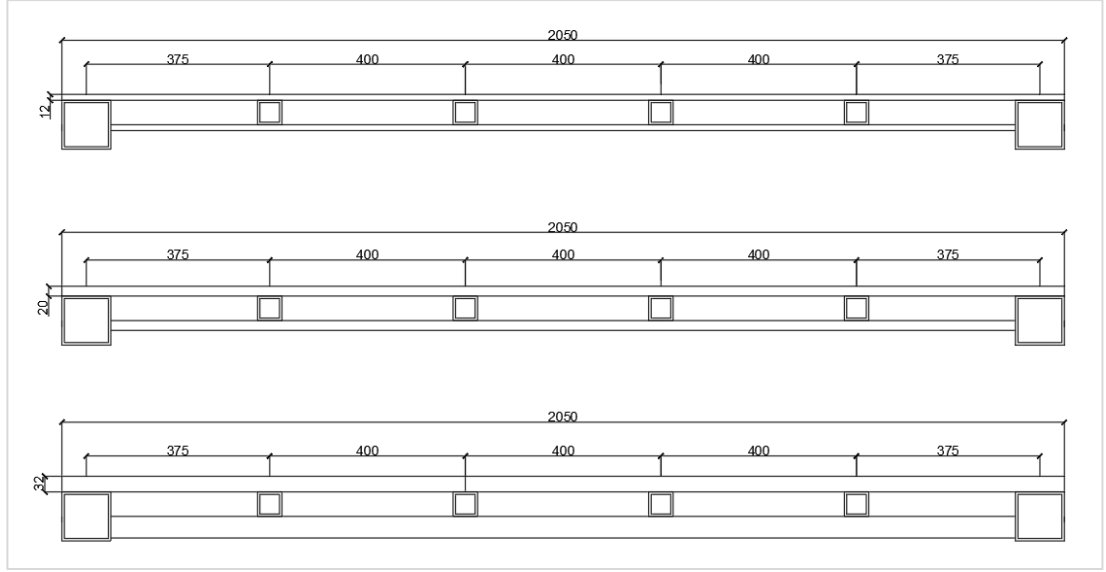
(Şekil 5.12) et kalınlığında kutu profiller ile CC100, CC400 serilerinde aynı et kalınlığında (4 mm) ve iki farklı et kalınlığında CC140 serisi (4mm ve 1,5mm) soğuk şekillendirilmiş çelik profillerden oluşmaktadır. Her modelde yalıtım kalınlığı 50 mm olarak sabitlenmiş ve mineral yünü ile taş yünü kullanılmıştır. Analizler sonucunda, mineral yünü ve taş yünü arasında çeliğin korunmasında belirgin bir fark olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenle, sonraki analizlerde yalnızca mineral yünü tercih edilmiştir. Yalıtım kaplaması olarak, her model için 12, 20 ve 32 mm kalınlıklarında alçı panel, kontrplak ve yangına dayanıklı fibercement kaplamalar kullanılarak ISO, Fast (Hızlı), Slow (Yavaş) ve Smouldering olmak üzere 4 farklı yangın etkisi altında farklı yalıtım senaryoları değerlendirilmiştir.

Modeller;

- Çelik elemanların et kalınlıklarının farkına göre
- Çelik elemanlarının çeşidine göre (SHS veya CC)
- Çelik elemanların boyutlarına göre (boşluk oranına göre)
- Yalıtım Malzemesine Göre (mineral yünü ve taş yünü)
- Yalıtım Kaplamasına göre (alçı panel, kontrplak ve fibercement)
- Yalıtım kaplaması kalınlığına göre (12mm, 20mm ve 32mm) farklı parametrelerde incelenmiştir.

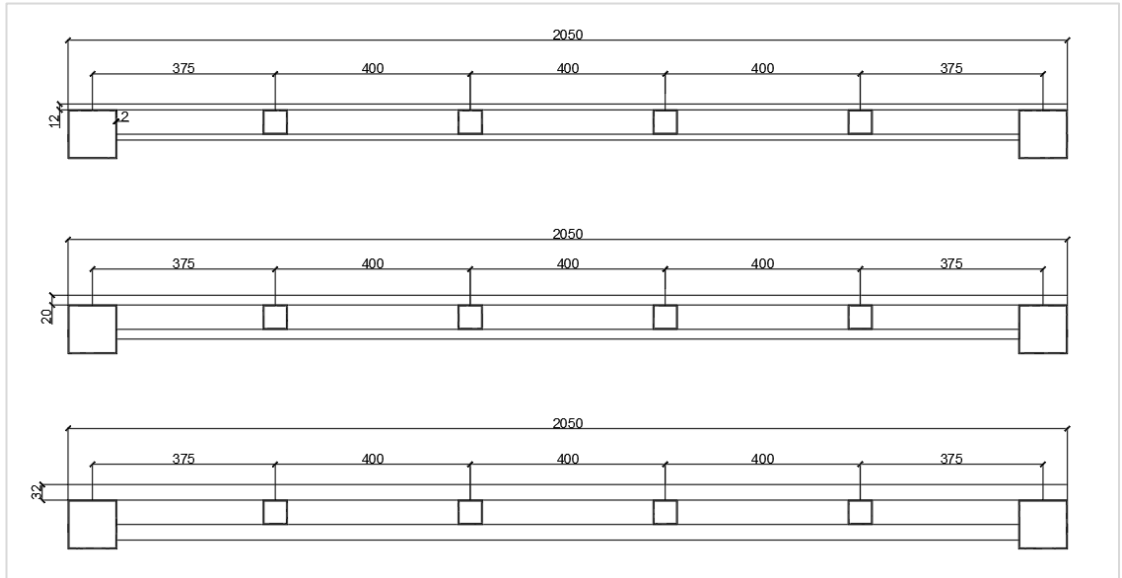
5.2.1. Kutu (SHS) profillerden oluşturulan modeller

Bu tasarımda, yangın etkisinin, çelik elemanın enkesiti sabit tutulmak kaydıyla et kalınlığı ile ilişkisini incelemek amacıyla 50mm×50mm’lik kutu profiller kullanılmıştır. Profillerin kalınlıkları sırasıyla 5 mm ve 2 mm’dir. Şekil 5.11’de görüldüğü üzere, SHS50×5 mm profillerle tasarlanan, 2050 mm genişliğinde ve 3000 mm yüksekliğe sahip bu modelde duvarın başına ve sonuna SHS100×5 mm profil yerleştirilerek model kapatılmıştır. Modelin içine 50 mm yalıtım malzemesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kısımlarında 12mm ,20 mm ve 32 mm’lik yalıtım kaplaması eklenmiştir.



Şekil 5.11. SHS50×5 mm kutu profillerden oluşan duvar modelleri

Şekil 5.12’de görüldüğü üzere, SHS50×2 mm profillerle tasarlanan, 2050mm genişliğinde ve 3000 mm yüksekliğe sahip bu modelde duvarın başına ve sonuna SHS100×2 mm profil yerleştirilerek model kapatılmıştır. Modelin içine 50 mm yalıtım malzemesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kısımlarında 12 mm, 20 mm ve 32 mm’lik yalıtım kaplaması eklenmiştir. İki farklı kalınlığa sahip profille oluşturulan bu modelde çelik eleman mesafeleri eşit olarak atanmıştır.

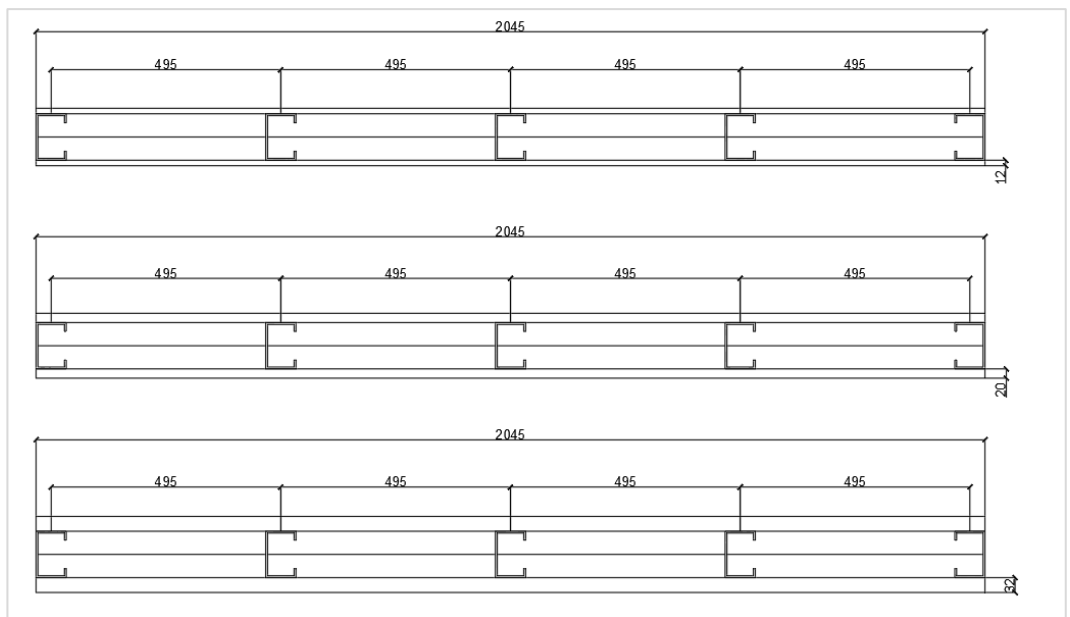


Şekil 5.12. SHS50×5 mm kutu profillerden oluşan duvar modelleri

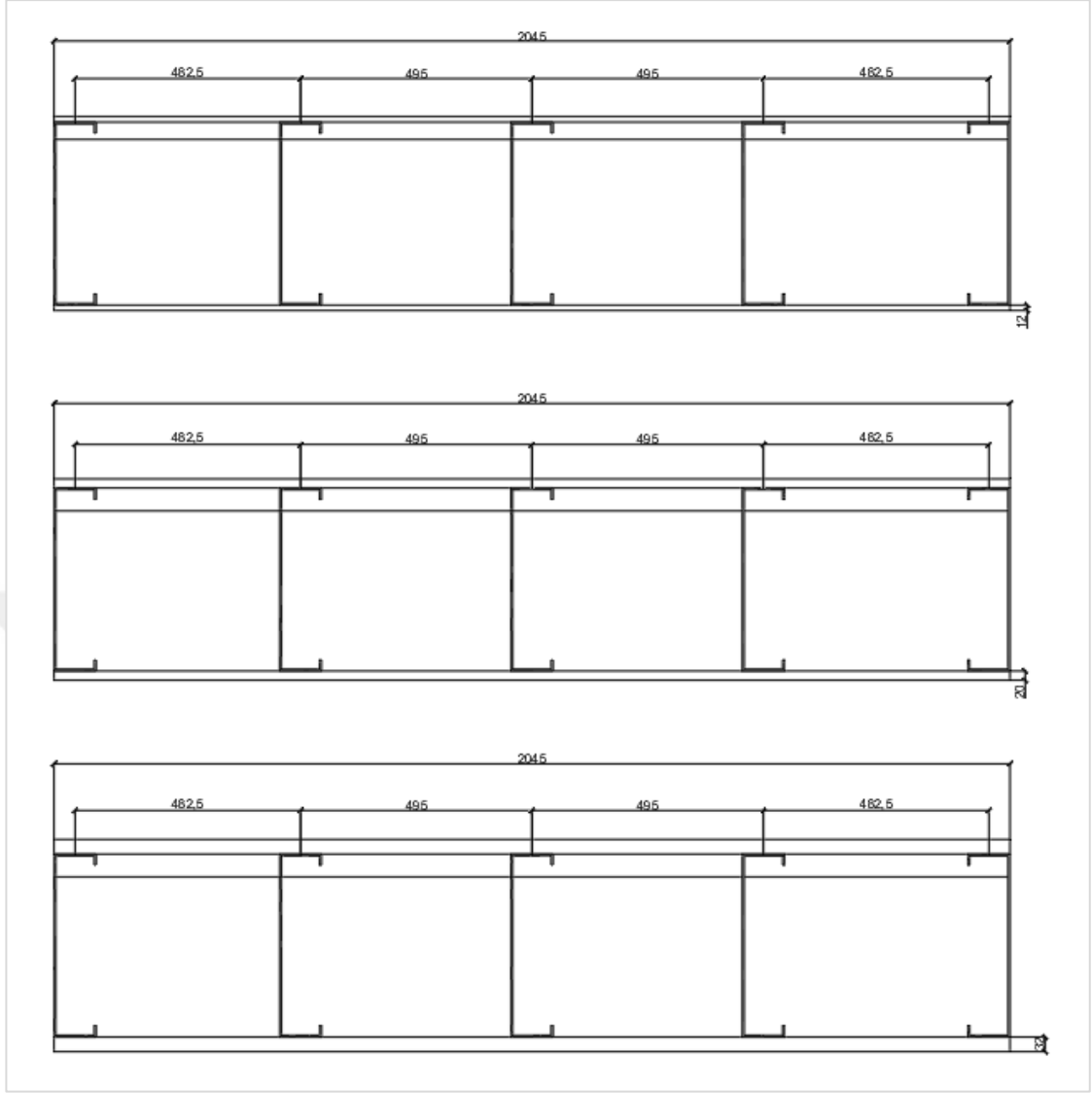
Şekil 5.11 ve Şekil 5.12'deki toplam 6 adet modül için iç yalıtım malzemesi olarak mineral yün ve camyünü özellikleri tanımlanmıştır. Kalınlıkları sabit ve 50 mm'dir. Yalıtım kaplaması olarak ise alçıpan(plasterboard), kontrplak(plywood) ve lifli çimento(fibercement) levhaları üzerinde analizler yapılmıştır. Bu kaplamaların kalınlığının ve ısı özelliklerinin değişmesiyle çelik elemana etkiyecek yangın etkisinin de değişmesi beklenmektedir.

5.2.2. C Profillerden (CC) oluşturulan modeller

Bu modellerde ise, yangın etkisinin, çelik elemanın et kalınlığı sabit tutulmak kaydıyla boyutundaki değişimi ile ilişkisini tespit etmek için CC100×45×19×4 mm'lik (Şekil 5.13) ve CC400×90×24×4 mm'lik (Şekil 5.14) ve boyutu sabit tutulmak kaydıyla elemanın et kalınlıkları ile ilişkisini incelemek amacıyla CC140×75×19×4 mm (Şekil 5.15) CC140×70×16×1,5 mm (Şekil 5.16) enkesitlerine sahip C profiller kullanılmıştır. Şekil 5.13 de görüldüğü üzere, CC100×45×19×4 mm profillerle tasarlanan, 2045 mm genişliğinde ve 3000 mm yüksekliğe sahip bu modelde 50 mm yalıtım malzemesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kısımlarında 12 mm, 20 mm ve 32 mm'lik yalıtım kaplaması eklenmiştir. Analizlerde iç yalıtım malzemesinin kalınlığı 50 mm alınmıştır. Burada amaç yalıtım kalınlığının çelik elemana etkisinden ziyade, yalıtım çeşidi ve modeldeki boşluk miktarının çelik elemanda yangın etkisini ne ölçüde etkilediğini araştırmaktır.



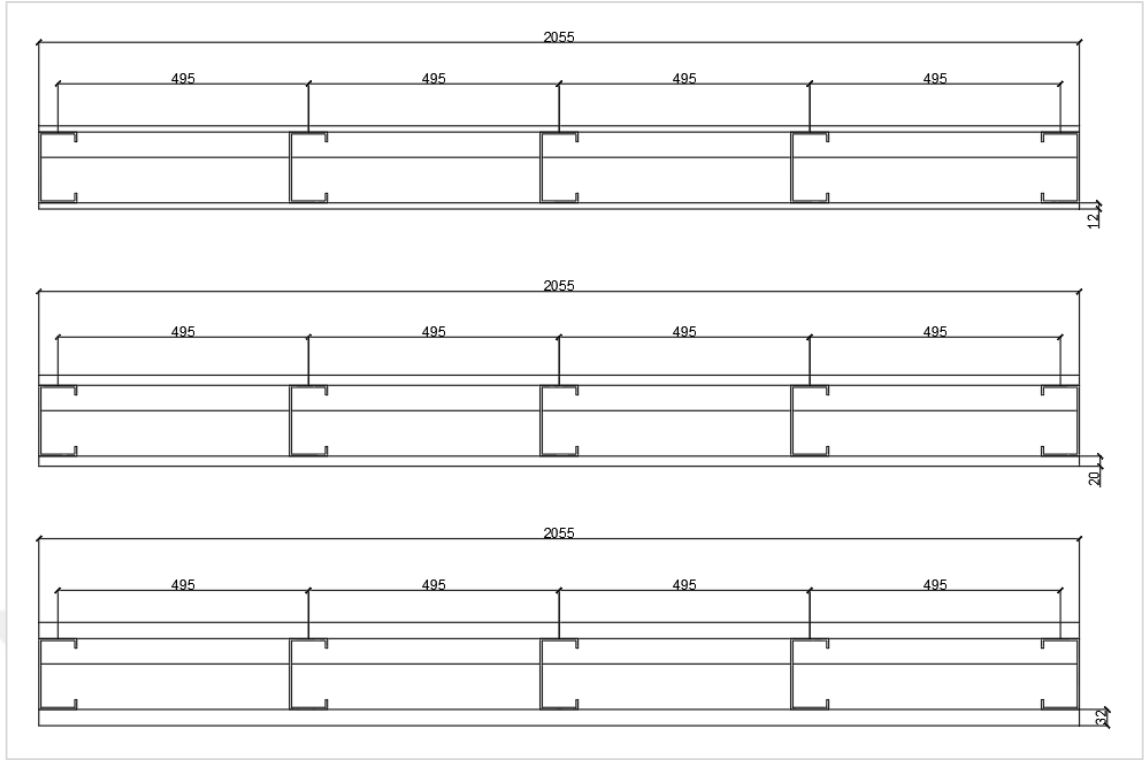
Şekil 5.13. CC100×45×19×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri



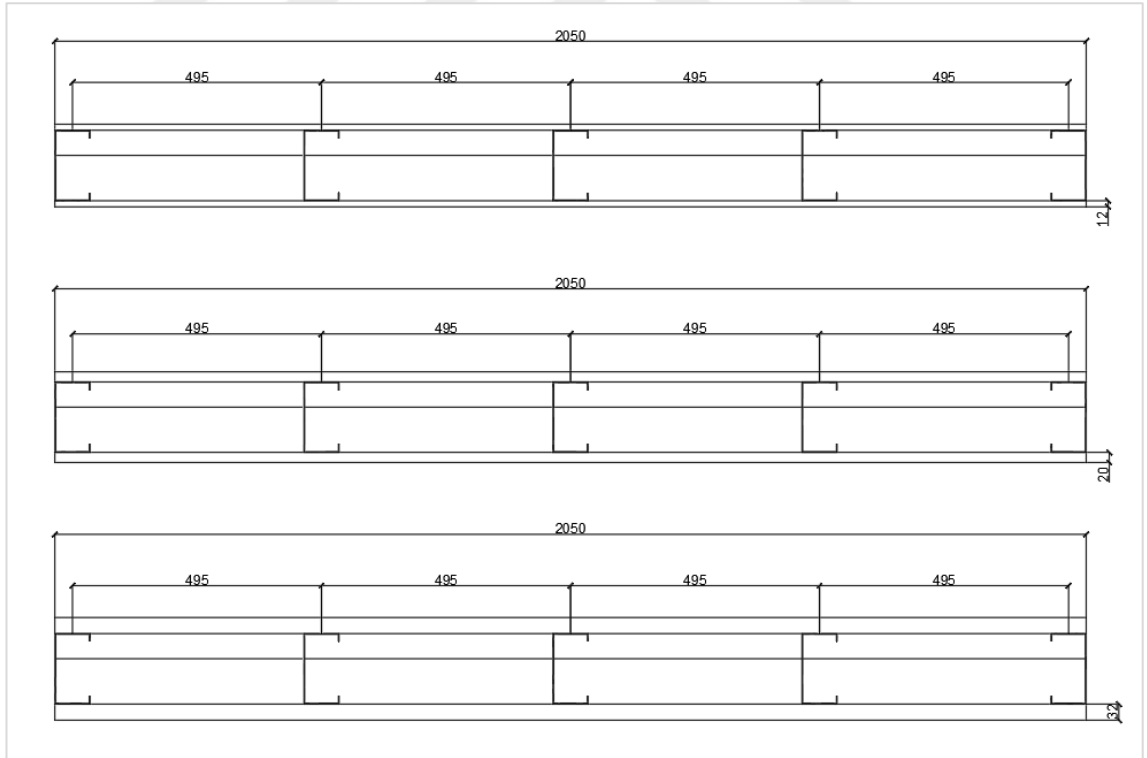
Şekil 5.14. CC400×90×24×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri

Şekil 5.14'te görüldüğü üzere, CC400×90×24×4 mm profillerle tasarlanan, 2045 mm genişliğinde ve 3000 mm yüksekliğe sahip bu modelde 50 mm yalıtım malzemesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kısımlarında 12 mm, 20 mm ve 32 mm'lik yalıtım kaplaması eklenmiştir.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14'teki modeller, farklı boyutlardaki çelik elemanlarda yangın etkisinin araştırılmasına yardımcı olmuştur. Aynı zamanda iç yalıtım malzemesi kalınlığı sabit tutularak duvarın içindeki boşluk hacminin, yangın etkisini ne ölçüde etkileyeceği incelenecektir.



Şekil 5.15. CC140×75×19×4 mm C profillerden oluşan duvar modelleri



Şekil 5.16. CC140×70×16×1,5 mm C profillerden oluşan duvar modelleri

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da görüldüğü üzere, her iki çeşit modelde 140 mm’lik C profil kullanılmıştır. Tıpkı kutu profilde olduğu gibi et kalınlıkları farkından yola

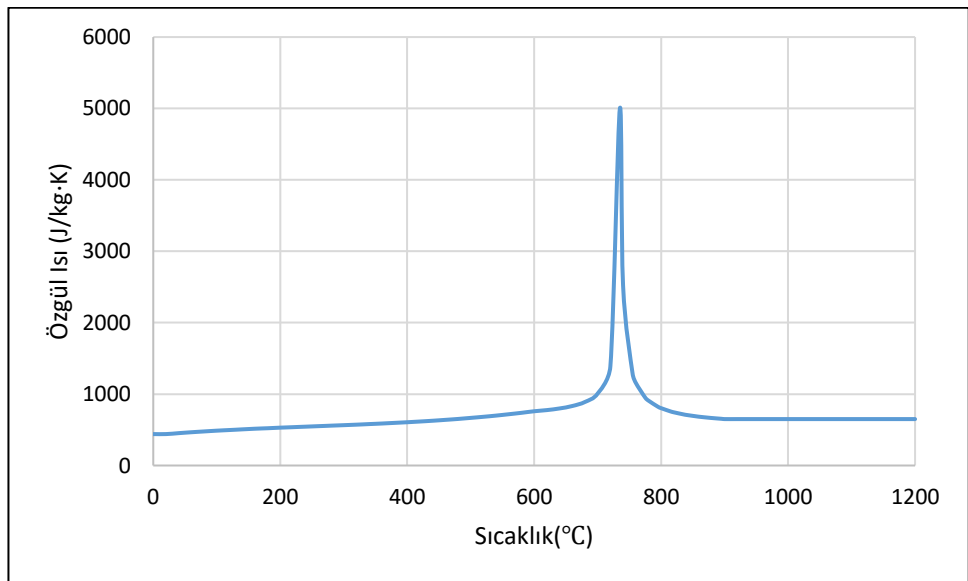
çıkılarak sonuçlar yorumlanacaktır. CC140×75×19×4 mm ve CC140×70×16×1,5 mm profillerle tasarlanan, 2050-55 mm genişliğinde ve 3000 mm yüksekliğe sahip bu modelde 50 mm yalıtım malzemesi tanımlanmıştır. Üst ve alt kısımlarında 12 mm, 20 mm ve 32 mm'lik yalıtım kaplaması eklenmiştir.

Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'daki modeller, farklı et kalınlıklarındaki çelik elemanlarda yangın etkisinin araştırılmasına yardımcı olmuştur. Ayrıca kutu profillerde olmayıp C profillerde incelenen boşluk emisyonu etkisi de yine bu modellerde incelenecektir. Her kaplama kalınlığı için 3 farklı malzeme tanımlanarak hangi malzemenin çelik elemanı yangına karşı en fazla koruduğu tespit edilecektir.

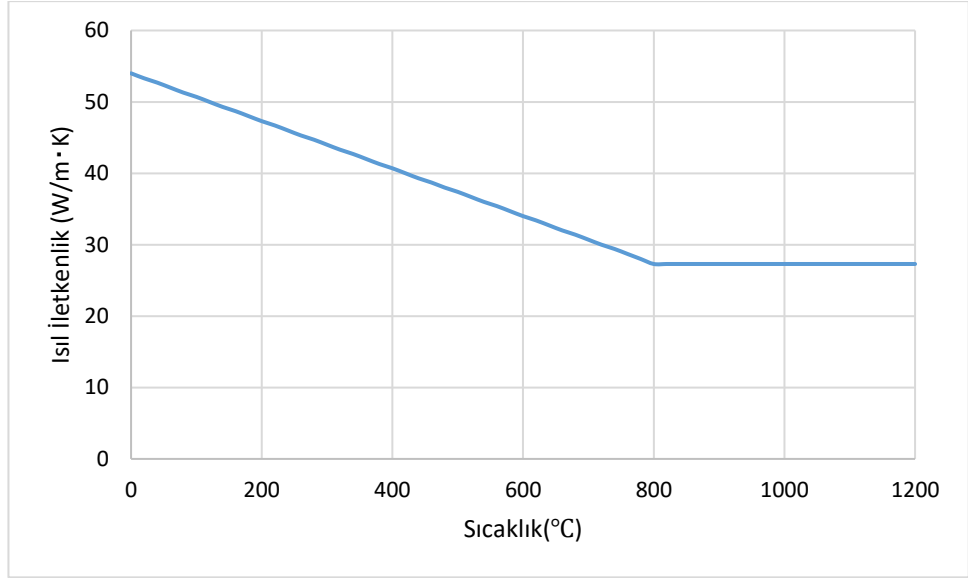
5.3. Modellerde Kullanılan Malzemelerin Termal Özellikleri

5.3.1. Çelik

Çelik elemanlar olarak farklı boyutlarda kutu (SHS) ve C profiller kullanılmıştır. Araştırma için büyük öneme sahip olan çelik malzemelerin yoğunluğu EN-1993-1-2 de belirtildiği üzere 7850 kg/m^3 olarak alınmıştır. Özgül ısı ve ısı iletkenliği de aynı şekilde EN-1993-1-2 de belirtilen parametrelere göre Şekil 5.17 ve Şekil 5.18'deki grafiklerden hesaplanarak modeller üzerinde kullanılmıştır.



Şekil 5.17. Çeliğin sıcaklık- özgül ısı grafiği (En, 1993)

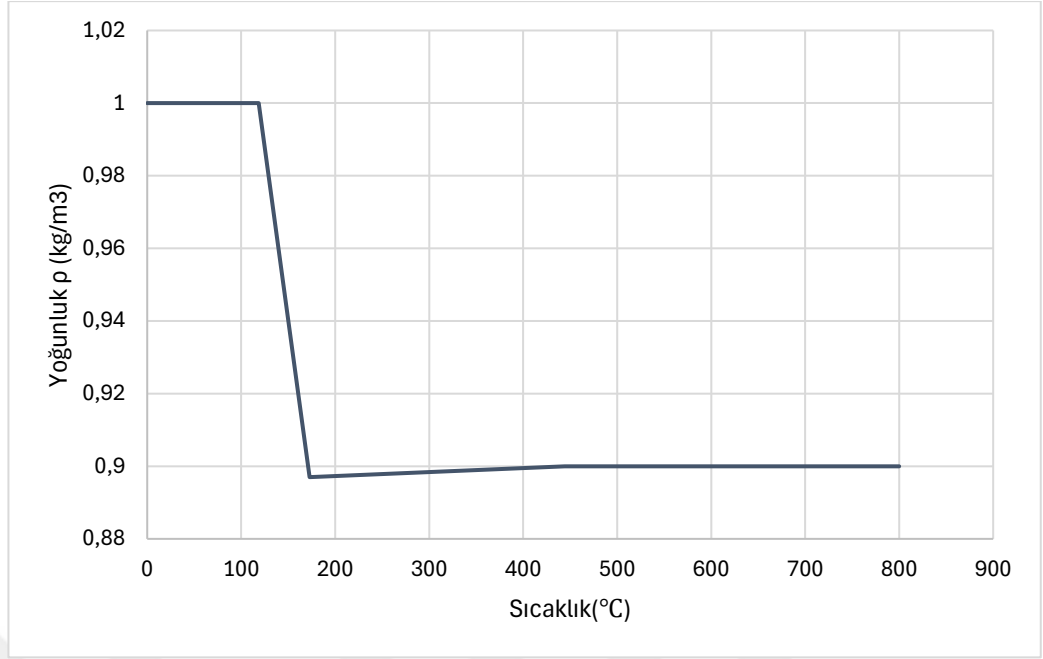


Şekil 5.18. Çeliğin Sıcaklık- Isıl İletkenlik Grafiği (En, 1993)

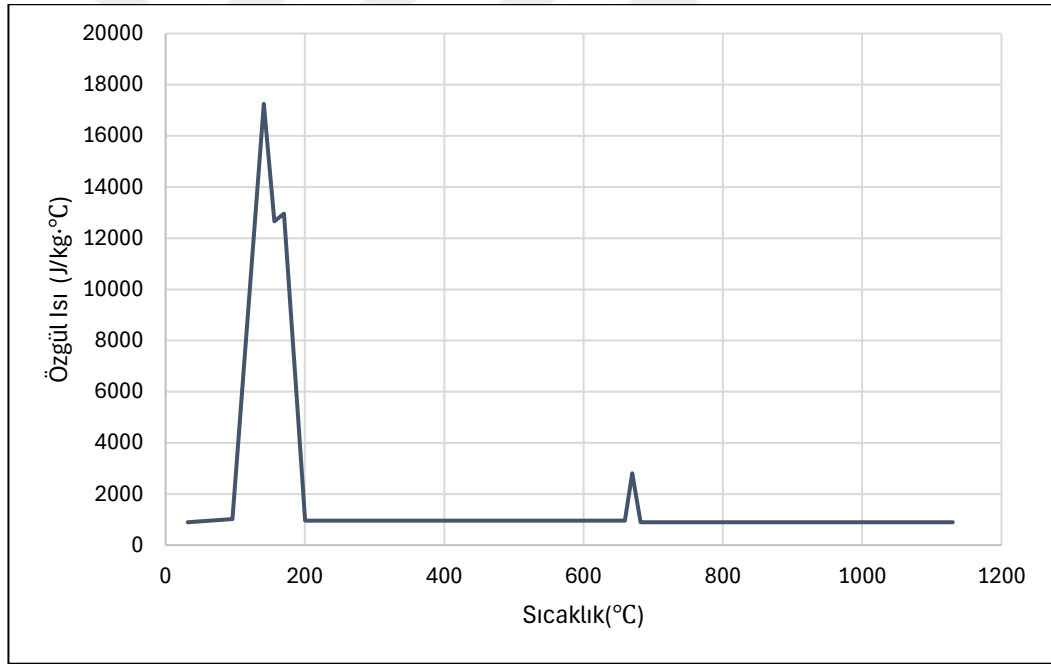
5.3.2. Alçı levha (Plasterboard)

Alçı levhalar, yapı sektöründe yangına karşı dayanıklılıklarıyla bilinen malzemelerdir. Alçının doğal yapısında bulunan kristal su, yangın sırasında buharlaşarak ısıyı emer ve bu sayede yangının yayılması yavaşlar. Bu özelliğiyle alçı levhalar, yangın esnasında koruyucu bir bariyer oluşturmayı sağlar. Özellikle yangına dayanıklı malzemeler olarak üretilen alçı levhalar, cam elyaf katkılı yapıları sayesinde yangın dayanım sürelerini artırır. Genel olarak asma tavan, giydirme ve bölme duvarlarda kaplama malzemesi olarak kullanılırlar.

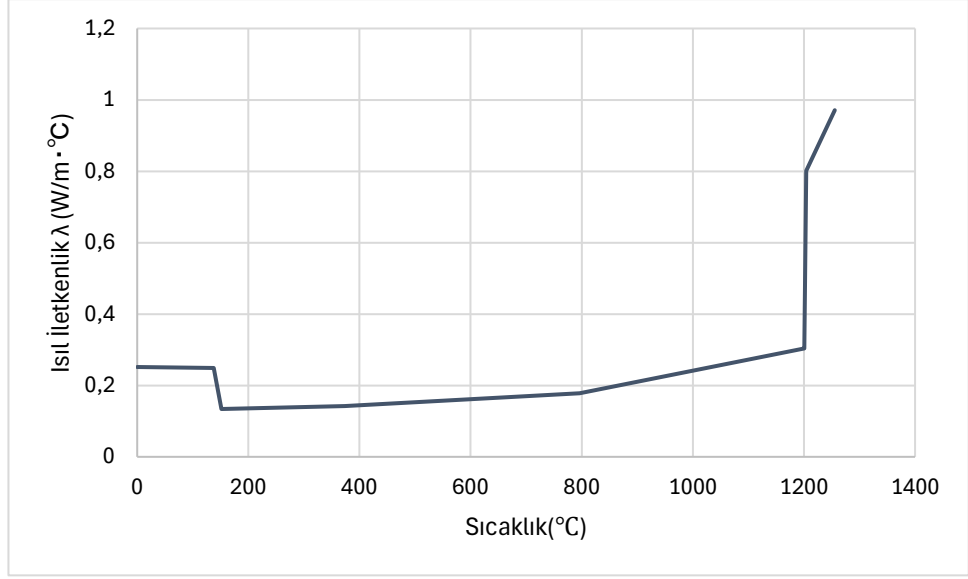
Modelde alçı levhanın yoğunluğu Şekil 5.19’da ve özgül ısısı Şekil 5.20’de ve ısı iletkenliği Şekil 5.21’de (Keerthan & Mahendran, 2013) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir.



Şekil 5.19. Alçıpanın Sıcaklık-Yoğunluk İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013)



Şekil 5.20. Alçıpanın Sıcaklık- Özgül Isı İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013)



Şekil 5.21. Alçıpanın Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Keerthan & Mahendran, 2013)

5.3.3. Kontrplak levha (Plywood)

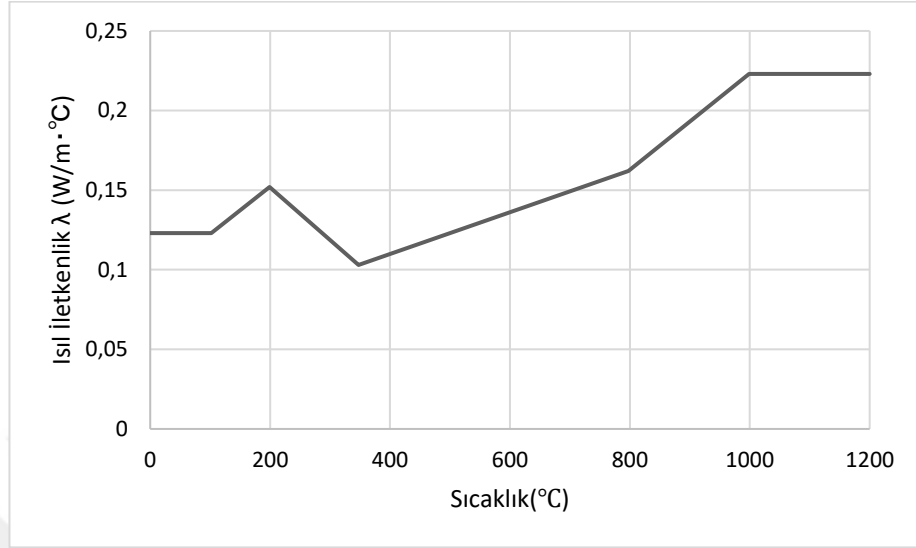
Kontrplak, ahşap katmanlarının birbirine yapıştırılmasıyla elde edilen çok yönlü bir yapı malzemesidir. Doğal ahşabın estetik ve mekanik özelliklerini sunmasına rağmen yangın dayanımı açısından bazı sınırlamalara sahiptir. Ahşap esaslı bir malzeme olduğundan, yangına karşı duyarlıdır ve belirli koşullarda yanıcı özellik gösterebilir.

Bu nedenle, kontrplak uygulanacak mekanlarda levhanın yangın açısından güvenilir olması isteniyorsa, yangına dayanıklı veya yangın geciktirici özelliklere sahip özel kontrplak türleri tercih edilmektedir. Bu tür kaplamalar, üretim aşamasında yangın geciktirici kimyasallarla işlem görerek, yangına maruz kaldıklarında alev almayı geciktirir ve yangının yayılmasını önler.

Yangına dayanıklı kontrplaklar, Avrupa standardı EN 13501-1:2007 + A1:2009'a göre B yanabilirlik sınıfına uygun olarak üretilir ve duvar, tavan ve aynı zamanda zemin kaplaması gibi uygulamalarda kullanılır.

Modelde kontrplak levhanın yoğunluğu, özgül ısı ve ısı iletkenliği(Perera at al. 2022) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Bahsi geçen çalışmada levhanın yoğunluğu 500 kg/m^3 ve özgül ısı $1500 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır ve modelde

de bu şekilde kullanılmıştır. Kontrplak levhanın ısı iletkenliği Şekil 5.22’de gösterilmektedir.

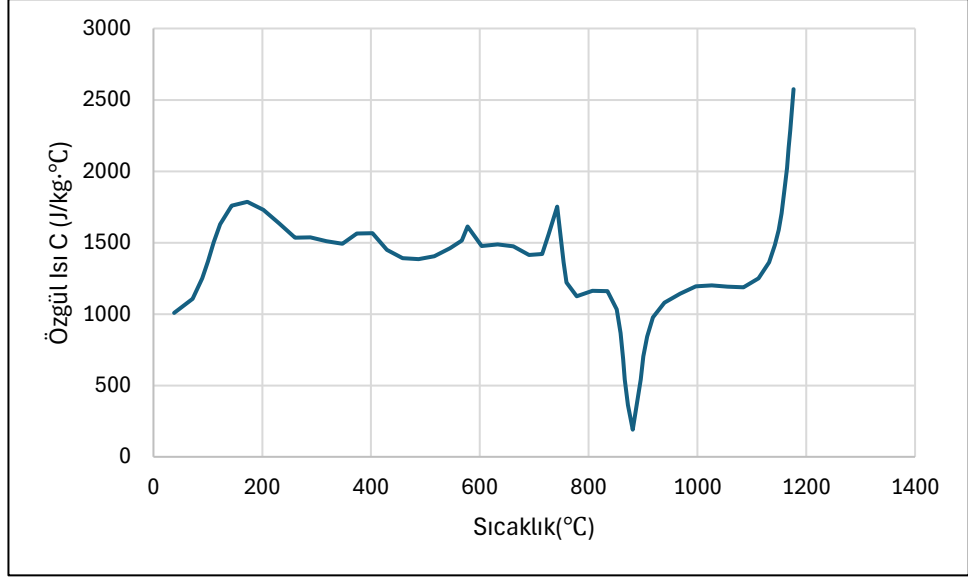


Şekil 5.22. Kontrplak levhanın sıcaklık- ısı iletkenlik ilişkisi (Perera et al., 2022)

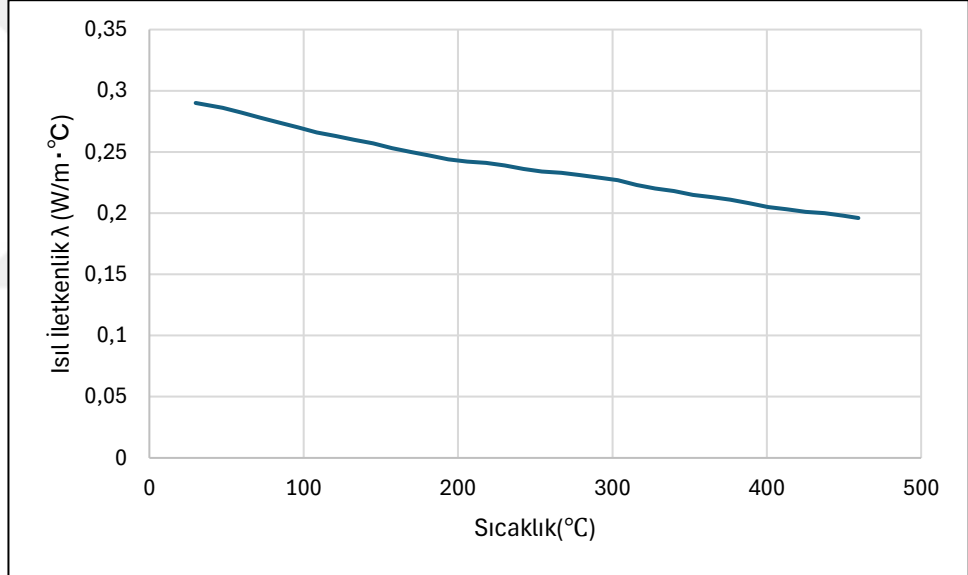
5.3.4. Fibercement

Fibercement, çimento, kum, su ve selüloz liflerinin birleşiminden oluşan kompozit bir yapı malzemesidir. Özellikle yangına karşı üstün dayanıklılığıyla bilinen ve A1 sınıfı yanmazlık özelliğine sahip olan fibercement, olası bir yangın durumunda tutuşmaz ve zehirli gaz salınımı yapmaz, böylece yangının yayılmasını engelleyerek yapının yangına karşı güvenliğini artırır.

Modelde fibercement yoğunluğu, özgül ısı ve ısı iletkenliğ (Gnanachelvam et al., 2022) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Bu çalışmada fibercement levhanın yoğunluğu 1350 kg/m^3 olarak alınmıştır özgül ısı Şekil 5.23’te, ısı iletkenliği Şekil 5.24’te gösterilmektedir ve modelde de bu şekilde kullanılmıştır.



Şekil 5.23. Fibercement Levhanın Sıcaklık- Özgül Isı İlişkisi (Gnanachelvam et al., 2022)



Şekil 5.24. Fibercement Levhanın Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Gnanachelvam et al., 2022).

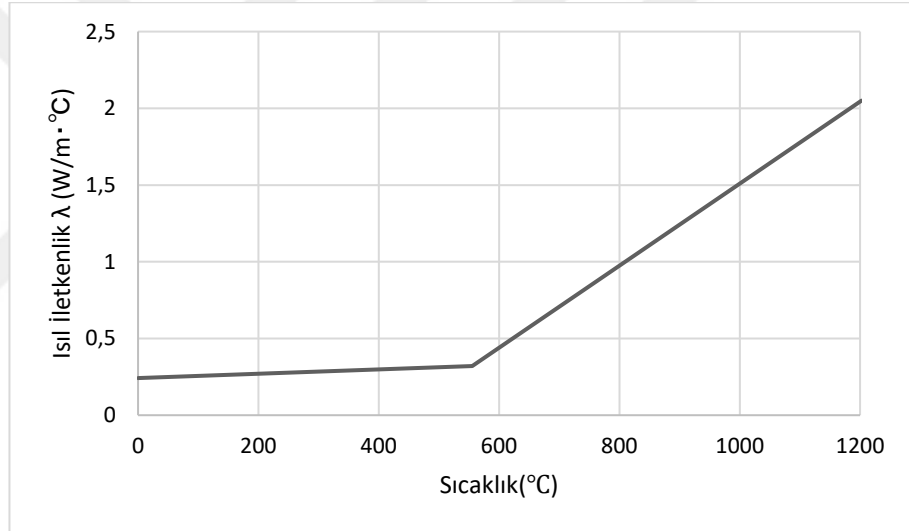
5.3.5. Taşyünü (Rockwool)

Taşyünü, volkanik kayaların yüksek sıcaklıklarda eritilip lif haline getirilmesiyle elde edilen bir yalıtım malzemesidir. Doğal yapısı sayesinde yüksek sıcaklıklara dayanıklıdır ve yangın güvenliği açısından önemli bir rol oynar. Taşyünü, A1 sınıfı "hiç yanmaz" malzeme kategorisinde yer alır ve yangın sırasında erimez veya alev almaz. Bu özellikleri sayesinde yangının yayılmasını engelleyerek can ve mal güvenliğini artırır.

Ayrıca, yangın esnasında duman ve zehirli gaz üretmediği için tahliye ve kurtarma operasyonları sırasında ek bir avantaj sağlar.

Taşyünü, çok iyi bir yangın koruyucu malzeme olmasının yanı sıra ısı ve ses izolasyonu yapmak amacıyla da kullanılır. Bu malzeme binaların cephelerinde, çatı ve duvarlarında yaygın olarak kullanılır.

Modelde taşyününün yoğunluğu, özgül ısısı ve ısı iletkenliği (Perera et al., 2022) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Bahsi geçen çalışmada taşyününün yoğunluğu 100 kg/m^3 ve özgül ısısı $840 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır ve modelde de bu şekilde kullanılmıştır. Taş yününün ısı iletkenliği Şekil 5.25'te gösterilmektedir.



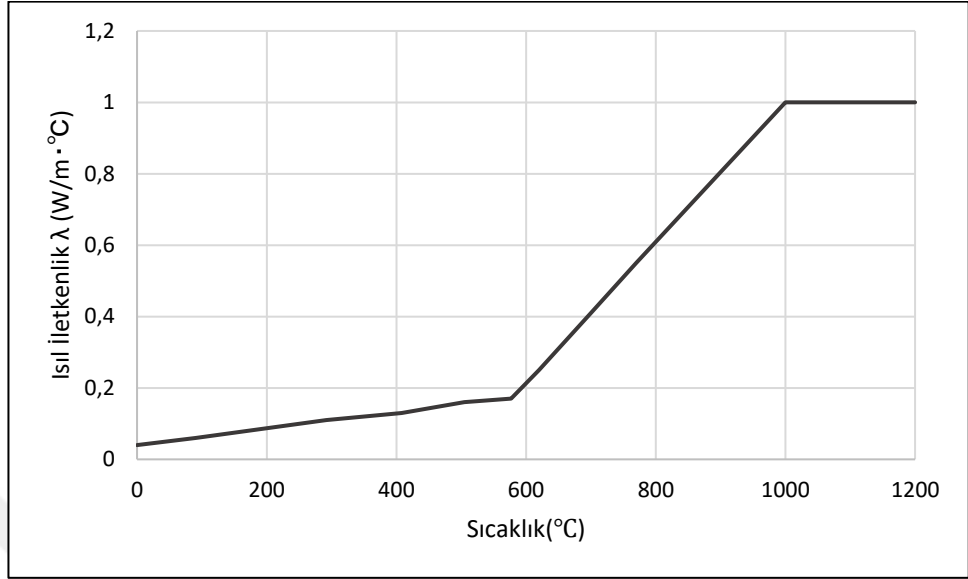
Şekil 5.25. Taşyününün sıcaklık- ısı iletkenlik ilişkisi (Perera et al., 2022)

5.3.6. Mineral yünü (Mineralwool)

Mineral yünü, doğal minerallerden üretilen ve yüksek yangın dayanımı sunan bir inorganik yalıtım malzemesidir. Binalarda yangın güvenliğini artırmada kritik rol oynar çünkü yapısal olarak yanmaz ve ısıya dayanıklıdır.

Modelde mineral yününün yoğunluğu, özgül ısısı ve ısı iletkenliği (Yu et al., 2021) tarafından yapılan araştırmaya dayanarak belirlenmiştir. Bahsi geçen çalışmada mineral yününün yoğunluğu 120 kg/m^3 ve özgül ısısı $840 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ olarak alınmıştır ve

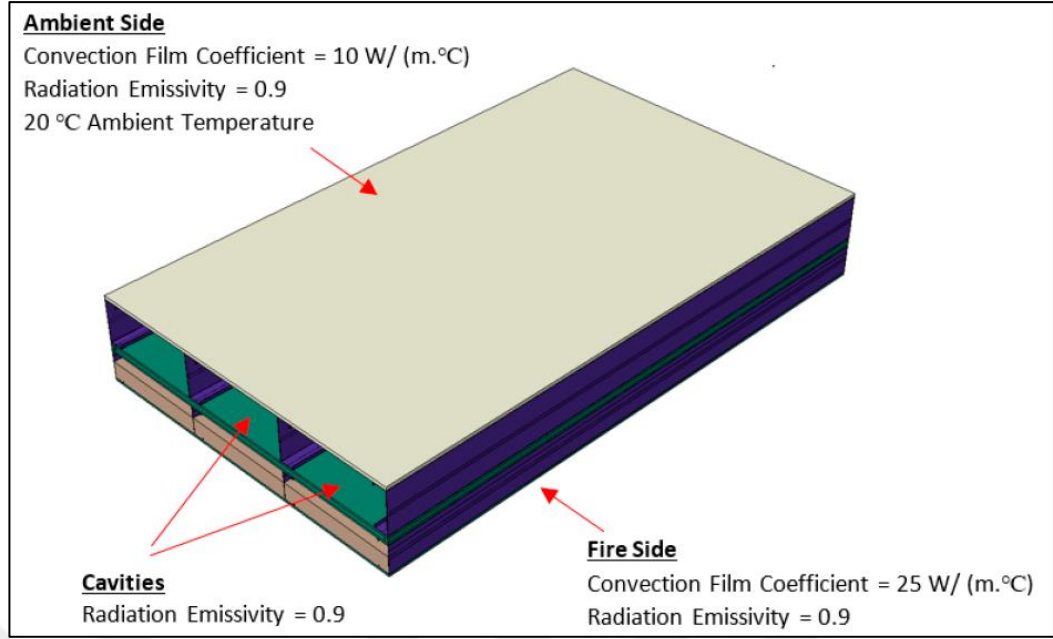
modelde de bu şekilde kullanılmıştır. Mineral yününün ısı iletkenliği Şekil 5.26’da gösterilmektedir.



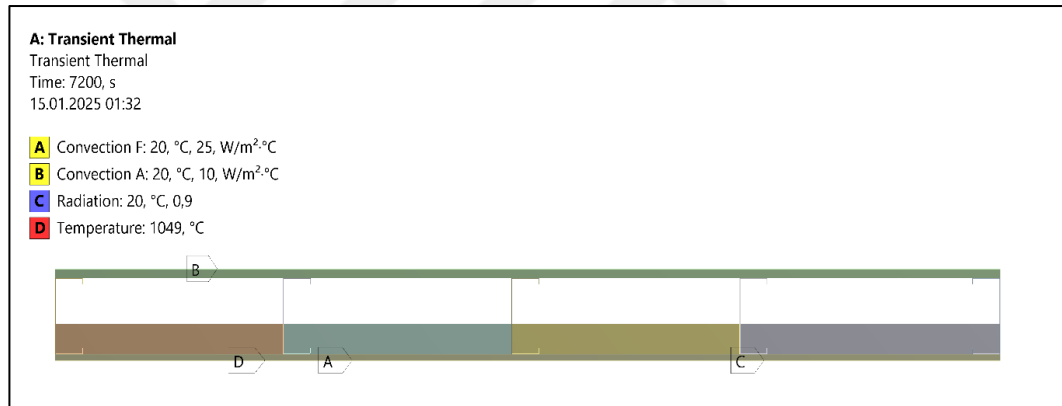
Şekil 5.26. Mineral Yünün Sıcaklık- Isıl İletkenlik İlişkisi (Yu et al., 2021)

5.4. Modele Uygulanan Termal Özellikler

Modellerin yangına karşı verdikleri tepkiyi ölçmek amacıyla sadece malzeme özelliklerini tanımlamak yetmemektedir. Analizin yapılacağı ANSYS Sonlu Elamanlar programına, modelin içinde bulunduğu ortamın sınır koşullarını tanıtmak gerekir. Bu sebeple modellerin yangın alan ve almayan kısımları için konveksiyon katsayısı atanmıştır. (Perera et al., 2022) çalışmasında yangın alan kısımda (fire side) konveksiyon katsayısını 25 W/m.°C kabul ederken, yangın almayan kısımda (ambient side) 10 W/m.°C olarak kabul etmiştir. Aynı zamanda bütün model için bir radyasyon emisivitesi tanımlanmış olup bu değer 0,9’dur. Bu değer, modelin yangın alan ve almayan kısımlarına ve eğer varsa modelde yangından etkilenecek olan boşluk kısımlarına tanımlanmıştır. Modelin yanmadan önceki sıcaklığı, diğer bir deyişle ortam sıcaklığı 20°C olarak verilmiştir. Şekil 5.27’de model üzerine tanıtılan değerlere yer verilmiştir. Şekil 5.28’de model üzerinde bu değerler gösterilmiştir.



Şekil 5.27. Sonlu elemanlar modelindeki etkileşimler ve sınır koşulları (Perera, Upasiri, Poologanathan, O’Grady, et al., 2022).



Şekil 5.28. C Profilden oluşan validasyon modelinin ANSYS’den en kesit görüntüsü ve sınır koşulları(Perera et al., 2022).

5.5. Yangın Eğrileri

Modeller üzerine uygulanacak olan yangın eğrileri, Avrupa standartlarında kabul görmüş Standart ISO-834 ve Smouldering (CEN 2013) ve bunlarla birlikte yapılan bir dizi yangın testinden sonra kabul görmüş Hızlı (Fast) ve Yavaş (Slow) (Zhang et al. 2012, Cirpici et al. 2020, Cirpici et al. 2019) yangın eğrileridir. Bu yangın eğrilerinin etkisinde, belirlenen parametreler doğrultusunda modüler elemanın yangına karşı performansı araştırılmıştır.

5.5.1. Standart (ISO 834) sıcaklık-zaman eğrisi ((ISO) 2014)

ISO 834 yangın eğrisi uluslararası kabul görmüş bir eğri olup zamanlar logaritmik artış göstermektedir. Yapı malzemelerinin ve yapı elemanlarının yangına dayanıklılığını test etmek için referans olarak alınır. 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

5.5.2. FAST (Hızlı) yangın eğrisi

Yangının hızlı bir şekilde geliştiği senaryolar için kullanılan yangın eğrisidir. Kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşır. Yanıcı maddelerin yoğunlukta olduğu ortamlar için kullanılır. Bu tez için Fast yangın eğrisi kullanılarak analiz edilen modellerde yangın süresi 1 saat (3600 saniye)'dir.

5.5.3. SLOW (Yavaş) yangın eğrisi

Yangının yavaş bir şekilde geliştiği senaryolar için kullanılan yangın eğrisidir. Sıcaklık yükselmesi uzun bir zaman dilimine yayılmıştır. Yangın yükünün düşük veya yanıcı maddelerin az olduğu ortamlarda kullanılır. Bu tez için Slow yangın eğrisi kullanılarak analiz edilen modellerde yangın süresi 1 saat (3600 saniye)'dir.

5.5.4. Smouldering sıcaklık-zaman eğrisi (CEN 2013)

Smouldering yangın eğrisi alevsiz ve düşük sıcaklıklı yanma süreçlerini ifade etmek için kullanılır. Smouldering sıcaklık-zaman eğrisi şu şekilde elde edilmektedir (CEN 2013).

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

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

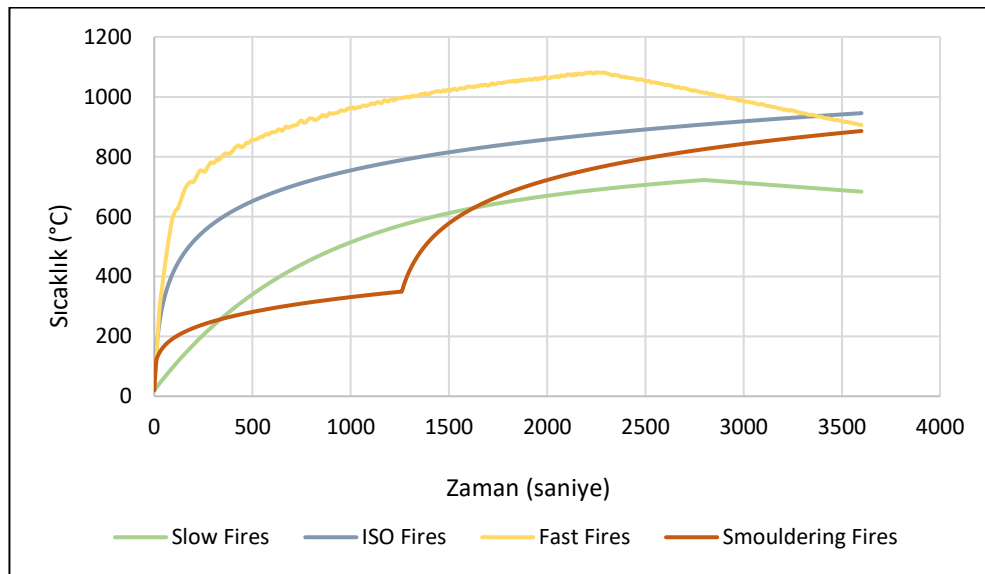
21. dakikadan itibaren yangın eğrisinin değişimi;

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

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

t – Zaman

Şekil 5.29’da gösterilen grafikte modellerin yangın analizlerinde kullanılan ve Avrupa Standartlarında kabul görmüş 4 farklı yangın eğrisinin sıcaklık-zaman karşılaştırılmaları verilmiştir. Yavaş yangın etkisinde zamana bağlı olarak yangın sıcaklığı yavaş bir şekilde artmaktadır. Hızlı yangınlar ise, sıcaklığın birden yükseldiği ve daha sonra da yüksek seyrettiği bir yangın eğrisidir. Standart yangın (ISO-834) eğrisi sıcaklık-zamana bağlı normal derecelendirilmiş bir yangın eğrisidir. Smouldering yangın eğrisi ise yangın sıcaklığının zamanla değişken olarak seyrettiği bir yangın eğrisidir.



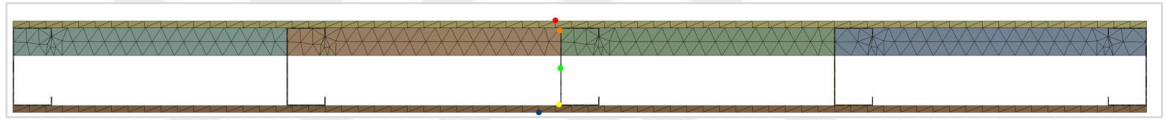
Şekil 5.29. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması

5.6. Modellerde Sıcaklık Ölçümü ve İsimlendirme

Modellerde sıcaklık değerleri noktasal olarak ölçülmüştür. Şekil 5.30’da ve Şekil 5.31’de görüldüğü üzere modelin üst ve alt noktalarından birer tane (kırmızı ve mavi), çelik elemanın üst orta ve alt noktasından da birer tane olmak üzere (turuncu, yeşil ve sarı) toplam 5 noktadan sıcaklık değerleri alınarak farklı malzeme özellikleri ve yangın eğrileri altında modelin davranışı tespit edilmiştir.



Şekil 5.30. SHS elemanlarla oluşturulan model üzerinde okunan sıcaklık değerlerinin noktalarının belirtilmesi.



Şekil 5.31. C elemanlarla oluşturulan model üzerinde okunan sıcaklık değerlerinin noktalarının belirtilmesi.

- Kırmızı ile gösterilen noktadaki değer T1 değeri
- Turuncu ile gösterilen noktadaki değer T2 değeri
- Yeşil ile gösterilen noktadaki değer T3 değeri
- Sarı ile gösterilen noktadaki değer T4 değeri ve
- Mavi ile gösterilen noktadaki değer T5 değeri olarak adlandırılacaktır. Bu noktalardan okunan T2, T3 ve T4 değerleri kullanılan yalıtım malzemelerinin yapı çeliği üzerindeki yangın performanslarını belirttiği için sık olarak kullanılacaktır. Bunların haricinde olan T1 ve T5 değerleri modelin yangına maruz kalan ve yangına maruz kalmayan alanlarda spesifik noktalardaki sıcaklık değerleridir.

Modelleri adlandırırken SHS (kutu) profiller için “k” harfi ve C profiller için “cc” harfleri kullanılmıştır. Bu harflerden sonra sırasıyla çelik elemanın boyu ve et kalınlığı gösterilip daha sonra dış kaplamanın kalınlığı ve çeşidi belirtilip son olarak iç yalıtım

malzemesi kısaltılarak kullanılmıştır. Kısaltmalar mineral yün için “m”, taş yünü için “r”, alçı panel için “pl”, kontrplak için “ply” ve son olarak fibercement için “f” şeklindedir.

Örneğin, SHS50×2 çelik kutu profillerden oluşan ve içinde mineral yün malzemesi bulunup dışında 12 mm fibercement ile kaplanmış malzeme için isimlendirme k_50_2_12pl_m şeklinde olacaktır.

C profiller için örnek olarak, CC140×75×19×4 mm profillerden oluşan ve içinde taş yünü malzemesi bulunup dışında 32 mm kontrplak ile kaplanmış malzeme için isimlendirme cc_140_4_32ply_r şeklinde olacaktır.

5.7. Mesh Özellikleri

Modellerin analizi için kullanılan mesh boyutları genel olarak;

- 0,03-0,04 metre büyüklüklerinde,
- 30000-100000 düğüm (nodes) aralığında
- 100000-500000 eleman sayısı aralığında kullanılmıştır.

Örnek olarak; Çizelge 5.1’de k_50_2_12f_m modeli için yapılan meshlemenin mesh boyutu, boğum sayısı ve eleman sayısı gösterilmiştir.

Çizelge 5.1. Mesh özelliklerinin düğümler ve eleman sayılarına göre karşılaştırması

Mesh size (m)	0,02	0,03	0,04	0,05
Nodes(Düğümmler)	149934	61864	34834	21427
Eleman Sayısı	537465	201278	109155	63919

Çizelge 5.1’de gösterilen tabloda görüldüğü üzere 0,02 m, 0,03 m, 0,04 m ve 0,05 metre kullanılan mesh boyutları ile elde edilen düğüm (nodes) ve eleman sayıları gösterilmiştir. Çizelge 5.1’den de görüldüğü gibi mesh büyüklüğü ne kadar küçük veya ideale yakın olursa model o kadar küçük parçalara bölünmekte ve modelden alınacak olan analiz değerleri gerçeğine o kadar çok yaklaşmaktadır.

Bu değerlerin yanı sıra mesh kalitesi için üç ayrı parametreye bakılmış ve değerlendirilmiştir. Mesh kalitesinin kontrolü için ANSYS Transient Thermal programının Mesh kısmında skewness, aspect ratio ve element quality değerleri ayrı ayrı karşılaştırılmıştır. Üç ayrı değerlendirme kriteri için de iyi sonuçların ortaya çıkması hedeflenmiştir. Mesh kalitesinin değerlendirilmesi element quality, skewness ve aspect ratio değerlendirme ölçütleri ile değerlendirilerek Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. 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.

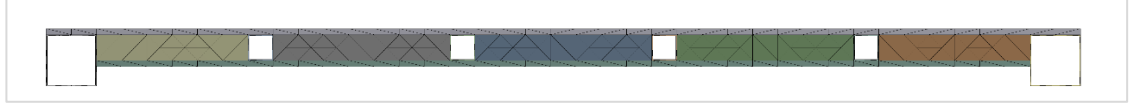
Çizelge 5.2. Mesh özelliklerinin Skewness, Aspect Ratio ve Element Quality Değerlerine göre karşılaştırılması.

Mesh boyutu (m)	0,02	0,03	0,04	0,05
Skewness	0,37217	0,48453	0,58928	0,68718
Aspect Ratio	3,3625	4,9516	6,9834	9,2585
Element Quality	0,7063	0,6068	0,51432	0,43156

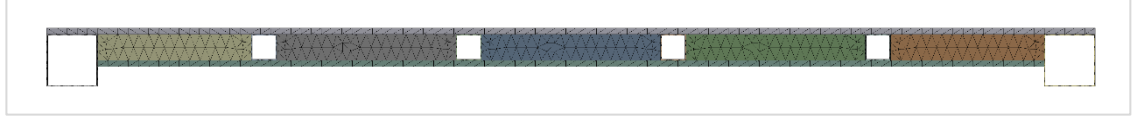
Genel olarak;

- Skewness değeri için 0-0,5 arasındaki değerler çok iyi
- Element quality değeri için 0,5-1 arasındaki değerler iyi ve
- Aspect ratio değeri için 1-10 arası kabul edilebilir mesh kalitesini gösterir.
- Mesh metodu olarak Tetrahedron kullanılmıştır.

Şekil 5.32’de k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,05 metre büyüklüğünde atılan mesh ve Şekil 5.33’te ise k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,02 metre büyüklüğünde atılan mesh gösterilmektedir.



Şekil 5.32. k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,05 metre büyüklüğündeki mesh görüntüsü.

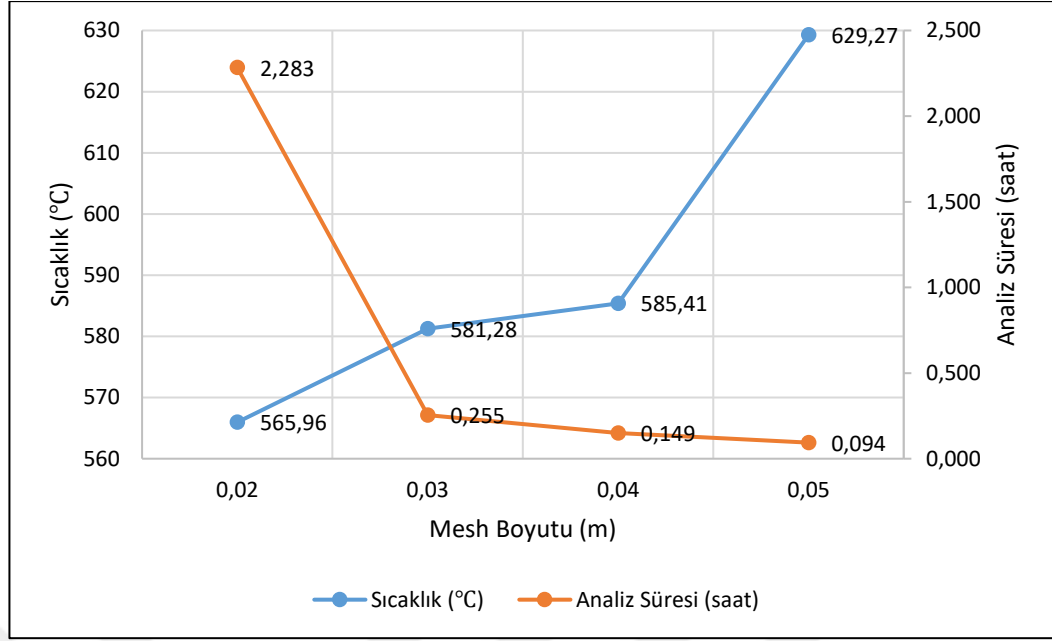


Şekil 5.33. k_50_2_12f_m modelinde kullanılan 0,02 metre büyüklüğündeki mesh görüntüsü.

Mesh boyutlarının analiz süresine etkisi

Çizelge 5.1’de görüldüğü üzere modellemede kullanılan mesh boyutu azaldıkça eleman sayıları artmaktadır ve bu da programın daha fazla parçayı analiz etmesi anlamına gelmektedir. Dolayısıyla eleman sayısı ne kadar fazla olursa analiz süresi de o kadar uzun olacaktır. Aynı zamanda kullanılan bilgisayarın özelliklerinin ve kalitesinin de analiz süresini etkileyen faktörlerden biri olduğu unutulmamalıdır.

Şekil 5.34’te sırasıyla 0,02 m, 0,03 m, 0,04 m ve 0,05 m mesh boyutları için programın analiz süreleri saat olarak verilmiştir ve aynı zamanda her bir mesh boyutu için modelin analiz sonucunda ölçülen sıcaklık değerlerinin hassasiyeti de görülmektedir. Şekil 5.34’e bakıldığında optimum süre ve sıcaklık hassasiyetinin 0,03 m’lik mesh boyutunda olduğu görülmüştür. Bu sebeple analiz yapılırken bu mesh boyutu kullanılmıştır.

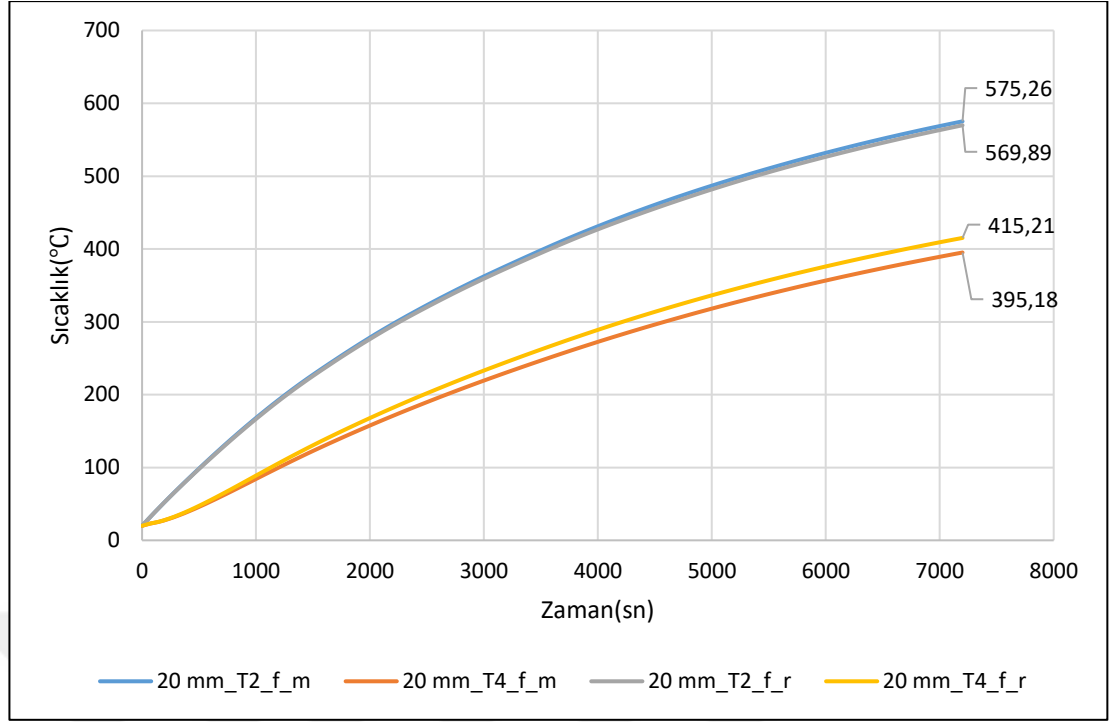


Şekil 5.34. Mesh boyutlarına göre bilgisayarın analiz süresi ve ölçülen model sıcaklıklarının hassasiyeti.

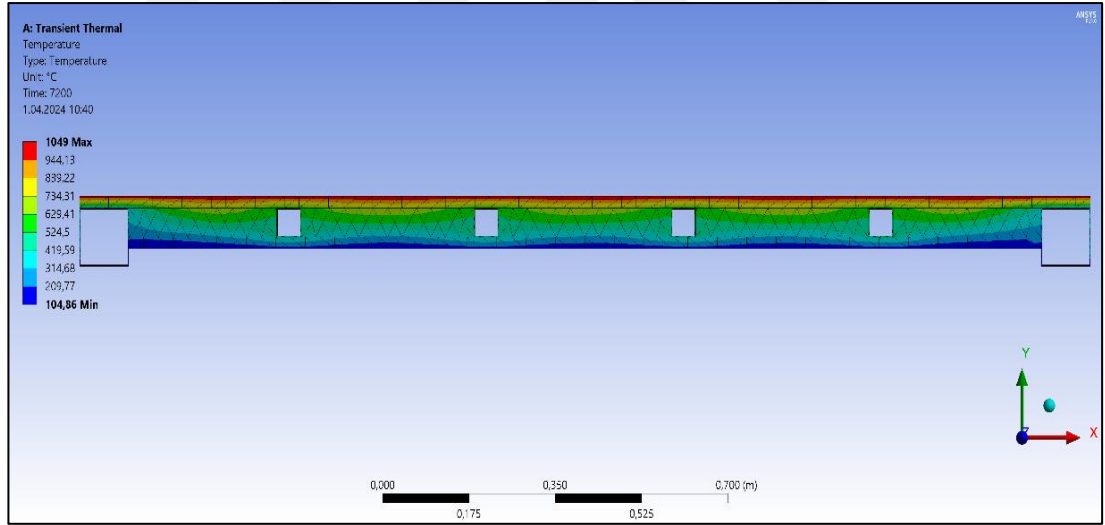
5.8. Farklı Yalıtım Malzemelerinin Yangın Performansına Etkisi

SHS50'lik çelik kutu elemanlarının, et kalınlıklarının 2 mm, yalıtım kaplamasının fibercement ve 20 mm olduğu duvar modelinde değişken olarak farklı yalıtım malzemeleri belirlenmiş, Standart ISO-834 yangın eğrisi model üzerine etki ettirilmiş, 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmış ve ara yalıtım malzemeleri farklı olan modellerin T2 ve T4 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.35'te gösterilmiştir.

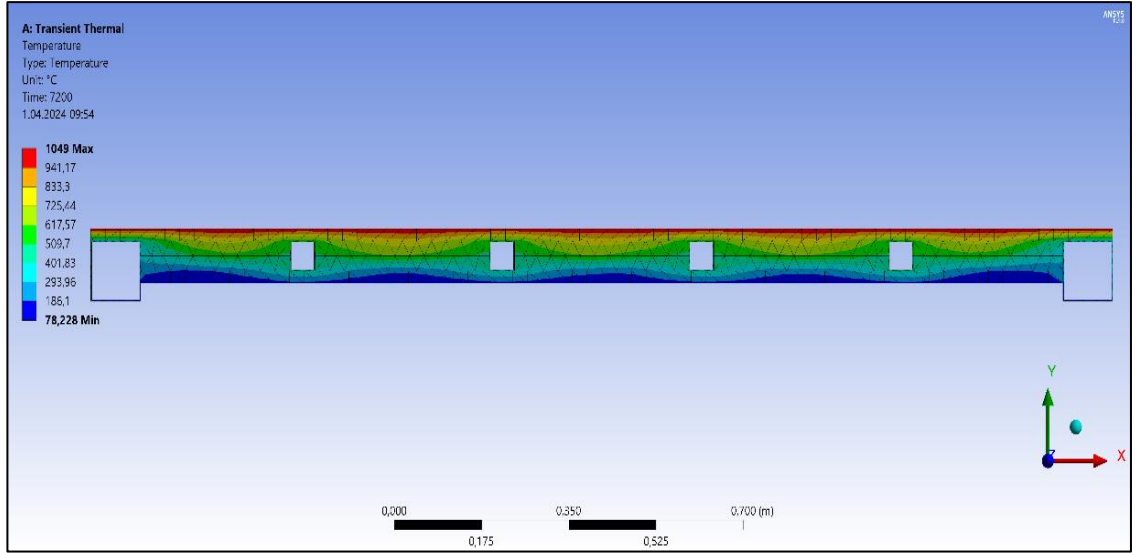
Mineral yün kullanılarak yalıtılan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.36'da, taş yünü kullanılarak yalıtılan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.37'de gösterilmiştir.



Şekil 5.35. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_20f_m, k_50_2_20f_r).

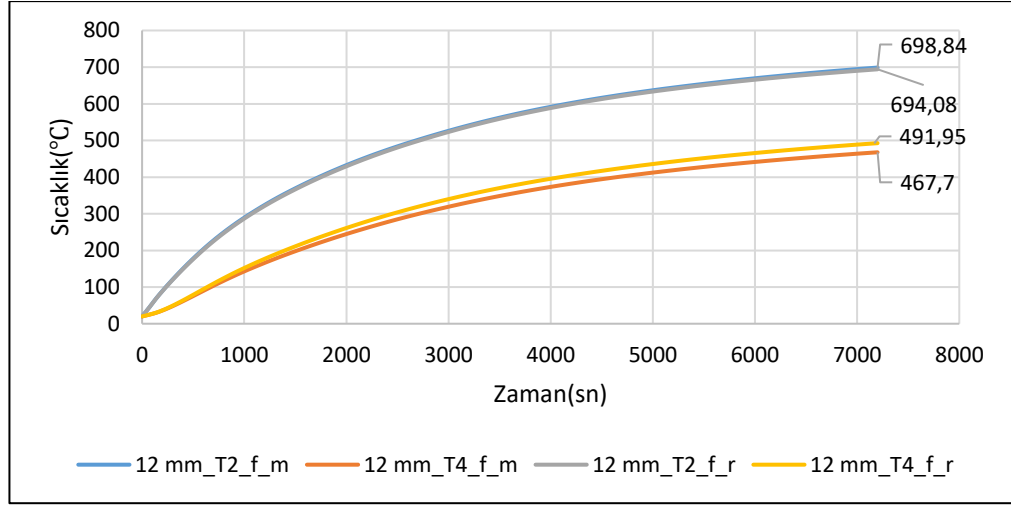


Şekil 5.36. k_50_2_20f_r modelinin sıcaklık dağılımı

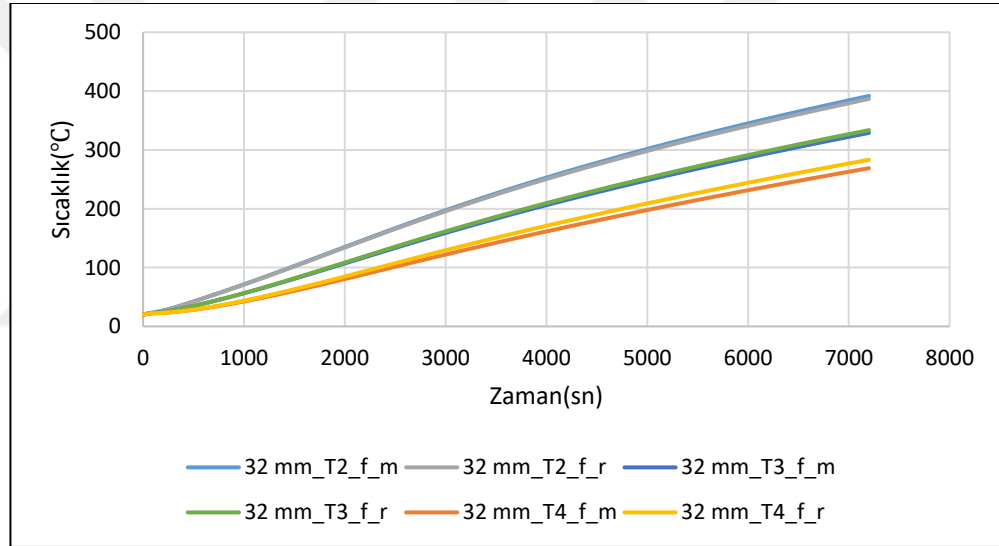


Şekil 5.37. k_50_2_20f_m modelinin sıcaklık dağılımı

Şekil 5.35'te görülen grafikte SHS50×2 mm'lik kolonlardan oluşan ve 20 mm kalınlıkta fibercement kaplaması ile kaplanan modüler duvar modelinde duvarın içinde farklı yalıtım malzemesi kullanılarak modeldeki çelik elemanın yangından koruma performansları T2 ve T4 noktalarında incelenmiştir. Bu grafiğe göre mineral yünü ve taş yünü malzemelerinin yangın performansları arasında belirleyici bir fark görülmemiş olup sonucu desteklemek için çelik malzemenin et kalınlıkları (2 mm) ve duvar kaplaması türü (fibercement) sabit tutarak ara yalıtım malzemelerinin (mineral yün ve taş yünü), kaplama kalınlığının 12 mm olduğu durumda T2 ve T4, 32 mm olduğu durumda ise T2, T3 ve T4 noktalarından sıcaklık değerleri ölçülerek sonuçlar sırasıyla Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_12f_m, k_50_2_12f_r).



Şekil 5.39. Farklı yalıtım malzemelerinin çelik elemanın sıcaklığına etkisi (k_50_2_32f_m, k_50_2_32f_r).

Şekil 5.35'teki grafikten anlaşılacağı üzere 20mm fibercement yalıtım kaplaması bulunan ve SHS50×2'lik kolonlardan meydana gelen modelde ara yalıtım malzemesi olarak mineral yünü kullanıldığı takdirde T2 noktasından ölçülen sıcaklık değeri 575,26°C ve T4 noktasından ölçülen sıcaklık değeri 395,18°C iken, aynı özelliklerdeki modelde ara yalıtım malzemesinin taş yünü olarak kullanılması durumunda T2 noktasından ölçülen sıcaklık değeri 569,89°C ve T4 noktasından ölçülen sıcaklık değeri 415,21°C'dir. İki malzeme arasında 5-20°C fark vardır ve bu fark ihmal edilebilir düzeydedir. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'daki grafiklerden de anlaşıldığı üzere mineral yünü ve taş yününün yangın performansları arasında belirleyici bir fark oluşmamıştır. Bu

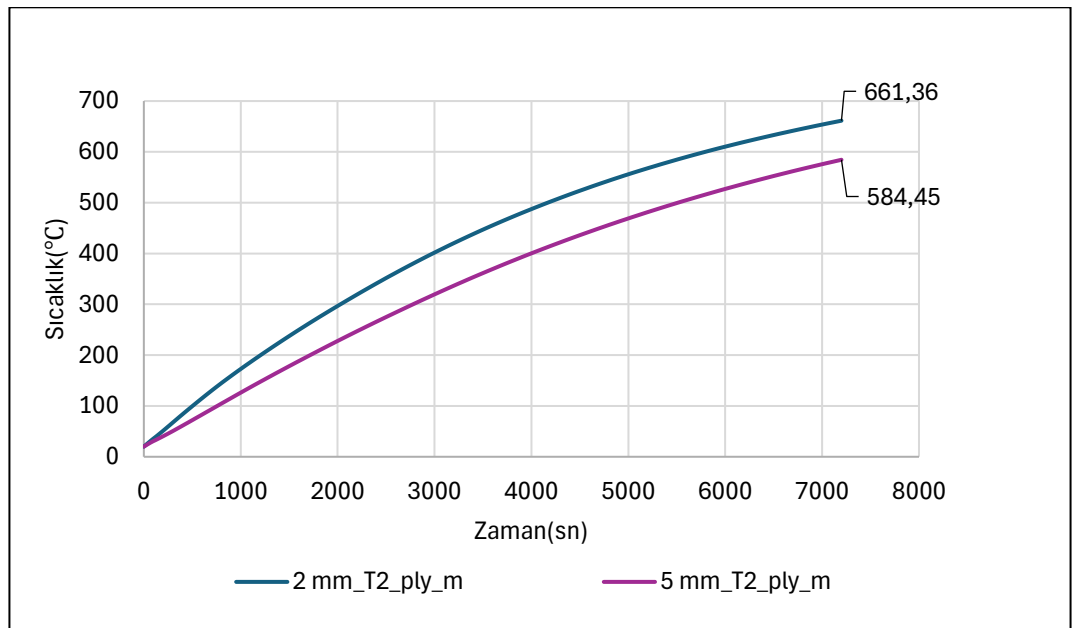
sebeple bundan sonra analizi yapılacak olan modellerde, bilgisayardaki analiz süresi performansı nedeniyle mineral yünü ile devam edilmiştir. Yani ara yalıtım malzemesi tüm analizlerde aynı olacaktır.

5.9. Çelik Elemanların Et kalınlığının Yangın Performansına Etkisi

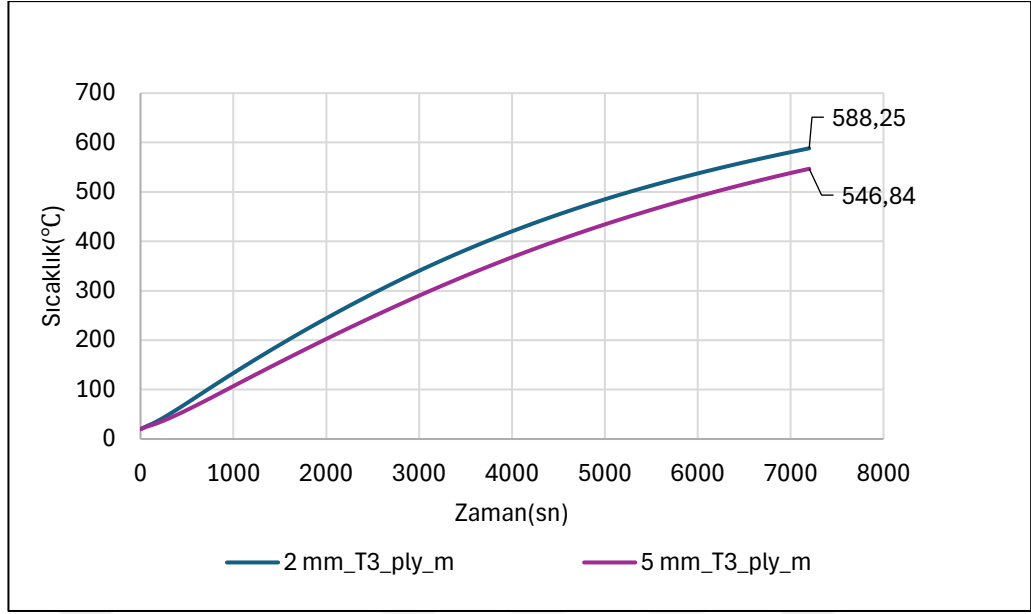
Bu parametre iki başlık altında incelenmiştir. Kutu profiller için ve C profiller için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır.

5.9.1. SHS (Kutu) elemanların et kalınlığının yangın performansına etkisi

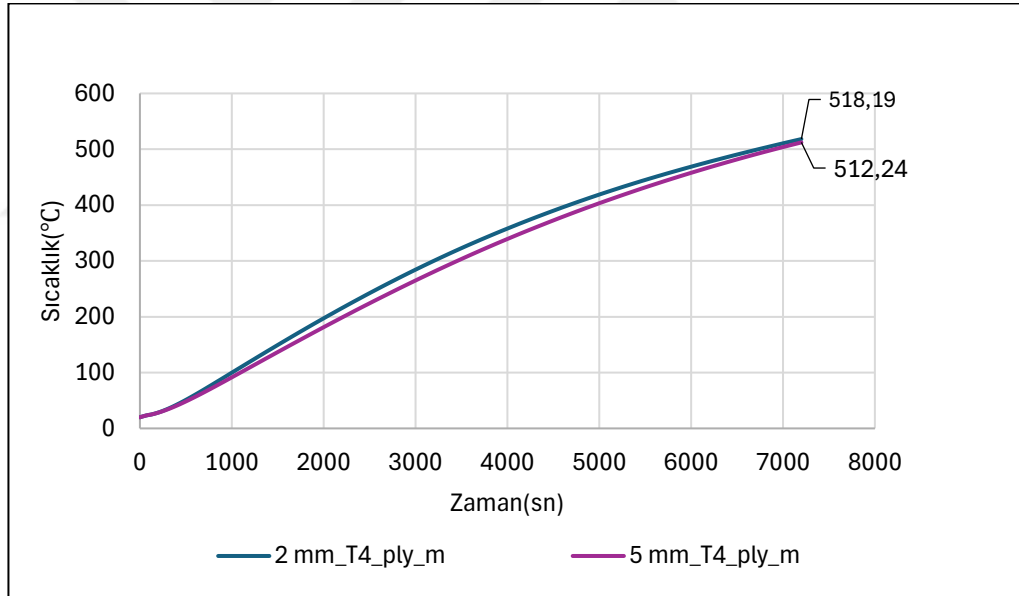
SHS50'lik çelik kutu elemanlarının, yalıtım kaplamasının kontrplak ve 20 mm olduğu duvar modelinde değişken olarak farklı et kalınlıkları belirlenmiş, Standart ISO834 yangın eğrisi model üzerine etki ettirilmiş, 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmış ve et kalınlıkları sırasıyla 2 mm ve 5 mm olan SHS50'lik elemanlardan oluşan modellerin T2 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.40'da, T3 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.41'de ve T4 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.42'de gösterilmiştir.



Şekil 5.40. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

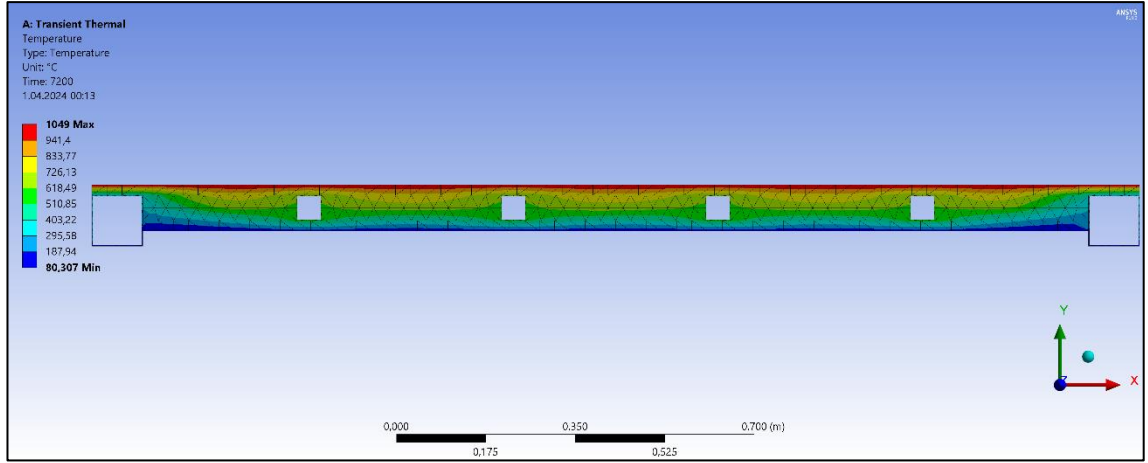


Şekil 5.41. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

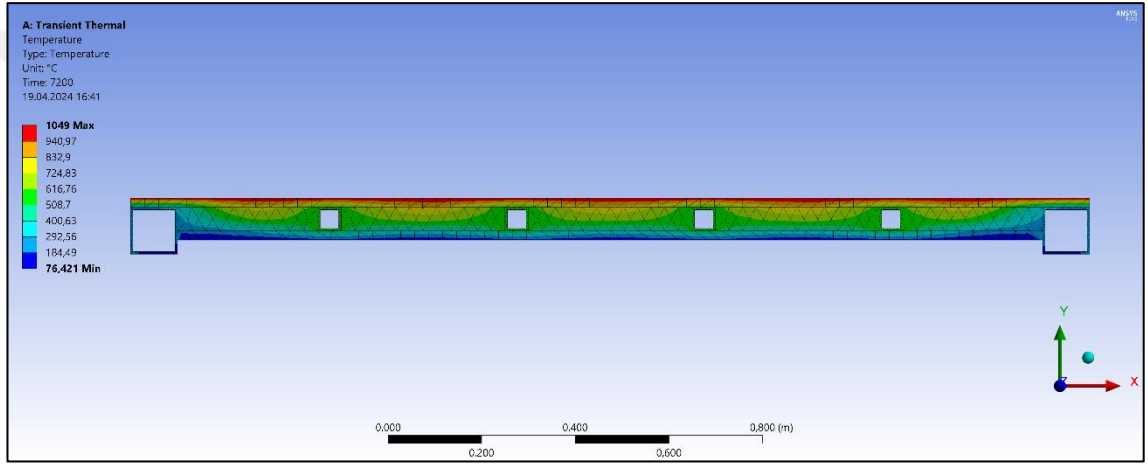


Şekil 5.42. k_50_2_20ply_m ve k_50_5_20ply_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

SHS50×2 mm’lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve sabit yalıtım kaplaması/kalınlığı olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.43’te, SHS50×5 mm’lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve sabit yalıtım kaplaması/kalınlığı olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.44’te gösterilmiştir.



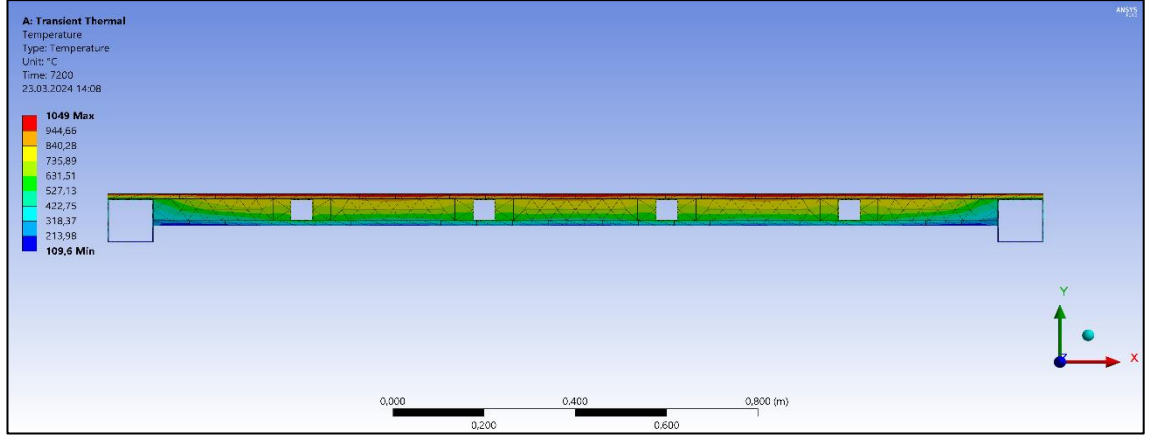
Şekil 5.43. k_50_2_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı



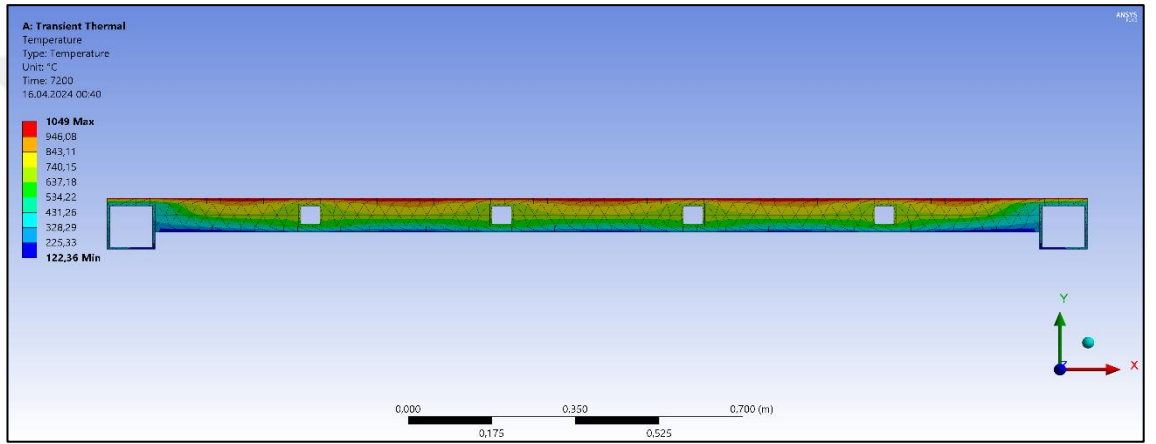
Şekil 5.44. k_50_5_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı

Kolonları SHS50×2 mm çelik profilden oluşan ve 12 mm alçı panel kaplaması ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.45'te, Kolonları SHS50×5 mm çelik profilden oluşan ve 12 mm alçı panel kaplaması ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.46'da gösterilmiştir. Bu modellerin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri Şekil 5.47'de gösterilmiştir.

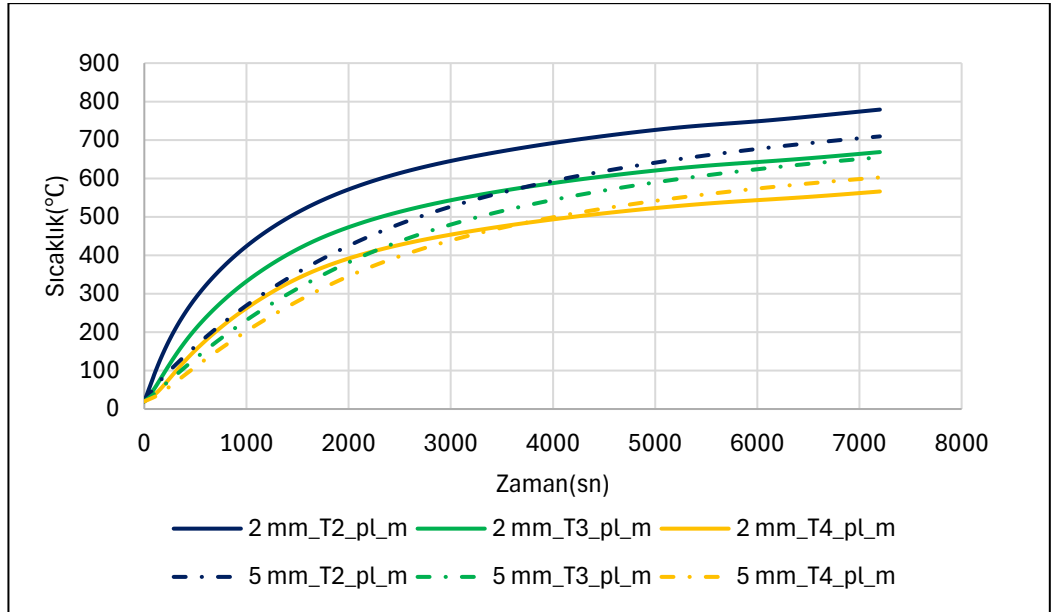
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 5.45. k_50_2_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı



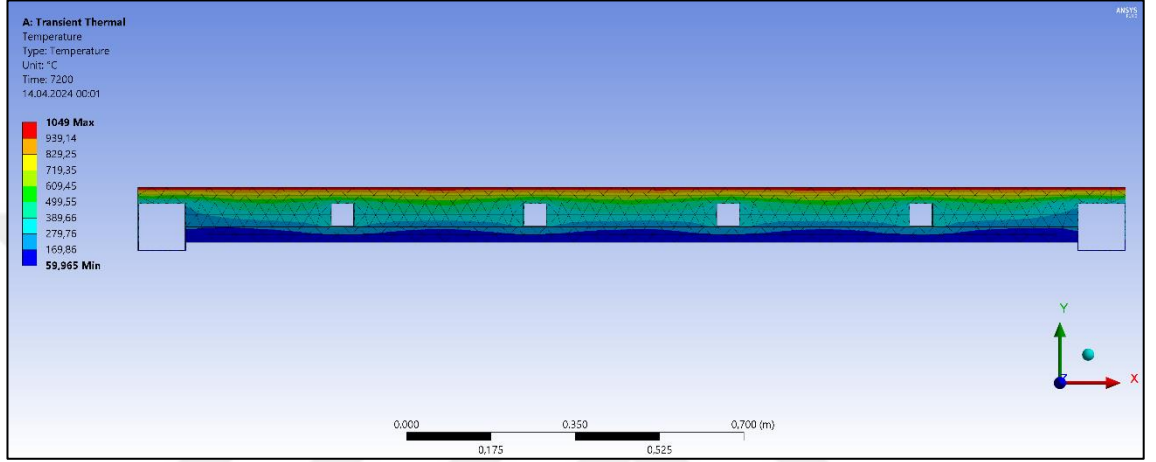
Şekil 5.46. k_50_5_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı



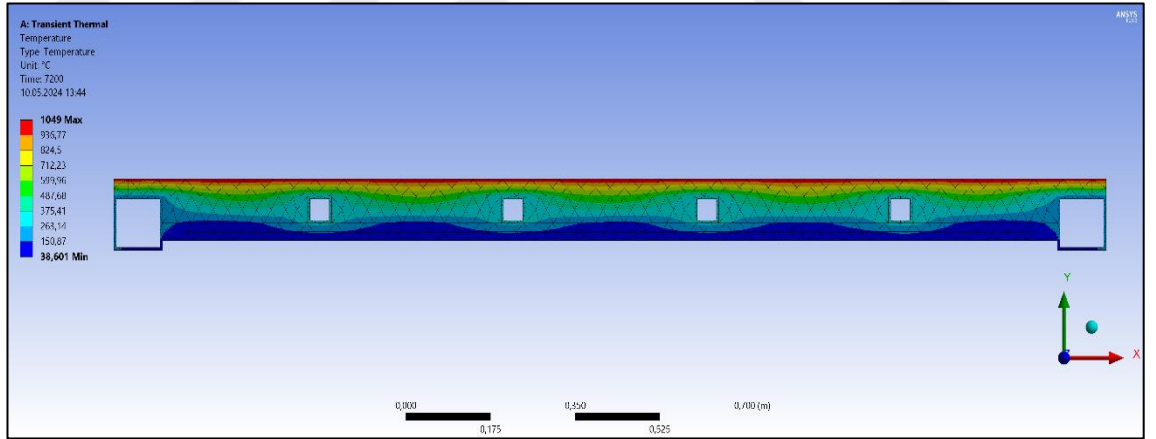
Şekil 5.47. k_50_2_12pl_m ve k_50_5_12pl_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

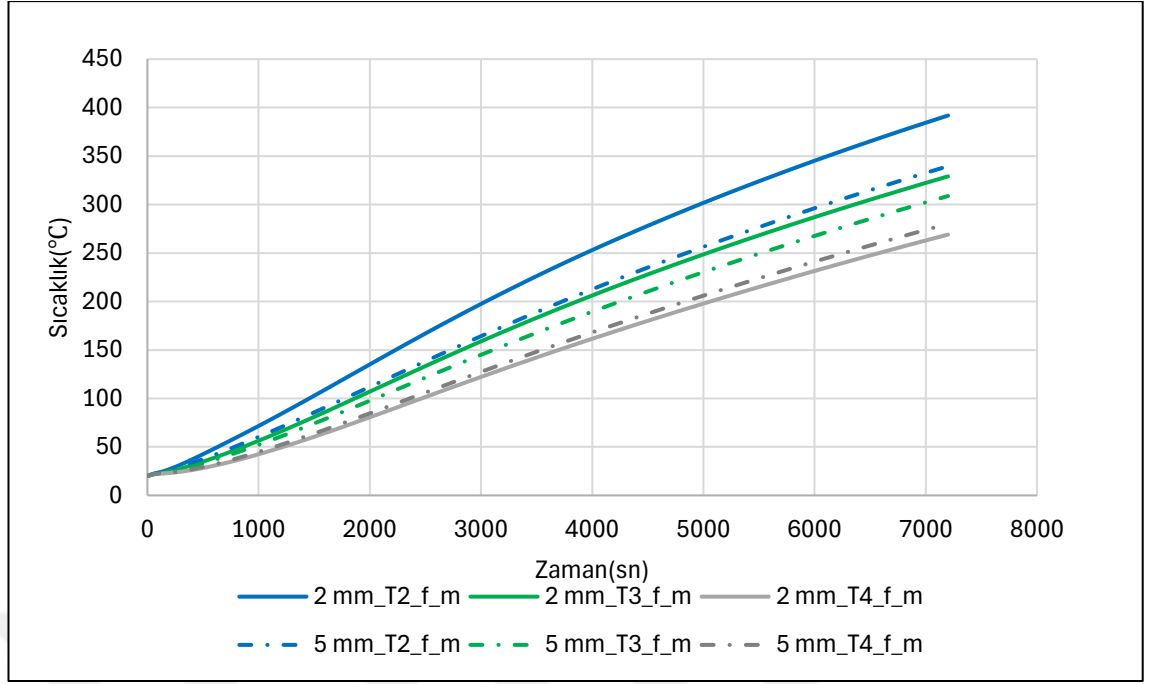
Kolonları SHS50×2 mm çelik profilden oluşan ve 32 mm fibercement kaplaması ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.48’de, Kolonları SHS50×5 mm çelik profilden oluşan ve 32 mm fibercement kaplaması ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.49’ da gösterilmiştir. Bu modellerin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri Şekil 5.50’de gösterilmiştir.



Şekil 5.48. k_50_2_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.49. k_50_5_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.50. k_50_2_32f_m ve k_50_5_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

Şekil 5.40, Şekil 5.41 ve Şekil 5.42’de görülen grafiklerde SHS elemanlardan oluşan ve 20 mm yalıtım kaplaması kalınlığına sahip modüler yapının çelik elemanının profil et kalınlıkları 2 ve 5 milimetre olmak üzere değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiştir ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda 50×50 mm kutu profil enkesitine, 20 milimetre kontrplak yalıtım kaplamasına ve 2 mm çelik profil et kalınlığına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 661,36°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 588,25°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 518,19°C olurken 5 mm çelik profil et kalınlığına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 584,45°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 546,84°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 512,24°C olduğu görülmektedir. Modelin yalıtım kalınlıkları değiştirilerek 12 milimetre alçı panel kaplaması ve 32 milimetre fibercement levha kaplaması kullanılarak analiz tekrarlanmıştır. Analiz sonucu 12 milimetrelik yalıtım kaplaması için ölçülen T2, T3 ve T4 sıcaklık değerleri Şekil 5.47’de ve 32 milimetrelik yalıtım kaplaması için ölçülen T2, T3 ve T4 sıcaklık değerleri Şekil 5.50’de karşılaştırılmıştır. 5 milimetrelik çelik profillerin bulunduğu modellerde 2 milimetrelik çelik profillerin bulunduğu modellere nispeten okunan noktalardaki sıcaklık değerleri daha düşüktür ve T2, T3 ve T4 noktaları arasındaki sıcaklık değerleri farkı, 12 milimetrelik yalıtım kaplaması ile kaplanan

modeller için Çizelge 5.3'te, 32 milimetrelik yalıtım kaplaması ile kaplanan modeller için Çizelge 5.4'te verilmiştir. Sıcaklık değerleri farkı en yüksek olarak T2 noktalarında 12 milimetrelik alçıpanel kaplaması için 69,76°C, 32 milimetrelik fibercement kaplaması için 52,26°C okunmuştur. Yapılan analizlerde her iki yalıtım malzemesi kalınlığındaki 5 milimetre et kalınlığına sahip modellerin T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri, 2 milimetre et kalınlığına sahip modellerin T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değerinden daha yüksek sonuç vermiştir.

Çizelge 5.3. k_50_2_12pl_m ve k_50_5_12pl_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.

	k_50_2_12pl_m	k_50_5_12pl_m	Fark
T2(°C)	779,12	709,36	69,76
T3(°C)	668,56	654,94	13,62
T4(°C)	566,05	602,66	-36,61

Çizelge 5.4. k_50_2_32f_m ve k_50_5_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.

	k_50_2_32f_m	k_50_5_32f_m	Fark
T2(°C)	391,85	339,59	52,26
T3(°C)	329,05	308,8	20,25
T4(°C)	269,02	280,12	-11,1

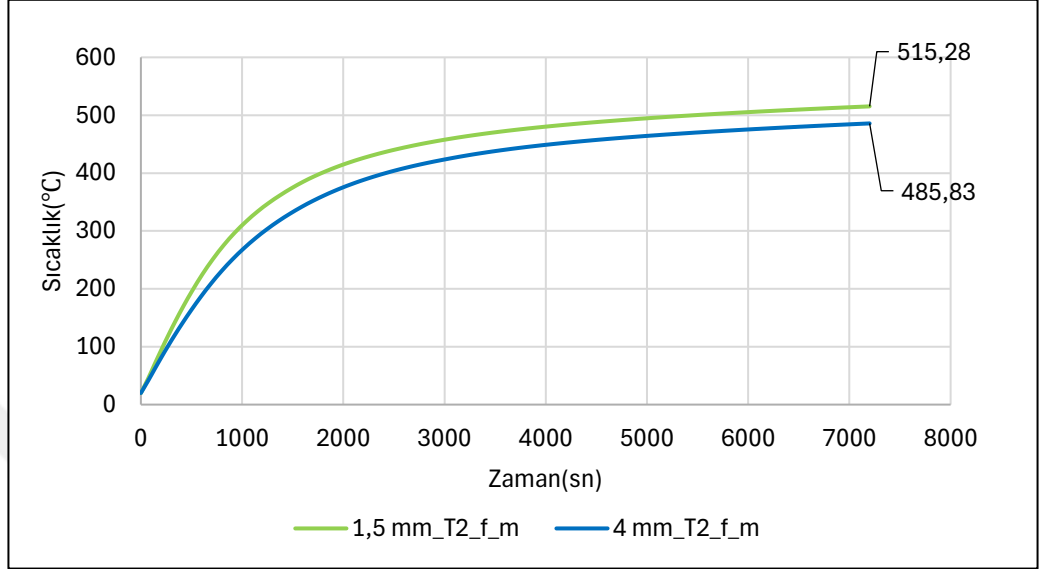
5.9.2. CC çelik profil elemanlarının et kalınlığının yangın performansına etkisi

CC140'lık çelik profil elemanlarının, yalıtım kaplamasının fibercement levha ve 12 mm olduğu duvar modelinde değişken olarak farklı et kalınlıkları belirlenmiş, Standart ISO834 yangın eğrisi ve Hızlı (Fast) yangın eğrisi model üzerine etki ettirilmiş, ISO834 yangın eğrisi için 2 saatlik, Hızlı (Fast) yangın eğrisi için 1 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmış ve et kalınlıkları sırasıyla 1,5 mm ve 4 mm olan CC140'lık elemanlardan oluşan modellerin T2 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.51'de, T3 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.52'de ve T4 noktalarından elde edilen sıcaklık değerleri Şekil 5.53'te gösterilmiştir.

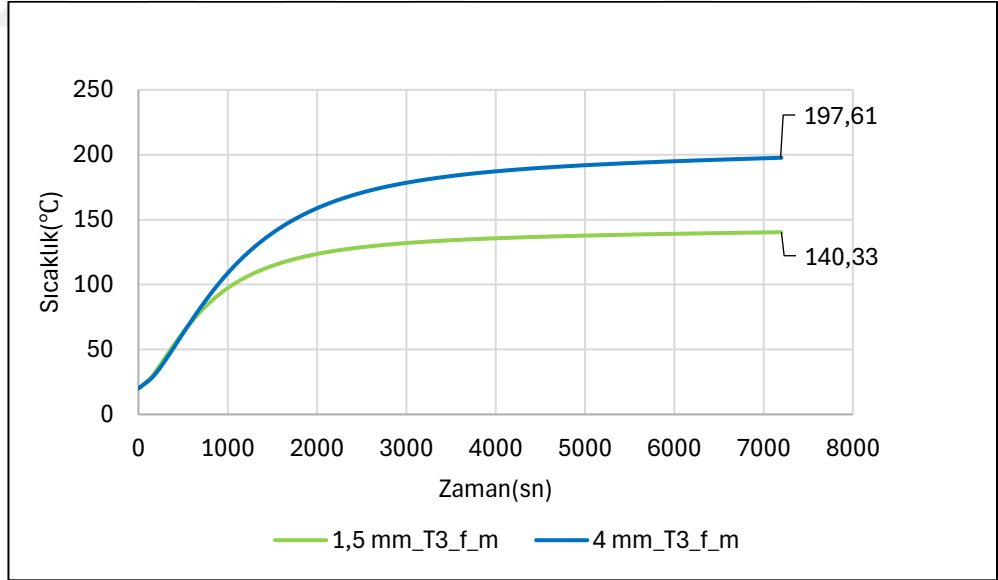
CC140×1,5 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve sabit yalıtım kaplaması/kalınlığı olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

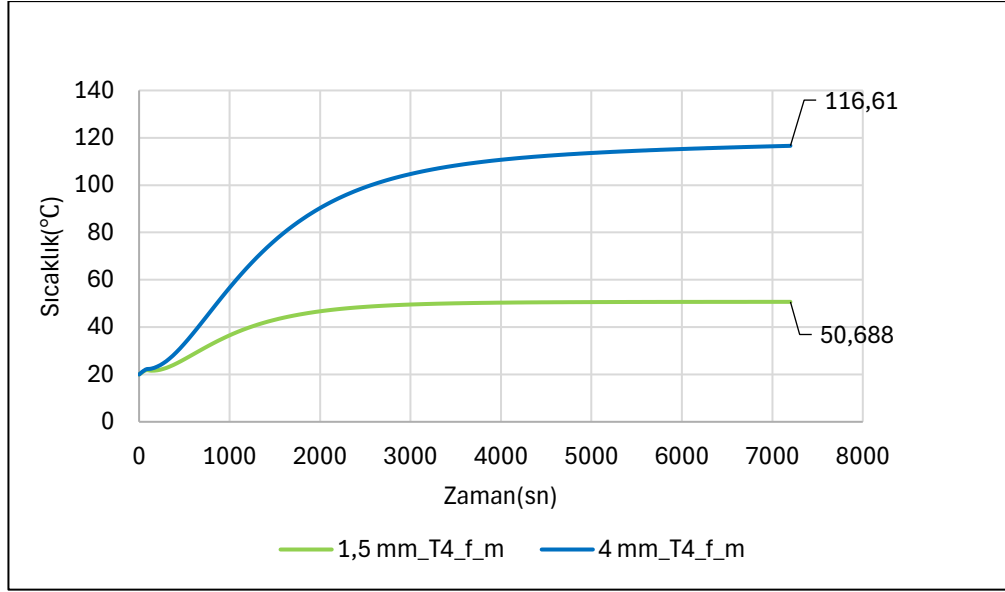
modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.54'te, CC140×4 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve sabit yalıtım kaplaması/kalınlığı olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.55'te gösterilmiştir.



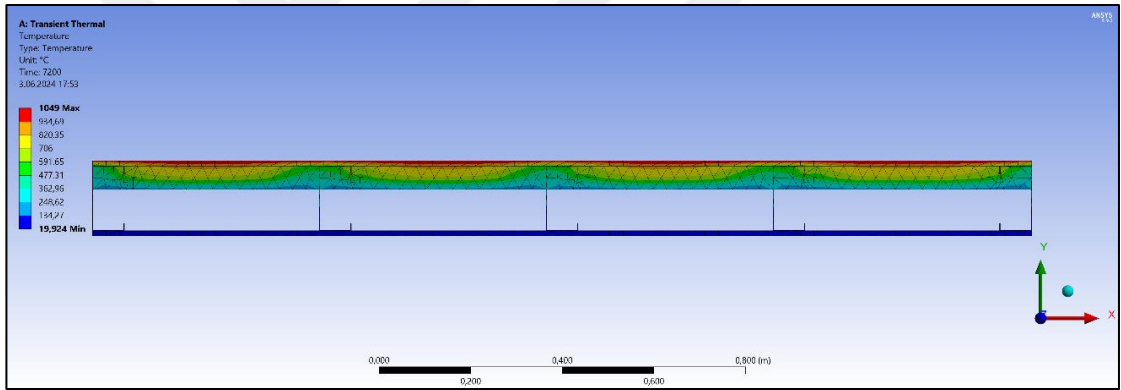
Şekil 5.51. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



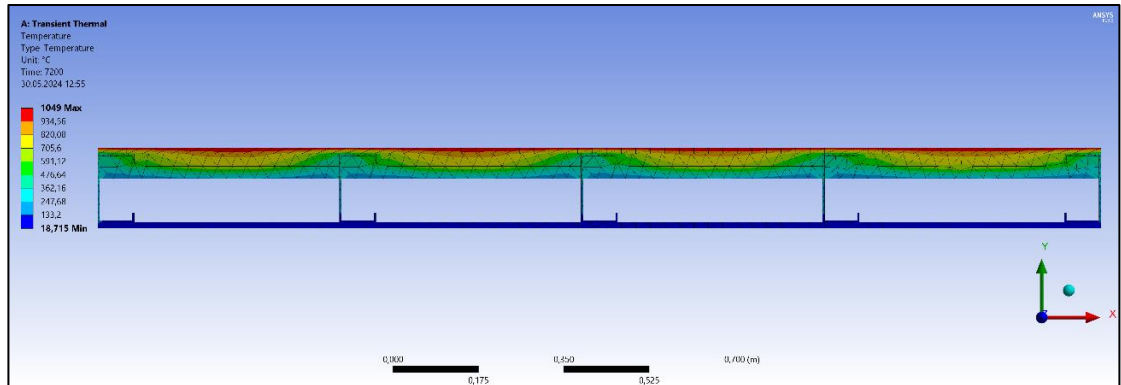
Şekil 5.52. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



Şekil 5.53. CC_140_1,5_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



Şekil 5.54. CC_140_1,5_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı

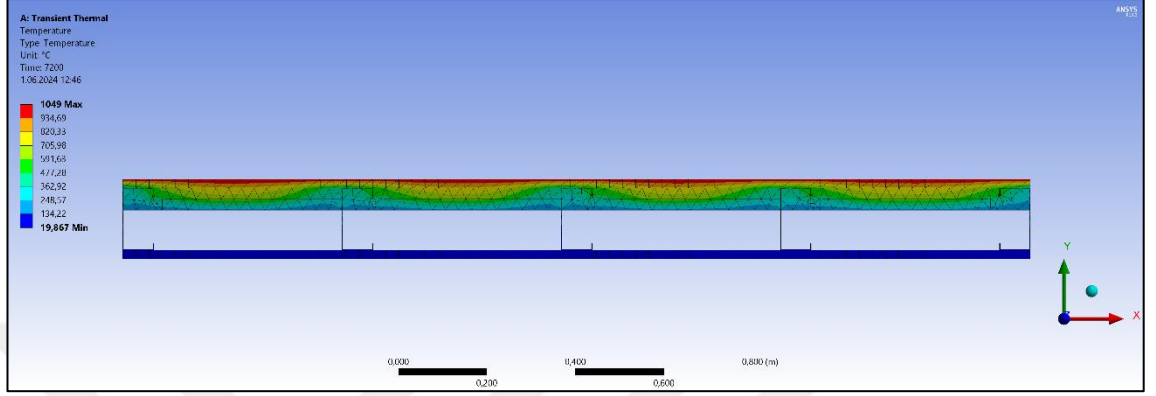


Şekil 5.55. CC_140_4_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı

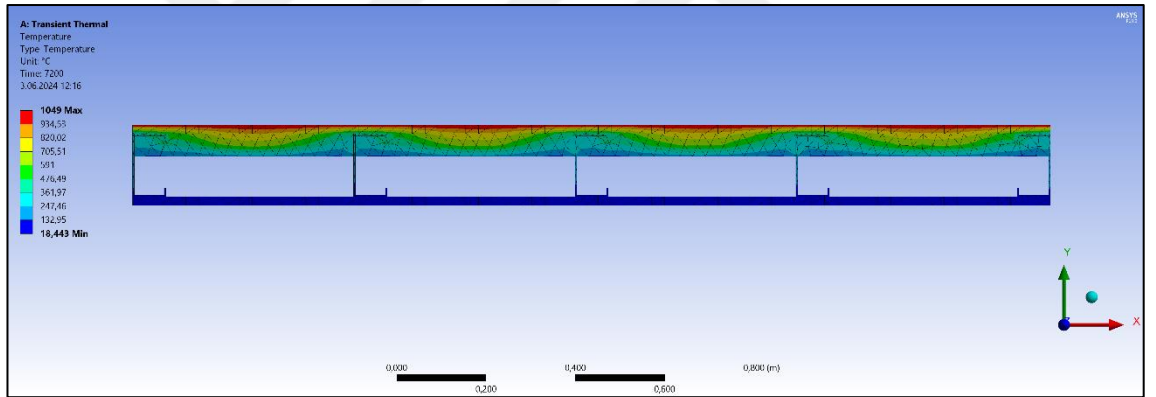
Kolonları CC140×1,5 mm çelik profilden oluşan ve 20 mm kontrplak ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımını Şekil 5.56'da

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

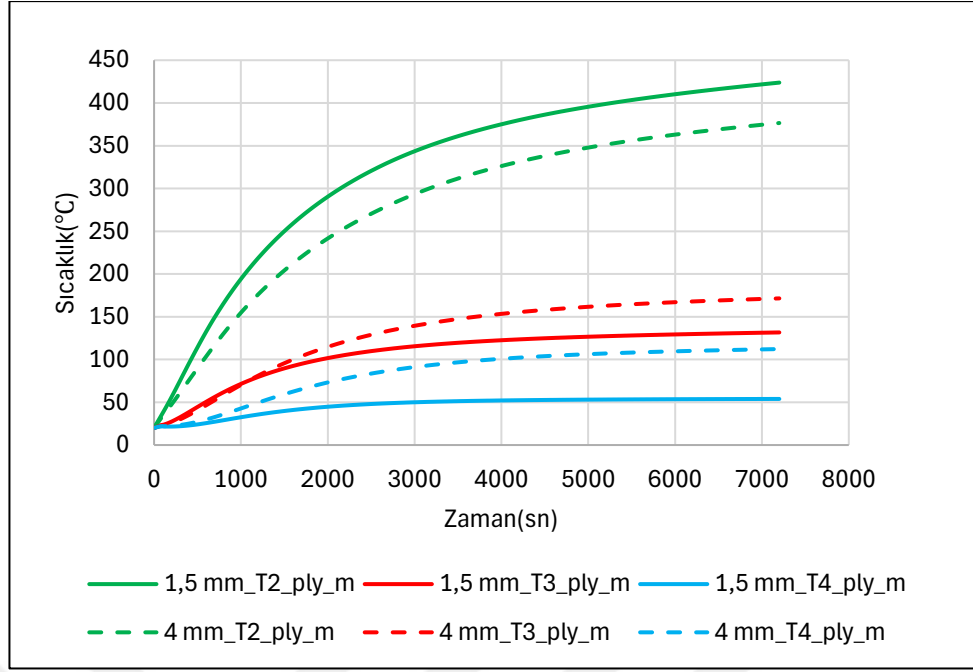
kolonları CC140×4 mm çelik profilden oluşan ve 20 mm kontrplak ile kaplanan modelde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.57’de gösterilmiştir. Bu modellerin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri Şekil 5.58’de gösterilmiştir.



Şekil 5.56. CC140_1,5_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı

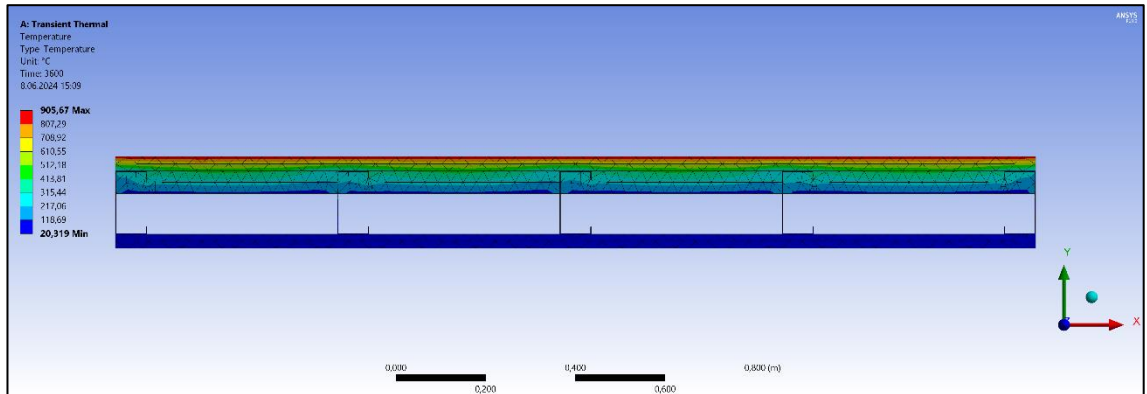


Şekil 5.57. CC140_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı



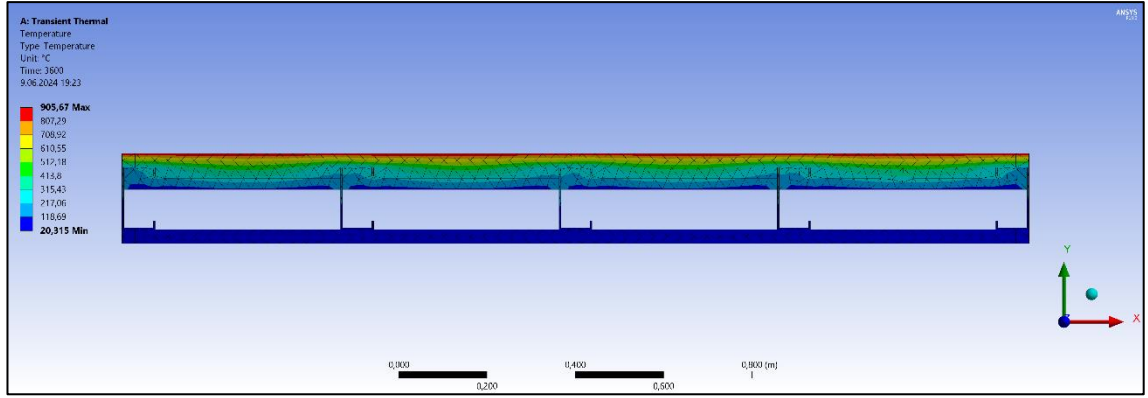
Şekil 5.58. CC_140_1,5_20ply_m ve CC_140_4_20ply_m modellerinin ISO834 Standart yangın eğrisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

Kolonları CC140×1,5 mm çelik profilden oluşan ve 32 mm fibercement kaplaması ile kaplanan modelde Hızlı (Fast) yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.59’da, kolonları CC140×4 mm çelik profilden oluşan ve 32 mm fibercement kaplaması ile kaplanan modelde Hızlı (Fast) yangın etkisinde elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 5.60’da gösterilmiştir. Bu modellerin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri Şekil 5.61’de gösterilmiştir.

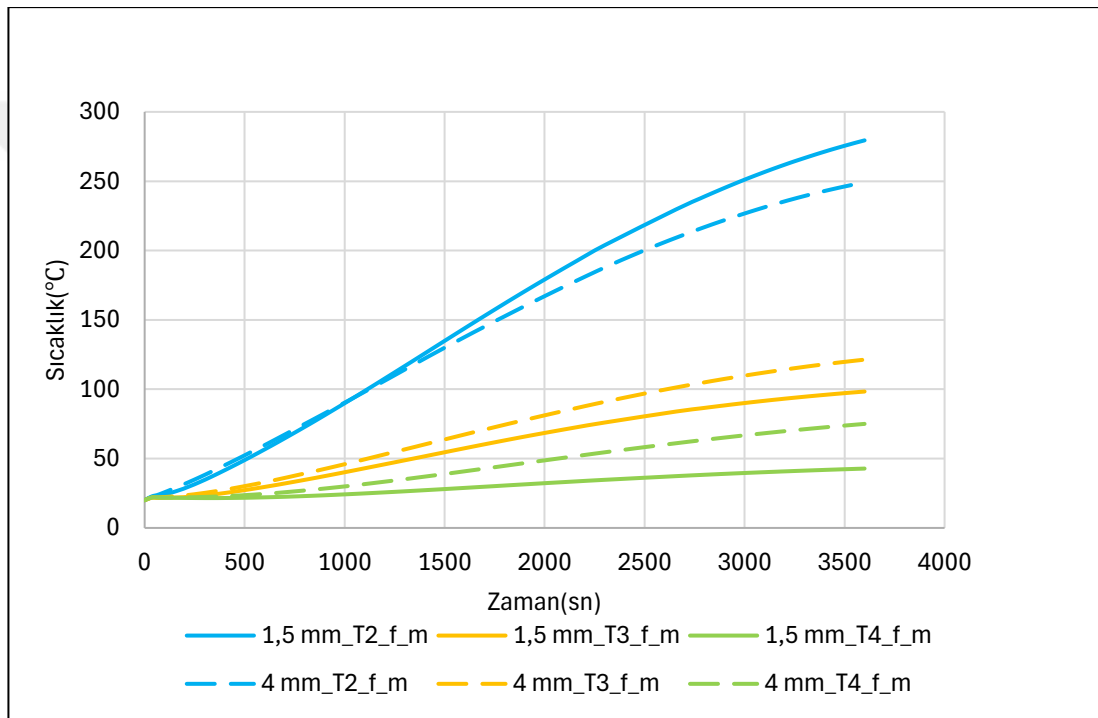


Şekil 5.59. CC_140_1,5_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 5.60. CC_140_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.61. CC_140_1,5_32f_m ve CC_140_4_32f_m modellerinin FAST yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

Şekil 5.51, Şekil 5.52 ve Şekil 5.53'te görülen grafiklerde CC elemanlardan oluşan ve 12 mm yalıtım kaplaması kalınlığına sahip modüler yapının çelik elemanının profil et kalınlıkları 1,5 ve 4 milimetre olmak üzere değişken olarak kullanılmış, ISO834 standart yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda CC140×70×16×1,5 mm profil enkesitine, 12 milimetre fibercement yalıtım kaplamasına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 515,28°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 140,33°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 50,69°C olurken CC140×70×19×4 mm çelik profil enkesitine sahip modüler duvar modelinde 7200.

Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 485,83°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 197,63°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 116,61°C olduğu görülmektedir. T2 noktasında 1,5 mm ve 4 mm'lik profiller arasındaki fark yaklaşık 30°C olup, 1,5 milimetrelilik çelik profili daha fazla ısınmıştır. Ancak modellerin T3 noktalarına bakıldığında 4 milimetrelilik et kalınlığına sahip C profilin sıcaklık değerinin 1,5 milimetrelilik et kalınlığına sahip C profilin sıcaklık değerinden 57,3°C fazla olduğu görülmüştür. Aynı şekilde T4 noktasında da bu fark 65,92°C'dir. Sonuçlara bakılarak modeldeki kalın profillerin ince profillere göre geç ısınıp geç soğuduğu tespit edilmiştir. Bu görüşü desteklemek adına, yalıtım kalınlıkları değiştirilerek 20 milimetre kontrplak levha ve 32 milimetre fibercement levha kaplaması kullanılarak analiz tekrarlanmıştır. Analiz sonucu 20 milimetrelilik yalıtım kaplaması için ölçülen T2, T3 ve T4 sıcaklık değerleri Şekil 5.58'de ve Hızlı (fast) yangın eğrisi kullanılarak analiz edilen 32 milimetrelilik yalıtım kaplamalı model için ölçülen T2, T3 ve T4 sıcaklık değerleri Şekil 5.61'de karşılaştırılmıştır. 4 milimetrelilik çelik profillerin bulunduğu modellerde 1,5 milimetrelilik çelik profillerin bulunduğu modellere kıyasla T2 noktalarındaki sıcaklık değerleri daha düşükken T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerlerinin yüksek olduğu gözlemlenmiştir ve sıcaklık değerlerinin farkı, 20 milimetrelilik yalıtım kaplaması ile kaplanan modeller için Çizelge 5.5'te, 32 milimetrelilik yalıtım kaplaması ile kaplanan modeller için Çizelge 5.6'da verilmiştir. Sıcaklık değerleri farkı en yüksek olarak T2 noktasında 20 milimetrelilik kontrplak kaplaması için 3600.saniyede 47,25°C, 32 milimetrelilik fibercement kaplaması için 3600.saniyede 30,28°C okunmuştur. Yapılan analizlerde tablolarda da görüldüğü üzere her iki yalıtım malzemesi kalınlığındaki 4 milimetre et kalınlığına sahip modellerin 3600.saniyede T3 ve T4 noktalarındaki maksimum sıcaklık değeri, 1,5 milimetre et kalınlığına sahip modellerin T3 ve T4 noktalarındaki maksimum sıcaklık değerinden daha yüksek sonuç vermiştir.

Çizelge 5.5. CC_140_1,5_20ply_m ve CC_140_4_20ply_m modellerinin ISO834 Standart yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.

ISO834	CC_140_1,5_20ply_m	CC_140_4_20ply_m	Fark
T2(°C)	423,83	376,58	47,25
T3(°C)	131,7	171,5	-39,8
T4(°C)	53,927	112,24	-58,313

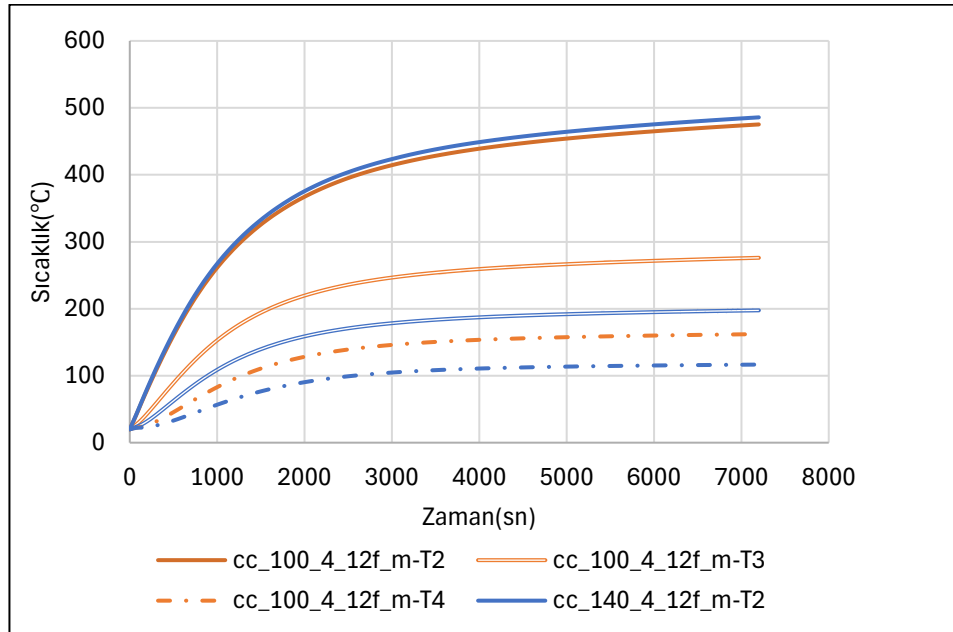
Çizelge 5.6. CC_140_1,5_32f_m ve CC_140_4_32f_m modellerinin Hızlı (Fast) Yangın etkisinde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık farkları.

FAST	CC_140_1,5_32f_m	CC_140_4_32f_m	Fark
T2(°C)	279,47	249,19	30,28
T3(°C)	98,35	121,35	-23
T4(°C)	42,796	75,019	-32,223

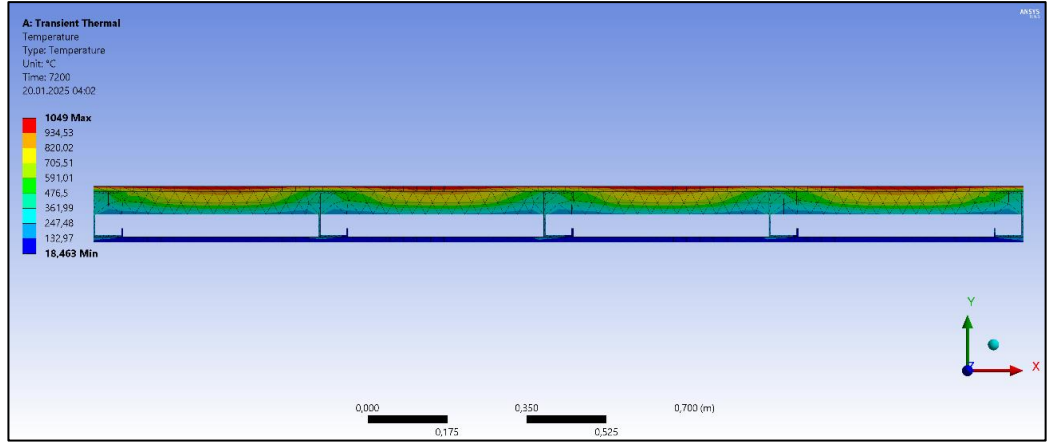
5.10. Çelik Elemanın Enkesitinin Yangın Performansına Etkisi

Çelik elemanların enkesit farkının yangın performansına etkisini incelemek için hepsi 4 milimetre et kalınlığına sahip ve boyutları CC100mm, CC140 mm ve CC400 mm’lik çelik profillerin, kaplama türleri ve kalınlıkları sabit olup, Standart ISO834 yangın eğrisi etki ettirilip yangına maruz kalma süresince analizler yapılmış ve 2 saatin sonunda T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri aşağıda gösterilmiştir.

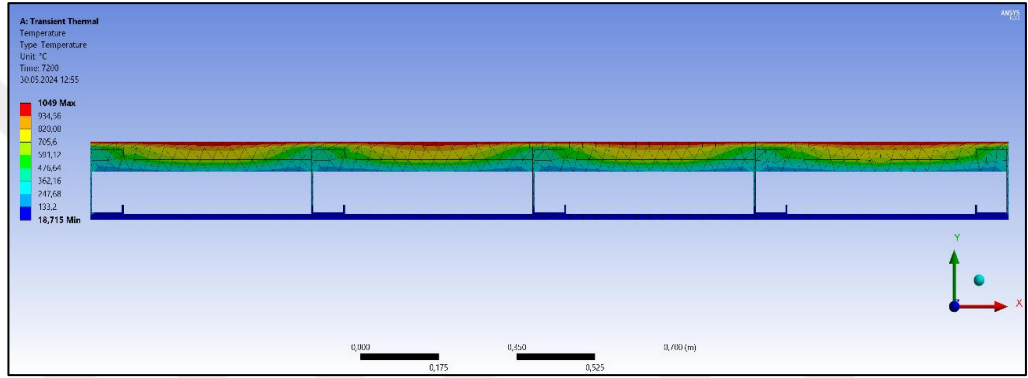
CC100 ve CC140 mm’lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 12 milimetre fibercement yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.62’de C100’lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.63’te ve C140’lık profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.64’te gösterilmiştir.



Şekil 5.62. CC_100_4_12f_m ve CC_140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

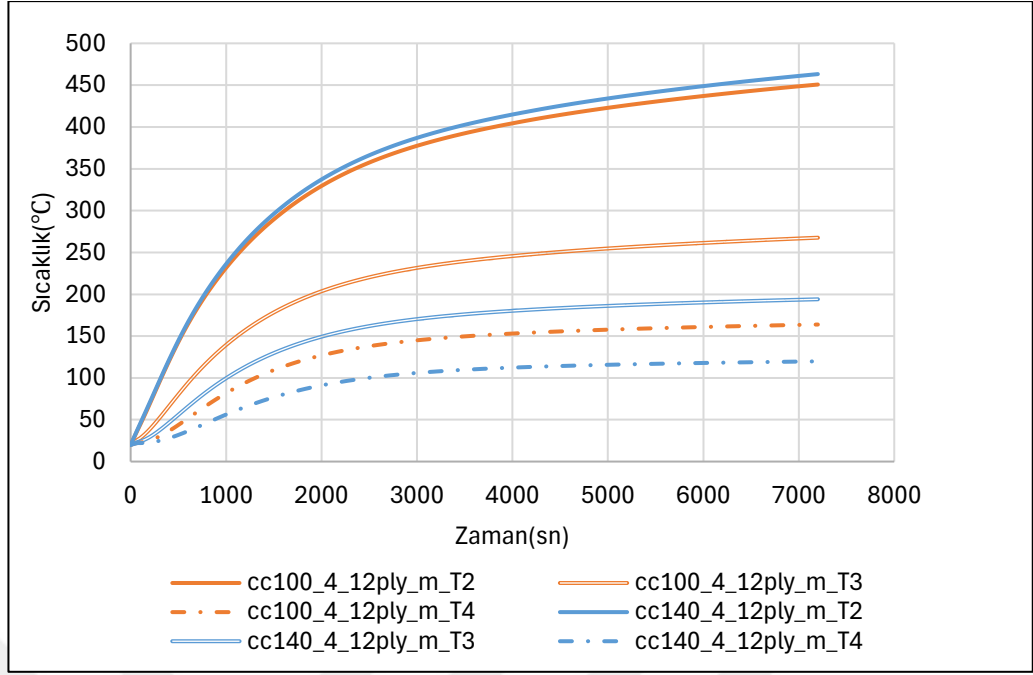


Şekil 5.63. CC_100_4_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

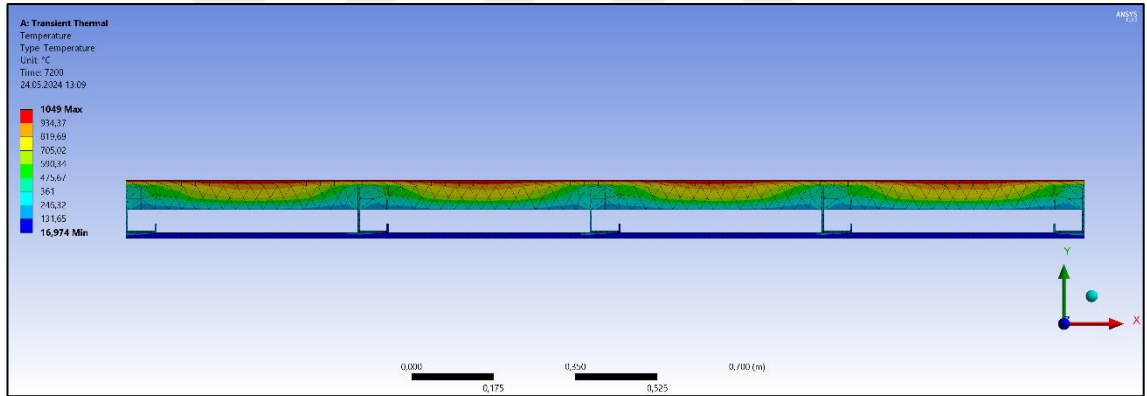


Şekil 5.64. CC_140_4_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

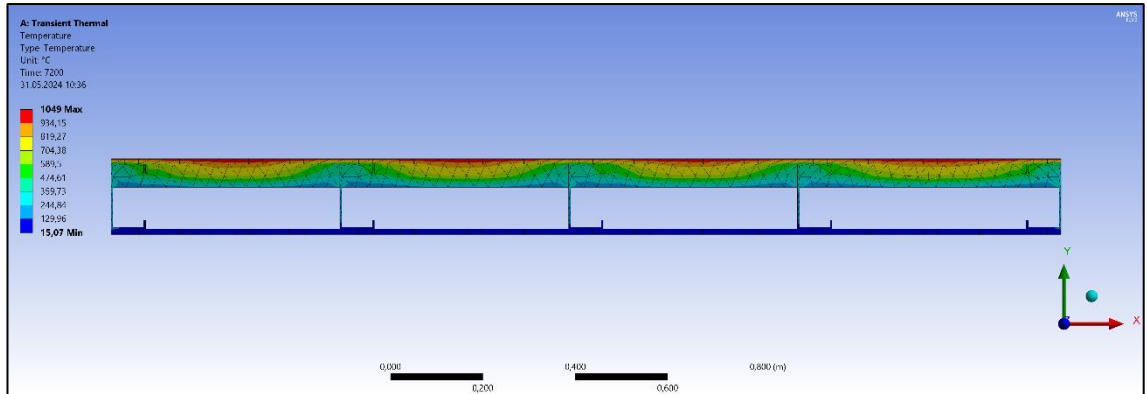
CC100 ve CC140 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 12 milimetre kontrplak yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.65'te C100'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.66'da ve C140'lık profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.67'de gösterilmiştir.



Şekil 5.65. CC_100_4_12ply_m ve CC_140_4_12ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



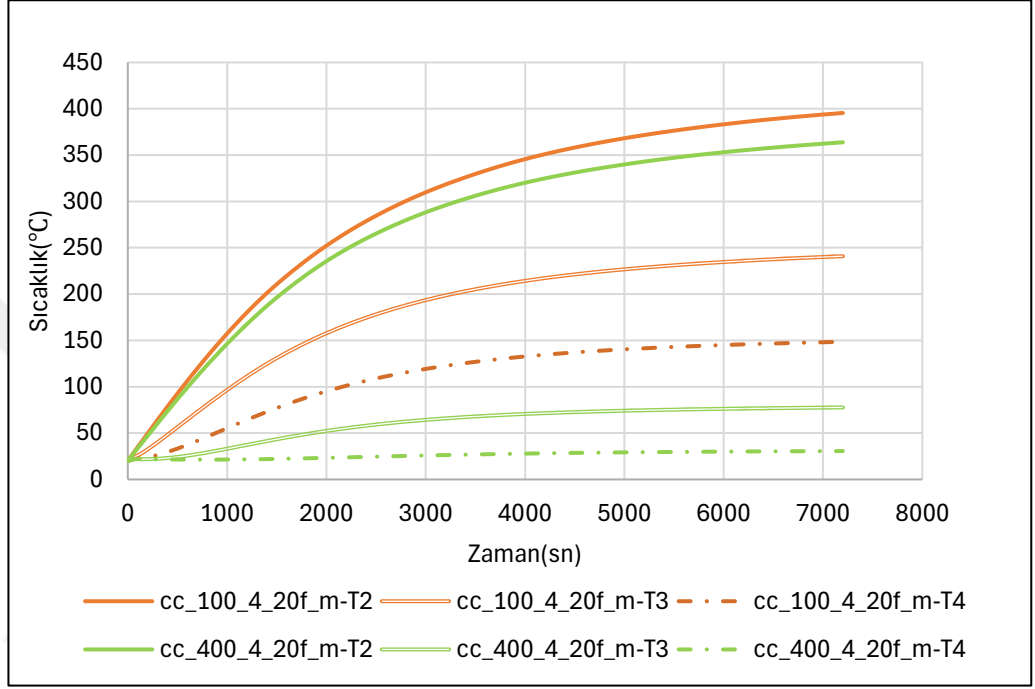
Şekil 5.66. CC_100_4_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı



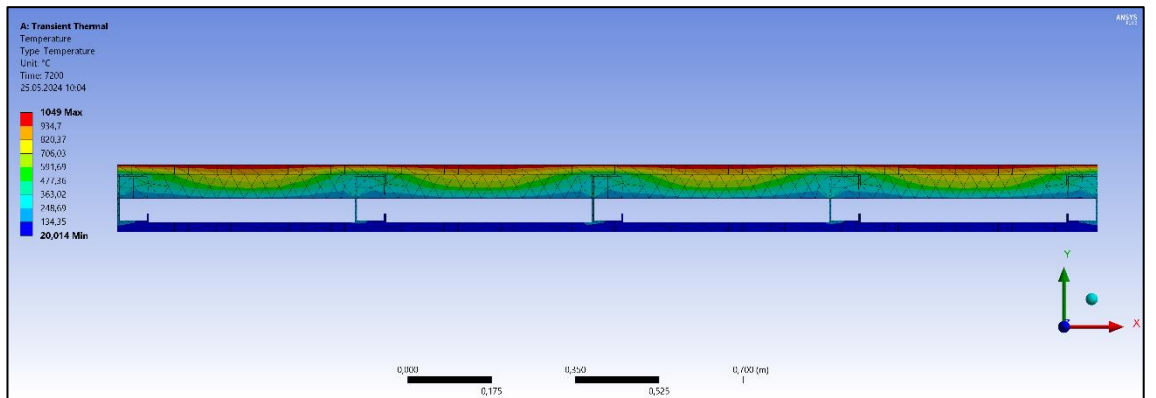
Şekil 5.67. CC_140_4_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

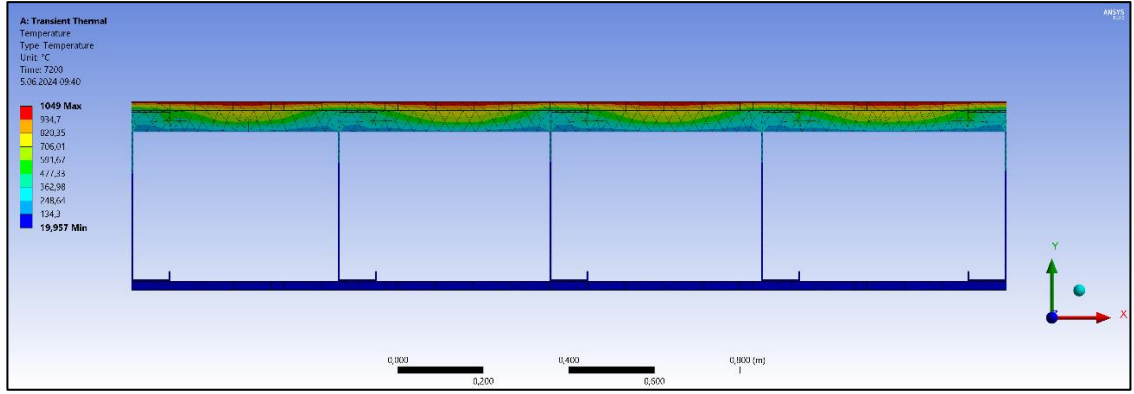
CC100 ve CC400 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 20 milimetre fibercement yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.68'de C100'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.69'da ve C400'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.70'te gösterilmiştir.



Şekil 5.68. CC_100_4_20f_m ve CC_400_4_20f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

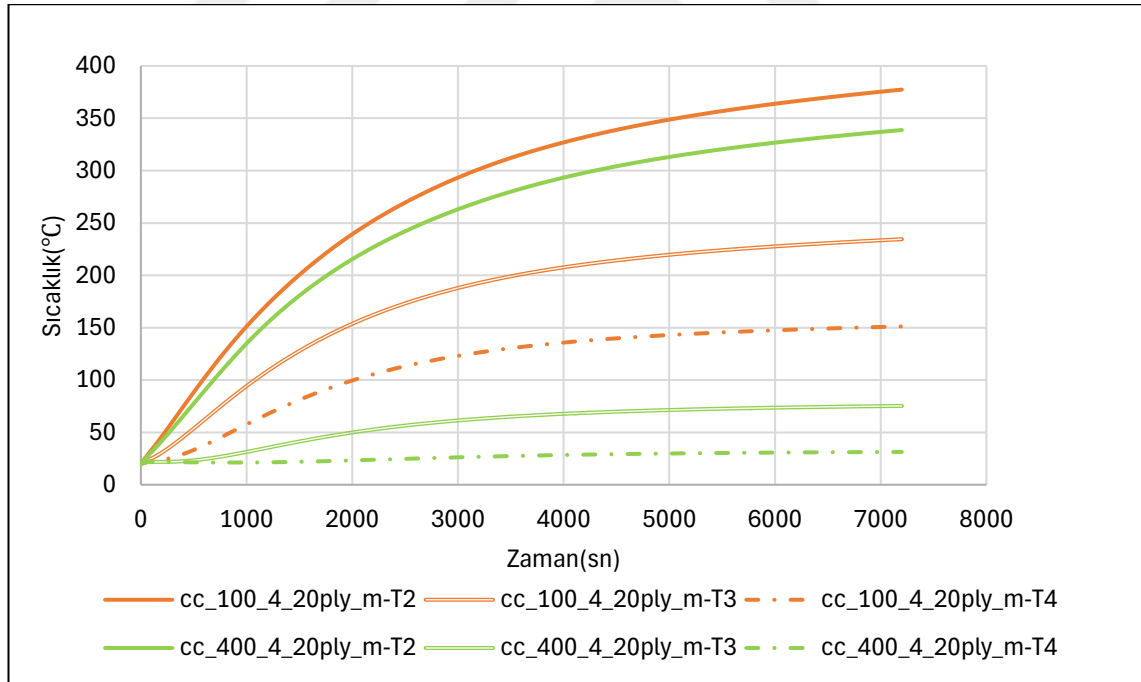


Şekil 5.69. CC_100_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı



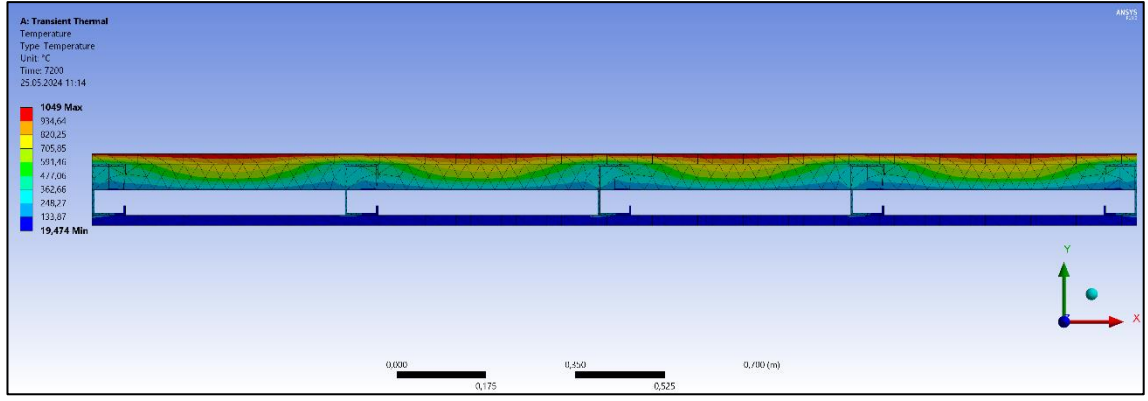
Şekil 5.70. CC_400_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

CC100 ve CC400 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 20 milimetre kontrplak yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.71'de C100'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.72'de ve C400'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.73'te gösterilmiştir.

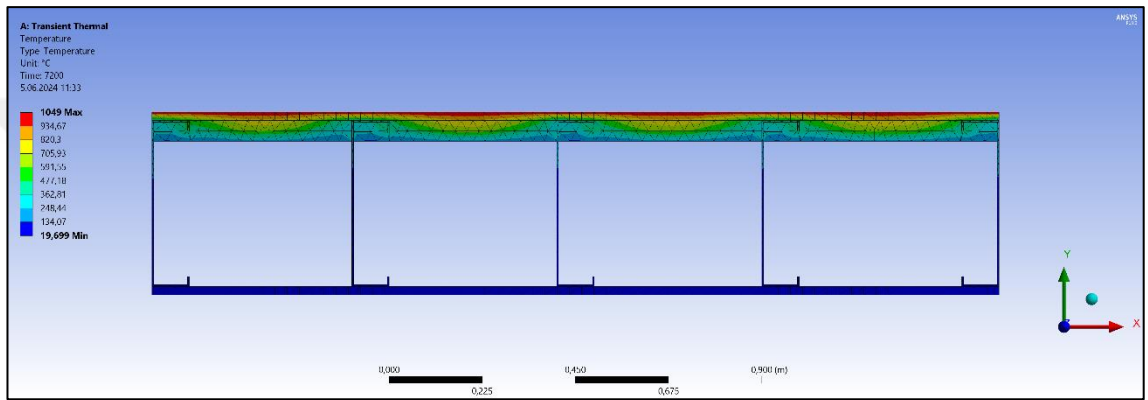


Şekil 5.71. CC_100_4_20ply_m ve CC_400_4_20ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

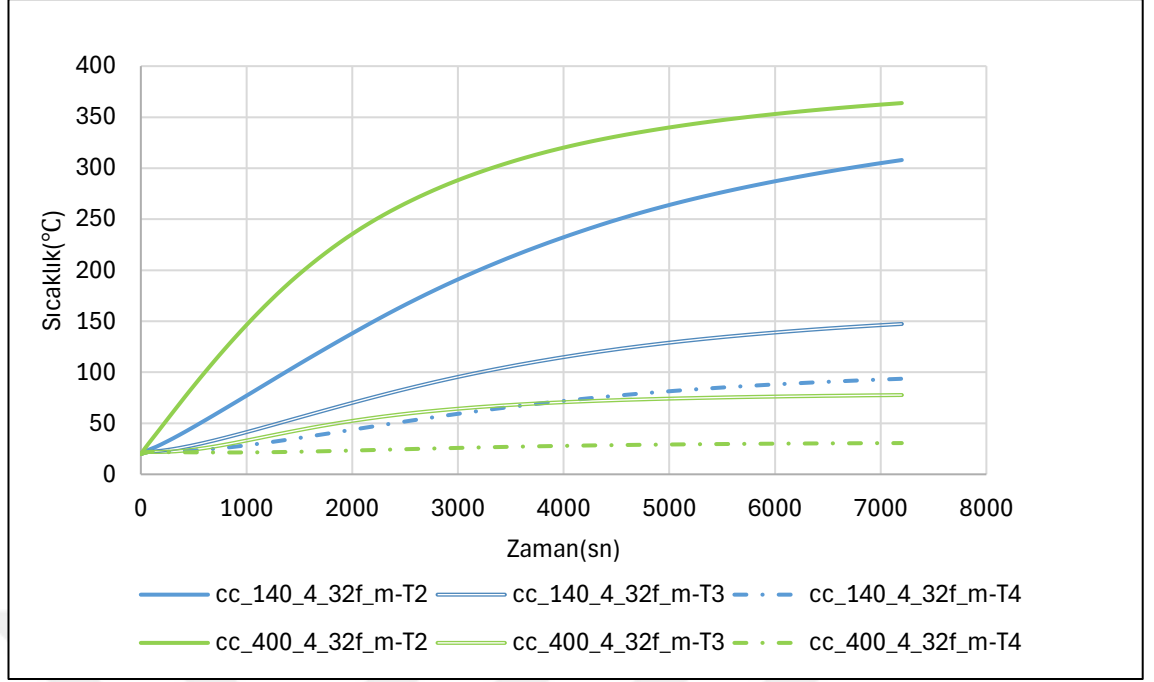


Şekil 5.72. CC_100_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı

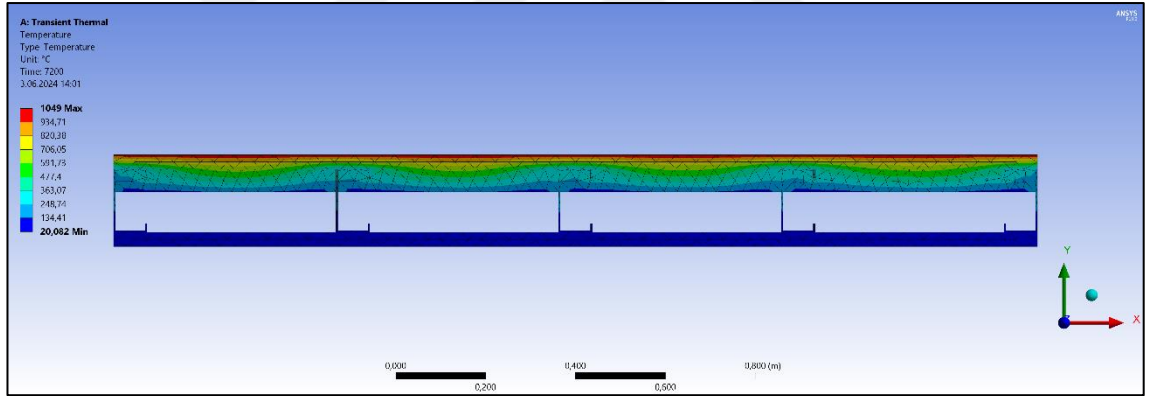


Şekil 5.73. CC_400_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı

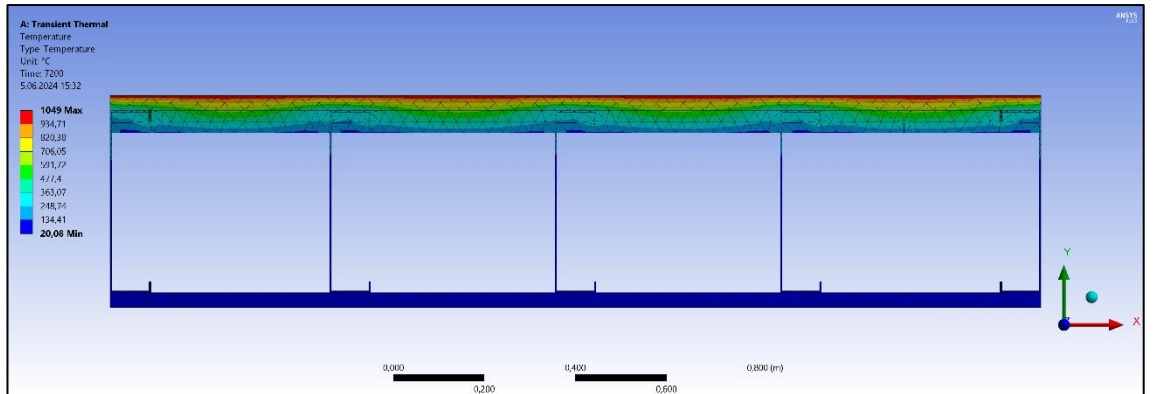
CC140 ve CC400 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 32 milimetre fibercement yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.74'te, C100'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.75'te ve C400'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.76'da gösterilmiştir.



Şekil 5.74. CC_140_4_32f_m ve CC_400_4_32f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



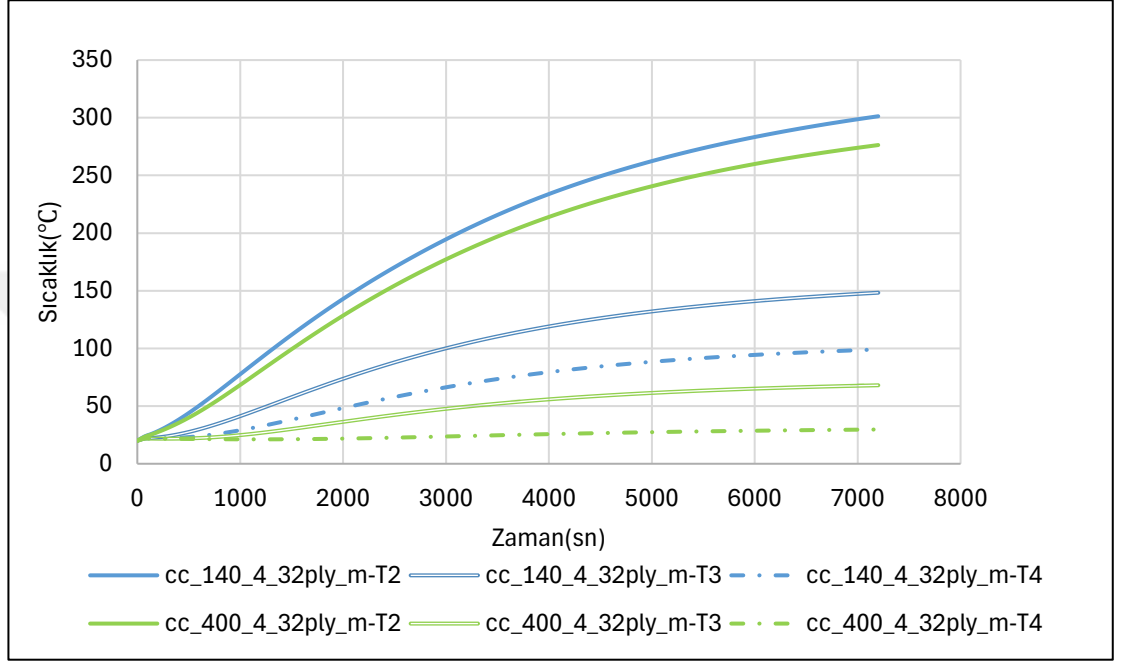
Şekil 5.75. CC_140_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı



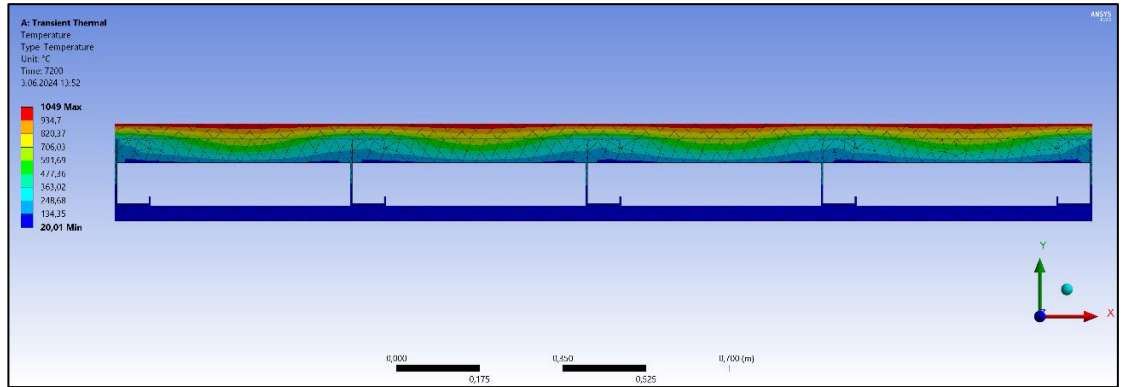
Şekil 5.76. CC_400_4_32f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

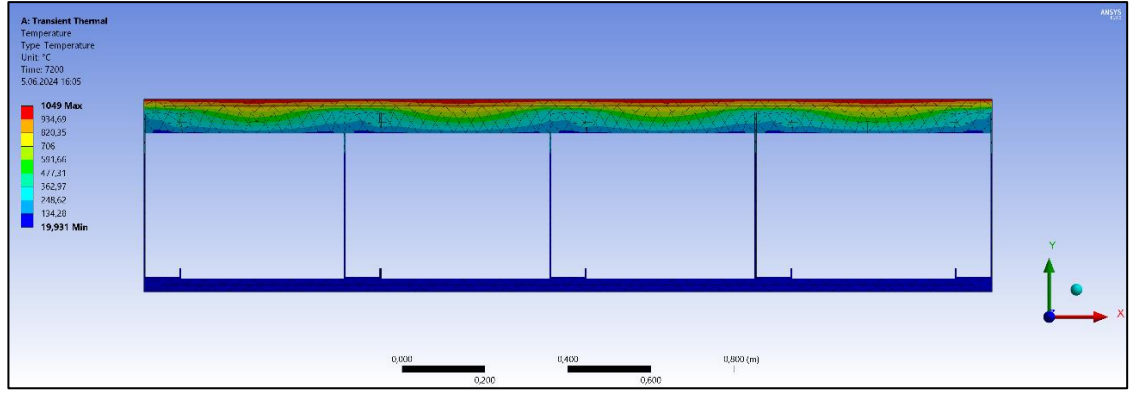
CC140 ve CC400 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 32 milimetre kontrplak yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.77'de, C100'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.78'de ve C400'lük profillerle oluşturulan modelin sıcaklık dağılımı Şekil 5.79'da gösterilmiştir.



Şekil 5.77. CC_140_4_32ply_m ve CC_400_4_32ply_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

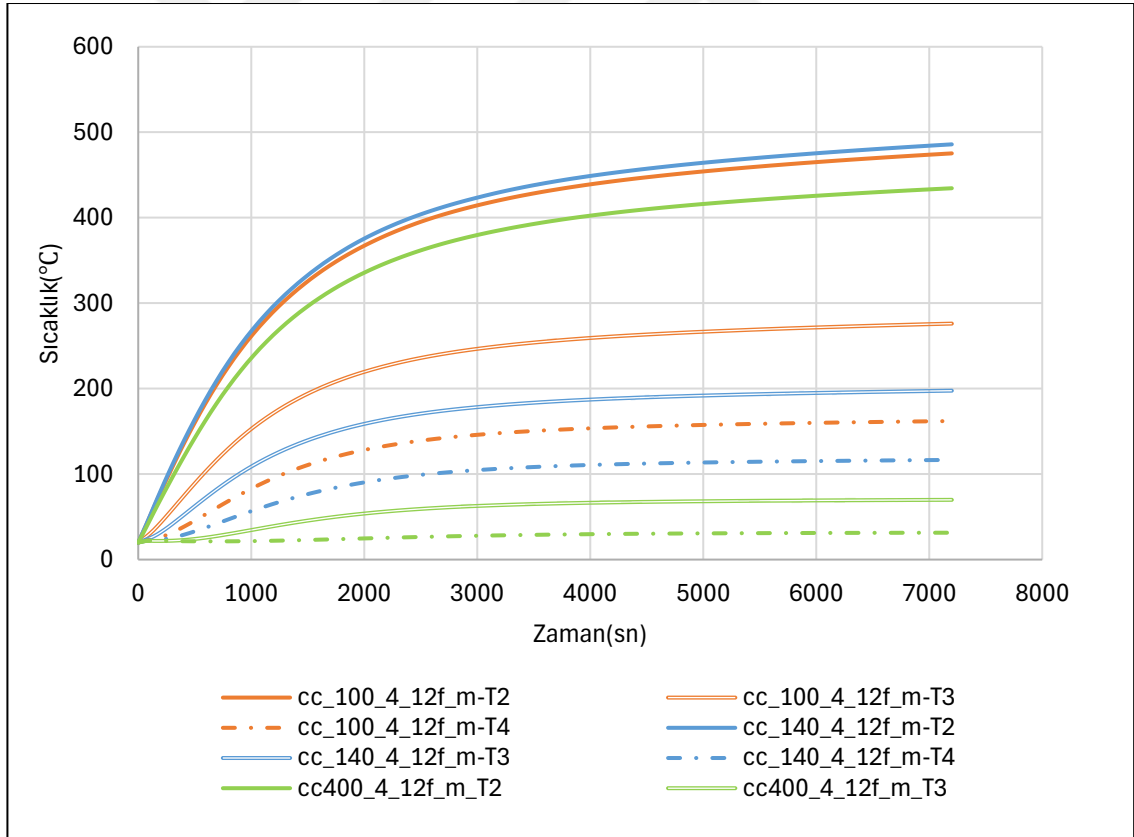


Şekil 5.78. CC_140_4_32ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.79. CC_400_4_32ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı

CC100, CC140 ve CC400 mm'lik çelik elemanlar kullanılarak oluşturulan ve 12 milimetre fibercement yalıtım kaplaması olacak şekilde Standart ISO-834 yangın eğrisine maruz bırakılan modelin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımları Şekil 5.80'de gösterilmiştir.

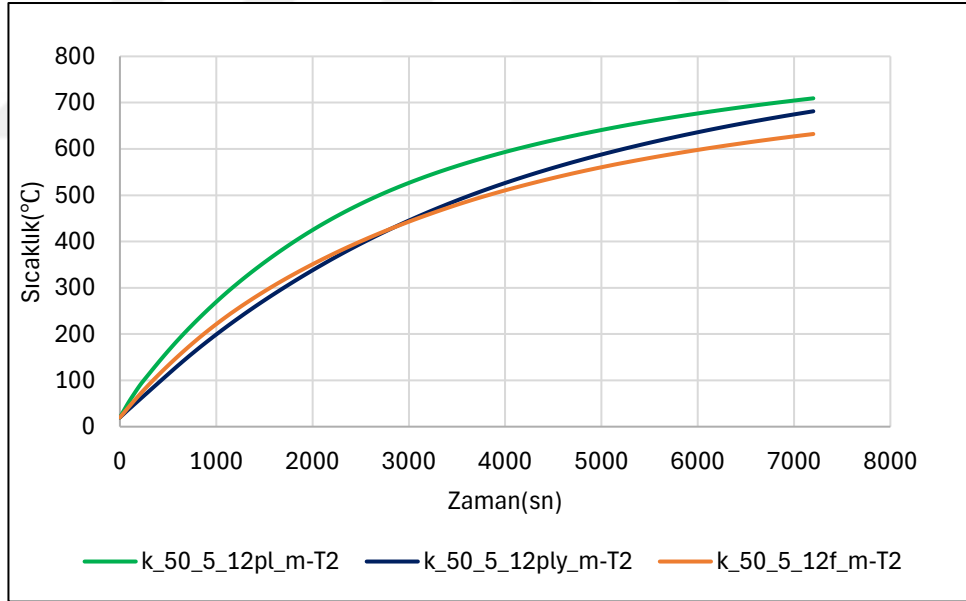


Şekil 5.80. CC100_4_12f_m, CC_140_4_12f_m ve CC_400_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

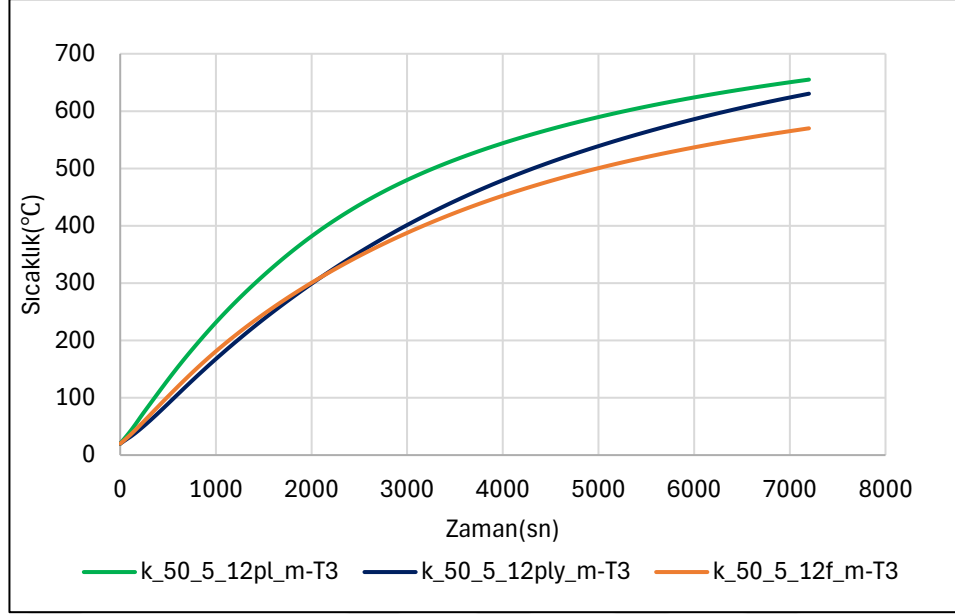
Şekil 5.80’de görülen grafikte 12 milimetrelik fibercement levha kaplamalı ve C profillerden oluşan modüler yapının enkesitleri CC100×45×19×4 milimetre, CC140×75×19×4 milimetre ve CC400×90×24×4 milimetre olmak üzere değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda C100’lük c profil enkesitine, 12 milimetre fibercement yalıtım kaplamasına ve 4 mm çelik profil et kalınlığına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 475,26°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 276,11°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 162,08°C olup, C140’lık c profil enkesitine, 12 milimetre fibercement yalıtım kaplamasına ve 4 mm çelik profil et kalınlığına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 485,83°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 197,63°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 116,61°C olurken C400’lük c profil enkesitine, 12 milimetre fibercement yalıtım kaplamasına ve 4 mm çelik profil et kalınlığına sahip modüler duvar modelinde 7200. Saniyede T2 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 434,47°C, T3 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 69,92°C ve T4 noktasındaki maksimum sıcaklık değeri 31,44°C olduğu görülmektedir. Modelin yalıtım kalınlıkları değiştirilerek C100 ve CC140’lık c profillerle oluşturulan modeller için; 12 milimetre fibercement ve kontrplak kaplaması için sıcaklık dağılımları Şekil 5.62 ve Şekil 5.65’te , C100 ve C400’lük c profillerle oluşturulan modeller için 20 milimetre fibercement ve kontrplak kaplaması için sıcaklık dağılımları Şekil 5.68 ve Şekil 5.71 ve CC140 ve CC400’lük c profillerle oluşturulan modeller için 32 milimetre fibercement ve kontrplak kaplaması için sıcaklık dağılımları Şekil 5.74 ve Şekil 5.77’de gösterilmiştir. Analizler sonucunda 400 milimetrelik en kesite sahip olan c profilde T2 noktasından T4 noktasına gelene kadar, modelin içindeki boşluk hacminin de etkisiyle ısının malzeme içinde yayılımının azaldığı görülmüştür. En son şekilde görüldüğü biçimde T2 noktasındaki sıcaklık değerleri arasındaki fark ortalama yaklaşık 40°C iken T4 noktasındaki sıcaklık değerleri arasındaki fark ortalama yaklaşık 130°C’dir. Sonuç olarak model içindeki boşluk hacminin artması, ısı iletimini yavaşlatır ve malzemenin daha geç ısınmasına sebep olur. Elbette boşluk hacminin emisivitesi göz önünde bulundurulmalıdır.

5.11. Yalıtım Kaplama Malzemesinin Yangın Performansına Etkisi

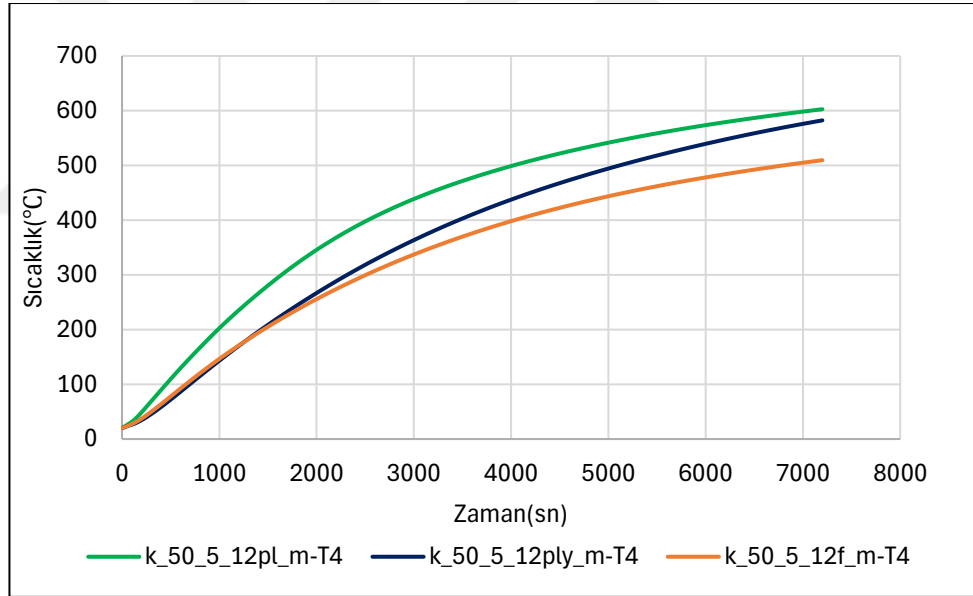
Bu tez çalışmasında 3 farklı yalıtım kaplaması için analizler yapılmıştır. Bu malzemeler sırasıyla alçı panel (plasterboard), kontrplak (plywood) ve fibercement levhalardır. Tez için hazırlanan 18 model üzerine 3 farklı yalıtım kaplaması kullanılarak yangın esnasında çelik elemanı koruma performansları incelenmiştir. SHS50×2 milimetre çelik elemanına ve 12 milimetrelik yalıtım kaplamasına sahip olup değişken olarak kaplama türü belirlenmiş, ISO834 standart yangın etkisinde yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3, T4 ve T5 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.81, Şekil 5.82, Şekil 5.83 ve Şekil 5.84’te gösterilmiştir. T5 noktasından alınan sıcaklık değerleri kaplama malzemesinin duvarın diğer tarafına ne kadar ısı geçireceğini ölçmek amacıyla alınmıştır. Alçı panel, kontrplak ve fibercement levhaların kaplı olduğu modellerin sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.85, Şekil 5.86 ve Şekil 5.87’de gösterilmiştir.



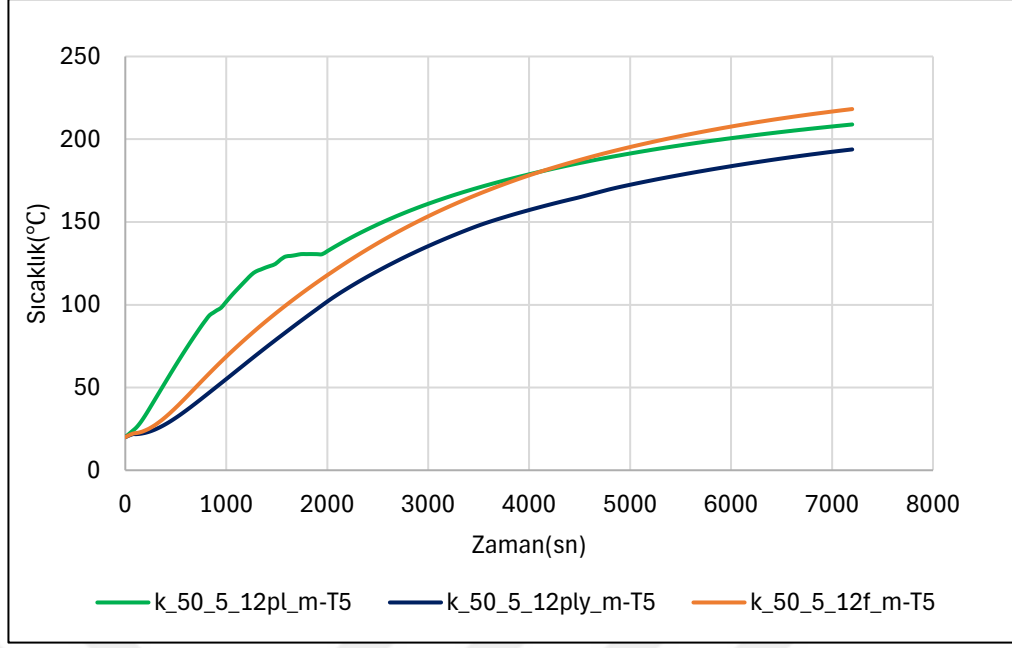
Şekil 5.81. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



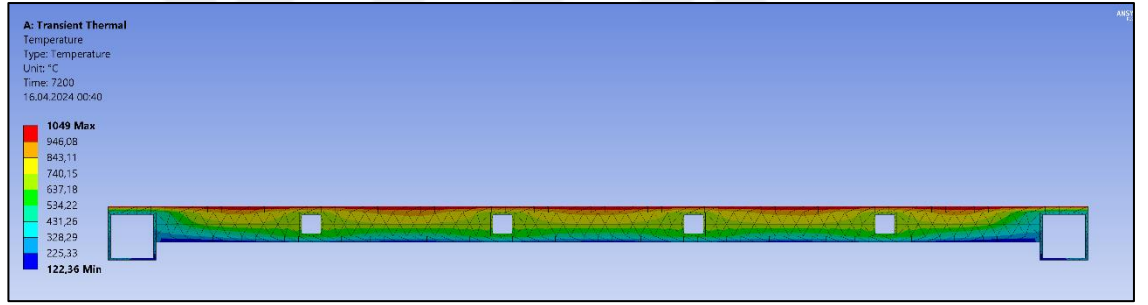
Şekil 5.82. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



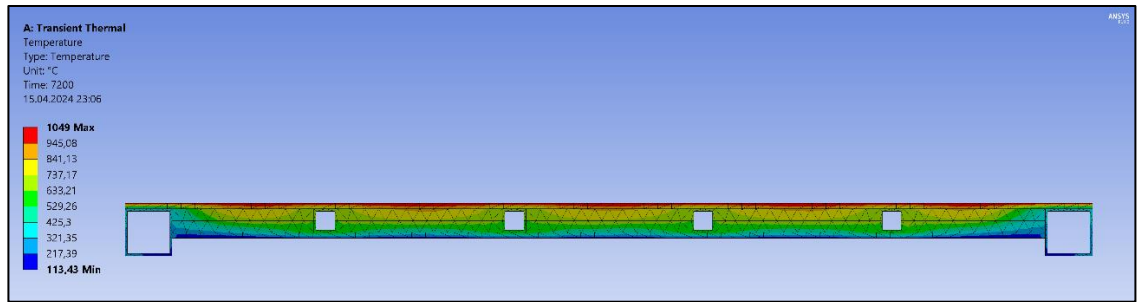
Şekil 5.83. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



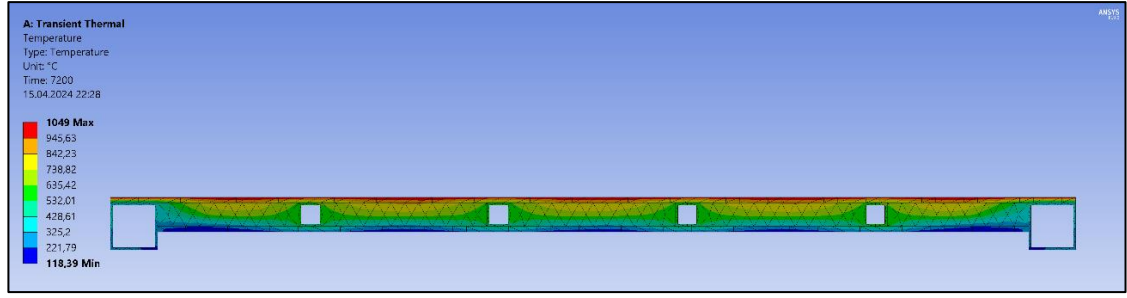
Şekil 5.84. k_50_5_12pl_m k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T5 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



Şekil 5.85. k_50_5_12pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı

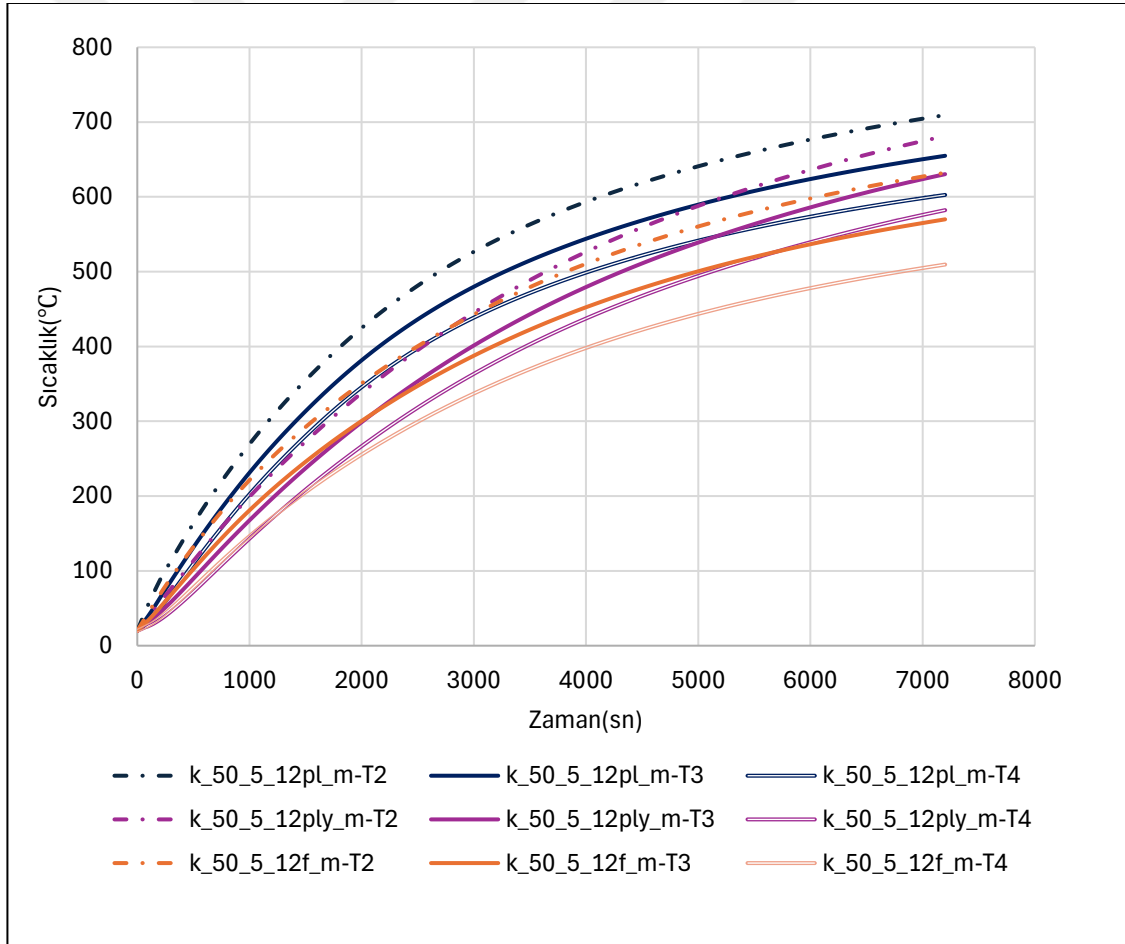


Şekil 5.86. k_50_5_12ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.87. k_50_5_12f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 5.88’de görülen grafikte SHS50×5’lik çelik kolonlardan oluşan modüler yapının her biri 12 milimetre olmak üzere yalıtım kaplamaları türü sırasıyla alçı panel, kontrplak ve fibercement levhalar değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır.



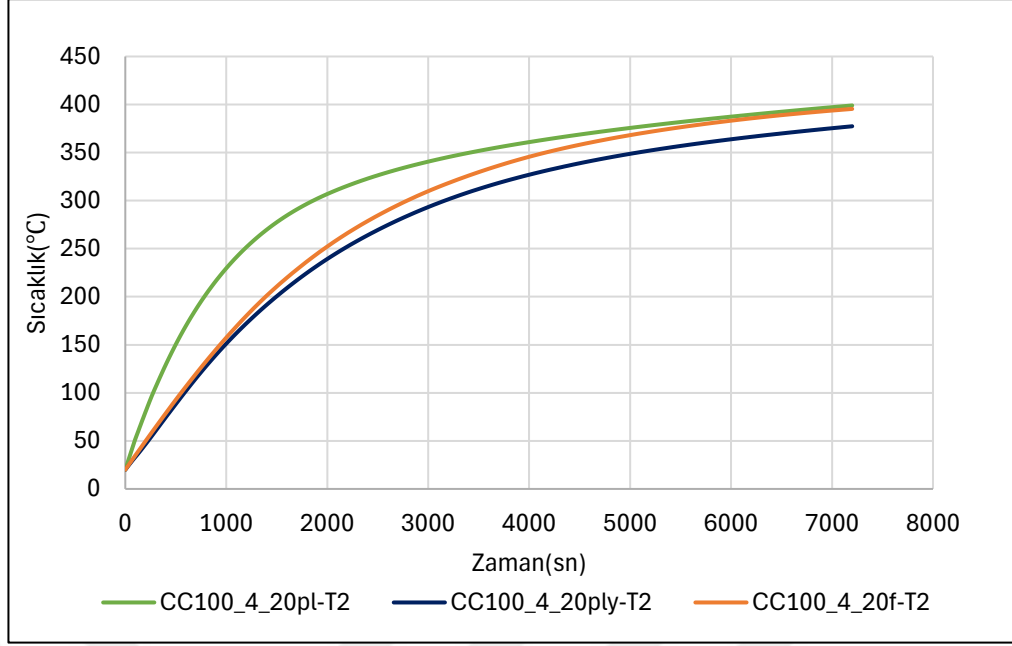
Şekil 5.88. k_50_5_12pl_m, k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.

Analiz sonucunda farklı yalıtım malzemelerine sahip SHS50×5 enkesitli modellerdeki 7200. Saniyede T2, T3, T4 ve T5 noktalarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 5.7’de verilmiştir. Buna göre alçıpanel levha kaplamalı modelde T2 noktasındaki sıcaklık değeri 709,36°C olup kontrplak levha kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 681,36°C olurken, fibercement levha kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 632,29°C olarak ölçülmüştür. Modellerin ısı almayan kısımlarındaki yani T5 noktasındaki sıcaklık değerlerine bakılırsa alçıpanel levhanın T5 noktasındaki sıcaklık değeri 208,93°C olup, kontrplak levhanın T5 noktasındaki sıcaklık değeri 193,84°C olup, fibercement levha kaplamalı modelin T5 noktasındaki sıcaklık değeri 218,23°C olarak ölçülmüştür.

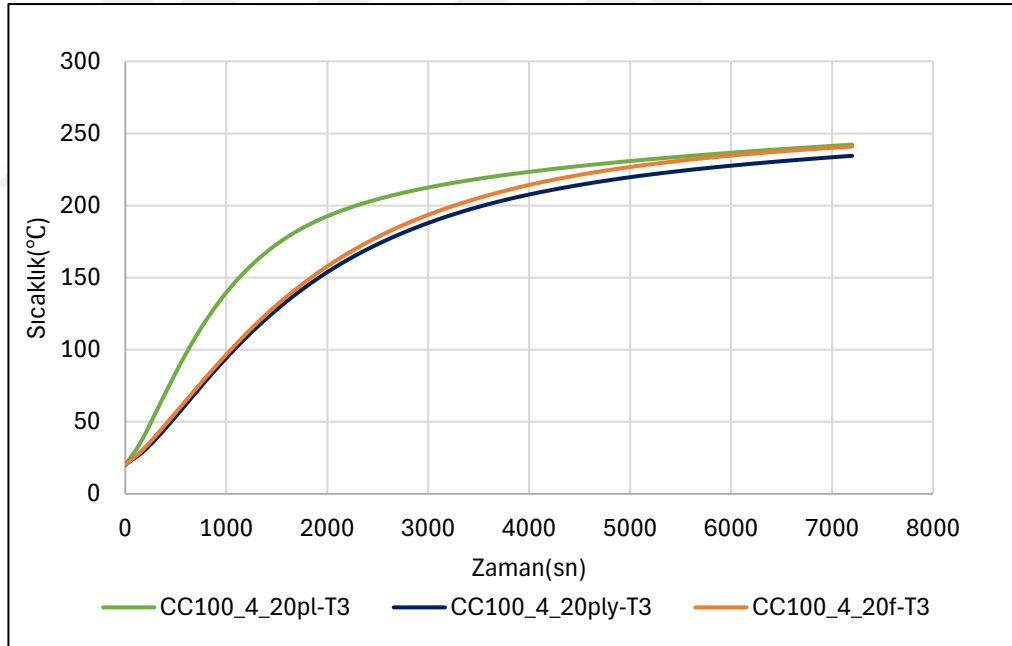
Çizelge 5.7. k_50_5_12pl_m ve k_50_5_12ply_m ve k_50_5_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.

	k_50_5_12pl_m	k_50_5_12ply_m	k_50_5_12f_m
T2(°C)	709,36	681,36	632,29
T3(°C)	654,94	630,36	569,98
T4(°C)	602,66	582,3	509,56
T5(°C)	208,93	193,84	218,23

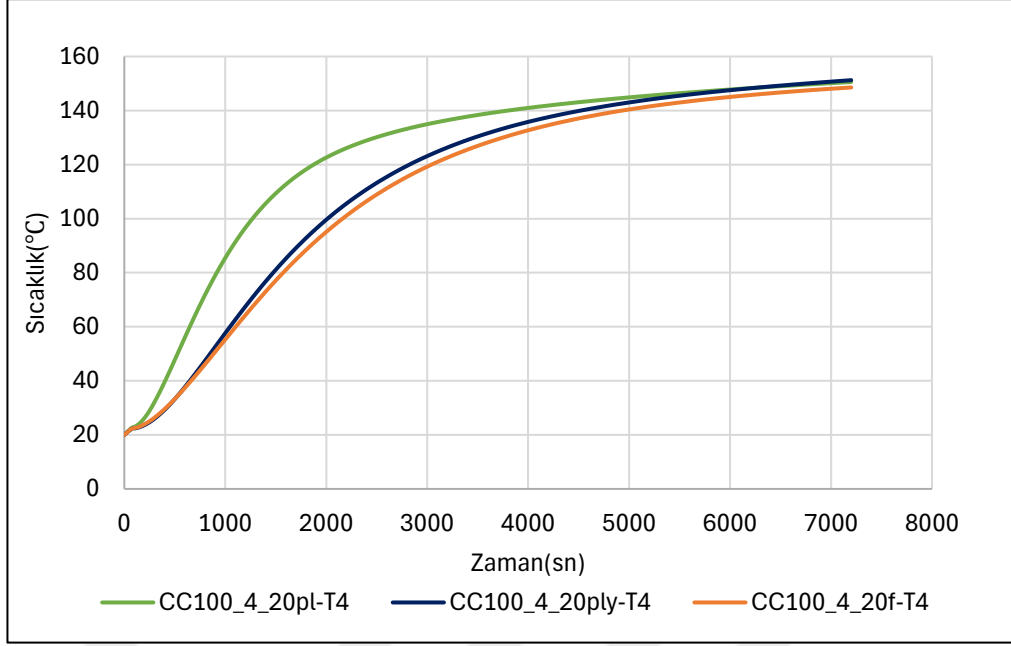
Kolonları CC100×4 mm çelik profilden oluşan ve 20 mm alçı panel, kontrplak ve fibercement levha kaplamaları ile kaplanan modellerde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen T2, T3, T4 ve T5 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.89, Şekil 5.90, Şekil 5.91 ve Şekil 5.92’de gösterilmiştir. Alçı panel, kontrplak ve fibercement levha kaplamalarıyla analiz edilen bu modellerin sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.93, Şekil 5.94 ve Şekil 5.95’te gösterilmiştir.



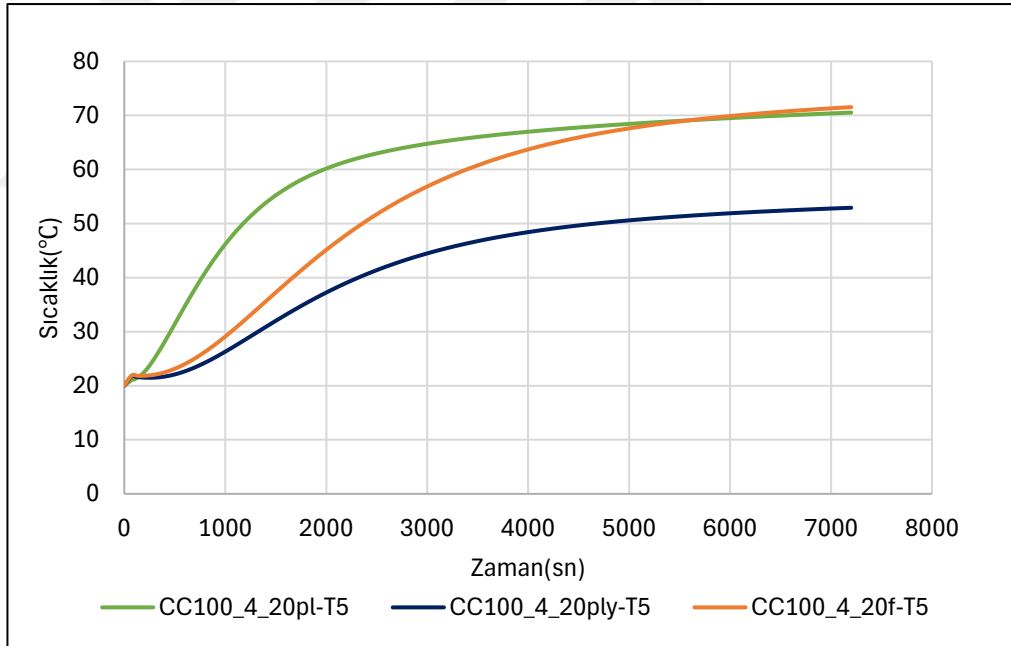
Şekil 5.89. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.



Şekil 5.90. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

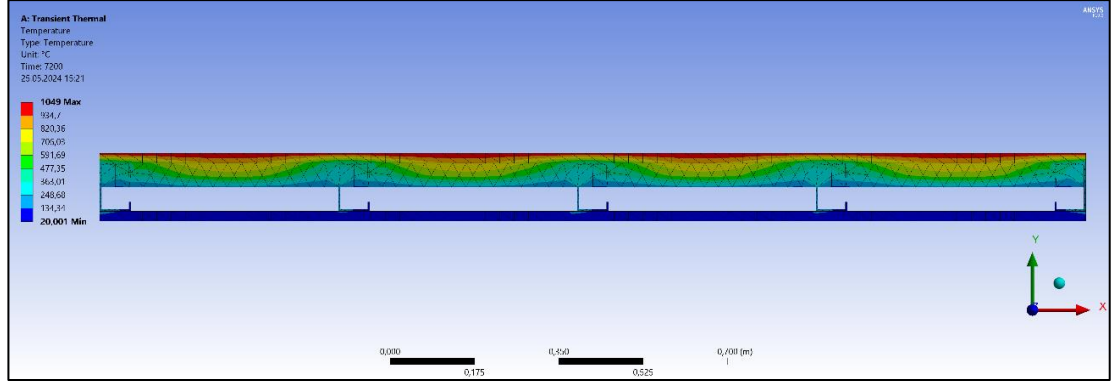


Şekil 5.91. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

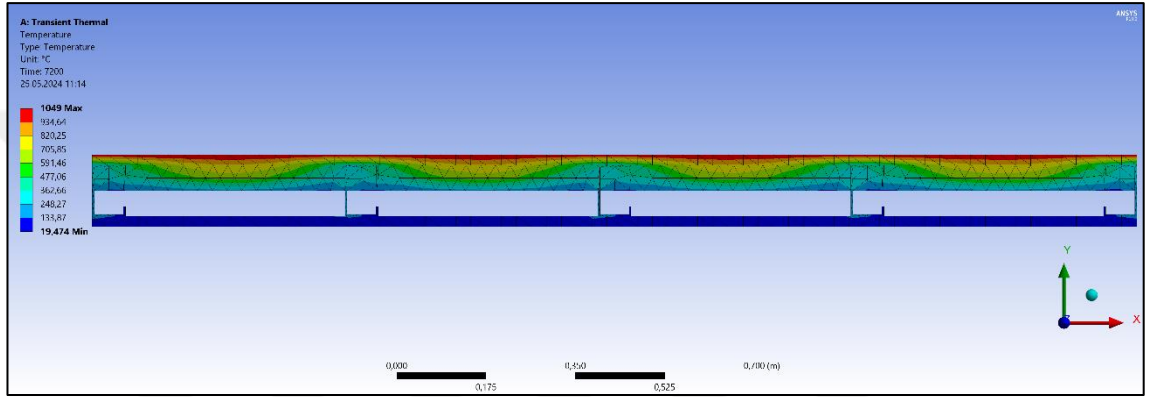


Şekil 5.92. cc_100_4_20pl_m, cc_100_4_20ply_m ve cc_100_4_20f_m modellerinin T5 noktasındaki sıcaklık değerleri karşılaştırması.

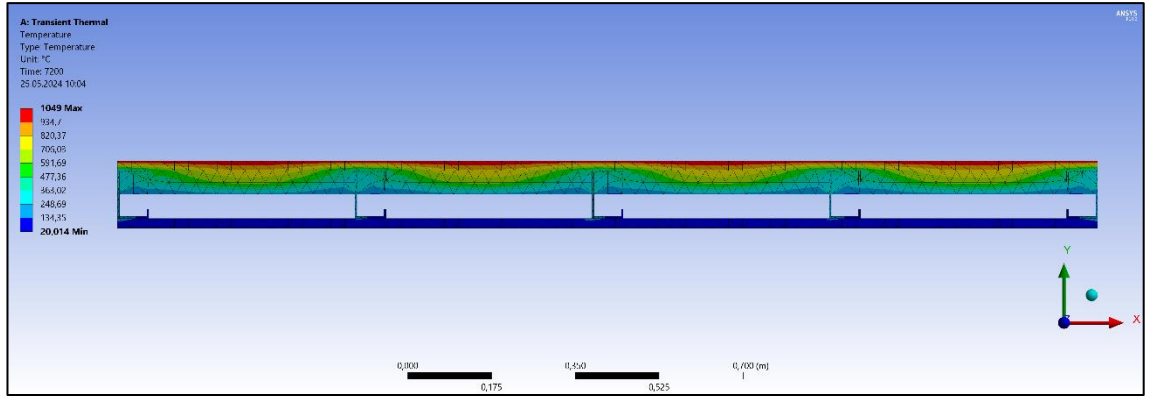
5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 5.93. cc_100_4_20pl_m modelindeki sıcaklık dağılımı

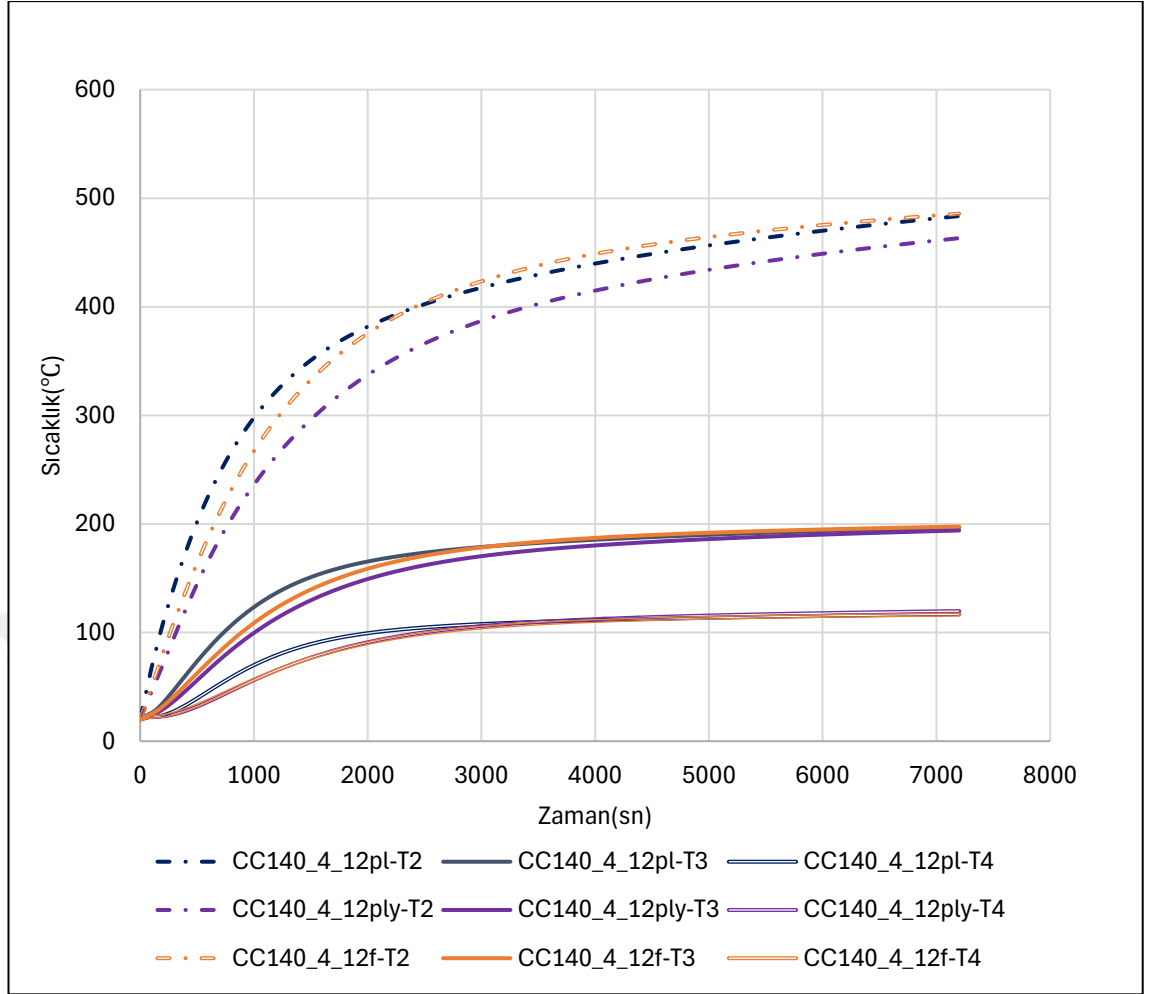


Şekil 5.94. cc_100_4_20ply_m modelindeki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.95. cc_100_4_20f_m modelindeki sıcaklık dağılımı

Kolonları CC140×4 mm çelik profilden oluşan ve 12 mm alçı panel, kontplak ve fibercement levha kaplamaları ile kaplanan modellerde ISO834 Standart yangın etkisinde elde edilen T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık dağılımı Şekil 5.96’da gösterilmiştir.



Şekil 5.96. cc140_4_12pl_m, cc140_4_12ply_m ve cc140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.

CC enkesitli ve farklı yalıtım kaplamaları ile kaplanan modeller üzerinde yapılan analizler sonucu 7200. Saniyede T2, T3, T4 ve T5 noktalarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 5.8’de verilmiştir. Buna göre alçı panel levha kaplamalı modelde T2 noktasındaki sıcaklık değeri 483,59°C olup kontrplak levha kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 663,24°C olurken, fibercement levha kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 485,83°C olarak ölçülmüştür. Modellerin ısı almayan kısımlarındaki yani T5 noktasındaki sıcaklık değerlerine bakılırsa alçıpanel levhanın T5 noktasındaki sıcaklık değeri 73,94°C olup, kontrplak levhanın T5 noktasındaki sıcaklık değeri 59,03°C olup, fibercement levha kaplamalı modelin T5 noktasındaki sıcaklık değeri 75,43°C olarak ölçülmüştür.

Kutu profillerle oluşturulan modellerde fibercement yalıtım kaplaması yangının ilerlemesini yavaşlatarak ve daha az ısı iletimi gerçekleştirerek üstün yangın koruması

sergilerken C profillerle oluşturulan modellerde alçı panel kaplamasıyla neredeyse aynı yangın koruyuculuk özellikleri göstermektedir. Kontrplak levha kaplamaları ise C profillerden oluşturulan modelde en iyi yangın koruma performansı göstermiştir.

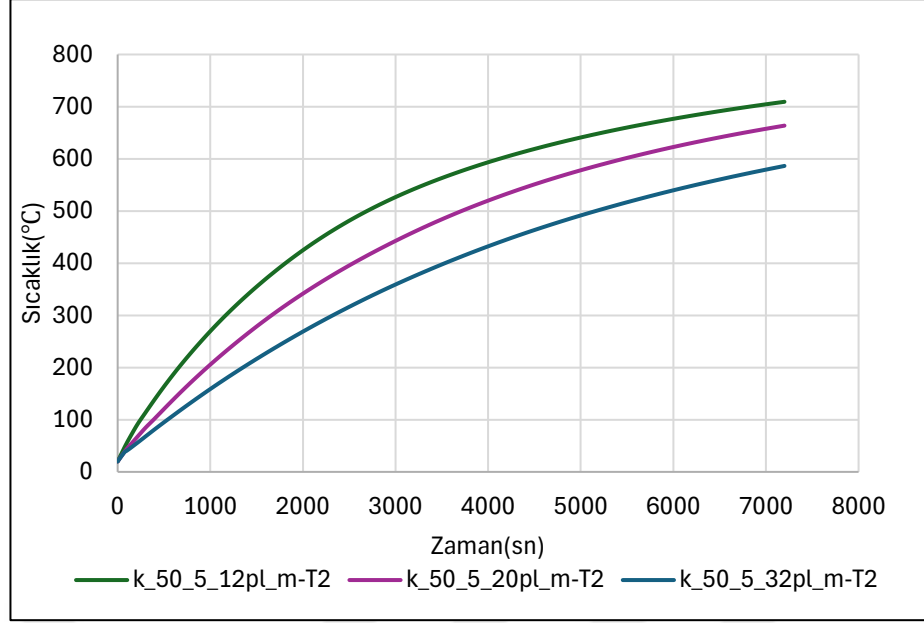
Çizelge 5.8. cc140_4_12pl_m, cc140_4_12ply_m ve cc140_4_12f_m modellerinin T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri.

	CC140_4_12pl_m	CC140_4_12ply_m	CC140_4_12f_m
T2(°C)	483,59	463,24	485,83
T3(°C)	196,89	194,03	197,63
T4(°C)	116,93	119,80	116,61
T5(°C)	73,94	59,03	75,43

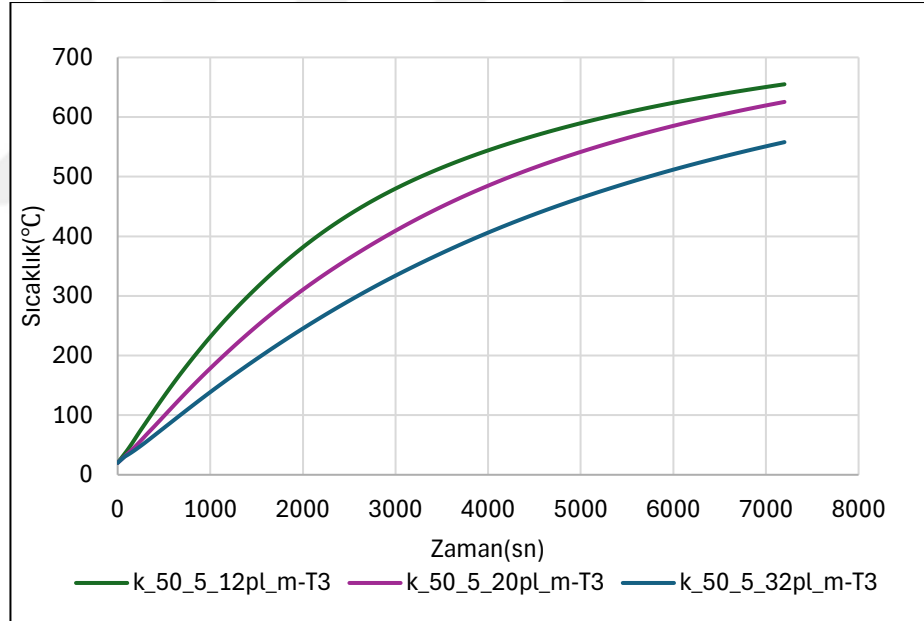
5.12. Yalıtım Kaplamasının Kalınlığının Yangın Performansına Etkisi

Bu tez çalışmasında 3 farklı yalıtım kaplaması kalınlığı için analizler yapılmıştır. Bu kalınlıklar sırasıyla 12 mm, 20 mm ve 32 mm'dir. Tez için hazırlanan 18 model üzerine 3 farklı yalıtım kaplaması kalınlığı kullanılarak yangın esnasında çelik elemanı koruma performansları incelenmiştir.

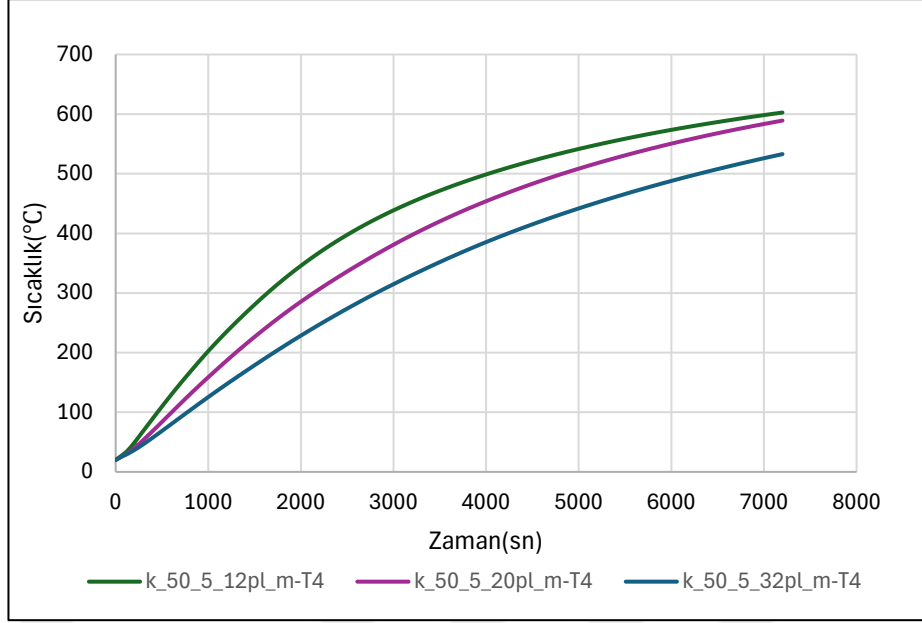
SHS50×2 milimetre çelik elemanına ve yalıtım kaplaması olarak alçı levha uygulanıp değişken olarak kaplama kalınlığı belirlenmiş, ISO834 standart yangın etkisinde yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.97, Şekil 5.98 ve Şekil 5.99'da verilmiştir. 12 milimetrelik, 20 milimetrelik ve 32 milimetrelik kaplama kalınlıklarına sahip olan modellerin sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.100, Şekil 5.101 ve Şekil 5.102'de gösterilmiştir.



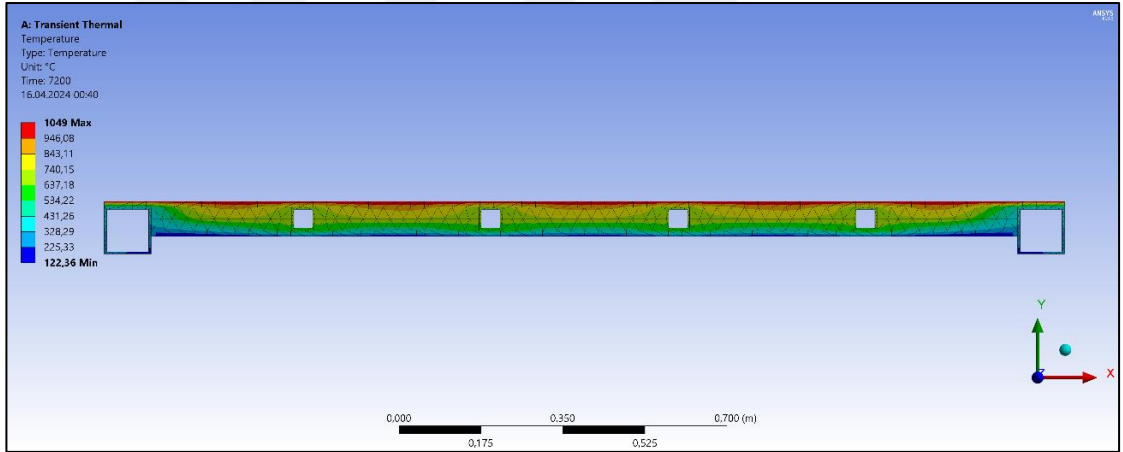
Şekil 5.97. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.



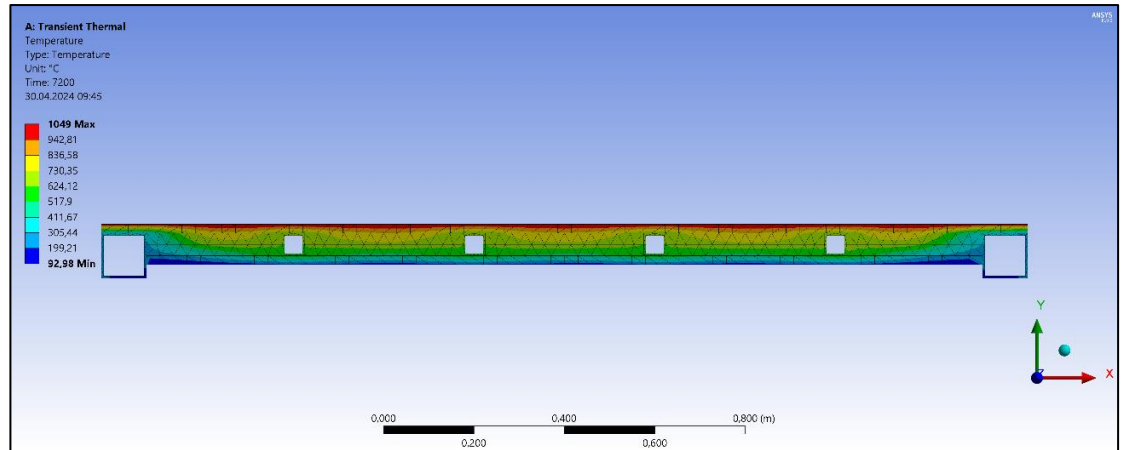
Şekil 5.98. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.



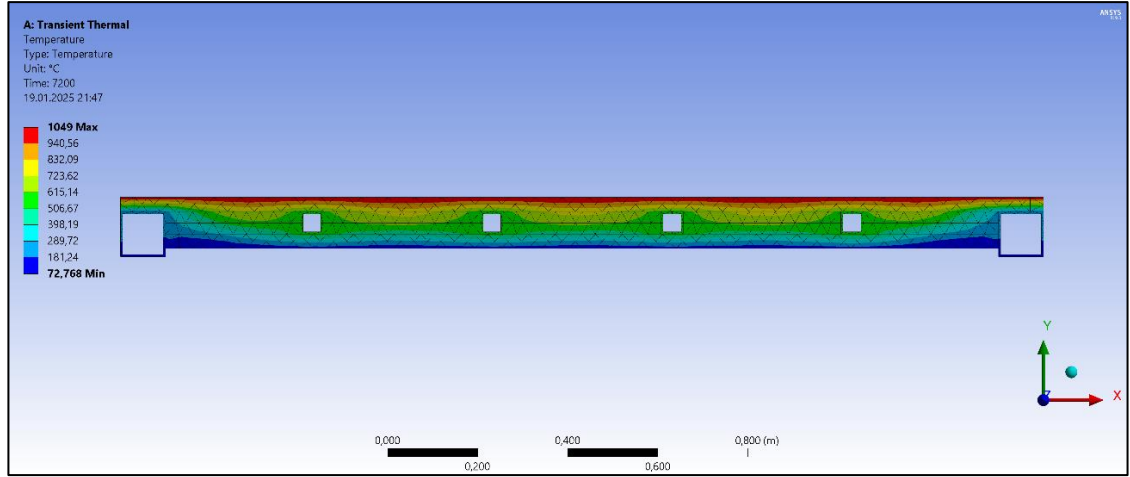
Şekil 5.99. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.



Şekil 5.100. k_50_5_12pl_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.101. k_50_5_20pl_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.102. k_50_5_32pl_m modelinin sıcaklık dağılımı

SHS50×5’lik çelik kolonlardan oluşan modüler yapının yalıtım kaplama türleri aynı ve alçı panel olmak üzere kalınlıkları sırasıyla 12 mm, 20 mm ve 32 mm değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda farklı yalıtım kaplama kalınlıklarına sahip SHS50×5 enkesitli modellerdeki 7200. Saniyede T2, T3 ve T4 noktalarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 5.9’da verilmiştir.

12 mm yalıtım kaplaması bulunan modelde T2 noktasındaki sıcaklık değeri 709,36°C olup 20 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 663,64°C olurken, 32 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 586,40°C olarak ölçülmüştür. T2 noktası baz alınarak 12 mm ve 20 mm’lik levhalar arasında 45,72°C’lik bir fark varken 20 mm ve 32 mm’lik levhalar arasında 77,24°C’lik bir sıcaklık farkı vardır.

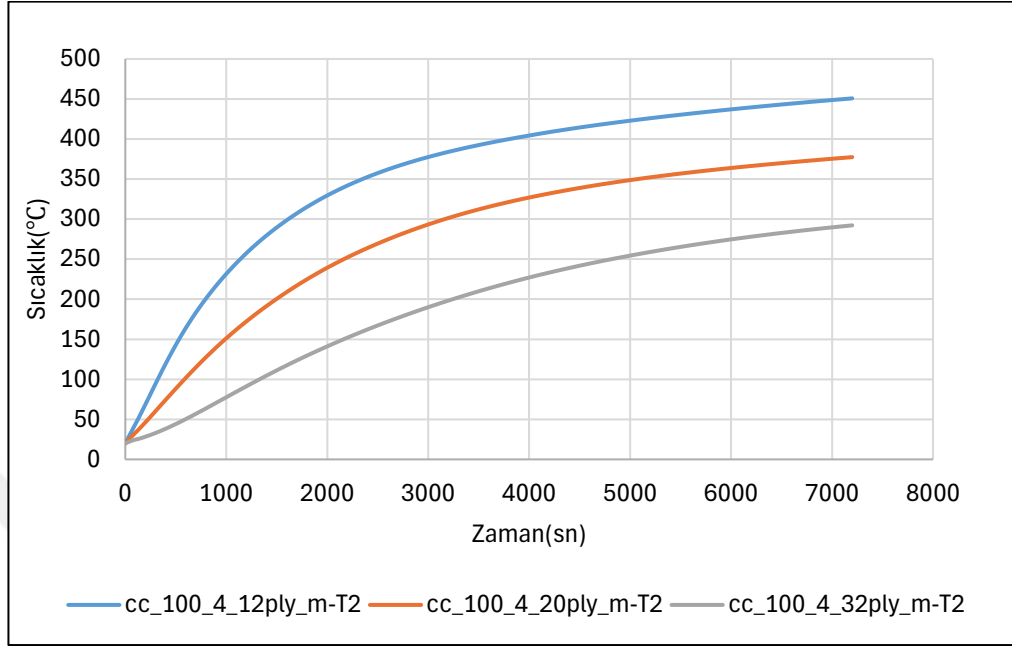
Çizelge 5.9. k_50_5_12pl_m, k_50_5_20_pl_m ve k_50_5_32pl_m modellerinin sıcaklık değerleri.

	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)
k_50_5_12pl_m	709,36	654,94	602,66
k_50_5_20pl_m	663,64	625,33	589,15
k_50_5_32pl_m	586,4	557,88	532,94

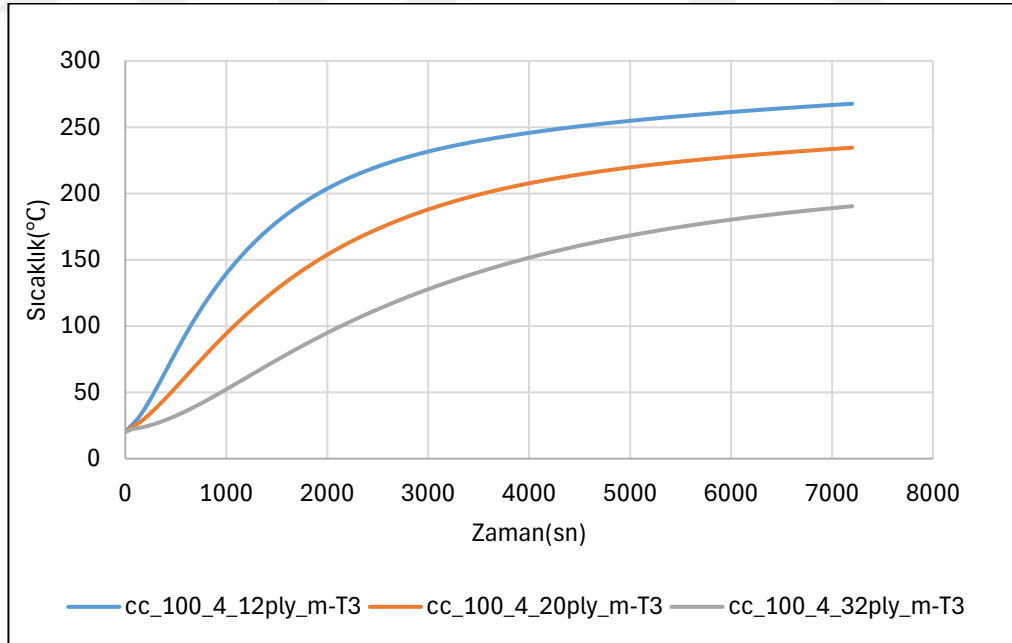
CC100×4 milimetre çelik elemanına ve yalıtım kaplaması olarak kontrplak uygulanıp değişken olarak kaplama kalınlığı belirlenmiş, ISO834 standart yangın

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

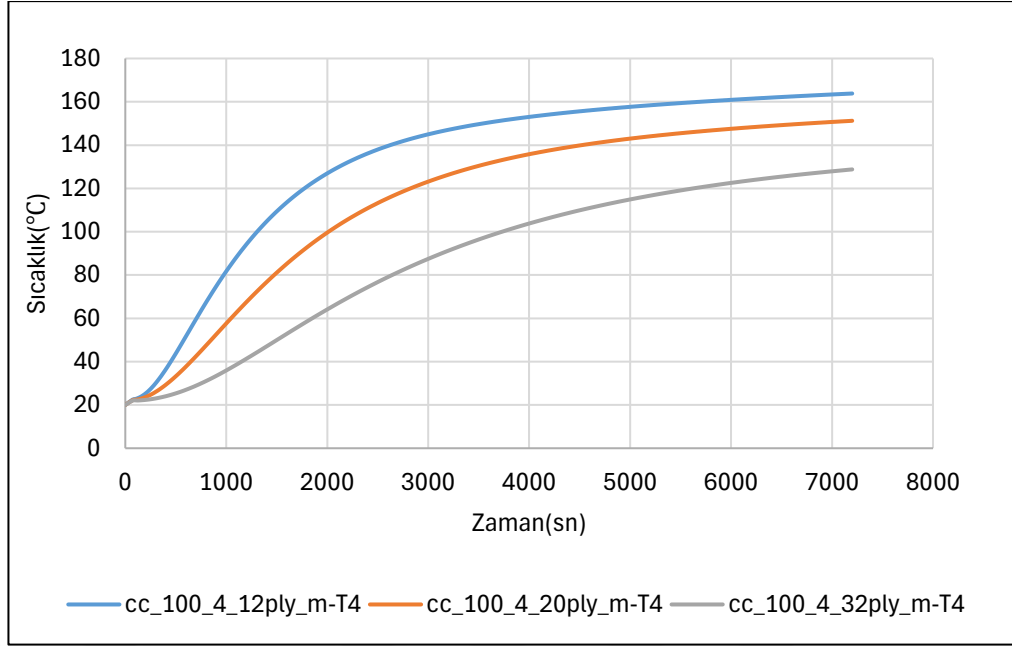
etkisinde yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.103, Şekil 5.104 ve Şekil 5.105'te verilmiştir.



Şekil 5.103. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.

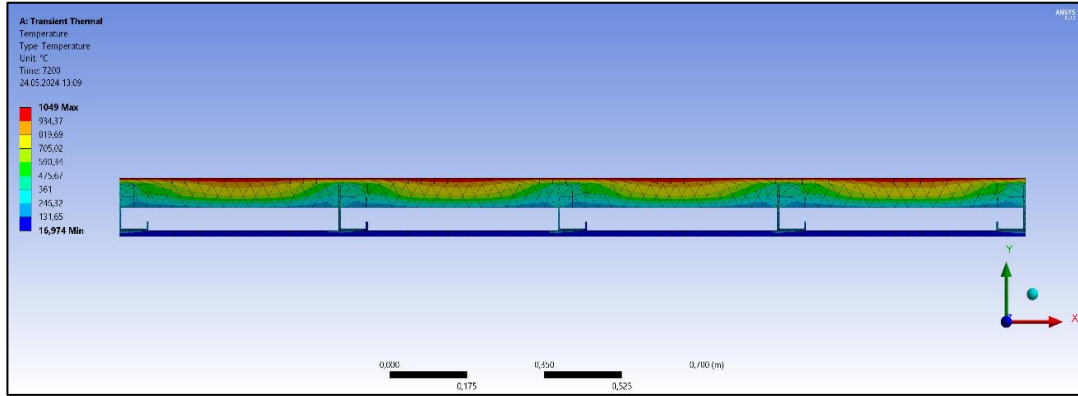


Şekil 5.104. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.

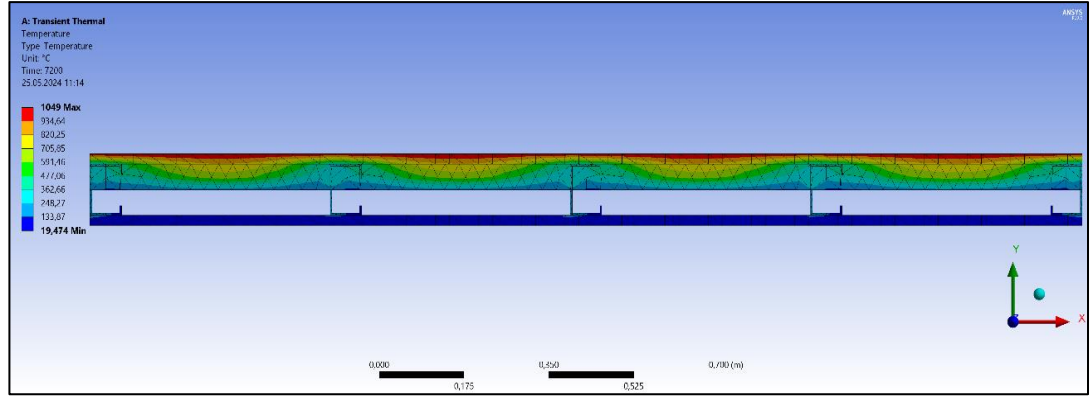


Şekil 5.105. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.

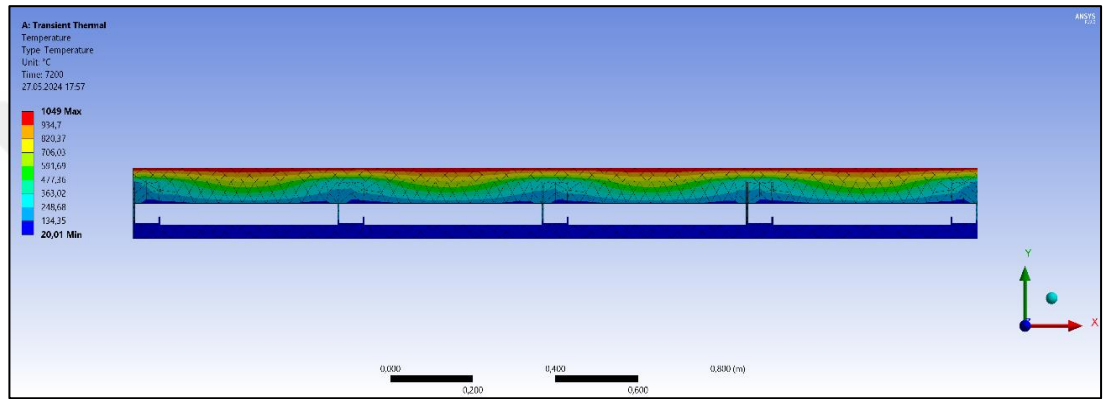
12 milimetrelik, 20 milimetrelik ve 32 milimetrelik kaplama kalınlıklarına sahip olan modellerin sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.106, Şekil 5.107 ve Şekil 5.108’de gösterilmiştir.



Şekil 5.106. cc100_4_12ply_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.107. cc100_4_20ply_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.108. cc100_4_32ply_m modelinin sıcaklık dağılımı

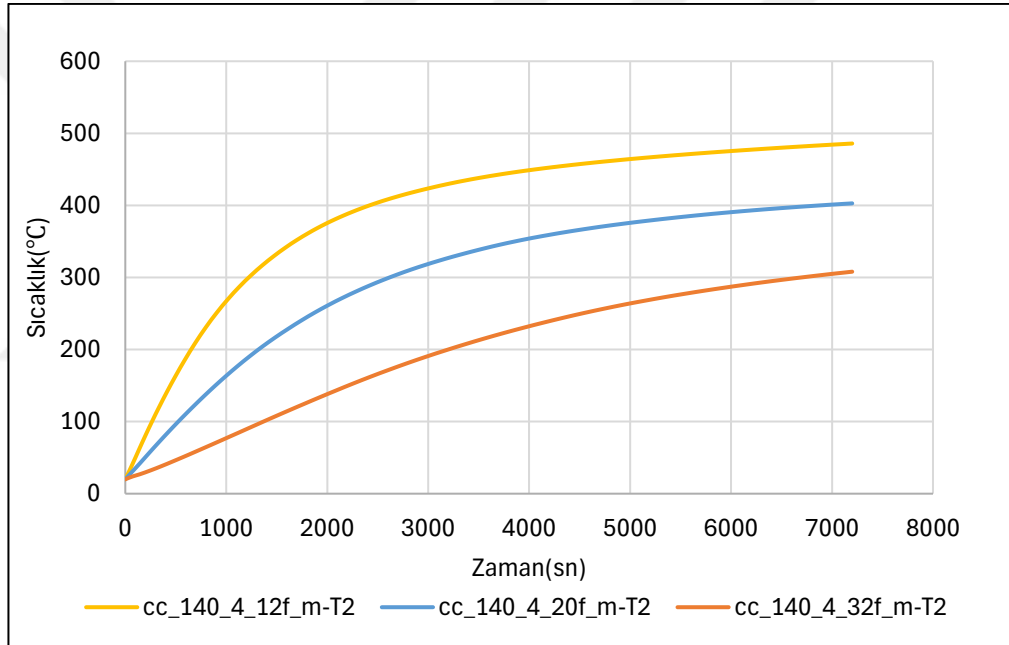
CC100'lük çelik kolonlardan oluşan modüler yapının yalıtım kaplama türleri aynı ve kontrplak levha olmak üzere kalınlıkları sırasıyla 12 mm, 20 mm ve 32 mm değişken olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda farklı yalıtım kaplama kalınlıklarına sahip CC enkesitli modellerdeki 7200. Saniyede T2, T3 ve T4 noktalarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir.

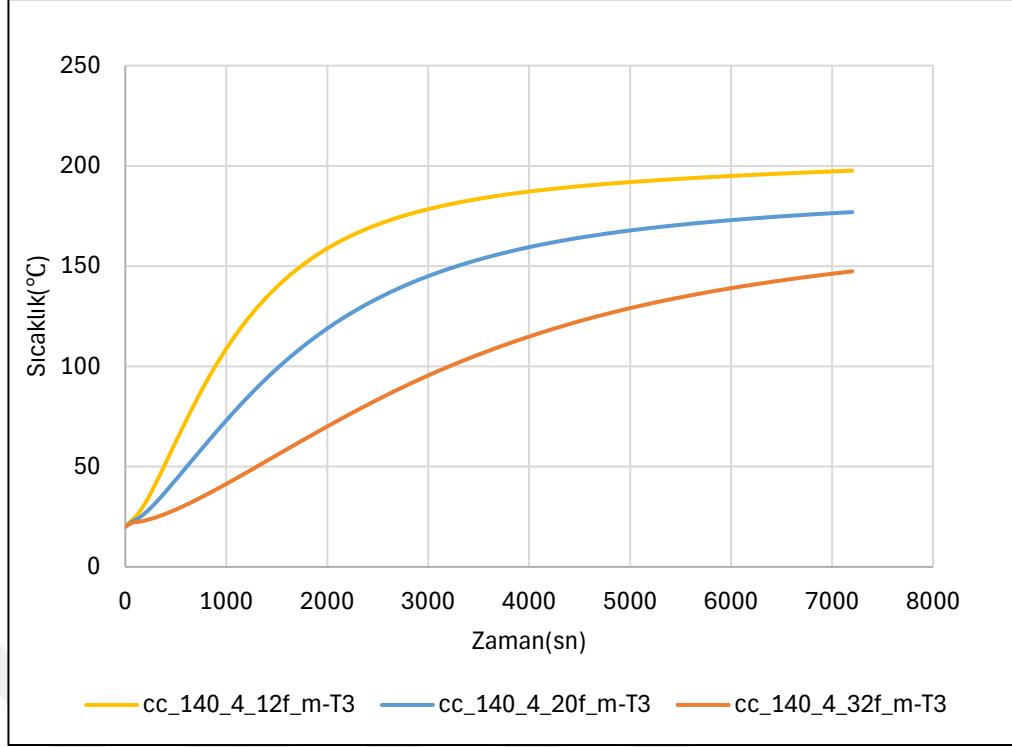
12 mm yalıtım kaplaması bulunan modelde T2 noktasındaki sıcaklık değeri 450,77°C olup 20 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 377,39°C olurken, 32 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 292,22°C olarak ölçülmüştür. T2 noktası baz alınarak 12 mm ve 20 mm'lik levhalar arasında 73,38°C'lik bir fark varken 20 mm ve 32 mm'lik levhalar arasında 85,17°C'lik bir sıcaklık farkı vardır.

Çizelge 5.10. cc100_4_12ply_m, cc100_4_20_ply_m ve cc100_4_32ply_m modellerinin sıcaklık değerleri

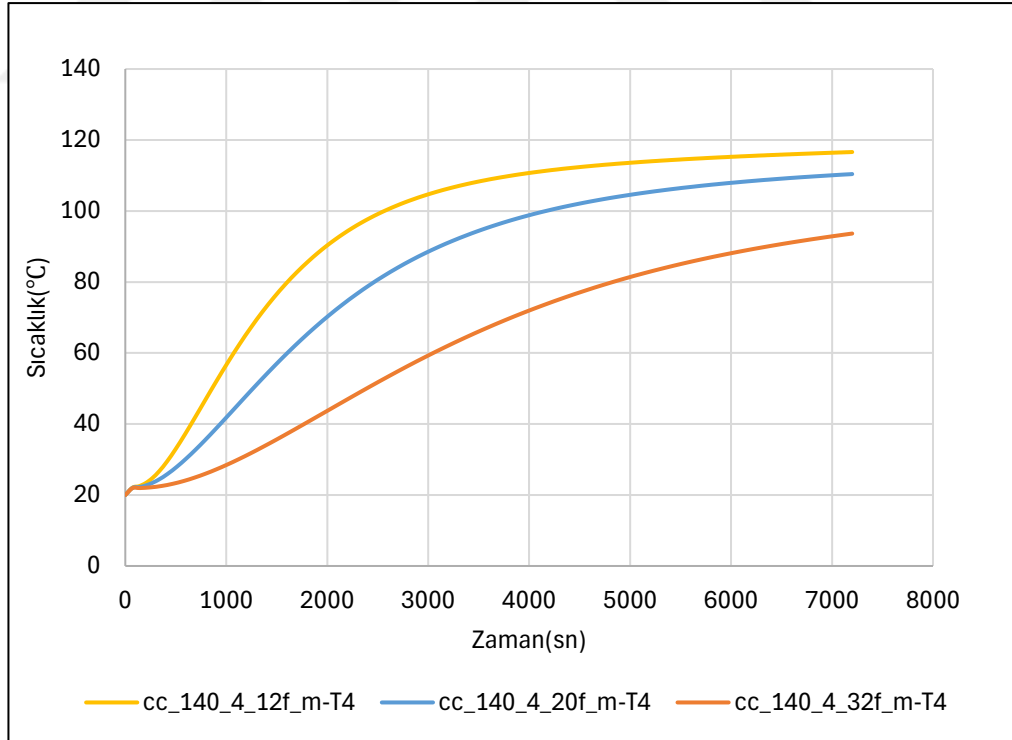
	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)
cc_100_4_12ply_m	450,77	267,65	163,82
cc_100_4_20ply_m	377,39	234,51	151,23
cc_100_4_32ply_m	292,22	190,35	128,77

CC140×4 milimetre çelik elemanına ve yalıtım kaplaması olarak fibercement uygulanıp değişken olarak kaplama kalınlığı belirlenmiş, ISO834 standart yangın etkisinde yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.109, Şekil 5.110 ve Şekil 5.111’de verilmiştir.

**Şekil 5.109.** cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.



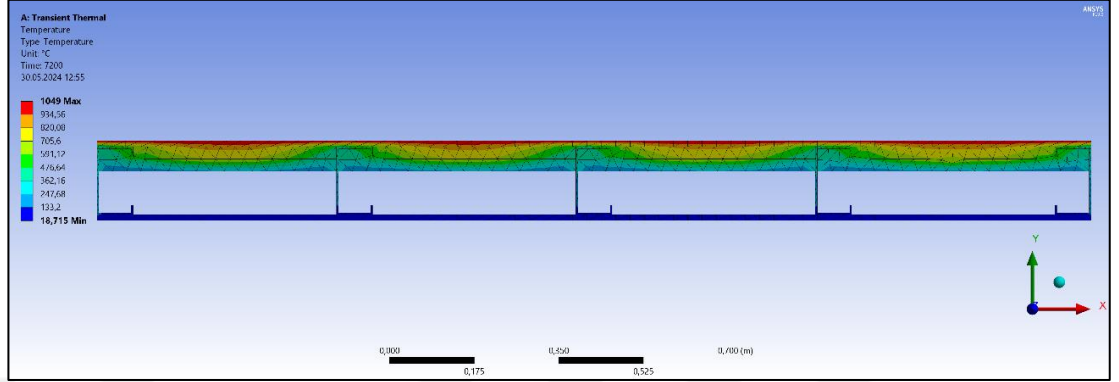
Şekil 5.110. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.



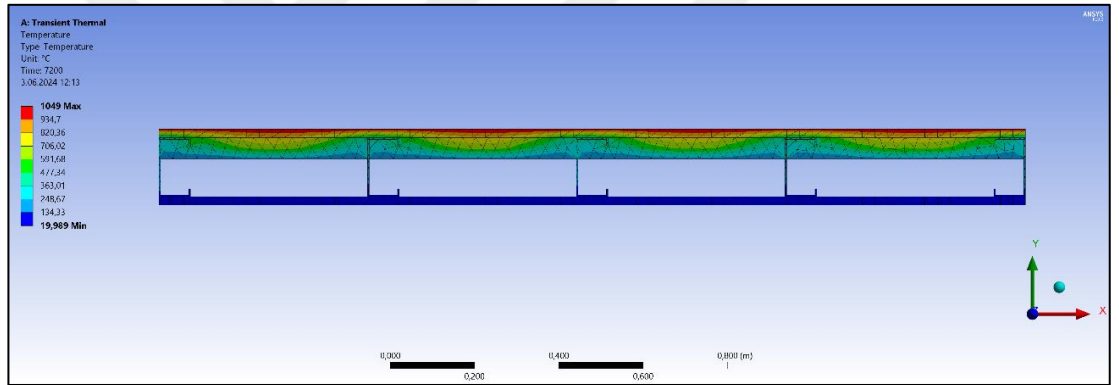
Şekil 5.111. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

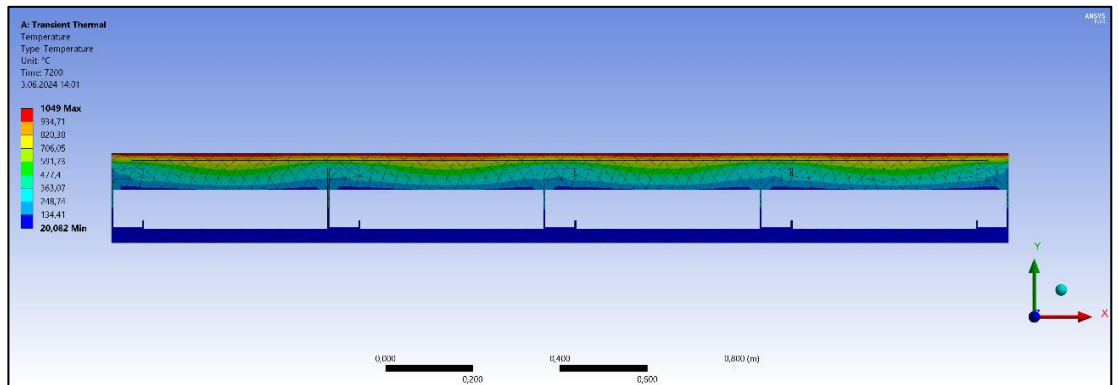
12 milimetrelık, 20 milimetrelık ve 32 milimetrelık kaplama kalınlıklarına sahip olan modellerin sıcaklık dağılımları sırasıyla Şekil 5.112, Şekil 5.113 ve Şekil 5.114'te gösterilmiştir.



Şekil 5.112. cc140_4_12f_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.113. cc140_4_20f_m modelinin sıcaklık dağılımı



Şekil 5.114. cc140_4_32f_m modelinin sıcaklık dağılımı

CC140'lık çelik kolonlardan oluşan modüler yapının yalıtım kaplama türleri aynı ve fibercement levha olmak üzere kalınlıkları sırasıyla 12 mm, 20 mm ve 32 mm değişken

olarak kullanılmış, Standart ISO yangın eğrisi etki ettirilmiş ve 2 saatlik yangına maruz kalma süresince analizler yapılmıştır. Analiz sonucunda farklı yalıtım kaplama kalınlıklarına sahip CC enkesitli modellerdeki 7200. Saniyede T2, T3 ve T4 noktalarında ölçülen sıcaklık değerleri Çizelge 5.11’de verilmiştir.

12 mm yalıtım kaplaması bulunan modelde T2 noktasındaki sıcaklık değeri 485,83°C olup 20 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 402,80°C olurken, 32 mm yalıtım kaplamalı modelin T2 noktasındaki sıcaklık değeri 308,00°C olarak ölçülmüştür. T2 noktası baz alınarak 12 mm ve 20 mm’lik levhalar arasında 83,03°C lik bir fark varken 20 mm ve 32 mm’lik levhalar arasında 94,80°C’lik bir sıcaklık farkı vardır.

32 milimetrelik yalıtım kaplamalarının yangın koruyuculuk performansının 12 milimetrelik ve 20 milimetrelik kaplamalardan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Verilerden de anlaşılacağı üzere CC profillerden oluşan modellerde kutu profillerden oluşan modellere göre daha iyi bir sıcaklık koruması vardır. SHS50’lik çelik profillerle oluşturulan modelde, modelin içinde boşluk olmadığı için boşluk bırakılarak veya aynı kesitteki CC çelik profillerle oluşturulan modeli boşluksuz tasarlayarak sonlu elemanlar yöntemi ile analizi yapıp modelden yola çıkılarak hazırlanan numunelerle deneyler yapılabilir.

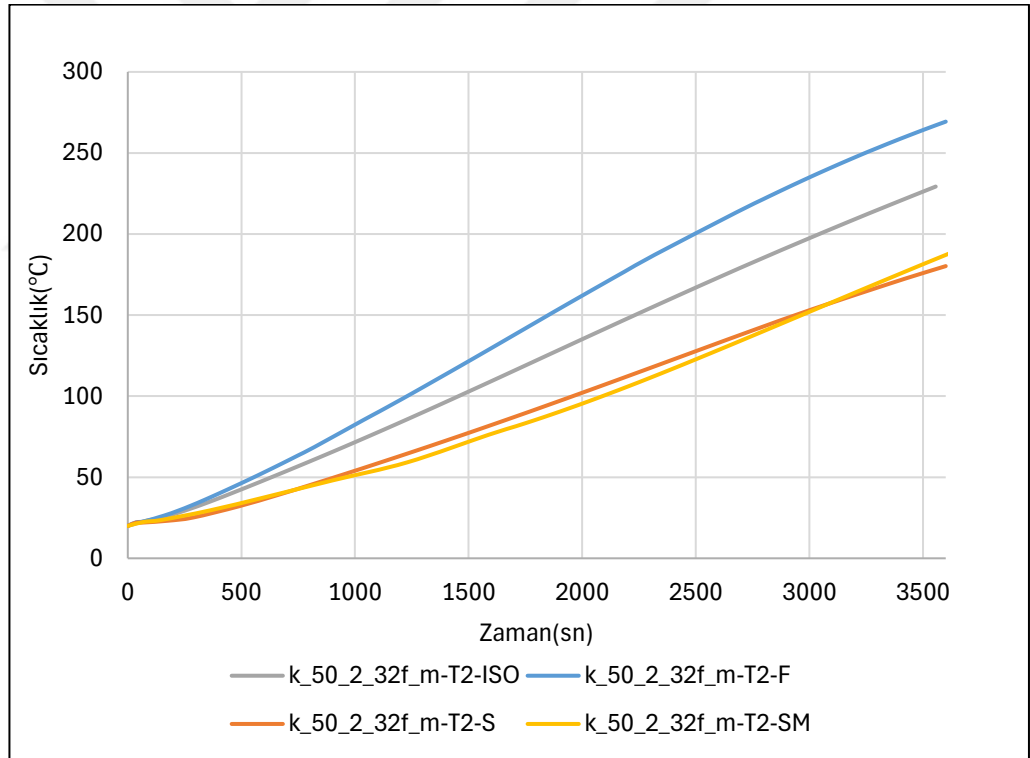
Yalıtım kaplamasının fazla olması yangının modüler elemanın içine yayılmasını geciktirip ısı miktarını azaltarak yapıyı yangından korur ve modülün yapısal bütünlüğünü korur.

Çizelge 5.11. cc140_4_12f_m, cc140_4_20_f_m ve cc140_4_32f_m modellerinin sıcaklık değerleri

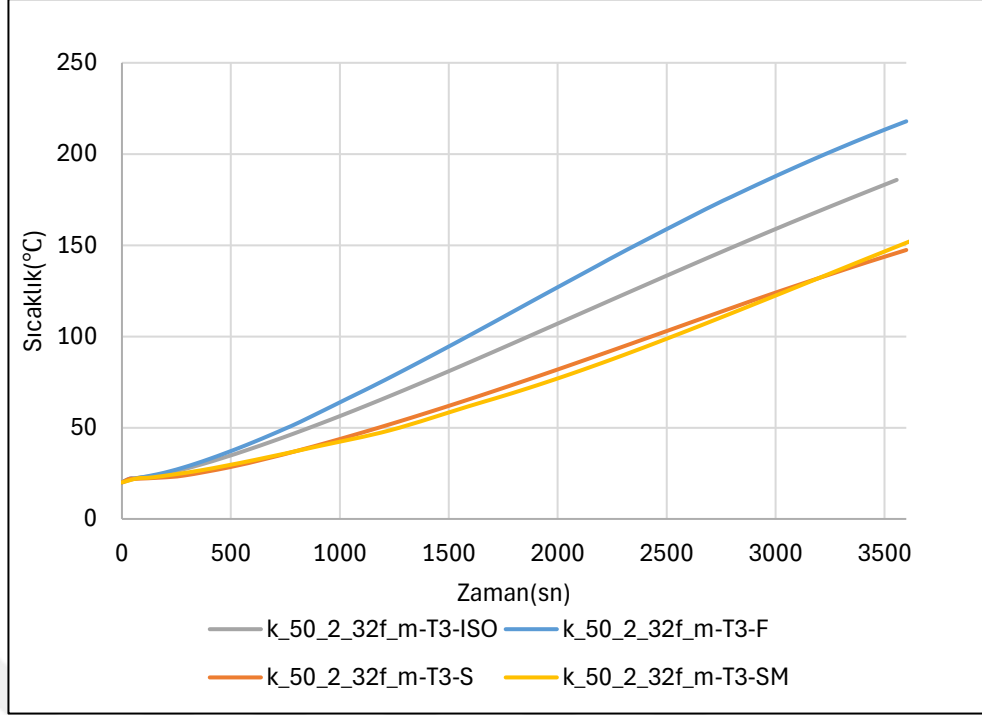
	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)
cc_140_4_12f_m	485,83	197,63	116,61
cc_140_4_20f_m	402,80	176,94	110,40
cc_140_4_32f_m	308,00	147,37	93,64

5.13. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi

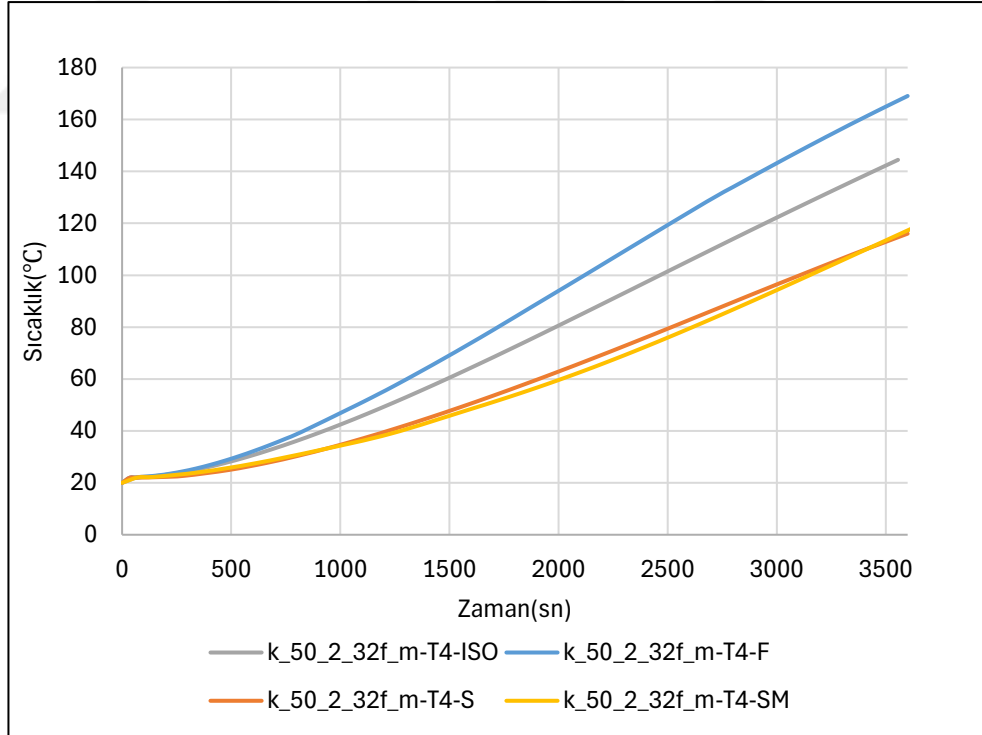
Bu tez çalışmasında 4 farklı yangın eğrisi için analizler yapılmıştır. Bu eğriler sırasıyla Standart ISO 834, FAST (hızlı), SLOW (yavaş) ve Smouldering yangın eğrileridir. Tez için hazırlanan 18 model üzerinde 4 farklı yangın eğrisi kullanılarak yangın esnasında çelik elemanın yanma senaryoları incelenmiştir. SHS50×2 milimetre çelik elemanına ve 32 milimetrelik fibercement yalıtım kaplamasına sahip olup değişken olarak yangın eğrileri belirlenmiş, 1 saatlik yangın süresince farklı yangın senaryolarında malzemelerin yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.115, Şekil 5.116 ve Şekil 5.117’de gösterilmiştir. ISO ve Smouldering yangın eğrilerinin standart süreleri 2 saattir ancak sağlıklı sonuçlar elde edilmesi için 3600. Saniyesinde ölçülen sıcaklık değerleri kullanılmıştır.



Şekil 5.115. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.



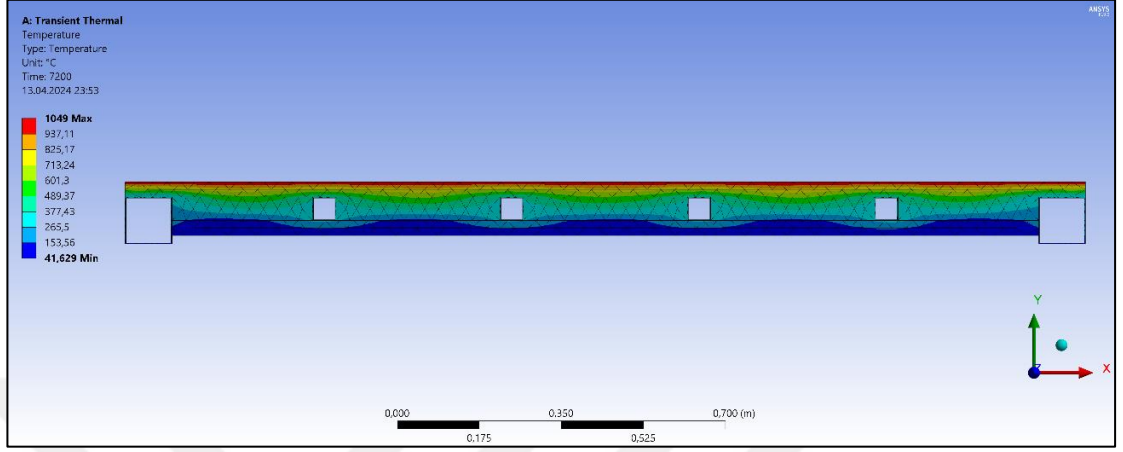
Şekil 5.116. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.



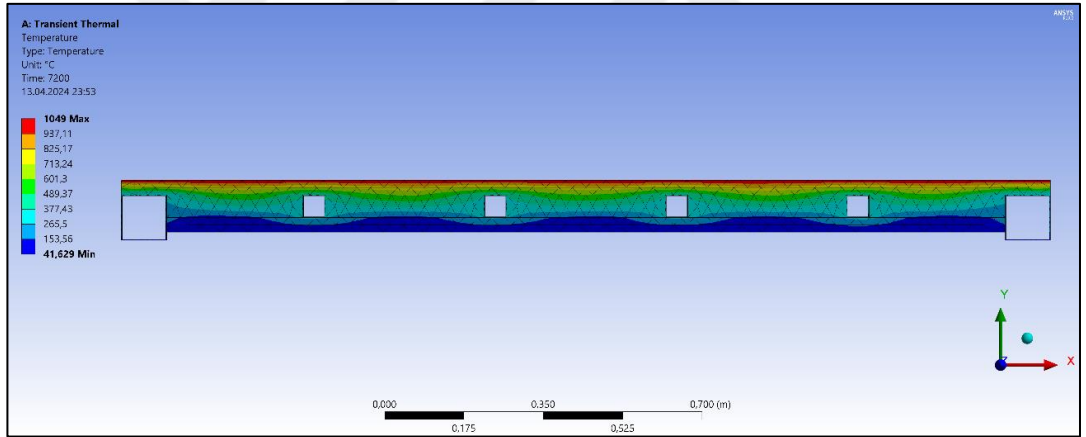
Şekil 5.117. k_50_2_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

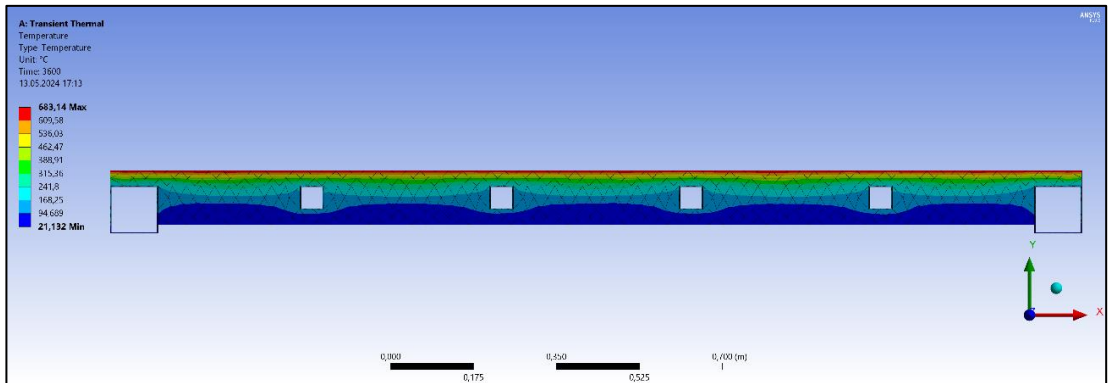
k_50_2_32f_m modelinin Standard ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarında oluşturdukları sıcaklık dağılımları Şekil 5.118, Şekil 5.119, Şekil 5.120 ve Şekil 5.121’de verilmiştir.



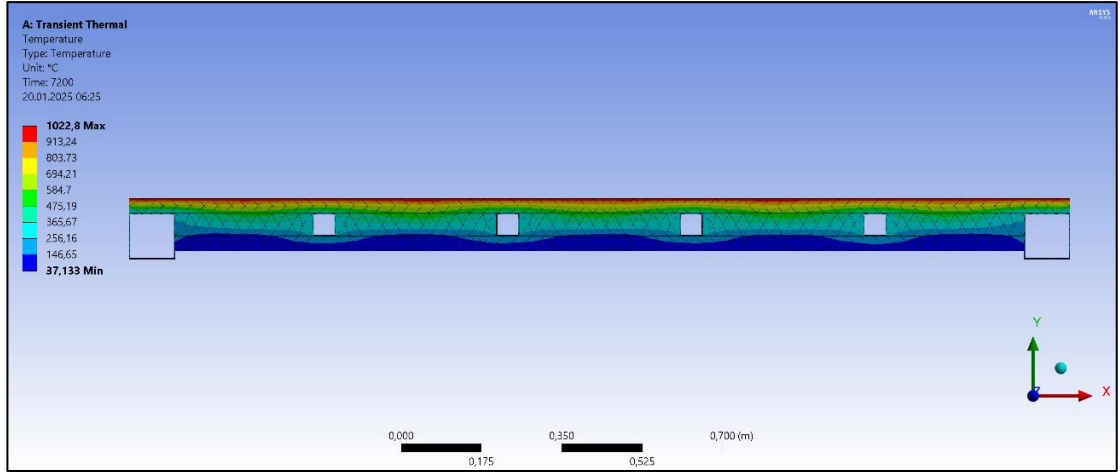
Şekil 5.118. k_50_2_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.119. k_50_2_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı

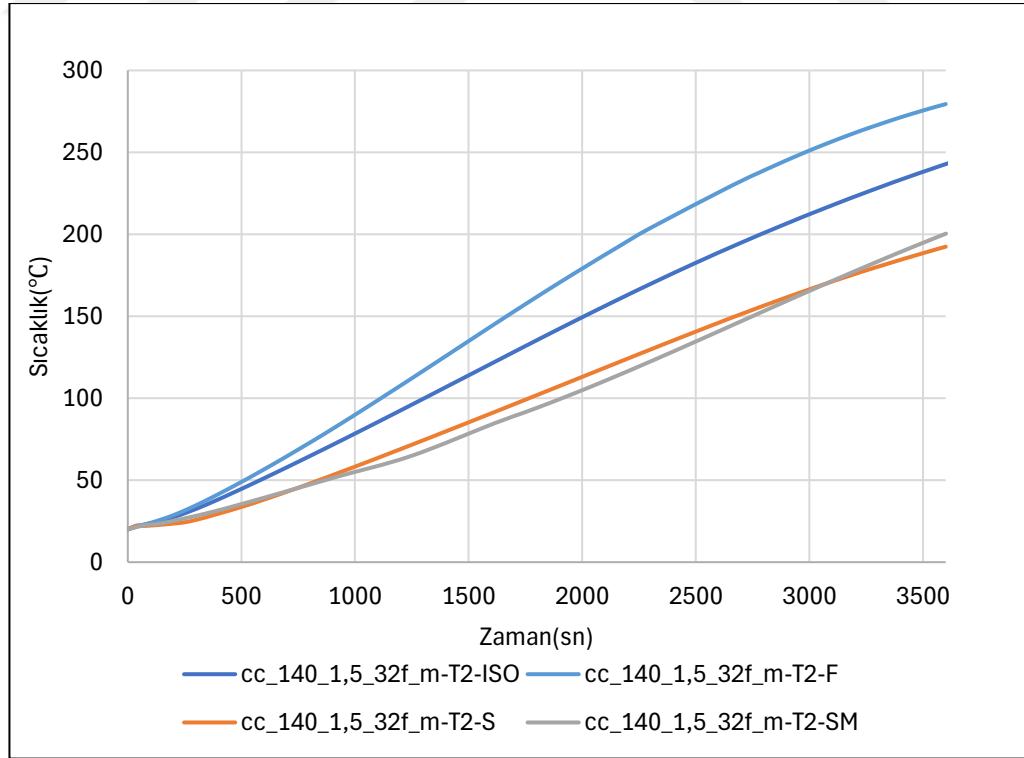


Şekil 5.120. k_50_2_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı

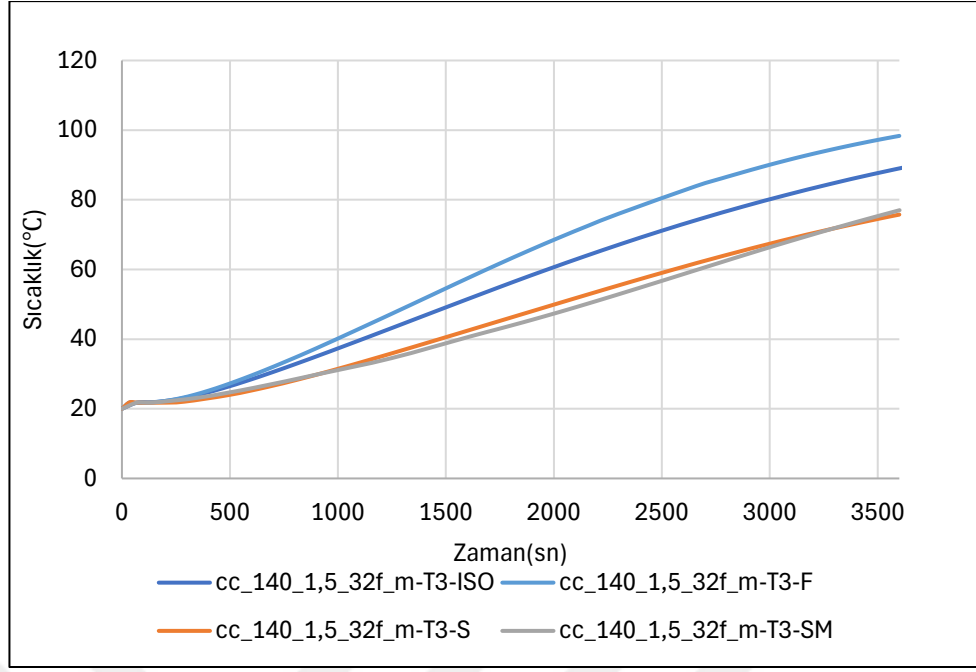


Şekil 5.121. k_50_2_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.

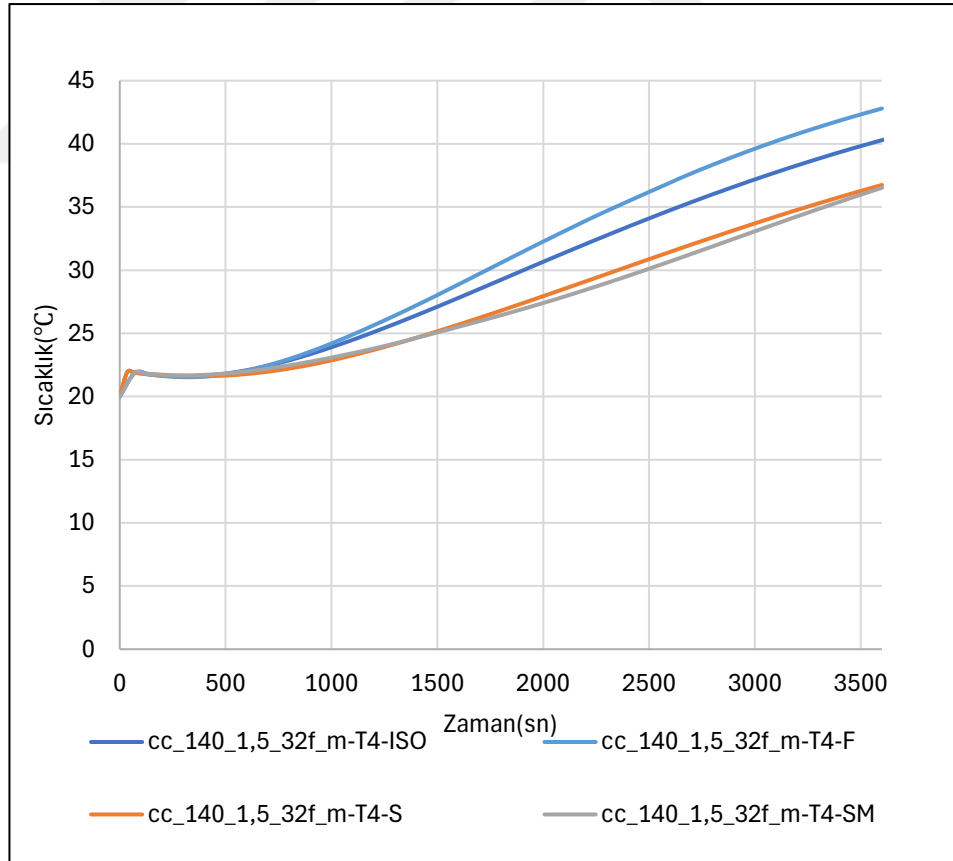
CC140×1,5 milimetre çelik elemanına ve 32 milimetrelik fibercement yalıtım kaplamasına sahip olup değişken olarak yangın eğrileri belirlenmiş, 1 saatlik yangın süresince farklı yangın senaryolarında malzemelerin yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.122, Şekil 5.123 ve Şekil 5.124’de gösterilmiştir.



Şekil 5.122. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.



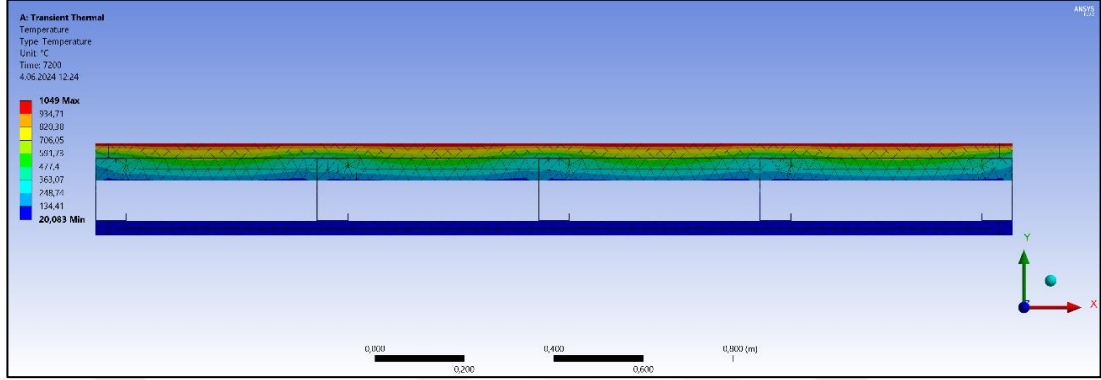
Şekil 5.123. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.



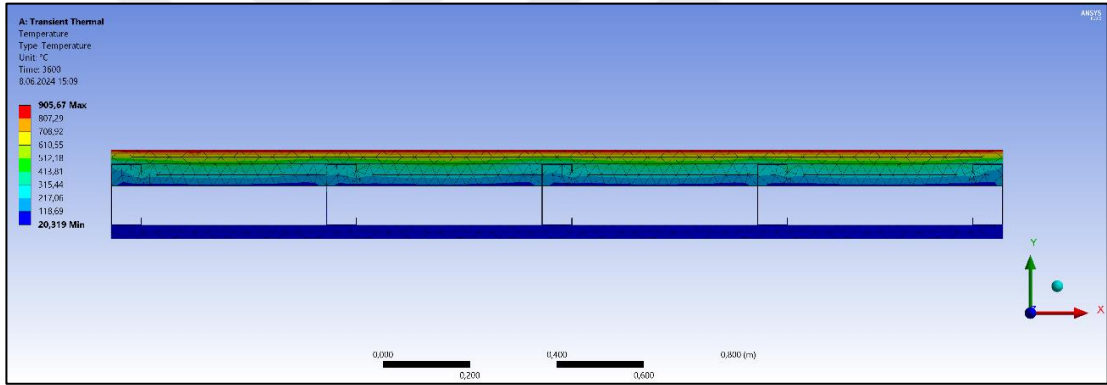
Şekil 5.124. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

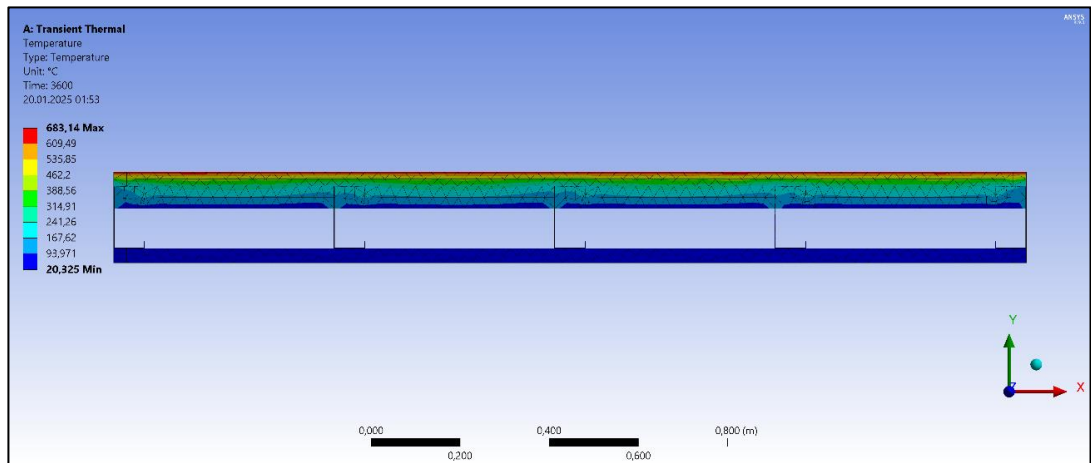
cc_140_1,5_32f_m modelinin Standard ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarında oluşturdukları sıcaklık dağılımları Şekil 5.125, Şekil 5.126, Şekil 5.127 ve Şekil 5.128’de verilmiştir.



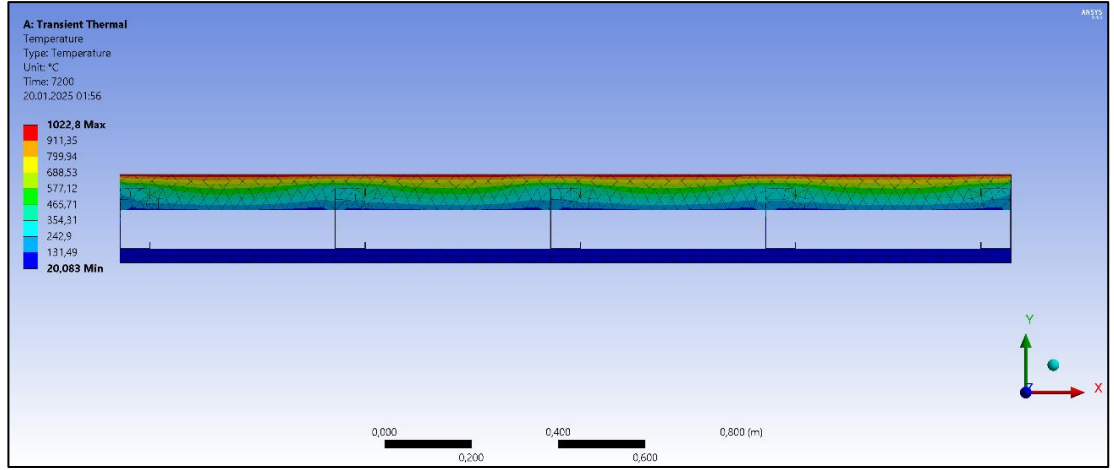
Şekil 5.125. cc_140_1,5_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.126. cc_140_1,5_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.

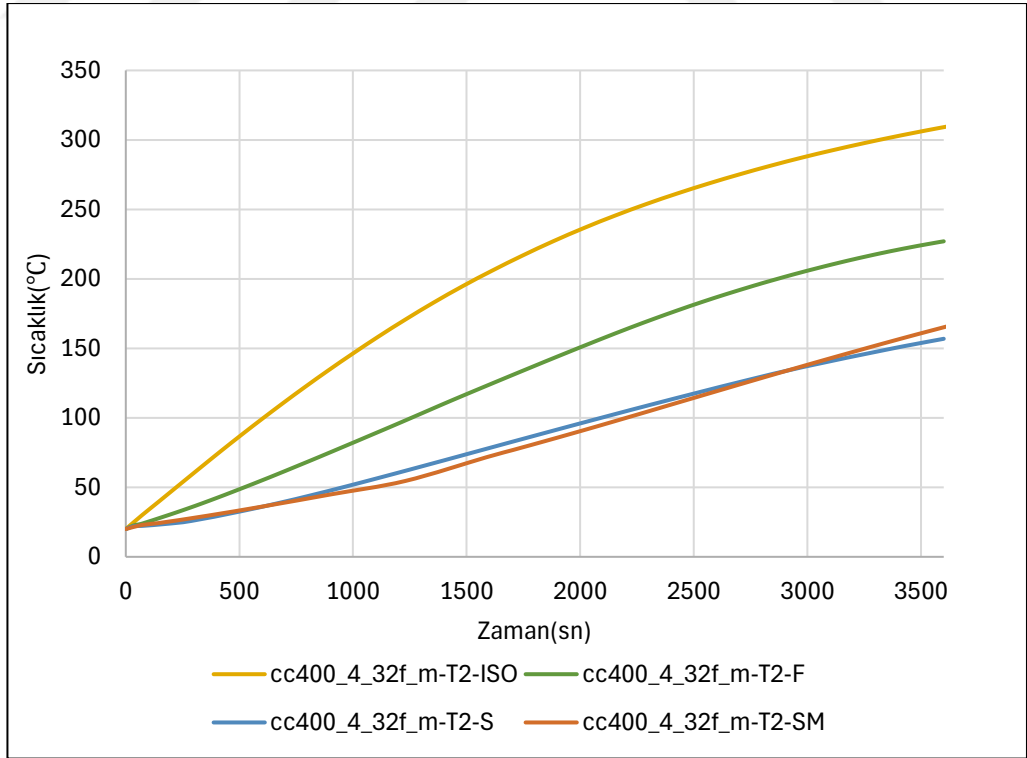


Şekil 5.127. cc_140_1,5_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.

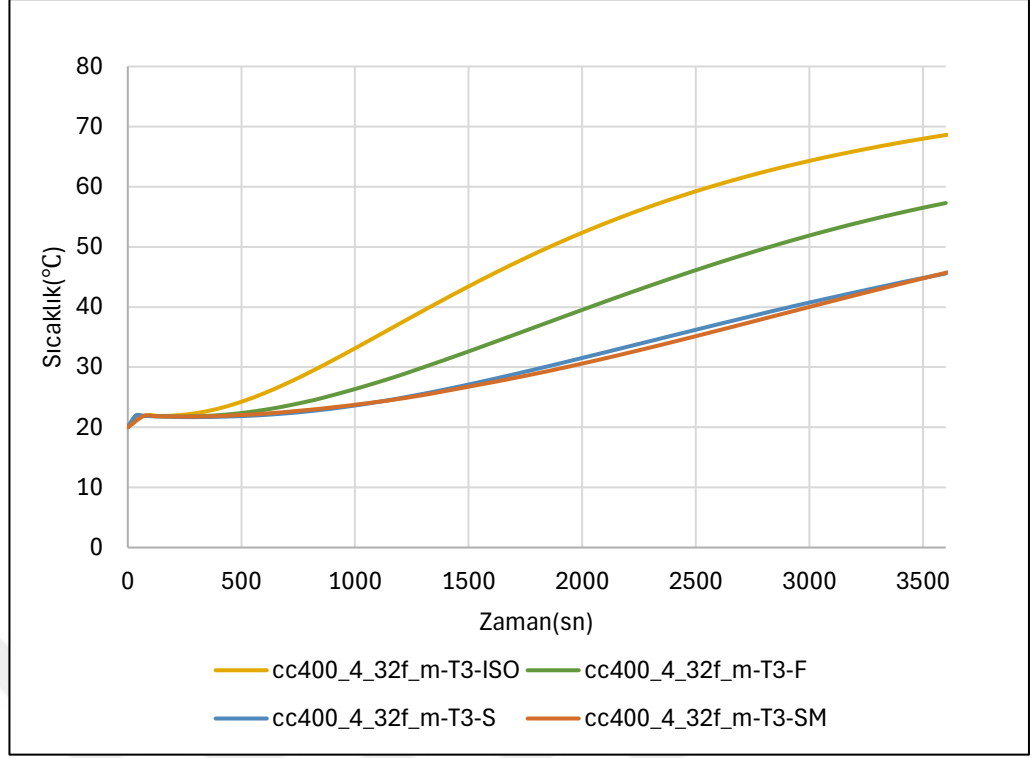


Şekil 5.128. cc_140_1,5_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.

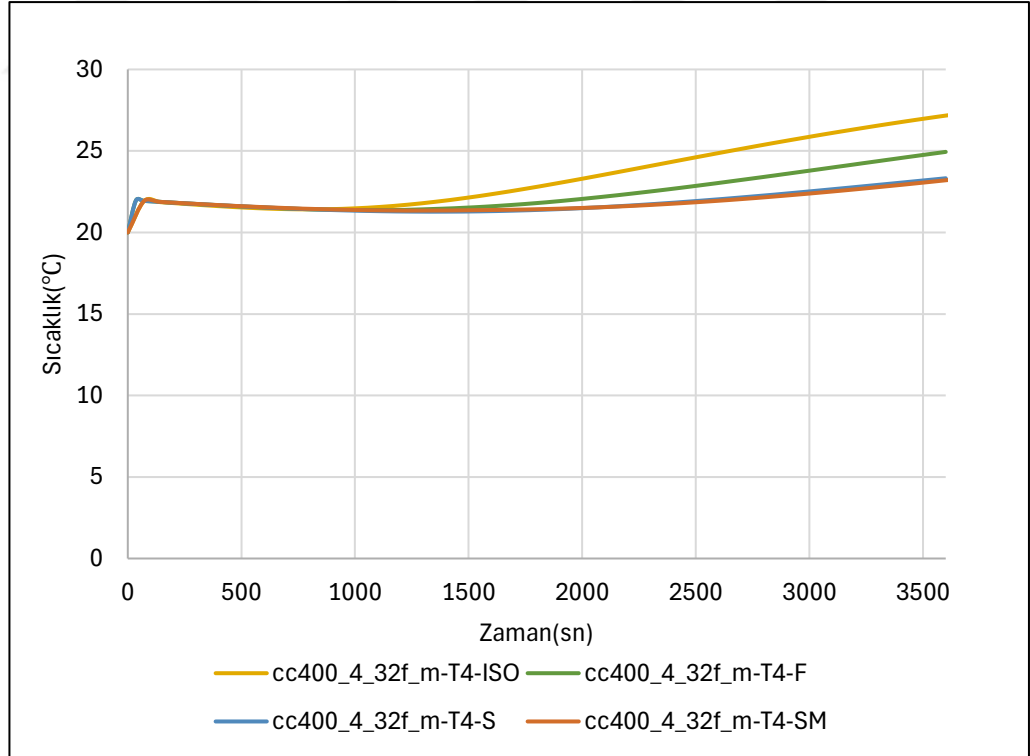
CC400×4 milimetre çelik elemanına ve 32 milimetrelik fibercement yalıtım kaplamasına sahip olup değişken olarak yangın eğrileri belirlenmiş, 1 saatlik yangın süresince farklı yangın senaryolarında malzemelerin yangın koruyuculuklarını araştırmak için T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 5.129, Şekil 5.130 ve Şekil 5.131’de gösterilmiştir.



Şekil 5.129. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T2 noktasındaki sıcaklık değerleri.



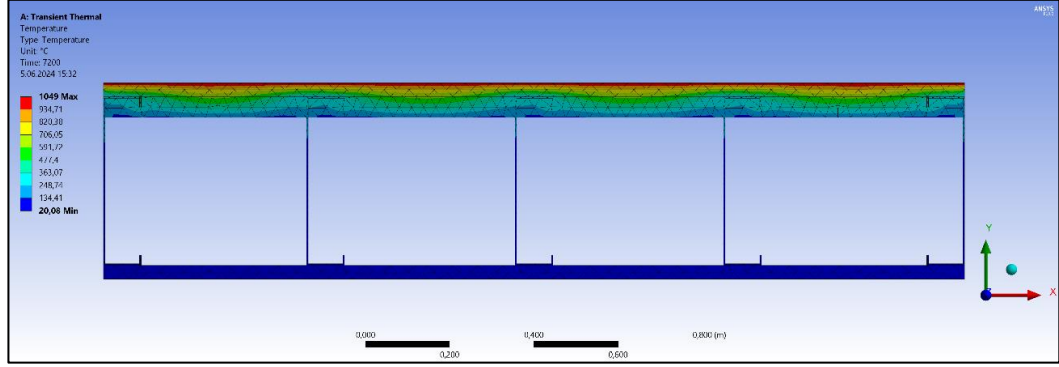
Şekil 5.130. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T3 noktasındaki sıcaklık değerleri.



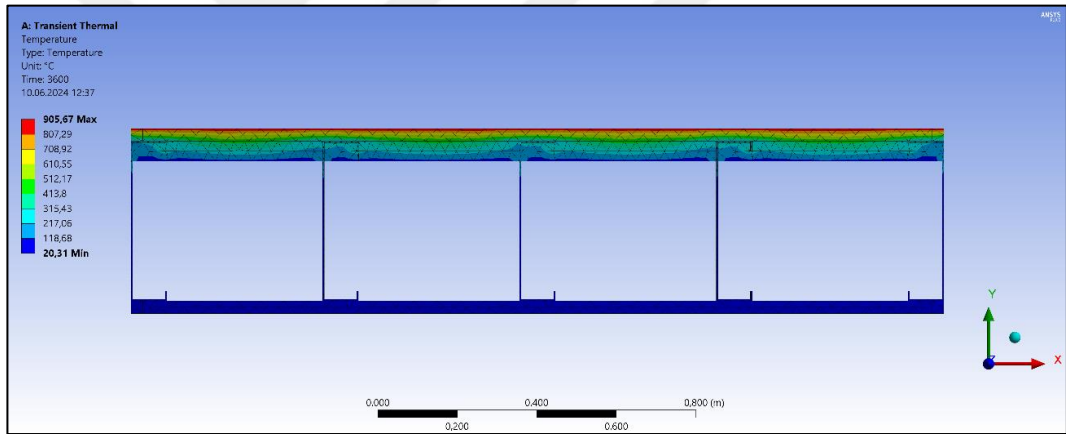
Şekil 5.131. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarındaki T4 noktasındaki sıcaklık değerleri.

5. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

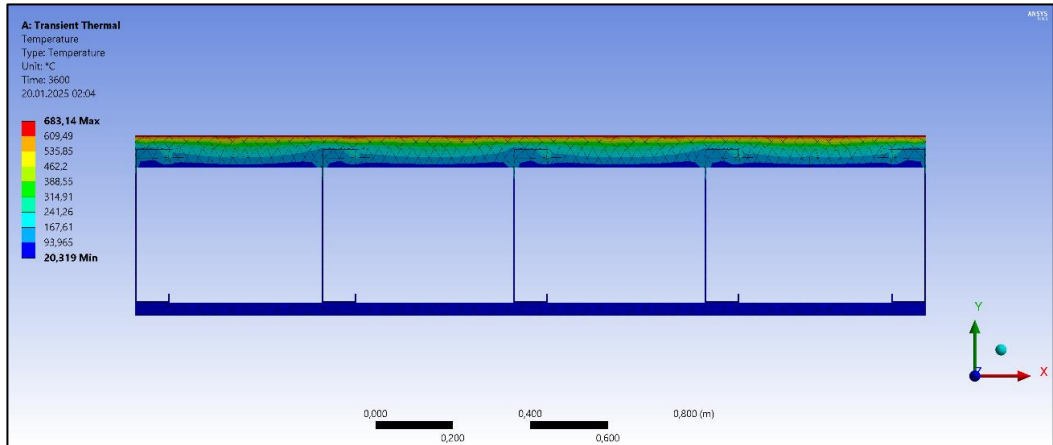
cc_400_4_32f_m modelinin Standard ISO834, Fast, Slow ve Smouldering yangın senaryolarında oluşturdukları sıcaklık dağılımları Şekil 5.132, Şekil 5.133, Şekil 5.134 ve Şekil 5.135’de verilmiştir.



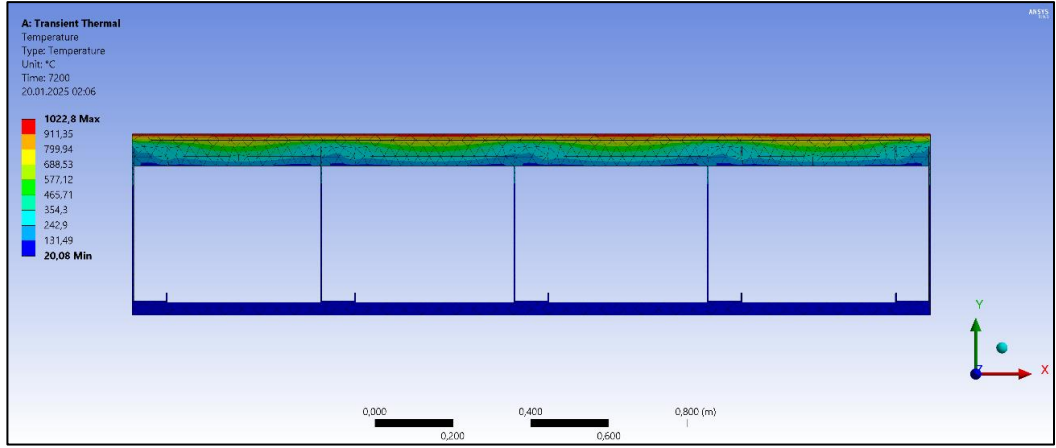
Şekil 5.132. cc_400_4_32f_m modelinin ISO834 yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 5.133. cc_400_4_32f_m modelinin FAST yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.134. cc_400_4_32f_m modelinin SLOW yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı



Şekil 5.135. cc_400_4_32f_m modelinin Smouldering yangın senaryosundaki sıcaklık dağılımı.

k_50_2_32f_m, cc_140_4_1,5_32f_m ve cc_400_4_32f_m modellerine etki ettirilen yangın eğrileri değişken olarak kullanılmış, 1 saatlik yangına maruz kalma süresince yangın senaryoları gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda FAST (Hızlı) yangın eğrisi etki ettirilen modellerdeki T2, T3 ve T4 sıcaklık değerleri en yüksek değerler olup SLOW (Yavaş) ve Smouldering yangın eğrileri etki ettirilen modellerde T2, T3 ve T4 noktalarındaki sıcaklık değerleri neredeyse aynı çıkmıştır ve bu değerler analizi yapılan yangın senaryoları arasındaki en düşük değerlerdir. ISO 834 Standart yangın eğrisi etki ettirilen modellerdeki noktalar ise ortalama sıcaklık değerlerine sahiptirler.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, modüler duvar panelleri içerisinde bulunan çelik profillerinin en kesitleri, profil et kalınlıkları, iç yalıtım malzemeleri, dış yalıtım kaplamaları türleri ve kaplama kalınlıkları 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 (Versiyon 19.0) Transient Thermal seçeneği yardımıyla yapılmıştır ve modüler yapı içindeki çelik elemanın üst (T2), orta (T3) ve alt (T4) noktalarındaki sıcaklık değerleri ve modüler elemanın sıcaklık gradyanı (dağılımı) elde edilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar 6 grup olarak verilmiştir. Bunlar;

- 1- 50 milimetre kalınlığında mineral yün ve taş yünü olmak üzere olmak üzere 2 farklı ısı yalıtım malzemesi türü kullanılmıştır. Bu malzemeler SHS ve CC profillerle oluşturulmuş modeller üzerinde analiz edilmiştir.
- 2- Çelik et kalınlığı olarak, kutu profiller için 2 mm ve 5 mm, C profiller için 1,5 mm ve 4 mm olmak üzere 4 farklı kalınlık değerlendirmeye alınmıştır.
- 3- Çelik en kesiti olarak, SHS50×2, SHS50×5, CC100×45×19×4, CC140×75×19×4, CC400×90×24×4 ve CC140×70×16×1,5 olmak üzere 5 farklı profil kullanılarak yangından etkilenme durumları çeşitli noktalarda incelenmiştir.
- 4- Modüler duvar panelini kaplayan ve alçı panel, kontrplak ve fibercement levha olmak üzere 3 farklı ısı yalıtım kaplaması kullanılarak çeşitli enkesitlerdeki modellerle sıcaklık analizi yapılmıştır.
- 5- Isı yalıtım kaplaması olarak 12 mm, 20 mm ve 32 mm olmak üzere 3 farklı kalınlık değerlendirmeye alınmıştır.
- 6- Farklı yangın eğrilerinin modüler duvar panelinin yangın performansını ne ölçüde etkileyeceğini görmek için ve farklı yangın senaryolarını incelemek amacıyla 4 farklı yangın etkisinde modellemeler yapılmıştır. Bu yangın senaryoları olarak; Standard (ISO 834), Smouldering, FAST (Hızlı) ve SLOW (Yavaş) yangınlar geliştirilen modellere etki ettirilmiştir.

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

- Geliştirilen 223 farklı model için optimum meshi saptayabilmek amacıyla mesh çalışmaları ve analizleri yapılmıştır. Model analizlerinde mesh boyutları 0,03-0,04 metre büyüklüğünde kullanılmıştır. 0,04 metrelik mesh çalışması mümkün olduğunca az kullanılmıştır. 30.000-100.000 node(düğüm) sayısı aralığında ve 100.000-500.000 eleman sayısı aralığında düğümler ve elemanlar kullanılmıştır.
- Mesh 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.
- Mesh metodu olarak Tetrahedron kullanılmıştır.
- Isı yalıtım malzemesinin türünün modelin yangın performansına etkisi incelendiğinde; 50 mm kalınlığa sahip mineral yün ve yaş yününün, uygulanan yangın senaryosunda yangın koruyuculukları arasında kayda değer bir fark bulunmamıştır. Bu sebeple deneylerin geri kalanında analiz süresi ve yangına karşı taş yününden az da olsa bir fark bulundurduğundan dolayı yalnızca mineral yünü kullanılmıştır.
- Çelik eleman et kalınlığının yangın performansına etkisi incelendiğinde; kutu profiller ve C profiller için ayrı incelenen modellerde her iki enkesitte et kalınlığı fazla olan profillerin yangın esnasında geç ısınıp geç soğuduğu görülmüştür. Et kalınlığı daha fazla olan çelik profillerin kütlesi fazladır dolayısı ile daha yüksek ısıl kapasiteleri vardır. Bu yüzden et kalınlığı fazla olan profillerde ısının profilin tamamına yayılması daha geç olur ve yangından sonra bu profiller daha geç söner. Et kalınlığı arttıkça, ısının yayılma hızı azalır sonucuna ulaşılabilir.
- Çelik eleman en kesitlerinin yangın performansına etkisi incelendiğinde; yalıtım kaplaması türü ve yalıtım kaplaması kalınlığı sabit olmak üzere C100, C140 ve C400'lük profiller arasında yapılan analizler sonucunda içerisinde daha fazla boşluk hacmi bulunduran modellerde yani C400'lük modellerde

C100 ve C140'lık modellere nazaran T2 ve T4 noktaları arasındaki sıcaklık değeri farkının fazla olduğu sonucuna varılmıştır. Modüler elemandaki boşluk artışının ısı iletimini etkiler böylece modelin yangın performansı artar sonucu çıkarılabilir. Modelde bulunan boşluk hacminin ısı yama katsayısı da (radiation emissivity) göz önünde bulundurulmalıdır.

- Yalıtım kaplama malzemesi türünün yangın performansına etkisi incelendiğinde; kutu profillerle oluşturulan modellerde yalıtım kaplama kalınlıkları sabit olmak üzere fibercement yalıtım kaplaması yangının ilerlemesini yavaşlatmış ve daha az ısı iletimi gerçekleştirerek üstün yangın koruması sergilemiştir. C profillerle oluşturulan modellerde fibercement levhalar ve alçı panel levha kaplamasıyla neredeyse aynı yangın koruyuculuk özellikleri göstermiştir. Kontrplak levha kaplamaları ise C profillerden oluşturulan modelde en iyi yangın koruma performansı göstermiştir.
- Yalıtım kaplama kalınlığının yangın performansına etkisi incelendiğinde; 12 mm, 20 mm ve 32 mm olmak üzere 3 farklı kalınlıktaki 3 tür kaplama malzemesi analiz edilmiş ve çelik en kesiti, çelik et kalınlığı ve yalıtım kaplaması türü sabit olmak üzere değişken olan yalıtım kaplaması kalınlıklarından 32 milimetrelik yalıtım kaplamalarının yangın koruyuculuk performansının 12 milimetrelik ve 20 milimetrelik kaplamalardan daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Modelin yalıtım kaplaması kalınlığını artırmak, yangının çelik elemana daha geç ulaşmasını sağlarken yapıyı bir arada tutmaya yardımcı olur.
- Farklı yangın eğrilerinin (ISO 834, Hızlı ve Yavaş ve Smouldering,) modüler duvar panellerinin yangın performansına etkisi incelendiğinde; yangın doğalarının tamamen birbirlerinden farklı olmasından ötürü Hızlı (Fast) yangın eğrisinde kısa zamanda yüksek sıcaklık hedeflendiğinden dolayı belirtilen noktalardan alınan değerler daha yüksekken Yavaş (Slow) yangın eğrisinde yangın artışı geniş bir zamana yayıldığından dolayı noktalardan alınan sıcaklık değerleri daha düşüktür. Bu durum farklı enkesitler, farklı yalıtım kaplamaları ve farklı yalıtım kalınlıkları içeren modellerin analizlerinin tümünde benzer şekilde seyretmiştir. Standart ISO834 yangın eğrisi ile Smouldering yangın eğrisinin 2 saat olmasına rağmen birinci saatteki sıcaklık değerleri alınmış Smouldering yangın eğrisinin Hızlı (Slow) yangın eğrisiyle paralel şekilde bir yangın senaryosu oluşturduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlara göre optimum bir değerlendirme yapılırsa; yangına dayanıklı en ideal çelik eleman C profillerdir, gerçekçi ve ekonomik olarak C140'lık profiller analizi yapılan modellerdeki çelikler arasında en ideal çelik elemanlardır. Et kalınlığı yangın esnasında ısı iletiminde büyük rol oynadığı için yangına dayanıklı modüler elemanları tasarlarken kalın profil seçilmelidir. Bu sebeple modüler duvarlarda yangın korunması için yapılan analizlerdeki en ideal enkesite sahip profil CC140×75×19×4 mm'dir. Yalıtım kaplaması olarak yangın koruyuculuk özelliği üstün olmakla birlikte yangın esnasında zehirli gaz çıkarmadığı ve yangının yayılımını yavaşlattığı için fibercement levhalar en ideal yalıtım kaplamaları olarak tercih edilebilir. En kalın yalıtım kaplaması yangın koruyuculuğu bakımından en yüksek yangın performansına sahip olduğu için 32 milimetrelik levhalar yangın esnasında en iyi performansı göstereceklerdir.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan analizlerin ve değerlendirmeye alınan parametrelerin gerçek ölçekli veya boyut analizi yapılarak boyutları azaltılmış modüler duvar numuneleri testleri yapılması ve sonuçların numerik sonuçlarla karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, yine bu tez çalışmasında değerlendirmeye alınmayan, kutu profillerle hazırlanan modellerin, modelin içinde boşluk kalacak şekilde tasarlanıp yangın performansının, modelin yangın etkiyen ve yangın etkimeyen bölümlerde kullanılan yalıtım malzemelerinin türlerinin birbirinden farklı olduğu durumların belirlenmesi ve irdelenmesi önerilmektedir. Bunlara ilaveten, bu modellere yük parametresi eklenerek yükleme esnasında yangın performansı veya yangın sonrası (post-fire) yükleme analizlerinin deneysel ve numerik olarak yapılması bu tez kapsamında önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Anonim, 2018. Web Sitesi: <https://www.asyacelik.com.tr/celik-yapilarin-gelisimi>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2023. Web Sitesi: <https://villayapi.com/tr/blog/hafif-celik-yapi-nedir/>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2024. Web Sitesi: https://knauf.com/tr-TR/p/urun/yangina-dayanikli-alcipan-r-fr-12-5-mm-18608_0253, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2023. Web Sitesi: <https://www.kariwood.com.tr/plywood/vulcan-plywood>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2025. Web Sitesi: <https://odek.eu/tr/products/fire-retardant-4>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2024. Web Sitesi: <https://www.hekimyapi.com/fibercement-kaplama>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2025. Web Sitesi: <https://www.kalekim.com/tas-yunu-nedir-nerelerde-kullanilir>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2025. Web Sitesi: <https://www.karmod.com/prefabrik-ev-teknik-ozellikler>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://www.engineered-mind.com/fem/the-finite-element-method-beginners-guide/>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://www.linkedin.com/pulse/yangin-ve-evreleri-levent-%C3%B6zdi%CC%87I/>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2006. Web Sitesi: <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/211807>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- Anonim, 2024. Web Sitesi: <https://www.serdarkorkut.com/2017/05/09/sonlu-elemanlar-metodu/>, Erişim Tarihi: 22.01.2025.
- 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.

- Chen, W., Jiang, J., Ye, J., Zhao, Q., Liu, K., & Xu, C. (2020). Thermal behavior of external-insulated cold-formed steel non-load-bearing walls exposed to different fire conditions. *Structures*, 25, 631-645. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.03.044>
- Cirpici, B. K., Orhan, S. N., & Kotan, T. (2020). Finite element study on composite slab-beam systems under various fire exposures. *Steel and Composite Structures*, 37(5), 589-603. <https://doi.org/10.12989/scs.2020.37.5.589>
- Dodangoda, M. T., Mahendran, M., Keerthan, P., & Frost, R. L. (2019). Developing a performance factor for fire rated boards used in LSF wall systems. *Fire Safety Journal*, 109. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102872>
- En, © I S. (1993). *Tel: +353 1 807 3800 NSAI 2 0 0 5 EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES-PART 1-2: GENERAL RULES-STRUCTURAL FIRE DESIGN NO COPYING WITHOUT NSAI PERMISSION EXCEPT AS PERMITTED BY COPYRIGHT LAW.* <http://www.nsai.ieSaleshttp://www.standards.ie>
- Gümüştas, M. (2021). *Farklı taşıyıcı sistemlerin yangın anındaki davranışı ve güvenlik önlemleri* (Master's thesis, İstanbul Sabahattin Zaim Üniversitesi).
- Gnanachelvam, S., Ariyanayagam, A., & Mahendran, M. (2020). Fire resistance of LSF wall systems lined with different wallboards including bio-PCM mat. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101628>
- Gnanachelvam, S., Mahendran, M., & Ariyanayagam, A. (2022). Elevated Temperature Thermal Properties of Advanced Materials Used in LSF Systems. *Fire and Materials*, 46(1).
- Keerthan, P., & Mahendran, M. (2013). Thermal Performance of Composite Panels Under Fire Conditions Using Numerical Studies: Plasterboards, Rockwool, Glass Fibre and Cellulose Insulations. *Fire Technology*, 49(2), 329-356. <https://doi.org/10.1007/s10694-012-0269-6>
- Lisans, Y., İnşaat, T., & Dalı, M. A. (t.y.). *YIĞMA YAPILARIN YANGIN PERFORMANSININ ÇEŞİTLİ PARAMETRELERLE İNCELENMESİ Halil İbrahim ŞEN.*
- Liu, F., Fu, F., Wang, Y., & Liu, Q. (2017). Fire performance of non-load-bearing light-gauge slotted steel stud walls. *Journal of Constructional Steel Research*, 137, 228-241. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.06.034>
- Mahyar Maali Modüler Yapılar Ders Notları
- Moura Correia, A. J. P., Rodrigues, J. P. C., & Real, P. V. (2014). Thermal bowing on steel columns embedded on walls under fire conditions. *Fire Safety Journal*, 67, 53-69. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.001>

- Perera, D., Poologanathan, K., Gatheeshgar, P., Upasiri, I. R., Sherlock, P., Rajanayagam, H., & Nagaratnam, B. (2021). Fire performance of modular wall panels: Numerical analysis. *Structures*, 34, 1048-1067. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.111>
- Perera, D., Upasiri, I. R., Poologanathan, K., O'Grady, K., Nagaratnam, B., Kanthasamy, E., & Rajanayagam, H. (2022). Numerical Investigation on Fire Performance of LSF and Steel Modular Floor Panels. *Buildings*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/buildings12101721>
- Perera, D., Upasiri, I. R., Poologanathan, K., Perampalam, G., O'Grady, K., Rezazadeh, M., Rajanayagam, H., & Hewavitharana, T. (2022). Fire performance analyses of modular wall panel designs with loadbearing SHS columns. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01179>
- Shan, S., & Pan, W. (2022). Collapse mechanisms of multi-story steel-framed modular structures under fire scenarios. *Journal of Constructional Steel Research*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2022.107419>
- Tao, Y., Mahendran, M., & Ariyanayagam, A. (2021a). Fire tests of cold-formed steel walls made of hollow section studs. *Journal of Constructional Steel Research*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106495>
- Tao, Y., Mahendran, M., & Ariyanayagam, A. (2021b). Numerical study of LSF walls made of cold-formed steel hollow section studs in fire. *Thin-Walled Structures*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108181>
- Taşkaya, S., Taşkaya, S., Üniversitesi, A. Ç., Yüksekokulu, M., Ve, M., & Planlama, Ş. (2019). Çok Katlı Yapıların ANSYS Paket Yazılımında Workbench Modülü Kullanılarak Ölçümlendirilmesi ve Prototip Analizlerinin İncelenmesi Measurement of Multi-Storey Structures Using Workbench Module in ANSYS Package Software and Investigation of Prototype Analysis. İçinde *International Journal of Engineering, Design and Technology* (C. 1, Sayı 2). <http://dergipark.org.tr/ijedt>
- Yılmaz, B., & Eren, Ö. (2022). Konut Üretiminde Tipleştirilmiş Hafif Çelik Modül Sistem ile Tasarım Olanaklarının Değerlendirilmesi. *Mimarlık ve Yaşam*, 7(2), 617-646.
- Yu, Y., Tian, P., Man, M., Chen, Z., Jiang, L., & Wei, B. (2021). Experimental and numerical studies on the fire-resistance behaviors of critical walls and columns in modular steel buildings. *Journal of Building Engineering*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102964>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2013). The standard discrete system and origins of the finite element method. The finite element method: its basis and fundamentals, 1-20.