



**YANGIN KORUMALI PETEK KİRİŞLERİN
DÖNGÜSEL YÜKLER VE YANGIN ETKİSİ
ALTINDA YAPISAL PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ**

Muhammed Taha AYDIN

Yüksek Lisans Tezi

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

2025

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



YANGIN KORUMALI PETEK KİRİŞLERİN DÖNGÜSEL YÜKLER VE
YANGIN ETKİSİ ALTINDA YAPISAL PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Muhammed Taha AYDIN

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

ERZURUM, 2025

T.C.
ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

YANGIN KORUMALI PETEK KİRİŞLERİN DÖNGÜSEL YÜKLER VE
YANGIN ETKİSİ ALTINDA YAPISAL PERFORMANSLARININ
İNCELENMESİ

Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI danışmanlığında Muhammed Taha AYDIN tarafından hazırlanan bu çalışma 15.12.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (3/3)** kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI
Erzurum Teknik Üniversitesi

İmza

Üye: Doç. Dr. Mahmut KILIÇ
Atatürk Üniversitesi

İmza

Üye: Doç. Dr. Mahyar MAALI
Erzurum Teknik Üniversitesi

İmza

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.

Prof. Dr. İlker KAZAZ
Enstitü Müdürü

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE 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 etik ilkelere uygun davrandığımı ve tezin hazırlanması sürecinde üretken yapay zekâ programlarından, içeriğin ve sonuçların özgünlük sorumluluğunun tarafıma ait olması ve çalışmanın bilimsel niteliğini etkilemeyecek düzeyde, yalnızca yardımcı bir araç olarak sınırlı düzeyde destek alındığını beyan ederim.

15.12.2025

İmzası

Muhammed Taha AYDIN

TEŞEKKÜR

Tez ve test çalışmalarım boyunca engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle yol gösteren, maddi ve manevi destekleriyle güç veren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI'ya şükran borçluyum. Deney aşamasında tecrübelerini paylaşarak çalışmama büyük katkı sağlayan Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALI'ye ve test çalışmalarımda aktif rol alan İnş. Müh. Tevhit KIRMACI'ya ve deney imkanlarını bana sağlayan Erzurum Teknik Üniversitesi'ne teşekkür ederim.

Son olarak, tüm eğitim hayatım boyunca koşulsuz desteklerini ve yardımlarını benden esirgemeyen sevgili anneme ve babama sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Taha AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YANGIN KORUMALI PETEK KİRİŞLERİN DÖNGÜSEL YÜKLER VE YANGIN ETKİSİ ALTINDA YAPISAL PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

Muhammed Taha AYDIN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Burak Kaan ÇIRPICI

Bu çalışmada, IPE 140 ve IPE 200 kesitli çelik kirişlerin yangın sonrasında döngüsel yükler altındaki yapısal performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma kapsamında dolu gövdeli ve petekli kesit tipleri, yangın korumalı ve korumasız durumlar ile berkitmeli ve berkitmesiz üretim koşulları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Numunelere yangın fırını ile yüksek sıcaklık uygulanmış, ardından FEMA tabanlı artan genlikli yükleme protokolü ile moment–dönme ilişkileri, enerji yutma davranışı ve göçme modları belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, petekli kesitlerde gövde yüksekliğinin artırılmasıyla yangın öncesi kapasitenin yükseldiğini, ancak yangın sonrasında boşluk çevresindeki hızlı ısı iletimi nedeniyle mukavemet kayıplarının oluştuğunu göstermiştir. Yangın koruma boyasının numunelerde kritik sıcaklığa ulaşma süresini geciktirdiği, rijitlik kaybını yavaşlattığı ve enerji yutma kapasitesini artırdığı belirlenmiştir. Berkitme uygulanmasıyla açıklık bölgelerinde gerilme dağılımı genişlemiş, göçme mekanizması yerel ve ani stabilite kaybından genel plastik şekil değiştirme davranışına dönüşmüştür. Sonuç olarak kesit geometrisi, yangın koruması ve berkitme şartlarının, döngüsel yükleme altındaki süneklik, taşıma kapasitesi ve göçme güvenliği üzerinde belirleyici olduğu ortaya konmuş; çalışma mevcut literatürde eksik kalan yangın-döngüsel yük kombinasyonunun mühendislik düzeyinde anlaşılmasına katkı sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Petek kiriş, Boya koruması, Yangın, Döngüsel yük, Berkitme levhası

ABSTRACT

MASTER'S THESIS

INVESTIGATION OF THE STRUCTURAL PERFORMANCE OF FIRE-PROTECTED CASTELLATED BEAMS UNDER CYCLIC LOADS AND FIRE EFFECTS

Muhammed Taha AYDIN

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 post-fire structural performance of IPE 140 and IPE 200 steel beams under cyclic loads was experimentally investigated. Within the scope of the study, solid web and castellated section types, fire-protected and unprotected states, and stiffened and unstiffened production configurations were comparatively evaluated. The specimens were subjected to high temperatures using a fire furnace, followed by the determination of moment–rotation relationships, energy dissipation behaviors, and failure modes using a FEMA-based increasing amplitude loading protocol. The findings indicated that while increasing the web depth in castellated sections enhanced the pre-fire capacity, significant strength losses occurred post-fire due to rapid heat conduction around the web openings. It was determined that fire-protective paint delayed the time to reach critical temperatures in the specimens, retarded stiffness degradation, and increased energy dissipation capacity. The application of stiffeners expanded the stress distribution in the opening regions, causing the failure mechanism to evolve from sudden local instability to global plastic deformation behavior. Consequently, it was demonstrated that section geometry, fire protection, and stiffener conditions are decisive factors for ductility, load-bearing capacity, and failure safety under cyclic loading. This study contributes to the engineering understanding of the combined fire–cyclic loading effects, addressing a gap in the existing literature.

Keywords: Castellated beam, Paint protection, Fire, Cyclic load, Stiffener plate

İÇİNDEKİLER

ÜRETKEN YAPAY ZEKÂ VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI	i
TEŞEKKÜR	ii
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	iv
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin önemi ve amacı.....	1
1.2. Çelik Yapılar ve Yangın Güvenliği.....	2
1.3. Yangının oluşumu ve Gelişimi.....	3
1.4. ISO 834 Standard Yangın Eğrisi.....	3
1.5. Yangın Koruma Yöntemleri.....	4
1.5.1. Aktif Yangın Koruma Sistemleri.....	5
1.5.2. Pasif Yangın Koruma Sistemleri	5
1.6. Petek Kirişler ve Yapısal Sistemlerde Tercih Edilme Nedenleri	7
1.7. Yangın ve Döngüsel Yük Altında Davranış ve Göçme Modları.....	9
1.7.1. Yangın Etkisi Altında Malzeme Davranışı.....	10
1.7.2. Döngüsel Yüklerin Etkisi	11
1.7.3. Koruyucu Boyanın Etkisi	12
1.7.4. Süneklik ve Enerji Yutma.....	15
2. KAYNAK ÖZETLERİ	17
3. MATERYAL METOD VE YÖNTEM.....	28
3.1. Araştırmaya Esas Taşıyıcı Elemanlar ve Kapsam.....	28
3.1.1. Araştırmaya Grubu ve Numune Nitelikleri	28
3.2. Malzeme Özellikleri ve Yangın Etkisine Hazırlık	29
3.2.1. Kullanılan Çelik ve Petek Kiriş Üretimi.....	29
3.2.2. Yangın Koruma Boyası Özellikleri ve Uygulaması	31
3.2.3. Yangın Fırını ve Yangına Maruziyet.....	33

3.3. Deneylerde Kullanılan Aletler.....	36
3.3.1. Hidrolik Dinamik Aktüatör.....	36
3.3.2. Deformasyon Ölçme Cihazları (LVDT'ler).....	37
3.3.3 Veri Toplama ve Kaydetme Sistemi (Data Logger).....	38
3.4. Deney Düzenegi	39
3.5. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri	42
3.5.1. FEMA-350 Yükleme Protokolü [2].....	42
3.5.2 Diğer Döngüsel Yükleme Protokolleri	44
3.5.3. FEMA-350'nin Bu Çalışmadaki Avantajları.....	46
4. DENEYSEL VERİLERİN YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRMA	47
4.1. Numunelerin Karşılaştırılması	47
4.1.1. Berkitme Etkisi	48
4.1.2. Petek Etkisi	54
4.1.3. Boya Koruma Etkisi	58
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	70
5.1. Sonuç	70
5.2. Öneriler.....	72
KAYNAKÇA	74

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Petek giriş türlerinin karşılaştırılması	9
Tablo 2. Karşılaştırmalı performans	14
Tablo 3. Deneysel çalışma kapsamındaki numuneler ve özellikleri	29
Tablo 4. Boya korumasına esas malzeme özellikleri	32
Tablo 5. Deney düzeneği elemanları	41
Tablo 6. Deneysel çalışma kapsamında karşılaştırılan numune özellikleri ve deney sonuçları.....	47

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Petek kiriş imalatı	30
Şekil 2. Kiriş Numunelere koruma boyası uygulanması	32
Şekil 3. Yangın fırını sıcaklık-zaman eğrisi (ISO 834) [1].....	34
Şekil 4. (a) Yangın fırını içindeki korumasız numuneler (b) Yangın fırını panosu.....	35
Şekil 5. (a) Fırından önce boyasız numuneler (b) Fırından sonra korumasız numuneler	35
Şekil 6. (a) Yangın deneyi öncesi boya korumalı numuneler (b) Yangın deneyi sonrası boya korumalı numuneler	36
Şekil 7. Hidrolik dinamik aktüatör	37
Şekil 8. Deformasyon ölçme cihazı (LVDT).....	38
Şekil 9. Data logger veri kayıt cihazı.....	38
Şekil 10. Deney düzeneği (a) Soldan görünüş, (b) Önden görünüş, (c) Sağdan görünüş	40
Şekil 11. Numuneler (a) IPE 140 petekli-berkitmeli, (b) IPE 140 petekli, (c) IPE 140 saf.....	41
Şekil 12. Numuneler (a) IPE 200 petekli-berkitmeli, (b) IPE 200 petekli, (c) IPE 200 saf.....	42
Şekil 13. FEMA-350 yükleme protokolü [2]	44
Şekil 14. ATC-24 yükleme protokolü [10]	45
Şekil 15. FEMA- 461 yükleme protokolü [3]	45
Şekil 16. IPE 140-P-BK-Y numunesine ait deney sonuçları	49
Şekil 17. IPE 140-P-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	49
Şekil 18. IPE 140-P-B-BK-Y numunesine ait deney sonuçları	50
Şekil 19. IPE 140-P-B-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	50
Şekil 20. IPE 200-P-BK-Y numunesine ait deney sonuçları	52
Şekil 21. IPE 200-P-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	52
Şekil 22. IPE 200-P-B-BK-Y numunesine ait deney sonuçları	53
Şekil 23. IPE 200-P-B-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	53
Şekil 24. IPE 140-BK-Y numunesine ait deney sonuçları.....	55
Şekil 25. IPE 140-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı	56

Şekil 26. IPE 200-BK-Y numunesine ait deney sonuçları.....	57
Şekil 27. IPE 200-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı	58
Şekil 28. IPE 140-P-Y numunesine ait deney sonuçları	59
Şekil 29. IPE 140-P-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	60
Şekil 30. IPE 140-P-B-Y numunesine ait deney sonuçları	61
Şekil 31. IPE 140-P-B-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	62
Şekil 32. IPE 140-Y numunesine ait deney sonuçları.....	63
Şekil 33. IPE 140-Y numunesine ait göçme modu davranışı	64
Şekil 34. IPE 200-P-B-Y numunesine ait deney sonuçları	65
Şekil 35. IPE 200-P-B-Y numunesine ait göçme modu davranışı.....	66
Şekil 36. IPE 200-P-Y numunesine ait deney sonuçları	67
Şekil 37. IPE 200-BK-Y numunesine ait deney sonuçları.....	68
Şekil 38. IPE 200-Y numunesine ait deney sonuçları.....	69

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

kN	Kilonewton
kNm	Kilonewton Metre
kNm.rad	Kilonewton Metre Radyan
m	Metre
rad	Radyan
°	Derece
µm	Mikro Metre
P _{max}	Maksimum Yük
FEMA	Federal Emergency Management Agency
LVDT	Linear Variable Differential Transformer (Deformasyon Ölçme Cihazı)
LTB	Lateral Torsional Buckling (Yanal Burulmalı Burkulma)
FE	Finite Element (Sonlu Elemanlar)
RWS	Reduced Web Section (Düşürülmüş Gövde Kesiti)
RBS	Reduced Beam Section (Düşürülmüş Kiriş Kesiti)
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Polymer (Karbon Fiber Takviyeli Polimer)
CCSB	Composite Castellated Steel Beam (Kompozit Petekli Çelik Kiriş)

1. GİRİŞ

Günümüz inşaat mühendisliğinde yapı elemanlarının taşıyıcılık görevini yerine getirmesi ile, güvenlik, ekonomik verimlilik, dayanıklılık, kullanılabilirlik gibi kriterleri de karşılaması elzemdir. Bu doğrultuda, çelik yapılar; yüksek mukavemetleri, hafiflikleri, hızlı inşa edilebilmeleri ve geri dönüştürülebilir yapı elemanlarına sahip olmaları açısından modern inşaat sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Çelik yapı sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla geliştirilen petek kirişler, özellikle ölü yüklerinin daha az olması ve ortaya koydukları moment taşıma kapasiteleri açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Ayrıca petek kirişler; yapılarda büyük açıklıkların geçilmesinde, mimari estetiğin sağlanmasında, mekanik, elektrik ve mimari imalatların birbirlerine karşı esnekliği ve tamamlayıcılığı sağlaması durumlarına imkân verdiğinden dolayı modern yapı sistemlerinde daha sürdürülebilir ve kullanışlı çözümler arasında kendisine yer bulmaktadır. Bu yapı elemanlarının günümüz inşaat teknolojisindeki karşılığı göz önünde bulundurularak çeşitli sınır koşullara ve yükleme durumlarına maruz kalmaları durumu düşünülerek ortaya koyulacak tasarım kriterleri, yapısal performans ve yapı güvenliği açısından çok büyük bir öneme sahiptir. Günümüzde doğal ve insan kaynaklı afetlerin yapılara olan etkisi üzerine yapılan çalışmalar, gelişen inşaat teknolojisi ile birlikte düşünüldüğünde çok daha çeşitli seviyelere ulaştırabilmektedir. Bu minvalde petek kirişlerin çeşitli dinamik yükler (rüzgâr, deprem, titreşim) ve yangın sonrası oluşan artık gerilmeler altındaki davranışı, yapısal güvenlik açısından tam olarak aydınlatılması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışma, çeşitli kesitlere ve tasarım kriterlerine sahip petek kirişler ve dolu gövdeli kirişlerin, yangın koruma durumuna sahip olması ile döngüsel yükler ve yangın etkisi altındaki yapısal performanslarını deneysel çalışmalarla inceleyerek, ortaya konan çeşitli kriterleri bu bağlamda meydana gelen sonuçlarla birlikte değerlendirerek, ilgili kirişlerin yapısal performanslarının mukayese edilmesini amaçlanmaktadır.

1.1. Tezin önemi ve amacı

Bu çalışmada, IPE140 ve IPE200 kesitli çelik kirişlerin yangın etkisine maruz kalmasını takiben döngüsel yükler altındaki yapısal davranışları ve göçme modları incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, yangına maruz bırakılan kirişlere yangın koruması amacıyla boya koruması uygulanmış ve bu koruma şartları altında elde edilen

davranışlar benzer deneysel çalışmalarda ortaya konan diğer kirişlere karşı referans alınmıştır. Ayrıca, dolu gövdeli kirişler ile altıgen boşluklu petek kirişlerin yangın sonrası döngüsel yüklere maruz kalması durumunda ortaya çıkan yapısal performansları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Petek kirişlerin yapısal davranışına ve göçme modlarına doğrudan etki eden bir diğer imalat özelliği olarak, gövdede yer alan berkitme levhalarının olup olmama durumu (berkitmeli ve berkitmesiz numuneler) deneysel çalışma dahilinde ele alınmıştır. Böylece, yangın koruma durumu, kesit tipi ve berkitme levhası koşullarının ilgili kirişler üzerindeki yapısal davranışı, enerji yutma kapasitesi, sünekliliği ve göçme mekanizmaları üzerindeki etkileri genel olarak incelenmiştir. Bu çalışma, petek kirişlerin aynı anda maruz kaldığı yangın durumu ve dinamik döngüsel yükleme koşullarını bir arada değerlendirerek ilgili tüm literatürlerdeki sınırlılığa alternatif oluşturmuş ve günümüz şartlarında değerlendirilmesi elzem olan bu kriterleri makul bir düzeyde çalışma sahasına kavuşturmuştur.

1.2. Çelik Yapılar ve Yangın Güvenliği

Çelik, inşaat sektöründe en çok tercih edilen taşıyıcı malzemelerden biridir. Yüksek mukavemeti, hafifliği, kolay montaj imkânı ve geri dönüştürülebilir yapısı sayesinde özellikle sanayi yapılarında, yüksek katlı binalarda ve köprülerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak çeliğin sahip olduğu bu avantajlar, yangın gibi yüksek sıcaklık ortamlarında zayıf kalan davranış özellikleri nedeniyle bazı güvenlik risklerini de beraberinde getirmektedir.

Çeliğin sıcaklığı arttıkça mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelir. Özellikle 400 °C sıcaklıktan sonra elastik modülünde, 500–600 °C aralığında ise akma mukavemetinde ciddi düşüşler oluşur. Yaklaşık 600 °C'den sonra çelik taşıyıcı sistemlerin yük taşıma kapasitesinin %50'den fazlası kaybolabilir. Bu durum, yangın anında yapıların aniden göçme riskiyle karşı karşıya kalmasına neden olabilir.

Yangın anında çelik yapıların ani olarak ısıya maruz kalması, sıcaklık gradyanları ve genleşme durumu sebebiyle hem boyutsal deformasyonlara hem de stabilite kayıplarına yol açar. Bu da yapının göçmesini hızlandıran bir önemli etkenlerdendir. Bu nedenle, yangın güvenliği açısından çelik yapıların yangına karşı dayanımı artırılmalı ve pasif yangın koruma sistemleri ile desteklenmesi sağlanmalıdır.

Yangın güvenliği yalnızca insanların tahliyesi açısından değil, aynı zamanda yapıların göçmesini engellemek ve can kaybını azaltmak açısından da temel bir

mühendislik sorunudur. Bu bağlamda, çelik yapıların yangına karşı korunmasında yapısal tasarım kriterleri, yangına karşı koruma sistemleri ve detay mühendisliği önemli bir rol oynar.

1.3. Yangının oluşumu ve Gelişimi

Yangın, kontrolsüz şekilde gelişen oksidasyon reaksiyonları sonucu ısı ve alevin açığa çıkmasıyla oluşan bir olaydır. Yapısal yangınlar genellikle organik malzemelerin (ahşap, mobilya, plastik, tekstil ürünleri vb.) tutuşturulmasıyla başlar. Yangının oluşabilmesi için üç temel unsur gereklidir: yanıcı madde, oksijen ve ısı. Bu üçlü yapı “yangın üçgeni” olarak adlandırılır.

Yangın başladığında gelişim süreci genel olarak dört ana evre ile açıklanır:

Başlangıç Evresi: Tutuşma ile düşük seviyede ısının ve dumanın açığa çıktığı evredir. Müdahale için en uygun zaman dilimidir.

Gelişme Evresi: Yangının büyüyerek daha fazla oksijen ve yakıtı tükettiği, sıcaklığın hızla arttığı evredir. Isı, 500 °C ve üzerine çıkar.

Tam Gelişmiş Evre: Yangın tüm ortama yayılmıştır. Bu aşamada sıcaklık en yüksek seviyededir (800–1000 °C arası olabilir). Çelik yapılar için en tehlikeli evredir.

Sönme Evresi: Yakıtın tükenmesi veya yangına karşı müdahale sonucunda alevlerin kontrol altına alınarak sıcaklığın düşmeye başladığı evredir.

Yangının gelişimi, bulunduğu ortamdaki malzeme cinsi, havalandırma durumu ve iç hacmin büyüklüğüne göre farklılık gösterebilir. Özellikle kapalı ortamlarda, sıcaklık çok kısa sürede ciddi seviyelere ulaşabilir. Bu da yapı malzemelerinde hızlı bozulmaya ve taşıyıcı sistemlerin zayıflamasına neden olur.

Bu bağlamda yangın davranışının anlaşılması, çelik yapıların yapısal performans içerikli tasarımı açısından büyük önem taşımaktadır. Isının zamanla değişimi ve bu sıcaklıkların çelik malzeme üzerindeki etkisi, yangın dayanım hesaplarında temel esas olarak alınmalıdır.

1.4. ISO 834 Standard Yangın Eğrisi

Yangın testlerinin uluslararası geçerliliğe sahip olması ve yapı malzemelerinin yangına dayanımının karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmesi için standart yangın

eğrileri geliştirilmiştir. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı ISO 834 yangın standardıdır.

ISO 834, zamanla artan sıcaklığı tanımlayan matematiksel bir eğri sunar. Bu eğri, tam gelişmiş bir yapı yangınına temsil etmek amacıyla oluşturulmuştur ve yangın simülasyonlarında referans eğri olarak kullanılır. Eğrinin temel amacı, yangın esnasında sıcaklığın belirli bir süre boyunca çelik malzeme üzerindeki etkisini değerlendirebilmektir.

ISO 834 standardına göre sıcaklık-zaman ilişkisi aşağıdaki formülle ifade edilir [1]:

$$T_f = 20 + 345 \log (8t + 1) \quad (1)$$

Burada:

T_f : Yangın sıcaklığı (°C)

t : Geçen süre (dakika)

Bu formüle göre sıcaklık, yangının ilk dakikalarında hızla artar ve ilk 30 dakikada 800–900 °C seviyelerine ulaşabilir. Bu durum, yangının başlangıcından kısa bir süre sonra çelik yapının taşıma kapasitesinin ciddi bir şekilde düşmesine neden olur. ISO 834 yangın eğrisi, çelik yapı elemanlarının yangına dayanım süresini belirlemek için kullanılır. Örneğin, bir çelik kirişin 60 dakika yangına dayanması isteniyorsa, bu eğriye göre ne tür bir koruma uygulanması gerektiği belirlenebilir.

Yangın mühendisliği tasarımlarında, ISO 834 eğrisi dışında hidrokarbon yangın eğrileri (petrokimya tesislerinde) gibi alternatifler de kullanılmaktadır. Ancak yapı mühendisliği bağlamında en yaygın referans, ISO 834'tür.

1.5. Yangın Koruma Yöntemleri

Çelik yapıların yangına karşı korunması, yapısal bütünlüğün ve taşıma kapasitesinin yangın süresince belirli bir süre korunmasını sağlamak amacıyla yapılır. Yangın koruma sistemleri, yangının yapıya olan olumsuz etkisini yavaşlatmak, taşıyıcı sistemlerin yapısal stabilitesini artırmak ve tahliye süreci için zaman kazandırmak gibi hayati görevler üstlenir.

Yangın koruma yöntemleri genel olarak iki ana gruba ayrılır:

1.5.1. Aktif Yangın Koruma Sistemleri

Aktif sistemler, yangının erken algılanması ve söndürülmesini sağlayan dinamik müdahale yöntemleridir. Yangın başladığında devreye girerler ve yangının yayılmasını durdurmaya çalışırlar. Bunlara örnek olarak:

- Yangın algılama sistemleri: Duman, ısı veya alev detektörleriyle yangının erken tespiti sağlanır.
- Yangın alarm sistemleri: Ortamdaki kişileri tahliyeye yönlendiren sesli ve görsel uyarı sistemleridir.
- Sprinkler sistemleri: Tavanlara monte edilen su püskürtme başlıklarıyla otomatik söndürme sağlar.
- Gazlı söndürme sistemleri: Elektriksel donanımların bulunduğu alanlarda su kullanılmadan yangın söndürme sağlar.

Bu sistemler genellikle insan müdahalesi olmadan otomatik çalışırlar ve yangının yayılmasını fiziksel olarak durdurmayı amaçlarlar. Ancak yangın durumunda sadece aktif sistemlere güvenmek yeterli değildir; yangına karşı pasif koruma sistem ve yöntemleriyle yapısal taşıyıcıların güvenliği desteklenmelidir.

1.5.2. Pasif Yangın Koruma Sistemleri

Pasif yangın koruma sistemleri, yangın sırasında yapı elemanlarının ısıya karşı dayanım süresini artırmayı hedefler. Bu sistemler yangını söndürmez ancak yangının taşıyıcı eleman üzerindeki olumsuz etkilerini sınırlar ve yapının yangına karşı dayanım süresini uzatır. En çok kullanılan pasif yöntemler:

- Yangına karşı dayanıklı kaplama malzemeleri (alçı levha, çimento bazlı kaplamalar)
- Yangın perdeleri veya yangın kapıları
- Isı yalıtım sistemleri
- Yangın boyaları (özellikle intumescent – intümesan kaplamalar)

Pasif sistemler sayesinde, çelik taşıyıcıların sıcaklık artışı yavaşlatılır ve ani göçmelerin önüne geçilir. Özellikle yangın yalıtım kaplamaları ve boyalar, hafif olmaları ve estetik görünümü bozmamaları sebebiyle modern yapılarda yaygın olarak tercih edilmektedir.

1.5.2.1 Boya ile Yangın Koruması

Yangın koruma boyaları, özellikle çelik yapı elemanlarında pasif yangın dayanımını artırmak amacıyla kullanılan en yaygın yöntemlerden biridir. Hafif, estetik ve kolay uygulanabilir olmaları nedeniyle modern yapılarda yaygınlıkla tercih edilirler. Bu boyalar, yangın sırasında çeliğin ısı kazanımını geciktirerek, taşıma kapasitesinin belirli bir süre korunmasını sağlar.

Yangın koruma boyaları temelde iki sınıfa ayrılır:

1. İnorganik Yangın Boyaları: Seramik esastır. Genellikle kalın tabaka şeklinde uygulanır ve yüksek sıcaklıkta bile formunu korur. Mekanik darbelere karşı daha dayanıklıdır ancak daha ağırdır.

2. Organik (İntümesan) Yangın Boyaları: En yaygın kullanılan türdür. Yangınla karşılaştığında şişerek kalın bir karbon köpük tabakası oluşturur ve yalıtım görevi yapar. Estetik açıdan avantajlı olup, inşaat sonrası da uygulanabilir.

İntümesan boyalar, uygulandıkları yüzeyde 200–250 °C sıcaklığa ulaşıldığında şişme reaksiyonu başlatır. Şişme sonucunda oluşan karbonlu köpük tabakası, ısı iletkenliğini büyük ölçüde düşürerek alttaki çelik yüzeyin sıcaklık artışını yavaşlatır. Bu sayede çeliğin ısıl kapasitesi korunur ve taşıyıcı sistemin dayanım süresi uzatılır.

Yangın boyalarının sağladığı koruma süresi, uygulama kalınlığına, çevresel koşullara ve yangın türüne bağlı olarak 30, 60, 90 veya 120 dakika gibi sürelerle sınıflandırılır. Avrupa Birliği normlarında (EN 13381-4) ve Türkiye’deki yangın yönetmeliklerinde, boyaların performans testlerine göre sınıflandırılması zorunludur.

Bu boyalar, özellikle yangın sonrası da taşıyıcılığın sürdürülebilmesi gereken yapılarda, diğer yalıtım yöntemlerine göre büyük avantaj sunar.

1.5.2.2 Boyaların Çalışma Mekanizması

Yangın koruma boyalarının etkisi, yalnızca yüzeye uygulandıklarında değil, aynı zamanda yangınla karşılaştıklarında aktif hale gelen bir kimyasal dönüşüme dayanır. Özellikle intümesan boyalar (şişen boya sistemleri), yangın anında meydana gelen kimyasal termoreaksiyonlarla çeliği yüksek sıcaklıklardan koruma görevini üstlenir.

Bu mekanizma temelde üç ana aşamadan oluşur:

1. Dehidrasyon (Su Kaybı ve Köpük Oluşumu):

Boyanın içerisinde bulunan ısıya duyarlı katkı maddeleri, belirli sıcaklık değerlerine ulaşıldığında parçalanarak su buharı ve gazlar açığa çıkarır. Bu buharlaşma, boyanın hacmen genleşmesine neden olur.

2. Karbonlaştırma:

Açığa çıkan gazlar ile, boya içerisindeki karbon içeren bileşenler kömürleşerek köpük benzeri bir karbon tabakası oluşturur. Bu tabaka genellikle orijinal boya kalınlığının 20–40 katı kadar kalınlığa ulaşabilir.

3. Yalıtım ve Koruma:

Şişerek hacim kazanmış karbon köpüğü tabakası, ısı iletim katsayısı son derece düşük bir bariyer görevi görür. Çelik yüzeyle yangın arasındaki ısı geçişini ciddi şekilde azaltır ve yapının göçmesini geciktirir. Bu etki sayesinde çelik sıcaklığının 500–600 °C üzerine çıkması belirli süreyle engellenmiş olur.

Boyanın etkinliği;

- Uygulama kalınlığına,
- Yangın eğrisine (ISO 834 vb.),
- Ortam nemi, UV maruziyeti ve hava koşullarına

bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Bu nedenle yangın boyalarının performansı standart yangın testleri ile belirlenmeli ve düzenli olarak kontrol edilmelidir.

Yangın sırasında bahsedilen bu mekanizma sayesinde çelik taşıyıcı elemanlar, normalde birkaç dakikada ulaşabilecekleri göçme sıcaklıklarına karşı 30 ila 120 dakika arasında ek dayanım kazanabilirler. Bu da tahliye süreci, itfaiye müdahalesi ve yapı güvenliği açısından çok önemlidir.

1.6. Petek Kirişler ve Yapısal Sistemlerde Tercih Edilme Nedenleri

Petek kirişler, I tipi çelik profillerin gövdelerinin belirli geometrilerde kesilip yükseltilerek tekrar birleştirilmesiyle oluşturulan, gövdesi boşluklu taşıyıcı elemanlardır. Gövdelerinde var olan açıklıklar sayesinde hem yapısal imalatların birbiri ile uyumu hem de mimari estetik açıdan çeşitli avantajlar sunmaktadır.

Petek kiriş imalatlarında uygulanan kes-yükselt yöntemi, kirişin gövde yüksekliğini yaklaşık %50 oranında artırır. Bu artış, kesitteki atalet momentinin

yükselmesine ve eğilmeye karşı gösterilen direncin artmasına sebep olur. Böylece aynı miktarda çelik malzeme kullanılarak daha yüksek taşıma kapasitesine ulaşılır ve malzeme verimliliği artırılmış olur.

Gövde üzerinde oluşturulan açıklıklar, kirişin ölü yükünü azaltmakla beraber, havalandırma kanalları, elektrik tesisatları ve sprink hatları gibi elektrik ve mekanik imalatların kiriş içinden geçmesine imkân tanır. Petek kirişler, tüm bu bahsedilen özelliklerinin sonucu olarak mimari, elektrik ve mekanik imalatların bir arada uygulanabilmesi, çeşitli statik ve dinamik koşullara karşı istenilen yapısal taşıyıcılık kriterlerini sağlaması sebebiyle birtakım yapılarda özellikle tercih edilmektedir. Endüstriyel yapılar, AVM'ler ve büyük açıklıklı ofis yapıları bu yapılara örnek verilebilir.

Petek kirişlerin mimari estetik açısından değerlendirilmesi hususuna binaen altıgen, dairesel veya eliptik açıklık tipleri tercih edilmektedir. Bu açıklıklar ile petek kirişler aynı zamanda daha uzun açıklıkların geçilmesine olanak sağlar. Bu nedenle kolon sayısının azaltılması istenen salon, spor tesisi veya üretim alanı gibi yapılarda verimli bir çözüm sunarak yapı kullanışlılığına katkı sağlar.

Tüm bu hususlarla birlikte, petek kirişlerin tasarımında göz önünde bulundurulması gereken ve yapısal performansı etkileyen birtakım riskler söz konusudur. Açıklık kenarlarında oluşan gerilme yığılmaları, gövde burkulması riskleri, döngüsel yükler altındaki yorulma davranışı ve yangın koşullarında oluşabilecek göçme mekanizmaları bu kirişlerin yapısal performansını doğrudan etkileyebilir. Ayrıca yangın koşullarında şişen boya uygulamalarının açıklık kenarlarında homojen dağılıp dağılmaması, yapısal davranış üzerinde kritik bir rol oynayan başka bir etmendir.

Sonuç olarak, petek kirişler; daha verimli malzeme kullanımı ile yük taşıma kapasitesinin artırılması, tesisat ve elektrik imalatların uyumluluğu, estetik görünüm ve uzun açıklık geçişi gibi çok yönlü avantajları nedeniyle tercih edilen yapısal elemanlardır. Ancak bu avantajların güvenli şekilde kullanılabilmesi için imalat hassasiyeti, açıklık geometrisinin doğruluğu ve yangın koruma detayları değerlendirilirken dikkatli olunmalıdır.

Petek kiriş türleri arasında seçim yapılırken gerilme dağılımı, üretim zorlukları, tesisat geçirgenliği, yangın koruma uyumu ve maliyet gibi kriterler belirleyicilik açısından ana unsurlardır. Aşağıdaki tabloda, yangına maruziyet durumunda boya

koruması uygulanabilecek nitelikte olan petek kiriş türlerinin temel özellikleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir.

Tablo 1. Petek kiriş türlerinin karşılaştırılması

Özellikler	Altıgen Kirişler	Dairesel (Cellular) Kirişler	Diğer Türler (Eliptik vb.)
Gerilme dağılımı	Dengeli	Çok iyi	Değişken / Lokal yoğunluk
Üretim kolaylığı	Kolay (standart)	Orta (CNC gerekir)	Zor (özel kesim)
Estetik görünüm	Tercih edilebilir	Tercih edilebilir	Tercih edilebilir
Tesisat geçirgenliği	İyi	İyi	Projeye bağlı
Yangın koruma boyasına uyum	Yüksek	Orta	Düşük / karmaşık
Burkulma–göçme riski	Orta	Düşük	Noktasal riskli
Maliyet	Ekonomik	Orta–yüksek	Yüksek
Analiz kolaylığı	Kolay	Orta	Karmaşık

Bu tablo, projeye en uygun petek kiriş türünün belirlenmesinde önemli kriterler sunmaktadır. Örneğin; yangın boyası uygulama uyumu ve üretim kolaylığı açısından altıgen kirişler tercih edilirken, estetik gereksinimler ve yüksek tesisat yoğunluğu olan yapılarda dairesel kirişler daha uygun çözümler sunmaktadır. Mimari yaklaşımların daha spesifik olduğu özel projelerde ise eliptik veya serbest formda açıklıklı kirişler kullanılabilir.

1.7. Yangın ve Döngüsel Yük Altında Davranış ve Göçme Modları

Petek kirişler, boşluklu yapıları ve artırılmış kesit yükseklikleri sayesinde taşıma kapasitesi bakımından avantaj sağlarken, yangın ve döngüsel yük etkileri altında karmaşık yapısal davranışlar sergileyebilirler. Bu etkilerin birleşimi hem malzeme seviyesinde hem de sistem düzeyinde performans kayıplarına yol açabilir.

Yangın ve döngüsel yüklerin birlikte etkili olduğu senaryolar, özellikle endüstriyel yapılar, deprem sonrası yangın riski bulunan sistemler ve enerji tesisleri gibi zorlayıcı çevre koşullarına sahip yapılarda kritik öneme sahiptir.

1.7.1. Yangın Etkisi Altında Malzeme Davranışı

Çelik, mühendislikte yüksek dayanımı, şekil alma kabiliyeti ve süneklik özellikleri sayesinde tercih edilen bir malzemedir. Ancak bu avantajlı özellikler, yüksek sıcaklıklarda önemli ölçüde zayıflar. Yangın etkisi altında çeliğin mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler, yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir.

1.7.1.1. Akma Gerilmesinde Azalma

Çelik, 400 °C'nin üzerinde akma gerilmesini hızla kaybetmeye başlar.

- 500 °C'de akma gerilmesi yaklaşık %50 azalır.
- 600–650 °C aralığında ise malzeme, neredeyse taşıma kabiliyetini kaybeder.

Bu sıcaklıklar ISO 834 yangın eğrisine göre yangının ilk 20–30 dakikasında oluşabilir.

1.7.1.2. Elastik Modülde Düşüş

Elastik modül (E) değeri sıcaklıkla birlikte azalır.

- Bu, çeliğin rijitliğinin azalmasına ve deformasyonların artmasına neden olur.
- 600 °C'de elastik modül başlangıç değerinin %30–35'ine kadar düşebilir.

1.7.1.3. Termal Genleşme ve Geometrik Stabilite

Çelik ısındıkça boyutsal olarak genleşir.

Bu genleşme;

- Yapı bileşenleri arasında ek gerilmeler doğurur
- Ankastre veya kısıtlı sistemlerde termal itmeler ve burkulmalar meydana getirir.

Bu durum özellikle bağlantı detaylarında ve gövdesi boşluklu sistemlerde (örneğin petek kirişlerde) daha belirgin hale gelir.

1.7.1.4. Yangın Süresi ve Malzeme Hasarı

Yangın ne kadar uzun sürerse, çelik o kadar fazla ısı enerjisi depolar. Bu da ısıya bağlı moleküler yapının bozulması ve kalıcı deformasyonlar (plastik davranışa geçiş) ile sonuçlanır.

1.7.1.5. Korumasız Çelik Malzeme ile Boya Korumalı Çelik Malzeme Farkı

İntümesan yangın boyalarıyla korunmamış çelikler, çok daha kısa sürede kritik sıcaklığa ulaşır.

Yangın koruma boyaları sayesinde bu sıcaklık eşikleri geciktirilerek göçme zamanı ötelenebilir.

Sonuç olarak, çelik malzemelerin yangın etkisi altında gösterdiği davranış, yalnızca sıcaklık artışıyla sınırlı kalmaz; aynı zamanda taşıyıcı sistemin genel stabilitesini de olumsuz yönde etkiler.

Bu nedenle yapısal yangın tasarımı, malzemenin bu sıcaklık aralıklarındaki zayıflama karakteristiklerine göre yapılmalıdır.

1.7.2. Döngüsel Yüklerin Etkisi

Yapı elemanları sadece statik yükler altında değil, birçok yapıda dinamik döngüsel yükler altında da çalışır. Bu yükler, rüzgâr, deprem, makine titreşimleri, trafik yükleri gibi dinamik etkilerle oluşabilir. Döngüsel yükleme altında yapısal elemanlar zamanla yorulmaya ve kalıcı deformasyonlara maruz kalır.

1.7.2.1. Çelik Yapılarda Yorulma Davranışı

Çelik, sünek bir malzeme olsa da yüksek çevrimli döngüsel yüklemeler altında yorulma çatlakları geliştirme eğilimindedir. Yorulma davranışı, yükleme genliği, çevrim sayısı ve geometrik keskinlik gibi faktörlere bağlıdır. Özellikle petek kirişlerde gövde açıklığı kenarlarında bu çatlaklar daha erken oluşur çünkü bu bölgelerde gerilme yığılması artar.

1.7.2.2. Petek Kirişlerde Kritik Noktalar

- Açıklık köşeleri
- Kaynak birleşim yerleri
- Flanş gövde birleşimi

Bu noktalar, döngüsel yükleme etkisiyle çatlak başlatıcısı haline gelebilir.

1.7.2.3. Göçme Öncesi Belirtiler

- Artan yer değiştirme (deformasyon)
- Rijitlik kaybı
- Histeretik enerji sönümlene kapasitesinde azalma
- Yük çevrim sayısı arttıkça deformasyonlar birikerek stabilite kaybına neden olur.

1.7.2.4. Yangın ve Döngüsel Yük Kombinasyonu

Yangın, çeliğin rijitliğini düşürdüğü için aynı büyüklükteki döngüsel yüklerin etkisi daha büyük olur. Bu durum, göçmenin çok daha erken ve beklenmedik biçimde gerçekleşmesine neden olabilir.

1.7.2.5. Koruyucu Boyanın Etkisi

Yangın boyası uygulanan bir çelik kiriş hem sıcaklık artışını geciktirir hem de döngüsel yük altında çökme zamanını uzatabilir. Ancak bu boyaların elastik özelliği olmadığından yorulma direncine doğrudan katkısı sınırlıdır; asıl etkisi sıcaklık kontrolü üzerindedir. Sonuç olarak, petek kirişlerin döngüsel yükler altında analiz edilmesi, sadece taşıma kapasitesi açısından değil, servis ömrü ve güvenli çalışma sınırlarının belirlenmesi açısından da zorunludur. Bu nedenle deneysel çalışmalarda döngüsel yükleme senaryolarının uygulanması büyük önem taşır.

1.7.3. Koruyucu Boyanın Etkisi

Petek kirişlerin yapısal tasarımı gövde açıklıkları nedeniyle geleneksel I profillere göre daha karmaşıktır. Yangın, döngüsel yük ve birleşik etkiler altında bu kirişlerde bazı karakteristik göçme modları gözlemlenir. Bu göçme modları hem yerel (lokal) hem de küresel (global) düzeyde olabilir.

1.7.3.1. Yerel Gövde Burkulması (Web Local Buckling)

Altıgen ya da dairesel açıklıklar arasında kalan dar gövde bölgeleri, yüksek kesme kuvvetleri altında yerel burkulma gösterebilir. Bu durum, göçmenin ilk aşaması olabilir ve genellikle gözle görülebilir şekil değiştirme ile başlar.

1.7.3.2. Başlık Burkulması (Flange Buckling)

Yüksek sıcaklık altında, başlıklar eksenel basınca karşı dayanımlarını kaybederek burkulabilir. Özellikle yangında bu göçme tipi hızla gelişebilir.

1.7.3.3. Delik Kenarı Ezilmesi (Vierendeel Mekanizması)

Açıklık kenarlarında oluşan yüksek moment etkileri, delik kenarlarında lokal ezilmeye veya kesmeye neden olabilir. Bu tip göçmeler genellikle deliklerin hizasında çatlak gelişimiyle sonuçlanır.

1.7.3.4. Yanal Burkulma (Lateral-Torsional Buckling)

Kirişin boyuna eksen boyunca burulma ve yana yatma hareketi göstermesi. Bu tip burkulmalar yangın sıcaklıklarıyla birleştiğinde hızla yayılır ve global çökme riski oluşturur.

1.7.3.5. Yorulma Kaynaklı Kademeli Göçme

Döngüsel yükleme altındaki petek kirişlerde mikro çatlaklar büyüyerek birleşir ve zamanla göçme oluşur. Bu göçme, aniden değil kademeli gelişir. Yük–yer değiştirme eğrisinde rijitlik azalması ve enerji yutma kapasitesinde düşüş gözlemlenir.

1.7.3.6. Yangın-Yük Kombine Göçmesi

Hem yangının hem de döngüsel yüklerin birlikte etki ettiği senaryolarda, lokal burkulmalar küresel göçmeye neden olur. Deneysel çalışmalarda bu tip kombinasyonların çok kısa sürede göçmeye yol açtığı gözlemlenmiştir.

1.7.3.7. Berkitmeli / Berkitmesiz Farkları

Petek kirişlerin en zayıf noktalarından biri, gövdedeki açıklıkların etrafında oluşan gerilme yoğunlukları ve lokal burkulma eğilimidir. Bu nedenle açıklıkların bulunduğu bölgelere berkitme (takviye) levhaları eklenerek, yerel dayanım artırılabilir. Berkitmeli ve berkitmesiz kirişler hem yük taşıma hem de göçme davranışı açısından önemli farklılıklar gösterir.

- Berkitmeli Kirişler:

Bu kirişlerde, açıklık kenarlarına ya da gövde–flanş birleşim noktalarına ek sac levhalar kaynaklanarak yapısal dayanım güçlendirilir. Berkitmeler şu şekillerde uygulanabilir:

- Delik çevresine halka biçimli takviye levhası (ring stiffener)
- Açıklıklar arasına yerleştirilen çapraz levhalar
- Flanş altına dikme eklemesi (web stiffener)

Bu tür takviyeler, özellikle döngüsel yük ve yangın etkisi altındaki lokal göçmeleri önemli ölçüde geciktirir.

- Berkitmesiz Kirişler:

Klasik üretimde açıklık kenarlarına herhangi bir takviye yapılmaz.

Avantajı:

- Daha ekonomik
- Daha hafif
- Üretimi daha kolay

Ancak dezavantajı:

- Daha erken burkulma ve çatlama riski taşır.
- Yangın altında hızlı deformasyonlar görülebilir.
- Yorulma çatlaklarının başlangıcı daha kısa sürede olur.

Tablo 2. Karşılaştırmalı performans

Özellik	Berkitmeli Kiriş	Berkitmesiz Kiriş
Gövde burkulma direnci	Yüksek	Düşük
Göçme süresi (yangında)	Uzun	Kısa
Ağırlık	Artar	Az
Üretim maliyeti	Yüksek	Düşük
Yorulma dayanımı	Daha iyi	Sınırlı
Yapısal güvenlik	Yüksek	Orta / belirsiz

1.7.4. Süneklik ve Enerji Yutma

Süneklik (ductility), bir yapı elemanının elastik sınırdan çıktıktan sonraki şekil değiştirme kabiliyetidir. Enerji yutma kapasitesi ise, bu şekil değiştirme sırasında moment–dönme eğrisinin çevrelediği alan ile tanımlanır. Bu iki özellik, özellikle döngüsel yük ve yangın gibi zorlayıcı koşullar altında yapısal emniyetin temel göstergeleridir.

Sünekliğin önemli olma sebepleri aşağıda belirtilmiştir.

- Göçme öncesi uyarı verme yeteneği sağlar.
- Yapı elemanı kırılmadan önce büyük yer değiştirmelerle deformasyon gösterir.
- Deprem ve döngüsel yük senaryolarında güvenli boşluk sağlar.
- Yangın altında uzamaya tolerans sağlar; bu da ani göçmeyi geciktirir.

1.7.4.1. Petek Kirişlerde Süneklik Davranışı

Gövdede bulunan açıklıklar, yerel rijitliği azaltarak süneklikte artış sağlar ancak bu aynı zamanda kontrolsüz deformasyon riskini de artırır. Berkitme plakaları kullanılarak bu deformasyon daha kontrollü hale getirilebilir. Altıgen kirişler, dairesel açıklıklara kıyasla daha ani ve keskin göçme eğilimindedir; bu da sünek davranışı azaltabilir.

1.7.4.2 Enerji Yutma ve Histeretik Davranış

Döngüsel yükleme altında yapı elemanının yük–yer değiştirme eğrisi, kapalı çevrimler oluşturur.

Bu çevrimlerin büyüklüğü, yapının sönmeme kabiliyeti ve dayanıklılığı hakkında bilgi verir.

a) İdeal histeretik eğri:

- Geniş, tok (yani enerji yutan)
- Her çevrimde rijitliği düşmeyen
- Kalıcı deformasyonu az olan eğrilerdir.

b) Yangın ve Süneklik Etkileşimi

Yangın etkisiyle beraber malzemenin karakteristik mukavemeti etkilenecek rijitliği düşer ve termal etkilerden kaynaklı ortaya çıkan deformasyonlar sonucu sistem kontrolü zorlaşır. Yangın koruma boyaları, bu etkiyi dolaylı olarak yavaşlatarak sünek davranışı daha uzun süre korur.



2. KAYNAK ÖZETLERİ

Petek çelik kirişlerin patlama yükleri altındaki statik dayanımı ve bu dayanımı artırmaya yönelik farklı bağlantı tipleri ile güçlendirme yöntemlerinin etkisi araştırılmıştır. Çalışmada, petek çelik kirişlerin patlama yüklerine karşı davranışını değerlendirmek amacıyla deneysel testler gerçekleştirilmiş, kuvvet-deformasyon ilişkileri incelenmiş ve sonlu elemanlar (FE) modelleme yöntemiyle çeşitli kiriş konfigürasyonları analiz edilmiştir. Araştırma sonucunda, dikey destek elemanlarının, kapalı deliklerin ve cıvatalı başlık plakası gibi belirli bağlantı türlerinin kirişlerin genel dayanıklılığına ve enerji sönümleme kapasitesine önemli katkılar sağladığı gözlemlenmiştir [26].

Yangın korumalı ve korumasız boşluklu hücresel çelik kirişlerin ISO 834 yangın eğrisi yükü altındaki davranışları deneysel ve analitik olarak incelenmiştir. Farklı açıklık ve şekillerdeki kirişler üzerinde yapılan testlerde, intümesan kaplamanın (intümesan boya) yangın koruması açısından en etkili yöntem olduğu belirlenmiştir. Korumasız kirişler, yüksek sıcaklıklarda web-post burkulması ve Vierendeel eğilmesi mekanizmalarıyla göçme modlarına maruz kalırken, korumalı kirişler bu göçme modlarına karşı daha uzun süre direnç göstermiş ve daha az deformasyon göstermiştir. Deneysel bulgular, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile doğrulanmış ve Eurocode tasarım yaklaşımının intümesan kaplama malzeme özellikleri dikkate alınarak iyileştirilmesi önerilmiştir. Bu araştırma, kompozit döşemelerde çelik kirişlerin yangına dayanıklılığını artırmaya yönelik tasarım kurallarının geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [24].

Bi, et al. [9] çalışmasında düzenli altıgen ağ açıklıklarına sahip kafes kiriş-kolon bağlantılarının deprem davranışını incelemiştir. Farklı geometrik faktörlerin (açıklık oranı, açıklık mesafesi, ağ kalınlığı vb.) bağlantıların taşıma kapasitesi, plastik şekil değiştirme ve enerji sönümleme özellikleri üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak istemişlerdir. Çalışmada, beş tam ölçekli numune üzerinde yükleme testleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler sonlu elemanlar modeli (FEM) ile doğrulanmıştır. FEM sonuçları ile deneysel veriler büyük ölçüde birbirlerine uyum sağlamıştır. Sonuç olarak, kompozit döşemenin varlığının bağlantıların taşıma kapasitesini %25'ten fazla artırdığı ve yük aktarımını iyileştirdiği belirlenmiştir. Açıklık oranının %50'den düşük veya %70'ten yüksek olması, beklenmeyen göçme modlarına yol açabilmektedir. Bu çalışma, kafes kiriş-kolon bağlantılarının deprem performansını iyileştirmek için zemin

döşemesi ve ağ açıklıklarının etkilerini kapsamlı bir şekilde analiz etmiş ve tasarımda ideal plastik mafsallı oluşumunu ortaya koymak için önerilen parametre aralıklarını sunmuştur. Bu bulgular, özellikle depreme dayanıklı yapı tasarımlarında önemli bir referans oluşturmaktadır.

Maali and Çınar [16] yaptıkları çalışmada BS 5950 standartlarına göre tasarlanmış dairesel boşluklu çelik kirişlerin döngüsel yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Beş farklı IPE240 kesitli kiriş, çeşitli boşluk çaplarına sahip olacak şekilde test edilmiştir. Deneyler, kiriş yüksekliği ile gövde boşluk çapı oranının mekanik özellikler üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Deneysel verilerle elde edilen sonuçlar, sonlu elemanlar analizi (FEA) ile doğrulanmıştır. Altın orana (1.618) göre tasarlanan kiriş modelinin, daha küçük boşluklu kiriş modellerine göre daha fazla moment, yük taşıma ve enerji yutma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Rijitlik ve dönme kapasitesi açısından da ideal modele en yakın sonuçları sağlamıştır. Sonuçlar, BS 5950 standartlarının güncellenmesi ve altın oranın mühendislik tasarımlarında daha fazla kullanılması gerektiğini önermektedir. Çalışmaları, özellikle deprem yükleri altındaki kiriş tasarımlarının iyileştirilmesi için önemli bir referans oluşturmıştır.

Yüksek sıcaklıklarda yanal-burulma burkulmasına (LTB) maruz kalan boşluklu hücresel çelik kirişlerin (CB) tasarımını iyileştirmeyi amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda mevcut Eurocode 3 yöntemlerinin moment gradyanları altında burkulma direncini doğru tahmin edemediğini belirlemişlerdir. Bunu geliştirmek için alternatif bir tasarım önerisi sunmuşlardır. Çalışma kapsamında, ANSYS kullanılarak 1260 elastik ve elastik olmayan sonlu eleman analizi gerçekleştirilmiş ve farklı moment gradyanları, hücresel açıklık kombinasyonları, yükleme türleri ve kiriş incelikleri dikkate alınmıştır. Yeni yaklaşım, farklı sıcaklık seviyelerinde hücresel çelik kirişlerin burkulma direncini daha doğru hesaplayarak güvenli bir tasarım sağlamıştır. Ayrıca yapılan istatistiksel analizler, önerilen yöntemin mevcut standartlardan daha güvenilir olduğunu göstermiştir [14].

Çok katlı çelik çerçevelerin boşluklu hücresel ve standart kirişlerle olan yapısal performansını analiz ederek incelemişlerdir. İlgili yapısal performansları, Tekla Structural Designer programı kullanarak analiz etmişlerdir. Analizlerde Eurocode standartlarına bağlı kalmışlardır. Yapılan analizlerle, boşluklu hücresel kirişlerin açıklık boyutları ve yerleşimi üzerinden yapı davranışlarını karşılaştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda, boşluklu hücresel çelik kirişlerin, standart kirişlere kıyasla daha az

sehim meydana getirdiğini ve daha fazla yük taşıma kapasitesi ortaya koyduğunu göstermişlerdir. Yüksek katlı yapılarda boşluklu hücreli çelik kirişlerin avantajları öne çıkarmışlar ve bu kirişlerin yapıları etkileyen iç kuvvetlere karşı daha iyi bir yapısal stabilite ortaya koyduğunu ortaya çıkarmışlardır [4].

Hibrit ve homojen malzeme özelliklerine ait çelik kirişlerin ağ açıklığı (boşluklu) olmaları durumunda ortaya koydukları yapısal davranışları birbirleriyle mukayese edecek şekilde incelemişlerdir. ANSYS numerik analiz programını kullanarak sonlu elemanlar analizi yapmışlar ve ortaya çıkan sonuçları, ilgili literatürde gerçekleşen deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan verilerle karşılaştırarak doğrulamışlardır. Homojen ve hibrit türündeki çelik kirişlerin göçme modu türlerini ve sonuçlarını yorumlamışlardır. İlgili çalışmalar sonucunda hibrit türündeki kirişlerin homojen kirişlere göre daha fazla yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılan analizlerde hibrit kirişlerin açıklık aralığı oranı ve açıklık derinliği oranı gibi değişkenleri değerlendirmişlerdir. İlgili kirişlerde boşluk çapının kiriş yüksekliğine oranının 0,6 üzerinde olması durumunda kirişlerin daha düşük yük taşıma kapasitesine sahip olacağını ortaya koymuşlardır. Kirişlerdeki açıklık aralığının, açıklık genişliğine oranı azaldıkça kirişin burkulma riskinin arttığını ve yapısal performansın düştüğünü ortaya çıkarmışlardır. Bu çalışmada hibrit çelik kirişlerin daha güvenli ve ekonomik tasarım yöntemlerini ortaya koymaya çalışmışlardır [7].

Morkhade, et al. [20] araştırmalarında hücreli çelik kirişlerin (boşluklu ağ açıklığına sahip) burkulma performanslarını artırmak amacıyla flanş kaplama plakaları ile güçlendirilmesinin ortaya koyacağı etkileri incelemişlerdir. Boşluklu çelik kirişlerin gövde açıklıklarının kesme ve eğilme davranışı üzerindeki olumsuz etkilerini değerlendirmişler ve çalışmalarını bu güçlendirme teknikleri gerekliliği üzerine ortaya koymuşlardır. Çalışmada, CB420, CB450 ve CB480 olarak adlandırılan üç farklı hücreli kiriş türü, ISMB300 ana kesitinden üretilerek incelenmiştir. Açıklık çapı, açıklık aralığı ve kiriş yüksekliği gibi parametreler değiştirilerek sonlu elemanlar analizi (FEA) yapılmıştır. Analizler, ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiş ve kirişlerin güçlendirilmiş ve güçlendirilmemiş halleri karşılaştırılmıştır. Flanş kaplama plakaları ile güçlendirilen kirişlerin eğilme dayanımı, CB420 için %36,30, CB450 için %39,16 ve CB480 için %43,08 oranında arttığı sonucuna varmışlardır. Açıklık aralıklarının arttıkça kirişlerin eğilme dayanımının aynı şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Boşluklu

kirişlerde özellikle görülen Vierendeel göçme mekanizmasının ortaya konan güçlendirme teknikleriyle daha iyi önlenebileceğini görmüşlerdir.

Sinüzoidal ağ açıklıkları bulunan boşluklu çelik I-kirişlerin elastik yanal-burulmalı burkulma davranışını incelemişlerdir. Bu tür kirişlerin kritik burkulma momentini belirlemek ve mevcut tasarım yöntemlerinin yetersizliklerini gidermek için çalışmışlardır. Bu çalışmada, ABAQUS yazılımı kullanılmış ve 15.205 sonlu eleman modeli üzerinde sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada kiriş boşluklarına ait yükseklik ve genişlik faktörleri, profillerin inceliği ve yüksekliği gibi çok sayıda geometrik parametrenin, kritik eğilme momentine etkilerini incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlardan yola çıkarak, Sinüzoidal açıklıklı kirişler için yeni bir analitik hesap yöntemi önerilmişlerdir. Açıklık yüksekliğinin artmasının kritik eğilme moment taşıma kapasitesini azalttığını, kesit inceldikçe yanal-burulma burkulma riskinin arttığını ve mevcut hesap yöntemlerinin yük taşıma kapasitesinde yetersiz kaldığını göstermişlerdir. Yapılan çalışma ile önerilen yeni hesap yöntemi, mevcut sayısal sonuçlarla büyük uyum göstermiştir. Tüm bu sonuçlar çerçevesinde sinüzoidal açıklıklı çelik kirişlerin burkulma kapasitesinin daha doğru tahmin edilmesini sağlamışlardır [11].

Yüksek sıcaklıklarda eksenel olarak kısıtlanmış ve gövdesi boşluklu I kesitli çelik kirişlerin davranışını incelemişlerdir. ABAQUS programını kullanarak yaptıkları sayısal modellemelerle, boşlukların şekil, boyut ve konumunun boşluklu çelik kirişlerin yangın performansını nasıl etkilediğini ortaya koymuşlardır. Ortaya çıkan modelleme verileri ile daha önce yapılan deneysel çalışmalar karşılaştırılmış ve yapılan modellemeler bu çalışmalarla doğrulanmıştır. Eksenel kısıtlamalı kirişlerin özellikle büyük ve uzun açıklıklara sahip olduğu durumlarda, yangın durumunda düşük sıcaklıklarda katenar etkisine girebileceğini ortaya koymuşlardır. Kiriş gövdesinde yer alan boşlukların eğilme momentinin yüksek olduğu bölgelerde ani ve düşük geçiş sıcaklıklarına neden olacağı sonucu, ortaya çıkardıkları başka bir durumdur. Tüm bu çalışmalar sonucunda boşluklu çelik kirişlerin yangın dayanım tasarımında dikkate alınması gereken önemli hususları ve kritik kuvvet-sıcaklık ilişkilerini ortaya koymuşlardır [25].

Yangın durumunda tamamen ve bölgesel olarak kısmen korunmuş boşluklu I kesitli çelik kirişlerin gövde burkulması ile alakalı yapısal davranışlarını incelemişlerdir. Yangın koruma yöntemlerinde, kirişe tam olarak yangına karşı koruma boyası uygulanması, gövdede yer alan boşluk kenarlarının boya korumasız tutulması ve kirişlere uygulanan boya koruma kalınlığının değiştirilmesi kombinasyonları üzerinde

durmuşlardır. Çalışmada ABAQUS sonlu elemanlar analizi kullanılarak ortaya konan modellemelerde, ilgili kombinasyonlara ait boşluklu çelik kirişlerin yangına dayanma süreleri, taşıyıcıların sıcaklık dağılımı ve gövde burkulma davranışlarına ait göçme durumları üzerinde sonuçlar elde etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada tüm olarak korumalı olan kirişlerde boya koruma kalınlığının yangın direnci ile doğru orantılı olduğu sonucunu elde ederlerken, bölgesel korumalı kirişlerde koruma kalınlığının artışının daha düzensiz bir sıcaklık dağılımı meydana getirdiğini, yangına dayanım süresini kısalttığını ve daha düşük sıcaklıklarda boşlukların etrafında ani burkulma davranışı riskinin arttığını ortaya çıkarmışlardır [30].

Boşluklu I kesitli çelik kirişlerin hibrit özellikli olması durumunda, boşluklu bölgelerin hibrit çelik kirişte meydana getirdiği yapısal davranış etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, ANSYS numerik analiz programı kullanılarak sonlu elemanlar analizi yapılmış ve farklı şekil, boyut ve konumdaki boşluklu kirişlerin yük-taşıma kapasitesi, deformasyon davranışı ve gerilme dağılımı üzerindeki etkileri incelemişlerdir. Hibrit çelik kirişlerin homojen kirişlere göre eğilme momentine karşı taşıma kapasitesinin daha fazla olduğunu yaptıkları çalışmalar sonucunda ortaya koymuşlardır. Çalışmada gözlemledikleri göçme modu Vierendeel mekanizması olmuştur. Ayrıca dairesel ve altıgen boşluklu türdeki kirişlerin diğer boşluklu modellere göre daha iyi yapısal performans ortaya koyduklarını belirlemişlerdir [21].

Dairesel boşluklu I kesitli çelik kirişlerin eksenel kuvvet davranışlarını kısıtlayan çerçeveli bir deneysel mekanizma kurmuşlar ve ilgili kirişler üzerinde çeşitli yangın testleri gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışma kirişlerin sıcaklık dağılımı, gerilme türleri ve göçme modlarını analiz etme anlamında önemli olmuştur. Çalışmalar sonucunda Kirişlere uygulanan eksenel kısıtlamanın yangın durumunda kirişin göçme modlarını değiştirebileceği sonucunu ortaya çıkarmışlardır. Bu kısıtlama ile yangın durumunda ortaya çıkan termal etkiler kirişte tersinir eksenel kuvvet oluşturmuştur. Bu etki ile boşluklu bölgelerin burkularak deformasyon yapabileceği görülmüştür. Ayrıca yangın durumunda katenar etkisinin ortaya çıktığı ve bununla bağlantılı olarak eksenel çekme kuvveti etkisi ile kirişin yük taşıma kapasitesinin artabileceği durumunun ortaya çıkabileceği gözlenmiştir. Tüm bu çalışmalar sonucunda eksenel kısıtlama etkisi olan kirişlerin, yüksek sıcaklıklarda çökmeye karşı daha dirençli olduğu tespit edilmiştir [23].

Boşluklu çelik kirişlerin RWS kiriş – kolon cıvatalı bağlantılı olduğu durumda, Sonlu elemanlar (FE) analizi ile, SAC protokolüne göre döngüsel yüklere maruz

bırakarak, boşluklu kirişlerin sismik yükleme durumundaki yapısal davranışı, bağlantıların gerilme dağılımı, kirişlerin enerji yutma kapasitesi ve plastik mafsall oluşması gibi durumları incelemişlerdir. Boşluklu kirişlerin farklı delik mesafeleri ve açıklıkları olasılıklarını değerlendirerek ilgili davranışları birbirleri ile mukayese etmişlerdir. Çalışmada boşlukları meydana getiren açıklıkların, gerilemeleri kolondan kirişe aktarılmasını sağladığı görülmüş ve Vierendeel mekanizması ile boşluk kenarlarında plastik mafsalların oluşumu gözlemlenmiştir. Kirişteki ilk boşluğun kolona yakın olması durumunda kritik bölgelerde yüksek gerilmeler olduğu gözlenmiştir. Boşluklu kirişlerin, döngüsel yükler altında yeterli enerji sönümleme kapasitesine ulaştığı gözlenmiştir. Ancak, tamamen delikli kiriş modelinde enerji sönümleme kapasitesi %50'ye kadar azaldığı görülmüştür. Sonuç olarak, RWS bağlantılarının uygun şekilde tasarlanması durumunda, boşluklu kirişlerin döngüsel yükler altında sağlıklı bir performans sergilediğini ortaya koymuşlardır [29].

Deneyisel çalışmalarında deprem riski düşük bölgelerde kullanılan boşluklu ve kafesli (perfore) kirişlerin, döngüsel yükler altındaki yapısal davranışını incelemişlerdir. Deneylerinde kolonlara, üç farklı RWS (boşluklu) bağlantılı kirişi ve bir adet RBS (başlık kısımlarında kesit azaltılmış) bağlantılı kirişi, döngüsel yükler altında FEMA 350 protokolüne uygun olacak şekilde test etmişlerdir. Ortaya çıkan yapısal davranışlarda, plastik deformasyonun büyük ölçüde kiriş içinde kaldığı gözlemlenmişler ve kolon-kiriş bağlantısının koruduğu belirlemişlerdir. Bağlantıların, belirlenen kritik dönme seviyelerinde bile kırılğan bir göçme göstermediğini görmüşlerdir. Boşluklu kirişlerdeki deliklerin konumunun, bağlantıların enerji yutma kapasitesini etkileyerek maksimum performansı sağlamak için belirli bir mesafe içinde yerleştirilmesi gerektiğini belirlemişlerdir. RWS bağlantılarının, RBS bağlantılarına göre daha sünek olduğunu tespit etmişlerdir [28].

Boşluklu çelik kirişlerin özellikle gövde burkulması olarak bilinen kesme kuvveti kaynaklı burkulma davranışını incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmayla, mevcut tasarım yöntemlerinin eksikliklerini gidermek ve deneysel verilerle doğrulanmış, daha doğru bir kesme direnci formülasyonu ortaya koymuşlardır. 14 farklı geometriye sahip tam ölçekli boşluklu çelik kirişler üzerinde deneyler yapılmıştır. Bu deneylerle düşey ve yanal yer değiştirmeler ve gövde burkulması deformasyonlarını ölçülmüşlerdir. ABAQUS numerik analiz programında geliştirdikleri sayısal model ile 597 farklı geometrik ve malzeme özelliğine göre ortaya çıkan değişkenler ile analizlerini gerçekleştirilmişlerdir. Bu

analizler, gövde burkulmasının kesme direncini belirlemek için direnç eğrileri oluşturulmasını sağlamıştır. Sonuç olarak önerdikleri kesme formülasyonu ile deneysel veri sonuçlarıyla paralel sonuçlar ortaya çıkarmışlar ve literatürdeki yöntemlerden daha doğru sonuçlar ortaya koymuşlardır [12].

Yaptıkları çalışma ile eğilme altında boşluklu çelik kirişlerde burkulma etkilerini incelemişlerdir. ANSYS numerik analiz programında geliştirdikleri bir sonlu eleman modelini literatürden seçtikleri deneysel örneklerle kıyaslayarak kirişlerin burkulma davranışını yorumlamışlardır. Bu modeli, farklı çelik sınıfları ve kesit sınıfları için analiz etmişlerdir. Çalışmalarında nihai yük, gövde açıklıklarındaki deplasmanlar ve göçme modlarını karşılaştırılmışlardır. Kirişlerin göçme modlarının, gövdedeki ağ boşlukları ve alt ve üst başlıkların kesit sınıfına ve çelik sınıfına bağlı olarak değiştiğini gözlemlemişlerdir. Özellikle yarı-kompakt boşluklu kirişlerde, yerel burkulmalar nedeniyle taşıma kapasitesinin düştüğü görülmüştür. Hindistan Standardı IS800:2007, düşük çelik sınıfları (E250) için genellikle güvenli tahminler sunmuş fakat yüksek çelik sınıfları (E350 ve E450) ve yarı-kompakt boşluklu kirişler için tahminler yetersiz kaldığı sonucu ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışma ile boşluklu kirişlerin tasarımında IS800:2007'nin sınırlılıkları ortaya koyulmuş ve özellikle yüksek çelik sınıfları ve yarı-kompakt boşluklu kirişler için daha doğru tasarım yöntemlerine ihtiyaç olduğunu göstermiştir [8].

Bu çalışmada, altıgen ve sinüzoidal açıklıklara sahip kastelasyonlu çelik kirişlerin eğilme momenti taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Açıklık köşelerinde oluşan kesme gerilmelerini azaltmak ve eğilme kapasitesini artırmak için yeni bir sinüzoidal boşluk formu önermeye çalışmışlardır. Kiriş boşluklarının köşe yarıçapı, boşluk sayısı ve boşluk boyutları gibi parametreleri değiştirilerek kirişlerin performansı incelenmişlerdir. 15 adet kiriş üretilmiş ve bunlardan 4 adedini deneysel olarak test etmişlerdir. Kirişler, altıgen ve sinüzoidal boşluklara sahiptir. NSYS numerik analiz yazılımını kullanarak, kirişlerin sonlu eleman modellerini oluşturmuş ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılmışlardır. Kirişlerin maksimum moment taşıma kapasitesi, sehim değerleri ve gerilme dağılımlarını analiz etmişlerdir. Sinüzoidal boşluk açıklıklı kirişler, altıgen açıklıklı kirişlere göre daha yüksek moment taşıma kapasitesi göstermiştir. Bu çalışma, sinüzoidal boşluklu petek kirişlerin, altıgen boşluklu kirişlere kıyasla daha yüksek moment taşıma kapasitesi ve daha az sehim gösterdiğini ortaya koymuştur.

Özellikle, köşe yarıçapının artırılması, kesme gerilmesi konsantrasyonunu azaltarak kirişlerin performansını önemli ölçüde artırmıştır [17].

I profil çelik kirişlerde gövde boşluklarının eğilme dayanımını nasıl etkiledikleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Bu çalışmada ana parametreleri, gövde boşluklarının farklı geometrilerde olması durumu ve çeşitli gövde boşluğu oranları olmuştur. Bu durumlarda ortaya çıkacak kirişlerin yük taşıma kapasitesi ve stabilitesi üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada hem deneysel hem de sayısal (sonlu elemanlar analizi) yöntemleri kullanılmıştır. ABAQUS numerik analiz programı ile oluşturulan modeller, yapılan deneysel çalışmalar sonucunda ortaya çıkan veriler ile karşılaştırılmış ve göçme modları, deformasyon ve nihai yük taşıma kapasiteleri gibi parametrelerin birbirleriyle uyumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Kirişlerdeki boşluk oranlarının (boşluk çapı /kiriş yüksekliği)'nin 0,75 in üzerinde olduğu durumlarda yapısal stabilitenin önemli oranda azaldığını ortaya çıkarmışlardır. Ayrıca boşluk çapının 200 mm değerinin altında olduğu durumlarda kirişlerin taşıma kapasitesinin önemli oranda arttığı sonucuna varmışlardır [18].

Tae [27] doktora tez çalışmasında boşluklu çelik kirişlerde boşluklardan kaynaklı açıklıklarının neden olduğu kesme kuvveti ve eğilme momenti dayanımında meydana gelen azalmayı gidermek için karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) plakaların, geleneksel çelik levha kaynaklama yöntemine göre etkisini incelenmiştir. Çalışmada hem deneysel hem de sayısal yöntemleri kullanılmıştır. ABAQUS sonlu elemanlar analiz (FEA) ile yapılan analizler ile farklı CFRP düzenlemelerinin yapısal performans üzerindeki etkisini değerlendirmiştir. Çalışmasında dört farklı numuneyi test etmiştir. Bunlardan biri kontrol numunesi (boşluk olmayan ve güçlendirilmemiş), diğerleri ise farklı boşluk açıklık konumları ve CFRP güçlendirme yöntemleri ile hazırlanan numuneler olmuştur. Deneysel ve sayısal çalışmalar ile CFRP takviyesinin kirişlerin mukavemetini artırdığını ve deformasyonu azalttığını ortaya çıkarmıştır. Çalışma kapsamında, CFRP güçlendirme ile kirişlerin mukavemetinin boşluk açılmadan önceki seviyeye getirilebildiği ve hatta bu seviyenin aşılabileceğini belirlemiştir. Ayrıca, farklı CFRP kalınlıkları ve uygulama konumlarının etkisi analiz etmiştir. Geleneksel çelik plakaların kaynaklanmasıyla elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar sağladığı görmüştür.

Ancak, bazı durumlarda süneklilikte azalma gözlemlenmiş ve en uygun CFRP düzeninin belirlenmesinin önemini vurgulamıştır.

Karami, et al. [13] yaptıkları çalışmada kompozit kafesli çelik kirişlerin (CCSB) yangın altındaki yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için yenilikçi bir model geliştirmeyi amaçlamıştır. Çalışmasında, yangın sıcaklığı, kiriş boyutu, kiriş uzunluğu gibi çeşitli bağımsız değişkenlerin etkisini değerlendirerek güvenilir tahmin yöntemleri sunmayı hedeflemiştir. ABAQUS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) ile 180 farklı CCSB modeli analiz etmiş ve gövde boşluğundan kaynaklı burkulmalar, Vierendeel göçme mekanizması gibi göçme modlarını incelemiştir. Yük taşıma kapasitesini tahmin etmek için genetik programlama (GEP), çoklu doğrusal regresyon (MLR), ana bileşen regresyonu (PCR) ve çoklu doğal logaritma regresyonu (MLnER) gibi yöntemleri uygulamıştır. GEP-MLR kombinasyonunun en iyi tahmin yöntemi olduğu belirlemiştir. Sonuçlar, 400°C'nin üzerinde yük taşıma kapasite kaybının hızlandığını ve boşluk açıklıklarının burkulma ve kesme kuvvetlerine karşı yük taşıma kapasitesi açısından zayıflıklar meydana getirdiğini gözlemlemiştir.

İntümesan yangın koruma kaplamalarının (intümesan boya), boşluklu çelik kirişlerin yangına dayanıklılığını nasıl etkilediğini deneysel olarak incelemiştir. Boşluksuz ve boşluklu kirişlerin yangın koşulları altında, korumalı ve korumasız hallerinin performanslarını karşılaştırmışlardır. Farklı çaplarda boşluklara ve gövde genişliklerine sahip çelik kirişler seçerek test etmişlerdir. Kirişler, EN13381-8 ve prEN13381-9 standartlarına göre üç taraflı yangına tabi tutulmuştur. Kirişlerin sıcaklık değişimleri termokuple kullanılarak ölçülmüş ve intümesan kaplamaların (intümesan boya) genleşme miktarları karşılaştırılmıştır. İntümesan kaplamalar, kirişlerin yangına dayanım süresini artırmış, ancak boşluklu kirişlerdeki etkisi, boşluksuz kirişlere kıyasla daha düşük olmuştur. Nominal 1000 µm kalınlıkta uygulanan intumesan kaplamanın, çelik sıcaklığının 550 °C'ye ulaşma süresini boşluksuz kirişlerde 25 dakika, boşluklu kirişlerde ise 17 dakika ötelediği ortaya çıkarılmıştır. Gövde sıcaklıklarının, boşluk boyutları ve intümesan kaplama kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterdiği belirlenmiştir. Boşluklu kirişlerde intümesan kaplamanın (intümesan boya), boşluk çevresinde küçülme gösterdiği ve bu bölgelerde korumanın yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir [15].

Sinüzoidal açıklıklara sahip boşluklu çelik kirişlerin yangına dayanım performansını incelemiştir. Çalışmada ABAQUS numerik analiz programı

kullanmışlardır. Kirişlerin yük taşıma kapasitelerini ve sıcaklık dağılımlarını değerlendirerek farklı parametreler altındaki mekanik ve termal davranışlarını incelenmişlerdir. Boşluk çapı/yükseklik oranı, boşluk aralığı/yükseklik oranı, yük oranı ve boşluk şekillerinin kirişlerin yangına dayanıklılığı üzerindeki etkilerini değerlendirmişlerdir. Beş aşamalı bir yapısal tepki modeli geliştirilmişlerdir. Elastik aşama, elastik-plastik aşama, kendi kendini dengeleme aşaması, katenary aşaması ve nihai yıkım aşaması geliştirdikleri modeller olmuştur. ABAQUS numerik analiz programı ile yangın altındaki boşluklu kirişlerin termal ve yapısal analizlerini gerçekleştirilmişlerdir. ISO-834 yangın standardına göre üç taraflı yangın etkisi uygulanmışlardır. Açıklık çapı/yükseklik oranı arttıkça kirişlerin eksenel kuvvetleri ve taşıma kapasitelerinin azaldığı gözlenmiştir. Sinüzoidal boşluklara sahip kirişler altıgen boşluklara göre, düzgün gerilme dağılımı sağladığı için daha iyi yangına dayanıklılık göstermiştir [22].

Boşluklu çelik kirişlerin yangın durumunda gösterdiği sıcaklık davranışını ve intümesan kaplamanın (intümesan boya) sıcaklık gelişimi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. ABAQUS numerik analiz programı ile yapılan sonlu elemanlar analizlerinde, 0,1 mm-5 mm arasında değişen kaplama kalınlıklarının boşluklu kirişlerdeki yangın direncini nasıl artırdığını analiz etmişlerdir. Analiz Sonuçlarında intümesan boyasının kalınlığının artmasıyla sıcaklıktaki düşüş belirginleşmiş ve 5 mm kalınlıkta boya kalınlığıyla alt başlık sıcaklığının 710°C'den 328°C'ye kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Üst başlıkların, beton döşemeye temas ettiği için daha düşük sıcaklıklara sahip olduğu görülmüşken, alt başlıkların en yüksek sıcaklık değerlerine ulaştığını gözlenmiştir. Simetrik ve asimetrik iki boşluklu kiriş arasında yapılan çalışmalar sonucunda sıcaklık dağılımı açısından önemli bir fark bulamamışlardır [5].

Boşluklu ve boşluksuz çelik kirişlerin yangın durumunda intümesan boya korumalı ve yangın korumasız durumlarda ortaya çıkan etkilerini deneysel çalışmalarla analiz etmiştir. Deneysel çalışmasında korumasız boşluklu ve boşluksuz kirişler ve çeşitli oranlarda su ve solvent bazlı intümesan boya korumalı boşluklu çelik kirişleri kullanmıştır. Yapılan testlerde, korumasız boşluklu kirişlerde gövde boşluk sıcaklıklarının boşluksuz kirişlere göre daha düşük olduğunu, intümesan boyalı kirişlerde ise gövde boşluk sıcaklıklarındaki artışı gözlemlenmiştir. Sıcaklık artışının, boya korumasının boşluk çevresinde incelenerek çekilmesi nedeniyle oluştuğunu belirlemiştir.

Çalışma ile boşluklu kirişlerde yangın dayanımının, diğerine göre daha kalın olan solvent bazlı intümesan boya korumalı olan kiriş olduğunu görmüştür [6].

Morkhade and Gupta [19] çalışmalarında sıcak haddelenmiş boşluklu ve boşluksuz çelik kirişlerin (ISMB 100) üzerinde deneyler gerçekleştirmişler ve ANSYS yazılımı kullanılarak elasto-plastik sonlu elemanlar analizi yaparak deneysel sonuçlarla karşılaştırmışlardır. Deneysel ve numerik yöntemlerle yapılan incelemelerle, açıklık alanının ve açıklıkların konumlarının taşıma kapasitesini önemli ölçüde etkilediğini gözlemlemişlerdir. Çalışmada boşlukların arasındaki mesafenin boşluk çapına oranı 1,33 ve 1,5 olan kirişlerin yük taşıma kapasitelerinin daha verimli olduğunu belirlemişlerdir. Boşlukları kiriş açıklığının orta 2/3'lük bölgesinde yerleştirdiklerinde, kiriş davranışının dolu gövdeli kirişe yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Çalışmada boşluk kenarlarında plastik mafsallara yol açan Vierendeel göçme modunun en baskın göçme modu olduğu sonucunu elde etmişlerdir.

3. MATERYAL METOD VE YÖNTEM

3.1. Araştırmaya Esas Taşıyıcı Elemanlar ve Kapsam

Bu tez çalışması, değişken koşullar altında (profil kesiti, kiriş tipi, berkitme levhası kullanılması ve yangın koruması durumu) yapısal elemanların davranışının deneysel çalışmalar sonucunda karşılaştırmalı olarak incelenmesi ve sonuç olarak taşıyıcı elemanların ortaya çıkan yapısal davranışlarının mukayese edilmesi kapsamındadır. Çalışmanın temel odağı, IPE 140 ve IPE 200 profil kesitine sahip, yangına maruz kalmış boya korumalı numunelerin, maksimum moment taşıma kapasitelerini, enerji yutma kapasitelerini, yapısal davranışa esas sünekliliğini ve göçme mekanizmalarını; yangına maruz kalmamış kontrol numuneleri ve yangına maruz kalmış boya korumasız numunelerle kıyaslayarak analiz etmektir.

3.1.1. Araştırmaya Grubu ve Numune Nitelikleri

Bu deneysel çalışma kapsamında toplam 12 adet kiriş numunesi hazırlanmıştır. Numunelerdeki incelemeye esas kritik değişkenler; profil kesiti (IPE 140, IPE 200), kiriş gövde tipi (Dolu, Petek), gövdelerde berkitme levhası kullanılması durumu (Berkitmeli, Berkitmesiz) ve yangına karşı boya koruma durumudur. Numunelere ait temel parametrik indisler; P (Petek), B (Berkitme), BK (Boya koruma), Y (yanmış) olarak adlandırılan, deneysel çalışma serisine uygun olarak her biri için sabit veya değişken olma durumuna indirgenebilen indislerdir. Çalışmanın temel odağına esas numuneler, aşağıdaki tabloda "Temel Odak numune" olarak belirtilen Boya Korumalı (BK) kirişlerdir.

Tablo 3. Deneysel çalışma kapsamındaki numuneler ve özellikleri

Numune Adı	Prof il	Kiriş Tipi	Berkitme	Yangın Koruması	Yangına Maruziyet	Çalışma Odağı
IPE 200-P-BK-Y	IPE 200	Petek gövdeli	Yok	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 200-BK-Y	IPE 200	Dolu gövdeli	Yok	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 140-P-BK-Y	IPE 140	Petek gövdeli	Yok	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 140-P-B-BK-Y	IPE 140	Petek gövdeli	Var	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 140-BK-Y	IPE 140	Dolu gövdeli	Yok	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 200-P-B-BK-Y	IPE 200	Petek gövdeli	Var	Boya korumalı	Var (120 dk)	Temel Odak
IPE 140-P-B-Y	IPE 140	Petek gövdeli	Var	Boya korumasız	Var (120 dk)	Karşılaştırma
IPE 140-Y	IPE 140	Dolu gövdeli	Yok	Boya korumasız	Var (120 dk)	Karşılaştırma
IPE 200-P-B-Y	IPE 200	Petek gövdeli	Var	Boya korumasız	Var (120 dk)	Karşılaştırma
IPE 200-Y	IPE 200	Dolu gövdeli	Yok	Boya korumasız	Var (120 dk)	Karşılaştırma

3.2. Malzeme Özellikleri ve Yangın Etkisine Hazırlık

3.2.1. Kullanılan Çelik ve Petek Kiriş Üretimi

Deneylerde kullanılan IPE profilleri, TS EN 10025 standardına uygun S275 kalite yapı çeliğinden imal edilmiştir. Dolu gövdeli I profiller, üretim atölyesinde CNC plazma kesim yöntemiyle zikzak kesim hattı boyunca hassas biçimde iki parçaya ayrılmıştır. Bu işlem sırasında gövde, üst başlık (flanş) ve alt başlık ile iki eş parça hâline getirilmiş ve kesim hattının her bir tepe ve çukur noktası altıgen boşluk geometrisine uygun olarak CNC kontrollü şekilde oluşturulmuştur. Ayrılan parçalar daha sonra üretim masasında eksenel yönde belirli bir miktar kaydırılarak hizalanmış, böylece petek gövdede oluşacak altıgen boşlukların konumu ve boyutu belirlenmiştir. Kaydırma işlemi sonrasında gövde kenarları birbirine tam olarak temas edecek şekilde konumlandırılmış ve kaynak hazırlığı için puntalama işlemi uygulanmıştır.

Takip eden aşamada, üst ve alt başlığa bağlı gövde parçaları, kaynakçılar tarafından tam penetrasyonlu sürekli kaynak dikişleri ile birleştirilmiş ve böylece altıgen boşluklara sahip petek kiriş formu elde edilmiştir. Bu üretim yöntemi sonucunda ortaya çıkan petek kiriş numunesi, hem orijinal dolu gövdeli kesite kıyasla ölü yükünü azaltmış, hem de etkili gövde yüksekliğinin artırılmasıyla birlikte kesitin eğilme rijitliğini ve moment taşıma kapasitesini arttırmıştır. Ayrıca gövde boşluklarının oluşturduğu hafifletilmiş yapı, yapılan deneysel çalışmada özelinde döngüsel yükler altındaki yapısal davranış etkileri ve yerel gerilme dağılımlarının incelenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir. Yapılan deneyler sonrasında gövde boşluklarına yakın bölgelerde oluşacak her türlü mekanizma taşıyıcı elemana ait spesifik detaylar verecektir. Boya koruma uygulamasının boşluklu bölgelere ne derece entegre olabildiği hususu da değerlendirilecek özel kriterlerden bir başkasıdır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 1. Petek kiriş imalatı

3.2.2. Yangın Koruma Boyası Özellikleri ve Uygulaması

Çalışmanın temel odağını oluşturan yangın korumalı numunelerde (BK indisli), pasif yangın güvenliği sağlamak amacıyla şişen (intumescent) tip HAYPERFLEX marka su bazlı yangın boyası kullanılmıştır. Yangına maruz kalan çelik taşıyıcı elemanlarda en temel problem, sıcaklığın hızlı bir şekilde yükselmesiyle birlikte çeliğin akma dayanımı ve elastisite modülünde oluşan hızlı düşüşlerdir. Çelik, 400–600°C sıcaklık aralığında taşıma kapasitesinin oldukça büyük kısmını kaybettiği için, pasif yangın güvenliği yapısal stabilitenin korunmasında hayati bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada kullanılan HAYPERFLEX marka su bazlı intümesan (şişen tip) yangın boyası, yangın sırasında çeliğin sıcaklık artış hızını düşürerek kritik sıcaklığa ulaşma süresini uzatmakta ve böylece döngüsel yükler altında bile kirişlerin taşıma kapasitesini ve süneklik davranışını koruyan önemli bir koruyucu tabaka oluşturmaktadır.

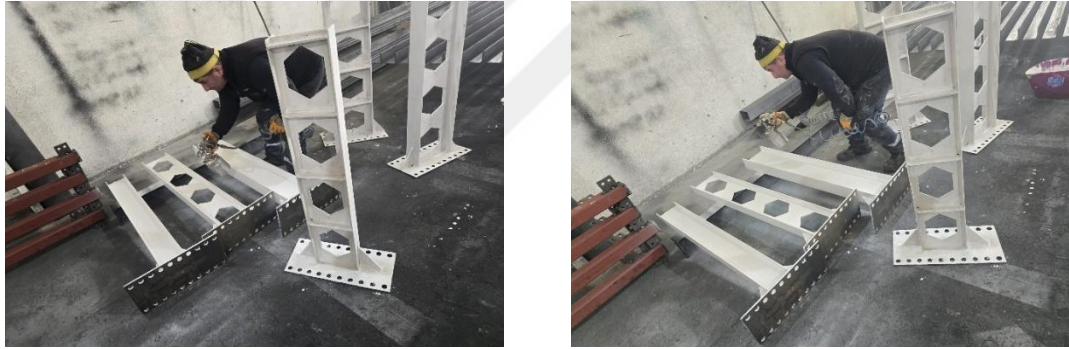
Bu yangın boyası, üretici talimatlarına uygun şekilde yaklaşık 500 µm kuru film kalınlığında ve 250–300 g/m² kuru film ağırlığında olacak biçimde çok katmanlı püskürtme yöntemiyle çelik yüzeylere uygulanmıştır. Boyanın yüksek aderans kapasitesi, yüzeyde homojen bir kaplama elde edilmesini sağlamış; uygulama viskozitesi DIN 4 mm viskozimetre ile 20 ± 2 s olarak ölçülerek sarkma, akma veya gözenek oluşumuna izin vermeyecek bir kıvamda olduğu doğrulanmıştır. Tam kürlenme süresi olan 24 saat sonunda elastik karakter kazanan kaplama, döngüsel yükleme altında çatlama veya dökülme oluşturmada bütünlüğünü korumuştur.

Yangın sırasında boya tabakası, kimyasal bileşimi gereği 20 ila 40 kat arasında hacimsel şişme göstererek karbon bazlı, düşük ısı iletkenliğine sahip kalın bir yalıtım köpüğüne dönüşmektedir. Yapılan literatür araştırmalarına göre bu genişlemiş tabaka, çeliğe etki eden ısı transferini büyük oranda azaltarak çeliğin mekanik özelliklerinin korunmasını sağlamış ve moment taşıma kapasitesinin düşmesini geciktirmiştir. Bununla birlikte dönme kapasitesinin korunmasına yardımcı olmuş ve enerji yutma kapasitesini artırmıştır. Bu çalışmanın deneysel verileri de bunu doğrulamaktadır. Sonuç ve açıklamalar bölümünde, deneysel çalışmaya tabi tutulan boya korumalı numunelerde maksimum moment kapasitesinin arttığı, sünek davranışın korunduğu ve döngüsel yükler altında enerji yutmanın belirgin şekilde iyileştiği görülmektedir.

HAYPERFLEX intümesan kaplamanın teknik özellikleri, su bazlı yapısı, 10.000–12.000 mPa·s viskozitesi, 1.20–1.40 g/cm³ yoğunluğu, 7.0–9.0 pH aralığı, 3 saatlik

dokunma kuruluğu ve 45–60 dakikalık toz tutmama süresi ile uygulama kolaylığı sunmaktadır. +5°C ile +35°C arasındaki ortam sıcaklıklarında uygulanabilmesi, uygulama sahasında karşılaşılan değişken atmosfer şartlarına uyum sağlamaktadır. Boyanın düşük ısı iletkenliği sayesinde, çelik yüzey ısıya maruz kaldığında oluşan karbon köpüğü tabakası kirişlerdeki sıcaklık dağılımını düzenleyerek hem kesitin rijitliğini hem de plastik şekil değiştirme kapasitesini korumaya yardımcı olur.

Sonuç olarak, intümesan yangın boyası kullanımı, çelik kirişlerin yangın etkisine karşı korunmasında vazgeçilmez bir pasif güvenlik yöntemidir. Bu boya, sıcaklık altında kritik mekanik kayıpları geciktirerek çelik kirişlerin döngüsel yükler altındaki performansını iyileştirir; moment kapasitesi, süneklik ve enerji yutma açısından yapının güvenilirliğini artırır. Yangın senaryolarında çeliğin mekanik davranışını iyileştiren bu koruyucu tabaka, çalışmada yer alan BK kodlu yanmış numunelerin korumasız yanmış numunelere nazaran numunelerin deneysel performanslarında gözlenen iyileşmelerin temel kaynağıdır.



Şekil 2. Kiriş numunelere koruma boyası uygulanması

Tablo 4. Boya korumasına esas malzeme özellikleri

Özellik	Değer / Açıklama
Tür	Su bazlı intümesan yangın boyası
Renk	Beyaz (RAL renklerinde üretilebilir)
Uygulama sıcaklığı	+5 °C +35 °C
Yoğunluk	1.20 – 1.40 g/cm ³
Viskozite	10,000 – 12,000 MPa·s (25 °C)
PH	7.0 – 9.0 (25 °C)
Toz tutmama süresi	45 – 60 dakika (25 °C)
Dokunma kuruluğu	3 saat (25 °C)
Tam kurlenme	24 saat (25 °C)
Kuru film kalınlığı	Yaklaşık 500 µm
Hacimsel genleşme	20–40 kat
Uygulama yöntemi	Çok katmanlı püskürtme
Kuru film ağırlığı	250–300 g/m ²

3.2.3. Yangın Fırını ve Yangına Maruziyet

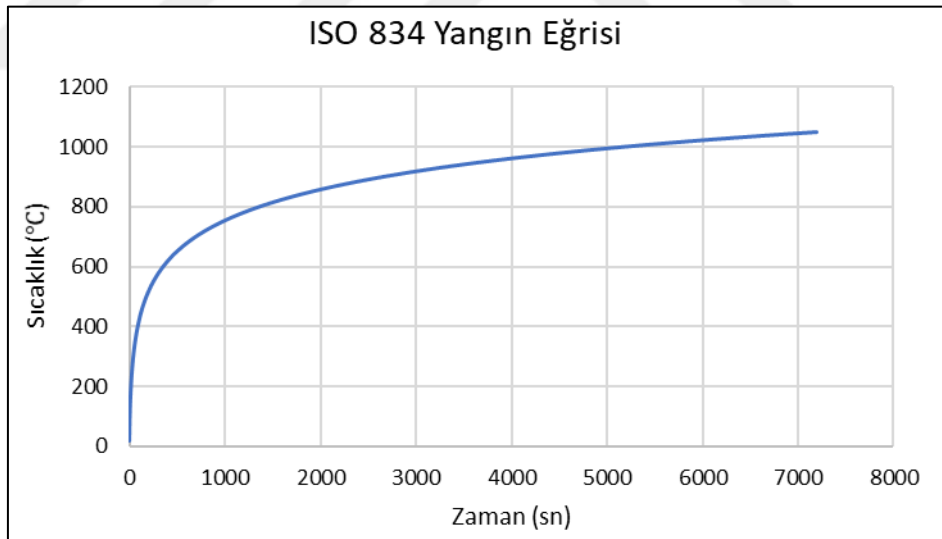
Döngüsel yük deneylerine hazırlanmak üzere yangın etkisine tabi tutulan (Y ve BK-Y indisli) petek gövdeli kiriş numuneleri, çelik yapı elemanlarının yangın sonrası gerçek davranışını laboratuvar ortamında temsil edebilmek amacıyla endüstriyel bir yangın fırınında ISO 834 standart sıcaklık–zaman eğrisi izlenerek ısıtılmıştır. Deney sürecinde fırın içi sıcaklık, standart eğriye uygun olarak ilk dakikalarda hızla yükselmiş; eğrinin karakteristik formunda olduğu gibi 100–200 saniye aralığında çelik yüzey sıcaklığı 400-600°C bandına ulaşmıştır. Bu sıcaklık aralığı, karbon çeliğinin elastik modülünde belirgin düşüşün başladığı, akma dayanımının yaklaşık %40–60 oranında kayba uğradığı kritik bölgedir. Eğri ilerleyen süreçte daha parabolik bir artış göstererek 120 dakikalık sürecin sonunda yaklaşık 7200 saniyede 1049°C seviyesine ulaşmış ve numuneler, standart yangın senaryosunda bir taşıyıcı elemanın maruz kalabileceği maksimum sıcaklık koşullarını karşılayan düzenli ve sürekli termal değişimler geçirmiştir.

Bu sıcaklık düzenlemeleri altında çelik elemanlarda mikro yapısal dönüşüm belirginleşmiş, petek kirişlerin gövdesindeki altıgen açıklık bölgelerinde hem kesit zayıflığının hem de geometrik değişimlerinin etkisiyle sıcaklık kaynaklı gerilme yığılmaları belirginleşmiştir. Bu durum, çalışmanın devamında uygulanacak döngüsel yükler altında Vierendeel mekanizması vb. gibi mekanizmaların daha erken devreye girmesine, açıklık çevresinde artacak olan bölgesel eğriliklere ve plastikleşme bölgelerinin daha çabuk oluşmasına zemin hazırlamaktadır.

Boya korumalı (BK-Y) numunelerde kullanılan intumesan kaplama, yangın fırınının numunelere etki ettiği süreç içerisinde kimyasal reaksiyona girerek yaklaşık 20–40 kat hacimsel genişleme göstermiş ve çelik yüzeyleri düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip karbon esaslı köpüksü bir tabaka ile sarmıştır. Bu tabaka, ISO 834 eğrisinin hızlı sıcaklık artışı gösterdiği dönemde, çeliğe ısı geçişini geciktirerek sıcaklık farkını azaltmış; özellikle ilk 20–30 dakikalık kritik evrede çeliğin ısıl kapasite kaybının yavaşlamasında etkili olmuştur. Ancak numunelerin fırın içerisinde sıcaklığa maruz kalma süresinin ilerlemesi ve sıcaklığın 1000°C seviyesine yaklaşmasıyla birlikte intumesan köpük tabakasında yer yer yanma, kuruma, çatlama ve dökülme gözlenmiş; buna rağmen malzemenin yangın boyunca sağladığı ısı geciktirici etki, numunelerin gerçekçi bir yangın sonrası davranış durumu kazanmasına katkı sağlamıştır.

Isıl işlem tamamlandıktan sonra tüm kirişler fırından çıkarılarak kontrollü doğal soğuma sürecine bırakılmıştır. Bu aşama, gerçek yangın senaryolarındaki söndürme-soğuma davranışını temsil ettiği için oldukça önemlidir. Hızlı soğumanın neden olabileceği termal şok, yüzey çatlakları veya gevrekleşme gibi ani hasarların oluşması engellenmiş; bunun yerine yangından çıkmış tipik bir çelik kesitte görülen renk değişimleri, oksidasyon izleri ve malzemede kısmi yumuşama davranışı elde edilmiştir. Boya korumalı numunelerde ise şişmiş köpük tabakasının kısmen dökülmüş kalıntıları gözlemlenmiş, bu kalıntılar intumesan malzemenin yangın süresince aktif olarak çalıştığının bir göstergesi olmuştur.

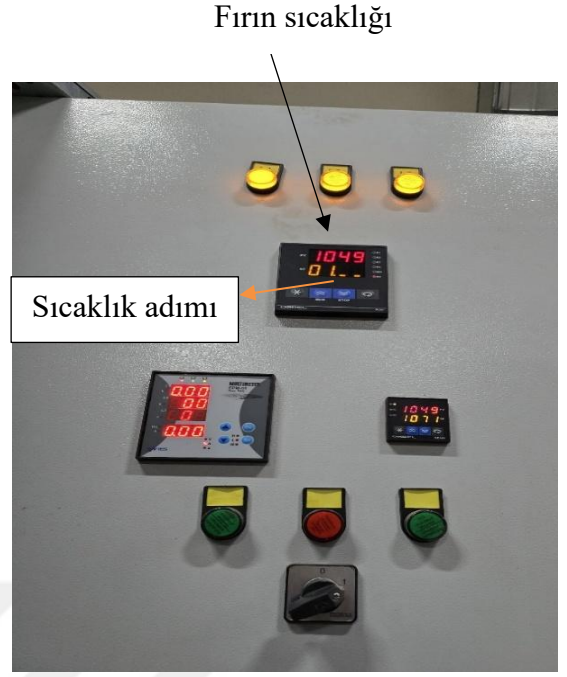
Bu hazırlık aşaması sonunda numuneler, yangın sonrası mekanik özellikleri zayıflamış, iç yapısı yumuşamış, açıklık çevrelerinde yerel deformasyon süreci geçirmiş, deneysel çalışmaya esas gerçekçi bir çelik taşıyıcı düzeye ulaşmış; böylece döngüsel yük deneylerinde değerlendirilecek yapısal davranışın yangın etkisini doğru şekilde temsil etmesi sağlanmıştır. Sonuç olarak, ISO 834 standart yangın eğrisine bağlı ısıtma işlemi, deneysel çalışmada amaçlanan yangın sonrası döngüsel yük performansının incelenebilmesi için gerekli olan gerçekçi ısı hasar koşullarını başarıyla oluşturmuştur.



Şekil 3. Yangın fırını sıcaklık-zaman eğrisi (ISO 834) [1]



(a)



(b)

Şekil 4. (a) Yangın fırını içindeki korumasız numuneler (b) Yangın fırını panosu



(a)



(b)

Şekil 5. (a) Fırından önce boyasız numuneler (b) Fırından sonra korumasız numuneler



Şekil 6. (a) Yangın deneyi öncesi boya korumalı numuneler (b) Yangın deneyi sonrası boya korumalı numuneler

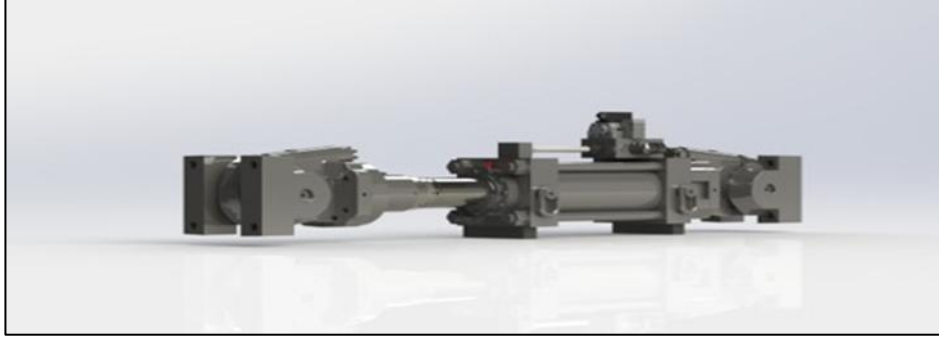
3.3. Deneylerde Kullanılan Aletler

Deneyisel çalışma, Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında, aşağıda detayları verilen yüksek hassasiyetli test cihazları kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.3.1. Hidrolik Dinamik Aktüatör

Yapılan deneylerde, yapısal taşıyıcı numunelere belirli bir kontrol mekanizmasıyla döngüsel yükleri uygulamak amacıyla bilgisayar üzerinden takip edilebilen bir servo-hidrolik dinamik aktüatör kullanılmıştır. Bu aletle kullanılan sistem hidrolik akışkanın sıkıştırılmazlığı prensibine göre çalışmaktadır. FEMA 350 protokolüne göre tanımlanan bu sistem aktüatörün piston – silindir düzeneği üzerinden doğrusal döngüsel hareketler meydana getirip, artarak devam eden deplasman hareketlerini numuneye hassas bir şekilde aktarmıştır. 150 ton kapasiteli bu aktüatör, servo-valf kontrol birimi sayesinde ileri ve geri doğrultuda tekrarlanabilir doğrusal yer değiştirmeler meydana getirmektedir. Entegre yük hücresi (load-cell) aracılığıyla uygulanan kuvvet, anlık olarak kaydedilmiştir. Deney boyunca hem yük hem de deplasman kontrollü artırımlı yük tekrarlamalarının güvenilir bir şekilde yürütülmesini sağlayan bu sistem, deneye tabi numunelerin moment taşıma kapasitesi, rijitlik ve

süneklik davranışlarında olan değişimlerin ve şekil değiştirmeye karşı oluşan istemsel davranışlarının FEMA 350 standartlarına uygun olarak değerlendirilmesini sağlamıştır.



Şekil 7. Hidrolik dinamik aktüatör

3.3.2. Deformasyon Ölçme Cihazları (LVDT'ler)

Deneyisel çalışmalarda, numunelerin yapısal davranışa esas kritik bölgelerindeki yer değiştirmeleri ve buna bağlı olarak gerçekleşen deformasyonları doğru bir şekilde ölçmek için Doğrusal Değişken Diferansiyel Transformatörler (LVDT) kullanılmıştır. Hidrolik aktüatörün uyguladığı hareketin numune üzerindeki gerçek karşılığını doğrudan ölçen bu sensörler, FEMA 350 protokolünün gerektirdiği hassas yer değiştirme kontrolü için gerekliliği elzem bir cihazdır. LVDT bobinleri silindirik bir gövde içerisinde yer almakta ve bobinler arasında sürtünmesiz bir biçimde hareket eden manyetik bir çekirdek bulunmaktadır. Çekirdeğin iki yönlü küçük yer değiştirmeleri, bobinlerdeki manyetik alan dengesini sürekli revize eder ve revize bağlı bu değişim elektrik sinyaline dönüşür. Numunelerde meydana gelen sürekli deformasyonlar bu şekilde ölçülebilmektedir. Deneyde kullanılan LVDT'ler, özellikle kirişin gövde açıklıklarındaki ve uç bölgelerdeki yer değiştirmeleri izlemek için deney düzeneği içerisinde yük uygulanan çerçeveye sabitlenmiştir. Bu düzenleme sayesinde aktüatörün planlamaya esas uyguladığı deplasman değeri ile numunenin ortaya koyduğu gerçek deplasman değeri arasındaki farkı gerçekçi bir şekilde kaydederek, elde edilen verilerin; moment–dönme davranışları arasındaki bağlantılar ve şekil değiştirmeye esas isterik davranışların değerlendirilmesi amaçlı kullanılmasını sağlar.



Şekil 8. Deformasyon ölçme cihazı (LVDT)

3.3.3 Veri Toplama ve Kaydetme Sistemi (Data Logger)

Deneysel çalışmanın devam ettiği süre içerisinde numunelerin döngüsel yükler altında sergilediği yapısal davranışların ortaya koyduğu verilerin doğru bir şekilde kayıt altına alınabilmesi için veri toplama sistemi (Data Logger) kullanılmıştır. Bu sistem, LVDT’lerden gelen elektrik sinyalleri eş zamanlı olarak toplayıp sayısal değerlerini hazırlayarak FEMA 350 protokolünün gerektirdiği sürekli ve doğru veri akışını sağlamıştır. Data Logger, belirlenen örnekleme hızında (milisaniye düzeyinde) çalışarak, her bir yük tekrarında meydana gelen süneklik ve rijitlik davranışlarındaki değişimlerinin, yer değiştirme adımlarının ve döngüsel yükleme deneyleri sonucunda ortaya çıkan verilerin eksiksiz olarak kaydedilmesini sağlamıştır. Ölçüm süreci, deney başlamadan önce sisteme entegre olan bilgisayar ara yüzü içeriğinden verilen “kayıt başlat” talimatıyla başlatılmış; deney sona erdiğinde ise sistem durdurularak tüm ölçümsel veriler değerlendirilmek için dijital ortama gönderilmiştir. Sistemin tamamıyla eşleştirilebilirliği açısından Data Logger, numunelerin gerçek zamanlı yapısal davranışlarını gerçekçi bir biçimde kaydetmiş ve çalışmanın moment–dönme ilişkileri, rijitlik ve süneklik değişimleri ve enerji yutma kapasitesi gibi temel yapısal özellikli davranışlarının güvenilir bir şekilde elde edilmesine doğrudan katkıda bulunmuştur.



Şekil 9. Data logger veri kayıt cihazı

3.4. Deney Düzenegi

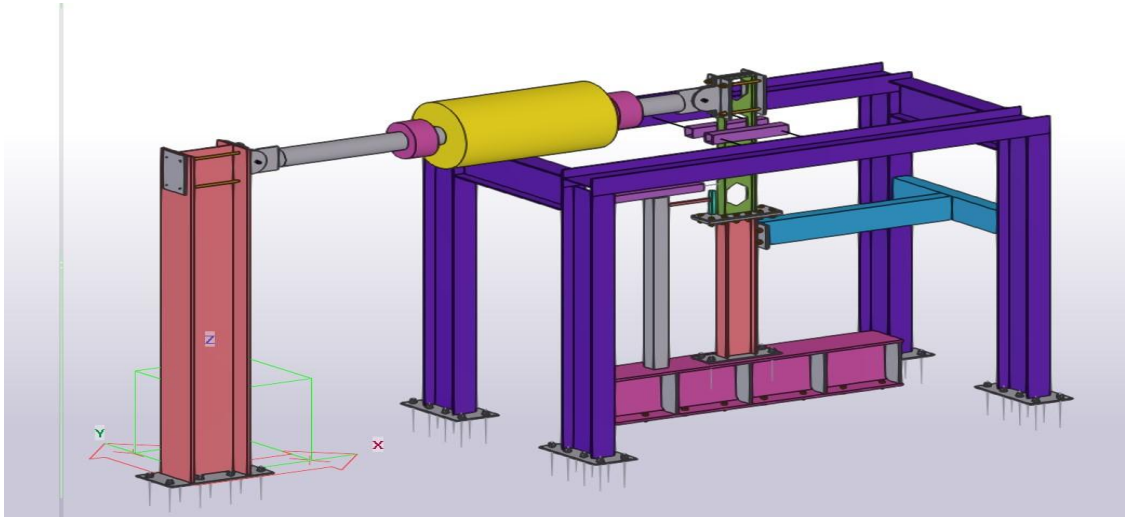
Deneylerde kullanılan yükleme düzenegi, çelik kiriş numunelerine yatay doğrultuda döngüsel yük uygulanmasını sağlayan hidrolik aktüatör ve çelik reaksiyon çerçevesinden oluşmaktadır. Aktüatör, mafsallı bir yük aktarım kafası ile kirişin serbest ucuna bağlanmış ve böylece yükün eksen kaçıklığı olmadan iletilmesi sağlanmıştır. Aktüatörün ürettiği yatay kuvvetler, zemine ankrajlı rijit çerçeve tarafından karşılanmıştır. Numunelerin bir ucu reaksiyon kolonuna sabitlenmiş, diğer ucu aktüatör bağlantısına yarı mafsallı serbest uç şeklinde yerleştirilmiştir. Böylece FEMA-350 protokolü kapsamında uygulanan çift yönlü döngüsel deplasmanlar kiriş uçlarına doğru biçimde aktarılmıştır. Kirişin yükleme sırasında dış düzleme hareket etmesini engellemek için gövdeye temas etmeyecek açıklıkta yanıl denge elemanı kullanılmıştır.

Bu sistemde numuneler 118 cm (1180 mm) efektif açıklık ile deney çerçevesine yerleştirilmiş ve kirişlerin uç bölgelerinde moment oluşumu ile dönme taleplerinin belirginleşmesi sağlanmıştır. Bir uç yatay ve düşey ötelenmeye kapalı olup dönmeye izin veren sabit mafsıl, diğer uç ise dönmeye serbest ve eksenel doğrultuda kayabilen kayıcı mafsıl olarak çalışmıştır. Bu mesnet düzeni, döngüsel yüklerin numuneye doğru ve kontrollü biçimde aktarılmasını sağlamış ve kiriş uçlarının moment gelişimine uygun bir sınır koşulu oluşturmuştur.

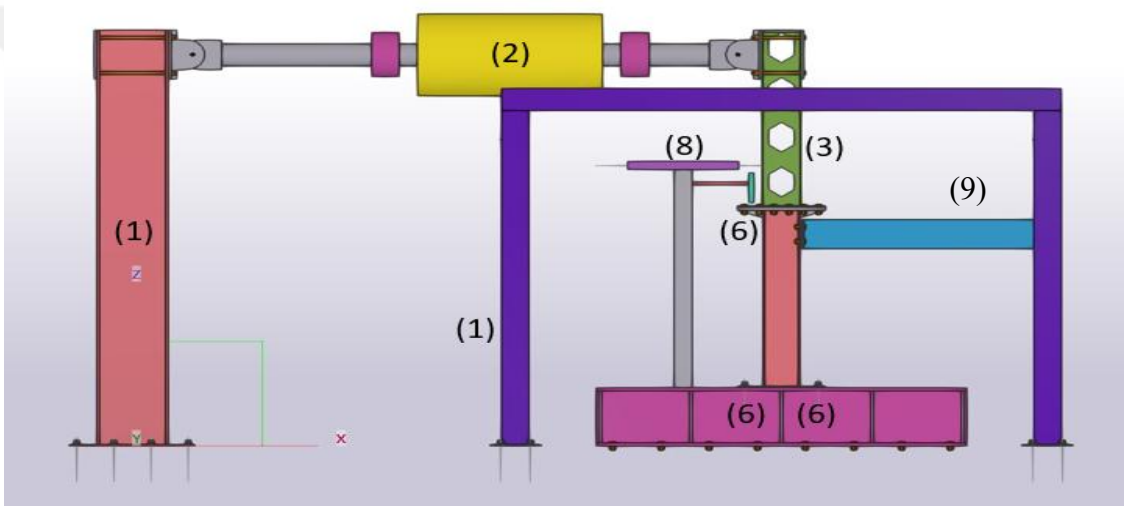
Düşey döngüsel yükler hidrolik aktüatör üzerinden uygulanmış; yük aktarım başlığının mafsallı yapısı, yükün numuneye eksen kaçıklığı oluşturmada iletilmesine imkân tanımıştır. FEMA-350 protokolü gereği artan genlikli çift yönlü deplasman talebi bu sistem aracılığıyla güvenli ve tekrarlanabilir şekilde sağlanmıştır.

Yük ve deplasman verilerinin kaydedilmesinde aktüatörün yerleşik sensörleri ve kiriş üzerine yerleştirilen LVDT'ler kullanılmıştır. Böylece numunelerin yangın sonrası zayıflayan mekanik özelliklerinden kaynaklanan rijitlik kaybı, tepe yük değişimleri ve açıklık bölgelerinde görülen yerel deformasyonlar yüksek doğrulukla elde edilmiştir.

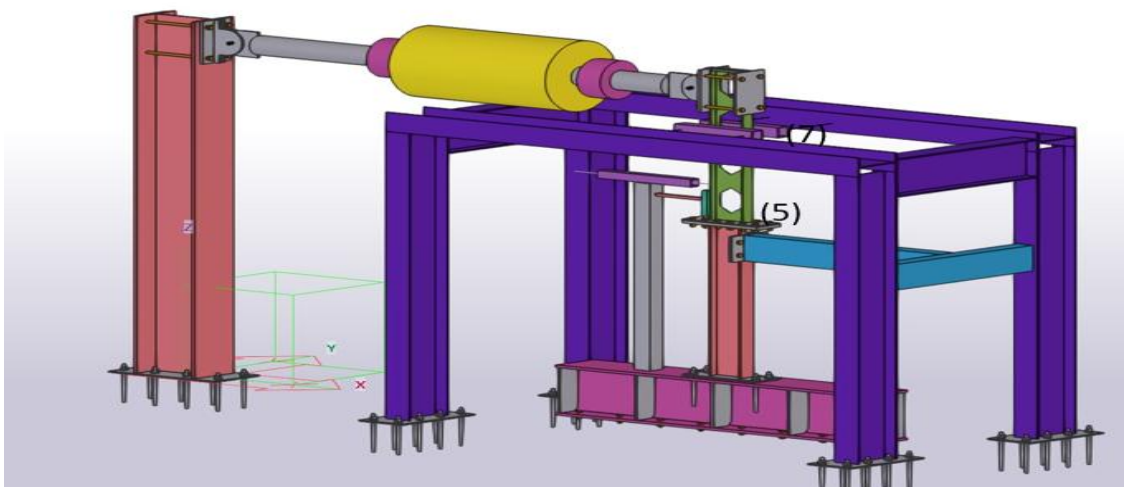
Bu düzenek üzerinde IPE 140 ve IPE 200 kesitli saf, petekli ve petekli-berkitmeli numuneler aynı yükleme ve mesnet koşullarında test edilmiş; böylece farklı numune türlerinin yangın sonrası ve yangın görmemiş hallerinin döngüsel yük altındaki yapısal performansları karşılaştırılabilir şekilde değerlendirilmiştir.



(a)



(b)

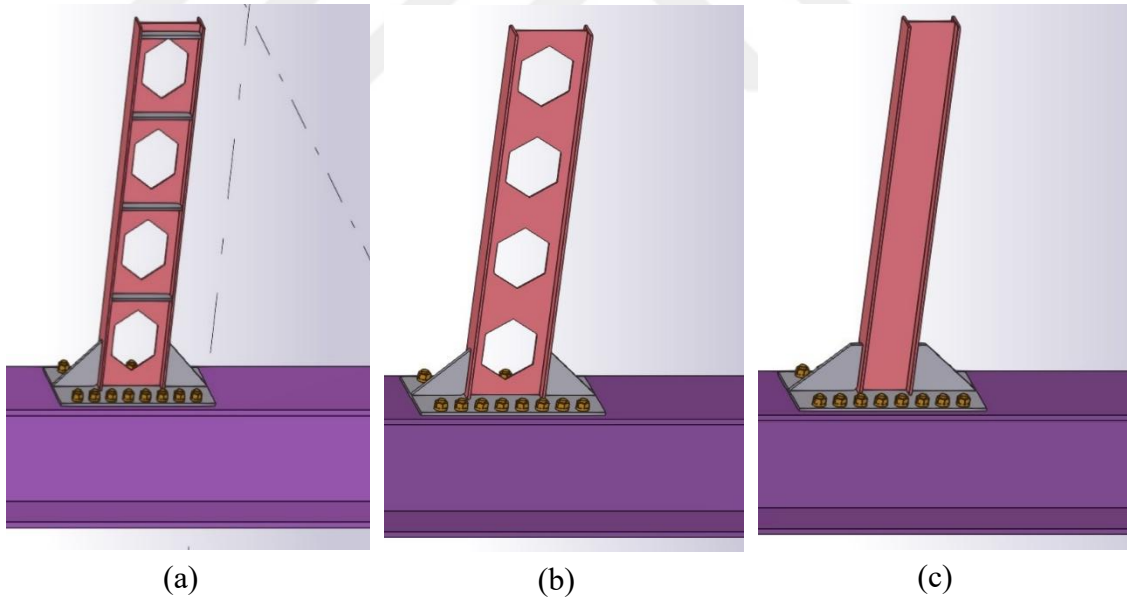


(c)

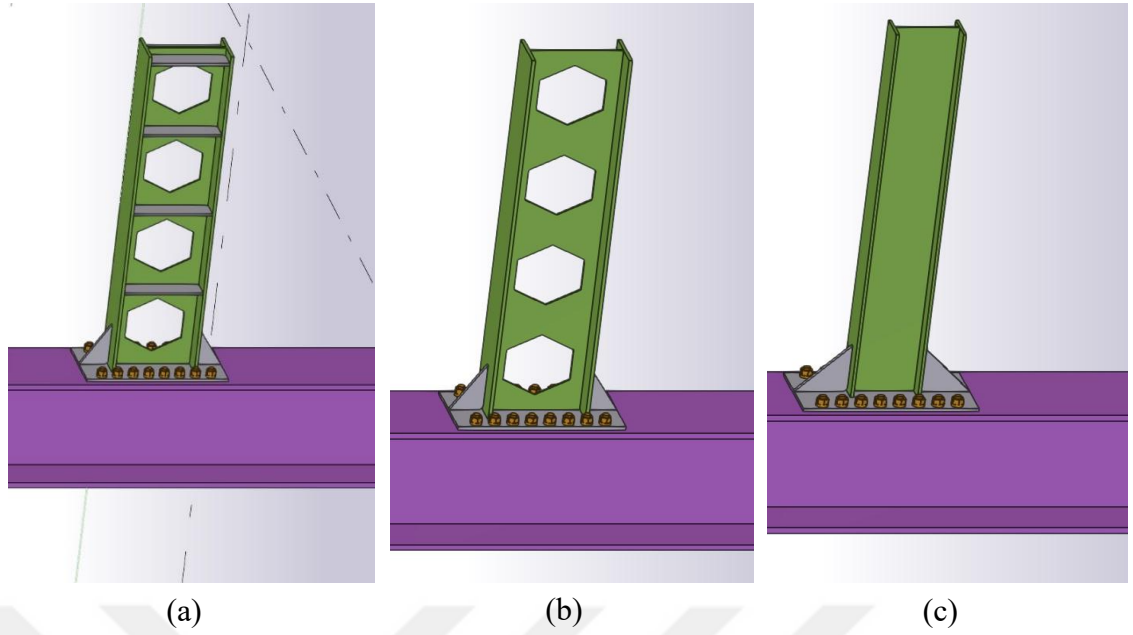
Şekil 10. Deney düzeneği (a) Soldan görünüş, (b) Önden görünüş, (c) Sağdan görünüş

Tablo 5. Deney düzeneği elemanları

Numara	Deney düzeneği Elemanı
1	Çerçeve Sistem
2	Hidrolik Aktüatör
3	Deney numunesi
4	Rijit kolon
5	Kiriş uç plakası
6	Bulonlar
7	Burkulma çubukları
8	LVDT
9	Yanal destek elemanı



Şekil 11. Numuneler (a) IPE 140 petekli-berkitmeli, (b) IPE 140 petekli, (c) IPE 140 saf



Şekil 12. Numuneler (a) IPE 200 petekli-berkitmeli, (b) IPE 200 petekli, (c) IPE 200 saf

3.5. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri

Deprem benzeri döngüsel yükler altında çelik yapı taşıyıcı eleman davranışlarının doğru bir şekilde değerlendirilebilmesi için yükleme durumunun bilimsel olarak değerlendirilmiş bir protokol dâhilinde uygulanması gerekmektedir. Döngüsel yükler, özellikle gövdesi boşluklu petek kirişler ve yangına maruz kalmış çelik kirişler gibi spesifik gerilme dağılımına sahip elemanlarda yerel plastikleşmenin karakterini, burkulma eğilimlerini ve enerji yutma kapasitesini belirlemek için önemli bir unsurdur. Bu nedenle literatürde farklı amaçlara hizmet eden çeşitli döngüsel yükleme protokolleri geliştirilmiştir.

Bu deneysel çalışma kapsamında yangına maruz bırakılmış dolu gövdeli ve petek gövdeli kirişlerin döngüsel yük altındaki davranışlarını incelemek için FEMA-350 yükleme protokolü temel alınmıştır. Aşağıda, FEMA-350 protokolünün yapısı, deneysel çalışmaya sağladığı katkılar sunulmuş ve diğer protokollerle karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır.

3.5.1. FEMA-350 Yükleme Protokolü [2]

FEMA-350 protokolü, deprem etkisi altında plastikleşme karakteri gösteren çelik yapı elemanlarının çevrimsel davranışını temsil etmek amacıyla geliştirilmiş çok döngülü, artan genlikli bir yükleme protokolüdür. Protokolün temel yaklaşımı, deney

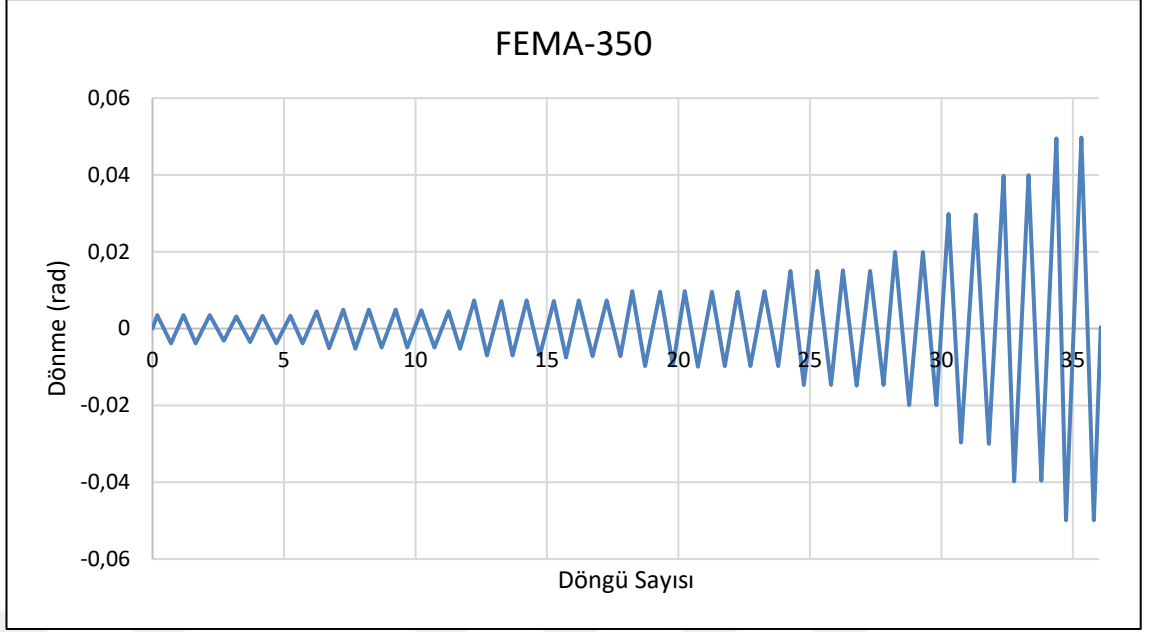
numunesinin hem küçük genlikli çok döngüsel hem de büyük plastik şekil değiştirmelere yol açacak genlikte daha az döngüsel yükler altında nasıl performans gösterdiğini ortaya çıkarmaktır. Bu özellik, özellikle yangın sonrası mekanik özellikleri zayıflayan çelik taşıyıcı elemanların davranışını anlamak açısından önemlidir.

FEMA-350’de yükleme adımları artan plastik dönme seviyeleri esas alınarak tanımlanır. Düşük genliklerde çok sayıda döngü uygulanırken, genlik arttıkça döngü sayısı azaltılır ve yapı giderek daha ağır yük taleplerine maruz bırakılır. Deney, elemana her döngüde uygulanan tepe yükünün deney sürecince uygulanan maksimum yükün %20’sinin altına düşmesiyle göçme kriterine ulaşılır. Tepe yük her döngünün en yüksek değeridir; maksimum yük (P_{max}) ise deney boyunca ulaşılan tek ve en büyük yüküdür. Göçme kriteri, tepe yüklerin P_{max} ’in %20’sinin altına düşmesiyle tanımlanır. Bu strateji hem rijitlik kaybının hem de süneklik ve enerji yutma kapasitesinin kapsamlı şekilde değerlendirilmesine olanak sağlar.

Yangın sonrası malzeme davranışını ortaya çıkarma açısından FEMA-350 oldukça başarılı bir yükleme protokolüdür. ISO 834 eğrisi izlenerek 1049°C’ye kadar ısıtılan numuneler, yangın sonrası gevşemiş, rijitliği azalmış ve mikro yapısal dönüşüm geçirmiş gerçek bir çelik davranışı sergilemektedir. Bu şartlarda FEMA-350’nin sunduğu çoklu döngüler, özellikle:

- açıklık çevresindeki yerel gerilmelerin döngüsel yük altında ulaştığı seviyeler,
- Vierendeel göçme mekanizmasının gelişimi,
- gövde burkulması ve plastik mafsallarda davranışının gözlemlenmesi,
- enerji yutma kapasitesinin çeşitli kombinasyonlara bağlı olarak kıyaslanabilir şekilde ölçülebilmesi gibi parametrelerin sağlıklı bir biçimde değerlendirilmesini sağlar.

Bu nedenle FEMA-350, yangına maruz bırakılmış petek kirişlerin döngüsel yük davranışını inceleyen bu deneysel çalışmada en uygun ve en güvenilir yükleme protokolü olarak seçilmiştir.



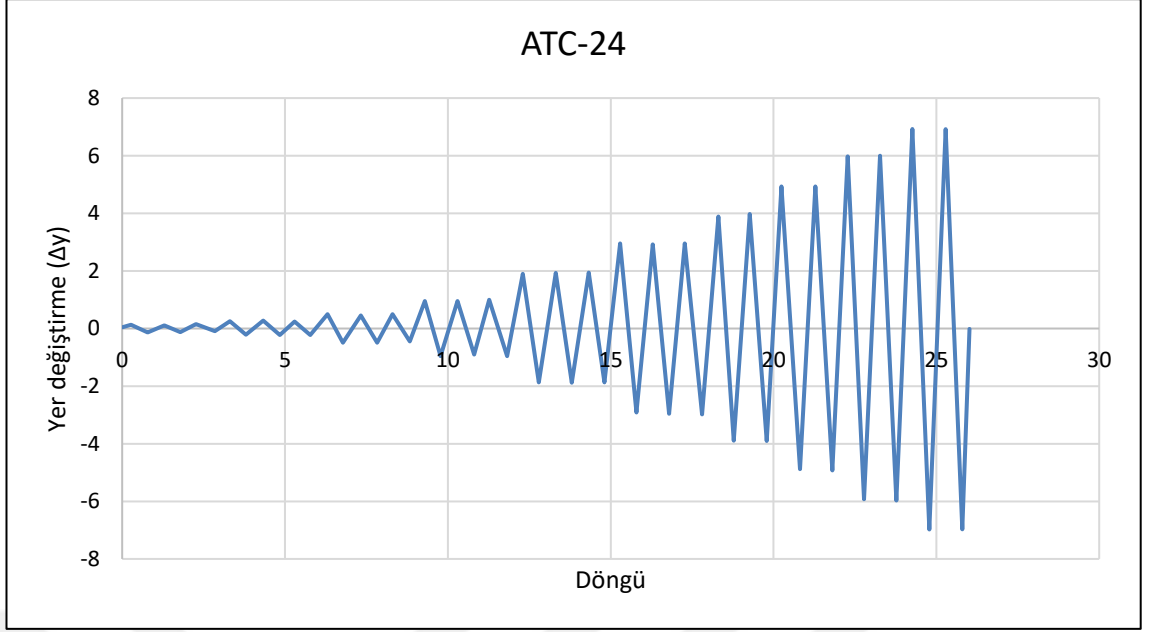
Şekil 13. FEMA-350 yükleme protokolü [2]

3.5.2 Diğer Döngüsel Yükleme Protokolleri

Farklı deneysel amaçlara hizmet eden çeşitli yükleme protokolleri literatürde kullanılmaktadır. Her birinin hedeflediği yapısal davranış farklıdır ve uygun protokolün seçimi çalışmanın amacına göre yapılmalıdır.

a) ATC-24 Yükleme Protokolü [10]

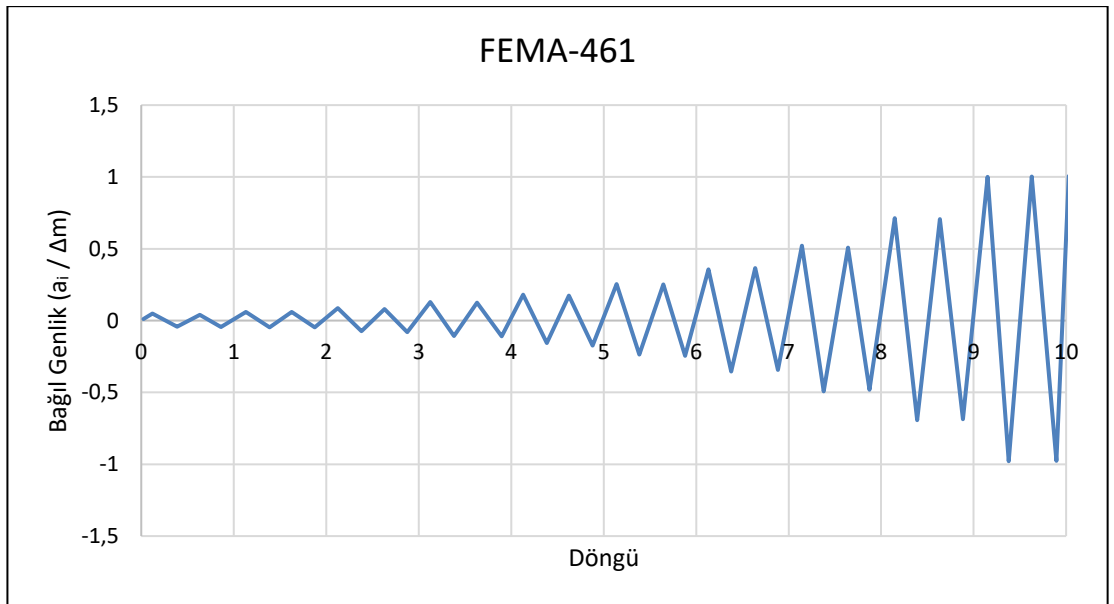
ATC-24, çelik ve betonarme yapılarda elastik ve elastik ötesi davranışların değerlendirilmesi için geliştirilmiş yer değiştirme kontrollü bir yükleme protokolüdür. Yükleme adımları akma deplasmanının katları şeklinde tanımlanır ($0.5\Delta_y$, $1\Delta_y$, $2\Delta_y$ vb.). Ancak döngü sayısının düşük olması ve taleplerin elastik bölgede daha belirgin olması nedeniyle ATC-24, yangın etkisiyle zayıflamış petek kirişlerde beklenen plastikleşme ve yerel göçme mekanizmalarını FEMA-350 kadar iyi temsil edemez.



Şekil 14. ATC-24 yükleme protokolü [10]

b) FEMA-461 Yükleme Protokolü [3]

FEMA-461, özellikle sürüklenmeye duyarlı doğrudan yapısal elemanlar için geliştirilmiştir. Bu elemanların doğrudan ana taşıyıcı elaman olma zorunlulukları da bu protokol için yoktur. Deformasyon adımları artan genlikli şekilde ilerler ve her adımda iki döngü uygulanır. Bu protokol, genel sistem davranışını değerlendirmeye uygun olsa da petek kirişlerdeki açıklık çevresi plastikleşmeyi, yerel gerilme yığılmalarını ve yangın sonrası yorulma davranışını FEMA-350 kadar detaylı ortaya koyamaz.



Şekil 15. FEMA- 461 yükleme protokolü [3]

3.5.3. FEMA-350'nin Bu Çalışmadaki Avantajları

Bu çalışma kapsamında FEMA-350'nin tercih edilmesinin temel gerekçeleri şu şekilde özetlenebilir:

- Yangın sıcaklığına maruziyet sonrası mekanik özellikleri zayıflamış olan çelik taşıyıcı elemanın yükleme surumu sonrası meydana gelen yapısal davranışını çoklu döngüler altında gerçeğe en yakın biçimde ortaya koyması,
- Yükleme protokolü sonrası oluşan etkilerin, petek kirişlerin gövdesinde var olan açıklıkların çevresinde yoğunlaşan Vierendeel etkisi, yerel burkulmalar ve plastikleşme bölgelerini belirginleştirmesi
- Yangına sıcaklığı etkisi karşısında boya korumalı ve boya korumasız numunelerin enerji yutma kapasitesinin birbirleriyle karşılaştırılabilir şekilde ölçülmesine olanak tanınması,
- Yangın ve döngüsel yük birleşik etkisinin oluşturduğu rijitlik kaybını adım adım izlemeyi sağlaması,
- Uluslararası literatürde yaygın kabul görmüş standart bir yöntem olması ve sonuçların bilimsel karşılaştırılabilirliğini artırması.

Bu nedenlerle FEMA-350 yükleme protokolü, yangın etkisine maruz bırakılmış petek kirişlerin döngüsel yük davranışını inceleyen bu deneysel çalışmanın gerekliliklerini karşılayan en uygun prosedürdür.

4. DENEYSEL VERİLERİN YORUMLANMASI VE KARŞILAŞTIRMA

4.1. Numunelerin Karşılaştırılması

Bu bölümde, 3. bölümde malzeme özellikleri, numune nitelikleri, yangın maruziyeti ve koruma yöntemi ile yükleme protokolleri ayrıntılı biçimde açıklanan deneysel altyapı doğrultusunda, farklı parametrelerin (profil kesiti, petek gövde kullanımı, berkitme levhası varlığı ve yangın koruma durumu) çelik kirişlerin yapısal performansı üzerindeki etkileri, yangına karşı boya korumalı kirişlerin içerisinde olduğu tüm deneysel kombinasyonlar çerçevesinde, karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Karşılaştırmalar; moment taşıma kapasitesi, maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesi, döngüsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesi ve gözlenen göçme modları üzerinden yapılmış olup, her bir numune çifti için deneysel veriler hem tablolarla hem de grafiklerle bütüncül şekilde sunulmuştur. Numunelere ait temel parametrik indisler; P (Petek gövdeli), B (Berkitme levhalı), BK (Boya korumalı), Y (yangına maruz) olarak adlandırılan, deneysel çalışma serisine uygun olarak her biri için sabit veya değişken parametre olma durumuna indirgenebilen indislerdir.

Örneğin:

IPE 140-P-B-BK-Y = IPE 140 Petekli Berkitmeli Boya Korumalı Yanmış

IPE 140-P-Y = IPE 140 Petekli Yanmış

Tablo 6. Deneysel çalışma kapsamında karşılaştırılan numune özellikleri ve deney sonuçları

Karşılaştırılan numuneler	Sabit Parametreler	Değişken Parametreler	Maksimum Moment (kNm)	Maksimum Dönme (rad)	Enerji Yutma (kNm.rad)
IPE 140-P-BK-Y	IPE 140, P, BK, Y	B	58.61	0.152332	64.73
IPE 140-P-B-BK-Y			66.73	0.163372	87.65
IPE 140-P-BK-Y	IPE 140, P, Y	BK	58.61	0.152332	64.73
IPE 140-P-Y			48.89	0.114237	35.68

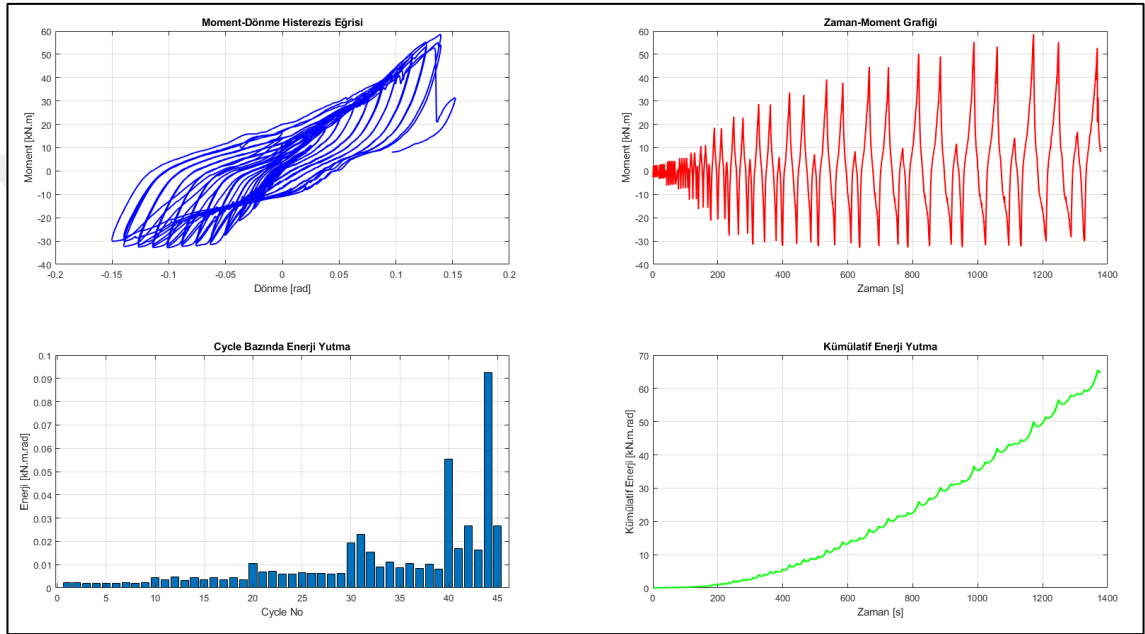
Tablo 6. Deneysel çalışma kapsamında karşılaştırılan numune özellikleri ve deney sonuçları (devamı)

IPE 140-P-B-BK-Y	IPE 140, P, B, Y	BK	66.73	0.163372	87.65
IPE 140-P-B-Y			53.76	0.152370	75.40
IPE 140-Y	IPE 140, Y	BK	48.88	0.165057	74.01
IPE 140-BK-Y			63.34	0.165223	79.05
IPE 140-P-BK-Y	IPE 140, BK, Y	P	58.61	0.152332	43.77
IPE 140-BK-Y			63.34	0.165057	63.34
IPE 200-P-B-B-Y	IPE 200, P, BK, Y	B	108.94	0.129209	136.19
IPE 200-P-BK-Y			92.33	0.127108	70.38
IPE 200-P-B-Y	IPE 200, P, B, Y	BK	88.99	0.163150	106.34
IPE 200-P-B-BK-Y			108.94	0.129209	136.19
IPE 200-P-Y	IPE 200, P, Y	BK	76.18	0.155310	95.14
IPE 200-P-BK-Y			92.33	0.127107	70.38
IPE 200 -Y	IPE 200, Y	BK	64.40	0.152475	94.59
IPE 200-BK-Y			95.92	0.165225	80.30
IPE 200-BK-Y	IPE 200, BK, Y	P	95.92	0.165225	94.59
IPE 200-P-BK---Y			92.33	0.127108	70.38

4.1.1. Berkitme Etkisi

Bu çalışmada, IPE 140 yangına karşı boya korumalı ve yangına maruz kalmış çelik petek kirişlerde kullanılan berkitme levhası uygulamasının, yapısal davranış üzerine etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, kirişlerdeki berkitme levhasının, kirişin hem eğilme etkisi altındaki moment taşıma kapasitesini hem de enerji yutma kapasitesini belirgin şekilde etkilediği gözlenmiştir. Berkitmesiz numunenin (Şekil 16) M_{max} değeri 58.61 kNm iken, berkitmeli numunede (Şekil 18) bu değer 66.73 kNm'ye çıkması, berkitme levhasının yerel gerilme yığılmaları sonucunda plastik moment taşıma kapasitesinin artışına olan etkisini ortaya koymuştur. Özellikle, döngüsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesi berkitmesiz numuneye ait olan 64.73 kNm.rad değerinden,

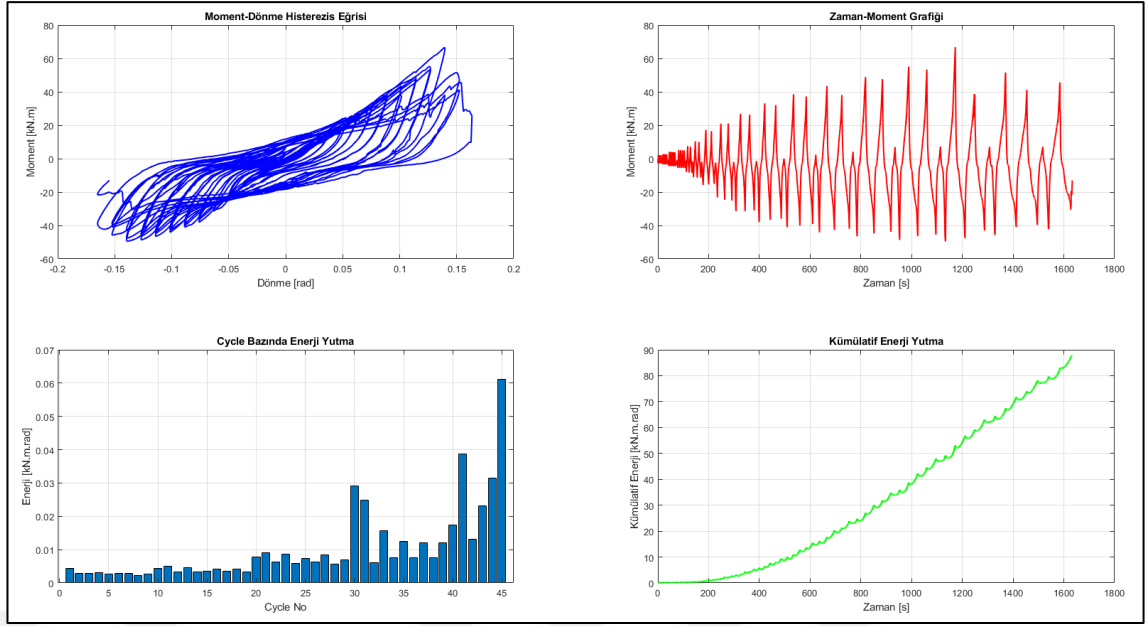
berkitmeli numunede 87.65 kNm.rad seviyesine kadar yükselmiştir. Bu belirgin artış, berkitme levhalı kirişlerin, döngüsel yükler altındaki yapısal davranışları açısından daha üstün olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesi değerlerinin (0.152332 rad'a karşılık 0.165122 rad) birbirlerine yakın olmaları, artan taşıma gücüne rağmen sünek davranışın korunduğunu göstermektedir. Berkitmeli numune toplam 99 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8497 kNm.rad) yaparken, berkitmesiz numune toplam 90 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.6716 kNm.rad) yapmıştır.



Şekil 16. IPE 140-P-BK-Y numunesine ait deney sonuçları



Şekil 17. IPE 140-P-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı



Şekil 18. IPE 140-P-B-BK-Y numunesine ait deney sonuçları

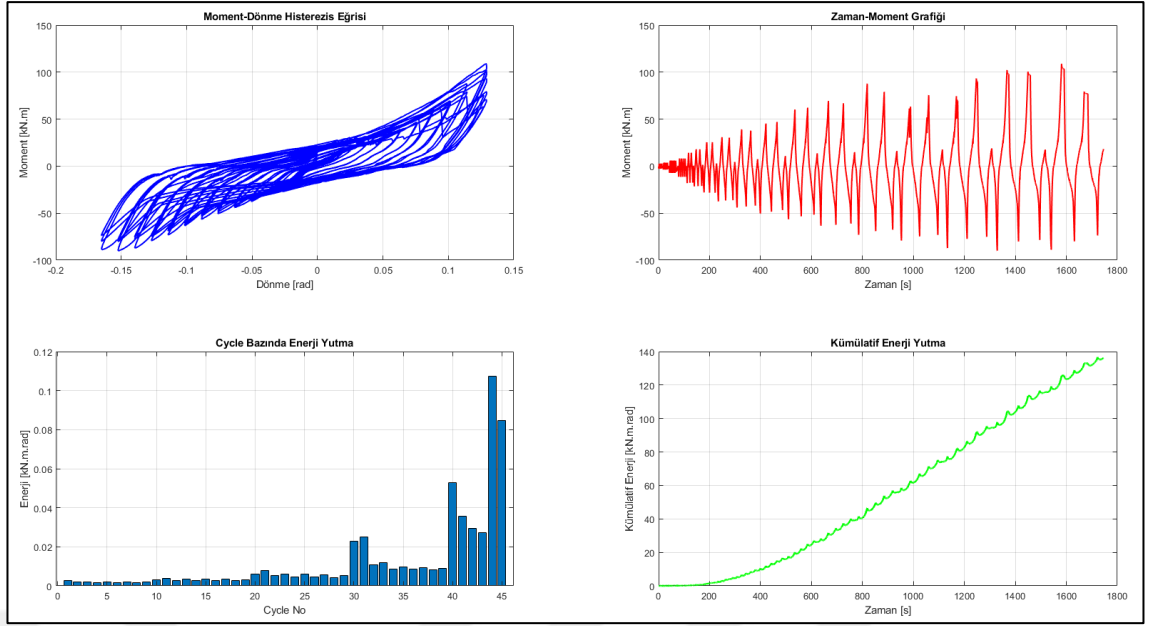


Şekil 19. IPE 140-P-B-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Yangın ve sonrasında uygulanan döngüsel yükler altındaki davranışları incelenen boya korumalı numunelerden elde edilen sonuçlar, berkitme levhalarının göçme mekanizmasını temelden değiştirdiğini göstermektedir. Berkitmesiz numune (Şekil 17),

yüksek sıcaklık etkisiyle mekanik özellikleri zayıflayan çeliğin kesme kuvvetlerini karşılayamaması sonucu, gövde dikmesinde (web-post) ani stabilite kaybı ve Vierendeel eğilmesi etkisiyle tam kopma (yırılma) yaşayarak gevrek bir göçme modu sergilemiştir. Buna karşın berkitmeli numune (Şekil 19), takviye levhalarının gövde narinliğini azaltması ve burkulma boyunu sınırlandırması sayesinde, döngüsel yüklemekten kaynaklanan enerjiyi kopma yerine yoğun plastik deformasyon ve akma yoluyla sönmülmüş; ağır hasar almasına rağmen kesit bütünlüğünü koruyarak sünek bir davranış göstermiş ve yapının toptan göçmesini engellemiştir

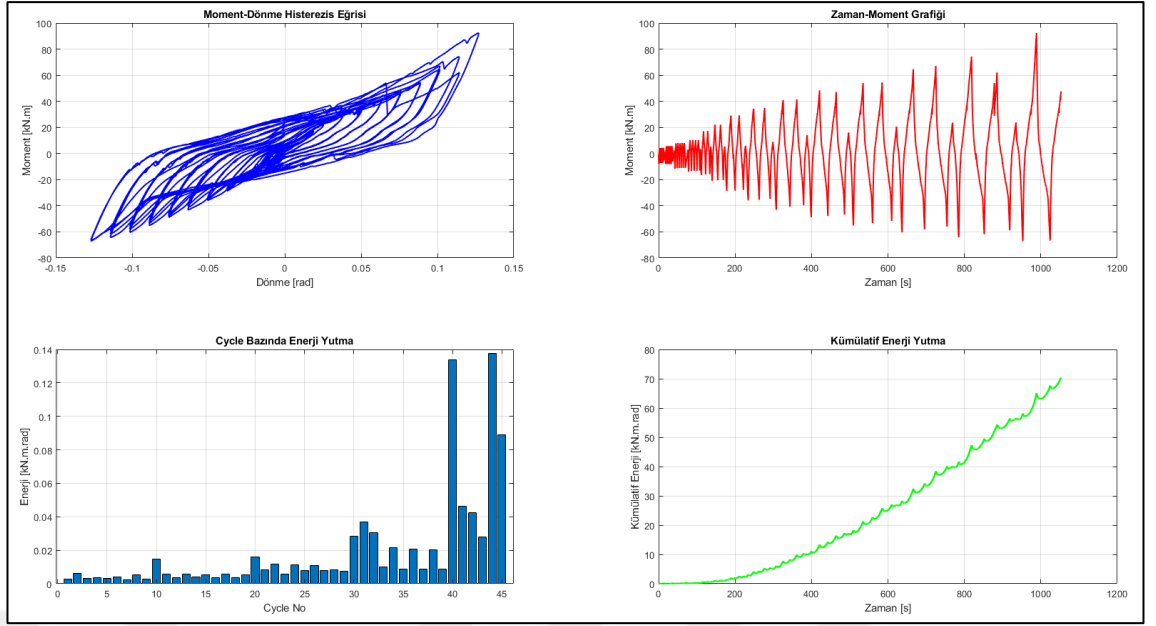
Karşılaştırmalı bu çalışmada, IPE 200 kesitli, petek gövdeli, yangın boyası korumalı ve yangına maruz kalmış çelik kirişlerdeki berkitme levhası uygulamasının döngüsel yükler altında, moment taşıma kapasitesi, taşıyıcı eleman numunenin süneklilik davranışı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır. Çalışmanın değişken parametresi olan berkitme levhası, petek açıklıkları nedeniyle gövde dayanımında meydana gelen zayıflamayı gidererek kesitin plastik moment taşıma kapasitesini kayda değer şekilde iyileştirmiştir. Deneysel veri sonuçlarına göre, berkitmesiz numunenin (Şekil 20) maksimum moment kapasitesi 92,33 kNm iken, berkitmeli numunede (Şekil 22) bu değer 108,94 kNm seviyesine yükselmiş, bu da yaklaşık %18,0 oranında bir artışa tekabül etmiştir. Dönme kapasitesi de benzer bir iyileşme göstermiş; 0,127108 rad'dan 0,129209 değerine çıkarak, berkitmenin plastik şekil değiştirme kabiliyetini artırarak sünek davranışı güçlendirdiğini ortaya koymuştur. En dikkat çekici bulgu, döngüsel yükler altında ortaya çıkan enerji yutma kapasitesinde gözlenmiştir; berkitmesiz numunede olan 70.38 kNm.rad değeri berkitmeli numunede 136.19 kNm.rad seviyesine yükselerek, yaklaşık %86,9'luk büyük bir artış sağlamıştır. Bu durum, berkitme levhalarının döngüsel yükler altında daha geniş ve kararlı plastikleşme bölgeleri oluşturduğunu ve böylece enerji yutma kapasitesini üstün bir seviyeye taşıdığını göstermektedir. Berkitmeli numune toplam 101 döngü (ortalama döngü enerjisi: 1.3077 kNm.rad) yaparken, berkitmesiz numune toplam 84 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8077 kNm.rad) yapmıştır.



Şekil 20. IPE 200-P-BK-Y numunesine ait deney sonuçları



Şekil 21. IPE 200-P-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı



Şekil 22. IPE 200-P-B-BK-Y numunesine ait deney sonuçları



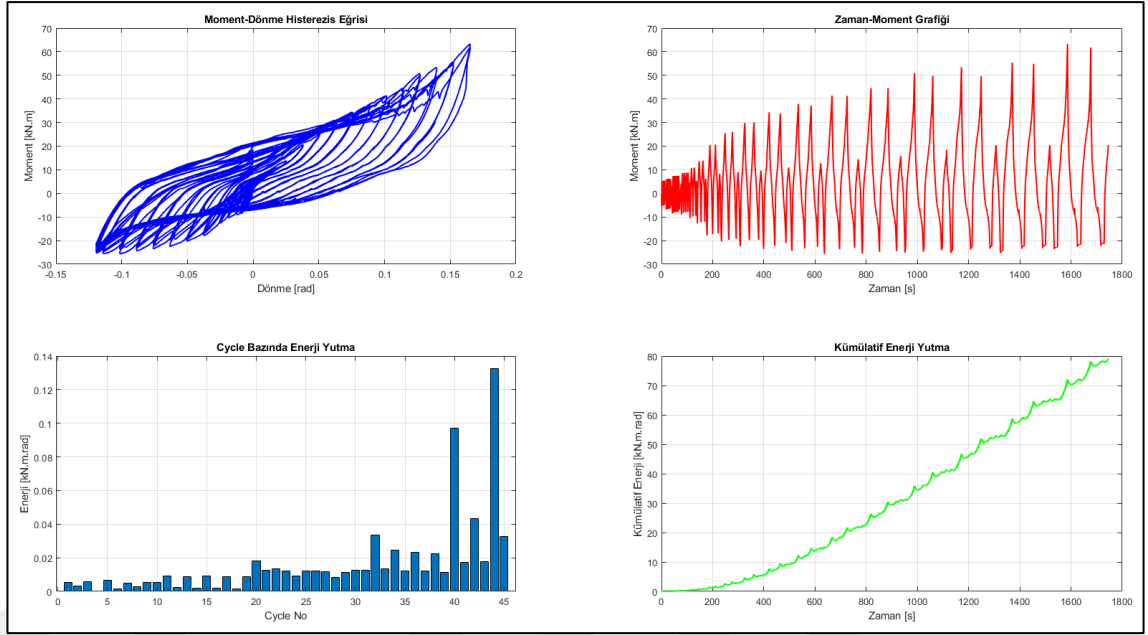
Şekil 23. IPE 200-P-B-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Yangın etkisine maruz kalmış ve yangına karşı boya korumalı numuneler, döngüsel yüke tabi tutulduğunda petek açıklıklı orta bölgede kaplama tabakasında dökülme ve kavrulma görülmüş, ancak berkitme uygulaması göçme davranışını belirgin şekilde değiştirmiştir. Berkitmesiz numunede (P-BK-Y) (Şekil 21) petek açıklığı

evresinde eğilme altında lokal burkulma ve yırtılma eğilimi daha erken başlamış, alt başlık bölgesine yakın kesimlerde hasar ilerleyici şekilde yayılmış ve petek geometrisinin etkisiyle çentik davranış üçlenmiştir. Buna karşılık berkitmeli numunede (P-B-BK-Y) (Şekil 23) eklenen levhalar deformasyonun yayılımını sınırlamış, kesit stabilitesi korunmuş ve burkulma daha geç oluşmuştur; hasar çoğunlukla lokal kalmış ve göçme davranış ilerleyici yayılım göstermemiştir. Sonuç olarak berkitme uygulaması, yangınla zayıflamış kesitlerde göçmeyi daha kontrollü ve gecikmeli hale getirerek stabilizeyi ve kapasitenin korunma süresini artırmıştır.

4.1.2. Petek Etkisi

Bu deneysel alışma, IPE 140 kesitli, yangın boyası korumalı ve yangına maruz kalmış elik kirişlerdeki petek tipi gövde tasarımının, dolu gövdeli (peteksiz) kesitlere kıyasla döngüsel yükler altında moment taşıma ücü, yapısal elemanın süneklilik davranış ı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmıştır (Şekil 16 ve Şekil 24) alışma, altıgen petekli gövde yapısının bölgesel rijitliği azaltması nedeniyle maksimum moment kapasitesinde peteksiz kesite kıyasla bir miktar düşüş gözleendiğini ortaya koymuştur. Peteksiz numunenin maksimum moment değeri 63.34 kNm iken, petekli numunede bu değeri 58.61 kNm olarak kaydedilmiştir. Maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesi değeri incelendiğinde ise, peteksiz numunenin 0.165223 rad değeri karşılık, petekli numunenin 0.152332 rad değeri kalarak yaklaşık düzeylerde dönme etkilerinin olduğu görülmüştür. Öte yandan, döngüsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesi açısından, petekli numunede hesaplanan 43.77 kNm.rad değeri, peteksiz numunede hesap edilen 63.34 kNm.rad değeri altında kalmıştır. Petekli gövdeye ait taşıyıcı kesitin enerji yutma kapasitesinin dolu gövdeye göre daha az olduğu belirlenmiştir. Petekli numune toplam 99 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8497 kNm.rad) yaparken, peteksiz numune toplam 99 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.7763 kNm.rad) yapmıştır.



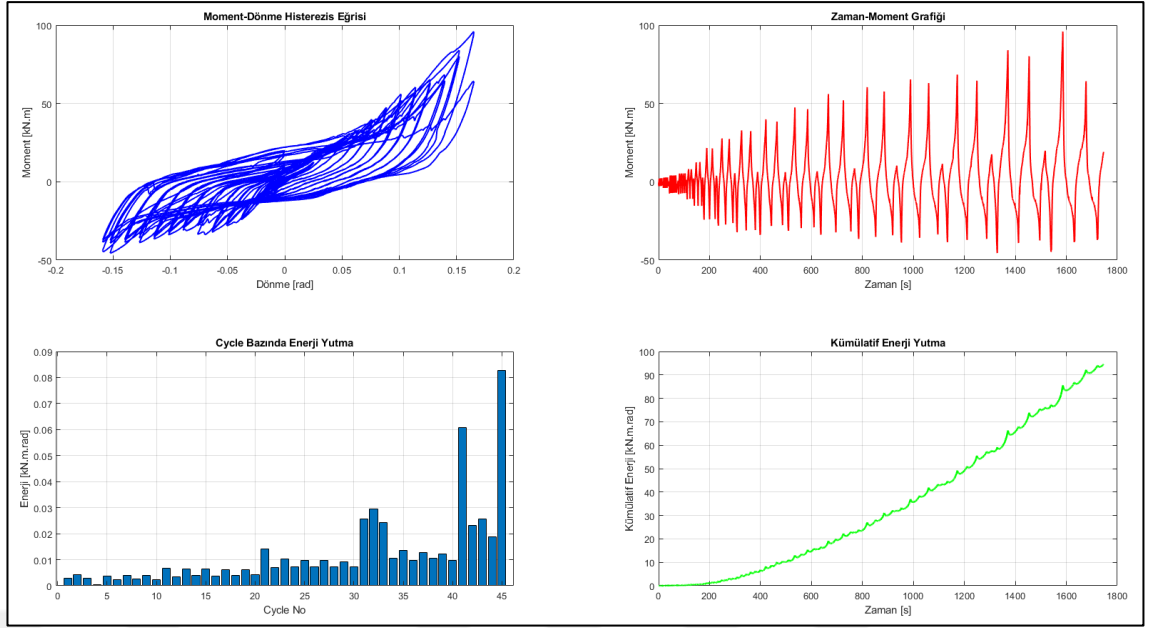
Şekil 24. IPE 140-BK-Y numunesine ait deney sonuçları

Şekil 17 (IPE140-P-BK-Y) ve Şekil 25’de (IPE140-BK-Y) gösterilen yangın görmüş ve yangın boyası korumalı numuneler kapsamında karşılaştırılan IPE 140-P-BK-Y numunesi ile aynı özelliklere sahip peteksiz referans numune (IPE140-BK-Y) incelendiğinde, petek formunun göçme davranışını belirleyici şekilde değiştirdiği açıkça görülmüştür. Petekli numunede yangının etkisiyle incelen gövde kesiminde gerilme yığılması doğrudan açıklık kenarlarında odaklanmış; bu bölgelerde lokal burkulma, yırtılma ve kesit kopma eğilimi gelişmiştir. Plastik şekil değiştirme, petek boşluğu çevresindeki keskin geçiş bölgelerinde yoğunlaşmış ve göçme belirli bir noktadan başlayarak ilerleyici şekilde yayılmıştır. Boya tabakasının kısmen korunmuş olması kesitin ısı sonrası dayanımını kısa süreli olarak desteklese de geometrik süreksizlik nedeniyle göçme kaçınılmaz olarak petek çevresinde başlamıştır. Buna karşılık peteksiz referans numunede hasarın daha dengeli bir şekilde yayıldığı görülmüştür; gövde boyunca tekil bir çentik bölgesi oluşmadığından burkulma ve plastikleşme kesit boyunca yayılmış, alt başlık civarında geniş yüzeyli eğilme deformasyonları ve vida bağlantı bölgesine doğru ezilme davranışları gelişmiştir. Peteksiz kesitte belirgin bir lokal kopma veya keskin yırtılma gözlenmemiş; bunun yerine gövde ve başlıkta yayılı bir kalıcı şekil değiştirme oluşmuştur. Sonuç olarak, petekli numunede göçme mekanizması lokalize, hızlı ve geometrik süreksizliğin kontrol ettiği şekilde gelişirken, peteksiz numunede hasar yayılı, daha rijit ve ani kapasite kaybı oluşturmeyen bir karakterde gerçekleşmiştir.



Şekil 25. IPE 140-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Bu deneysel çalışma, IPE 200 kesitli, yangın boyası korumalı ve yangına maruz kalmış çelik kirişlerdeki altıgen petek gövde tasarımının, dolu gövdeli kesitlere kıyasla moment taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi döngüsel yükleme sonrası ortaya çıkan yapısal davranışların üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktadır (Şekil 20 ve Şekil 26). Çalışmanın temel bulgusu, altıgen petek açılımının gövde rijitliğini düşürmesi nedeniyle petekli numunenin taşıma gücü ve dönme kapasitesini bir miktar azalttığı, ancak enerji yutma kapasitesinde artış sağladığı yönündedir. Deneysel sonuçlara göre, peteksiz boya korumalı numunenin maksimum moment kapasitesi 95.92 kNm iken, petekli boya korumalı numunede bu değeri 92.33 kNm 'dir. Bu sonuç, petek gövdeli kiriş numunesinde yaklaşık %3,74 oranında bir düşüş olduğunu ve petek açılması nedeniyle kiriş gövdesinde yerel rijitliğinin azalmasının moment kapasitesinde doğal bir kayba yol açtığını kanıtlamaktadır. Dönme kapasitesi peteksiz numunede 0.165225 rad değerine karşılık, petekli numunede 0.127108 rad seviyesinde kalarak yaklaşık %23,07 oranında bir azalmaya işaret etmiştir. Bu durum açıklıklarının yerel burkulmaya yol açarak sünek davranışı sınırladığını bizlere göstermektedir. Enerji yutma kapasitesi açısından, petekli IPE 200 kesit 70.38 kNm.rad kümülatif enerji yutma kapasitesi varken, peteksiz numune 94.59 kNm.rad kümülatif enerji yutma kapasitesine sahiptir. Petekli numune toplam 84 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8077 kNm.rad) yaparken, peteksiz numune toplam 100 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.9121 kNm.rad) yapmıştır.



Şekil 26. IPE 200-BK-Y numunesine ait deney sonuçları

Şekil 21 (IPE 200-P-BK-Y) ve Şekil 27’de gösterilen yangına maruz kalmış ve boya korumalı IPE 200 numuneleri incelendiğinde, petek etkisinin göçme mekanizmasını belirgin şekilde değiştirdiği görülmüştür. Petekli numune (IPE 200-P-BK-Y) yangın sonrası gövdenin incilmesi nedeniyle plastik şekil değiştirme petek boşluğunun keskin kenarlarında yoğunlaşmış, bu bölgede önce lokal burkulma ardından yırtılma gelişmiş ve göçme belirli bir noktadan başlayarak ilerleyici şekilde yayılmıştır. Kesitteki süreksizlik, gerilme yığılmasını artırarak hasarın lokalize olmasına neden olmuştur. Peteksiz numune (IPE 200-BK-Y) ise kesit sürekliliğinin korunması nedeniyle plastikleşme kesit boyunca daha dengeli oluşmuş; bağlantı bölgesi ve başlık plakası çevresinde geniş yüzeyli eğilme, ezilme ve kalıcı deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu numune ani yırtılma yerine, kapasitenin zamanla azaldığı kademeli bir göçme davranışı oluşmuştur. Genel olarak petek formu göçmenin başlangıç noktasını belirleyen kritik bir zayıflama oluşturmakta, peteksiz kesitte ise göçme daha bütüncül, dağınımlı ve gecikmeli gerçekleşmektedir.



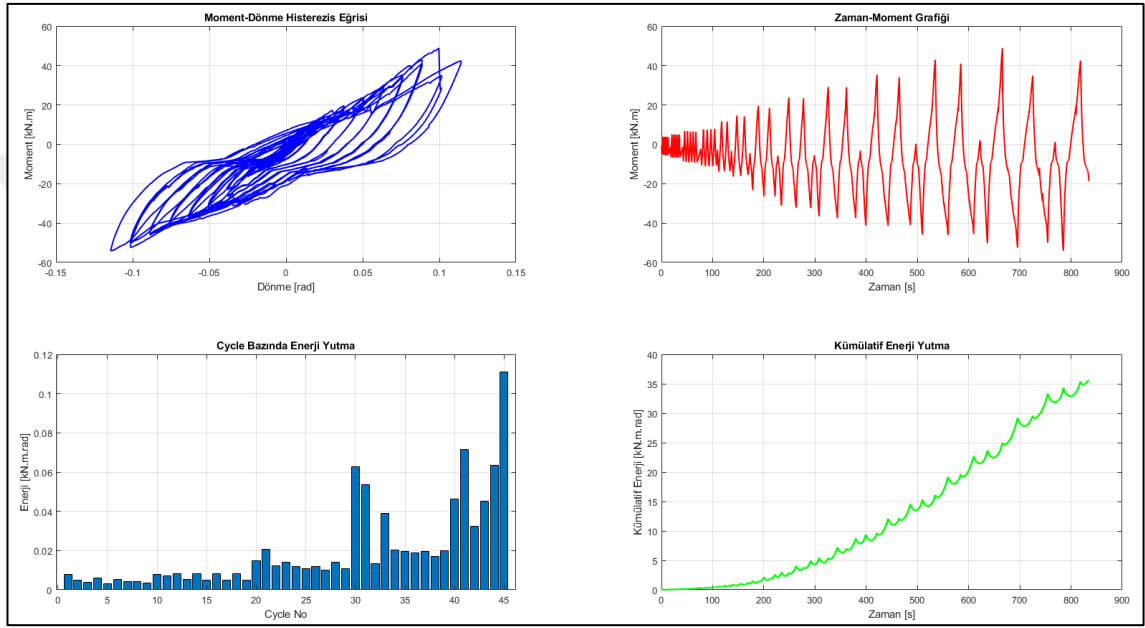
Şekil 27. IPE 200-BK-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Yangına maruz kalmış ve boya korumalı IPE 200 numuneleri incelendiğinde, petek etkisinin göçme mekanizmasını belirgin şekilde değiştirdiği görülmüştür. Petekli numunede (IPE 200-P-BK-Y) (Şekil 21) yangın sonrası gövdenin incelmesi nedeniyle plastik şekil değiştirme petek boşluğunun keskin kenarlarında yoğunlaşmış, bu bölgede önce lokal burkulma ardından yırtılma gelişmiş ve göçme belirli bir noktadan başlayarak ilerleyici şekilde yayılmıştır. Kesitteki süreksizlik, gerilme yığılmasını artırarak hasarın lokalize olmasına neden olmuştur. Peteksiz numunede (IPE 200-BK-Y) (Şekil 27) ise kesit sürekliliğinin korunması nedeniyle plastikleşme kesit boyunca daha dengeli oluşmuş; bağlantı bölgesi ve başlık plakası çevresinde geniş yüzeyli eğilme, ezilme ve kalıcı deformasyonlar meydana gelmiştir. Bu numunede ani yırtılma yerine, kapasitenin zamanla azaldığı kademeli bir göçme davranışı oluşmuştur. Genel olarak petek formu göçmenin başlangıç noktasını belirleyen kritik bir zayıflama oluşturmakta, peteksiz kesitte ise göçme daha bütüncül, dağılımlı ve gecikmeli gerçekleşmektedir.

4.1.3. Boya Koruma Etkisi

Bu karşılaştırılmalı çalışmada, yangına maruz kalmış IPE 140 petek gövdeli kirişlerde, döngüsel yüklerin uygulanması durumunda ortaya çıkan yapısal davranışlar, yangın boyası korumalı ve korumasız durumlar açısından karşılaştırılmıştır (Şekil 20 ve Şekil 28). Çalışma sonucunda yangına karşı koruma boyasının, çeliğin yangına maruz kalma durumunda dayanım kaybını geciktirerek yapısal performansa önemli bir katkı sağladığı görülmüştür. Boya koruması bulunmayan numunenin maksimum moment kapasitesi 54.11 kNm iken, boya korumalı numunede bu değer 58.61 kNm'ye yükselmiştir. Boya koruması ayrıca plastik şekil değiştirme kapasitesi kapsamında sünek davranışı desteklemiştir. Bu durum, maksimum momente karşılık gelen dönme

kapasitesinin 0.114237 rad'dan 0.152332 rad seviyesine çıkmasıyla kanıtlanmıştır. Boyasız numunenin enerji yutma kapasitesinde 35.68 kNm.rad değeri görülürken, boya korumalı numunede bu değer 64.73 kNm.rad olarak hesaplanmıştır. Boyalı numune toplam 90 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.6716 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 78 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.4235 kNm.rad) yapmıştır. Bu sonuçlar, yangın boyası korumasının, yangına maruz kaldıktan sonra döngüsel yüklerin uygulandığı kırışlerde enerji yutma kapasitesini belirgin biçimde artırdığını göstermektedir.



Şekil 28. IPE 140-P-Y numunesine ait deney sonuçları

Şekil 29 (IPE 140-P-Y) ve Şekil 17 (IPE 140-P-BK-Y)' de gösterilen yangına maruz kalmış petekli IPE 140 numunelerde boya korumasının etkisi incelendiğinde, boya korumalı numunede (IPE 140-P-BK-Y) göçme daha kontrollü ilerlemiş, petek açıklığı çevresinde oluşan burkulma ve gövde zayıflaması başlangıç bölgesi olsa da hasar büyümesi sınırlı kalmıştır. Boya kaplaması yangın sırasında çelik yüzeyi kısa süreli olarak korumuş, gövde ve başlık bölgelerinde rijitlik kaybı daha gecikmeli gerçekleşmiş ve yük aktarımı sırasında bağlantı elemanları üzerindeki deformasyon hızı düşük seyretmiştir. Buna karşılık korumasız numunede (IPE 140-P-Y) sıcaklık etkisi doğrudan çelik üzerinde gerçekleştiğinden gövde bölgesi daha erken zayıflamış, petek formunun keskin bölgelerinde plastikleşme yerel olarak yoğunlaşmış ve göçme süreci daha ani gelişmiştir. Özellikle başlık-plaka birleşiminde ezilme ve oturma davranışı daha hızlı oluşmuş; göçme ilerledikçe şekil değiştirme hem başlık hem de bağlantı yüzeyine daha

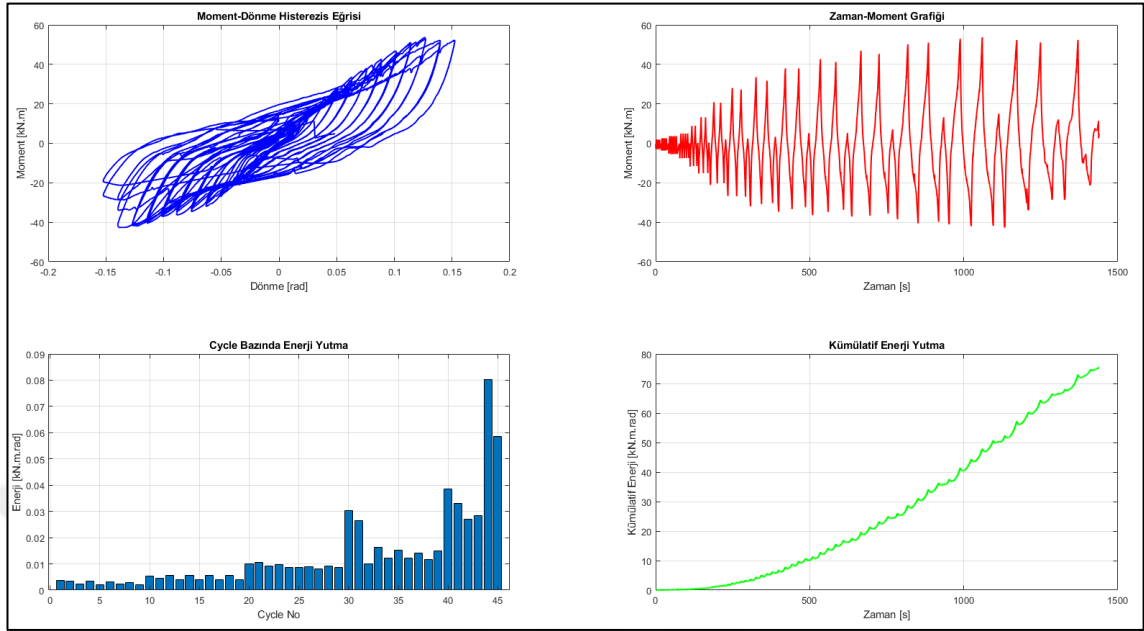
geniş olarak yayılmıştır. Sonuç olarak boya koruması, yangın sonrası kritik bölgelerde rijitlik kaybını geciktirerek göçme sürecini yavaşlatmış; korumasız numunede ise petek açıklıkları yangın sonrası kesit zayıflamasını hızlandırmış ve daha ani kapasite düşüşüne sebep olmuştur.



Şekil 29. IPE 140-P-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Bu çalışmada, IPE 140 kesitli, petekli gövdeye sahip ve berkitme levhaları bulunan çelik kirişlerde, yangın boyası korumasının yapısal taşıyıcı elemanın moment taşıma gücü, yapısal taşıyıcı elemanın sünek davranışı ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır (Şekil 18 ve Şekil 30). Döngüsel yükler altında boya korumalı numunenin maksimum moment kapasitesi 66.73 kNm iken, boyasız numunede bu değer 53.76 kNm olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, yangın boyasının moment taşıma kapasitesine olumlu bir katkı sağladığını göstermektedir. Boya koruması ayrıca plastik şekil değiştirme kapasitesi kapsamında sünek davranışı desteklemiştir. Bu durum, maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesinin 0.152370 rad'dan 0.163372 rad seviyesine çıkmasıyla kanıtlanmıştır. Enerji yutma kapasitesi boyasız numunede 75.40 kNm.rad değeri olarak hesaplanırken, boya korumalı numunede 87.65 kNm.rad olarak hesaplanmıştır. Boyalı numune toplam 99 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8497 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 92 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8163 kNm.rad) yapmıştır. Bu sonuçlar, boya uygulamasının döngüsel yükler altında

enerji yutma kapasitesini artırdığını ve yalnızca yangın dayanımını değil, yapısal taşıyıcı elemanın yük altındaki davranışını da iyileştirdiğini ortaya koymaktadır.



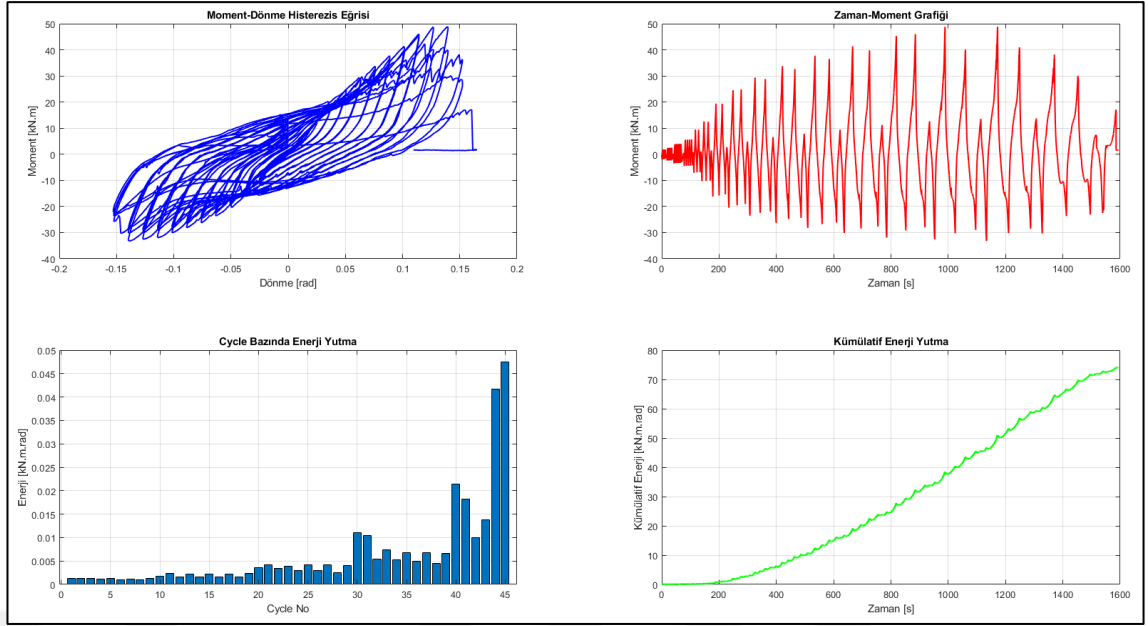
Şekil 30. IPE 140-P-B-Y numunesine ait deney sonuçları

Şekil 19 (IPE 140-P-B-BK-Y) ve Şekil 31’de yangına maruz kalmış petekli ve berkitmeli IPE 140 numunelerde boya korumasının göçme üzerindeki etkisi incelendiğinde, boya korumalı numunede (IPE 140-P-B-BK-Y) gövde bölgesindeki incelme ve deformasyon daha kontrollü ilerlemiş, petek açıklığı çevresinde oluşan burkulma ve yırtılma davranışı göçmenin başlangıç noktası olmakla birlikte hasarın büyüme hızı sınırlanmıştır; intümesan kaplama ısı etkisini belli oranda geciktirdiği için plastikleşme daha geç ortaya çıkmıştır. Buna karşılık korumasız numunede (IPE 140-P-B-Y) yangın sonrası kesit zayıflaması daha belirgin olmuş, petek geometrisinin keskin kenarlarında gerilme yığılması hızla artmış ve gövde bölgesinde lokal yırtılma ilerleyici şekilde gelişmiştir. Bağlantı bölgesine aktarılan yük oturma davranışı, korumasız numunede daha hızlı gelişmiş; başlık-plaka birleşiminde bükülme ve ezilme daha geniş alanlara yayılmıştır. Sonuç olarak intümesan boya, yangın sonrası kesit dayanımını belli bir süre koruyarak göçmenin hızını ve yayılımını azaltmış; berkitme ile birlikte değerlendirildiğinde korumalı numunede göçme daha gecikmeli, sınırlı ve kontrollü gerçekleşirken, korumasız numunede göçme daha ani ve keskin karakterde oluşmuştur.



Şekil 31. IPE 140-P-B-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Bu deneysel çalışmada, IPE 140 kesitli dolu gövdeli çelik kirişlerde uygulanan yangın boyası korumasının, yangına maruz kalmış numunelerin moment taşıma kapasitesi, sünekliği ve döngüsel yükler altında enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır (Şekil 24 ve Şekil 32). Çalışma sonucunda, yangın boyası ile korunmuş numunenin maksimum moment kapasitesi 63.34 kNm iken, boyasız numunede bu değer 48.88 kNm olarak elde edilmiştir. Bu sonuç, boya korumasının bu deneyler kapsamında moment kapasitesini yaklaşık %29,6 oranında artırdığını ve taşıma gücüne olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesi değerleri incelendiğinde (0.165223 rad'a karşılık 0.165057 rad) birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu deneysel çalışmada kullanılan dolu gövdeli kesitler kapsamında, yangın boyasının süneklik üzerinde belirleyici bir değişime yol açmadığı gözlenmiştir. Öte yandan, döngüsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesi boyasız numunede 74.01 kNm.rad iken, boya korumalı numunede 79.05 kNm.rad seviyesine yükselmiştir. Boyalı numune toplam 99 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.7763 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 94 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.7746 kNm.rad) yapmıştır. Bu deneysel çalışmaya ait dolu gövde kesitli numune tiplerinde boya korumasının enerji yutma kapasitesine olumlu yönde etki ettiği görülmektedir.



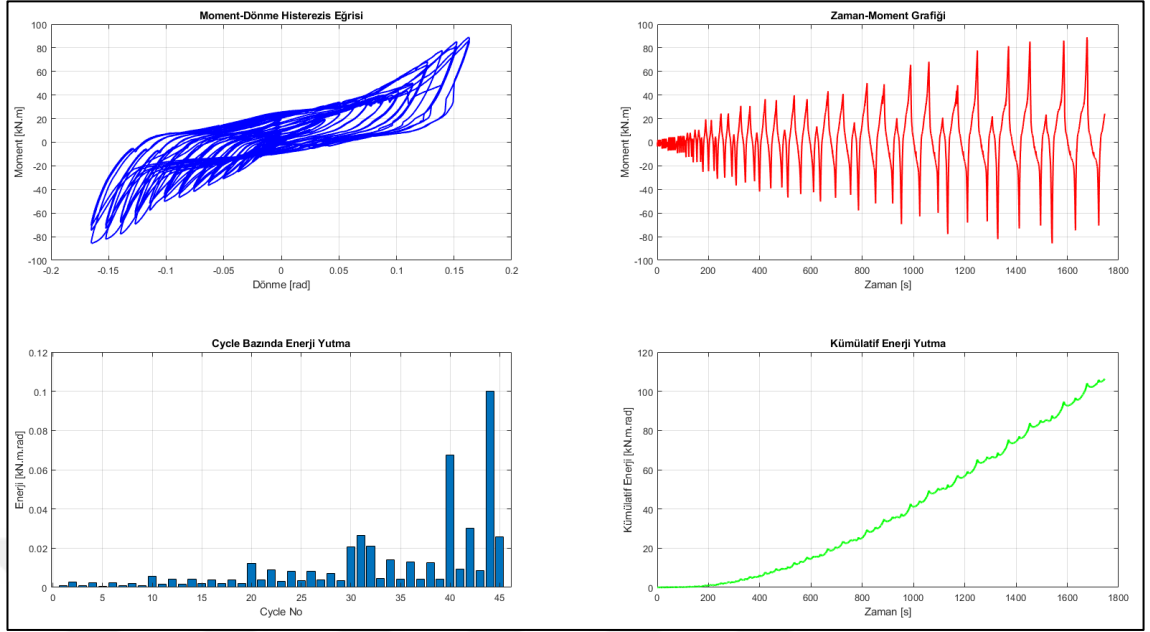
Şekil 32. IPE 140-Y numunesine ait deney sonuçları

Şekil 25 (IPE 140-BK-Y) ve Şekil 33’de gösterilen yangına maruz bırakılan dolu gövdeli IPE 140 numunelerde boya korumasının göçme davranışına etkisi incelendiğinde, korumasız numunede (IPE 140-Y) yangın sonrası başlık-plaka temas bölgesinde hızlı rijitlik kaybı olduğu, bağlantı levhasının erken büküldüğü ve yük aktarım bölgesinde ezilme ile oturma davranışının daha belirgin şekilde geliştiği görülmüştür. Bu numunede yüksek sıcaklık nedeniyle çelik gövde ve başlıkta dayanım kaybı daha erken gerçekleşmiş; plastikleşme bağlantı bölgesine kayarak geniş yüzeyli ve ilerleyici bir deformasyon meydana getirmiştir. Boya korumalı numunede (IPE 140-BK-Y) ise yangın boyasının oluşturduğu koruyucu tabaka sayesinde sıcaklık etkisi gecikmiş, göçme daha kontrollü ve ilerlemeli şekilde gerçekleşmiştir; bağlantı plakası bükülmüş olsa da deformasyon hızı daha düşük olmuş ve ezilme daha sınırlı bölgede gelişmiştir. Sonuç olarak korumasız numunede göçme ani ve hızlı kapasite kaybı ile başlarken, boya korumalı numunede göçme süreci gecikmiş, deformasyon yayılımı daha dengeli olmuş ve bağlantı bölgesinde hasarın derinliği daha düşük seviyede kalmıştır.



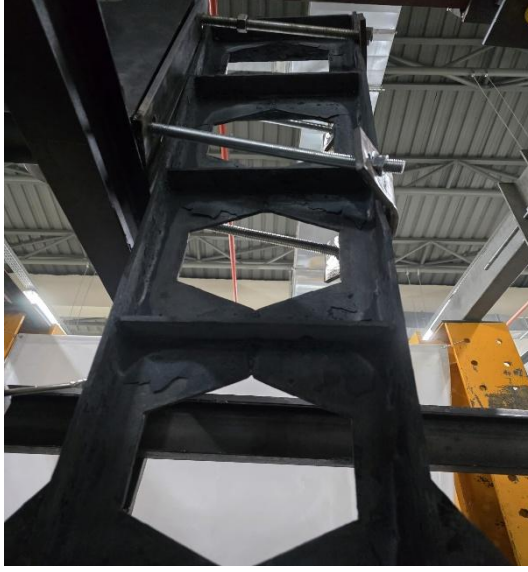
Şekil 33. IPE 140-Y numunesine ait göçme modu davranışı

Bu deneysel çalışma, IPE 200 kesitli, yangın durumuna maruz kalmış petekli gövdeye sahip ve berkitme levhaları bulunan çelik kirişlerde, yangın boyası korumasının döngüsel yükler altındaki moment taşıma kapasitesi, sünekliği ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktadır (Şekil 22 ve Şekil 34). Çalışma sonucunda, yangın boyası korumasının moment kapasitesinde belirgin bir artış sağladığı, ancak dönme kapasitesinde bir miktar sınırlama oluşturduğu görülmüştür. Deney sonucunda ortaya çıkan verilere göre, boyasız numunenin maksimum moment kapasitesi 88.99 KNm iken, boya korumalı numunede bu değer 108.94 KNm seviyesine ulaşarak yaklaşık %22,42 oranında bir artış sağlamıştır. Bu durum, boya korumasının yangına maruziyet sonucundaki döngüsel yükler altında kesitin plastik moment kapasitesini koruma mekanizmasını doğrulamaktadır. Boya korumalı ve korumasız numunelerin dönme kapasiteleri karşılaştırıldığında, değerlerin sırasıyla 0.165257 rad ve 0.165253 rad olduğu görülmüştür. İki değer arasındaki %0.0024 oranındaki ihmal edilebilir fark, boya uygulamasının elemanın nihai dönme kapasitesi ve sünekliği üzerinde herhangi bir olumlu veya olumsuz etkisi olmadığını ve yapısal davranışı değiştirmedikini göstermektedir. Buna karşın, histeretik enerji yutma kapasitesi boyasız numunede 106.34 kNm.rad iken, boya korumalı numunede 136.19 kNm.rad seviyesine yükselmiştir. Bu da yaklaşık %22 oranında bir artışla döngüsel yükler altında enerji yutma kapasitesinin iyileştiğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, boyalı numune toplam 101 döngü (ortalama döngü enerjisi: 1.3077 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 101 döngü (ortalama döngü enerjisi: 1.0146 kNm.rad) yapmıştır.



Şekil 34. IPE 200-P-B-Y numunesine ait deney sonuçları

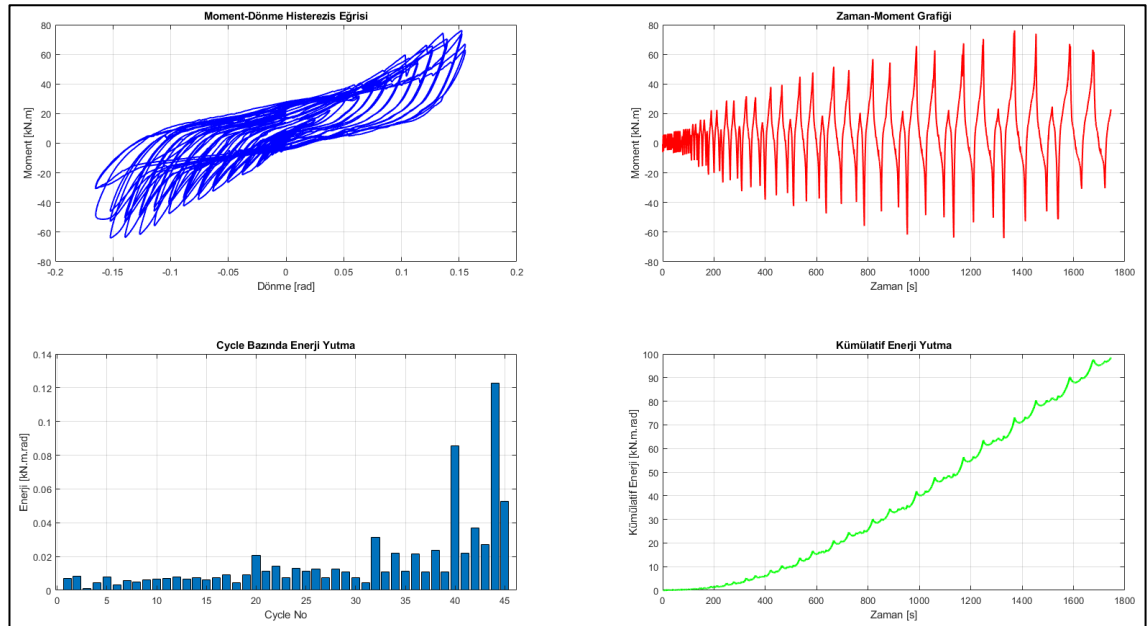
Şekil 23 (IPE 200-P-B-BK-Y) ve Şekil 35’de gösterilen yangına maruz kalmış petekli ve berkitmeli IPE 200 numunelerde boya korumasının göçme davranışına etkisi incelendiğinde, boya korumalı numunede (IPE 200-P-B-BK-Y) göçme ilerlemesi hem zamansal olarak gecikmiş hem de daha sınırlı bölgede kalmıştır. Petek açıklığı çevresinde lokal burkulma ve gövde zayıflaması yine göçmenin başlangıç bölgesini oluştursa da intümesan boya tabakasının yangın sırasında hacimsel şişme etkisiyle kesit dayanımını belirli süre koruduğu, bu nedenle bağlantı plakası bölgesine yük aktarımının daha dengeli gerçekleştiği gözlenmiştir. Boya kaplamasının parçalanarak dökülmesi sonrasında dahi göçme hızı sınırlı kalmış; berkitme levhası yük aktarım doğrultusunda rijitliği artırarak lokal çökmenin geniş alana yayılmasını engellemiştir. Buna karşılık korumasız eşdeğer numunede ısıl etkiden kaynaklanan kesit zayıflığı daha erken meydana gelmiş, petek bölgesindeki burkulma ilerleyerek gövdede süreksizliğe dönüşmüş ve bağlantı bölgesinde hızlı oturma ile ani kapasite kaybı oluşmuştur. Sonuç olarak boya koruması, yangın sonrasında petek bölgesinde oluşan lokal zayıflamayı geciktirmiş; berkitme ile değerlendirildiğinde göçme davranışı daha kontrollü, gecikmeli ve sınırlandırılmış bir formda gerçekleşmiştir.



Şekil 35. IPE 200-P-B-Y numunesine ait göçme modu davranışı

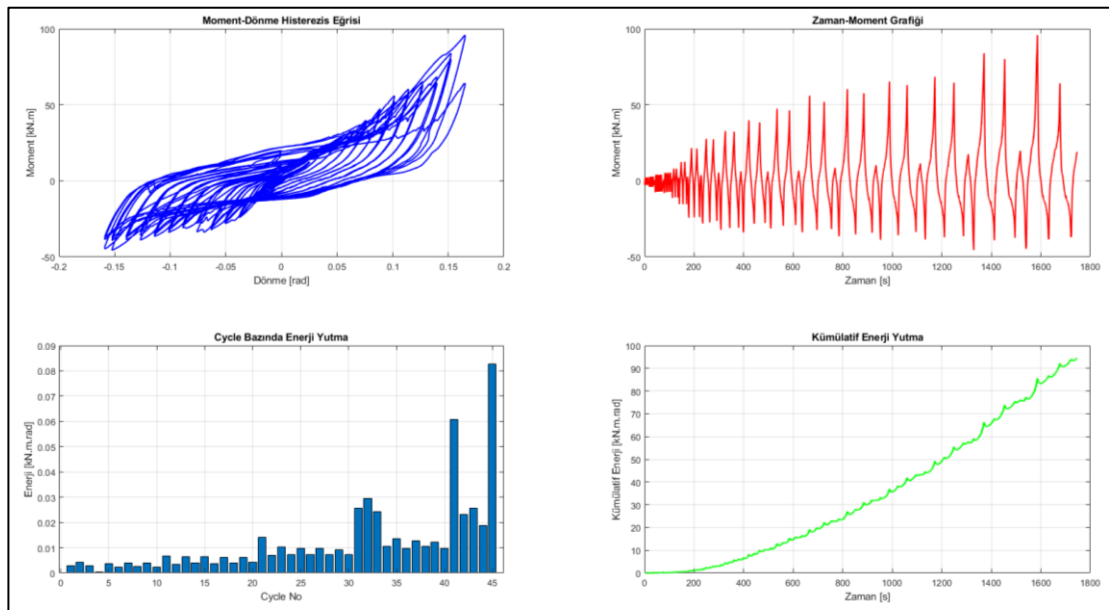
Bu deneysel çalışma, IPE 200 kesitli petekli kirişlerde, yangın boyası korumasının, yangına maruz kalmış numunelerin moment taşıma kapasitesi, sünekliği ve histeretik enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktadır (Şekil 20 ve Şekil 36). Çalışmanın temel bulgusu, yangın boyasının taşıma gücünü artırdığı ancak süneklik ve enerji yutma kapasitelerinde bir miktar azalma olduğu yönündedir. Yapılan deneysel verilere göre, boya korumalı numunenin maksimum moment kapasitesi 92.33 kNm iken, boyasız numunede bu değer 76.18 kNm olarak elde edilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak yaklaşık %21,20 oranında bir artış söz konusu olup boya korumasının yangın etkisi altında kesit rijitliğini belirli bir seviyede koruyarak moment kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ancak, dönme kapasitesi boyasız numunedeki 0.165235 rad değerinden, boya korumalı numunede 0.127108 rad seviyesine düşerek yaklaşık %23 oranında bir azalış göstermiş, bu durum boya korumasının plastik şekil değiştirme kabiliyetini kısmen sınırladığı sonucuna bizleri götürmüştür. Her iki numune de yangın testine maruz kalmış olmasına rağmen; korumasız (boyasız) numunenin daha yüksek dönme kapasitesi (0.165 rad) sergilemesi, yüksek sıcaklık (700°C+) maruziyeti sonucu çelikte meydana gelen yumuşama (annealing) ve dayanım kaybı ile açıklanmaktadır. Korunmasız numune yük taşıma kapasitesini kaybettiği için burkulmadan büyük açılarda dönebilmiştir. Buna karşın, boya korumalı numune, sıcaklığı daha düşük seviyelerde tutarak (400-500°C) rijitliğini ve akma dayanımını korumuştur. Ancak korunan bu yüksek dayanım, siklik (döngüsel) yükler altında daha yüksek gerilmelere neden olarak Yerel Burkulma (Local Buckling) mekanizmasını daha erken (0.127 rad) tetiklemiştir.

Ayrıca yalıtım tabakası nedeniyle yavaş soğuma sürecinde oluşabilecek 'Mavi Gevreklik' (Blue Brittleness) etkisi de süneklik kaybında rol oynamış olabilir. En önemli fark, döngüsel yükleme sonucunda kendini gösteren enerji yutma kapasitesinde gözlenmiştir. Enerji yutma kapasiteleri incelendiğinde; yangına karşı korumasız (boyasız) numunenin 95.14 kN.m.rad değerine ulaşırken, boya korumalı numunenin 70.38 kN.m.rad seviyesinde kalarak yaklaşık %26 oranında bir enerji kaybı yaşadığı görülmüştür. Bu durum, yüksek sıcaklık maruziyetinin çelik üzerindeki çift yönlü etkisi ile açıklanmaktadır: Korunmasız numune, yüksek sıcaklık (700°C+) etkisiyle dayanımını kaybetmiş ancak 'tavlama' (annealing) etkisiyle aşırı sünek bir davranış kazanmıştır. Düşük moment taşımaya rağmen, erken burkulma yaşamadan çok büyük plastik dönmelere ulaşabilmesi, kümülatif enerji tüketimini artırmıştır. Buna karşın, boya korumalı numune daha düşük sıcaklıklarda kalarak rijitliğini korumuştur. Ancak bu yüksek rijitlik, çevrimsel yükler altında elemanın flanşlarında yerel burkulma (local buckling) mekanizmasının daha erken tetiklenmesine neden olmuştur. Burkulma sonrası dayanım ve rijitlikteki hızlı düşüş, histeretik döngülerin erken sonlanmasına ve toplam enerji yutma kapasitesinin boyasız numuneye kıyasla daha sınırlı kalmasına yol açmıştır. Ayrıca, boyalı numune toplam 84 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.8077 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 97 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.9808 kNm.rad) yapmıştır.

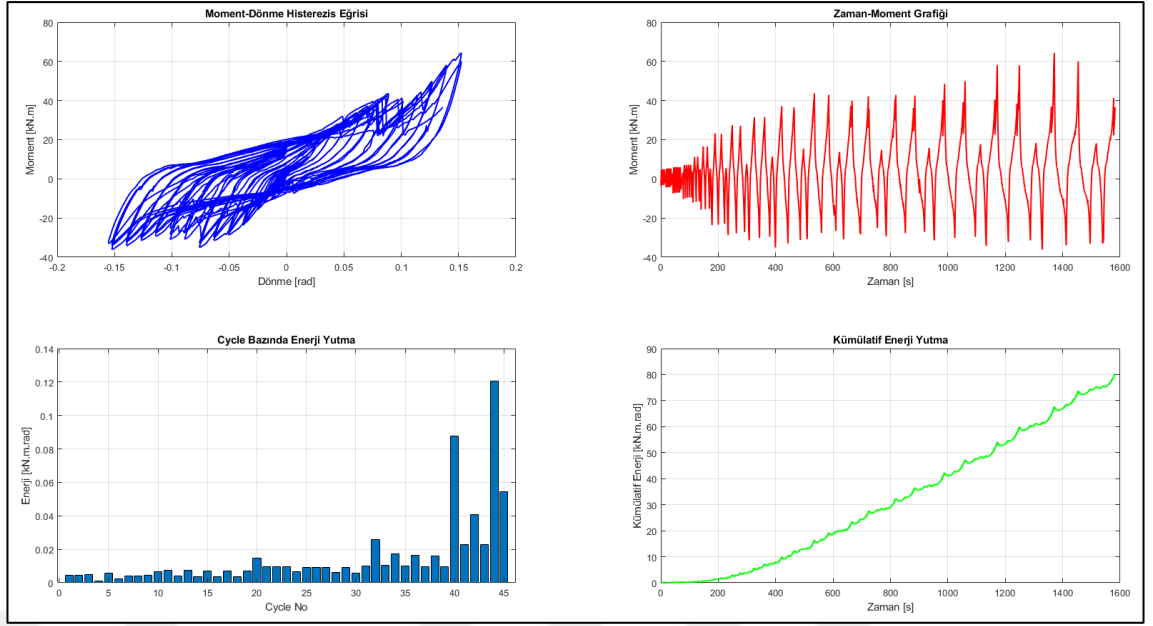


Şekil 36. IPE 200-P-Y numunesine ait deney sonuçları

Bu deneysel çalışma, IPE 200 kesitli dolu gövdeli çelik kirişlerde, yangına maruz kalma durumu altında uygulanan yangın boyası korumasının, döngüsel yükler altında ortaya çıkan moment taşıma kapasitesi, süneklik ve enerji yutma kapasitesi gibi yapısal davranışlar üzerindeki etkilerini karşılaştırmaktadır (Şekil 37 ve Şekil 38). Bu deneysel çalışma sonucunda ortaya çıkan veriler, yangına karşı uygulanan boya korumasının yapısal davranışlar üzerinde belirgin iyileştirmeler ortaya koyduğunu bizlere göstermektedir. Boyasız numunenin maksimum moment kapasitesi 64.40 kNm iken, boya korumalı numunede bu değer 95.92 kNm seviyesine yükselmiştir. Bu sonuç da yaklaşık olarak %48,94 oranında bir artışa denk gelmektedir. Bu sonuç, yangın boyasının çeliğin dayanım kaybını geciktirerek plastik moment kapasitesini önemli ölçüde iyileştirdiğini kanıtlamaktadır. Ayrıca, maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesi boyasız numunedeki 0.152475 rad değerinden, boya korumalı numunede 0.165225 rad seviyesine çıkarak yaklaşık %8,36 oranında bir iyileşmeye işaret etmiş ve boya korumasının plastik şekil değiştirme kapasitesini artırarak sünek davranışı desteklediğini kanıtlamıştır. Döngüsel yükler altındaki enerji yutma kapasitesi boyasız numunede 80.3062 kNm.rad iken, boya korumalı numunede 94.5904 kNm.rad olarak hesaplanmış, bu da yaklaşık %15 oranında bir artış sağlamıştır. Böylece döngüsel yükler altında boya korumalı numunenin enerji yutma kapasitesi belirli seviyede iyileşme göstermektedir. Ayrıca, boyalı numune toplam 100 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.9121 kNm.rad) yaparken, boya korumasız numune toplam 98 döngü (ortalama döngü enerjisi: 0.7821 kNm.rad) yapmıştır.



Şekil 37. IPE 200-BK-Y numunesine ait deney sonuçları



Şekil 38. IPE 200-Y numunesine ait deney sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Bu tez kapsamında, IPE 140 ve IPE 200 kesitli çelik kirişlerin dolu gövdeli ve petekli tipleri, yangın korumalı ve korumasız durumları ile berkitmeli ve berkitmesiz üretim şekilleri dikkate alınarak döngüsel yük etkisi altında yapısal performansları deneysel olarak incelenmiştir. Çalışma boyunca elde edilen değerler; kirişin gövde kesit geometrisinin, yangına maruziyet durumunun, yangına karşı boya koruması uygulamasının ve kirişlere uygulanan yerel güçlendirmenin (berkitme) kirişlerin moment taşıma kapasitesini, yükleme protokolü karşısında taşıyıcı elemanın gösterdiği süneklik davranışı, enerji yutma potansiyelini ve göçme modlarının karakterini doğrudan belirlediğini göstermiştir.

Yangın etkisi görmemiş numunelerde petek gövdeli kesitlerin gövde yüksekliklerinin artması (petek göz boşluğu açılması) nedeniyle dolu gövdeli kesitlere kıyasla daha yüksek maksimum moment taşıma değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Bu durum, gövde yüksekliğinin ilgili numunenin şekil değiştirmeye olan direncini (atalet) artırması ile doğrudan ilişkilidir. Ancak yangın fırını ile yüksek sıcaklık testleri sonrasında petek boşluklarının çevresinde daha hızlı sıcaklık transferi gerçekleşmiş; özellikle boşluklu kısımlarda numunenin karakteristik mukavemetinin düşmesine sebep olmuştur. Bu durum özellikle IPE 140 petekli kesitte, gövde yüksekliğinin IPE 200 kesitli numunelere göre daha düşük olması nedeniyle daha düşük atalet değerlerinde yaşanan karakteristik mukavemet kaybı ile yerel burkulmaları hızlandırmıştır. Buna karşın IPE 200 kesitlerde gövde genişliğinin daha fazla olması, yangına maruz kalmış numunelerde bile belirli bir düzeyde yük taşıma kapasitesinin korunmasını sağlamış ve deformasyon oluşumunun önemli bir kısmı, IPE 140 kesitli numunelere göre daha kontrollü şekilde ilerlemiştir. Bu nedenle kiriş gövdelerindeki geometrik kesit tipi, gövde yüksekliği ve çelik profil kesiti, yangına maruziyet durumu sonrası ortaya çıkan yapısal performansın belirleyici parametreleri olmuştur.

Yangın koruma boyasının uygulandığı numunelerde, yangın etkisinin elemanların taşıma kapasitesi üzerindeki olumsuz etkisinin geciktirildiği gözlemlenmiştir. İntümesan kaplamanın yangınla karşılaşması sonucu hacimsel şişme oluşturan karbon tabakası, yangına maruz kalmış elemanların gövde çevresinde oluşan ısı geçişini geciktirmiş, kritik sıcaklığa ulaşma sürelerini artırmış ve döngüsel yük altında ortaya çıkan rijitlik kaybının

daha kademeli oluşmasını sağlamıştır. Böylece boya korumalı numunelerin enerji yutma kapasitesi, boyasız numunelere göre belirgin şekilde artmış; özellikle çevrim sayısı arttıkça histeretik çevrim alanlarının küçülmesi gecikmiştir. Belirginleşen bu durum boya korumalı yangına maruz kalmış elemanlarda moment dönme eğrisi altındaki alansal büyüklüğün daha uzun süreli korunması ve bu şekilde enerji yutma kapasitesinin daha fazla olmasına sebebiyet vermiştir. Bu nedenle yangın koruma uygulaması, taşıyıcı elemanların kullanım ömrü, şekil değiştirme kabiliyeti ve göçme güvenliği açısından kritik bir faktör olarak görülmüştür.

Berkitme levhalarının kullanıldığı numuneler göçme davranışı açısından en belirgin ayrışmayı göstermiştir. Berkitmesiz numunelerde göçme çoğunlukla delik kenarı ezilmesi, açıklıklar arası boşluklar arası gövde burkulması (web-post buckling) ve ani rijitlik kaybı ile karakterize olmuştur. Plastik deformasyon tek bir kritik bölgeye yoğunlaşmış ve bu bölgedeki stabilite kaybı, kırışte ani kapasite düşümü ile sonuçlanmıştır. Buna karşılık berkitmeli numunelerde açıklık kenarları çevresinde rijitlik artışı sağlanmış; gerilme zonları daha geniş yüzeylere yayılmıştır. Böylece lokal göçme modları daha geç aktive olmuş, göçme kademeli ilerlemiş ve plastik mafsalları oluşumu tek noktadan ziyade geniş bir şerit boyunca yayılmıştır. Bu durum maksimum momente karşılık gelen dönme kapasitesini artırmış, ani kırılma davranışının önüne geçmiş ve sistematik yük transferi sağlayarak global eğilme davranışı altında göçmeyi mümkün kılmıştır. Bu yönüyle berkitme uygulaması, göçme modunu kırılma-lokal karakterden sünek-global karaktere dönüştürmüş ve yapısal güvenlik açısından en kritik iyileştirme parametresi olarak ortaya çıkmıştır.

Berkitme uygulamasının gövde zayıflık bölgelerinde oluşturduğu ek rijitlik, gerilmenin tek bir lokal noktada yoğunlaşmasını engelleyerek gerilme dağılımını daha geniş bir bölgeye yaymıştır. Normal şartlarda petek açıklıkları çevresinde yoğunlaşan kesme gerilmeleri, berkitmesiz numunelerde dar bir alanda birikerek açıklık arasındaki gövde bölgelerinde yük taşıma kapasitesini ve stabilitesini kaybederek ani kopma ile sonuçlanmıştır. Ancak berkitmeli numunelerde açıklık kenarlarının rijitlik kazanması, yerel deformasyonun başlamasını geciktirmiş; gerilme akışı kesit boyunca yayılmış ve plastik şekil değiştirme tek bölge yerine geniş bir şerit boyunca gelişmiştir. Bu durum, göçme mekanizmasını değiştiren temel etkidir. Dolayısıyla berkitme, gerilmeyi tek bölgeye zorlamaktan ziyade, o bölgedeki kırılma davranışı ortadan kaldırarak gerilmeyi kesit boyunca dağıtan ve süneklik kapasitesini artıran bir mekanizma olarak çalışmıştır.

Enerji yutma kapasitesi değerlendirildiğinde; boyasız ve berkitmesiz petek kirişlerin çevrim sayısı arttıkça belirgin rijitlik kaybı gösterdiği, buna karşın berkitme ve boya kombinasyonunun deneysel çalışmada numunelere verilen yükleme protokolü karşısında numunenin şekil değiştirerek enerji yutma kapasitesini belirgin ölçüde artırdığı tespit edilmiştir. Yangın sonrası bile berkitmeli-boya korumalı numuneler deformasyonu büyük bir çevrim genişliğiyle taşımış, bu da yorulma karakterinin daha güvenli bir yapıda devam etmesini sağlamıştır.

Sonuç olarak; Kesit geometrisi, yangın sonrası performansın temel belirleyicisi olmuş, IPE 200 kesitlerde stabilite daha yüksek seviyede korunmuştur. Petekli kesitler, yangın görmemiş durumda yüksek kapasite sunarken yangın sonrasında dezavantaja dönüşmüştür. Yangın koruma boyası, çeliğin sıcaklık kazanma hızını düşürerek kapasite kaybını geciktirmiş; döngüsel yükleme boyunca sünek davranışı korumuştur. Berkitme uygulaması, göçme modunun karakterini değiştirmiş; lokal gövde burkulması yerine global plastikleşme sağlayarak yapısal güvenliği en yüksek düzeye taşımıştır.

Bu çalışma, petek kirişlerin yangın ve döngüsel yük kombinasyonunda gerçek davranışını kapsamlı şekilde ortaya çıkararak literatürde eksik kalan bir alanı deneysel olarak açıklığa kavuşturmuştur. Elde edilen bulgular hem yapısal tasarım açısından hem de güçlendirme ve yangın güvenliği stratejilerinin belirlenmesi noktasında önemli bir referans niteliği taşımaktadır.

5.2. Öneriler

Bu çalışma, ileride hem sayısal hem de deneysel açıdan genişletilmeye açık önemli bulgular sunmaktadır. Deneysel sonuçların doğrulanması amacıyla sonlu elemanlar yöntemi ile ayrıntılı modellemeler yapılarak gerilme yoğunlaşmaları, açıklık ortasında yer alan gövde bölgesindeki stabilite kaybı ve yük taşıma kapasitesi kaybı başlangıcı, berkitme etkisinin gerilme akışını nasıl değiştirdiği ve yangın sonrası malzeme zayıflamasının kesit davranışına etkisi daha kapsamlı şekilde incelenebilir. Ayrıca FEMA-350 yerine ATC-24, FEMA-355D veya AISC Seismic Provisions gibi farklı döngüsel yük protokollerinin kullanılması, kirişlerin farklı deprem senaryoları altında performanslarının kıyaslanmasına imkân sağlayacaktır. Berkitme geometrisinin geliştirilmesi, delik çevresi yerel takviye detaylarının çeşitlendirilmesi ve yangın koruma malzemesi olarak alternatif kaplamaların denenmesi ile hem kapasite hem de süneklik açısından iyileştirilmiş kesitler elde edilebilir. Petek geometrisi çeşitlendirilebilir ve farklı

petek açıklıkları arasındaki yapısal davranışlar deneysel çalışmalar ve modellemeler üzerinden karşılaştırılabilir.



KAYNAKÇA

- [1] I. O. f. S. (ISO), "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," ed, 2014, p. 53.
- [2] F. E. M. AGENCY, "FEMA 350. Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings : FEMA 350, 351, 352 and 353 : Policy guide, FEMA 354 : State of the art reports, FEMA 355A, B, C, D, E and F," ed: [Washington, D.C.] : FEMA : NEHRP, [2000], 2000.
- [3] F. E. M. AGENCY, "FEMA 461. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Non-structural Components," ed: [Washington, D.C.] : FEMA : NEHRP, [2000], 2007.
- [4] D. Ahiwale, K. Jadhav, S. Morkhade, R. Khartode, and D. Bhosale, "Cellular versus standard beams: impact on steel frame stability and load-carrying capacity," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 2, pp. 2159-2174, 2024/02/01 2024, doi: 10.1007/s42107-023-00901-0.
- [5] F. A. Ahmad Zakwan, R. Ismail, R. R. Krishnamoorthy, and A. Ibrahim, "Predicted temperature development on protected cellular steel beam (CSB) under fire exposure," *Journal of Structural Fire Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 205-220, 2019, doi: 10.1108/jsfe-10-2018-0030.
- [6] C. Bailey, "Indicative fire tests to investigate the behaviour of cellular beams protected with intumescent coatings," *Fire Safety Journal*, vol. 39, no. 8, pp. 689-709, 2004/11/01/ 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2004.06.007>.
- [7] R. A. Bhat and L. M. Gupta, "Behaviour of hybrid steel beams with closely spaced web openings," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 1, pp. 93-100, 2021/01/01 2021, doi: 10.1007/s42107-020-00300-9.
- [8] R. A. Bhat and L. M. Gupta, "Interaction of Buckling Modes for Cellular Steel Beams Under Flexure," *International Journal of Steel Structures*, vol. 21, no. 1, pp. 260-273, 2021/02/01 2021, doi: 10.1007/s13296-020-00437-y.
- [9] R. Bi, L. Jia, P. Li, and Q. Wang, "Multiparameter seismic behavior of castellated beam-to-column connections based on stress migration," *Structures*, vol. 29, pp. 1137-1153, 2021/02/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.12.016>.
- [10] A. T. Council, "ATC-24. Guidelines of cyclic seismic testing on components for steel structures," ed. Redwood City, California, U.S.A, 1992.
- [11] A. S. de Carvalho, V. M. de Oliveira, A. Rossi, and C. H. Martins, "Elastic lateral-torsional buckling behavior of steel I-beams with sinusoidal web openings," *Structures*, vol. 47, pp. 23-36, 2023/01/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.11.027>.

- [12] L. F. Grilo, R. H. Fakury, A. L. R. d. Castro e Silva, and G. d. S. Veríssimo, "Design procedure for the web-post buckling of steel cellular beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 148, pp. 525-541, 2018/09/01/ 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.06.020>.
- [13] B. Karami, A. Shishegaran, H. Taghavizade, and T. Rabczuk, "Presenting innovative ensemble model for prediction of the load carrying capacity of composite castellated steel beam under fire," *Structures*, vol. 33, pp. 4031-4052, 2021/10/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.07.005>.
- [14] V. K. Kotapati and A. P. Khatri, "A new proposal for the design of laterally unrestrained cellular steel beams under moment gradient at elevated temperatures," *Fire Safety Journal*, vol. 140, p. 103812, 2023/10/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103812>.
- [15] M. Luís, G. João, P. Paulo, and K. Abdelhak, "Intumescente fire protection of cellular beams," in *X Congresso de Construção Metálica e Mista*, Coimbra, Portugal, 2015, pp. 623-630.
- [16] M. Maali and N. Çınar, "Experimental and Numerical Tests on Beams with Web Openings Under Cyclic Loading," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 1, pp. 149-167, 2025/01/01 2025, doi: 10.1007/s40999-024-01025-5.
- [17] A. J. Mehetre and R. S. Talikoti, "Effect of Fillet Radii on Moment Carrying Capacity of Sinusoidal Web Opening Castellated Steel Beams in Comparison with Hexagonal Web Openings," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 151-161, 2020/10/01 2020, doi: 10.1007/s40996-020-00378-w.
- [18] S. G. Morkhade and L. M. Gupta, "Critical study of steel beams with web openings," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 24, no. 1, pp. 24-35, 2023/01/02 2023, doi: 10.1080/13287982.2022.2117319.
- [19] S. G. Morkhade and L. M. Gupta, "Ultimate load behaviour of steel beams with web openings," *Australian Journal of Structural Engineering*, vol. 20, no. 2, pp. 124-133, 2019/04/03 2019, doi: 10.1080/13287982.2019.1607448.
- [20] S. G. Morkhade, K. R. Jagtap, P. S. Ghorpade, D. D. Ahiwale, and H. M. Najm, "Buckling performance evaluation of steel cellular beams strengthened with flange cover plate," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 23, no. 8, pp. 1277-1290, 2022/12/01 2022, doi: 10.1007/s42107-022-00483-3.
- [21] S. G. Morkhade, M. Kshirsagar, R. Dange, and A. Patil, "Analytical study of effect of web opening on flexural behaviour of hybrid beams," *Asian Journal of Civil Engineering*, vol. 20, no. 4, pp. 537-547, 2019/06/01 2019, doi: 10.1007/s42107-019-00122-4.
- [22] M. S. Mutentu, B. G. M. Horacio, and Y. Yang, "Investigation on the Fire Resistance of Cellular Steel Beam with Sinusoidal Openings," *Open Journal of Civil Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 637-663, 2023, doi: 10.4236/ojce.2023.134043.

- [23] A. Nadjai, S. Han, F. Ali, N. Alam, and A. Allam, "Fire resistance of axial restraint composite floor steel cellular beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 136, pp. 229-237, 2017/09/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.05.016>.
- [24] A. Nadjai, K. Petrou, S. Han, and F. Ali, "Performance of unprotected and protected cellular beams in fire conditions," *Construction and Building Materials*, vol. 105, pp. 579-588, 2016/02/15/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.150>.
- [25] M. Najafi and Y. C. Wang, "Axially restrained steel beams with web openings at elevated temperatures, part 1: Behaviour and numerical simulation results," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 128, pp. 745-761, 2017/01/01/ 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.10.002>.
- [26] M. T. Nawar, I. T. Arafa, O. M. Elhosseiny, and A. El-Zohairy, "Full static resistance of castellated steel beams with hexagonal web openings for blast response predictions," *Engineering Structures*, vol. 245, p. 112844, 2021/10/15/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112844>.
- [27] M. A. Tae, "CFRP STRENGTHENING OF STEEL BEAMS WITH WEB OPENINGS," PhD, Faculty of Science and Engineering, University of Manchester, 2018. [Online]. Available: https://pure.manchester.ac.uk/ws/portalfiles/portal/84020888/FULL_TEXT.PDF
- [28] K. D. Tsavdaridis, C. K. Lau, and A. Alonso-Rodríguez, "Experimental behaviour of non-seismical RWS connections with perforated beams under cyclic actions," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 183, p. 106756, 2021/08/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2021.106756>.
- [29] K. D. Tsavdaridis and T. Papadopoulos, "A FE parametric study of RWS beam-to-column bolted connections with cellular beams," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 116, pp. 92-113, 2016/01/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.046>.
- [30] P. Wang, X. Wang, M. Liu, and L. Zhang, "Web-post buckling of fully and partially protected cellular steel beams at elevated temperatures in a fire," *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 29-38, 2016/01/01/ 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.02.028>.