



**ÇELİK KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN YANGIN
PERFORMANSININ YANGINA KARŞI KORUMALI
VE KORUMASIZ OLARAK İNCELENMESİ**

Adem ŞAFAK

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

2024

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK KOLON-KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN YANGIN PERFORMASININ
YANGINA KARŞI KORUMALI VE KORUMASIZ OLARAK İNCELENMESİ

Adem ŞAFAK

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2024

Her hakkı saklıdır

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

**ÇELİK KOLON KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN YANGIN PERFORMANSININ
YANGINA KARŞI KORUMALI VE KORUMSIZ OLARAK İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI danışmanlığında, Adem ŞAFAK tarafından hazırlanan bu çalışma 13/12/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Mahmut KILIÇ *İmza* :

Üye : Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI *İmza* :

Üye : Doç. Dr. İrfan KOCAMAN *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.

13/12/2024

İmzası

Adem ŞAFAK

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ÇELİK KOLON KİRİŞ BİRLEŞİMLERİNİN YANGIN PERFORANSININ YANGINA KARŞI KORUMALI VE KORUMASIZ OLARAK İNCELENMESİ

Adem ŞAFAK

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

Çalışmada, çelik kolon-kiriş birleşimlerinin yangına karşı performansı korumalı ve korumasız durumlarda incelenmiştir. Pasif koruma yöntemi olarak intümesan boyaların etkinliği, sonlu eleman yöntemiyle deneysel olarak değerlendirilmiştir. Yangın sırasında çelik elemanlar, özellikle 600°C gibi sıcaklıklarda mukavemetlerini kaybederek yapıların taşıma kapasitelerini tehlikeye atmaktadır. İntümesan boyalar, yangında genişterek çelik yüzeyde koruyucu bir tabaka oluşturur ve yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı artırır. Deneysel testler, boya uygulanmış ve uygulanmamış çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve sonuçlar, intümesan boyaların yangın dayanım süresini artırmada etkili olduğunu göstermiştir. Araştırma, yapı tasarımı ve yangın güvenliği standartlarının geliştirilmesine katkı sunmayı ve tahliye süreçlerini kolaylaştırarak insan hayatını güvence altına almayı hedeflemektedir.

2024, 99 sayfa

Anahtar Kelimeler: Çelik yapılar, İntümesan boya, Yangın güvenliği, Pasif koruma, Yapısal dayanıklılık, Kolon- kiriş birleşimi

ABSTRACT

MS. Thesis

INVESTIGATION OF THE FIRE PERFORMANCE OF STEEL COLUMN-BEAM JOINTS WITH AND WITHOUT FIRE PROTECTION

Adem ŞAFAK

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

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

In this study, the performance of steel column-beam joints against fire is investigated in protected and unprotected conditions. The effectiveness of intumescent paints as a passive protection method was experimentally evaluated by finite element method. During fire, steel elements lose their strength, especially at temperatures such as 600°C, jeopardizing the bearing capacity of structures. Intumescent paints form a protective layer on the steel surface by expanding in fire and increase resistance to high temperatures. Experimental tests were carried out on coated and untreated steel specimens and the results showed that intumescent coatings are effective in increasing the fire resistance time. The research aims to contribute to the development of building design and fire safety standards and to safeguard human lives by facilitating evacuation processes.

2024, 99 pages

Keywords: Steel structures, Intumescent coating, Fire safety, Passive protection, Structural resilience, Column-beam connection

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında en büyük teşekkür, değerli Danışman Hocam Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI' ya aittir. Çalışmanın başlangıcından sonuna kadar gösterdiği sabır, anlayış ve bilgi birikimiyle bana rehberlik ederek, karşılaştığım zorlukların üstesinden gelmemde her zaman destek olmuştur. Hayatımın bu önemli dönüm noktasında yanımda olduğu için kendisine minnettarım.

Bu süreçte her daim yanımda olan kıymetli eşime ve sevgili çocuklarım Burak ve Alparslan' a teşekkürü bir borç bilirim. Sabırları, sevgileri ve desteği olmadan bu çalışmayı tamamlamak mümkün olmazdı. Onlardan çaldığım zamanların telafisi için de minnetle özür dilerim.

Adem ŞAFAK
Aralık 2024

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Yangının Oluşumu ve Kimyası.....	3
1.1.1. Yanma kimyası	4
1.1.2. Yangının gelişim evreleri.....	4
1.1.3. Yangının yayılma mekanizmaları	6
1.1.4. Yangından korunma yöntemleri.....	7
1.1.5. Yangın güvenliği tasarımı	8
1.2. Çelik Birleşimler	9
1.2.1. Birleşim araçları	9
1.3. Kolon Kiriş Birleşimleri.....	12
1.4. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Sınıflandırılması	13
1.4.1. Dönme rijitliğine göre sınıflandırma.....	14
1.4.2. Moment dayanımına göre sınıflandırma	18
2. KAYNAK ÖZETLERİ	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM	28
3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	28
3.1.1. Çelik	28
3,1,2, Yangın koruma malzemesi (intümesan boya) özellikleri.....	35
3.2. Yangın.....	36
3.2.1. Standart yangın eğrisi.....	37
3.2.2. Smouldering yangın eğrisi	38
3.2.3. Hidrokarbon (Hydrocarbon) yangın eğrisi.....	39
3.2.4. Yangın yükü yoğunluğu.....	39

3.3. Yangın yükü indeksi	40
3.4. Sonlu Eleman Programı: Abaqus	41
3.4.1. Malzeme modeli.....	42
3.4.2. Eleman Özellikleri	49
3.4.3. Katı eleman tipinde integrasyon yöntemi	54
3.4.4. Eleman yüzeyleri arasındaki etkileşim.....	56
3.5. Validasyon Modeli	57
3.6. Sonlu Eleman Modelleri	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	72
4.1.Pasif Yangın Koruyucu Boya Kalınlığının Sıcaklık Dağılımına Etkisi.....	72
4.1.1. Sıcaklık dağılımları	72
4.1.2. Sabit yangın koşullarında zamana bağlı gerilme değişimleri (von misses)	76
4.1.3. Boya kalınlıklarının Bulon Yüklerine Etkisi	79
4.1.4. Eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ)	82
4.2. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi.....	85
4.2.1. Sıcaklık değişimleri.....	85
4.2.2. Sabit boya kalınlığında zamana bağlı gerilme değişimleri (von misses).....	89
4.3. Kolon-kiriş sıcaklık iletimi	92
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	96

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Alan (m ²)
A	Maksimum sıcaklık artışı (500 °C -700 °C)
E	Elastisite modülü
f _y	Normal ortam sıcaklığındaki çeliğin akma dayanımı (MPa)
f _{y,θ}	Yangın durumundaki çeliğin etkin akma dayanımı (MPa)
g	Yerçekimi ivmesi
H _i	Yanıcı malzemenin ısı değeri (MJ/kg)
I _b	Birleşimdeki kirişin atalet momenti
I _b	Kirişin atalet momenti
I _c	Kolonun atalet momenti
K	Kelvin
K _b	Hesaplanan katta en üstteki tüm kirişlerin I _b / L _b değeri
k _b	Katsayı
K _c	Hesaplanan kattaki tüm kolonların I _c / L _c değeri
k _{y,θ}	Çelik için sıcaklıkta akma dayanımı azaltma faktörü
L _b	Birleşimdeki kirişin uzunluğu
L _b	Kirişin kolon merkezleri arasındaki açıklığı
L _c	Kolon kat yüksekliği
m	Metre
m _i	Yanıcı malzemenin kütlesi (kg)
°	Derece
P	Basınç
Q _f	Yangın yükü (MJ/m ²)
S _{j,ini}	Birleşimin başlangıç rijitliği
T	Sıcaklık (°C)
t	Zaman (Dakika)
T(t)	t zamanındaki Sıcaklık (°C)
T ₀	Başlangıç sıcaklığı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yangın oluşum şeması.....	4
Şekil 1.2. İntümesan boya uygulaması (3).....	7
Şekil 1.3. Yangın alarm sistemleri (4)	8
Şekil 1.4. Perçinli birleşimler (5).....	10
Şekil 1.5. Bulonlu birleşimler (6)	11
Şekil 1.6. Kaynaklı birleşimler	12
Şekil 1.7. Yatay ötelenmesi engellenmemiş sistemlerdeki kiriş kolon birleşimlerinin tavsie edilen sınıflandırılması (EC3).	16
Şekil 1.8. Yatay ötelenmesi engellenmiş sistemlerdeki kiriş kolon birleşimlerinin tavsie edilen sınıflandırılması (EC3).	17
Şekil 1.9. Kiriş-kolon birleşimleri için moment-dönme eğrilerine göre sınıflandırma örnekleri (EC-3).....	19
Şekil 3.1. Çelik etkin akma dayanımı grafiği (S275)	30
Şekil 3.2. Çelik etkin çekme dayanımı grafiği (S275).....	31
Şekil 3.3. Çelik etkin elastisite modülü grafiği.....	32
Şekil 3.4. Çelik özgül ısı grafiği	34
Şekil 3.5. Çelik ısıl iletkenlik grafiği	34
Şekil 3.6. Pasif yangın koruyucu boyanın sıcaklığa bağlı ısıl iletkenlik değişimi (Wang et al. 2013).	36
Şekil 3.6. Standart yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014), ISO 834-11:2014)	37
Şekil 3.7. Smouldering yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014)	38
Şekil 3.8. Hidrokarbon yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014)	39
Şekil 3.9. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması.....	41
Şekil 3.10. Tresca akma koşulu için mohr çemberi	43
Şekil 3.11. Tresca ve Von Mises akma yörüngeleri.	44
Şekil 3.12. Tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği.	46
Şekil 3.13. Malzeme pekleşme davranışları.	46
Şekil 3.14. Cisim üzerindeki dış yükler ve iç kuvvetler	47
Şekil 3.15. Newton raphson yöntemi	48
Şekil 3.16. Yaygın olarak kullanılan eleman ailesi.....	49
Şekil 3.17. ABAQUS örnek eleman tipleri ve isimlendirme koşulları.....	50

Şekil 3.18. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin davranışları.....	51
Şekil 3.19. Konvansiyonel ve sürekli kabuk eleman karşılaştırılması.....	52
Şekil 3.20. Katı eleman tipleri	53
Şekil 3.21. Tetrahedral ve hexahedral elemanlar.....	54
Şekil 3.22. Eleman üzerinde tam integrasyon ve azaltılmış integrasyon gösterimi.....	55
Şekil 3.23. Model üzerinde hourglass etkisi	56
Şekil 3.24. Yüzey tipinin etkileşim üzerindeki etkisi	56
Şekil 3.25. Kabuk yüzey-katı yüzey etkileşimi	57
Şekil 3.26. HEB280 malzeme özellikleri tanımlaması	58
Şekil 3.27. Plaka malzeme özellikleri tanımlaması	58
Şekil 3.28. Validasyon model görüntüsü	59
Şekil 3.29. Oluşturulan validasyon model görüntüsü.....	59
Şekil 3.30. Ağ yapısı görüntüsü.....	60
Şekil 3.31. Validasyon modeli yük yer değiştirme karşılaştırması.....	61
Şekil 3.32. Validasyon modeli birim şekil değiştirme karşılaştırması.....	61
Şekil 3.33. Model 1 çizimleri.....	63
Şekil 3.34. Sonlu eleman modeli 3d görünüşü	64
Şekil 3.35. Model 1 Sonlu eleman modeli görünüşleri.....	64
Şekil 3.36. Sonlu eleman ağ yapısı (Model-1).....	65
Şekil 3.37. ABAQUS Alın plakası ve kolon Temas Durum şartları tanımlaması.....	67
Şekil 3.38. Yangın önleyici boya modellemesi	70
Şekil 3.39. Bol önçekme kuvveti tanımlaması.....	70
Şekil 3.40. Sonlu eleman ağ yapısı görünüşleri.....	71
Şekil 3.41. Sonlu eleman sonlu eleman görünüşleri	71
Şekil 4.1. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (ISO)	72
Şekil 4.2. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (Smouldering)	73
Şekil 4.3. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (hidrokarbon)	74
Şekil 4.4. P2,0 sıcaklık dağılım gradyanları	75
Şekil 4.5. P1,4 Sıcaklık dağılım gradyanları.....	75
Şekil 4.6. P0,8 sıcaklık dağılım gradyanları	75
Şekil 4.7. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (ISO-834).....	76
Şekil 4.8. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (smouldering).....	77
Şekil 4.9. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (hidrokarbon)	78
Şekil 4.10. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (ISO-834).....	79

Şekil 4.11. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (smouldering).....	80
Şekil 4.12. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (hidrokarbon)	81
Şekil 4.13. 0,8 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)	82
Şekil 4.14. 1,4 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)	83
Şekil 4.15. 2,0 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)	84
Şekil 4.16. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (paint 0,8).....	85
Şekil 4.17. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (Paint 1,4)	86
Şekil 4.18. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (paint 2,0).....	87
Şekil 4.19. Şekil yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (boyasız)	88
Şekil 4.20. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 0,8)	89
Şekil 4.21. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 1,4)	90
Şekil 4.22. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 2,0)	91
Şekil 4.23. Kolon kiriş göçme bölgesi sıcaklık iletimi	92
Şekil 4.24. Birleşimin tipik göçme modu	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çelik malzemesi etkin malzeme özellikler (EC)	29
Çizelge 3.2. S275 Çelik malzemesi için etkin akma gerilmesi.....	29
Çizelge 3.3. Çelik etkin çekme dayanımı (S275)	30
Çizelge 3.4. Çelik etkin elastisite modülü	31
Çizelge 3.5. Çelik özgül ısı çizelgesi	33
Çizelge 3.6. Çelik ısıl iletkenlik çizelgesi.....	35
Çizelge 3.7. Bazı malzemelerin kalorifik değerleri (Çırpıcı 2021)	36
Çizelge 3.8. Malzeme mekanik özellikleri	57
Çizelge 3.9. Sonlu eleman modelleri isimlendirmeleri.....	62

1. GİRİŞ

Ateş, insanlık tarihinde dönüm noktası olan keşiflerden biri olup, medeniyetin gelişiminde temel bir rol oynamıştır. Aydınlatma, ısınma ve yemek pişirme gibi günlük yaşamı kolaylaştıran işlevleriyle insanlığın hayat kalitesini artırmış; ancak aynı zamanda yıkıcı etkileriyle birçok felaketi de beraberinde getirmiştir. Yangın, geçmişten günümüze kadar yerleşim alanlarını tehdit eden en önemli afetlerden biri olmayı sürdürmektedir. Büyük Londra Yangını (1666) ve İstanbul Beyoğlu Yangını (1870) gibi tarihsel örnekler, yangınların şehirlerin fiziki yapısını ve sosyal dokusunu nasıl derinden etkilediğini göstermektedir. Günümüzde ise özellikle hızlı kentleşme ve sanayileşme ile birlikte yangın riski daha karmaşık bir tehdit haline gelmiştir.

Yangın, insanlık tarihi boyunca yaşam alanlarını, yapıları ve doğal çevreyi tehdit eden yıkıcı bir güç olmuştur. Teknolojinin gelişmesi ve kentleşmenin hız kazanmasıyla birlikte, yangın riski yalnızca bireysel yaşam alanlarını değil, aynı zamanda büyük ölçekli endüstriyel tesisleri ve kamuya açık alanları da tehdit eden bir unsur haline gelmiştir. Modern mühendislik anlayışı, yangının fiziksel, kimyasal ve termal süreçlerini anlamayı ve kontrol altına almayı hedefler. Bu bağlamda yangın mühendisliği, yapıların yangına dayanıklı bir şekilde tasarlanmasını sağlamak ve yangın risklerini minimize etmek amacıyla disiplinler arası bir yaklaşıma sahiptir.

Modern toplumda barınma ihtiyacının karşılanması amacıyla kullanılan betonarme ve çelik yapılarda yangın güvenliği, tasarım aşamasında dikkate alınması gereken öncelikli konular arasında yer almaktadır. Beton ve çelik gibi malzemeler, yüksek sıcaklık etkisinde mekanik özelliklerini kaybederek yapıların taşıma kapasitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Çelik, 600°C sıcaklığa ulaştığında mukavemetinin büyük bir kısmını kaybederken, betonun basınç dayanımı 900°C sıcaklıkta %10'a kadar düşebilmektedir. Bu nedenle, yangına karşı dayanıklı yapı tasarımı hem binaların yapısal bütünlüğünü korumak hem de insan hayatını güvence altına almak açısından kritik bir öneme sahiptir.

Yangın güvenliği, yalnızca bir afet durumunda oluşabilecek zararları minimize etmeyi değil, aynı zamanda yangının büyümesini yavaşlatmayı ve yayılmasını

engellemeyi de amaçlamaktadır. Bu bağlamda, aktif ve pasif yangın güvenliği sistemleri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Aktif sistemler arasında sprinkler, yangın alarm sistemleri ve söndürme cihazları bulunurken; pasif sistemler, yangına dayanıklı malzemelerin kullanımı, yapı elemanlarının yangın geciktirici boyalarla korunması ve izolasyon yöntemlerini içermektedir. Pasif önlemlerden biri olan intümesan boyalar, çelik yapı elemanlarının yangın dayanım süresini artırmak için etkili bir çözüm sunmaktadır. Yangın sırasında genişerek bir yalıtım tabakası oluşturan bu boyalar, yapının çökme süresini uzatarak tahliye için gerekli zamanı sağlamaktadır.

Yangın güvenliği, endüstriyel yapılarda ve çelik taşıyıcı sistemli binalarda ayrı bir öneme sahiptir. Çelik taşıyıcı sistemler, yüksek mukavemet, süneklik ve hızlı inşa edilebilme gibi avantajları nedeniyle modern yapı sektöründe yaygın olarak tercih edilmektedir. Bununla birlikte, çelik malzemenin yüksek sıcaklıklara karşı duyarlılığı, yangın güvenliği açısından önemli bir zafiyet oluşturmaktadır. Yangına maruz kalan çelik elemanlar, taşıma kapasitesini hızla kaybederek yapısal çökme riski doğurmaktadır. Özellikle, kiriş-kolon bağlantı noktaları gibi kritik bölgeler, yangın sırasında yapısal bütünlüğün korunmasında kilit bir rol oynamaktadır.

Son yıllarda, büyük yangın felaketlerinin etkisiyle çelik yapılarda yangın güvenliğini artırmaya yönelik araştırmalar hız kazanmıştır. Özellikle 11 Eylül 2001 Dünya Ticaret Merkezi saldırılarında çelik yapıların hızlı çöküşü, yangın güvenliği konusundaki farkındalığı artırmış ve standartların yeniden değerlendirilmesine neden olmuştur. Bu olay, yapı malzemelerinin yangına dayanıklılığını artırmak için geliştirilen yöntemlerin önemini bir kez daha gözler önüne sermiştir.

Bu çalışma, çelik yapı elemanlarının yangına karşı korunmasında intümesan boyaların etkinliğini incelemeyi amaçlamaktadır. Çelik taşıyıcı sistemlerin yangın dayanım sürelerini artırmaya yönelik pasif koruma yöntemlerinden biri olan intümesan boyaların kalınlığı, uygulama şekli ve yangın koşullarında davranışı deneysel olarak değerlendirilecektir. Çalışma kapsamında, intümesan boya uygulanan ve uygulanmayan çelik numuneler üzerinde gerçekleştirilen testler analiz edilerek, yangın dayanım performansları karşılaştırılacaktır. Elde edilen bulgular, yapı tasarımı ve yangın güvenliği standartlarının geliştirilmesine yönelik önemli katkılar sunmayı hedeflemektedir.

Yangın güvenliğinin sağlanması, yalnızca yapısal çöküş riskini azaltmakla sınırlı değildir. Aynı zamanda, bina sakinlerinin güvenli tahliyesi ve yangının çevredeki yapılara yayılmasının önlenmesi de bu sürecin bir parçasıdır. Dolayısıyla, yangına dayanıklı yapı tasarımı hem teknik elemanların hem de tasarımcıların öncelikli sorumluluklarından biridir. Bu çalışmanın, yangın güvenliği alanında yapılan mevcut araştırmalara katkı sağlayarak, yapıların yangına karşı dayanıklılığını artırmak ve daha güvenli yaşam alanları oluşturmak için bir destek sunması amaçlanmaktadır. Yangın güvenliği tasarımı, yalnızca yapısal dayanıklılığı artırmayı değil, aynı zamanda yangının yayılmasını önlemeyi ve insanların güvenli bir şekilde tahliyesini sağlamayı da amaçlar.

1.1. Yangının Oluşumu ve Kimyası

Yangın, yanıcı bir maddenin (yakıt), ısı kaynağı ve oksijenle bir araya gelmesi sonucu gerçekleşen bir kimyasal reaksiyondur. Bu üç temel bileşenin bir arada bulunması, yanma sürecini başlatır. Bu süreç, “yanma üçgeni” olarak adlandırılan bir kavramla açıklanır:

Yakıt: Yangının oluşumu için gerekli olan enerji, yanıcı maddelerden sağlanır. Bu maddeler katı (ahşap, kâğıt), sıvı (benzin, alkol) veya gaz (doğalgaz, propan) formunda olabilir. Yakıtın fiziksel ve kimyasal özellikleri, yanma hızını ve yangının yayılma dinamiklerini belirler.

Isı: Yanıcı bir maddenin tutuşma sıcaklığına ulaşması için bir enerji kaynağına ihtiyaç vardır. Isı kaynakları, açık alevler, elektrik kıvılcımları, sürtünme veya kimyasal reaksiyonlar olabilir.

Oksijen: Yanma reaksiyonu için atmosferde bulunan oksijen temel bir gerekliliktir. Atmosferdeki oksijen oranı yaklaşık %21’dir ve yangının büyümesi için genellikle yeterlidir. Ancak oksijen oranı %15’in altına düştüğünde yanma durur.

Bu üç unsurdan biri eksik olduğunda, yanma süreci gerçekleşemez. Yangın mühendisliğinin temel prensibi, bu unsurları kontrol ederek yangın riskini en aza indirmektir.



Şekil. 1.1. Yangın oluşum şeması

1.1.1. Yanma kimyası

Yangının oluşumu sırasında, yanıcı maddelerde bulunan karbon (C) ve hidrojen (H) elementleri, oksijenle reaksiyona girerek kimyasal bir dönüşüm geçirir. Bu reaksiyon sonucunda enerji açığa çıkar. Yanma tepkimesinin sonucunda genellikle şu ürünler oluşur:

- Karbon Dioksit (CO_2) ve Su (H_2O): Organik yakıtların tam yanması sırasında açığa çıkar.
- Isı ve Işık: Kimyasal reaksiyon sırasında salınan enerji, çevresine ısı ve ışık şeklinde yayılır. Bu enerji, yangının çevredeki diğer maddelere yayılmasını hızlandırır.

1.1.2. Yangının gelişim evreleri

Yangın, oluşumundan sönmesine kadar geçen süreçte dört temel evreden geçer. Bu evrelerin anlaşılması, yangına müdahale stratejilerinin geliştirilmesinde büyük önem taşır.

1. Başlangıç Evresi

Yangının ilk aşaması olan başlangıç evresinde, ortamda yeterli oksijen bulunur ancak yanma süreci tam olarak gelişmemiştir. Bu evrede açığa çıkan sıcak gazlar, tavanda birikir ve kısa süreli alevlenmeler (flame-over) meydana gelir. Yangına bu aşamada müdahale edilirse, yangının büyümesi engellenebilir.

2. Yükselme Evresi

Yangının ilerlemesiyle birlikte, sıcak gazlar odanın tavanında yoğunlaşır ve bu gazlar aşağıya doğru ısı yayar. Tavan seviyesindeki sıcaklık, 500-600°C'ye ulaştığında flashover adı verilen kritik bir olay gerçekleşir. Flashover, odadaki tüm yanıcı maddelerin aynı anda alev alması durumudur. Bu aşamada, yangının kontrol altına alınması son derece zorlaşır.

3. Tam Gelişme Evresi

Bu evrede yangın, maksimum enerji üretimi seviyesine ulaşır. Ortamdaki oksijen hızla tükenirken yangın, yapısal elemanların mukavemetini ciddi ölçüde azaltır. Çelik ve beton gibi malzemeler, yüksek sıcaklık etkisi altında mekanik özelliklerini kaybeder ve yapı çökme riskiyle karşı karşıya kalır.

4. Sönme Evresi

Yangının son aşaması olan sönme evresinde, yakıtın tükenmesi ve oksijenin azalmasıyla yangın etkisini kaybeder. Ancak yangının tamamen sönmemesi durumunda, yeniden alevlenme riski bulunur. Bu nedenle yangın sonrası soğutma işlemleri büyük önem taşır.

1.1.3. Yangının yayılma mekanizmaları

Yangının bir alanda yayılması, ısı transferi, duman hareketi ve kimyasal reaksiyonlar gibi mekanizmalarla gerçekleşir. Bu mekanizmalar, yangının hızı ve yayılma yönü üzerinde belirleyici bir rol oynar.

1. Isı Transferi

- Isı transferi, yangının çevresindeki diğer maddelere yayılmasında kritik bir faktördür. Üç farklı ısı transfer yöntemi vardır:
- İletim (Conduction): Isının, bir katı malzeme boyunca moleküller arası enerji aktarımıyla iletilmesidir.
- Konveksiyon (Convection): Isının, hava veya sıvı gibi bir akışkan yardımıyla taşınmasıdır. Yangın sırasında sıcak hava yükselirken soğuk hava alçalır ve doğal konveksiyon akımları oluşur.

Radyasyon (Radiation): Isının elektromanyetik dalgalar yoluyla yayılmasıdır. Yangın sırasında oluşan radyasyon, yangının diğer bölgelere hızla yayılmasına neden olabilir.

2. Duman Hareketi

Yangının tehlikeli bir yan ürünü olan duman, genellikle sıcak gazlarla birlikte yükselir. Duman, karbon monoksit (CO) gibi zehirli gazlar içerir ve tahliye sırasında ciddi bir tehlike oluşturabilir. Duman hareketinin kontrol altına alınması, yangın güvenliği stratejilerinin önemli bir parçasıdır.

1.1.4. Yangından korunma yöntemleri

Yangın mühendisliği, yangına karşı korunmada hem pasif hem de aktif yöntemler uygular. Bu yöntemler, yapıların yangın dayanıklılığını artırmayı ve yangının etkilerini minimize etmeyi hedefler.

1. Pasif Korunma Yöntemleri

Pasif korunma yöntemleri, yangın sırasında yapı elemanlarını korumak için aktif müdahale gerektirmeyen önlemler içerir:

- İntümesan Boyalar: Yangın sırasında genişerek çelik elemanları yüksek sıcaklıktan izole eden boyalardır.
- Yangına Dayanıklı Kaplamalar: Çelik yapı elemanlarının alçı veya çimento bazlı malzemelerle kaplanması.
- Yalıtım Malzemeleri: Yangın sırasında ısı transferini yavaşlatan malzemeler, çelik yapıların dayanıklılığını artırır.



Şekil 1.2. İntümesan boya uygulaması

2. Aktif Korunma Yöntemleri

Aktif korunma yöntemleri, yangın anında devreye girerek yangını kontrol altına almayı amaçlar:

- Sprinkler Sistemleri: Yangını söndürmek veya yayılmasını engellemek için otomatik su püskürtme sistemleri.
- Yangın Algılama Sistemleri: Duman, ısı veya alev algılayarak erken uyarı verir ve yangın söndürme sistemlerini devreye sokar.
- Duman Tahliye Sistemleri: Yangın sırasında oluşan dumanın hızlı bir şekilde dışarı atılmasını sağlar.



Şekil 1.3. Yangın alarm sistemleri

1.1.5. Yangın güvenliği tasarımı

Yangın güvenliği tasarımı, yapıların yangına karşı dayanıklı hale getirilmesini ve tahliye sırasında insanların güvenliğini sağlamayı amaçlar. Bu tasarım sürecinde:

- Yapısal Yangın Dayanıklılığı: Çelik ve beton gibi malzemelerin yangına karşı dayanıklılığı artırılır.

- Yangın Bölmeleri: Yangının yayılmasını önlemek için yapıda yangına dayanıklı duvarlar ve zeminler oluşturulur.
- Tahliye Planları: Yangın sırasında bina sakinlerinin güvenli bir şekilde tahliye edilmesi için acil çıkış yolları tasarlanır.

1.2. Çelik Birleşimler

Mühendislik yapılarında demir kullanımı oldukça eskiye dayanmaktadır ve tarihte bilinen ilk mühendislik yapısı, 1779 yılında İngiltere’de inşa edilen, 31 metre açıklığa sahip bir kemer köprüdür. 1784 yılında geliştirilen yeni bir fırın teknolojisi ile dövme çelik üretimi gerçekleştirilmiştir. 19. yüzyılda çelik, farklı yöntemlerle eritilerek sıvı forma dönüştürülmüş ve dökme çelik üretimi başlamıştır. Bu gelişme, çelik yapı teknolojisinin ilerlemesini sağlamış ve 20. yüzyılda kaynaklı birleşim yöntemleri yaygınlaşmıştır (Odabaşı, 2000). Bu tarihten itibaren çelik yapılar, büyük açıklıklı köprüler, spor salonları, öğrenci yurtları, endüstri yapıları, prefabrik yapılar ve yüksek yapılar gibi çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. Çelik yapıların tercih edilme nedenleri arasında, büyük açıklıkları geçebilme kapasitesi, süneklik, hafiflik, kısa inşaat süresi, hava koşullarından etkilenmeme, prefabrik olarak inşa edilebilme ve hurdalarının geri dönüştürülebilirliği gibi avantajlar bulunmaktadır.

1.2.1. Birleşim araçları

Çelik yapılar, çelik profillerin ve levhaların uygun birleştirme elemanları ile belirli yöntemler kullanılarak bir araya getirilmesiyle inşa edilmektedir. Birleştirme yöntemleri, genel olarak sökülebilir ve sökülemez olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Sökülebilir yöntemlerde birleşim elemanlarının çıkarılması durumunda profiller zarar görmeden tekrar kullanılabilirken, sökülemez yöntemlerde birleşim ayrıldığında profillerin hasar görmesi söz konusudur. Sökülebilir birleşimler genellikle bulonlar aracılığıyla sağlanırken, sökülemez birleşimlerde ise perçinleme ve kaynaklama yöntemleri tercih edilmektedir.

1. Perçin

Perçin, çelik yapılarda kullanılan en eski birleştirme elemanlarından biridir ve 1850'den önce gemi ile kazan imalatında yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Perçinleme işlemi, perçinin deliğe yerleştirilmesi ve ardından çekiç veya pres yardımıyla karşılıklı olarak baş ve uç kısımlarının şekillendirilmesiyle gerçekleştirilir. Bu işlem sırasında perçin, deliği tamamen doldurarak delik çevresinde ezilme ve gövdesinde oluşan makaslama kuvvetleri ile yük taşır. Perçin çapı, genellikle deliğin çapından 1 mm daha küçük olacak şekilde tasarlanır. Karşılıklı presleme etkisi altında perçinin boyu kısalmır ve çapı genişleyerek deliği tamamen doldurur (Şekil 2.2). Birleştirme sırasında kullanılan perçin çeliği, yapı çeliğine kıyasla daha yumuşak özelliklere sahiptir.



Şekil 1.4. Perçinli birleşimler

2. Bulon

Bulonlar, altı köşeli bir başa, silindirik bir gövdeye ve ucunda spiral dişlere sahip, sökülebilir bir birleştirme elemanıdır. Kullanımı sırasında bulon deliğine yerleştirilir, spiral dişli ucun altına pul (rondela) takılır ve somun yardımıyla sıkılır. Bulonlar, mekanik

1. GİRİŞ

özelliklerine göre normal mukavemetli ve yüksek mukavemetli olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Normal mukavemetli bulonlar, genellikle "yumuşak çelik" olarak da adlandırılan 3.5, 4.6, 5.6 ve 8.8 kalite sınıflarında üretilirken, yüksek mukavemetli bulonlar 10.9 ve 12.9 kalite sınıflarında üretilmektedir. Bu çalışmada, birleştirme elemanı olarak 8.8 kalite sınıfındaki bulonlar tercih edilmiştir.



Şekil 1.5. Bulonlu birleşimler

2. Kaynak

Kaynak, çelik yapılarda kullanılan ve sökülemeyen bir birleştirme yöntemi olarak tanımlanır. Bu yöntemde, kaynaklanacak metallerin alaşımına benzer bileşime sahip bir elektrod kullanılarak, birleşim işlemi gerçekleştirilir. Kaynak işlemi sırasında, metallerin kenarlarında oluşturulan kaynak ağzı bölgesinde elektrodun ve kaynaklanacak metallerin yerel olarak erimesi sağlanır. Bu erime sonucunda bir kaynak dikişi oluşur ve iki metal arasında güçlü ve sürekli bir bağlantı meydana gelir.

1. GİRİŞ

Kaynak dikişı, soğuma sürecinde katılaşıarak birleşim bölgesinde homojen bir yapı oluşturur. Bu işlem sırasında kullanılan elektrod, yalnızca bağlantıyı sağlamla kalmaz, aynı zamanda ergiyen metal ile kaynak dikişinin mekanik ve kimyasal özelliklerini de belirler. Kaynak dikişinin dayanıklılığı, kullanılan elektrodun malzeme özellikleri, kaynak işlemi sırasında uygulanan teknikler ve kaynak ağzının geometrisi gibi faktörlere bağıdır. Bu yöntem, yüksek mukavemet, sızdırmazlık ve süreklilik gerektiren birleştirme işlemleri için sıklıkla tercih edilmektedir.



Şekil 1.6. Kaynaklı birleşimler

1.3. Kolon Kiriş Birleşimleri

Çelik yapıların inşasında, yukarıda açıklanan birleşim elemanları ve yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Bu birleşimlerin, yapıların servis ömrü boyunca maruz kalacakları dış etkiler altında beklenen performansı gösterebilmesini sağlamak amacıyla, Amerika’da ANSI/AISC 360-05 Specification for Structural Steel Buildings (2005) ve Avrupa’da Eurocode 3 (2005) gibi yönetmelikler hazırlanmış ve uluslararası alanda yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır.

1994 yılında meydana gelen Kaliforniya Northridge depremine kadar, mühendisler moment aktaran çelik çerçevelerin güvenilirliğine tam bir inanç beslemekteydi. Ancak bu depremde, her ne kadar can kaybı yaşanmasa da, ekonomik zarara yol açan ve moment aktaran çerçevelerde hasara neden olan durumlar ortaya çıkmıştır. Yapılan incelemelerde, bu çerçevelerdeki hasarların çoğunun birleşim bölgelerinde olduğu ve kaynak bölgeleri ile kaynaklara yakın alanlarda gevrek kırılmalar meydana geldiği tespit edilmiştir (Yılmaz, 2015).

Bu durum, sismik tasarımlarda moment aktaran çelik çerçevelere güvenen mühendisler için şaşırtıcı bir sonuç olmuştur. Bunun üzerine, Federal Acil Durum Yönetim Ajansı (FEMA), SAC Steel Project adıyla bir ekip kurarak hasarların nedenlerini ve önleme yollarını araştırmıştır (Roeder, 2002). Bu ekip, farklı birleşim türleri üzerinde deneyler gerçekleştirmiş ve birleşim davranışlarını anlamaya, akma ve göçme mekanizmalarını kontrol etmeye ve sismik performansı geliştirmeye yönelik bir dizi deney yapmıştır. Deneylerden elde edilen veriler ışığında çelik kiriş-kolon birleşim modelleri geliştirilmiş ve ulaşılan sonuçlar FEMA-350 Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings (2000) ve ANSI/AISC 358-10 Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications (2010) raporlarında yayımlanmıştır (Yılmaz, 2015).

1.4. Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Sınıflandırılması

Kiriş-kolon birleşimlerinin davranışlarını anlamak amacıyla geçmişten günümüze birçok deneysel ve sayısal çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu alanda öncü çalışmalardan biri, Kishi ve Li tarafından yapılmış olup, farklı kiriş-kolon birleşimleri üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına dayanarak, birleşimler rijit, yarı rijit ve mafsallı olarak sınıflandırılmıştır (Kishi ve Chen, 1989). Benzer şekilde, Bjorhovde ve çalışma arkadaşları birleşim sınıflandırmasında taşıma gücü ve kullanılabilirlik limit durumlarını temel almıştır. Kullanılabilirlik limit durumunda deformasyon ve rijitlik, taşıma gücü limit durumunda ise dönme kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi kriterlerin önemini vurgulayarak birleşimleri rijit, yarı rijit ve mafsallı olarak sınıflandırmışlardır (Bjorhovde et al., 1990).

1. GİRİŞ

Uluslararası düzeyde kabul gören Eurocode 3 (EC-3) standardına göre ise kiriş-kolon birleşimleri iki ana kriter üzerinden sınıflandırılmaktadır:

- Dönme Rijitliği
- Moment Dayanımı

Bu kriterler, birleşimlerin yapısal performanslarını değerlendirmek ve tasarım süreçlerini yönlendirmek için temel alınmaktadır.

1.4.1. Dönme rijitliğine göre sınıflandırma

Dönme rijitliğine göre yapılan sınıflandırma, birleşimlerin başlangıç rijitliklerinin ($S_{j,ini}$) karşılaştırılmasıyla gerçekleştirilir ve üç ana gruba ayrılır: rijit, yarı rijit ve mafsallı birleşimler. Bu sınıfların sınır değerleri Eurocode 3 (EC-3)'te tanımlanmış olup Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Birleşimin rijit kabul edilebilmesi için aşağıdaki eşitliğin sağlanması gerekmektedir:

$$S_{j,ini} \geq k_b \frac{EI_b}{L_b} \quad (1.1)$$

Bu eşitlikte kullanılan terimler şu şekilde tanımlanmaktadır:

k_b : Katsayı,

$S_{j,ini}$: Birleşimin başlangıç rijitliği,

I_b : Birleşimdeki kirişin atalet momenti,

L_b : Birleşimdeki kirişin uzunluğu,

E : Çeliğin elastisite modülü.

Burada k_b değeri, çerçevedeki çaprazların yatay yer değiştirmeyi %80'den fazla azaltması durumunda 8, aksi takdirde 25 olarak alınmaktadır.

Rijit birleşimlerde, hesaplanan moment ve kuvvetlerin birleşen elemanlar arasında rijitlik oranlarına göre dağıldığı varsayılmaktadır. Bu durum, kiriş açıklığında moment ve sehimlerin azalmasına, ancak kolon uçlarındaki momentlerin artmasına yol açar (Coşkun, 2003). Bu tür birleşimlerde moment aktarımı vardır ancak dönme oluşmaz (EC-3).

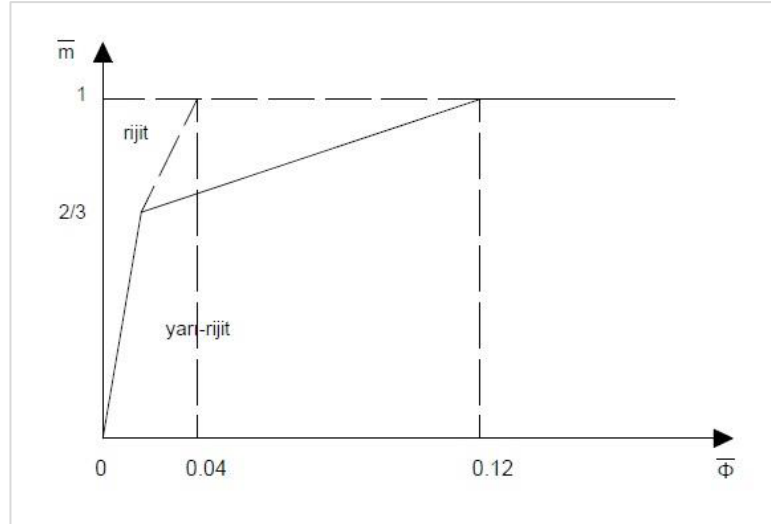
Yarı rijit birleşimler (2. bölge), rijit veya mafsallı birleşim sınıfına girmeyen birleşimler olarak tanımlanır. Mafsallı birleşimlerde (3. bölge) ise birleşen elemanlar arasında moment aktarımı olmadığı kabul edilir. Kolon-kiriş birleşimlerinin mafsallı olarak değerlendirilebilmesi için yanal ötelenmesi engellenmiş ya da serbest bırakılmış duruma göre,

$$S_{j.ini} \leq 0,5EI_b/L_b \quad (1.1)$$

şartını sağlamalıdır.

Mafsallı kolon-kiriş birleşimlerinde, kirişin kolona bağlanan uçlarında yalnızca eksenel kuvvet ve kesme kuvveti aktarılmakta, moment aktarımı gerçekleşmemekte ve kiriş uçlarının serbestçe dönmesine izin verilmektedir. Bu tür birleşimlerde, kolona iç kuvvet aktarımı olmadığı için kiriş kesiti daha fazla zorlanmaktadır. Yarı rijit birleşimlerde ise kirişten kolona iç kuvvet aktarımı gerçekleştiğinden, kiriş üzerindeki iç kuvvetler mafsallı birleşimlere kıyasla daha düşük seviyede kalmakta, dolayısıyla kesit üzerindeki zorlanma azalabilmektedir. Ancak, iç kuvvetlerin kolona aktarılması nedeniyle, kolonlarda iç kuvvet kaynaklı zorlanmalar meydana gelmektedir. Mafsallı birleşimlerde moment aktarımı gerçekleşmezken, dönme oluşmaktadır. Yarı rijit birleşimlerde ise hem moment hem de dönme etkisi görülmektedir.

Eurocode 3 (EC-3), birleşimlerin rijit veya yarı rijit olarak sınıflandırılması için, sistemin yanal ötelenmesinin engellenip engellenmediğine bağlı olarak farklı sınır şartları tanımlamıştır. Şekil 1.7’de, yatay ötelenmesi engellenmemiş sistemlerdeki kiriş-kolon birleşimlerine ilişkin rijitlik sınır değerleri sunulmaktadır.



Şekil 1.7. Yatay ötelenmesi engellenmemiş sistemlerdeki kiriş kolon birleşimlerinin tavsiye edilen sınıflandırılması (EC3).

$$m = \frac{M}{M_{pl,Rd}} \quad \phi = \frac{EIb\theta\theta}{L_b M_{pl,Rd}} \quad (1.3)$$

olarak hesaplanır.

Burada M moment, $M_{pl,Rd}$ plastik moment dayanımı, θ ise dönme değerini ifade etmektedir. Birleşimin rijitliğini belirleyen değerler;

$$\begin{aligned} m \leq 2/3 \text{ ise} \quad m &= 25\theta, \\ 2/3 < m < 1,0 \text{ ise} \quad m &= (25\theta + 4)/7 \end{aligned}$$

şeklinde hesaplanmaktadır.

Şekil 2.6'nın yatay ötelenmesi engellenmemiş sistemlerde kullanılabilmesi için;

$$\frac{K_b}{K_c} \geq 0,1 \quad (1.4)$$

eşitliği her katta sağlanmalıdır. Burada;

K_b : Hesaplanan katta en üstteki tüm kirişlerin I_b / L_b değeri,

1. GİRİŞ

K_c : Hesaplanan kattaki tüm kolonların I_c / L_c değeri,

I_b : Kirişin atalet momenti,

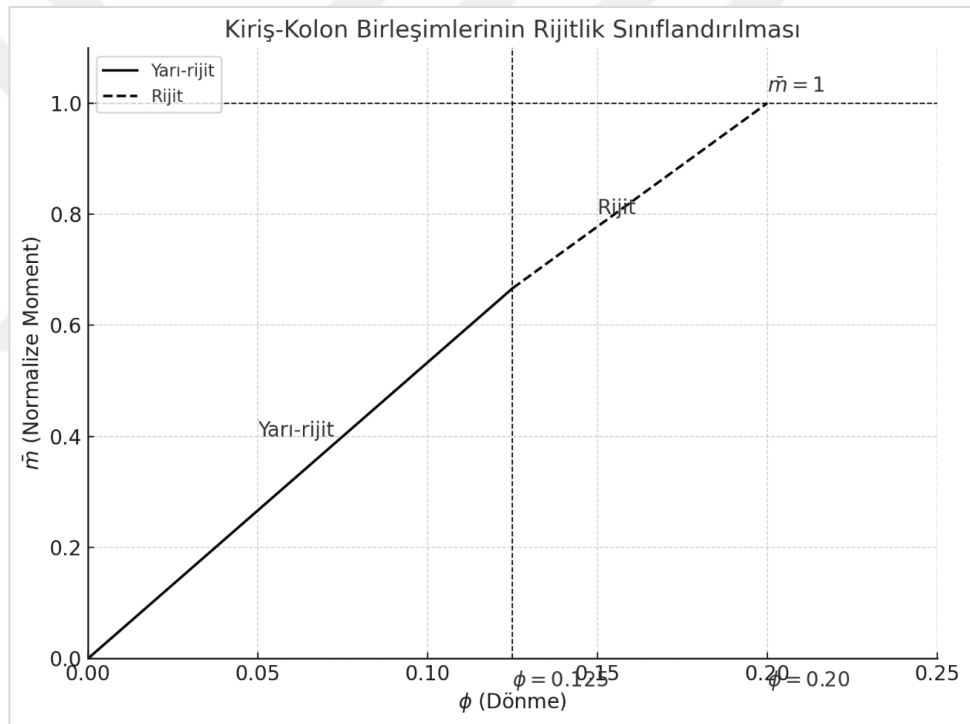
I_c : Kolonun atalet momenti,

L_b : Kirişin kolon merkezleri arasındaki açıklığı,

L_c : Kolon kat yüksekliği

olarak ifade edilmiştir.

Yatay ötelenmesi engellenmiş sistemlerdeki kiriş kolon birleşimlerine ait rijitlik sınır değerleri de Şekil 1.8’de verilmiştir.



Şekil 1.8. Yatay ötelenmesi engellenmiş sistemlerdeki kiriş kolon birleşimlerinin tavsiye edilen sınıflandırılması (EC3).

Şekil 2.7’ye göre birleşimde;

$$\begin{array}{ll} m \leq 2/3 & \text{ise} \quad m = 8\Phi \\ 2/3 < m < 1,0 & \text{ise} \quad m = (20\Phi + 3) / 7 \end{array}$$

sınır değerleri ifade edilmiştir.

1.4.2. Moment dayanımına göre sınıflandırma

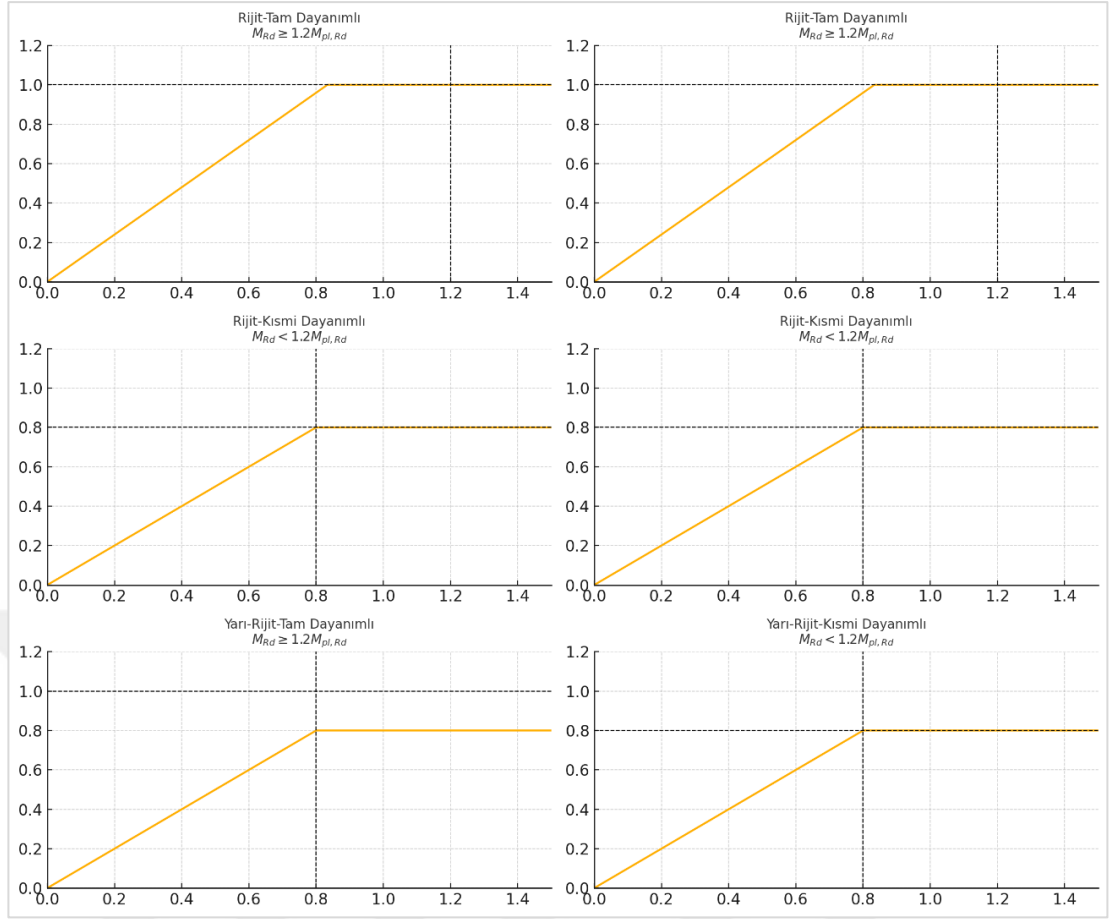
Birleşimlerin moment dayanımına göre sınıflandırılması, birleşimin moment dayanımının kirişin plastik moment dayanımı ile karşılaştırılması esasına dayanır. Bu sınıflandırma, birleşimleri üç ana grupta ele almaktadır:

Mafsallı Birleşimler: Birleşimin moment dayanımı (M_{Rd}), kirişin plastik moment dayanımının ($M_{pl,Rd}$) %25'inden fazla değilse ve birleşim yeterli dönme kapasitesine sahipse, bu tür birleşimler mafsallı olarak değerlendirilir.

Tam Dayanımlı Birleşimler: Eğer birleşimin moment dayanımı (M_{Rd}), kirişin plastik moment dayanımına ($M_{pl,Rd}$) eşitse ve yeterli dönme kapasitesine sahipse, bu birleşimler tam dayanımlı kabul edilir. Ayrıca, birleşimin moment dayanımı kirişin plastik moment dayanımının en az 1.2 katı kadar büyükse, birleşimin dönme kapasitesinin yeterli olduğu varsayılır ve bu durumda dönme kapasitesinin ayrıca kontrol edilmesine gerek duyulmaz.

Kısmi Dayanımlı Birleşimler: Eğer birleşimin moment dayanımı (M_{Rd}) kirişin plastik moment dayanımından ($M_{pl,Rd}$) daha küçükse, bu birleşimler kısmi dayanımlı olarak kabul edilir.

Birleşimlerin sınıflandırılması, yukarıda belirtildiği gibi dönme rijitliği ve moment dayanımına göre gerçekleştirilir. Eurocode 3 (EC-3), farklı moment-dönme eğrilerine dayanarak birleşimlerin sınıflandırılmasına ilişkin detayları sunmaktadır (Şekil 1.9).



Şekil 1.9. Kiriş-kolon birleşimleri için moment-dönme eğrilerine göre sınıflandırma örnekleri (EC-3).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Liu T.C.H. (1998) uç plaka vida bağlantılarıyla bağlanan basit alt yapılı çerçevelerin yangın durumundaki yapısal davranışını sonlu elemanlar modeliyle incelemiştir. Düz ve genişletilmiş uç plaka bağlantıları, ortam koşullarında yarı rijitten rijit hale gelmiştir. Bağlantı elemanlarının boyutları, vida sayısı ve uç plaka kalınlığı gibi parametrelerin etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, bağlantının moment kapasitesinin ortam koşullarında ne kadar büyük olursa olsun, yangın limit durumu altında bu kapasitenin en fazla üçte ikisi kadar bir artış sağlanabileceğini göstermiştir.

K.S. Al-Jabri et. al. (2005) yüksek sıcaklıklarda flush end-plate bağlantılarının davranışı, genel amaçlı sonlu elemanlar yazılımı ABAQUS kullanılarak incelenmiştir. Bağlantı bileşenleri üç boyutlu tuğla elemanlarla modellenmiş ve bileşenler arasındaki temas Coulomb sürtünmesiyle temsil edilmiştir. Çelik malzeme özelliklerinin sıcaklık arttıkça bozulduğu EC3 önerilerine göre ele alınmıştır. Sonlu eleman sonuçları ve yangın koşullarında yapılan deneysel testler karşılaştırıldığında, simülasyon ve deneysel veriler arasında iyi bir uyum olduğu görülmüştür.

Amir Saedi Daryan et. al. (2009), yüksek sıcaklıklarda iki tür cıvatalı açılı kiriş-kolon bağlantısının yangına karşı dirençleri incelenmiştir. 12 tam ölçekli test gerçekleştirilmiş ve elde edilen dönüşüm-sıcaklık eğrileri ile bağlantıların deformasyon ve failure modları analiz edilmiştir. Çalışma, bağlantıların sıcaklık dayanımını artırmak için cıvata malzemesi, açılı kalınlığı ve uygulanan moment gibi parametrelerin etkilerini göstermektedir. Sonuçlar, 900°C'nin üzerinde çelik bağlantıların tamamen bozulduğunu ve bağlantı sertliğinin sıfırlandığını ortaya koymuştur. Ayrıca, cıvataların erken gerilme hatası nedeniyle bağlantının kapasitesinin tam kullanılamayabileceği belirtilmiştir.

C.J. Mao et al. (2009), H-şekilli kiriş ve kolon ile yapılan çelik yarı rijit kiriş-kolon moment bağlantılarının yangına tepkisi incelenmiştir. ANSYS sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılan sayısal model, Tayvan'daki Mimarlık ve İnşaat Araştırma Enstitüsü (ABRI) bina yangın laboratuvarında gerçekleştirilen tam ölçekli yangın testleriyle doğrulanmış ve iyi bir uyum sağlanmıştır. Sonuçlar, uygulanan momentlerin, bağlantı geometrisi ve malzeme özelliklerinin yanı sıra çelik moment bağlantılarının

sertliğini önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça çelik bağlantıların sertliğinin önce arttığı, sonra 300°C civarında azaldığı bulunmuştur.

Özberk D. D. (2010) çelik taşıyıcı sistemlerin yangından korunmasında kullanılan üç farklı pasif yöntem maliyet açısından karşılaştırılmıştır. Püskürtme sıva, sıcaklıkla şişen boyalar ve fiber sement plakalarla kaplama yöntemleri incelenmiştir. Maliyet analizleri, Denizli ve Aydın'daki çelik yapılar üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar, fabrika binasında püskürtme sıvanın, iş merkezi binasında ise fiber sement plakaların daha ekonomik olduğunu göstermiştir. Ayrıca, çelik yüzey alanı ile yangın koruma maliyeti arasında bir ilişki bulunmuş ve farklı çelik kullanımı durumlarına göre en ekonomik yöntem belirlenmiştir.

Wang Y. C. (2011) farklı çelik bağlantı türlerinin yangın sırasında davranış ve dayanıklılığını incelemek için on adet orta ölçekli çelik alt çerçeve yangın testi gerçekleştirilmiştir. Çalışma, iki farklı kolon boyutu ve beş bağlantı türünü (fin plaka, web cleat, flush ve flexible endplate, extended endplate) kapsamaktadır. Testler, bağlantıların başarısızlık modları, giriş deformasyonları ve aksiyel kuvvetlerin gelişimini değerlendirmiştir. Sonuçlar, güçlü bağlantıların daha yüksek sıcaklıklara dayanabildiğini, ancak bağlantı türleri arasındaki farkın sınırlı olduğunu göstermiştir. Web cleat bağlantılarının en iyi performansı sergilediği, kolon boyutlarının etkisinin ise sınırlı olduğu bulunmuştur.

Dündar U. (2009) bir binanın odasında uygulanan yangın senaryosu ile yangının yapısal elemanlarda oluşturduğu ihmal edilen kuvvetler incelenmiştir. Kritik sıcaklıklar, hem yangın tasarımında bir hata kriteri olarak kullanıldığından hem de bu sıcaklıklarda kuvvet davranışlarının değişmesi nedeniyle hesaplanmıştır. SAP2000 kullanılarak zaman adımlarında oluşan kuvvetler belirlenmiş, ardından aynı parametrelerle SAFIR sonlu elemanlar programı kullanılarak yangın kaynaklı kuvvetler, gerilmeler ve yer değiştirmeler hesaplanmıştır. SAP2000 ile SAFIR sonuçları karşılaştırılmış, benzerlikler ve farklılıklar açıklanmıştır. Çalışma, yangına maruz kalan eleman davranışlarını anlamaya yönelik bir rehber oluşturmayı hedeflemektedir.

Yiqi Gao et. al. (2013) , esnek ve rijit uç plakalı bağlantıların yangın dayanımı deneysel ve sayısal olarak incelenmiştir. Altı yangın testi, üç farklı yükleme kombinasyonu ile gerçekleştirilmiştir. Bağlantılar genellikle 500-650 °C arasında hasar görmüştür. İnce uç plakalar bükülme deformasyonuna uğrarken, kalın plakalar kolon flanşı ve cıvatalarda deformasyona neden olmuştur. Yükleme kombinasyonlarına bağlı olarak dayanım azalsa da deformasyon davranışları benzerdir. ABAQUS ile yapılan sonlu elemanlar analizleri deney sonuçlarıyla uyum göstermiştir. Parametrik çalışmalarla, farklı yük kombinasyonlarında bağlantıların yangın davranışı incelenmiş ve gerilme-kayma ilişkileri değerlendirilmiştir.

Meng Wang et. al. (2013), yangın sırasında uç plaka kiriş-kolon bağlantılarının dayanıklılığını artırma stratejilerini sayısal olarak incelemiştir. Önerilen yöntemler arasında cıvata kalitesinin veya çapının artırılması, dog-bone şekilli kiriş, kanal uç plakası veya aralıklı uç plakalı bağlantılar kullanılması yer alır. Analiz sonuçları, cıvata yük taşıma kapasitesinin artırılmasının veya farklı uç plaka türlerinin kullanılmasının sınırlı etkileri olduğunu göstermiştir. Ancak, dog-bone şekilli kiriş veya kanal/arıklı uzatılmış uç plakalar, bağlantıların kritik sıcaklıkta 100 °C daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır.

Xuhong Qiang et. al (2014), yüksek dayanımlı çelik uç plaka bağlantılarının yangın altındaki davranışını ve başarısızlık mekanizmalarını anlamak için deneysel bir araştırma sunmaktadır. 550 °C'de ve sabit sıcaklık koşullarında tam ölçekli deneyler gerçekleştirilmiş, sonuçlar ortam sıcaklığındaki ve düşük dayanımlı çelik bağlantılarla karşılaştırılmıştır. Eurocode 3 hükümleri de test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Daha ince bir yüksek dayanımlı çelik uç plakanın hem ortam sıcaklığında hem de yangında dönerlik artırabileceği ve düşük dayanımlı çelik plaka ile benzer moment direnci sağlayabileceği bulunmuştur.

Shuyuan Lin et. al. (2014), kısmi uç plaka bağlantılarının yangın koşullarındaki davranışını modellemek için basitleştirilmiş, sağlam bir 2 düğümlü bağlantı elemanı sunmaktadır. Model, bağlantıyı iki aşamalı dönme davranışı ile doğrusal olmayan bir yay elemanı olarak temsil eder. Yayın özellikleri, bağlantının bileşenlerinden elde edilen rijitlik, gerilme, basınç, kesme dayanımları ve eğilme moment direnci ile belirlenmiştir. Model, statik çözümde sayısal kararlılık avantajı sağlar. Daha önce yapılan 14 test ile

doğrulan bu model, çelik çerçeveli kompozit binaların performansa dayalı yangın dayanım tasarımında kullanılabilir.

Xuhong Qiang et. al. (2015) yüksek dayanımlı çelik uç plaka bağlantılarının yangın sonrası davranışını ve hasar mekanizmalarını anlamak için deneysel bir araştırmayı sunmaktadır. 550 °C'de ısıtılıp soğutulan yedi uç plaka bağlantısı test edilmiştir. Yüksek dayanımlı çelik bağlantılar, düşük dayanımlı çelik bağlantılar ve yangına maruz kalmamış orijinal durumlarıyla karşılaştırılmıştır. Eurocode 3 hükümleri, yangın sonrası test sonuçlarıyla doğrulanmıştır. Çalışma, ince yüksek dayanımlı çelik uç plakanın, kalın düşük dayanımlı çelik uç plakaya benzer artık yük taşıma kapasitesi ve daha yüksek dönme kapasitesi sağladığını göstermektedir.

Tudor Petrina (2016) çelik binaların kiriş-kolon uç plaka bağlantılarının davranışını anlamak için gerçekleştirilen sayısal simülasyonları açıklamaktadır. Deneysel testlerden önce yapılan simülasyonlarda yangın etkisi, zaman-sıcaklık eğrileri ile modellenmiştir. İleri düzey modelleme kullanılarak tüm doğrusal olmayan etkiler dikkate alınmış ve hesaplamalar iteratif olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, artan kuvvet etkisi altında iki ana yangın senaryosu incelenmiştir.

Elie G. Hantouche et. al. (2017) çelik kiriş-kolon makaslama uç plaka bağlantılarındaki eksenel sınırlama kuvvetlerini yangın sırasında tahmin eden bir mekanistik model geliştirmek için sonlu eleman (FE) simülasyonları ve deneysel çalışmaların sonuçlarını sunmaktadır. Model, toplam kuvvet-dönme davranışını ve hasar modlarını tahmin etmek için doğrulanmıştır. Parametrik çalışmalarla kiriş uzunluğu, yük oranı, yangın şiddeti ve uç plaka kalınlığı gibi faktörler incelenmiştir. Önerilen model, farklı geometrik özellikler ve yükleme koşulları altında, yangın sırasında ısı kaynaklı kuvvetleri tahmin edebilmektedir.

Rohola Rahnavard et. al. (2018) çelik çerçeve sistemlerinde kiriş ve kolon arasındaki bağlantıların yangın altında nasıl davrandığını daha iyi anlamak için ABAQUS sonlu elemanlar programı kullanılmıştır. Bağlantıların sıcaklık-bağımlı modelleri geliştirilerek, yangın senaryosundaki davranışları analiz edilmiştir. Deneysel modellerin sonlu eleman analizleri yapılmış ve bu modellerin doğruluğu test edilmiştir. Bağlantıların

detaylı, saha-değişken bağımlı iletkenlik eleman modelleri geliştirilmiş ve elastik ile plastik bölgelerde ısıнын malzeme davranışına etkileri incelenmiştir. Ayrıca, doğrusal olmayan bölgelerdeki aşırı deformasyonlar da araştırılmıştır.

Rohola Rahnavard et. al. (2019), çelik moment çerçeve sistemlerinde kiriş-kolon bağlantılarının yangına karşı dayanımı incelenmiştir. ABAQUS sonlu elemanlar modellemesi kullanılarak, dört farklı bağlantı türü (1) civatalı son levha, (2) civatalı kapak levhası, (3) civatalı T bağlantı ve (4) kaynaklı kapak levhası) termal yüklemeye maruz bırakılmıştır. Sıcaklık aralığı 20 ile 900 °C arasında olan bu bağlantılar için, termal yüklemenin kiriş burulması, yer değiştirme, dönme, bağlantı sertliği ve moment-dönme davranışı üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Civatalı son levha bağlantısı, diğer üç bağlantı türüne kıyasla en yüksek yangın dayanımını sergilemiş ve bağlantı performansındaki bozulma önemli ölçüde daha düşük olmuştur.

Pouria Safari et. al. (2020), yangına maruz kalan çelik çerçevelerin hayatta kalma süresini artırmak için çeşitli stratejiler incelenmiş ve değerlendirilmiştir. Beş tipik çelik bağlantı kullanılarak iki parametrelili çalışma yapılmıştır. İlk parametre çalışması, eleman kalınlıkları ve malzeme türündeki değişikliklerin etkisini, ikinci çalışma ise ek takviyeler ve levhalar eklemenin etkisini incelemiştir. Sonuçlar, kiriş flanşı ve web kalınlıklarının artırılmasının, çelik çerçevelerin hayatta kalma süresini uzatmada oldukça etkili olduğunu göstermiştir. Diğer stratejiler ise çelik çerçevelerin yangın dayanımını üzerinde çok az etki yapmıştır. Birleştirilmiş strateji, çerçevenin dayanma süresini 25 dakika kadar artırmada en etkili yöntem olarak bulunmuştur. Simülasyonlar, mevcut deneysel yangın testleri ile mükemmel uyum göstermiştir.

Fatih Macit (2020), yangına karşı koruyucu boyanın (100, 200 ve 400 mikron) silindirik tankların başlangıç burkulması ve göçme kapasitesine etkisini incelemiştir. Farklı sıcaklıklarda (300-450-600 °C) yangın uygulanarak 22 laboratuvar örneği test edilmiştir. Sonuçlar, boya kalınlığı arttıkça, tankların yangına dayanıklılığının arttığını ve 450 dereceye kadar burkulma yüklerinin ideal modelin üzerinde olduğunu göstermektedir.

Hüsna Ekşi (2020) çelik yapılarda T birleşim bölgelerinin yangına maruz kaldıktan sonraki yük-deformasyon ilişkileri incelenmiştir. Su bazlı boya ile birleşim bölgeleri farklı kalınlıklarda boyanarak, termal bariyer etkisi sağlanmıştır. Boya kalınlığının, birleşim bölgelerinin yük deformasyon eğrileri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu yöntem, yüksek sıcaklığa karşı koruma sağlayarak yapı elemanlarının yangın güvenliğini artırmayı hedeflemektedir.

Seda Akduman (2022) çelik yapıların ısı etkisindeki davranışı incelenmiştir. Farklı birleşim detaylarının 600°C'de ısıtılarak, ısı sonrası taşıma gücü ve davranışları belirlenmiştir. Isı etkili ve etkisiz çelik çerçevelere üç noktalı eğilme deneyleri uygulanmış, deney verileri sonlu eleman modelleriyle doğrulanmıştır. Ayrıca, yangın sonrası deprem etkileri analiz edilerek, ısıнын birleşim araçları üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Xuhong Qiang et. al. (2022), yüksek dayanımlı çelik (HSS) flanş kaynaklı web-cıvatalı bağlantıların yangın davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle inceler. Mevcut tasarım spesifikasyonlarının uygulanabilirliğini değerlendirmek için Eurocode 3 Bölüm 1-8, AISC360-16 ve GB50017-2017 ile karşılaştırmalar yapılır. Sonuçlar, Eurocode 3'ün muhafazakar olduğunu, AISC360-16 ve GB50017-2017'nin ise güvenli olmadığını göstermektedir. Kaynak kalitesini iyileştirmek ve çelik sınıflarını ve kalınlıklarını eşleştirmek, kaynak arızasını önlemek için çok önemlidir. Bu araştırma, HSS bağlantılarının performansa dayalı optimizasyonunu ve yangına dayanıklı tasarımını desteklemektedir.

Shenggang Fan et. al. (2002), çelik çerçeve yapılarda cıvatalı-kaynaklı hibrit bağlantı eklemlerinin yangına dayanıklılığını araştırır. Kiriş-uç yük oranının ve beton levha kalınlığının yangına dayanıklılık üzerindeki etkilerini incelemek için üç numune test edildi. Sonuçlar, yük oranının artırılmasının yangına dayanıklılık sınırlarına ulaşma süresini kısalttığını ve kemer karşıtı değerleri azalttığını göstermektedir. Beton levha kalınlığı yangına dayanıklılıkta küçük bir iyileştirme sağlar. Parametrik analiz için ABAQUS kullanılarak bir sonlu eleman modeli geliştirildi ve eklemin mekanik davranışı ve hasar modları simüle edildi.

Abdulsamet Aktürk (2022) söndürücü, yangına maruz kalan çelik yapıların dayanımları ve patlamanın ardından performansları ortaya çıkıyor. Sekiz katlı çelik bina üzerinde yapılan tasarım bölümü ile farklı sıcaklık senaryolarında yapı elemanlarındaki değişikliklerdeki değişiklikler araştırılmıştır.

Serkan Kocapınar (2022), UPN 200 kesitli S275 çelik kirişler üzerindeki iki intumescent kaplamanın, bir fırında 2 saat boyunca ISO 834 yangın eğrisi altında yangın koruma performansını karşılaştırır. Kirişler, kaplama türü hariç tüm değişkenler kontrol edilerek farklı intumescent ürünlerle kaplandı. Ürün A, BS 476-20,22 ve EN 13381-8 standartlarını karşılarken, Ürün B, ASTM UL-94 ve EN 13381-8 ile uyumludur. Termokupllar sıcaklık-zaman eğrilerini ölçtü ve ABAQUS yazılımı, deneysel sonuçları simülasyonlarla karşılaştırmak, termal bariyer etkinliğini değerlendirmek için ısı transferi analizi için kullanıldı.

Enock Tuyişime (2022), yangın koşulları altında uzay çerçeve yapılarının davranışını inceler ve başlangıçta eğrilik kusurları olan basınç elemanlarının performansına odaklanır. Yapısal analiz ve simülasyonlar için ABAQUS/Explicit kullanılarak hem kusursuz hem de kusurlu elemanlar çeşitli sıcaklık koşulları altında incelenmiştir. Sonuçlar, termal kuvvetlerin kolonun dış yüklere dayanma kapasitesini önemli ölçüde azalttığını ve başlangıçtaki kusurların yapısal performansı daha da düşürdüğünü göstermektedir. Termal genleşme kuvvetleri, davranışı değiştirmede kritik bir rol oynar.

Peng Lu et. al. (2023) yüksek dayanımlı Q690 çelik düz uç plaka bağlantılarının (Q690-FEC) ortam ve yüksek sıcaklıklardaki yangın davranışını inceler. Ortam sıcaklığındaki deneysel testler, eğilme kapasitesini, başlangıç sertliğini ve nihai dönüşü ölçtü. Parametrik analizler, yük oranı, uç plaka kalınlığı ve cıvata çapının etkilerini araştırdı. Yangına dayanıklılık testleri, uç plaka kalınlığının kritik sıcaklık ve yangına dayanıklılık üzerinde asgari etkiye sahip olduğunu gösterdi. Yangın davranışını tahmin etmek için bir dönüş-sıcaklık modeli geliştirildi.

L. L. Wang et. al. (2013)deneysel ve sayısal simülasyonlar yoluyla hızlandırılmış yaşlandırmadan sonra intumescent kaplamaların termal iletkenliğini araştırmaktadır. İki

tip intumescent kaplama kullanılmış ve genleşme kalınlığı ve kabarcık boyutuna dayalı bir termal iletkenlik modeli geliştirilmiştir. Genleşmiş kalınlık ve kabarcık boyutu için ölçülen veriler kullanılarak yalıtımlı çelik levha sıcaklıklarının sayısal hesaplamaları deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Model, ölçümlerle iyi bir uyum göstermiştir. Yaşlandırmanın genleşme kalınlığını azalttığı ve kabarcık boyutunu artırdığı, her ikisinin de termal iletkenliği artırarak yalıtım performansını olumsuz etkilediği bulunmuştur.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

3.1.1. Çelik

Çalışmada kullanılacak çelik malzeme özellikleri Eurocode normlarına göre hesaplanmıştır.

Yoğunluk

Yoğunluk sıcaklıktan bağımsız olarak ($\rho_{st} = 7.850 \text{ kg/m}^3$) alınabilir (CEN 2005b).

Etkin akma dayanımı

Eurocode'a (EN 1993-1-2: Çelik Yapılar İçin Yangın Tasarımı) göre çelik malzemelerin etkin akma dayanımının (reduction factor for yield strength,) hesaplanması, yüksek sıcaklıkların çelik üzerindeki etkilerini dikkate alır. Bu hesaplamada, çeliğin sıcaklığa bağlı olarak akma dayanımında azalma gösterdiği kabul edilir.

Çeliğin Etkin Akma Dayanımı Hesabı

$$f_{y,\theta} = k_{y,\theta} \cdot f_y \quad (3.1)$$

Burada:

$f_{y,\theta}$: Yangın durumundaki çeliğin etkin akma dayanımı (MPa).

$k_{y,\theta}$: Çelik için sıcaklıkta akma dayanımı azaltma faktörü.

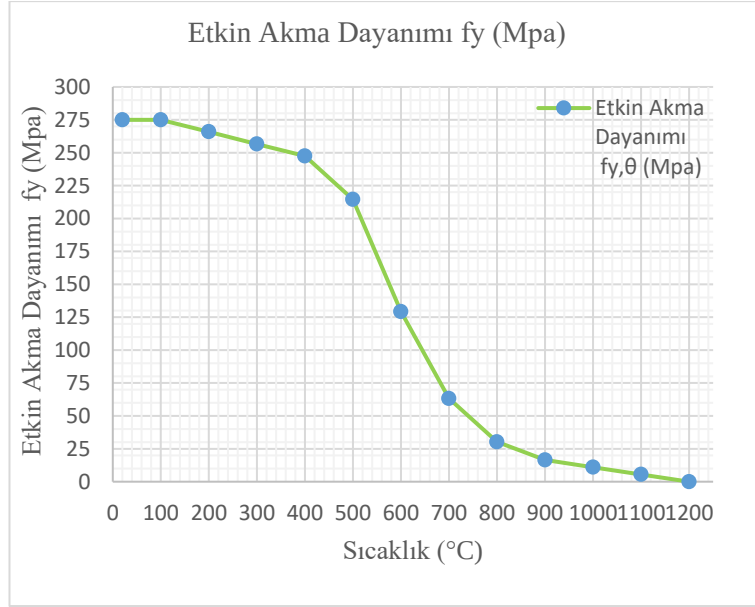
f_y : Normal ortam sıcaklığındaki çeliğin akma dayanımı (MPa).

Çizelge 3.1. Çelik malzemesi etkin malzeme özellikler (EC)

Çelik sıcaklığı θ_a	θ_a sıcaklığı için, 20 °C sıcaklıktaki f_y veya E_a değerlerine bağlı azaltma faktörleri		
	Etkili akma dayanımı için (f_y 'ye bağlı) azaltma faktörü	Orantıllık sınırı için (f_y 'ye bağlı) azaltma faktörü	Doğrusal elastik bölümün eğimi için (E_a 'ya bağlı) azaltma faktörü
	$k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	$k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	$k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000
Not - Çelik sıcaklığının ara değerleri için doğrusal interpolasyon kullanılabilir.			

Çizelge 3.2. S275 Çelik malzemesi için etkin akma gerilmesi

Sıcaklık (°C)	Akma Gerilmesi $f_{y,20}$ (Mpa)	$k_{y,\theta}$	Etkin Akma Dayanımı $f_{y,\theta}$ (Mpa)
20	275,00	1,000	275,00
100	275,00	1,000	275,00
200	275,00	0,967	265,93
300	275,00	0,933	256,58
400	275,00	0,900	247,50
500	275,00	0,780	214,50
600	275,00	0,470	129,25
700	275,00	0,230	63,25
800	275,00	0,110	30,25
900	275,00	0,060	16,50
1.000	275,00	0,040	11,00
1.100	275,00	0,020	5,50
1.200	275,00	0,000	0,00

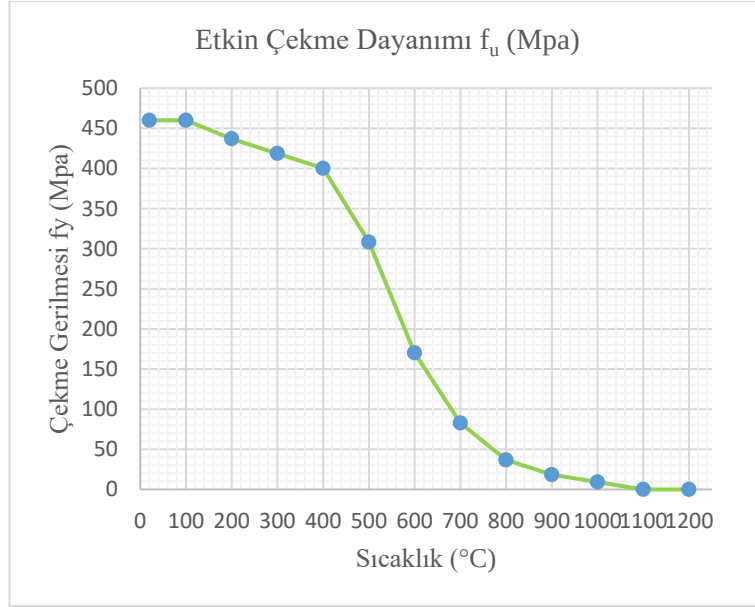


Şekil. 3.1. Çelik etkin akma dayanımı grafiği (S275)

Etkin çekme dayanımı

Çizelge 3.3. Çelik etkin çekme dayanımı (S275)

Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı $f_{u,20}$ (Mpa)	$k_{u,\theta}$	Etkin Çekme Dayanımı $f_{u,\theta}$ (Mpa)
20	460	1,000	460,00
100	460	1,000	460,00
200	460	0,950	437,00
300	460	0,910	418,60
400	460	0,870	400,20
500	460	0,670	308,20
600	460	0,370	170,20
700	460	0,180	82,80
800	460	0,080	36,80
900	460	0,040	18,40
1.000	460	0,020	9,20
1.100	460	0,000	0,00
1.200	460	0,000	0,00

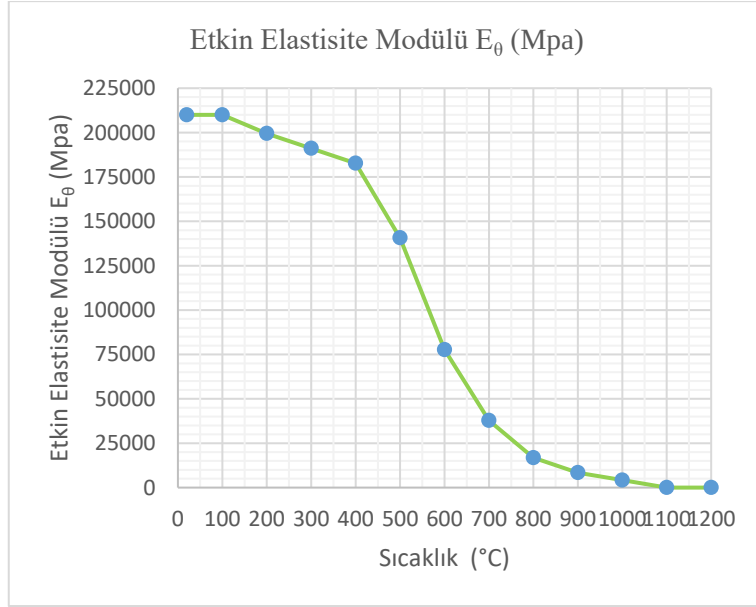


Şekil 3.2. Çelik etkin çekme dayanımı grafiği (S275)

Etkin elastisite modülü

Çizelge 3.4. Çelik etkin elastisite modülü

Sıcaklık (°C)	Elastisite Modülü E_{20} (Mpa)	$k_{E,\theta}$	Etkin Elastisite Modülü E_θ (Mpa)
20	210.000	1,000	210.000,00
100	210.000	1,000	210.000,00
200	210.000	0,950	199.500,00
300	210.000	0,910	191.100,00
400	210.000	0,870	182.700,00
500	210.000	0,670	140.700,00
600	210.000	0,370	77.700,00
700	210.000	0,180	37.800,00
800	210.000	0,080	16.800,00
900	210.000	0,040	8.400,00
1.000	210.000	0,020	4.200,00
1.100	210.000	0,000	0,00
1.200	210.000	0,000	0,00



Şekil 3.3. Çelik etkin elastisite modülü grafiği

Özgül Isı

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 600^{\circ}\text{C}$ için

$$c_a = 425 + 7,73 \times 10^{-1} \theta_a - 1,69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2,22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \text{ J/kgK} \quad (3.2)$$

$$600^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 735^{\circ}\text{C} \text{ için } c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \text{ J/kgK} \quad (3.3)$$

$735^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 900^{\circ}\text{C}$ için

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \text{ J/kgK} \quad (3.4)$$

$900^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200^{\circ}\text{C}$ için

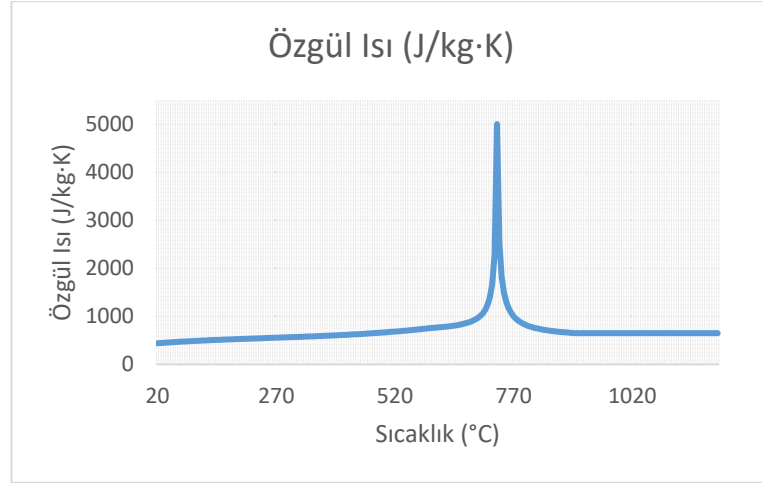
$$c_a = 650 \text{ J/kgK} \quad (3.5)$$

θ_a = Çelik Sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$

c_a =Çeliğin özgül ısısı J/kgK

Çizelge 3.5. Çelik özgül ısı çizelgesi

Özgül Isı (J/kg·K)	Sıcaklık (°C)
439,802	20
459,703	50
487,620	100
510,418	150
529,760	200
547,313	250
564,740	300
583,708	350
605,880	400
632,923	450
666,500	500
708,278	550
759,920	600
813,750	650
1.008,158	700
1.482,895	750
803,261	800
694,748	850
650,444	900
650,000	950
650,000	1.000
650,000	1.050
650,000	1.100
650,000	1.150
650,000	1.200



Şekil 3.4. Çelik özgül ısı grafiği

Isıl iletkenlik

$20\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ için

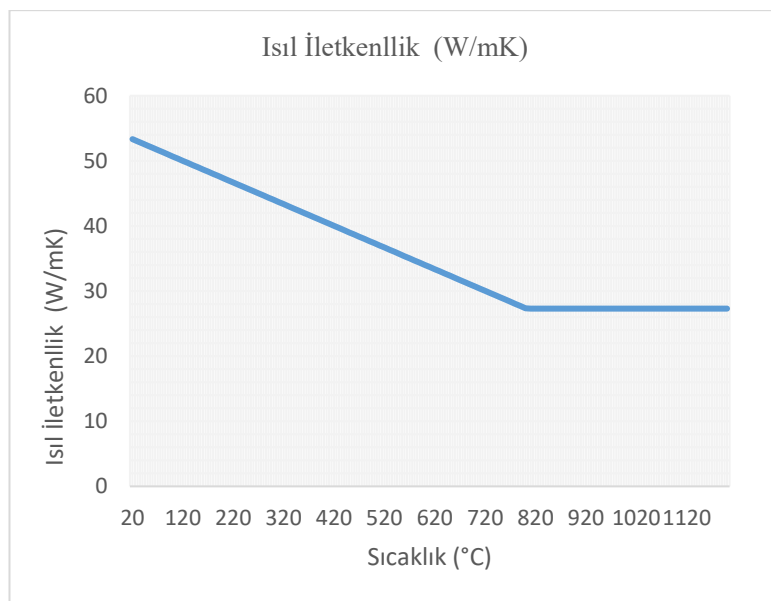
$$\lambda_a = 54 - 3,33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ W/mK} \quad (3.6)$$

$800\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta_a < 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ için

$$\lambda_a = 27,3 \text{ W/mK}$$

θ_a = Çelik Sıcaklığı $^{\circ}\text{C}$

λ_a =Çeliğin ısıl iletkenliği W/mK



Şekil 3.5. Çelik ısıl iletkenlik grafiği

Çizelge 3.6. Çelik ısı iletkenlik çizelgesi

Sıcaklık (°C)	Isıl İletkenlik (W/mK)
20	53,334
50	52,335
100	50,670
150	49,005
200	47,340
250	45,675
300	44,010
350	42,345
400	40,680
450	39,015
500	37,350
550	35,685
600	34,020
650	32,355
700	30,690
750	29,025
800	27,360
850	27,300
900	27,300
950	27,300
1.000	27,300
1.050	27,300
1.100	27,300
1.150	27,300
1.200	27,300

3,1,2, Yangın koruma malzemesi (intümesan boya) özellikleri

Yoğunluk ($\rho_p - \text{kg/m}^3$)

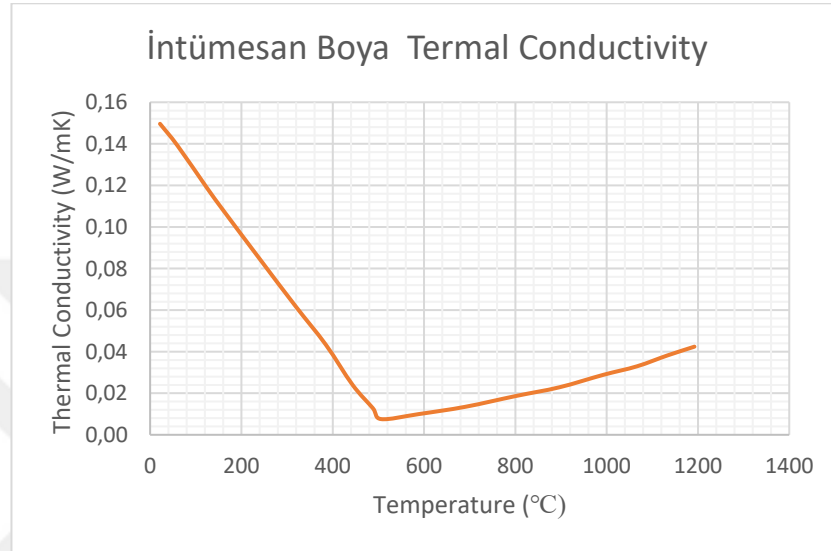
Pasif yangın koruma yoğunluğu, koruma sıcaklığından bağımsız olarak 100 kg/m^3 alınabilir (CEN 2013).

Özgül ısı ($C_p - \text{J/kgK}$)

Pasif yangın korumanın Özgül Isı değeri, koruma sıcaklığından bağımsız olarak 1.000 J/kgK alınabilir (CEN 2013).

Isıl iletkenlik (λ_p – W/mK)

Wang et al. (2013)'de belirtilen koruma malzemesinin (intumesan boya) Isıl iletkenlik değeri, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir. Şekil 3.6'da bu değişim gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Pasif yangın koruyucu boyanın sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik değişimi (Wang et al. 2013).

3.2. Yangın

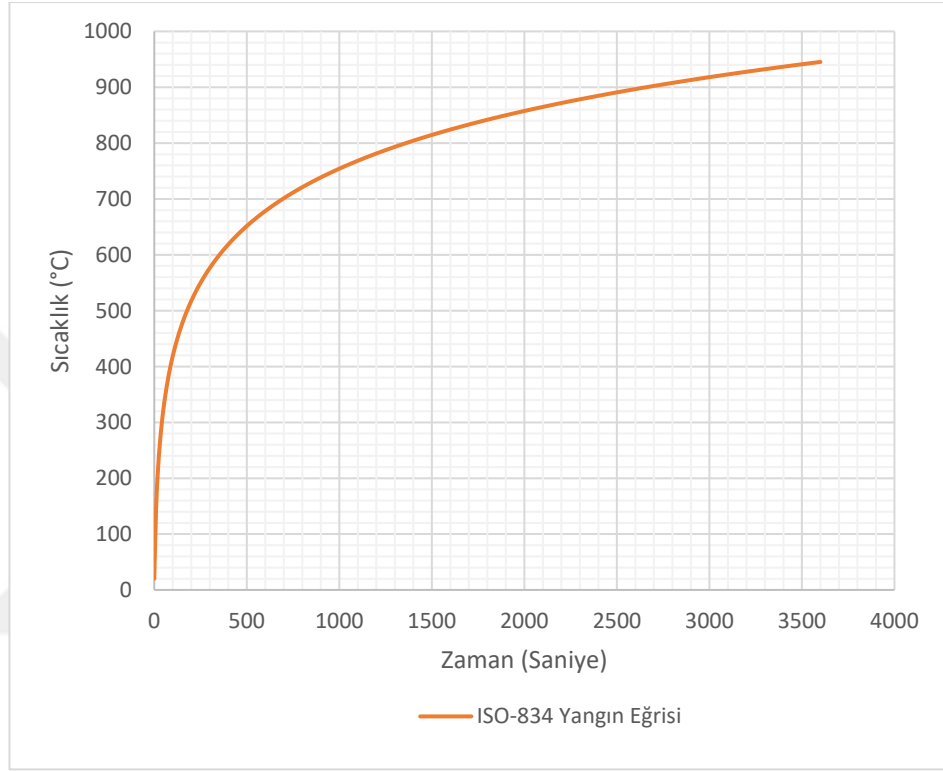
Yeterli ısının bulunması durumunda yanıcı özellikli malzemenin oksijen ile bir araya gelmesi durumunda yangın oluşur. Yanıcı malzemelerin 1 kg kütlesinin tam yangında ortama verdiği ısı miktarına kalorifik değer denir (Çırpıcı 2021). Bu değerler Çizelge 3.7'de sunulmuştur.

Çizelge 3.7. Bazı malzemelerin kalorifik değerleri (Çırpıcı 2021)

Malzeme	Kalorifik Değeri (MJ)
Ahşap	17,5
Diğer Selülozik Malzemeler	20
Karbon	30
Alkol	30
Polyester	30
Kauçuk Lastik	30
PVC	20

3.2.1. Standart yangın eğrisi

Yangın, meydana geldiği ortama bağlı olarak farklı tiplerde gelişebilir. Ancak özellikle yangın hakkında yapılan çalışmalarda esas alınan bir standart yangın oluşumu vardır. ISO 834'te de belirtilen standart yangın eğrisi Şekil 3.6'daki gibidir:



Şekil 3.6. Standart yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014), ISO 834-11:2014)

Standart yangında istenilen bir andaki gaz sıcaklığı aşağıdaki formül ile bulunabilir (Eurocode 2012):

$$T_f(t) = T_f(t_0) + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3.7)$$

$T_f(t)$ = t anındaki yangın sıcaklığı (°C)

$T_f(t_0)$ = t_0 anındaki yangın sıcaklığı (°C)

t=zaman (Dakika)

3.2.2. Smouldering yangın eğrisi

Smouldering yangın eğrisi, hızlı bir sıcaklık artışı yerine sabit veya yavaş artış gösteren bir yapıya sahiptir. İdeal bir smouldering yangın eğrisi şu şekilde temsil edilebilir:

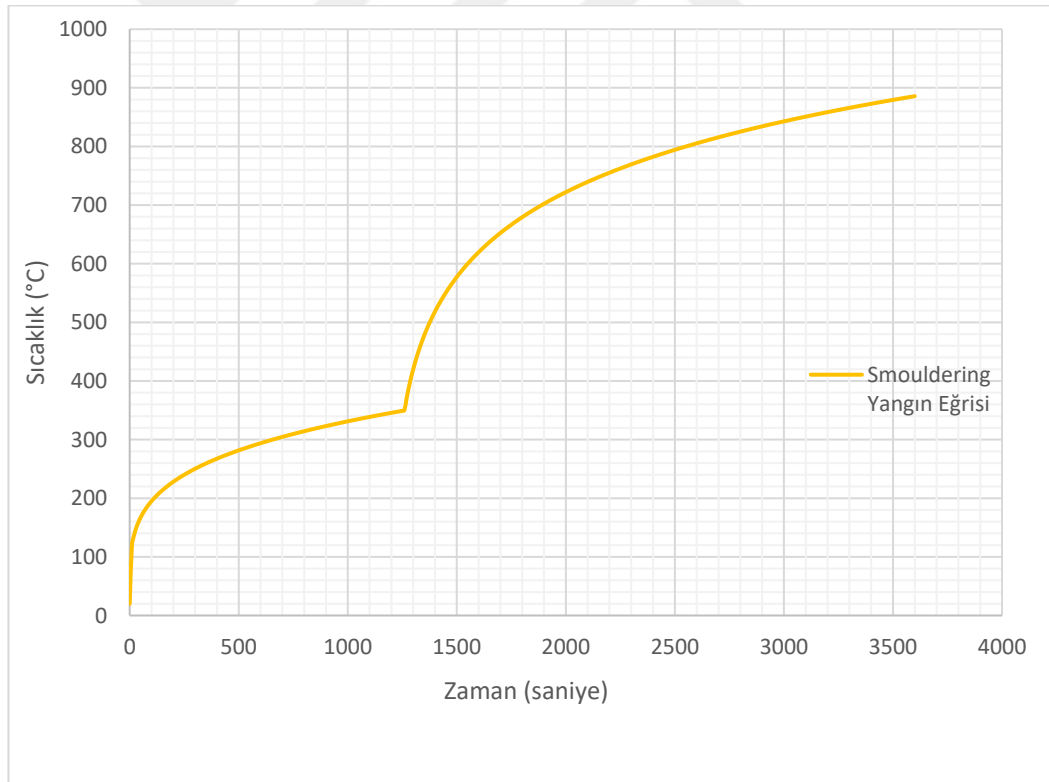
$$\begin{aligned} T(t) &= T_0 + A \cdot (1 - e^{-0.05t}) \\ T(t) &= t_0 + 600 \cdot (1 - e^{-0.05 \cdot t}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

$T(t)$ = Sıcaklık (°C)

T_0 = Başlangıç sıcaklığı

t = zaman (dakika)

A = Maksimum sıcaklık artışı (500 °C - 700 °C)



Şekil 3.7. Smouldering yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014))

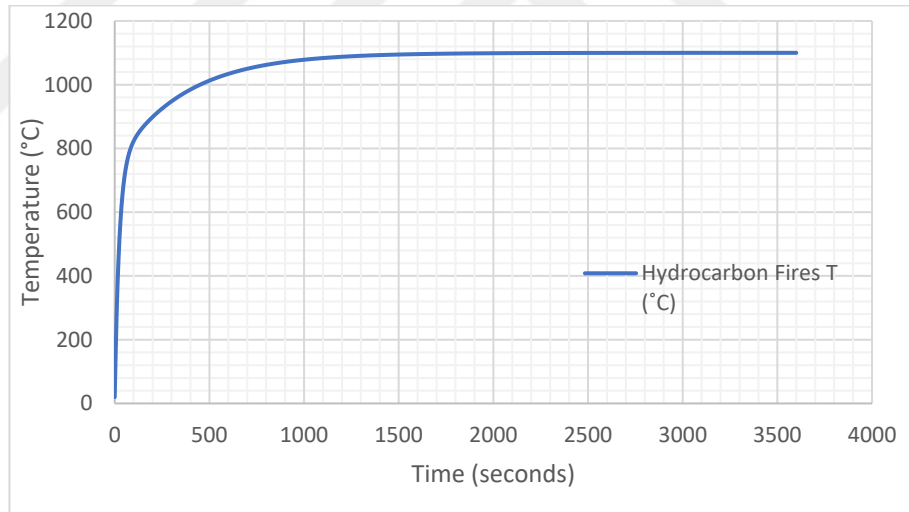
3.2.3. Hidrokarbon (Hydrocarbon) yangın eğrisi

Hidrokarbon yangın eğrisi (Hydrocarbon Fire Curve), petrol, gaz ve diğer hidrokarbonların yanmasıyla oluşan yangınları simüle eder ve bu tür yangınlar genellikle çok hızlı sıcaklık artışı ile karakterize edilir. Bu eğri, hidrokarbonların yanması sırasında açığa çıkan yüksek enerji nedeniyle yangın ortamındaki hızlı ve yoğun sıcaklık artışını yansıtmak için geliştirilmiştir ve yangın dayanımı hesaplamalarında kullanılır. Eurocode kapsamında, hidrokarbon yangın eğrisi, standart bina yangın eğrisinden (ISO 834) daha agresif bir sıcaklık artışı gösterir.

$$T = 1080 [1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}] + 20 \quad (3.9)$$

T= Sıcaklık (°C)

T=Zaman (dakika)



Şekil 3.8. Hidrokarbon yangın eğrisi ((ISO), I. O. f. S. (2014))

3.2.4. Yangın yükü yoğunluğu

Yangın dayanımı analizlerinde dikkate alınması gereken en kritik parametrelerden biri yangın yüküdür. Yangın yükü, yangın güvenliği tasarımı ve analizinde temel bir veri olup, alınacak tüm önlemler ve yapılacak değerlendirmeler bu parametreye dayalı olarak şekillendirilir.

Yangın yükü, incelenen alan içerisinde bulunan yanıcı malzemelerin toplam enerjisini temsil eder. Bu değer, alanda bulunan yanıcı özellikteki malzemelerin kütleleri ile bunların özgül ısı değerlerinin çarpılmasıyla hesaplanır. Daha sonra bu toplam enerji değeri, çalışılan alanın büyüklüğüne (örneğin birimin m² cinsinden yüzey alanı) bölünerek birim yüzey başına düşen enerji miktarı elde edilir.

Matematiksel olarak, yangın yükü şu şekilde ifade edilebilir:

$$q_f = \frac{\sum(m_i \cdot H_i)}{A} \quad (3.10)$$

Burada;

q_f : yangın yükü (MJ/m²)

m_i : yanıcı malzemenin kütlesi (kg)

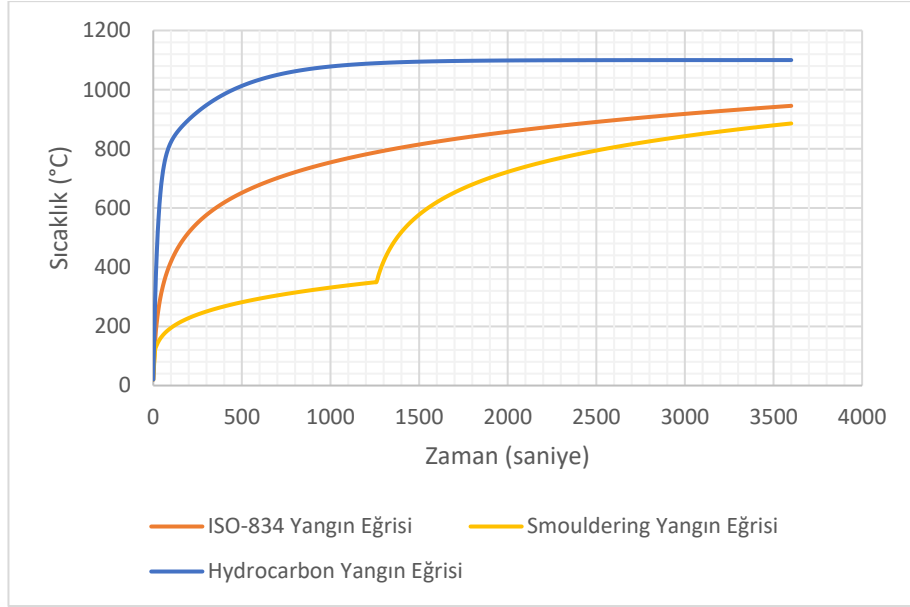
H_i : yanıcı malzemenin ısı değeri (MJ/kg)

A : alanın ölçüsü (m²)'dir.

3.3. Yangın yükü indeksi

1.000.000 kJ/ m² değerine (1GJ / m²) yangın yükü indeksi denilir. Bu indeks sayesinde yapılar yangın riskine göre sınıflandırılabilir. Sınıflandırmanın basamakları aşağıdaki gibidir:

0 – 1,00	: yangın sıçrama tehlikesi bulunmayan
1,0 – 1,5	: yangın yayılma tehlikesi bulunan
1,5 – 2,5	: yangın fırtınası tehlikesi bulunan
2,5 – 3,5	: yangın fırtınası ihtimali yüksek olan
3,5 <	: felaket yangını



Şekil 3.9. Modellerde kullanılan yangın eğrilerinin karşılaştırılması

Şekil 3.9’ da gösterilen grafikte modellemelerde kullanılan Avrupa Standartlarında kabul görmüş 3 farklı yangın eğrisinin sıcaklık-zaman karşılaştırmaları verilmiştir. Standart yangın durumunda sıcaklık zamana bağlı normal derecelendirilmiş bir yangın eğrisidir. Hidrokarbon yangınları ise, sıcaklığın aniden yükseldiği ve yüksek seyrettiği bir yangın eğrisidir. Smouldering yangın eğrisi de yangın sıcaklığının dalgalı seyrettiği bir yangın eğrisidir.

3.4. Sonlu Eleman Programı: Abaqus

ABAQUS, mühendislik uygulamalarında kullanılan ve sonlu elemanlar analizi ile çalışan bir yazılımdır. Tasarımı yapılacak modellerin gerçekçi simülasyonlarını oluşturarak detaylı çözümlemeler yapabilen bir sonlu eleman programıdır. Güvenilir çözümü çok zor elde edilebilecek olan doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri bünyesinde bulundurduğu pek çok sonlu eleman tipleri ve malzeme modelleri ile gerçekleştirmektedir. Bu bölümde ABAQUS programının, çalışma kapsamında kullanılan özelliklerinden bahsedilecektir.

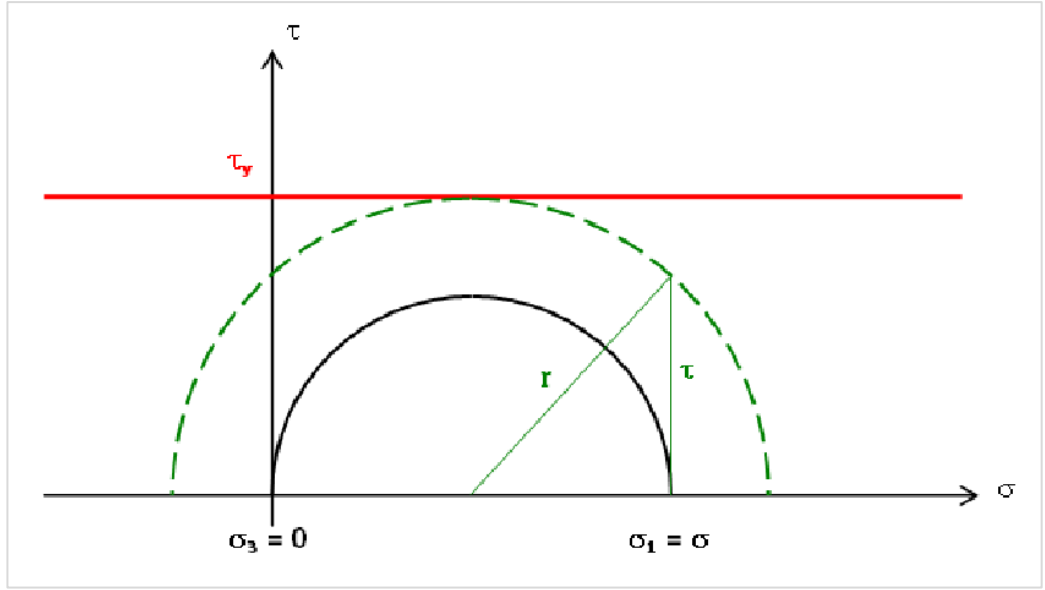
3.4.1. Malzeme modeli

Akma Koşulu

Bir malzemenin deformasyon sürecinde elastik deformasyonların sona erip plastik deformasyonların başlama durumuna akma denir. Akma sınır durumu malzemenin elastisite limitini belirlemektedir. Malzemede gerilme etkisi altında sadece elastik deformasyonların oluşması uygulanan gerilmenin yokluğunda malzemenin tekrardan ilk haline gelmesine neden olur. Akma sınırının üstüne çıkıldığında ise uygulanan gerilme yokluğunda malzeme belirli bir seviyede plastik deformasyona uğramaktadır.

Plastik deformasyonun başlaması için gerekli olan gerilmeleri açıklayan bağıntılara akma koşulu denir. Mühendislik uygulamalarındaki tasarımlar nadiren tek eksenli gerilim durumu altında çalışmaktadır. Bu sebeple pek çok durumda bu tasarımların üç eksenli gerilim durumu altındaki davranışı göz önüne alınmalıdır. Üç eksenli gerilim altında çalışan bir malzemenin hangi durumda plastik deformasyona uğrayacağını belirlemek için kullanılan farklı akma koşulları mevcuttur. Sünek malzemeler için maksimum kayma gerilmesi (Tresca) ve distorsiyon işi (Von Mises) olarak adlandırılan iki akma koşulu kullanılmaktadır.

Maksimum kayma gerilmesi (Tresca) koşulu 1860'lı yıllarda fransız bir makine mühendisi olan Henri Tresca tarafından geliştirilmiştir. Bu akma koşuluna göre bir malzemede kesme gerilmeleri vasıtasıyla plastik şekil değiştirmeler gerçekleşiyorsa üç eksenli gerilme durumunda da plastik şekil değiştirmelerin başladığı anda kritik bir kesme gerilmesi değeri oluşur. Bu kesme gerilmesi değerinin bulunması için tek eksenli çekme deneyleri dikkate alınır.



Şekil 3.10. Tresca akma koşulu için mohr çemberi

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (3.11)$$

Mohr çemberi dikkate alındığında Şekil 3.10’de görüldüğü üzere en yüksek ve en düşük asal gerilmelerin farkı çemberin çapını temsil ederken, bu değer yarısı ise maksimum kayma gerilmesi değerini gösterir. Bu akma koşuluna göre akmanın bir malzemede başlayabilmesi için Denklem 3.1’de görülen eşitliğin bozularak maksimum kayma gerilmesinin aşılması gerekmektedir.

Tresca akma koşulunun keşfinden uzun süre sonra Avusturyalı matematikçi Richard Von Mises bir akma koşulu prensibi öne sürmüştür. Bu akma koşulunda sadece en büyük ve en küçük asal gerilmeler değil tüm asal gerilmeler dikkate alınmaktadır. Akmanın başlayabilmesi için sapma geriliminin asal gerilmeler arasındaki farkları dikkate alan ikinci sabit katsayısı (J_2) dikkate alınır ve bu katsayının k_2 ile gösterilen bir değeri aşması gerekir.

İkinci sabit katsayının denklemi

$$J_2 = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (3.12)$$

Von Mises akma koşuluna göre (J_2) değerinin k^2 değerinin üstüne çıkmasıyla akma koşulu gerçekleşmektedir. Tek eksenli gerilme durumu dikkate alındığında ikinci ve üçüncü asal gerilmeler sıfır kabul edilir ($\sigma_2=\sigma_3=0$). Bu durumda Von Mises akma koşulu aşağıdaki gibi yazılabilir.

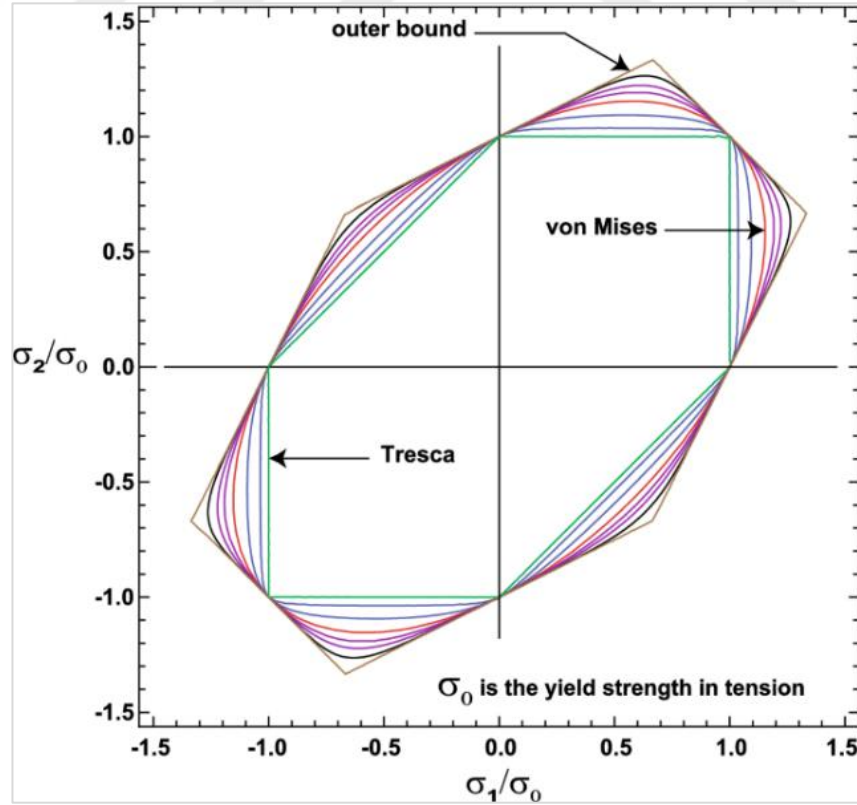
$$J_2=1/6[(\sigma_1-0)^2+0+(0-\sigma_1)^2]=k^2 \quad (3.13)$$

Yukarıdaki denklem sadeleştirildiğinde

$$\sigma_1^2+\sigma_1^2=6k^2$$

Sonucu elde edilir. Tek eksenli gerilme durumunda akma dayanımı σ_0 kabul edilirse k değeri akma dayanımı cinsinden aşağıdaki gibi yazılır.

$$k=\frac{\sigma_0}{\sqrt{3}} \quad (3.14)$$



Şekil 3.11. Tresca ve Von Mises akma yörüngeleri.

Yukarıdaki denklem göz önünde bulundurularak Von Mises ve Tresca akma koşulları tek eksenli gerilme durumu için karşılaştırıldığında plastik deformasyon için gerekli kesme gerilmeleri arasında yaklaşık %15 fark olduğu görülmektedir. Şekil 3.11’de görüldüğü üzere Von Mises akma koşulunda gerilme değerlerinin biraz daha yüksek olduğu görülür. Tresca akma koşulu nispeten daha basit uygulamalarda pratiklik açısından avantaj sağlar. Ancak eliptik akma yörüngesine sahip Von Mises akma koşulu deneysel sonuçlar ile çok daha uyumludur.

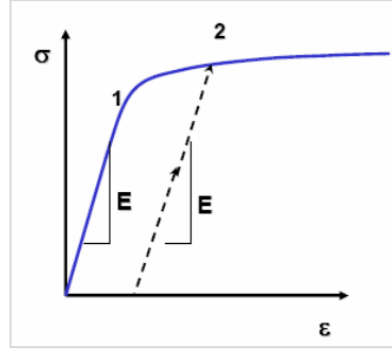
Pekleşme Davranışı

Çelik bir malzemenin davranışını incelemek için numuneler üzerinde çekme testleri yapılır ve mühendislik gerilme ve şekil değiştirme değerleri elde edilir. Aşağıda gösterilen denklemlerden (3.15 ve 3.16) yararlanılarak elde edilen bu veriler, ABAQUS programında kullanılmak üzere gerçek mühendislik gerilme ve şekil değiştirme değerlerine dönüştürülebilir. Elastik bölgedeki malzeme davranışı programda tanımlanırken elastisite modülünün girilmesi yeterlidir. Plastik bölgedeki malzeme davranışının tanımlaması yapılırken aşağıdaki denklemler ile elde edilen değerler tablo halinde programa girilir ve malzemenin akma gerilmesine ulaştığı durumda plastik deformasyonun olmadığı kabul edilir.

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + \varepsilon_e) \quad (3.15)$$

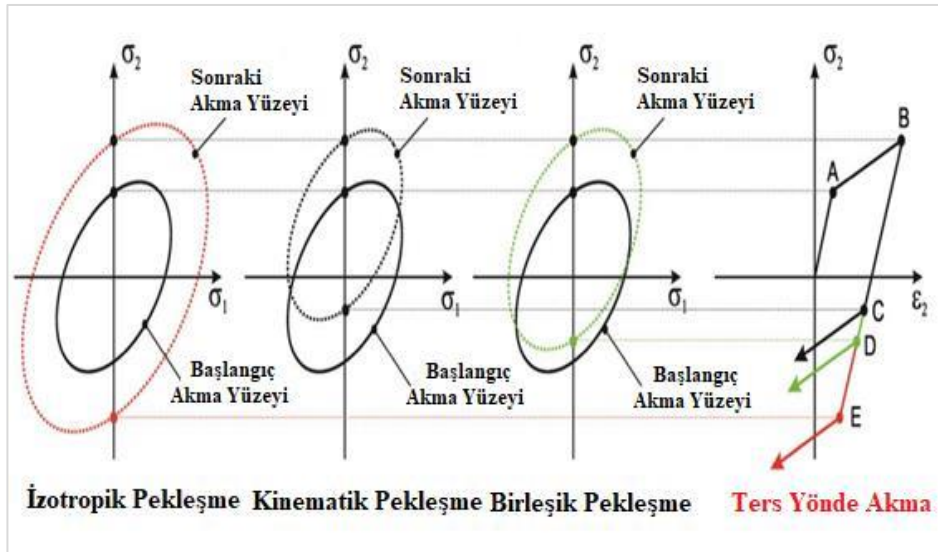
$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_e) \quad (3.16)$$

Yük etkisi altındaki bir çelik malzemenin elastik bölgeden çıkarak plastik deformasyonlar oluşturmaları ve bu sebeple deformasyon esnasında malzemede sertlik ve mukavemet değerlerinin yükselmesi pekleşme olarak tanımlanır. Ayrıca pekleşme durumu Şekil 3.2’de görülen akma yüzeyinin yükleme etkisi altında boyutunun değişmesi ile de açıklanabilir. Şekil 3.12’te tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği gösterilmiştir. Şekilde gösterilen 1 noktası malzemenin elastik ve akma dayanımı sınırını temsil eder. Malzeme, yük etkisinde bu sınırın üstüne çıkarsa yükleme kaldırıldığında plastik deformasyona uğrar. Yükleme tekrar uygulandığında malzemenin dayanımı 2 noktasına çıkarak mukavemeti artar ve malzeme pekleşme davranışı sergiler.



Şekil 3.12. Tipik gerilme-şekil değiştirme grafiği.

Pekleşme davranışı malzemenin plastik deformasyon talebini belirlemek için dikkate alınması gereken önemli bir unsurdur. Çelik bir malzemede yük etkisi altında dislokasyonlar oluşur. Dislokasyonlar, kararlı bir davranış sergileyen kristal yapıların atomsal dizilişlerinde meydana gelen kusurlardır. Yükleme ortadan kaldırıldığında bu tanecikli yapıda herhangi bir değişim gözlemlenmez ve oluşan dislokasyonlar malzemenin akma dayanımını artırır. Ancak malzeme üzerinde ters yönde gerilim uygulandığında akma dayanımının düştüğü gözlemlenir. Akma dayanımının düşme sebebi ilk yüklemeden kaynaklı oluşan dislokasyonların ters yöndeki yüklemeden kaynaklı hareketinde herhangi bir engelle karşılaşmamasıdır. Bu sebeple dislokasyonların ters yönde hareket etmeleri elastik bir malzemeye kıyasla daha kolay gerçekleşmektedir. Gerilim yönüne bağlı olarak meydana gelen bu davranışa Bauschinger etkisi nedir. Pekleşme davranışı Şekil 3.13'te görüldüğü üzere farklı türde yaklaşımlarda temsil edilebilir.

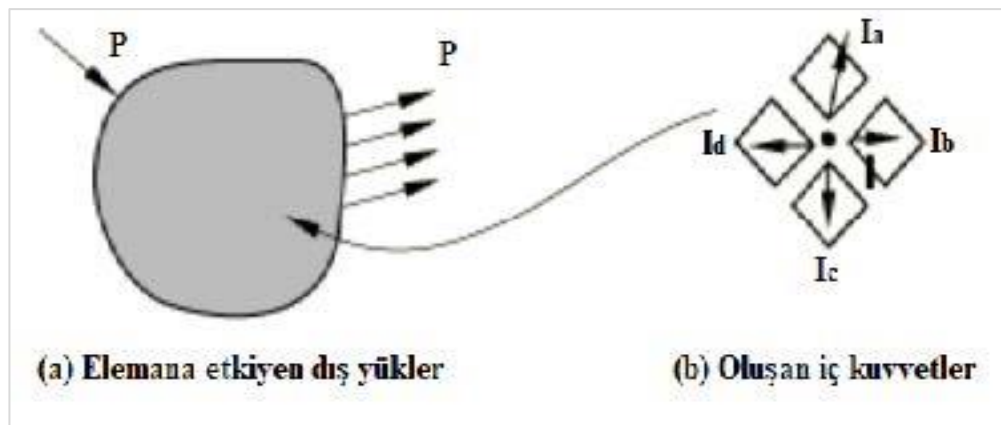


Şekil 3.13. Malzeme pekleşme davranışları.

İzotropik pekleşme davranışında, numunelerde plastik deformasyonlar artarken başlangıç akma yüzeyi tüm doğrultularda aynı miktarda artarak genişlemektedir. Şekil değiştirmelerin görece daha büyük ve yüklemenin orantılı olduğu tasarımlarda kullanılabilir. Ancak bu yaklaşım deprem etkisi gibi çevrimsel yüklemeler altında akma yüzeyinde meydana gelebilecek hareketleri tam olarak temsil edemez. Kinematik pekleşme durumunda başlangıçtaki akma yüzeyi ile sonraki akma yüzeyinin formu eşittir ancak farklı konumlanmaktadır. Bu yaklaşım izotropik pekleşme davranışının aksine daha küçük şekil değiştirmelerin olduğu çevrimsel yükleme etkisi altındaki tasarımlarda kullanılabilir. Bu iki yaklaşımı birlikte değerlendirebilmek için çevrimsel yüklemeler altında bu pekleşme davranışlarının birleşimi olan birleşik pekleşme yaklaşımı kullanılabilir.

Doğrusal olmayan analiz

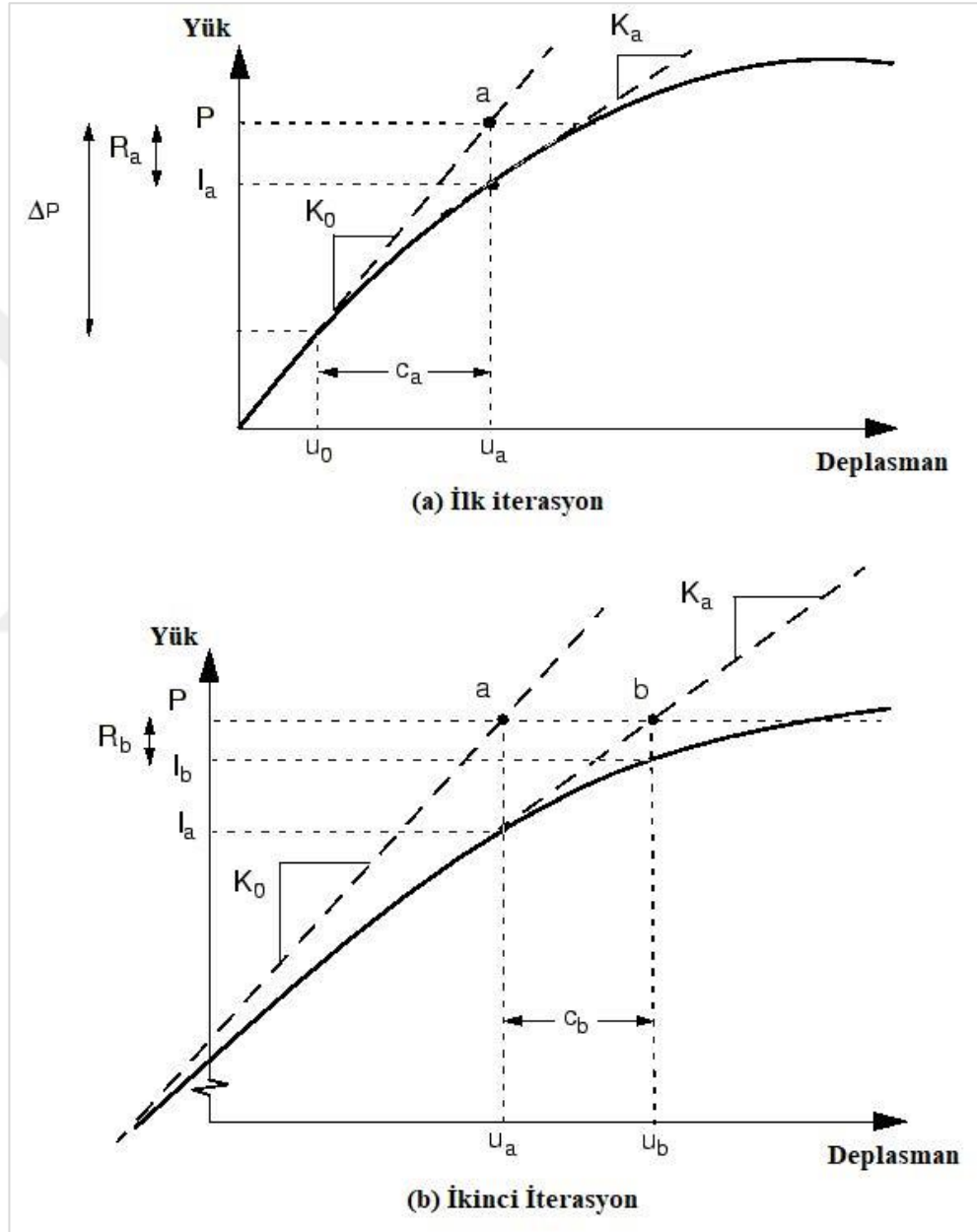
Doğrusal olmayan analizlerin temel amacı davranışı belirlemektir. Bu davranışı belirlemek için yapılan yükleme zamanının bir fonksiyonu cinsinden oluşturulur doğrusal olmayan analiz çözümünü elde edebilmek için zaman arttırımı yapılır. Çünkü doğrusal olmayan analizlerde çözüm, doğrusal analizlerde olduğu gibi tek bir doğrusal denklem sistemi çözülerek hesaplanmamaktadır. ABAQUS programı doğrusal olmayan analizlerin çözümünde Newton-Raphson metodunu kullanmaktadır.



Şekil 3.14. Cisim üzerindeki dış yükler ve iç kuvvetler

Newton-Raphson metodunda sistemin denge koşulunun sağlanması için elemana etkiyen dış yüklerin meydana gelen iç kuvvetlerle eşit olması gerekir (Şekil 3.14). İlk

olarak modele ufak artımlar ile kuvvet uygulanır. Modelin başlangıç rijitliğinden yola çıkılarak ilk yük artımından kaynaklı dış yük etkisi altındaki deplasmanı elde edilir. Bu deplasman değerleri ile cisimde oluşan iç kuvvetler belirlenir. Elde edilen iç kuvvetler ile uygulanan dış yükler arasındaki fark karşılaştırıldığında sonuç ABAQUS programının belirlediği toleranslar içindeyse iterasyon sona erer ve ikinci yük artımı gerçekleştirilir.



Şekil 3.15. Newton raphson yöntemi

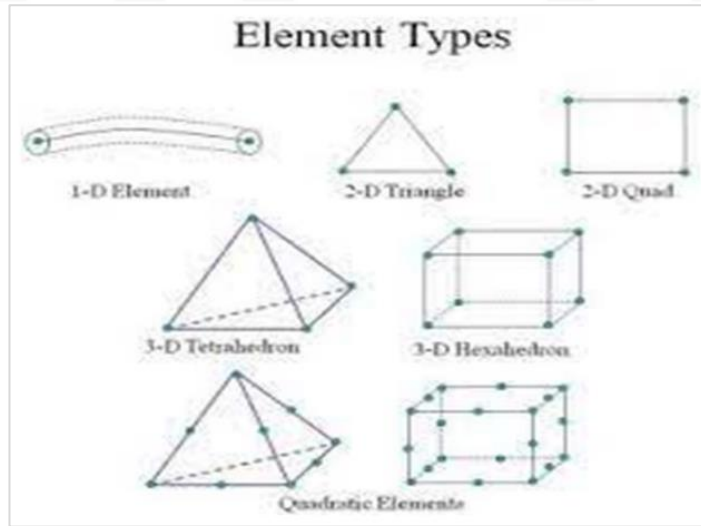
Cisme etkiyen dış yükler ile iç kuvvetler arasındaki fark belirlenen sınırların dışında kalıyorsa Şekil 3.15’da görüldüğü üzere rijitlik matrisi yenilenerek ikinci bir iterasyon yapılır. Sistem üzerinde denge koşulu sağlanana kadar iterasyonlara devam

edilir. Kuvvetler arasındaki fark belirlenen koşulu sağladığında kuvvet artımı yapılarak benzer işlemlere devam edilir. Araştırma kapsamında yapılan çalışmalarda da itme ve tekrarlı yükler altındaki analizlerde bu davranış yöntemi benimsenmiştir.

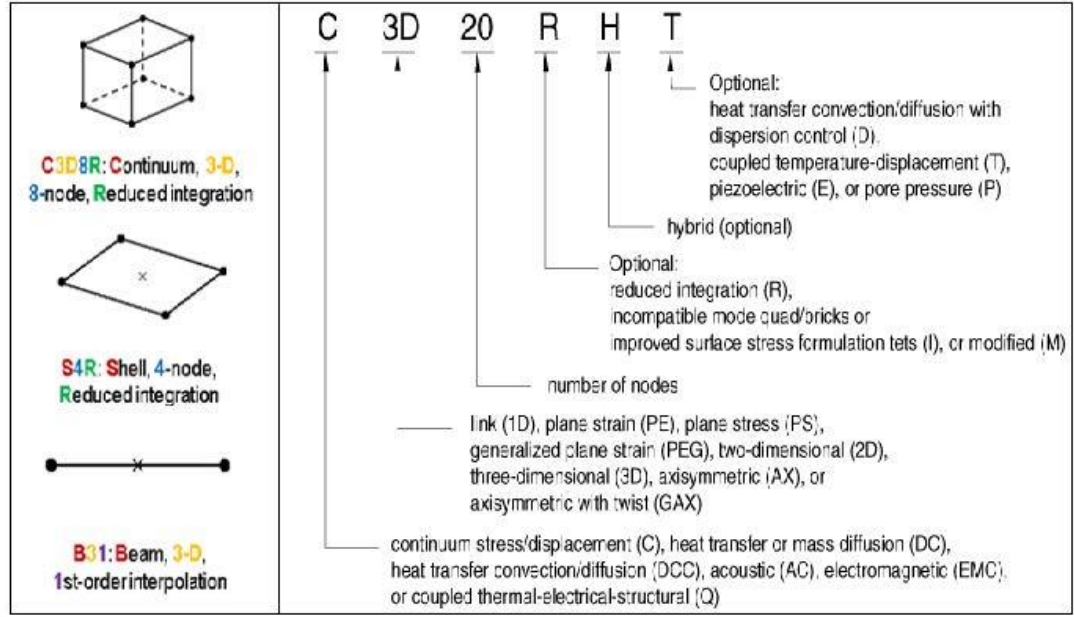
3.4.2. Eleman Özellikleri

ABAQUS, farklı geometrilere sahip sistemler ve analiz tipleri için geniş bir eleman çeşitliliğine sahiptir. Şekil 3.16'de yaygın olarak kullanılan eleman tipleri gösterilmiştir. Bir elemanın karakteristik özelliklerini aşağıdaki parametreler belirler.

- Eleman Ailesi: Katı, Kabuk, Membran, Çubuk vb.
- Düğüm Noktası Sayısı: Elemanın şekline ve interpolasyon durumuna bağlıdır.
- Düğüm Noktasındaki Serbestlik Derecesi: Analizlerin (Deplasman, Dönme, Sıcaklık vb) çözüm alanına bağlı olarak model boyutuna göre (1D, 2D, 3D) değişir.
- İntegrasyon: İndirgenmiş ve tam integrasyon yöntemi.



Şekil 3.16. Yaygın olarak kullanılan eleman ailesi.



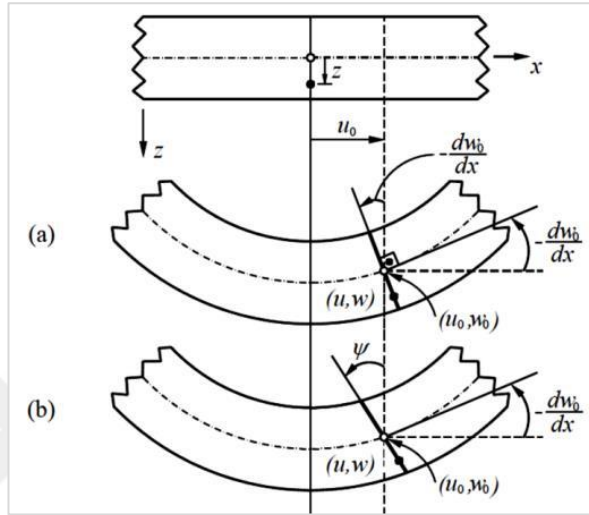
Şekil 3.17. ABAQUS örnek eleman tipleri ve isimlendirme koşulları

ABAQUS programında her bir elemanın isimlendirilmesi o elemanın karakteristik özelliklerine sınıflandırılmıştır. Örneğin S4R ismine sahip bir elemanda S ifadesi eleman tipini, 4 ifadesi düğüm noktası sayısını ve R ifadesi integrasyon durumunu simgeler. İsimlendirmeler ile ilgili detaylı bilgiler Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Tasarımı yapılan sistemlerde eleman seçimi yapılırken sonlu elemanlar analizinin teorisi ve uygulaması hakkında bilgi sahibi olunması gereklidir.

Kiriş ve Çubuk Eleman Tipi

Kiriş eleman tipi üç boyutlu bir elemanın bir boyuta indirgenmesi ile oluşur ve elemanın enine kesit uzunluğunun aksel doğrultudaki uzunluğundan çok daha kısa olması durumunda kullanılır. Geometrilerinin basit olması ve serbestlik derecesinin diğer eleman tiplerine kıyasla görece daha az olması en belirgin avantajıdır. ABAQUS’te kullanılan kiriş teorilerinden biri Euler-Bernoulli kiriş teorisidir. Bu teoride başlangıçta kiriş eksenine ve düzleme dik olan kesitin eğilme etkisi altında da benzer durumda olduğu kabul edilir (Şekil 3.18a). Timoshenko kiriş teorisinde ise eğilme etkisi altında kesitin düzleme dik olduğu ancak kiriş eksenine dik olmadığı görülür (Şekil 3.18b). Daha kapsamlı olan Timoshenko teorisinde, elemandaki malzeme kaynaklı deplasmanlar, düşey kuvvetlerden dolayı kayma gerilmeleri ve kayma şekil değiştirmeleri dikkate alınır. Bu sebeple bu teori Euler-Bernoulli kiriş teorisine göre özellikle kalınlığın arttığı

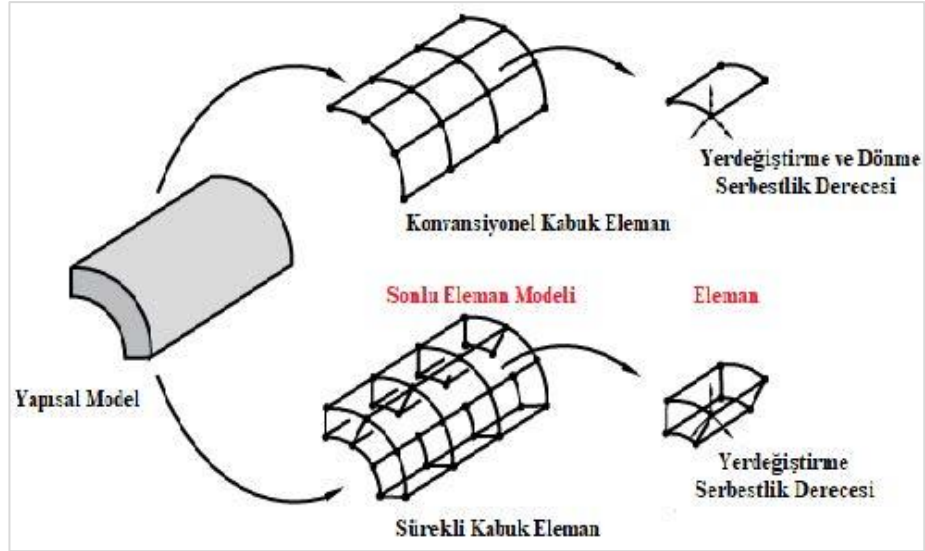
kirişlerde gerçeğe daha yakın sonuçlar vermektedir. Kiriş kalınlığı incelendiğinde ise sonuçlar birbirine yakınlaşmaktadır. ABAQUS programında en yaygın kullanılan kirişler B31 (Doğrusal Kayma Deformasyonu) ve B32 (Kuadratik Kayma Deformasyonu) kiriş elemanlarıdır. Çubuk elemanlar ise sadece çekme ve basınç yüklemelerine maruz kalmaktadır.



Şekil 3.18. Euler-Bernoulli ve Timoshenko kirişlerinin davranışları.

Kabuk Eleman Tipi

ABAQUS programında kabuk elemanlar, bir boyutun (kalınlık) diğer iki boyut ile arasında çok büyük fark olduğu durumlarda kullanılır. Kabuk elemanlarda kalınlık boyunca oluşan gerilmeler göz ardı edilir. Program içerisinde konvansiyonel ve sürekli olmak üzere iki farklı kabuk eleman modellemesi yapılabilir. Konvansiyel kabuk eleman tipinde elemanlar Şekil 3.19’da görüldüğü gibi geometri, referans yüzeyleri düğüm noktalarına ayırarak oluşturulur ve kalınlık kesit özelliklerinden tanımlanır. Bu tip geometriler özellikle ince cidarlı modellerde iyi bir performans gösterirler. Çözüm algoritması bu eleman tipi ile benzer olan sürekli kabuk elemanlar ise model içerisinde kontakların sık olduğu durumlarda daha çok tercih edilir. Geometri üç boyutlu parça vasıtasıyla yüzeylere ayırarak oluşturulur. Kalınlık düğüm noktaları yoluyla tanımlanır.

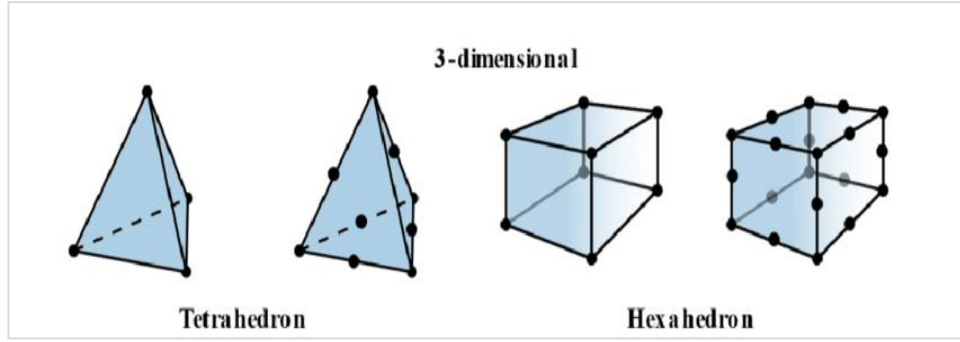


Şekil 3.19. Konvansiyonel ve sürekli kabuk eleman karşılaştırılması.

Konvansiyonel kabuk elemanlar yer değiştirme ve dönme serbestlik derecesine sahipken sürekli kabuk elemanlar sadece yer değiştirme serbestlik derecesine sahiptir. Model üzerinde büyük şekil değiştirmelerin oluşabileceği durumlarda bazı konvansiyonel kabuk elemanlar (S4R, S3R, SAX1) tercih edilir. Örneğin S4R, genel amaçlı uygulamalarda kullanılmak için elverişli bir elemandır. S3R, kayma deformasyonlarına maruz kalan üçgen şeklindeki elemandır. Bu elemanın özellikle eğimli yüzeylerde modellenmesi tercih edilmemektedir. Görece daha küçük şekil değiştirmelerin oluşabileceği durumlarda ise S4RS, S4RSW ve S3RS tipi konvansiyonel elemanlar tercih edilebilir.

Katı Eleman Tipi

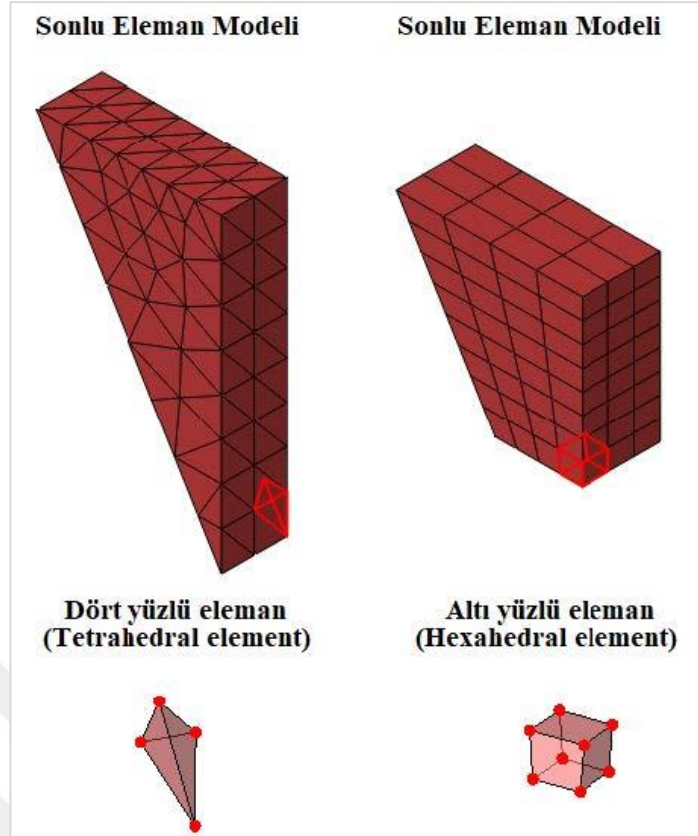
ABAQUS programında tasarım ihtiyacına bağlı olarak kullanılabilen çok sayıda katı eleman tipi mevcuttur. Katı elemanlar hem doğrusal analizlerde hem de plastisitenin, büyük şekil değiştirmelerin ve kontakların olduğu karmaşık modellerin doğrusal olmayan analizlerinde kullanılabilir. Ayrıca gerilim, akustik, ısı transferi, piezoelektrik, elektromanyetik içeren analizler içinde kullanılabilir. Üçgen ve dörtgen şeklindeki elemanlar iki boyutlu katı modellerinde kullanılırken dört yüzeyli ve altı yüzeyli elemanlar üç boyutlu katı modellemelerde yaygınca kullanılır. Katı eleman modellenmesinde tasarımı zorlaştırmasına rağmen gerçeğe daha yakın sonuçlar elde edilebilmesi için dörtgen ve altı yüzlü elemanların tercih edilmesi gereklidir.



Şekil 3.20. Katı eleman tipleri

Şekil 3.20’de farklı tipteki katı elemanlar gösterilmiştir. Bir katı elemanda düğüm noktaları sadece köşelerde ise bu elemanlara birinci derece (doğrusal) elemanlar denir. Düğüm noktalarının hem köşelerde hem de orta bölümde olduğu elemanlara ise ikinci derece (kuadratik) elemanlar denir. Tasarımı yapılan bir modelde düğüm noktasına bağlı olarak sonlu eleman ağı yapısı ne kadar çok ise analiz süresi de bir o kadar yüksektir. Bu sebeple büyük sistem modellemelerinde analiz sürelerini kısaltabilmek için doğrusal elemanlar (C3D8 vb.) kullanılabilir.

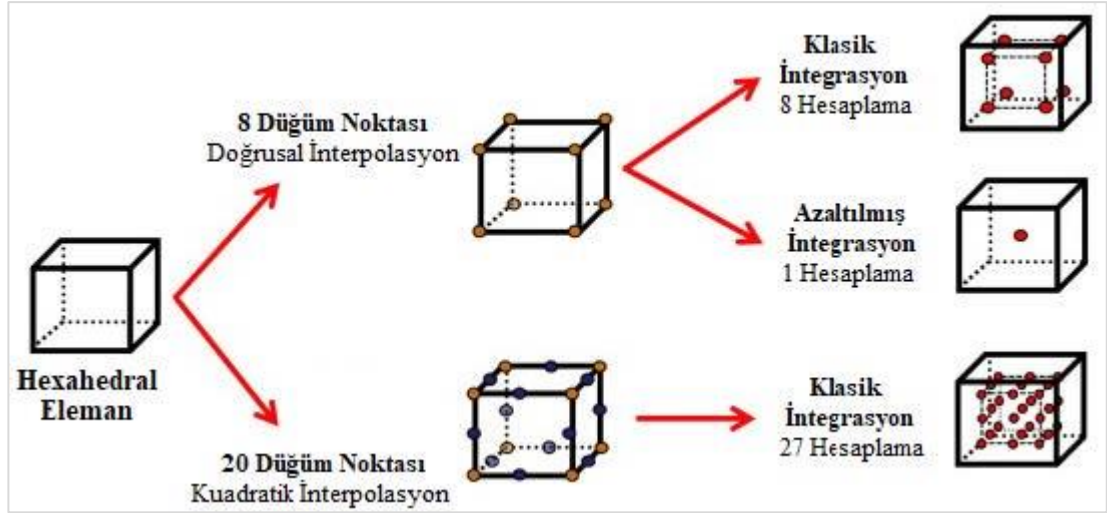
Şekil 3.21’de sonlu eleman modellerine ait dört yüzlü (tetrahedral) ve altı yüzlü (hexahedral) elemanlar gösterilmiştir. Kompleks modellemelerde sonlu eleman ağı yapısını daha kolay oluşturabilmek için tetrahedral elemanlar kullanılabilir. Ancak rijit yapıları sebebiyle yapısal analizlerde kullanılması tavsiye edilmez. Büyük deplasmanların ve çok sayıda kontakların bulunduğu modellerde modifiye edilmiş ikinci dereceden tetrahedral elemanlar kullanılabilir. Hexahedral elemanların kullanıldığı modellerde analiz süresi daha kısadır ve tetrahedral elemanlara göre eğilme ve kayma durumlarında sayısal sonuçlara daha yakın değerler elde edilir.



Şekil 3.21. Tetrahedral ve hexahedral elemanlar.

3.4.3. Katı eleman tipinde integrasyon yöntemi

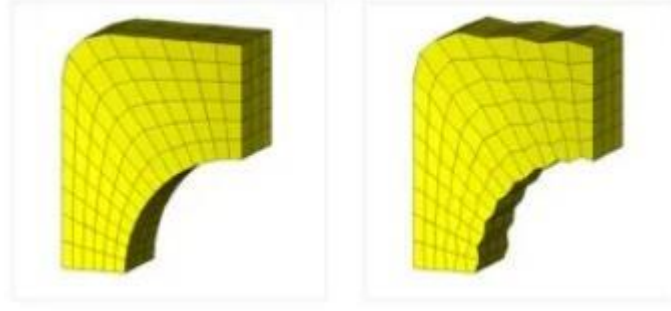
Çok basit geometriler dışında, sonlu elemanlar analizinde elemanın rijitliği ve kütlesi sayısal integrasyon yöntemi ile hesaplanır. ABAQUS programında çok sayıda eleman için Gauss tümlevi metodu kullanılır. Modeller üzerinde integrasyon tipinin farklılığı hem analiz sonuçlarını hem de analiz süresini etkilemektedir. Programda iki farklı integrasyon yöntemi mevcuttur. Azaltılmış integrasyon yöntemine sahip elemanlar 'R' ile gösterilir. Azaltılmış ve tam integrasyon yöntemleri, rijitlik matrisi formülasyonunda kullanılan integrasyonun doğruluğu ile ilgilidir. İntegrasyon noktalarının sayısı bu formülasyonun doğruluğunu belirler. Tam integrasyon yönteminde rijitlik matrisi tüm Gauss noktalarında hesaplanır. İndirgenmiş integrasyon yönteminde ise hesaplamaları basitleştirmek için formülasyondaki yüksek dereceli terimler göz ardı edilir ve bu durum belirli bir derecede doğru sonuçtan uzaklaşılmasına sebep olur.



Şekil 3.22. Eleman üzerinde tam integrasyon ve azaltılmış integrasyon gösterimi

Şekil 3.22’te elemanların her iki integrasyon yöntemine ait gösterimleri mevcuttur. Örneğin C3D8 elemanında C3D8R elemanından 8 kat fazla integrasyon noktası olduğu için analiz süresi de bununla doğru orantılı olarak kısalmaktadır. Eğilme davranışının model üzerinde belirleyici olduğu durumlarda tam integrasyon yönteminin kullanılması, analiz sonuçlarında sayısal sonuçlardan daha küçük değerler elde edilmesine sebep olabilir. Bu durum doğrusal elemanlarda gerçekte olmayan kayma deformasyonlarını (shear locking) meydana getirir. Bu sebeple eğilmenin etkili olduğu analizlerde azaltılmış integrasyon yöntemi kullanılması tavsiye edilir. Ancak bu integrasyon yöntemi kullanılırken dikkat edilmesi gereken durumlar vardır. Bu yöntemle sahip doğrusal elemanlar çok esnekler ve bu sebeple kum saati (hourglassing) adı verilen probleme sebep olabilirler. Hourglass durumu eleman üzerinde herhangi bir gerilme veya şekil değiştirme oluşturmaz ancak analiz sonucunu etkileyebilen fiziksel olmayan bir durumdur. İndirgenmiş integrasyon yöntemine sahip elemanlar bu duruma karşı daha duyarlıdır. Tetrahedral elemanlar hourglass kaynaklı hatalardan etkilenmemektedir.

Hourglass durumlarında elemanın bu şekildeki deformasyonu sebebi ile şekil değiştirme enerjisi üretilmediğinden, eleman bu duruma karşı rijit bir davranış sergileyemez. Bu sebeple özellikle büyük boyutlu elemanların kullanıldığı modellerde bu durum sonlu eleman ağı yapısında yayılarak anlamsız sonuçlar üretebilir. Şekil 3.23’te hourglass etkisi net bir şekilde görülmektedir. Bu durumun önüne geçebilmek için tam integrasyonlu elemanlar veya daha küçük boyutlu elemanlar kullanılabilir.

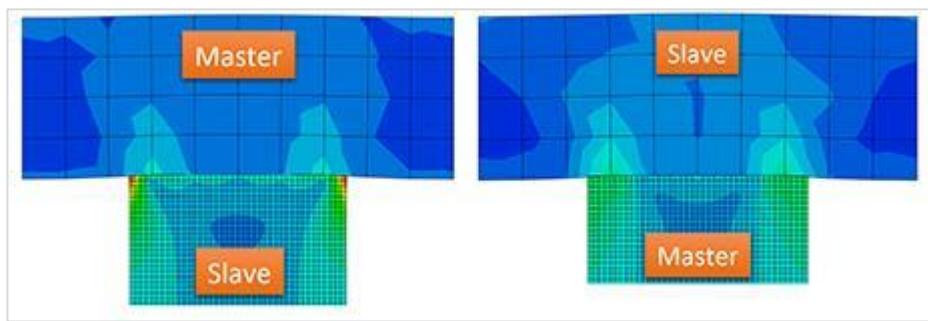


Şekil 3.23. Model üzerinde hourglass etkisi

3.4.4. Eleman yüzeyleri arasındaki etkileşim

Yüzey-Yüzey Etkileşimi

Tasarımı yapılan elemanlar arasında etkileşimi sağlayabilmek için ABAQUS programında yüzey tanımlaması yapılmaktadır. Yüzey tipleri ‘master surface’ ve ‘slave surface’ olarak ikiye ayrılır. Kesin bir kural olmamakla birlikte, genellikle esas yüzeye (master surface) sahip eleman daha rijittir ve Şekil 3.24’da görüldüğü gibi sonlu eleman ağı yapısı daha büyük iken tamamlayıcı yüzeyde (slave surface) ise sonlu eleman ağı daha küçüktür. Tamamlayıcı yüzeylerde sonlu eleman ağının daha küçük olmasının sebebi, bu bölümlerde rijitliğin daha az olmasından dolayı analiz sonucunda gerilme, şekil değiştirme vb. durumları daha gerçekçi olarak gözlemleyebilmektir.

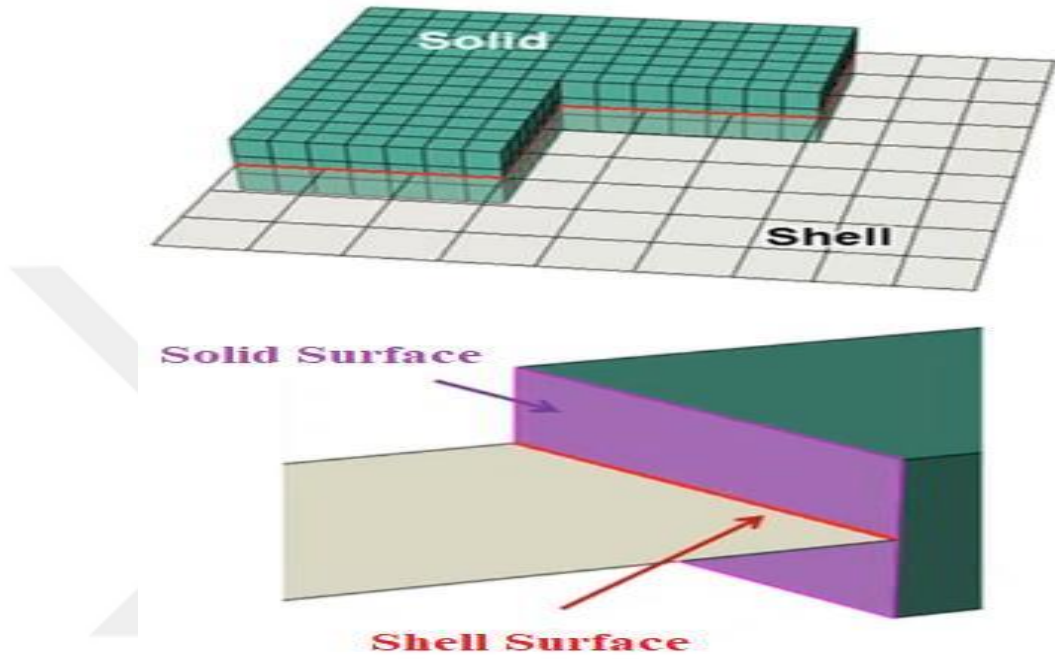


Şekil 3.24. Yüzey tipinin etkileşim üzerindeki etkisi

Kabuk Yüzey-Katı Yüzey Etkileşimi

ABAQUS programında kabuk yüzey-katı yüzey etkileşimi, kabuk elemanları katı elemanlara bağlayabilmek için kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte düğüm noktalarını

birbirine basitçe bağlamak yerine her bir kabuk elemanın düğüm noktasındaki yer değiştirme ve dönmeyi, kabuk eleman çevresindeki katı eleman yüzeyinin ortalama yer değiştirme ve dönmesiyle eşleştirir. Bu tür bağlantılarda kabuk ve katı eleman arasındaki çok iyi gerilim ve deplasman sürekliliği oluşur. Şekil 3.25’de sonlu eleman modellerinde kabuk yüzey-katı yüzey etkileşimi görülmektedir.



Şekil 3.25. Kabuk yüzey-katı yüzey etkileşimi

3.5. Validasyon Modeli

Bu validasyon modeli Akduman, S (2022) çalışması baz alınarak ve o çalışmada kullanılan malzeme özellikleri termal özellikleri dikkate alınarak geliştirilmiştir. Termal özellikler olarak çeliğin özgül ısı değerleri, ısı iletkenlik ve yoğunlukları aşağıda sunulmuştur.

Çizelge 3.8. Malzeme mekanik özellikleri

	Akma (MPa)	Kopma (MPa)	Elstisite Modülü (MPa)	Poisson Oranı
S235 (Korniyer ve levhalar)	235	360	200.000	0,3
Grade 8.8 (Bulonlar)	640	800	200.000	0,3
Kiriş	251	391	200.000	0,3
Kolon	351	450	200.000	0,3

3. MATERYAL ve YÖNTEM

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Edit Material' dialog box for material Prop_HEB180. The left window shows the 'Plastic' behavior selected, and the right window shows the 'Elastic' behavior selected.

Left Window (Plastic Behavior):

- Name: Prop_HEB180
- Description: [Empty]
- Material Behaviors: Density, Elastic, Plastic (selected)
- General tab selected.
- Plastic section:
 - ☐ Use scale stress value: [Empty]
 - Hardenings: Isotropic
 - Extrapolation: Constant
 - ☐ Use strain-rate-dependent data
 - ☐ Use temperature-dependent data
 - Number of field variables: 0
- Data table:

	Yield Stress	Plastic Strain
1	351	0
2	450	0.18

Right Window (Elastic Behavior):

- Name: Prop_HEB180
- Description: [Empty]
- Material Behaviors: Density, Elastic (selected), Plastic
- General tab selected.
- Elastic section:
 - Type: Isotropic
 - ☐ Use temperature-dependent data
 - Number of field variables: 0
 - Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term
 - ☐ No compression
 - ☐ No tension
- Data table:

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	200000000000	0.3

Şekil 3.26. HEB280 malzeme özellikleri tanımlaması

The image shows two side-by-side screenshots of the 'Edit Material' dialog box for material Prop_S235. The left window shows the 'Plastic' behavior selected, and the right window shows the 'Elastic' behavior selected.

Left Window (Plastic Behavior):

- Name: Prop_S235
- Description: [Empty]
- Material Behaviors: Density, Elastic, Plastic (selected)
- General tab selected.
- Plastic section:
 - ☐ Use scale stress value: [Empty]
 - Hardenings: Isotropic
 - Extrapolation: Constant
 - ☐ Use strain-rate-dependent data
 - ☐ Use temperature-dependent data
 - Number of field variables: 0
- Data table:

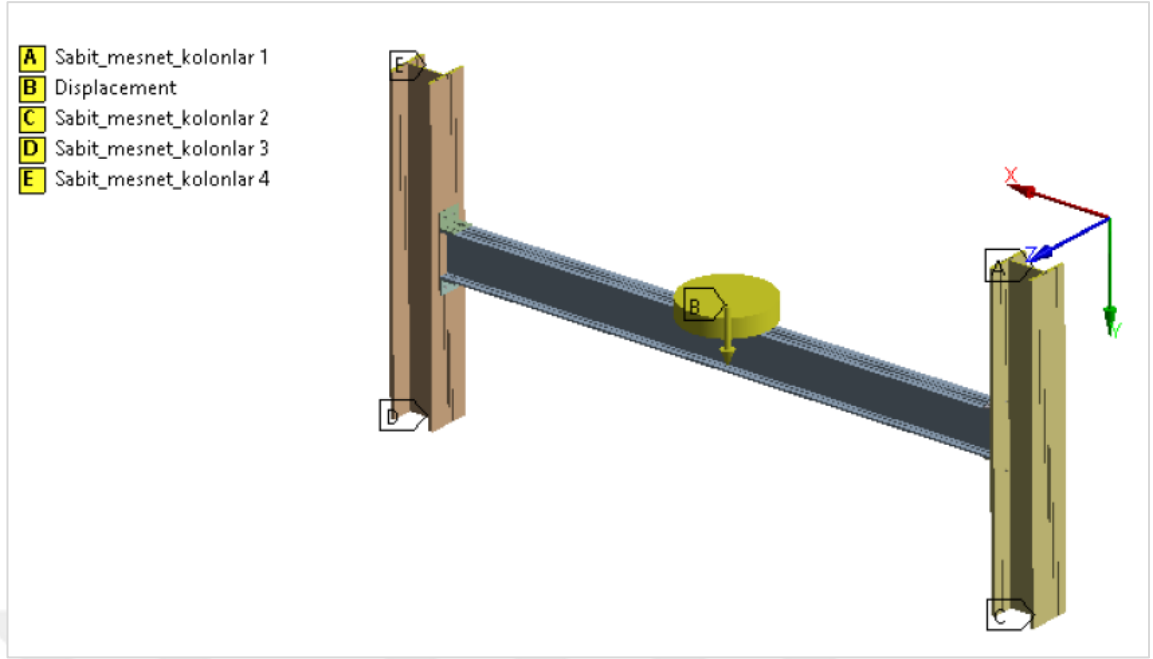
	Yield Stress	Plastic Strain
1	235	0
2	360	0.18

Right Window (Elastic Behavior):

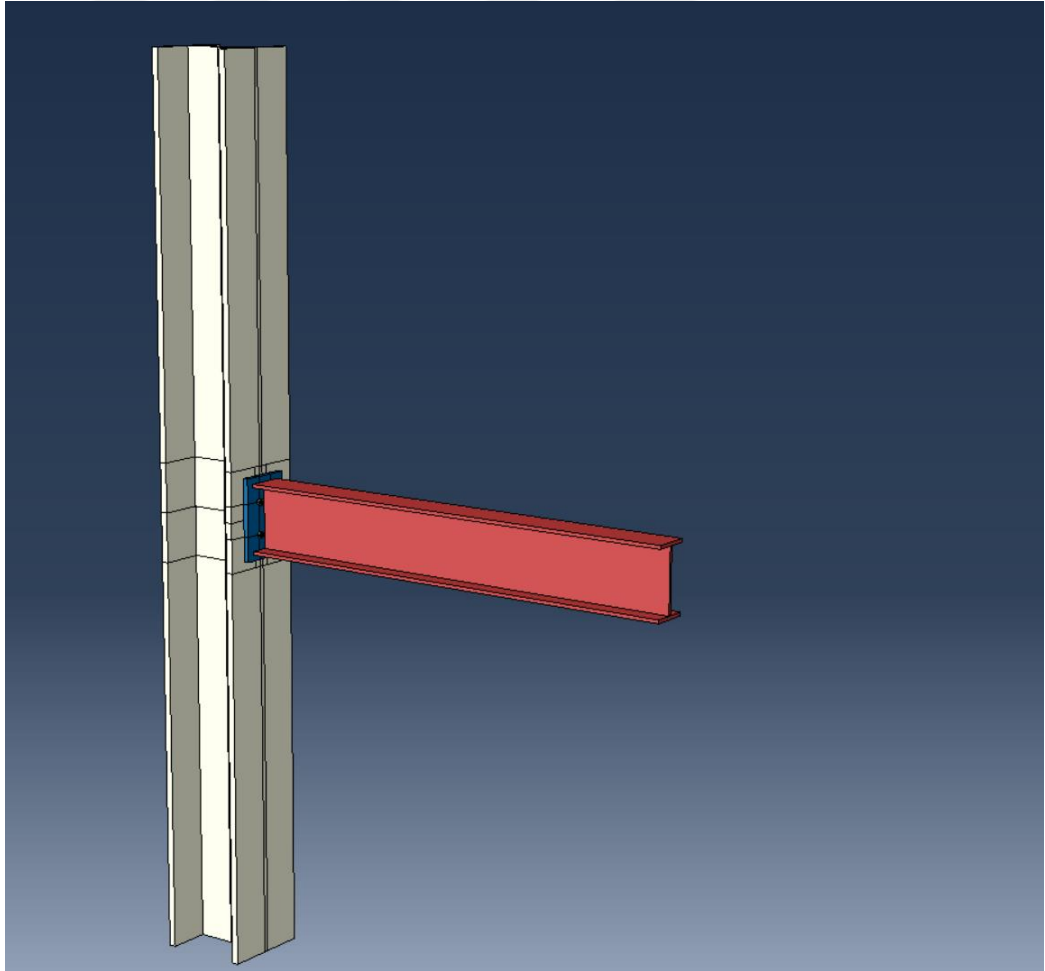
- Name: Prop_S235
- Description: [Empty]
- Material Behaviors: Density, Elastic (selected), Plastic
- General tab selected.
- Elastic section:
 - Type: Isotropic
 - ☐ Use temperature-dependent data
 - Number of field variables: 0
 - Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term
 - ☐ No compression
 - ☐ No tension
- Data table:

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	200000000000	0.3

Şekil 3.27. Plaka malzeme özellikleri tanımlaması



Şekil 3.28. Validasyon model görüntüsü



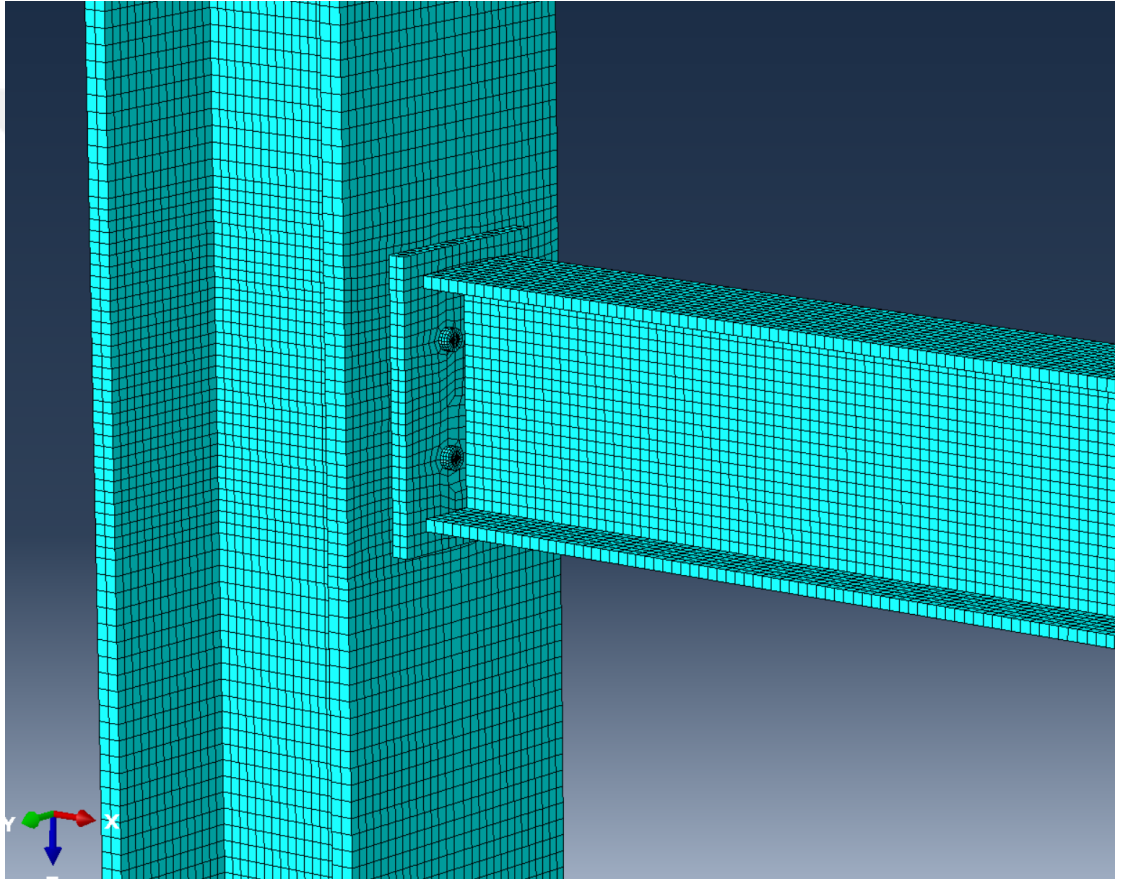
Şekil 3.29. Oluşturulan validsyon model görüntüsü

3. MATERYAL ve YÖNTEM

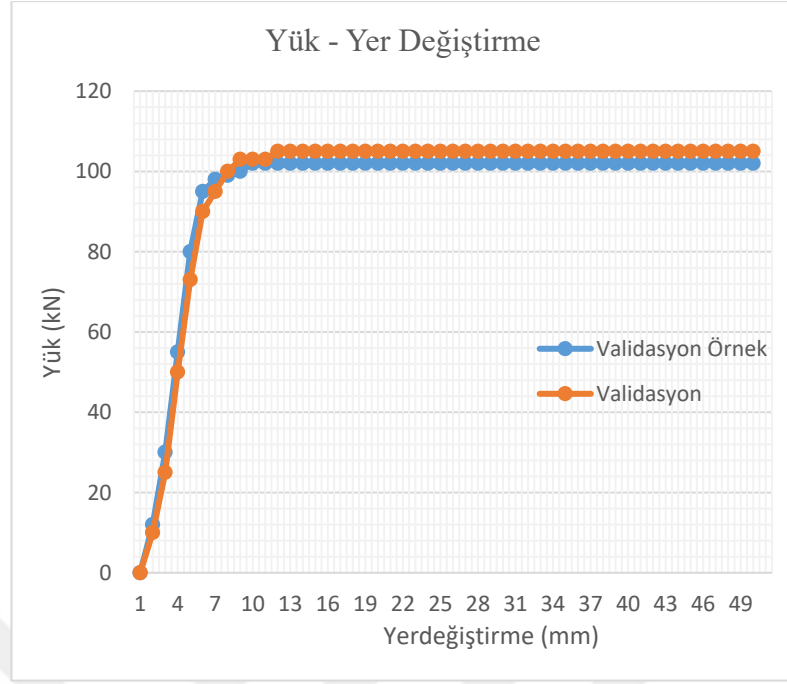
Validasyon modeli simetrik olduğu için yarısı modellenerek çalışmalara devam edilmiştir.

Bulon önçekme kuvveti 16.085 N olarak verilmiş kiriş uç noktasından 40,60 mm düşey yer değiştirme yük olarak verilmiştir. Örnek Modelde kiriş 102 kN yük almıştır.

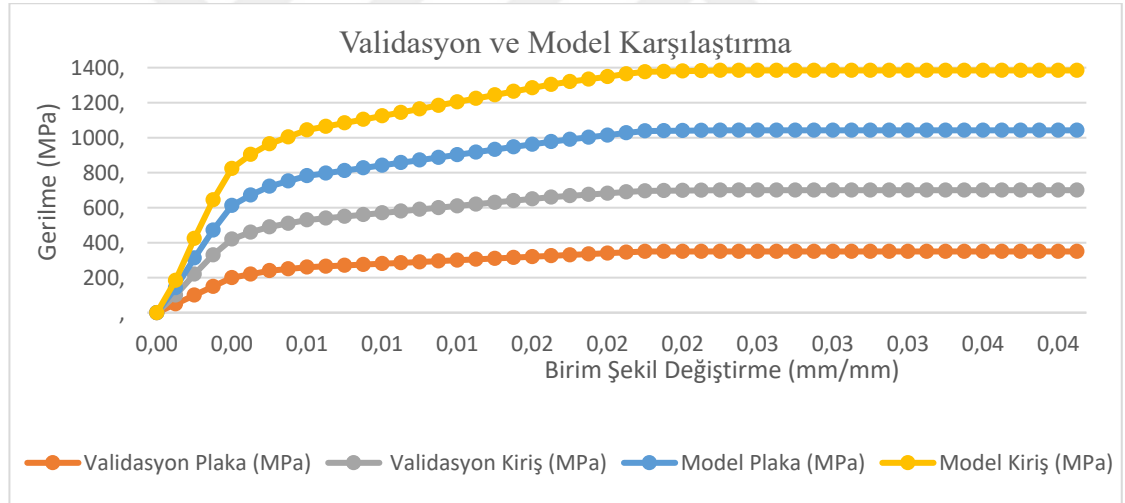
Ağ yapısı olarak plakada 5 mm, kolon ve kirişte ise birleşim bölgelerinde 5mm, birleşim bölgelerinden uzak yerlerde 10 mm olarak seçilmiştir.



Şekil 3.30. Ağ yapısı görüntüsü



Şekil 3.31. Validasyon modeli yük yer değiştirme karşılaştırması



Şekil 3.32. Validasyon modeli birim şekil değiştirme karşılaştırması

3.6. Sonlu Eleman Modelleri

Çalışmada ilk olarak birleşimde kullanılacak olan levhaların enkesit özellikleri ve bulon delik mesafeleri belirlenmiştir. Detayların tasarımı ise TÇYHTY'e göre yapılmıştır. Birleşim modellerinin davranışını ortaya koyabilmek için kolon enkesiti büyük seçilmiş, böylece deney sırasında kirişlerin birleşimlerden ayrılması planlanmıştır. Çalışmada 3 adet farklı boya kalınlığı ve 3 adet farklı yangın yüklemesi olacak şekilde modeller hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında model isimlendirmeleri M-1-1.4-ISO

3. MATERYAL ve YÖNTEM

şeklinde yapılmıştır. M-1 model numarasını, 1,4 intümesan boya kalınlığını, ISO ise yangın yüklemeye tipini belirtmektedir. Model isimlendirmeleri Çizelge 3.9 de gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Sonlu eleman modelleri isimlendirmeleri

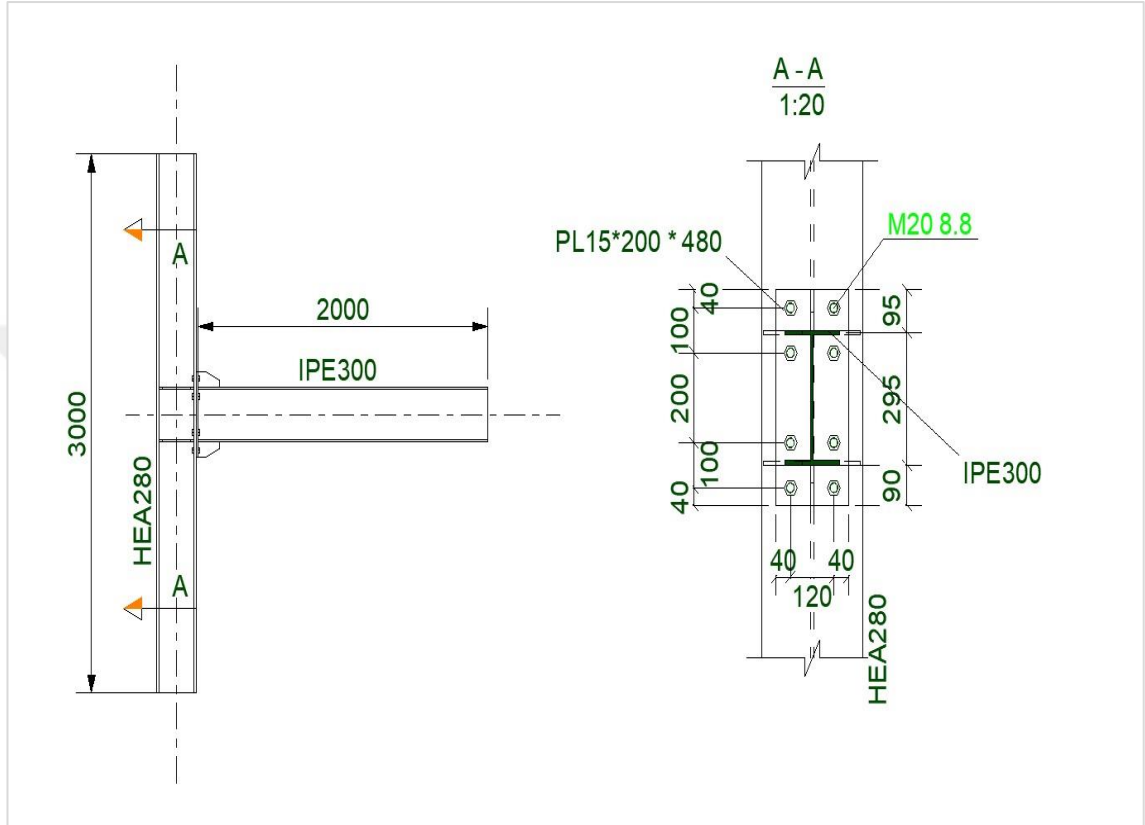
Model No	İntümesanBoya Kalınlığı	Yangın Tipi
M-1-0.8-ISO	0.8	ISO 834
M-1-0.8-SML	0.8	Smouldering (için için yanan)
M-1-0.8-HYD	0.8	Hidrokarbon
M-1-1.4-ISO	1.4	ISO 834
M-1-1.4- SML	1.4	Smouldering (için için yanan)
M-1-1.4-HYD	1.4	Hidrokarbon
M-1-2-ISO	2.0	ISO 834
M-1-2- SML	2.0	Smouldering (için için yanan)
M-1-2-HYD	2.0	Hidrokarbon
M-1-WOP-ISO	Boyasız	ISO 834
M-1- WOP - SML	Boyasız	Smouldering (için için yanan)
M-1- WOP -HYD	Boyasız	Hidrokarbon
M-2-0.8-ISO	0.8	ISO 834
M-2-0.8-SML	0.8	Smouldering (için için yanan)
M-2-0.8-HYD	0.8	Hidrokarbon
M-2-1.4-ISO	1.4	ISO 834
M-2-1.4- SML	1.4	Smouldering (için için yanan)
M-2-1.4-HYD	1.4	Hidrokarbon
M-2-2-ISO	2.0	ISO 834
M-1-2- SML	2.0	Smouldering (için için yanan)
M-2-2-HYD	2.0	Hidrokarbon
M-2-WOP-ISO	Boyasız	ISO 834
M-2- WOP - SML	Boyasız	Smouldering (için için yanan)
M-2- WOP -HYD	Boyasız	Hidrokarbon

Modelde kullanılan bütün elemanlar S275 kalite çelik olarak belirlenmiştir. Kolonlar HEA280, kiriş kesitleri IPE300, birleşim bulonları ise Grade 8.8 ve M20 çapında seçilmiştir. Plaka boyutlandırması yapılırken bulon delikleri arasındaki mesafeler ve plaka kenarına olan mesafeleri yönetmelik koşulları gözetilerek seçilmiştir.

Model 1

Sonlu eleman modelinde kolon HEA280 kiriş profili IPE300 olarak seçilmiştir. Birleşim plakası 15*200*480 mm olarak seçilmiş bağlantı bulonları M20 grade 8.8 olarak

belirlenmiştir. 1 modelde birleşim plakası kiriş derinliğinden büyük olarak tasarlanmıştır. Ayrıca kiriş ve plakanın birleştiği noktada kirişe rijitleştirici plakalar kaynatılarak ve kolon flanşları arasında süreklilik plakaları kaynatılarak birleşimin rijit bir birleşim olması amaçlanmıştır. Şekil. 3.34



Şekil 3.33. Model 1 çizimleri

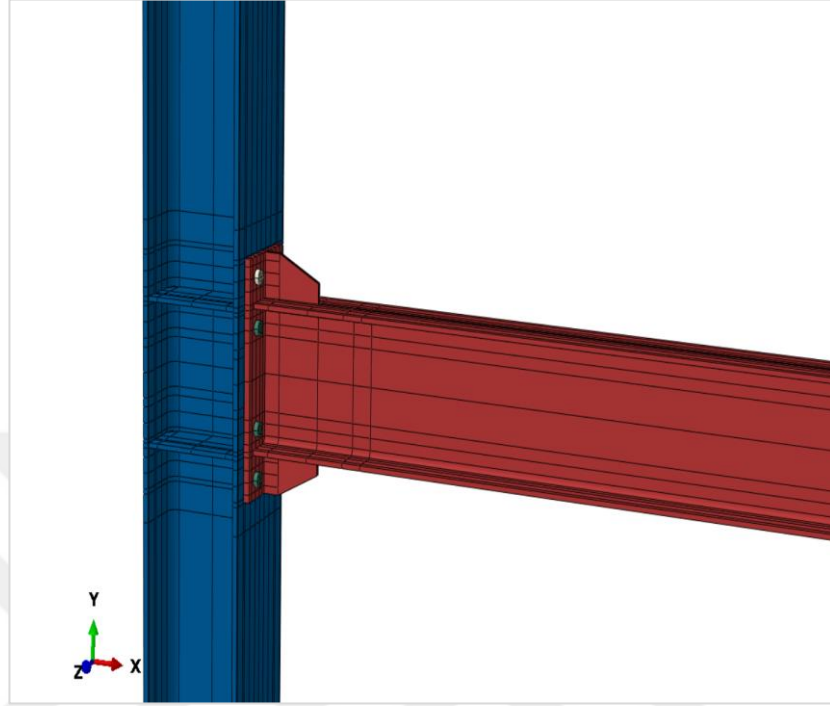
ABAQUS programında yapısal modeli tanımlayabilmek için; ilk önce birleşen profillerin geometrileri oluşturulur, sonra malzeme modelleri, sonra parçalar arasındaki temas durumları, daha sonra model sonlu eleman ağı oluşturulur, en son dış kuvvetler ve sınır şartları tanımlanarak model çözüme geçilir. Aşağıda Model 1'e ait matematiksel modelin oluşturulması adım adım anlatılmıştır.

Model geometrisinin oluşturulması

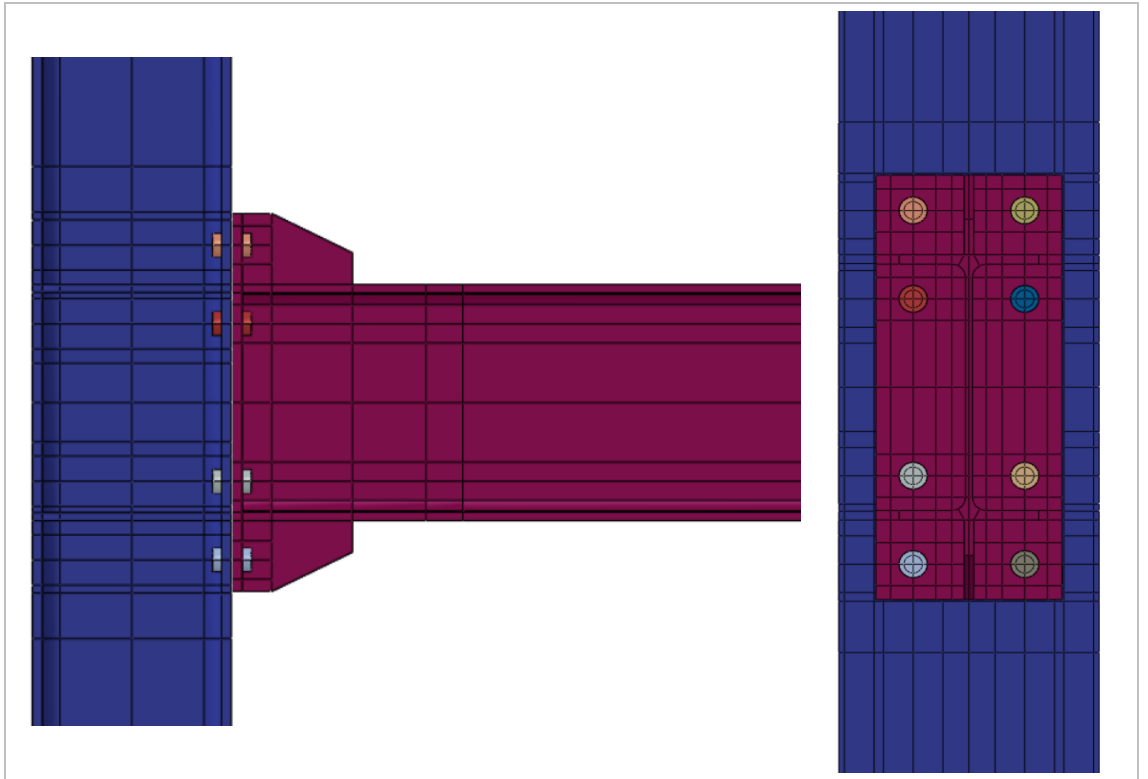
Araştırma kapsamında doğrusal olmayan sonlu eleman analizleri gerçekleştirilecek olan kolon kiriş birleşim modellerinin ABAQUS programındaki

3. MATERYAL ve YÖNTEM

detaylı görünümü gösterilmiştir. Tüm birleşim modellerinde kolon ve berkitme plakaları ile kiriş ve birleşim levhası birlikte modellenmiştir.



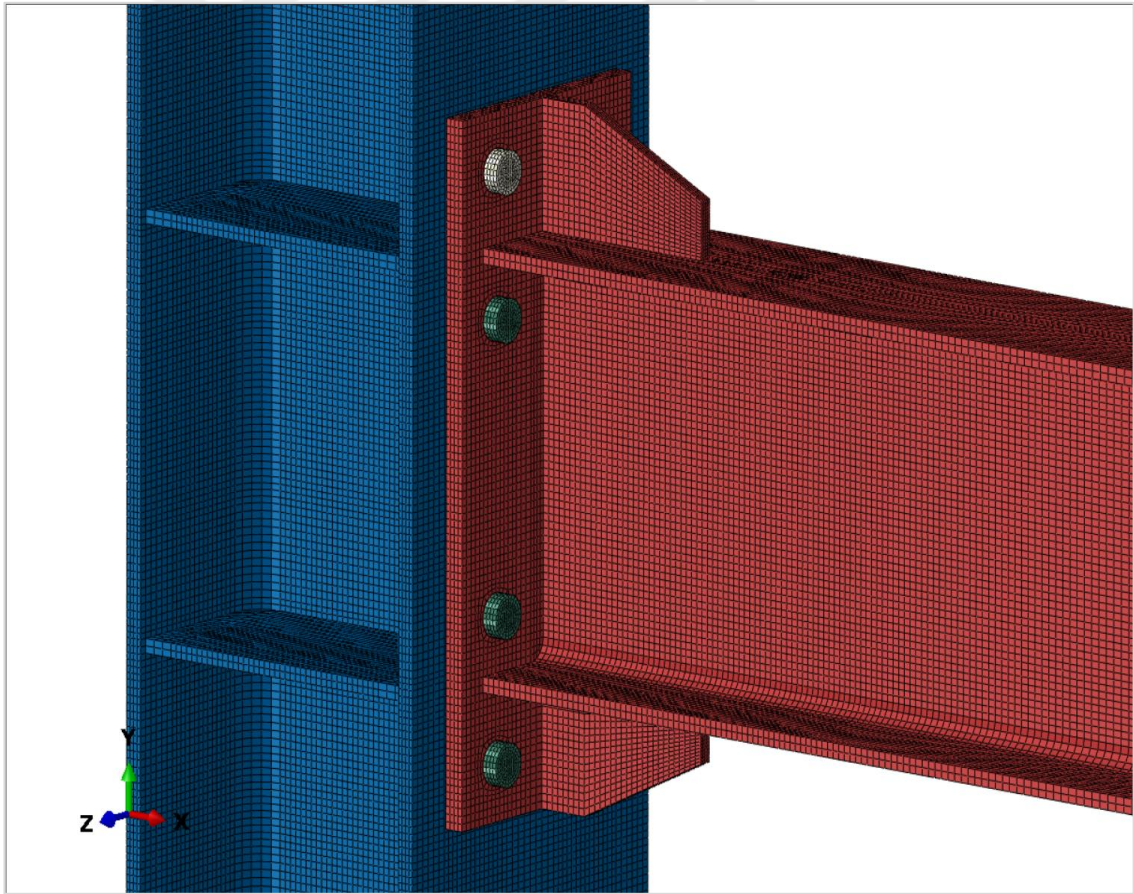
Şekil 3.34. Sonlu eleman modeli 3d görünüşü



Şekil 3.35. Model 1 Sonlu eleman modeli görünüşleri

Tüm kolon kiriş birleşim modellerinde analiz sonuçlarının gerçeğe daha yakın elde edilebilmesi için, modellerin yüklemeler altında zorlanabilecek bölümlerinde doğrusal integrasyona sahip C3D8 eleman tipi kullanılmıştır. Kritik bölgelerden uzak bölümlerde ise doğrusal ve azaltılmış integrasyona sahip C3D8R eleman tipi kullanılmıştır. Tercih edilen bu eleman tiplerinin, integrasyon sayısı daha fazla olan ve bu sebeple analiz sonrasında gerçeğe daha yakın sonuç vermesi yüksek ihtimal olan C3D20 eleman tipi ile karşılaştırıldığında gerilme dağılımları oldukça yakınlık göstermektedir. Bu sebeple analiz süresini kısaltmak amacıyla C3D8, C3D8R C3D8T, C3D8RT elemanlarının modelleme aşamasında kullanılması uygundur.

Kolon kiriş birleşimi davranışını daha iyi temsil etmek ve gerçekçi sonuçlar elde etmek için Şekil 3.36 da gösterildiği gibi kritik bölümlerde eleman kalınlıkları boyunca en az 4 katman olmasına dikkat edilmiştir (Han ve arkadaşları [38]).



Şekil 3.36. Sonlu eleman ağ yapısı (Model-1)

Malzeme Özellikleri ve Malzeme Modeli

Tüm birleşim modellerinde, kolon elemanlarında S275, kirişi ve kiriş alt ve üst başlıklarındaki rijitlik levhalarında S275, kolon berkitme levhalarında S275 yapı çeliği kullanılmıştır. Malzemelere ait karakteristik özellikler bölüm 3.1.1' de gösterilmiştir.

Yangın önleyici boya özellikleri bölüm 3.1.2' de verilmiştir.

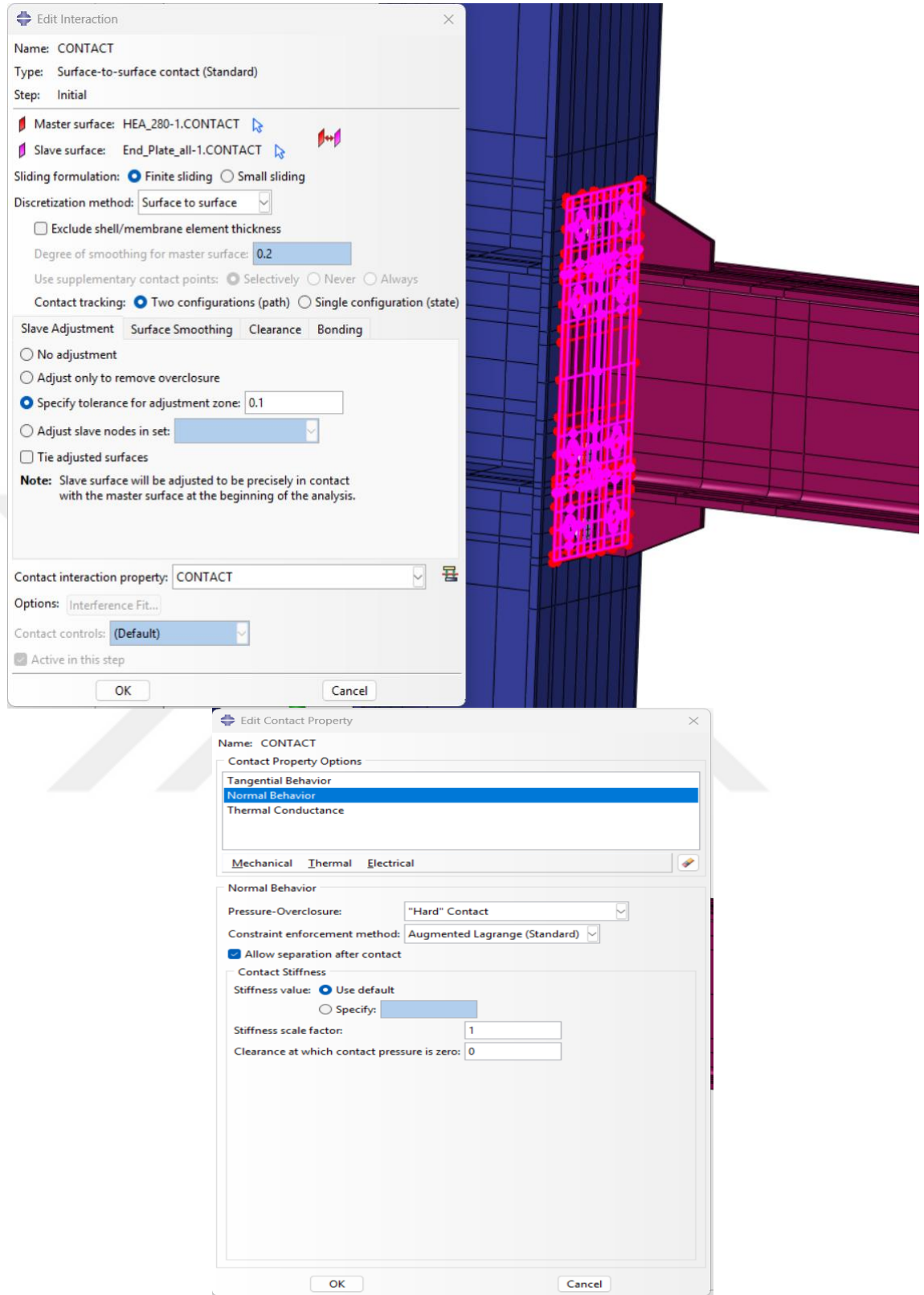
Temas Eden Yüzeyler Arasındaki Etkileşim

Birleşim modellerinin tasarım sürecinde, elemanlar arasındaki etkileşimi tanımlamak için ABAQUS programında yüzey tanımlamaları yapılmaktadır. Bu bağlamda, yüzeyler arasındaki etkileşim sağlanırken bir yüzey "esas yüzey" (master surface) olarak, diğer yüzeyler ise "tamamlayıcı yüzeyler" (slave surfaces) olarak tanımlanmaktadır. Esas yüzeyin rijitliği, tamamlayıcı yüzeylere kıyasla görece daha yüksek olan eleman üzerinden belirlenmektedir. Bunun temel sebebi, tamamlayıcı yüzeylerde kullanılan sonlu eleman ağının genellikle daha küçük olmasından ve bu bölgelerde rijitliğin daha az olmasından dolayı, gerilme, şekil değiştirme gibi mekanik davranışların gerçeğe daha yakın bir şekilde incelenmesinin sağlanmasıdır.

Kolon ve kiriş birleşimlerinde, bu elemanların plakalar ve kaynaklar ile bağlantılarında, sonlu eleman modelinde yer alan düğüm noktaları arasındaki bağlar "tie constraint" kullanılarak tanımlanmaktadır. Bu bağlama yöntemiyle, her iki yüzeyin de aynı serbestlik derecesine sahip olması sağlanmakta ve böylece yer değiştirme uyumu sınırlandırılmaktadır. Bu yaklaşım, birleşim bölgelerindeki davranışın doğru bir şekilde modellenmesi ve analiz edilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Şekil 3.38'da kolon ve birleşim plakası arasındaki etkileşim tanımı gösterilmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.37. ABAQUS Alın plakası ve kolon Temas Durum şartları tanımlaması

Geometri ve Sınır Koşulları

Modellerde kolonun alt ve üst ucuna sabit mesnetler koyularak yatay ve düşey doğrultuda dönmesi kısıtlanmıştır. Yüklemeler kolonun kirişin uç noktasından yapılmıştır. Kolon kesiti HEA280, kiriş kesiti ise IPE300 olarak seçilmiştir. Bağlantı elemanları olan alın plakası 15x28x450 mm boyutlarında bulonlar ise M20 grade 8.8 olarak seçilmiştir.

Kolon yüksekliği 2m ve kiriş uzunluğu da 2m olarak seçilmiştir. Kirişin uç noktasından düşey yönde 25 mm deplasman verilerek yükleme sağlanmıştır. Bulonlara 126.064 kN ön çekme kuvveti verilmiştir. Bulon yüklemeleri 1 stepte bulonlar y ve z eksenlerinde sabitlenerek öncekme kuvveti uygulanmış 2. Stepte sınırlandırmalar kaldırılarak “fix end current length” işlemi yapılarak bulonlar bulon boyu değişse bile öngerme kuvvetinin sabit kalması sağlanmıştır.

Belirli yangın senaryoları altında birleşim noktalarının termal ve statik davranışlarının incelenmesi amacıyla kapsamlı bir termal ve mekanik analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, farklı yüzeylere uygulanan konveksiyon ve radyasyon parametreleri dikkate alınarak termal yüklerin malzeme davranışına etkisi araştırılmıştır.

Termal analiz kapsamında, birleşim noktasını oluşturan farklı yüzeylere konveksiyon ve radyasyon etkileri uygulanmıştır:

Konveksiyon Parametreleri:

Boya koruma dış yüzeyi için konveksiyon katsayısı $4 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınmıştır.

Çelik dış yüzeyi için konveksiyon katsayısı $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak uygulanmıştır.

Radyasyon Parametreleri:

Boya koruma dış yüzeyi için radyasyon emisyon katsayısı 0.7 olarak kullanılmıştır.

Kiriş üzerinde kompozit bir döşeme olduğu varsayılarak yangın önleyici boya kiriş alt ve yan kısımlarına, alın plakasına ve kolona kiriş üst flanşı seviyesine kadar olacak şekilde modellenmiştir.

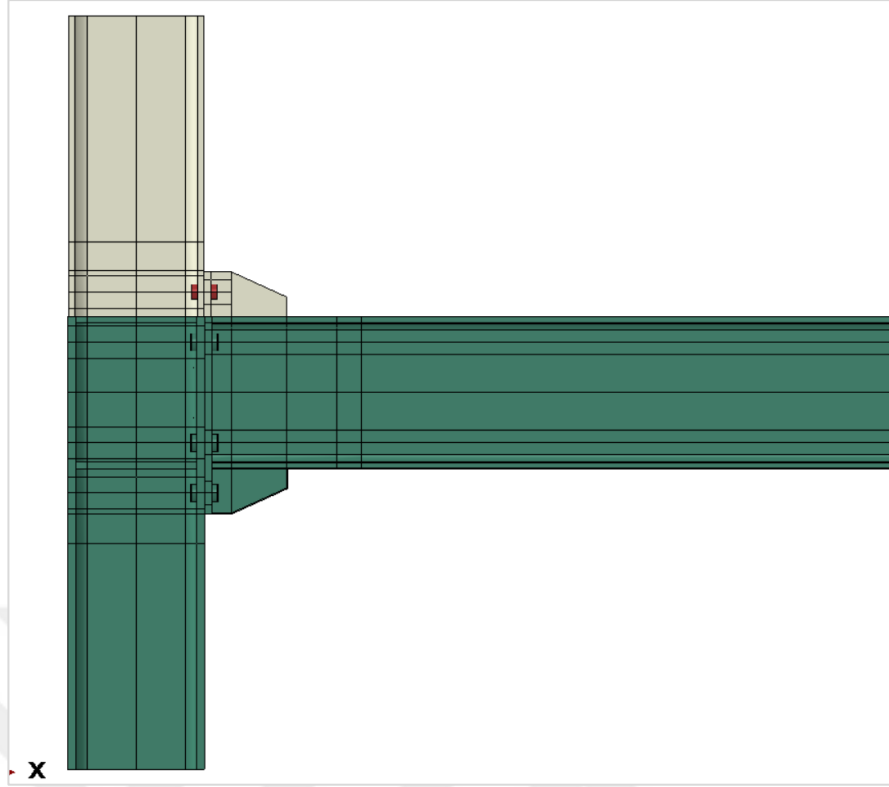
Bu termal sınır koşulları, birleşim noktasında meydana gelen sıcaklık dağılımını daha gerçekçi bir şekilde modellemek amacıyla sisteme tanımlanmıştır. Modeller, 3600 saniyelik (1 saatlik) bir analiz süresi boyunca farklı yangın eğrilerine maruz bırakılmıştır. Böylece malzemelerin termal tepki davranışı belirlenmiştir.

Termal analiz sonuçları, daha sonraki statik analizler için başlangıç yükleme koşulları olarak kullanılmıştır. Bu işlem, termal analiz sırasında elde edilen sıcaklık dağılımının, statik analizde malzeme özelliklerini etkileyen bir termal yükleme olarak tanımlanmasını sağlamıştır. Mapping (Haritalama) yöntemi kullanılarak, her bir düğüm noktasında elde edilen sıcaklık dağılımları statik modele aktarılmıştır.

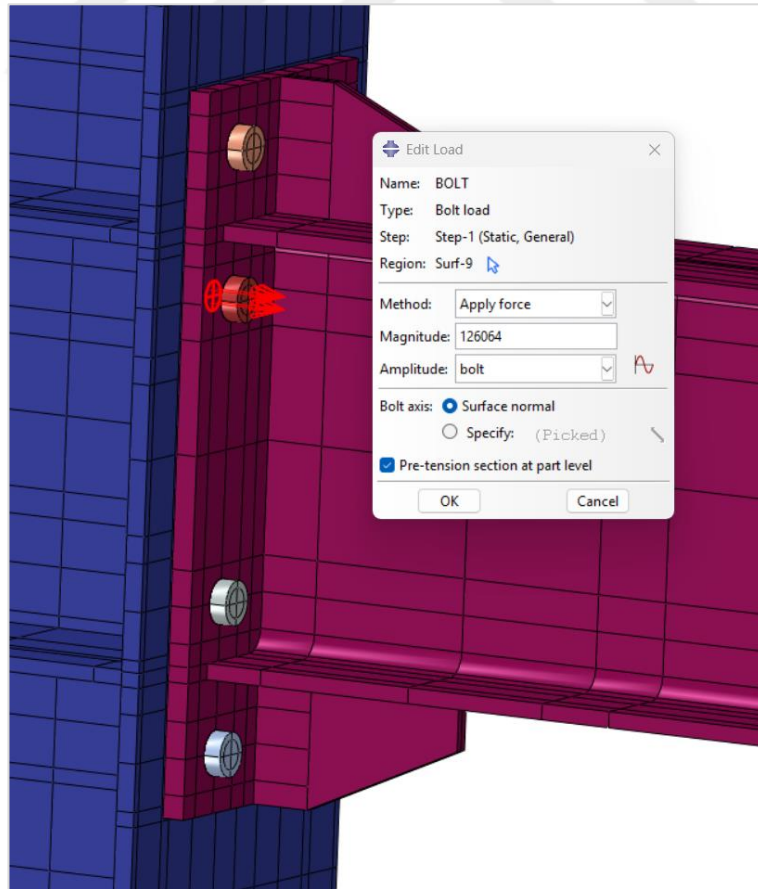
Statik analiz, birleşim noktasının belirli bir yükleme durumu altında yangın senaryosundaki mekanik davranışını incelemek için gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda:

Statik yükler, birleşim noktasına uygulanarak yapısal gerilme ve deformasyon analizleri yapılmıştır.

Yangın sırasında malzemelerin elastik modül, akma dayanımı ve diğer mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler termal analiz sonuçlarına dayalı olarak hesaplanmıştır.



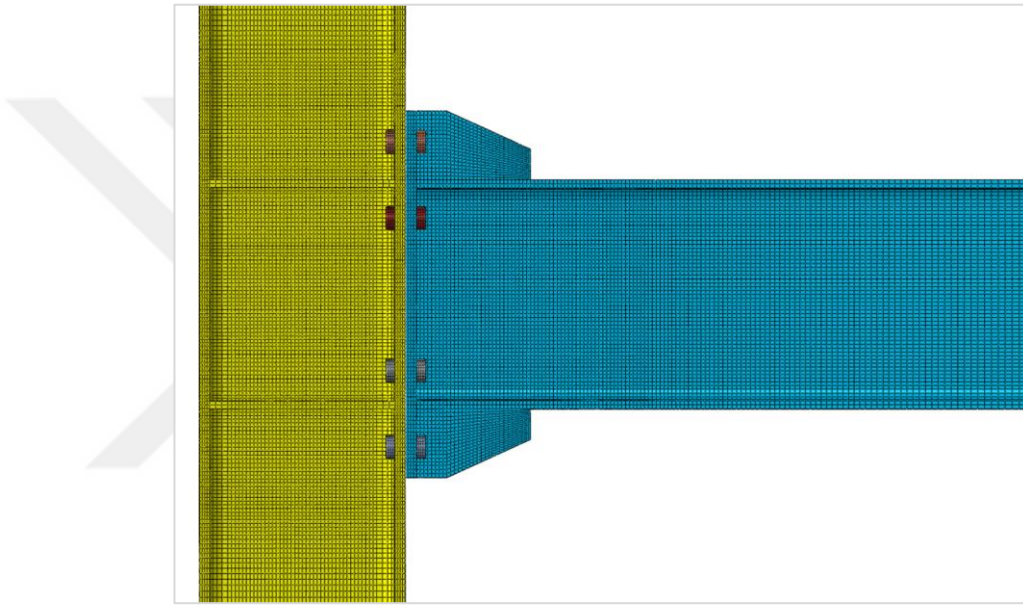
Şekil 3.38. Yangın önleyici boya modellemesi



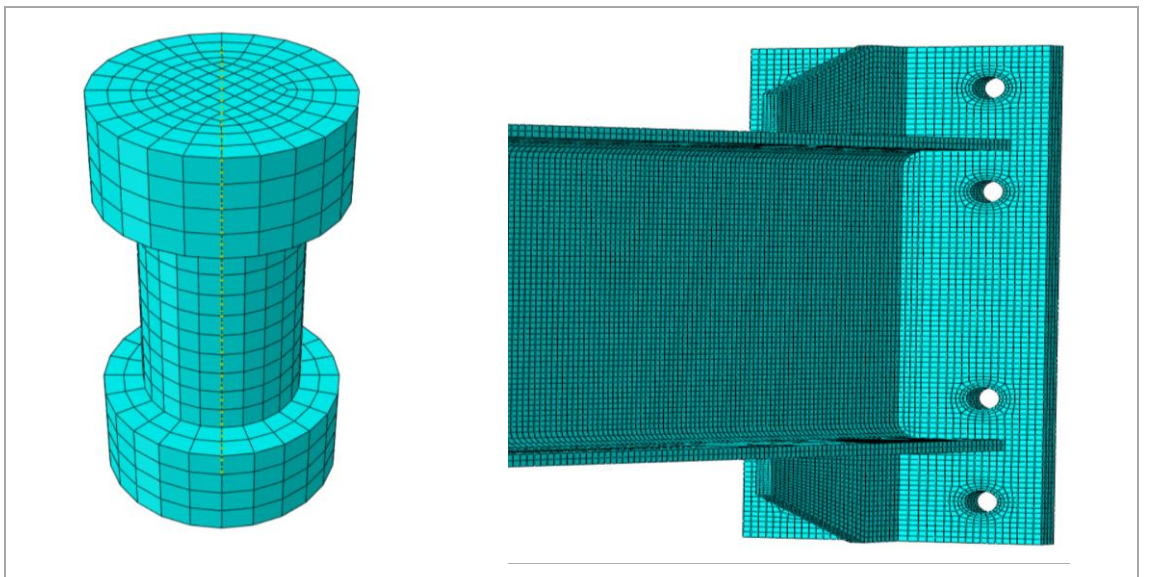
Şekil 3.39. Bol önçekme kuvveti tanımlaması

Sonlu Eleman Ağı Tanımlamaları

Model içerisinde farklı geometrik özelliklere sahip elemanlar, analiz için en uygun çözümü veren yapısal sonlu eleman ağlarını oluşturabilmek için bölmeler yapılarak (partition) birbirinden ayrılmıştır. Kolon ve kiriş C3D8R olarak bulonlar ise C3D8 olarak modellenmiştir. Sıcaklık analizi modelinde ise C3D8T olarak modellenmiştir. Modelde 229.332 eleman bulunmaktadır. Eleman mesh boyutları birleşim bölgesinde 5 mm, birleşimden uzak bölgelerde kademeli olarak 20 mm ye çıkarılmış tır.



Şekil 3.40. Sonlu eleman ağı yapısı görünüşleri



Şekil 3.41. Sonlu eleman sonlu eleman görünüşleri

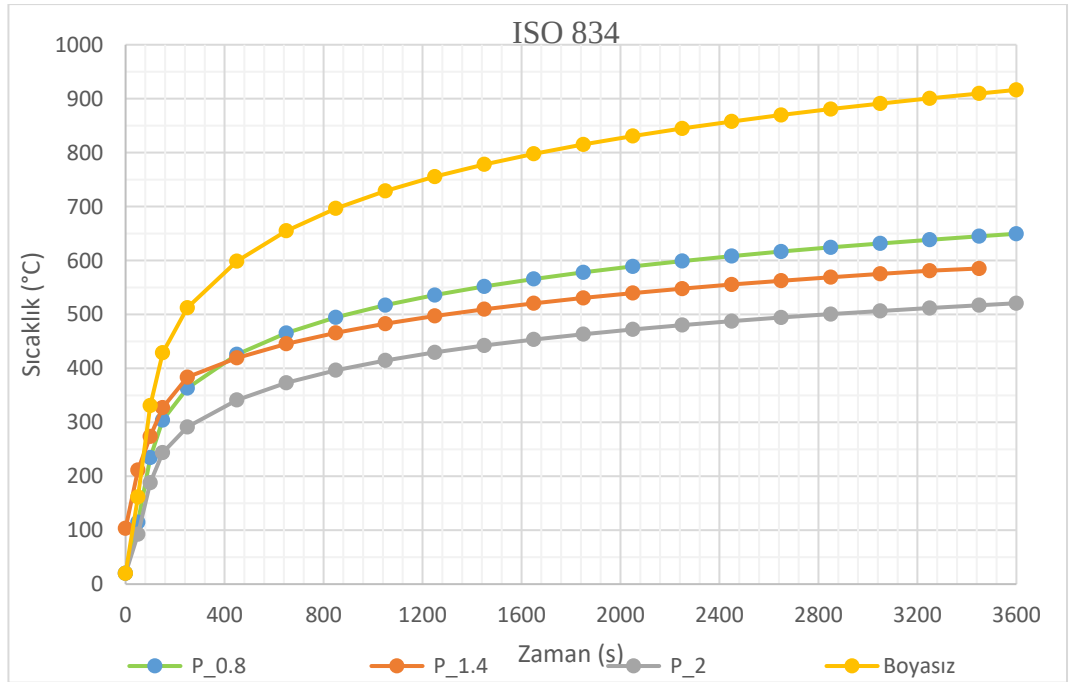
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çalışmanın temelini oluşturan deneysel veriler ve analizler sunularak araştırmanın bulguları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Farklı koşullar altında malzemelerin davranışlarını inceleyen bu araştırma, özellikle termal dayanım ve yangına karşı direnç gibi kritik mühendislik parametreleri üzerine odaklanmaktadır. Bulgular, malzemelerin sıcaklık, gerilme ve zaman parametreleri altındaki performansını değerlendirerek farklı test koşullarındaki davranışlarını karşılaştırmalı bir şekilde ortaya koymaktadır.

4.1.Pasif Yangın Koruyucu Boya Kalınlığının Sıcaklık Dağılımına Etkisi

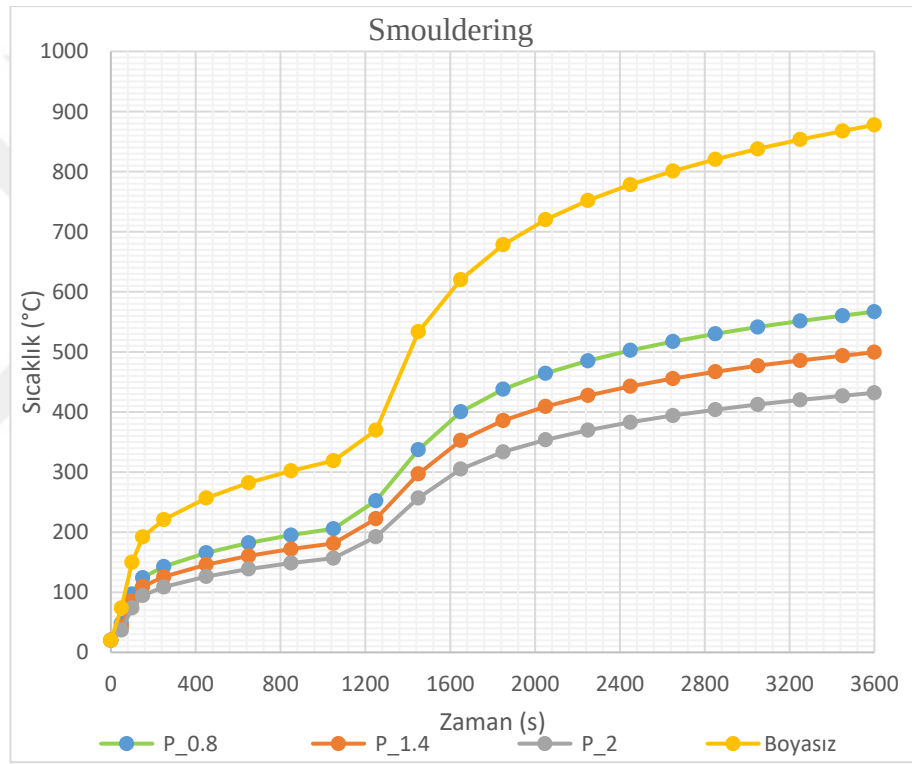
4.1.1. Sıcaklık dağılımları

Bütün modellerde göçme modu alın palankasının plastik şekil değiştirme sınırları aşması ve üst bulonların kopması sonucu meydana gelmektedir. Sıcaklık grafikleri birleşimin üst noktasında göçme modunun başladığı noktadan elde edilerek grafikler halinde sunulmuştur.



Şekil 4.1. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (ISO)

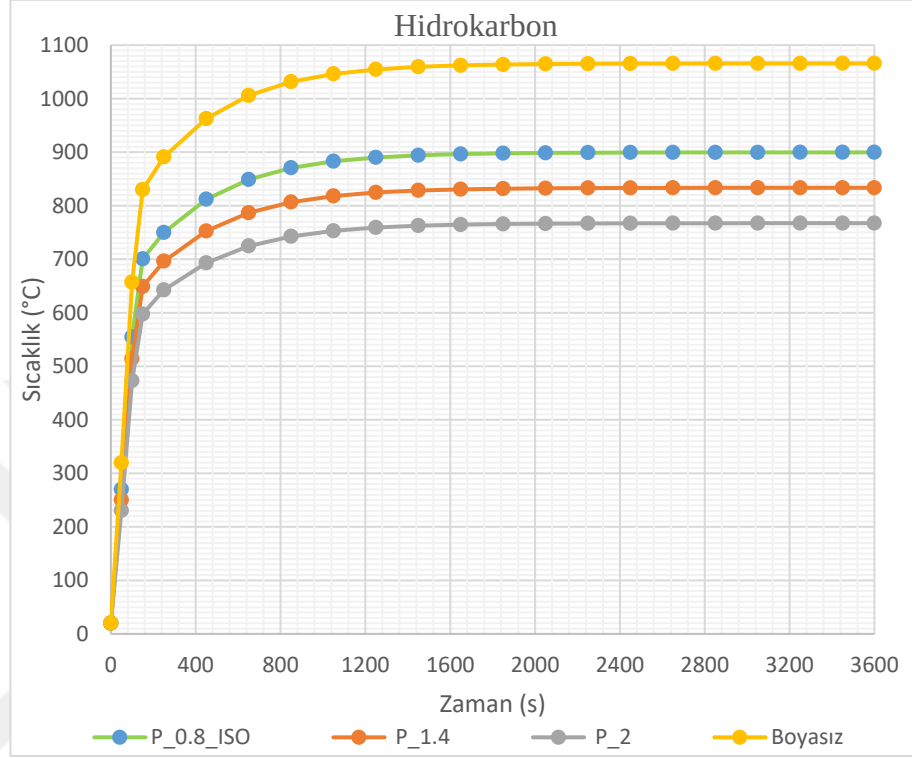
Şekil 4.1’ de ISO yangın eğrisi esnasında farklı boya kalınlıklarının malzeme yüzey sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Boyasız malzeme, sıcaklık artışına karşı en savunmasız durumdayken, yaklaşık 900°C’ye hızlı bir şekilde ulaşarak yüksek yangın riski oluşturmuştur. Buna karşılık, boya kalınlığı arttıkça malzemenin yangına dayanımı artmış, özellikle 2 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model yüzey sıcaklığını 520°C seviyelerinde en etkili korumayı sağlamıştır. 0,8 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model çelik için kritik sıcaklık olan 650 °C seviyesinde koruma sağlamıştır. 1,4 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model çelik için kritik sıcaklık olan 585 °C seviyesinde koruma sağlayabilmiştir.



Şekil 4.2. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (Smouldering)

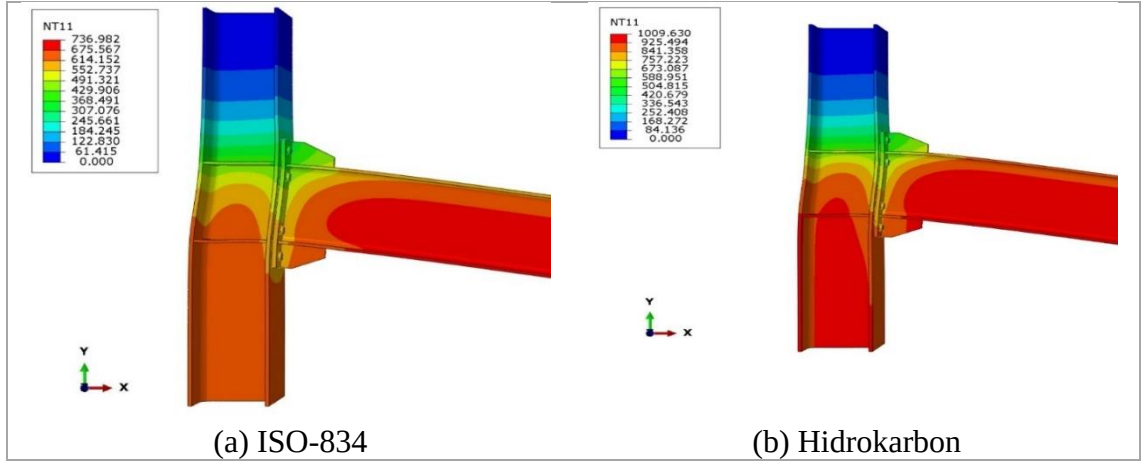
Şekil 4.2’de smouldering (için için yanan) yangınında farklı boya kalınlıklarının malzeme yüzey sıcaklıklarına etkisini göstermektedir. Boyasız malzeme, yaklaşık 900°C sıcaklığa ulaşarak en yüksek risk faktörünü ortaya koyarken, koruma sağlayan boya uygulamaları sıcaklık artışını önemli ölçüde sınırlamıştır. Özellikle, 2 mm boya kalınlığına sahip model, yüzey sıcaklığını 430 °C seviyelerinde tutarak yangın etkisini minimize etmiştir. Boya kalınlığı azaldıkça koruma performansı da düşmekte olup, 0,8 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model, 566 °C sıcaklığa kadar yükselmiştir. 1,4 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model ise 500 °C sıcaklığa

kadar yükselmiştir. Bu sonuçlar, düşük yoğunluklu ve uzun süreli yangın etkileri karşısında bile boya kalınlığının yangın direncinde kritik bir öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

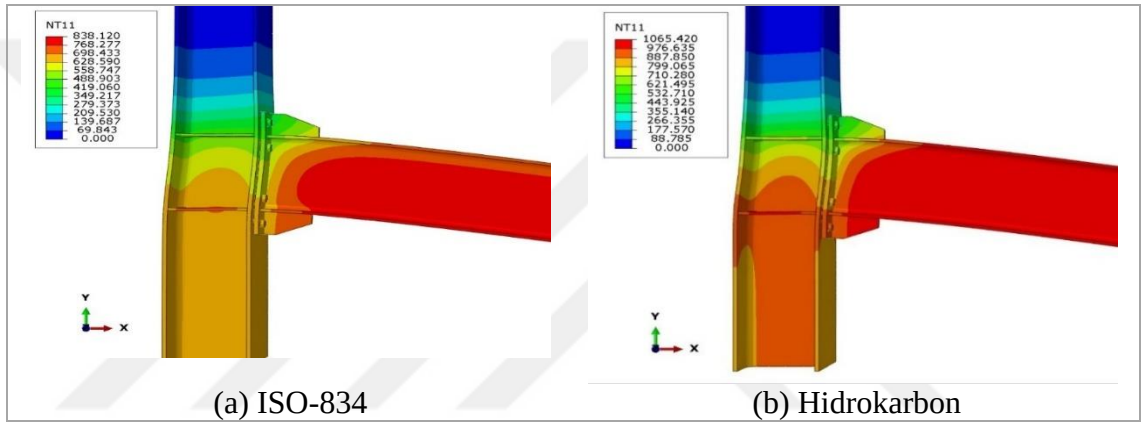


Şekil 4.3. Boya kalınlıklarının yangın performansına etkisi (hidrokarbon)

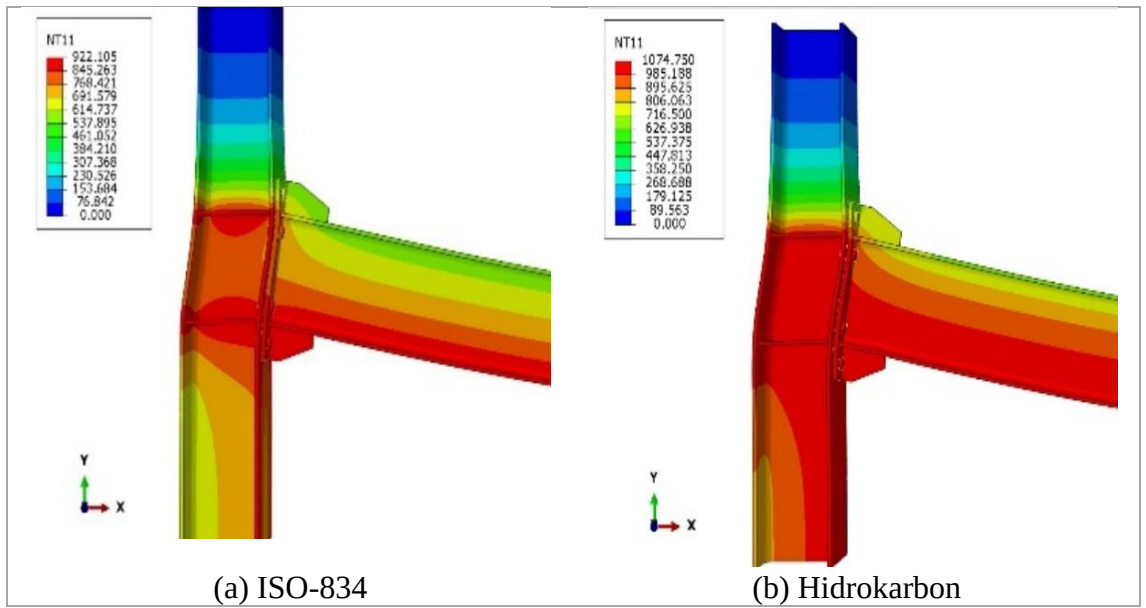
Şekil 4.3' de, hidrokarbon yangınında farklı boya kalınlıklarının malzeme yüzey sıcaklıklarına etkisini göstermektedir. Boyasız malzeme, hızlı bir şekilde yaklaşık 1.100°C sıcaklığa ulaşarak en yüksek sıcaklık değerini elde etmiş ve yangına karşı en düşük direnci sergilemiştir. Koruyucu boyaların uygulanması, sıcaklık artışını belirgin şekilde sınırlamış, özellikle 2 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model yüzey sıcaklığını 760°C civarında sabitleyerek en etkili korumayı sağlamıştır. Boya kalınlığı azaldıkça sıcaklık artışı artmış, 0,8 mm boya kalınlığına sahip model 900°C'ye ulaşarak daha sınırlı bir koruma sağlamıştır. 1,4 mm boya kalınlığına model ise 830°C'ye ulaşmıştır. Bu bulgular, yüksek sıcaklık ve hızlı ısınma içeren hidrokarbon yangınlarında boya kalınlığının malzeme performansı üzerindeki kritik önemini açıkça göstermektedir.



Şekil. 4.4. P2,0 sıcaklık dağılım gradyanları

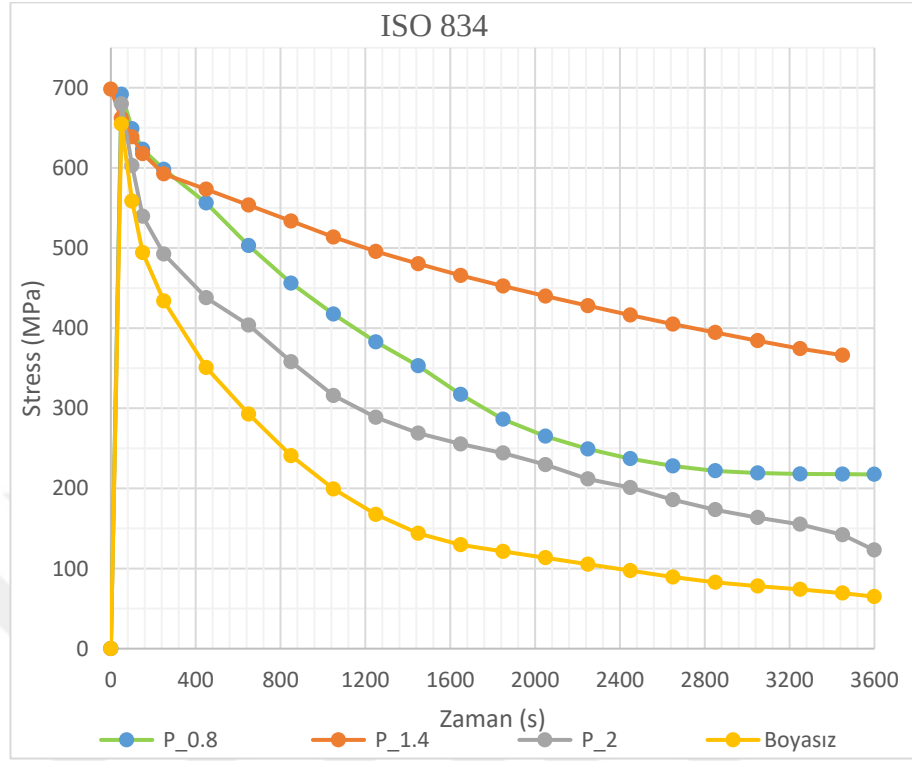


Şekil 4.5. P1,4 Sıcaklık dağılım gradyanları



Şekil 4.6. P0,8 sıcaklık dağılım gradyanları

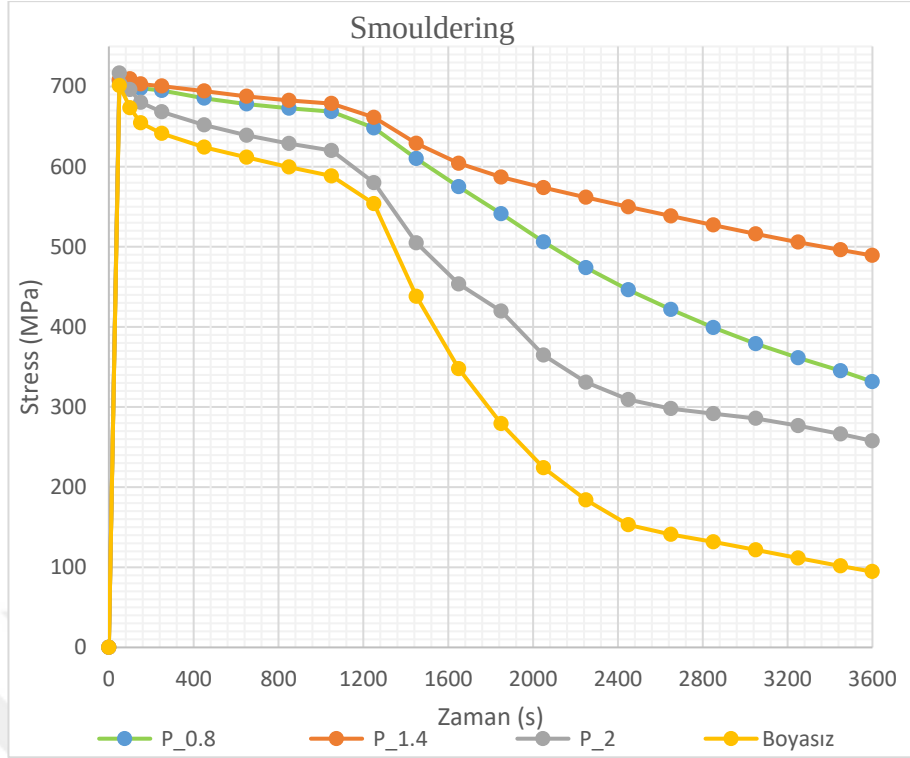
4.1.2. Sabit yangın koşullarında zamana bağlı gerilme değişimleri (von misses)



Şekil 4.7. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (ISO-834)

Şekil 4.7’ de, ISO-834 yangın koşulları altında farklı kalınlıktaki yangın önleyici boya ile kaplı malzeme durumlarının zamana bağlı gerilme (MPa) davranışlarını göstermektedir. Başlangıçta tüm malzemeler yüksek gerilme seviyelerine ulaşmış, ardından zamanla gerilme değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalma eğilimi, yangın önleyici boya kalınlığına bağlı olarak değişiklik göstermiştir.

1,4 mm kalınlığında yangın önleyici boya uygulanan model, zamanla daha yüksek gerilme seviyelerinde stabil kalmış ve yangın koşulları altında nispeten daha az dayanım kaybı sergilemiştir. 1,4 mm kalınlığında yangın önleyici boya uygulanan model malzemeleri ise daha düşük gerilme seviyelerine inmiş, ancak bu seviyelerde stabil hale gelerek dayanım açısından dengeli bir performans sunmuştur.

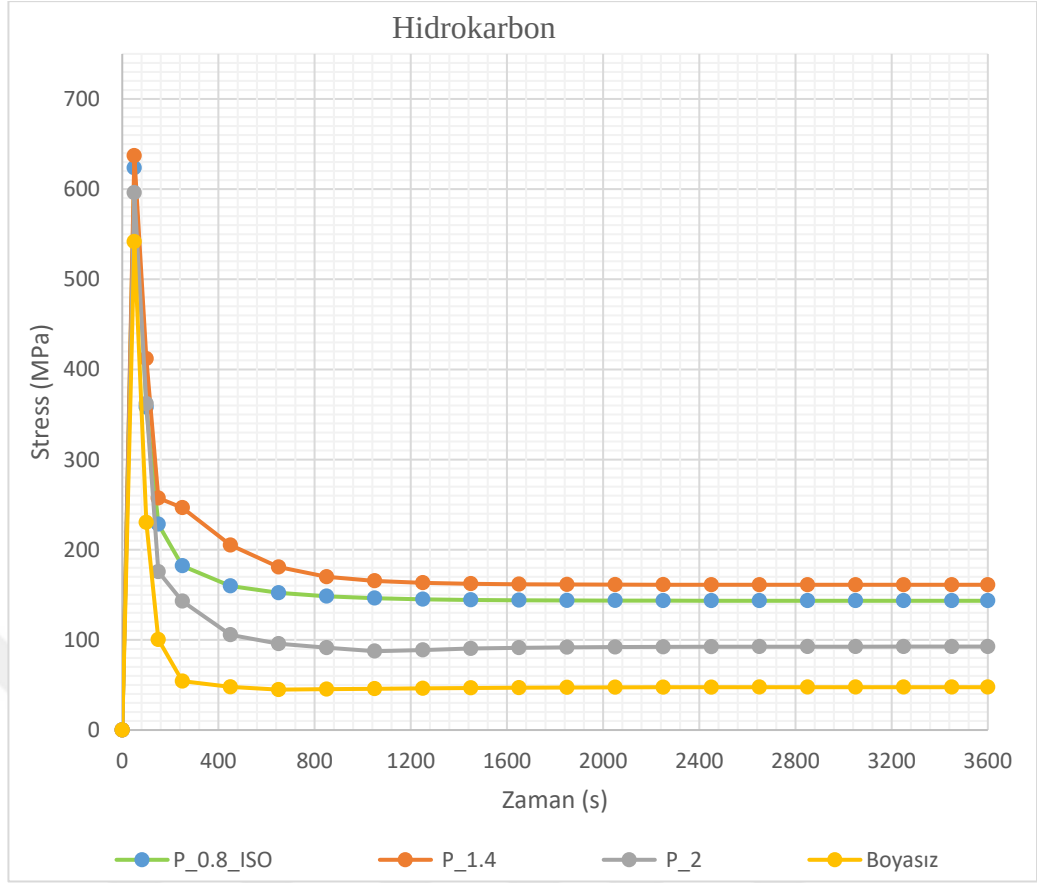


Şekil 4.8. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (smouldering)

Şekil 4.8’ de için için yanma (smouldering) koşulları altında farklı kalınlıklarda yangın önleyici boya ile kaplı malzemelerin zamana bağlı gerilme davranışlarını göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, malzemelerin türüne ve termal dayanım kapasitelerine bağlı olarak gerilme seviyelerindeki azalma eğilimlerinin farklılık gösterdiğini ortaya koymaktadır.

1,4 mm kalınlığında yangın önleyici boya kaplaması ile, zaman içinde en yüksek gerilme seviyelerini koruyarak tütme koşulları altında en dayanıklı performansı sergilemiştir. Bu durum, malzemenin mekanik ve termal dayanım açısından üstünlüğünü ortaya koymaktadır. 0,8 ve 2 mm kalınlığındaki boyalı malzemeler başlangıçta yüksek gerilme seviyelerini bir süre korumuş, ancak zamanla daha düşük seviyelere gerilemiştir.

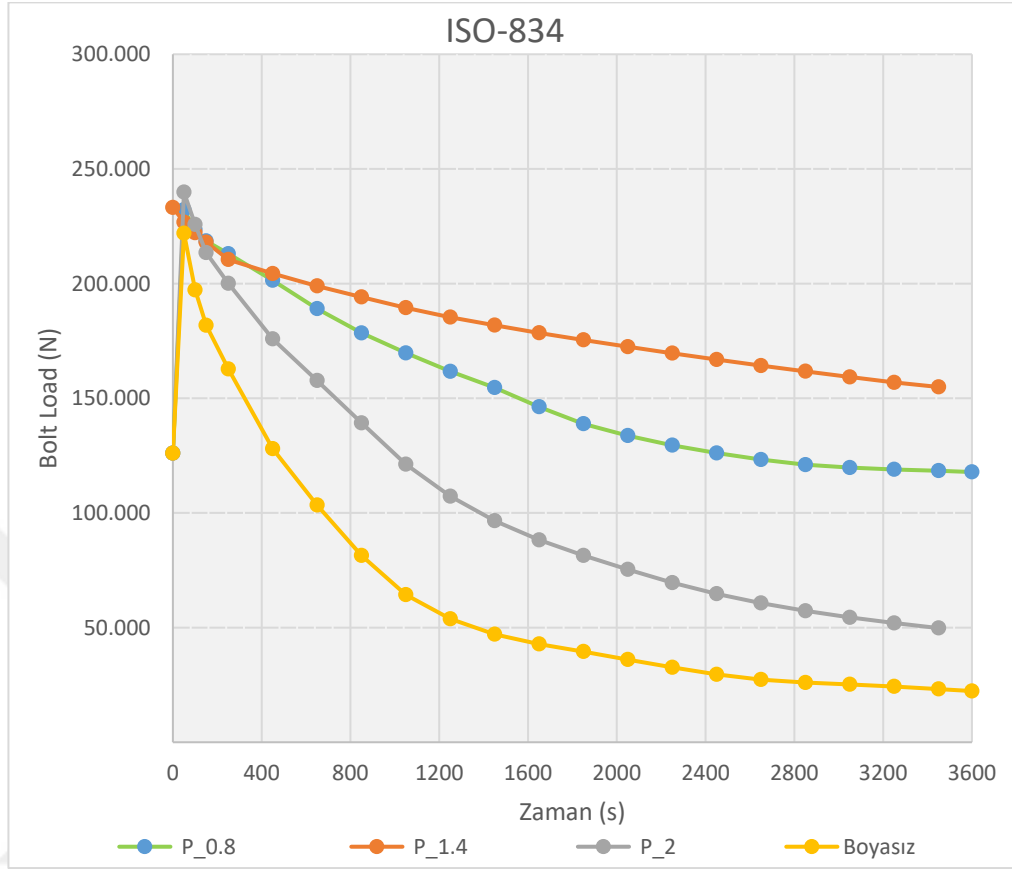
Boyasız malzeme ise başlangıçtan itibaren en hızlı gerilme kaybını yaşamış ve tütme koşulları altında en düşük dayanımı göstermiştir. Özellikle boyasız malzemenin hızla gerilme kaybına uğraması, sınırlı bir termal ve mekanik dayanım sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9. Boya kalınlıklarının gerilmelere etkisi (hidrokarbon)

Şekil 4.9 da, ISO 834 yangın koşulları altında farklı malzeme türlerinin zamana bağlı gerilme değişimlerini karşılaştırmaktadır ve malzemelerin yangına karşı termal dayanımlarını değerlendirmektedir. 0,8 mm ve boyasız malzemeler, sıcaklık seviyelerindeki hızlı düşüş ve daha düşük stabilite noktalarına ulaşmalarıyla, yangına karşı en etkili termal koruma performansını sergilemiştir. Boyasız malzeme özellikle en düşük sıcaklık seviyelerine ulaşarak üstün bir termal dayanım göstermiştir. Buna karşın, 1,4 ve 2 mm boya kalınlıklı malzemeleri daha yüksek sıcaklık seviyelerinde stabil hale gelmiş ve yangına karşı görece daha düşük bir koruma sağlamıştır.

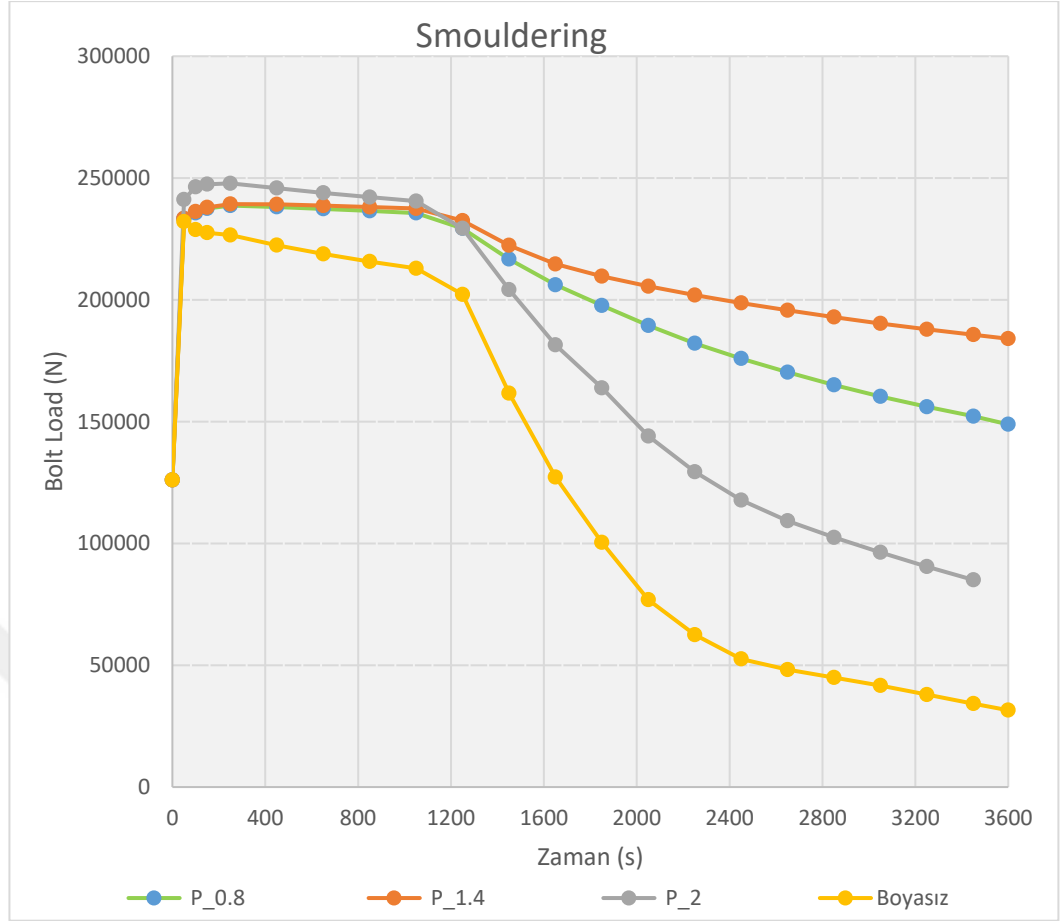
4.1.3. Boya kalınlıklarının Bulon Yüklerine Etkisi



Şekil 4.10. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (ISO-834)

Şekil 4.10’ da, ISO-834 yangın koşullarına göre farklı kalınlıklarda yangın önleyici boya korumasına sahip bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitelerinin (Bolt Load) zamana bağlı değişimi gösterilmektedir. Başlangıçta tüm gruplar yüksek bir yük taşıma kapasitesine sahipken, zamanla bu kapasitelerde belirgin bir azalma gözlenmiştir.

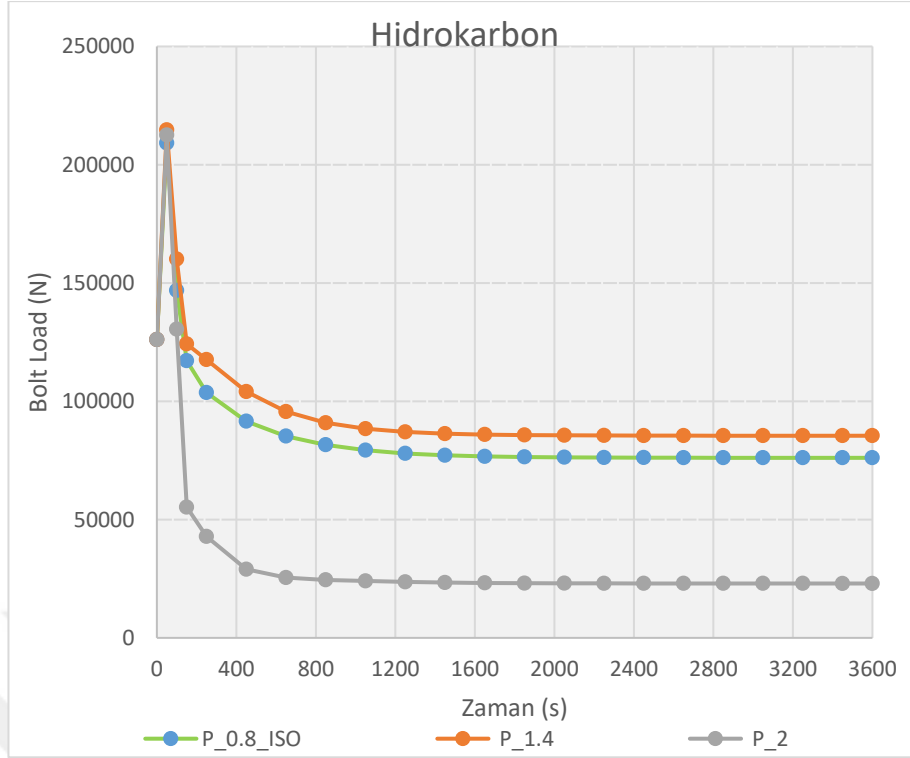
1,4 mm yangın önleyici boya kaplamalı örnekler, zaman ilerledikçe en yüksek yük taşıma kapasitesini korurken, Boyasız örnekler en hızlı kapasite kaybını yaşamış ve en düşük değerlere ulaşmıştır. 0,8 ve 2mm kalınlıklı boya kaplamalı örnekler ise ara seviyelerde performans göstermiştir. Bu durum, kaplama türünün yük taşıma kapasitesinin zaman içerisindeki dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.11. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (smouldering)

Şekil 4.11’de, "Smouldering" koşulları altında farklı kaplama türlerinin bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitesine (Bolt Load) etkisi zamana bağlı olarak incelenmiştir. Veriler, dört farklı örnek grubu için yük taşıma kapasitesinin (N) zaman (s) boyunca nasıl değiştiğini göstermektedir.

Başlangıçta tüm numuneler yaklaşık 250.000 N bir yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak zaman ilerledikçe kaplama türlerine bağlı olarak farklı azalma eğilimleri gözlenmiştir. Boyasız numuneler en hızlı şekilde yük taşıma kapasitesini kaybederek en düşük değerlere ulaşmıştır. P_1,4 kaplamalı numuneler, zamana bağlı olarak yük taşıma kapasitesini en iyi koruyan grup olarak dikkat çekmektedir. P_2 ve P_0,8 kaplamalı numuneler ise performans açısından orta seviyelerde yer almıştır.



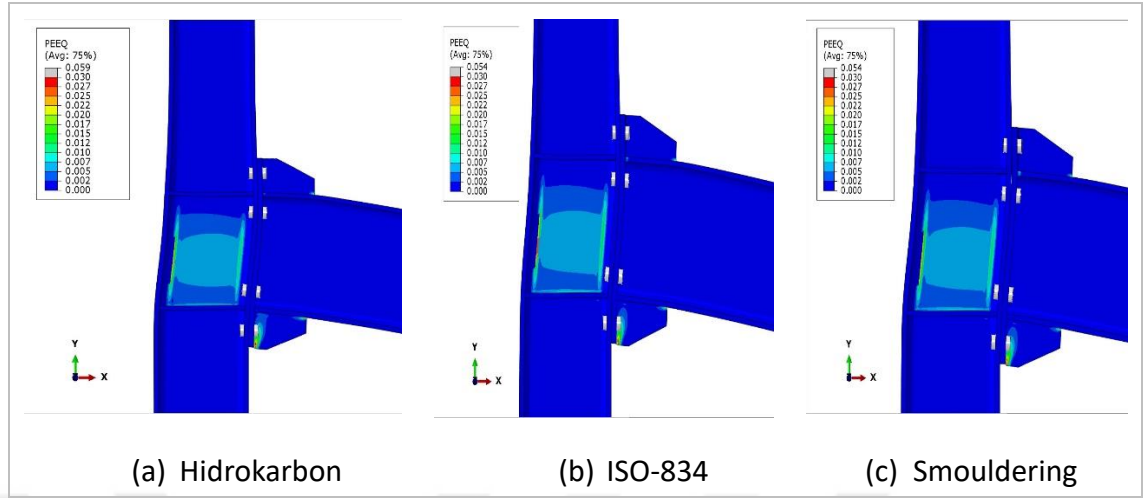
Şekil 4.12. Boya kalınlıklarının bulon yüklerine etkisi (hidrokarbon)

Şekil 4.12' de, "Hidrokarbon" koşulları altında farklı kaplama türlerinin bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitesine (Bolt Load) zamana bağlı olarak etkisi incelenmiştir.

Başlangıçta tüm gruplar yaklaşık 200.000 N bir yük taşıma kapasitesine sahiptir. Ancak çok kısa bir süre içinde özellikle Boyasız ve P_2 numunelerinin yük taşıma kapasitesinde dramatik bir azalma meydana gelmiştir. Boyasız numuneler, en düşük kapasiteye ulaşmış ve zamanla bu düşük seviyeyi korumuştur. P_1.4 kaplamalı numuneler, yük taşıma kapasitesini zamana bağlı olarak en iyi koruyan grup olmuştur. P_0.8_ISO ve P_2 kaplamalı numuneler ise orta seviyelerde bir performans sergilemiştir.

Bu grafik, hidrokarbon ortamındaki termal yüklenme senaryolarında kaplama türünün bağlantı elemanlarının yük taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini göstermektedir. Özellikle yangına maruz kalma koşullarında P_1.4 kaplamasının en dayanıklı performansı sergilediği, buna karşın Boyasız numunelerin en zayıf performansı gösterdiği görülmektedir. Bu durum, yangın güvenliği açısından doğru kaplama seçiminin önemini vurgulamaktadır.

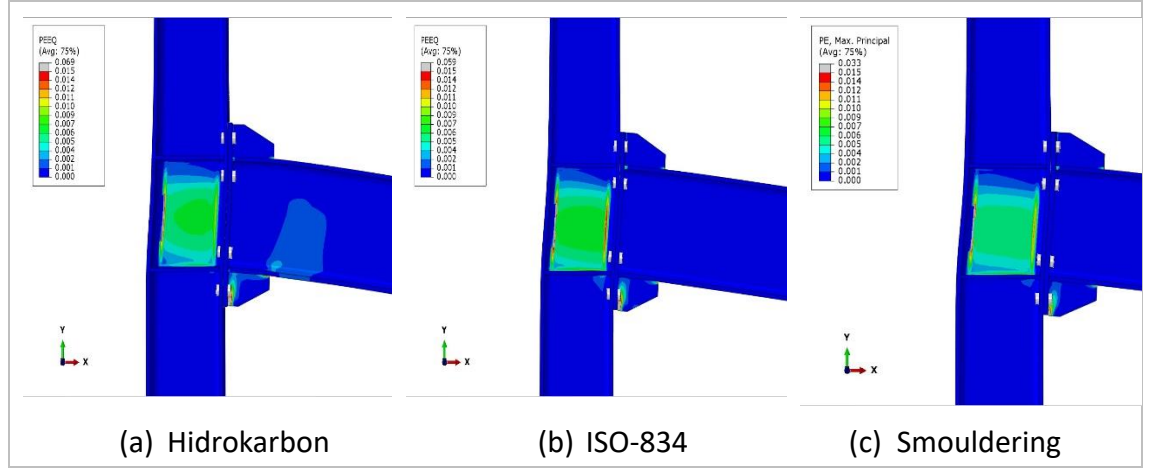
4.1.4. Eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ)



Şekil 4.13. 0,8 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)

Şekil 4.13’ de, 0,8 mm yangın geciktirici boya kaplaması bulunan birleşim elemanlar farklı yangınlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ) davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Analiz sonuçları, yangın türlerine bağlı olarak malzemede meydana gelen plastik deformasyon yoğunluğunun değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Hidrokarbon yangını koşullarında, yüksek sıcaklıkların hızla oluşması sonucu birleşim noktası çevresinde plastik şekil değiştirme oranlarının maksimum seviyeye ulaştığı gözlemlenmiştir. Özellikle birleşim bölgesindeki yoğun deformasyon, malzemenin yük taşıma kapasitesinin hızlı bir şekilde azalmasına neden olmaktadır. Bu durum, hidrokarbon yangınının malzeme üzerinde en yüksek termomekanik etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

ISO yangın eğrisi koşullarında, deformasyon yoğunluğu hidrokarbon yangınına kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır. Plastik şekil değiştirme, birleşim çevresinde sınırlı alanlarda gözlenmiş ve genel olarak malzemenin yapısal dayanımı daha iyi korunmuştur. ISO yangın eğrisinin daha yavaş sıcaklık artışına sahip olması, malzemeye termal yüke uyum sağlama açısından daha fazla süre tanımış ve deformasyon seviyesinin sınırlı kalmasına olanak sağlamıştır. İçin için yanma koşullarında ise deformasyon yoğunluğunun en düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Plastik şekil değiştirme genellikle birleşim bölgesinde minimal seviyelerde kalmış ve malzeme düşük sıcaklık gradyanları altında yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde korumuştur.

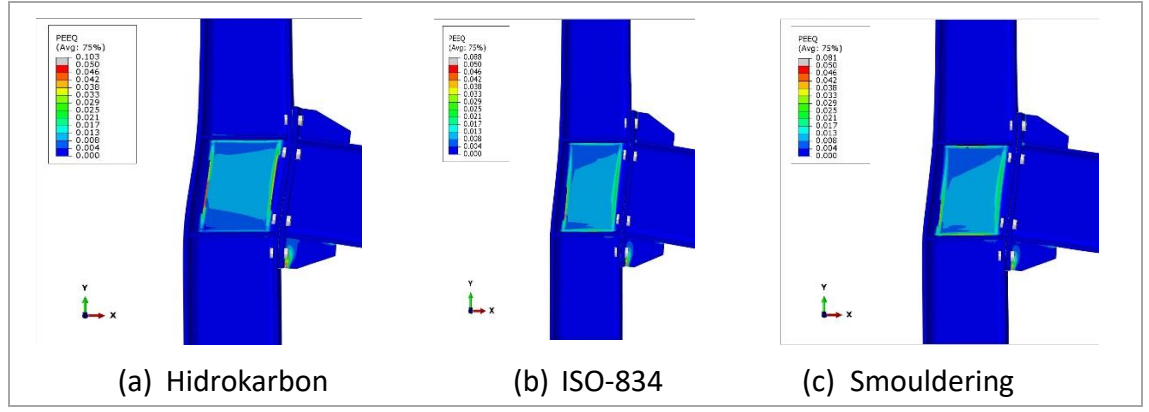


Şekil 4.14. 1,4 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)

Şekil 4.14’ de, 0,8 mm yangın geciktirici boya kaplaması bulunan birleşim elemanlar farklı yangınlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ) davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Analiz sonuçları, yangın türlerine bağlı olarak malzemede meydana gelen plastik deformasyon yoğunluğunun değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Hidrokarbon yangını koşullarında, malzemenin birleşim bölgesinde plastik şekil değiştirmenin yoğun olduğu ve kırmızı renkte yoğunlaşarak maksimum seviyeye ulaştığı görülmüştür. Bu durum, hidrokarbon yangınlarının yüksek sıcaklık gradyanı nedeniyle malzemede hızlı bir termal ve mekanik yük birikimine neden olduğunu göstermektedir. Plastik şekil değiştirme, özellikle birleşim noktalarında yoğunlaşmış ve bu bölgelerdeki yük taşıma kapasitesinin önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

ISO yangın eğrisi koşullarında, plastik şekil değiştirme hidrokarbon yangınına kıyasla daha düşük seviyelerde kalmıştır. Deformasyon yoğunluğu genellikle yeşil ve mavi tonlarında kalmış ve yalnızca sınırlı bölgelerde sarı ve kırmızı tonlara ulaşmıştır. ISO yangın eğrisinin daha yavaş sıcaklık artışına sahip olması, malzemenin termal yüklere karşı daha uzun süre direnç göstermesine olanak tanımış ve deformasyon seviyesini sınırlandırmıştır.

İçin için yanma koşullarında, plastik şekil değiştirme seviyesinin en düşük olduğu tespit edilmiştir. Düşük sıcaklık gradyanları ve yavaş termal yükleme, malzemenin yapısal bütünlüğünü büyük ölçüde korumasını sağlamış ve deformasyonu sınırlamıştır.



Şekil 4.15. 2,0 mm boya kalınlığında eşdeğer plastik şekil değiştirmeler (PEEQ)

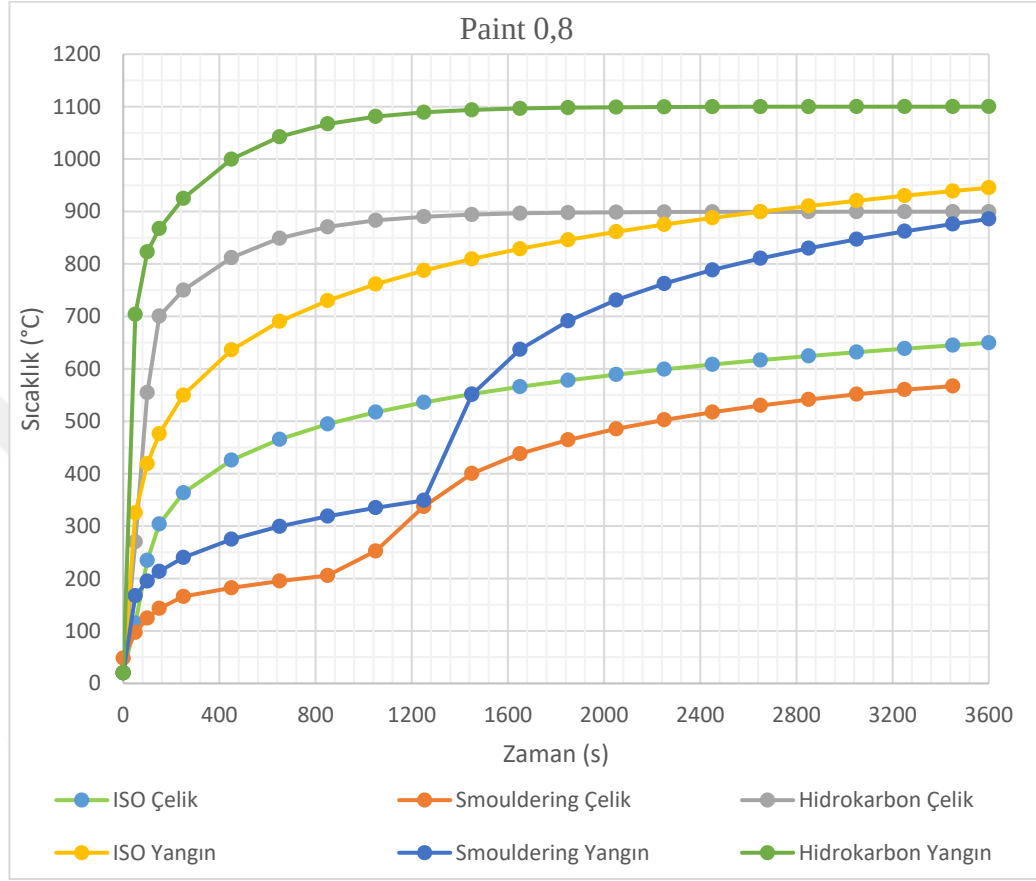
Şekil 4.15’ de 2,0 mm yangın geciktirici boya kaplaması bulunan birleşim elemanlar farklı yangınlarda eşdeğer plastik şekil değiştirme (PEEQ) davranışlarını karşılaştırmalı olarak incelemektedir. Analiz sonuçları, yangın türlerine bağlı olarak malzemede meydana gelen plastik deformasyon yoğunluğunun değişkenlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Hidrokarbon yangını koşullarında, malzemede oluşan plastik şekil değiştirmenin yoğunluğu diğer senaryolara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Özellikle birleşim noktası çevresinde kırmızı tonlarla ifade edilen yüksek plastik deformasyon bölgeleri gözlemlenmiştir. Bu durum, hidrokarbon yangınının yüksek sıcaklık gradyanı ve hızlı ısı transferi nedeniyle malzeme üzerinde büyük termal ve mekanik stres yarattığını göstermektedir. Bu tür deformasyon, malzemenin yapısal dayanımını hızlı bir şekilde sınırlayarak birleşim bölgelerinde hasara yol açmaktadır.

ISO yangın eğrisi koşullarında, plastik şekil değiştirmenin hidrokarbon yangınına göre daha düşük seviyelerde olduğu tespit edilmiştir. Plastik deformasyon, genellikle yeşil ve mavi tonlarında yoğunlaşmış ve yalnızca sınırlı bölgelerde sarı veya kırmızı tonlara ulaşmıştır. ISO yangın eğrisinin daha yavaş sıcaklık artışına sahip olması, malzemenin termal ve mekanik yüklemeye karşı daha fazla direnç göstermesine olanak tanımıştır.

İçin için yanma koşulları altında ise plastik şekil değiştirmenin en düşük seviyelerde olduğu belirlenmiştir. Deformasyonun büyük ölçüde mavi tonlarda sınırlı olduğu ve birleşim bölgelerinde minimum seviyede gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklık gradyanları ve yavaş ısı transferi, malzemenin yapısal bütünlüğünü koruyarak deformasyonu minimuma indirmiştir.

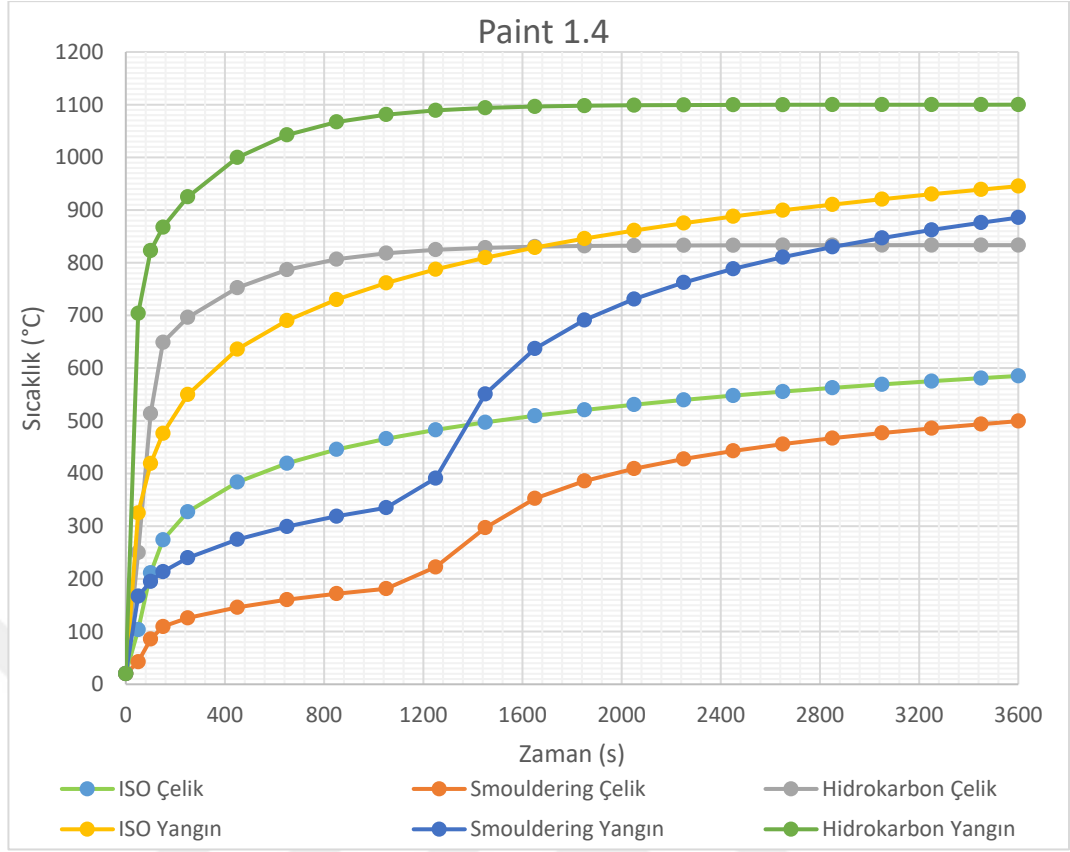
4.2. Farklı Yangın Eğrilerinin Yangın Performansına Etkisi

4.2.1. Sıcaklık değişimleri



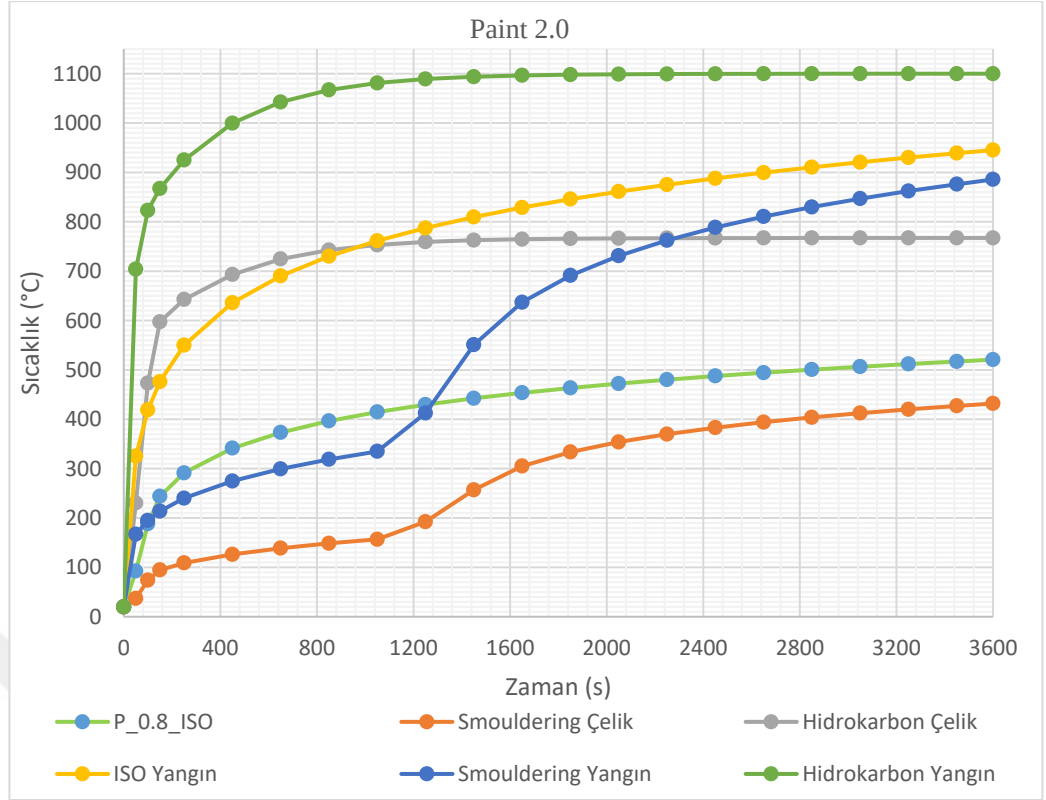
Şekil 4.16. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (paint 0,8)

Şekil 4.16’de sabit boya kalınlığı (0,8 mm) ile farklı yangın türlerinin malzeme yüzey sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Hidrokarbon yangını, hızlı bir şekilde yaklaşık 900°C’ye ulaşarak en yüksek sıcaklık değerini elde etmiş ve sabit boya kalınlığının bu yangın türünde sınırlı bir koruma sağladığını göstermiştir. ISO yangını ise daha dengeli bir sıcaklık artışı sergileyerek yaklaşık 650°C’de sabitlenmiş, bu da sabit boya kalınlığının bu tür yangınlarda kabul edilebilir bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Düşük enerjiye sahip smouldering yangınlarında ise maksimum sıcaklık 560°C civarında kalmış ve sabit boya kalınlığı yüzey sıcaklıklarını etkin bir şekilde kontrol etmiştir. Bu değerlendirme, yangın güvenliği tasarımında boya kalınlığının seçiminin yangın türüne göre optimize edilmesi gerektiğini ve farklı yangın senaryolarına yönelik analizlerin önemini vurgulamaktadır.



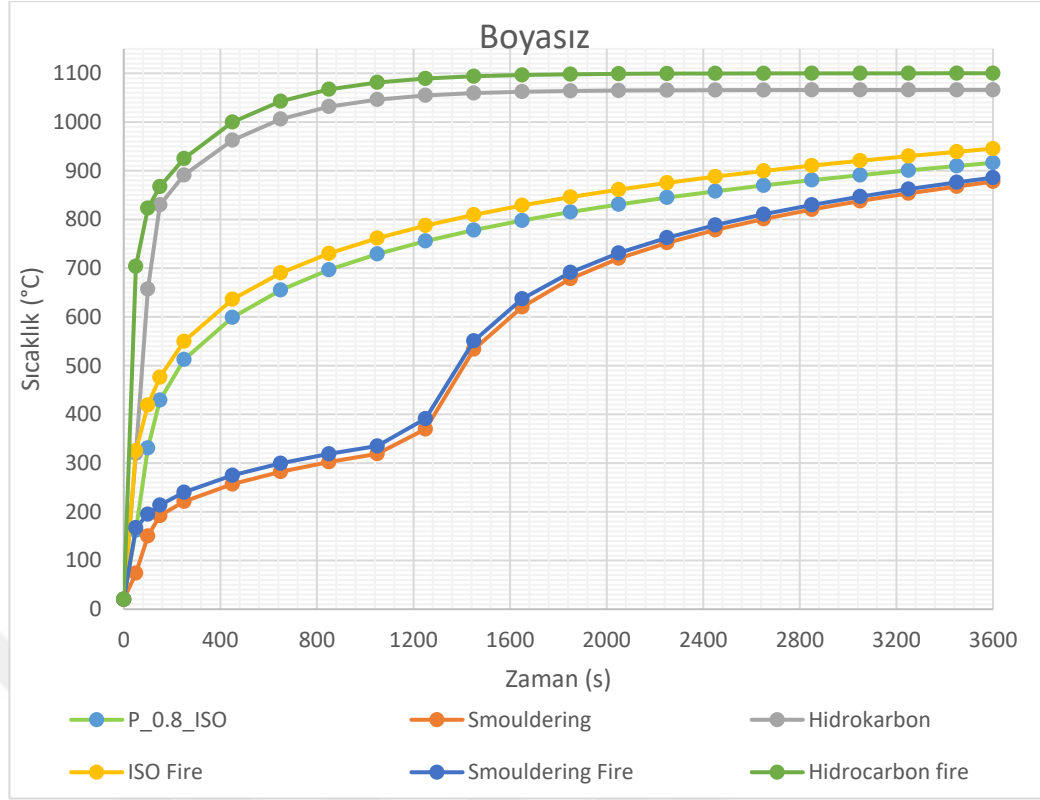
Şekil 4.17. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (Paint 1,4)

Şekil 4.17’de, 1,4 mm boya kalınlığı ile farklı yangın türlerinin malzeme yüzey sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Hidrokarbon yangını, hızlı bir şekilde yaklaşık 830°C’ye ulaşarak en yüksek sıcaklık değerine erişmiş, ancak bu boya kalınlığı ile yüzey sıcaklığının kontrolünde daha başarılı bir performans sergilenmiştir. ISO yangını yaklaşık 585°C seviyelerinde sabitlenirken, düşük enerjiye sahip smouldering yangınlarında maksimum sıcaklık 500°C arasında kalmış ve sabit boya kalınlığının bu tür yangınlarda etkili bir koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Özellikle smouldering yangınlarında sıcaklık artışı yavaş ve kontrollü bir şekilde gerçekleşmiş, bu da boyanın termal koruma kapasitesini artırdığını göstermektedir. Bu analiz, 1,4 mm boya kalınlığının yangın direncinde daha güçlü bir koruma sağladığını ve farklı yangın senaryolarına karşı etkin bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.18. Yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (paint 2,0)

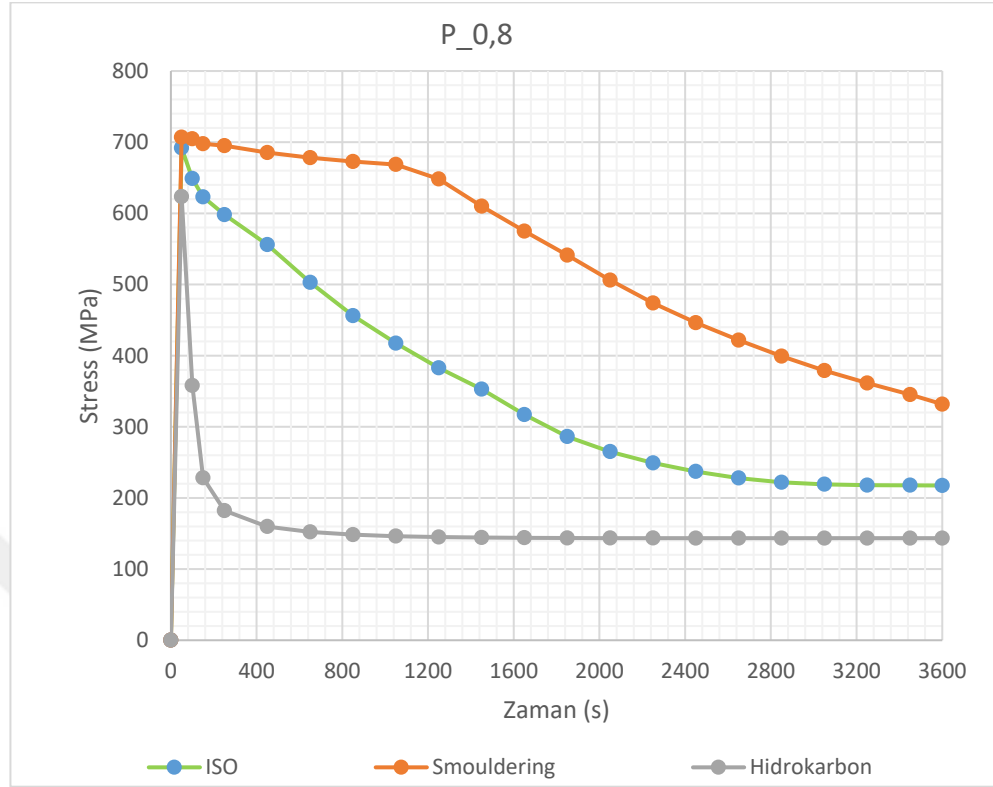
Şekil 4.18’de, 2.0 mm boya kalınlığı ile farklı yangın türlerinin malzeme yüzey sıcaklıklarına etkisi incelenmiştir. Hidrokarbon yangını, hızlı bir şekilde yaklaşık 770°C’ye ulaşmış olmasına rağmen, 2.0 mm boya kalınlığı sayesinde diğer grafiklere kıyasla malzeme yüzey sıcaklıkları daha iyi kontrol edilmiştir. ISO yangını yaklaşık 520°C seviyelerinde sabitlenirken, düşük enerjiye sahip smouldering yangınlarında sıcaklık artışı oldukça yavaş olmuş ve maksimum sıcaklık 430°C seviyelerinde kalmıştır. Bu durum, 2.0 mm boya kalınlığının, özellikle düşük ve orta enerjiye sahip yangınlarda malzemeyi daha etkin bir şekilde koruduğunu göstermektedir. Bu analiz, yangın güvenliği tasarımlarında daha kalın boya katmanlarının yüksek enerjiye sahip yangın türlerinde bile etkili bir koruma sağladığını ve malzeme yüzey sıcaklıklarının kontrol altında tutulmasına katkıda bulunduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.19. Şekil yangın tiplerinin yangın performansına etkisi (boyasız)

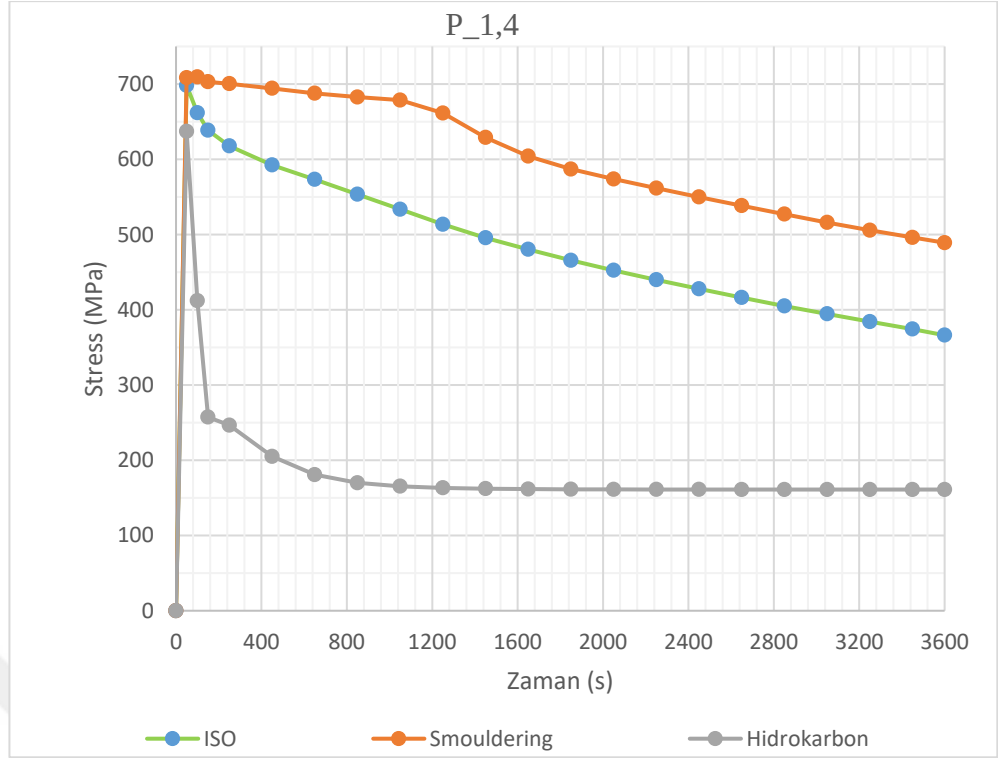
Şekil 4.19’da, boyasız bir malzemenin farklı yangın türlerine karşı sıcaklık artışı üzerindeki tepkisi incelenmiştir. Hidrokarbon yangını, hızlı bir şekilde yaklaşık 1.100°C sıcaklığa ulaşarak en yüksek sıcaklık değerini göstermiş ve koruyucu kaplama olmadan malzemenin yüksek risk altında olduğunu ortaya koymuştur. ISO yangını ise yaklaşık 1.000°C seviyelerinde sabitlenmiş ve bu yangın türünde de boyasız malzemenin yetersiz bir koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Smouldering yangınlarında daha düşük bir sıcaklık artışı görülmüş, ancak yüzey sıcaklıkları yine de zamanla 400-500°C seviyelerine ulaşmıştır. Bu analiz, koruyucu boya veya kaplama kullanılmadan malzemenin yangına karşı dayanıklılığının düşük olduğunu ve bu tür bir malzemenin yangına maruz kalması durumunda ciddi yapısal riskler oluşturabileceğini göstermektedir.

4.2.2. Sabit boya kalınlığında zamana bağlı gerilme değişimleri (von misses)



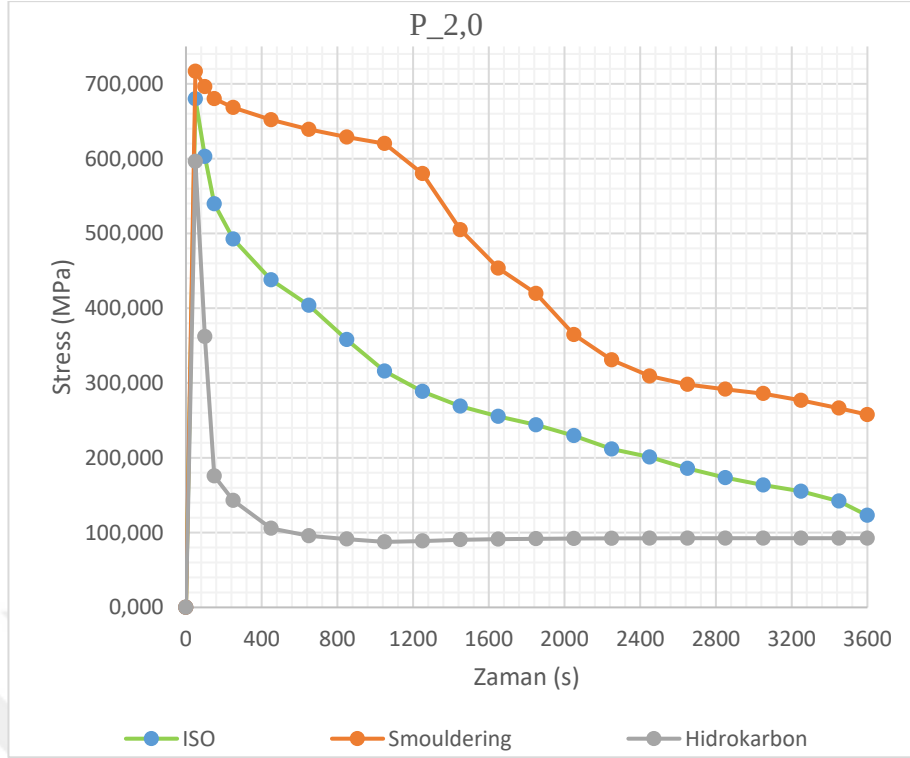
Şekil 4.20. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 0,8)

Şekil 4.20’de, 1,4 yangın koruyucu boya kalınlığına sahip malzemenin değişik yangın koşullarında zamana bağlı zamana bağlı gerilme davranışını karşılaştırmaktadır. ISO-834 yangını koşullarında malzeme hızlı bir gerilme azalımı sonrası stabil bir seviyeye ulaşırken, Smouldering yangını koşullarında azalma daha yavaş gerçekleşmiş ve malzemenin uzun süreli dayanım kapasitesine işaret etmiştir. Hidrokarbon yangını koşullarında ise gerilme değerleri başlangıçta hızla düşerek kısa sürede sabitlenmiştir, bu da yangın ortamının malzeme üzerinde yoğun bir stres yarattığını göstermektedir. Genel olarak, Smouldering koşulu en yüksek dayanıklılığı sergilerken, Hidrokarbon koşulu malzeme üzerindeki en yıkıcı etkileri göstermiştir.



Şekil 4.21. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 1,4)

Şekil 4.21’ de, 1,4 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip malzemenin değişik yangın koşullarında zamana bağlı gerilme davranışını göstermektedir ve farklı test ortamlarının malzeme performansı üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktadır. ISO-834 yangını koşullarında malzemenin gerilme değerleri başlangıçta hızlı bir düşüş göstermiş, ardından daha düşük bir seviyede stabil hale gelmiştir. Smouldering yangını koşullarında ise gerilme azalımı daha yavaş bir eğilim göstermiş ve bu durum, malzemenin tütme ortamında daha yüksek bir dayanıklılığa sahip olduğunu ortaya koymuştur. Hidrokarbon yangını koşullarında gerilme değerleri başlangıçta hızla düşmüş ve kısa sürede sabit bir seviyeye ulaşmıştır; bu da hidrokarbon yangınlarının malzeme üzerinde yoğun bir stres yarattığını göstermektedir. Genel olarak, Smouldering yangını koşullarında en dayanıklı performansı sergilerken, Hidrokarbon yangını koşullarında malzeme üzerinde en yıkıcı etkilere sahip olmuştur.



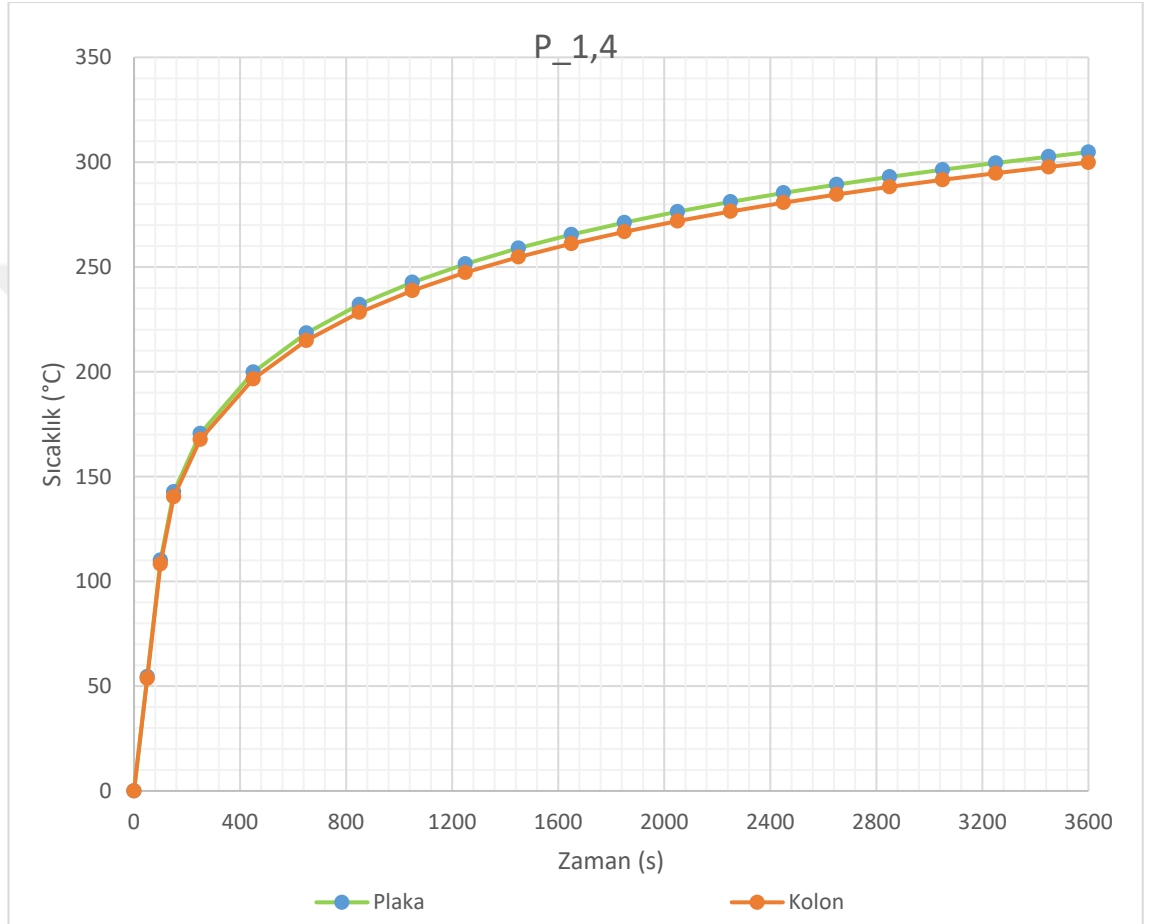
Şekil 4.22. Yangın tiplerinin gerilmelere etkisi (P 2,0)

Şekil 4.22’ de, 2 mm yangın koruyucu boya kalınlığına sahip model değişik yangın koşullarında malzemenin zamana bağlı gerilme davranışını ve farklı test ortamlarının etkilerini analiz etmektedir. ISO-834 yangını koşullarında malzeme, başlangıçta hızlı bir gerilme azalımı sonrası stabil bir seviyeye ulaşırken, Smouldering yangını koşullarında gerilme azalımı daha yavaş gerçekleşmiş ve malzeme daha uzun süre dayanım göstermiştir. Hidrokarbon ortamında ise malzeme, hızlı bir gerilme kaybı yaşamış ve kısa sürede sabit bir seviyeye ulaşmıştır. Smouldering yangını koşullarında en yüksek dayanıklılığı sergilerken, Hidrokarbon ortamı en yıkıcı etkilere neden olmuştur. ISO-834 standardı ise bu iki durum arasında orta düzeyde bir performans sergilemiştir.

Yapılan analizler, farklı yangın koşullarında malzemenin zamana bağlı gerilme davranışını değerlendirmiş ve bu koşulların malzeme dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Smouldering yangını koşullarında, en yüksek dayanıklılığı sergileyerek malzemenin termal kararlılık ve uzun süreli dayanım açısından üstün performans gösterdiğini ortaya koymuştur. ISO-834 yangını koşullarında, stabil bir dayanım seviyesi sunarak orta düzeyde bir performans göstermiştir. Hidrokarbon yangını koşullarında ise başlangıçta hızlı bir gerilme kaybına yol açarak malzeme üzerinde en yıkıcı etkiye neden

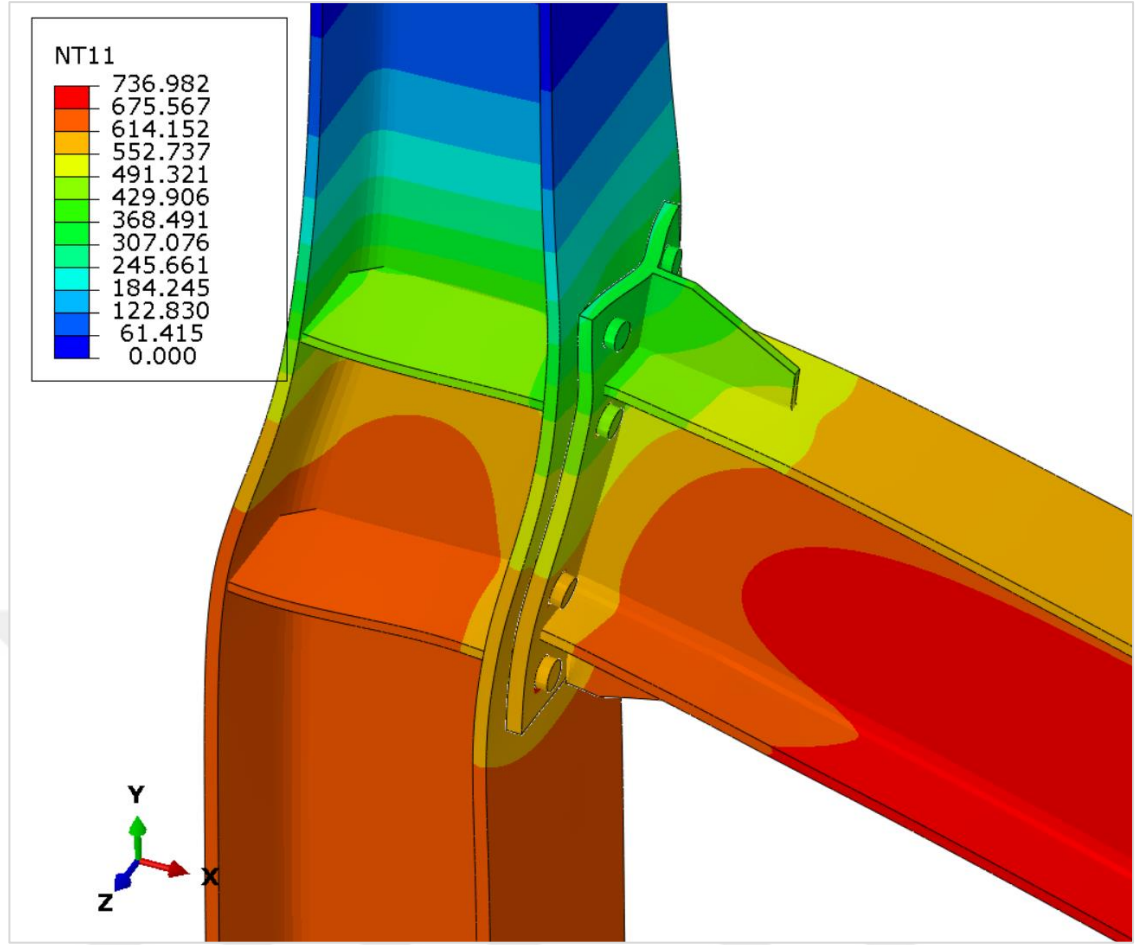
olmuştur. Bu sonuçlar, yangın dayanımı, termal kararlılık ve uzun vadeli mekanik dayanıklılık gibi mühendislik kriterlerinin değerlendirilmesinde önemli bilgiler sunmaktadır.

4.3. Kolon-kiriş sıcaklık iletimi



Şekil 4.23. Kolon kiriş göçme bölgesi sıcaklık iletimi

Şekil 4.23' d, ISO-834 yangın eğrisi altında 1,4 mm kalınlığında yangın önleyici boya kaplaması bulunan birleşim noktasının kolon ve alın plakasının birbirlerine temas eden yüzeylerindeki ısı farklarını göstermektedir. Seçilen noktalar birleşimin arıza modu verdiği ve plakanın kolon yüzeyinden ayrılarak plastik şekil değiştirme yapmaya başladığı nokta seçilmiştir. Zamanla noktalar arasındaki ısı farkı oluşması kolon ve plaka arasındaki temas yüzeyinin zamanla azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.24. Birleşimin tipik göçme modu

Şekil 4.24’de Bütün modellerde göçme modunun tespiti için birleşim göçmeye uğrayana kadar yük arttırılmış, birleşimin benzer tip göçmelere uğradığı tespit edilmiştir. Birleşimler alın plakasının üst ucunun ve kiriş flaş seviyesinden plastik şekil değiştirmeye uğrayarak kolondan ayrılmaya başlaması ve üst bulonların plastik şekil değiştirme akabinde kopmasıyla meydana gelmektedir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, kolon kiriş birleşimlerinin statik yükler yanı sıra pasif yangın koruma malzemesi olarak kullanılan intumesan boyanın kalınlığı gibi önemli parametreler ele alınarak Avrupa Standartlarında belirtilen Standard (ISO 834) ve Smouldering ve hidrokarbon yangın etkileriyle birlikte yangın performansı numerik modeller geliştirilerek incelenmiştir. Yapılan tüm analizler ABAQUS programı yardımıyla yapılmıştır ve sıcaklık sonuçları ve sıcaklık gradyanı (dağılımı) elde edilmiştir. Yapılan analizler ve elde edilen sonuçlar 2 grup olarak verilmiştir. Bunlar;

- 0,8 mm, 1,4 mm ve 2,0 mm olmak üzere 3 farklı pasif yangın koruyucu kalınlığı kullanılmıştır.
- Farklı yangın eğrilerinin kolonun yangın performansını ne ölçüde etkileyeceğini görmek için 3 farklı yangın etkisinde modellemeler yapılmıştır. Bu yangın senaryoları olarak; Standard (ISO 834), Smouldering ve hidrokarbon yangınları geliştirilen modellere etki ettirilmiştir.

Belirtilen tüm parametrelere göre geliştirilen ABAQUS modellerinden elde edilen sonuçlara göre; farklı yangın koşullarına maruz bırakılan çelik yapısal elemanların mekanik ve termal davranışları incelenmiş, özellikle yangın önleyici boya uygulamalarının performansa olan etkileri değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan farklı kalınlıklardaki yangın önleyici boyalar ve boyasız malzemeler arasındaki dayanıklılık farkları, sayısal analizlerle ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, yangın koşullarındaki malzeme davranışlarının, yangına karşı koruma yöntemlerinin etkinliği açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir.

Araştırma sonuçları, yangın önleyici boya kalınlığının çelik elemanların eşdeğer plastik şekil değiştirme seviyeleri ve dayanım süreleri üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Özellikle 2,0 mm kalınlığında yangın önleyici boya ile kaplanmış elemanlar, yüksek dayanım sergileyerek, yangın sırasında uzun süreli mekanik bütünlüğünü koruyabilmiştir. Bunun aksine, boyasız çelik elemanlar, yangına maruz kaldığında hızlı bir şekilde mekanik özelliklerini kaybetmiş ve deformasyonun en yüksek

seviyelere ulaştığı durumları ortaya koymuştur. Bu durum, boyasız elemanların termal yalıtım ve yangın dayanımı açısından ciddi bir zafiyet taşıdığını açıkça göstermektedir.

Farklı yangın eğrileri altında yapılan analizler, yangın önleyici boyaların etkinliğinin sadece malzeme kalınlığına değil, aynı zamanda yangın senaryosunun özelliklerine de bağlı olduğunu ortaya koymuştur. Hidrokarbon yangınları gibi yüksek sıcaklık ve hızlı yükselme eğilimleri sergileyen koşullarda, malzeme deformasyonu daha belirgin olmuş; buna karşın, yangın önleyici boya kaplaması bu deformasyonun şiddetini azaltmada etkili olmuştur. ISO ve tütme yangını koşulları ise nispeten daha düşük deformasyon seviyeleri oluşturmuş, ancak boya kalınlığı ile deformasyon arasındaki korelasyon bu senaryolarda da korunmuştur.

Sonuç olarak, bu çalışma, yangın önleyici boya uygulamalarının çelik yapı elemanlarının termal dayanım ve mekanik performansı üzerindeki olumlu etkilerini doğrulamaktadır. Özellikle yüksek sıcaklık altındaki deformasyonların sınırlandırılmasında boya kaplamalarının önemi vurgulanmıştır. Elde edilen bulgular, yapı tasarımında yangın önleyici stratejilerin, özellikle kritik bağlantı noktaları ve taşıyıcı elemanlarda, etkin bir şekilde uygulanmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Yangın güvenliğine yönelik standartların geliştirilmesinde, bu tür koruyucu uygulamaların dikkate alınması hem yapısal güvenliği artıracak hem de olası can ve mal kayıplarını önlemeye katkı sağlayacaktır.

Bu tez çalışması kapsamında yapılan çalışmaların ve değerlendirmeye alınan parametrelerin gerçek ölçekli kolon yangın testleri yapılması ve sonuçların numerik sonuçlarla karşılaştırılması önerilmektedir. Bu bağlamda, ileride yapılacak çalışmalarda farklı yangın önleyici boya türlerinin ve kaplama kalınlıklarının, farklı çelik alaşımları ile kombinasyonlarının performansını değerlendirmek; ayrıca uzun süreli dayanım testleri ile bu malzemelerin imalat sırasında kaynaklardan oluşan ısı etkileri ile yaşlanma etkilerini analiz etmek, yangın güvenliği alanına önemli katkılar sunacaktır. Çelik yapıların yangına karşı daha dirençli hale getirilmesi ve daha güvenli yaşam alanları oluşturulması için bu tür çok yönlü araştırmalar, bilimsel ve mühendislik perspektifleri açısından önemli bir yol haritası oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- Akduman, S. 2022. Çelik Birleşim Araçlarının Yangın Sonrası Davranışının İncelenmesi. Doktora Tezi, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 381, Zonguldak.
- Aktürk, A. 2022. Farklı Yangın Senaryolarında Çelik Binaların Yapısal Davranışının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Erzurum Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 125, Erzurum.
- Algül, A. 2019. Numerical investigation of structural behaviour of steel frames under fire load. Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 48, Gaziantep.
- Al-Jabri, K., Seibi, A., & Karrech, A. 2006. Modelling of unstiffened flush end-plate bolted connections in fire. Journal of Constructional Steel Research, 62(1-2), 151-159.
- Anonim, 2003. Web Sitesi: <http://www.erkurum.edu.tr>, Erişim Tarihi: 15.08.2024.
- Anonim, 2003. Web Sitesi: <http://www.novo.dk>, Erişim Tarihi: 21/09/2024.
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <http://www.profire.com.tr/intumesan-boya.html> Erişim Tarihi:11.09.2024
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://guvenlikdanismanlik.com/yangin-algilama-ve-alarm-sistemi-parcalari-nelerdir/> Erişim Tarihi:01.11.2023
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://pixabay.com/tr/photos/k%C3%B6pr%C3%BC-%C3%A7elik-per%C3%A7in-s%C4%B1n%C4%B1r%C4%B1-yap%C4%B1-2662692/> Erişim Tarihi:11.09.2024
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://www.intacinsaat.com/celek-yapilarin-incelikleri/> Erişim Tarihi:11.09.2024
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://sistemyapi.com.tr/2020/07/22/yapi-guclendirme/> Erişim Tarihi:11.09.2024
- Cen 2005a. EN 1993-1-1: Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings. BSI: London.
- Cen 2005b. EN 1993-1-2: Eurocode 3. Design of Steel Structures. Part 1.2: General Rules - Structural fire design. BSI: London.
- Cen 2005c. EN 1994-1-2:2005, Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. Part 1-2: General Rules – Structural Fire Design. BSI: London.

- Cen 2013. EN 13381-8:2013 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members. Part 8: Applied reactive protection to steel members. BSI: London.
- Cirpici, B. K., Orhan, S. N. and Kotan, T. 2019. Numerical modelling of heat transfer through protected composite structural members. Challenge Journal of Structural Mechanics, 5(3), 96-107
- Çırpıcı, B.K. 2021, ETÜ Yapıların Yangın Tasarımı Ders Notları, Erzurum.
- Daryan, A. S., Pirmoz, A., Khoei, A. S., & Mohammadrezapour, E. (2009). Moment–rotation behavior of bolted top–seat angle connections. Journal of Constructional Steel Research, 65(4), 973-984.
- Doğan Özberk, D. 2010. Çelik yapılarda pasif yangından koruma yöntemlerinin karşılaştırmalı maliyet analizi. Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 124, Denizli.
- Dündar, U. 2013. Analysis of fire induced forces in steel design. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 138, İstanbul.
- Ekşi, H. 2020. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan çelik T-birleşimlerinin yük deformasyon eğrilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 105, Sakarya.
- EN 13501-2. 2003. Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation service, European Committee for Standardization.
- ENV 1999-1-2:1998, 1998. Eurocode 9: Design of aluminium structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design, European Committee for Standardization.
- Fan, S., Duan, S., Zeng, S., Wu, Y., & Ding, R. (2022). Experimental study and numerical simulation analysis of the Bolted-Welded hybrid connection joint of steel frame under fire. Structures,
- Gao, Y., Yu, H., & Shi, G. (2013). Resistance of flush endplate connections under tension and shear in fire. Journal of Constructional Steel Research, 86, 195-205.
- Hantouche, E. G., & Sleiman, S. A. (2017). Axial restraint forces in shear endplates of steel frames due to fire. Journal of Constructional Steel Research, 128, 528-541.
- ISO, I. O. f. S. 2014. ISO 834-11:2014 Fire resistance tests - Elements of building construction - Part 11: Specific requirements for the assessment of fire protection to structural steel elements.

- Işık, N. (2020). Çelik Endüstri Yapılarının Yangın Güvenliği Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü].
- Kocapınar, S. (2023). Fire protection performance of different industrial intumescent coatings for steel beams [Yüksek Lisans, Özyeğin University].
- Kurnaz, G. (2023). İntümesan yangın boya kalınlığının çelik levhalarda yangın performansına etkilerinin araştırılması
- Lin, S., Huang, Z., & Fan, M. (2014). Modelling partial end-plate connections under fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 99, 18-34.
- Liu, T. (1999). Fire resistance of unprotected steel beams with moment connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 51(1), 61-77.
- Macit, F. 2020. Yangın önleyici boyaların kullanıldığı silindirik kabuklarda basınç yük etkisi altında burkulma davranışlarının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 88, Sakarya.
- Mao, C., Chiou, Y.-J., Hsiao, P.-A., & Ho, M.-C. (2009). Fire response of steel semi-rigid beam-column moment connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 65(6), 1290-1303.
- Özdemir Mazlum, T. 2019. Fire performance of fin plate shear connections modelled with component based method and 3d finite elements. Yüksek Lisans Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 73, İstanbul.
- Petrina, T. (2016). Fire resistance of steel beam to column end plate connections. *Procedia engineering*, 161, 143-149.
- Qiang, X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H., & Jiang, X. (2014a). Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions—Part 1: Experimental study. *Engineering Structures*, 64, 23-38.
- Qiang, X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H., & Jiang, X. (2014b). Behaviour of beam-to-column high strength steel endplate connections under fire conditions—Part 2: Numerical study. *Engineering Structures*, 64, 39-51.
- Qiang, X., Jiang, X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H., & Luo, Y. (2015a). Post-fire behaviour of high strength steel endplate connections—Part 1: Experimental study. *Journal of Constructional Steel Research*, 108, 82-93.
- Qiang, X., Jiang, X., Bijlaard, F. S., Kolstein, H., & Luo, Y. (2015b). Post-fire behaviour of high strength steel endplate connections—Part 2: Numerical study. *Journal of Constructional Steel Research*, 108, 94-102.

- Qiang, X., Shu, Y., & Jiang, X. (2022). Experimental and numerical study on high-strength steel flange-welded web-bolted connections under fire conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 192, 107255.
- Rahnavard, R., & Thomas, R. J. (2018). Numerical evaluation of the effects of fire on steel connections; Part 1: Simulation techniques. *Case Studies in Thermal Engineering*, 12, 445-453.
- Rahnavard, R., & Thomas, R. J. (2019). Numerical evaluation of the effects of fire on steel connections; Part 2: Model results. *Case Studies in Thermal Engineering*, 13, 100361.
- Tuyışime, E. 2022. Performance of space steel structure under fire. Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 92, Bursa.
- Wang, M., & Wang, P. (2013). Strategies to increase the robustness of endplate beam-column connections in fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 109-120.
- Wang, Y., Dai, X., & Bailey, C. (2011). An experimental study of relative structural fire behaviour and robustness of different types of steel joint in restrained steel frames. *Journal of Constructional Steel Research*, 67(7), 1149-1163.
- Wang, Y., et al. 2011. Thermal conductivity of intumescent coating char after accelerated aging. 37(6), 440-456.