



**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK
ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞININ AKILLI
VİDALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNDE
İNCELENMESİ**

Erdem OKCU

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI**

**2025
Her hakkı saklıdır.**



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK ÇERÇEVELERİN SİSMİK
DAVRANIŞININ AKILLI VİDALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNDE
İNCELENMESİ

Erdem OKCU

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mahyar MAALI

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

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

**SOĞUK ŞEKİLLENDİRİLMİŞ ÇELİK ÇERÇEVELERİN SİSMİK
DAVRANIŞININ AKILLI VİDALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNDE
İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Mahyar MAALI danışmanlığında, Erdem OKCU tarafından hazırlanan bu çalışma 29 / 05 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (29/05/2025)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Doç.Dr Mahyar MAALİ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğretim Üyesi Muhammed GÜRBÜZ	İmza	:
Üye	: Dr. Öğretim Üyesi Barış BAYRAK	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması tarafından nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

29 / 05 / 2025

Erdem OKCU

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SOĞUK ŞEKİLENDİRİLMİŞ ÇELİK ÇERÇEVELERİN SİSMİK DAVRANIŞININ AKILLI VIDALI MOMENT BİRLEŞİMLERİNDE İNCELENMESİ

Erdem OKCU

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mahyar MAALI

Bu çalışma, soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) taşıyıcı elemanlarının deprem yükleri altındaki davranışını, özel olarak tasarlanmış vidalı moment bağlantıları kullanarak deneysel yöntemlerle incelemektedir. Araştırma kapsamında, farklı kesit özelliklerine ve malzeme kalınlıklarına sahip CFS kolon ve kirişlerden oluşan T şeklindeki çerçeve sistemleri hazırlanmış ve bu sistemlere FEMA-350 standartlarına uygun yarı-statik döngüsel yük testleri uygulanmıştır.

Deneylerde, bağlantı noktalarında kullanılan vidalı birleşim detaylarının, sistemin rijitliği, taşıma kapasitesi, dönme performansı ve enerji sönmüleme yeteneği üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Tüm numunelerde, kiriş gövdeleri deliksiz olarak üretilmiş ve farklı guse kalınlıklarına sahip beş farklı konfigürasyon test edilmiştir.

DeneySEL bulgular, akıllı vida uygulamalarının, geleneksel vidalara kıyasla daha yüksek kesme ve çekme dayanımı sağladığını ortaya koymuştur. Yapılan çalışmalar akıllı vida uygulamalarının geleneksel vidalara göre kesme ve çekme dayanımını %20 ile %40 oranında artırdığını ortaya koymuştur. Tasarım ve uygulama parametrelerinin karşılaştırılması sonucunda, akıllı vidaların birleşim bölgelerinde moment dayanımını yaklaşık %30 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Özellikle sismik etkiler altında kritik öneme sahip süneklilik oranını ise yaklaşık %30 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu bağlantı yönteminin, tekrarlı sismik yükler altında yapısal performansın korunmasında olumlu etkiler gösterdiği gözlemlenmiştir.

Elde edilen moment-dönme ilişkileri ve deformasyon verileri, söz konusu birleşim sistemlerinin, depreme dayanıklı yapı tasarımında güvenli, ekonomik ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu doğrulamaktadır. Bu çalışma, soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların sismik performansını iyileştirmeye yönelik yenilikçi bağlantı tekniklerinin geliştirilmesine önemli bir katkı sağlamaktadır.

2025, 75 sayfa

Anahtar Kelimeler: Soğuk şekillendirilmiş çelik, Hafif çelik yapı sistemleri, Moment birleşimi, Akıllı vida,

ABSTRACT

MS. Thesis

SEISMIC BEHAVIOR OF COLD-FORMED STEEL FRAMES WITH BOLTED MOMENT CONNECTIONS

Erdem OKCU

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mahyar MAALI

This study investigates the behavior of cold-formed steel (CFS) structural members under seismic loading using specially designed screwed moment connections through experimental methods. Within the scope of the research, T-shaped frame systems composed of CFS columns and beams with varying cross-sectional properties and material thicknesses were prepared, and quasi-static cyclic loading tests in accordance with FEMA-350 standards were applied to these systems.

In the experiments, the effects of the screwed connection details used at the joints on system stiffness, load-bearing capacity, rotational performance, and energy dissipation capacity were analyzed. In all specimens, beam webs were manufactured without openings, and five different configurations with varying gusset plate thicknesses were tested.

Experimental findings revealed that the application of smart screws provides higher shear and tensile strength compared to conventional screws. Studies have shown that smart screw applications increase shear and tensile strength by approximately 20% to 40% compared to traditional screws. Additionally, comparison of design and application parameters indicated that smart screws enhance moment capacity in the connection regions by approximately 30%. Moreover, the ductility ratio, which is of critical importance under seismic effects, was found to increase by approximately 30% as well. Furthermore, it was observed that this connection method has positive effects in maintaining structural performance under repeated seismic loads.

The obtained moment-rotation relationships and deformation data confirm that these connection systems provide a safe, economical, and applicable solution in earthquake-resistant structural design. This study makes a significant contribution to the development of innovative connection techniques aimed at improving the seismic performance of cold-formed steel structures.

2025, 75 page

Keywords: Cold-formed steel, Light steel structural systems, Moment connection, Self-tapping screw with monitoring capability, Experimental investigation

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmasını yapmama imkân sağlayan, tez çalışmam süresince hiçbir yardımı esirgemeyen değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mahyar MAALİ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarında desteğini ve yardımlarını esirgemeyen meslektaşım Nurullah ÇINAR kardeşime teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans çalışması yapmam konusunda her daim yanımda olan eşim Zeliha OKCU'ya ve aileme destek ve sabırlarından dolayı teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım. Ayrıca beni bugünlere getiren kendisi de akademisyen olan ve bu çalışmamda devamlı beni teşvik eden Atatürk Üniversitesi emekli öğretim üyelerinden babam Prof.Dr. Naci OKCU'ya teşekkürlerimi, saygı ve sevgilerimi sunarım.

Erdem OKCU
Mayıs 2025

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	2
1.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Levhalar	4
1.3. Akıllı Vidalar	8
1.4. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik (CFS) Çerçevesi Kirişlerde Göçme Türleri.....	10
1.4.1. Yanal burulmalı burkulma (lateral torsional buckling – LTB)	10
1.4.2. Bükülmeli burkulma (lateral distortional buckling – LDB).....	11
1.4.3. Yerel başlık burkulması (local flange buckling – LFB).....	11
1.4.4. Gövde burkulmaları	11
1.4.5. Vierendeel mekanizması (VIER)	12
1.4.6. Gövde kaynak bölgesi yırtılmaları	13
1.4.7. Eğilme göçmesi.....	13
1.5. Tasarım Prosedürü	14
2. KAYNAK ÖZETLERİ	17
3. MATERYAL ve YÖNTEM	24
3.1. Deneysel Çalışmalar.....	24
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler	30
3.2.1. Hidrolik dinamik aktüatör	30
3.2.2. Deformasyon ölçme cihazı.....	31
3.2.3. Veri toplama ve kaydetme sistemi (Data logger).....	32
3.3. Deney Düzeneği	33
3.4. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri	34
3.4.1. ATC-24 yükleme protokolü	35

3.4.2. FEMA-350 yükleme protokolü	36
3.4.3. FEMA-461 yükleme protokolü	37
3.4.4. Rastgele yükleme protokolü	37
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	39
4.1. Numunelerin Maksimum Yük Değerlerinin Karşılaştırılması	40
4.2. Numunelerin Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması	42
4.3. Numunelerin Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması	44
4.4. Numunelerin Süneklik Değerlerinin Karşılaştırılması	46
4.5. Numunelerin Maksimum Moment Değerlerinin Karşılaştırılması	47
4.6. Numunelerin Dönme Değerlerinin Karşılaştırılması	49
4.7. Numunelerin Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması	51
4.8. Göçme Modları	54
4.9. Deney Numunelerinin Literatürle Karşılaştırma	64
4.9.1 Taşıma kapasitesi ve yer değiştirmeleri yönüyle karşılaştırma	64
4.9.2 Maksimum moment ve dönme yönüyle karşılaştırma	66
5. SONUÇ ve ÖNERİLER	71
KAYNAKLAR	73

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

Açıklama

cm	Santimetre
kN.m	Kilonewtonmetre
m	Metre
mm	Milimetre
P	Basınç
Rad	Radyan
Δ	Yer Değiştirme
σ_m	Kirişin Emniyetli Gerilmesi
θ	Dönme
θ_{Mjmax}	Eğilme Momentine Karşılık Gelen Dönme
θ_p	Plastik Momente Karşılık Gelen Dönme
φ	Altın Oran

Kısaltmalar

A	Kirişin Başlıklarının Ağırlık Merkezleri Arasındaki Mesafe
AISI	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü Teknik Şartnamesi
ASTM	Amerikan Test ve Malzeme Standartları Derneği
F	Kirişin Başlığının Alanı
FE	Sonlu Elemanlar
FEMA	Federal Acil Durum Yönetim Kurumu
Fmax	Maksimum Kuvvet
H _s	Kiriş Yüksekliği
JIFS	Japonya Demir Çelik Federasyonu
L	Kiriş Boyu
LDB	Bükülmeli Burkulma
LFB	Yerel Başlık Burkulması
LTB	Yanal Burulmalı Burkulma
LVDT	Deformasyon Ölçme Cihazı

M	Moment
M_{jRd}	Eğilme Momenti
M_p	Plastik Moment
M- θ	Moment-Dönme
$M_{\theta Cd}$	Eğilme Momenti Kapasitesi
S	Delikler Arasındaki Mesafe
VIER	Vierendeel Mekanizması
WBC	Basınç Nedeniyle Gövde Burkulması
WPB	Kesme Kuvveti Nedeniyle Gövde Burkulması Sonrası Davranışı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Örnek bir hafif çelik bina.....	2
Şekil 1.2. Soğuk şekillendirilmiş profiller	7
Şekil 1.3. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhanın montaj işlemi.....	7
Şekil 1.4. Somun başlıklı akıllı vida	10
Şekil 1.5. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi	12
Şekil 1.6. Kaynak bağlantısının yırtılması (Kaygısız 2019)	13
Şekil 1.7. Dairesel kırışte yüksek kesme (Kaygısız 2019).....	14
Şekil 1.8. Deney numune düzeneği (Tüm birimler mm’dir.)	15
Şekil 1.9. Deney numunelerinin geometrisi.....	15
Şekil 3.1 Kupon test düzeneği	25
Şekil 3.2 1.5mm , 2.0mm, 3 mm kalınlığındaki soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar ..	25
Şekil 3.3. Deney düzeneği	27
Şekil 3.4. EX-1 numunesi detay çizimleri	27
Şekil 3.5. EX-2 numunesi detay çizimleri	28
Şekil 3.6. EX-3 numunesi detay çizimleri	28
Şekil 3.7. EX-4 numunesi detay çizimleri	29
Şekil 3.8. EX-5 numunesi detay çizimleri	29
Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan hidrolik dinamik aktüatörün şekli	30
Şekil 3.10. Deneylerde kullanılan LVDT’ler.....	31
Şekil 3.11. Deneyde kullanılan yaprak tipi gerinim ölçer (Published 2017)	32
Şekil 3.12. Deneylerimizin yapım aşamasında kullanılan data logger	33
Şekil 3.13. Deneylerin yapıldığı sistem ve numune yerleşim modeli (a) önden görünüşü; (b) sağ önden görünüşü; (c) sol önden görünüşü.	34
Şekil 3.14. Atc-24 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)	36
Şekil 3.15. FEMA-350 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)	36
Şekil 3.16. FEMA-461 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)	37
Şekil 3.17. Rastgele yükleme protokolü (Okazaki ve Engelhart 2007)	38
Şekil 4.1 Maximum yüke göre dağılım grafiği.....	41
Şekil 4.2. Numunelerin yük-deplasman iskeletoe eğirileri.....	42
Şekil 4.3. Maksimum momente göre dağılım grafiği	49
Şekil 4.4. Numunelerin moment-dönme hysteresis eğirileri	50

Şekil 4.5. Numunelerin hysteresis alan karşılaştırma ve hesaplama eğrileri.....	52
Şekil 4.6. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri.....	53
Şekil 4.7. Ex-1 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar.....	54
Şekil 4.8. Ex-2 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar.....	56
Şekil 4.9. Ex-3 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar.....	58
Şekil 4.10. Ex-4 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar.....	60
Şekil 4.11. Ex-5 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar.....	62



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Deney numunelerinin özellikleri	16
Çizelge 3.1. Numunelerin kalınlıklarına göre mekanik özellikleri.....	25
Çizelge 3.2. Numunelerin özellikleri	26
Çizelge 3.3. Deney araç gereç listesi	34
Çizelge 3.4. ATC-24 yükleme protokolü değerleri	35
Çizelge 4.1. Numunelerin özellikleri ve deney sonuçları.	39
Çizelge 4.2 Kolon kalınlığı ve guse kalınlıklarına bağlı rijitlik ve süneklik.	45
Çizelge 4.3. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri.....	52
Çizelge 4.4. Levha kalınlığı ve delik parametrelerinin maksimum taşıma kapasitesine etkisi ve maksimum yer değiştirmenin deneysel karşılaştırması.	64
Çizelge 4.5. Levha kalınlığı ve delik parametrelerinin maksimum moment etkisi ve maksimum dönmenin deneysel karşılaştırması.....	66
Çizelge 4.6. Tez ve literatürdeki deney numunelerinin maksimum yük altındaki dönme ve yer değiştirme kapasitelerinin karşılaştırması.	69

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe hızla yaygınlaşmaya başlayan soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlar çeliğin yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan soğuk şekillendirmeye üretilen malzemeleridir. Günümüzde doğal afet, salgın hastalık gibi sorunların hemen ardından hastanelerin birkaç hafta içerisinde yapılması, okul, afet konutları gibi yapıların oluşturulması için yapım tekniğinin basit ve hızlı olması gibi özellikleri yönüyle tercih sebebi olmaya başlamıştır. Ayrıca yaşamın her alanında inşaat sektörünün farklı alanlarında kapı doğramaları, pencere çerçeveleri, depolama raf sistemlerinde v.b yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Hafif çelik elemanların tek katlı veya orta katlı yapılar için hafif olmaları, yapım tekniklerinin basit ve hızlı bir şekilde yapım imkanı olması ve diğer inşaat malzemelerine kıyasla hava koşullarından etkilenmemeleri gibi kendine özgü avantajları vardır. Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlar yük taşıma kapasitesinin ağırlığına oranı çok yüksek olduğundan, özellikle büyük açıklıklı ve yüksek olmayan yapılarda, ağır çelik elemanlara göre daha ekonomik bir imalata sahip olması yönüyle de avantajlıdır. Ayrıca bu elemanlar malzeme özellikleri de dikkate alındığında ve doğru tasarım ile yüksek süneklik performansı orataya koyarak deprem performansı açısından da avantaj sunmaktadır. (Gad et al,2008,2009)

Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanların kullanıma başlanması dünya genelinde 1850’li yıllara kadar dayanmasına rağmen bu tür elemanların binalarda kullanılması oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Ülkemizin deprem kuşağında yer alması ve bu bilinçle yaşamayı öğrenmemiz gerektiği düşünüldüğünde soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlar ile bina yapımının sağladığı avantajlar sayesinde yaygın bir şekilde kullanılması gerekmektedir. Şekil 1.1 de hafif çelik elemanlarla oluşturulmuş bina da son yıllarda bu elemanların özellikle sismik risk altında bulunan bölgelerde kullanımının yaygınlaşmaya başladığının en güzel örneklerinden biridir. Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik elemanlardan oluşan çerçeve sitemlerin cıvatalı moment birleşim bölgelerinin yapısal davranışını inceleyen birçok deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. (Yu et al, 2005.) Bu çalışmada, akıllı vidalı moment bağlantılı soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) çerçevenin yanal tekrarlı yükler altında sismik zemin

1. GİRİŞ

davranış hareketlerini yarı statik yükleme testleri ve sayısal analiz yoluyla taşıma kapasitesinin gözlemlenmesi hedeflenmektedir.



Şekil 1.1. Örnek bir hafif çelik bina

1.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, modern yapı sistemlerinde giderek artan bir kullanım alanı bulan soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) taşıyıcı elemanlarının, deprem gibi dinamik yanal yükler altındaki yapısal performansını kapsamlı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. Hafif şekillendirilmiş çelik levhalar için farklı konfigürasyonlarla çerçeve sistemlere döngüsel yükleme testleri yaparak moment, yer değiştirme ilişkileri, enerji sönümleme kapasiteleri ve deformasyon miktarları tespit edilmiştir.

Tezin amacı kapsamında, çeşitli kesit ve bağlantı detaylarına sahip C profil kolon ve kiriş elemanlarından oluşan T birleşimli soğuk şekillendirilmiş çelik çerçeveler tasarlanmıştır. Bu çerçeveler, döngüsel yükleme testlerine tabi tutulmuş; yüksek doğrulukta veri elde etmek için hassas ölçüm cihazları ve FEMA-350 protokolü gibi

gelişmiş yükleme yöntemleri kullanılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel çalışmalar, moment taşıyıcı soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerin deprem performansını değerlendirmeye yönelik literatürdeki sınırlı sayıdaki çalışmalardan (Schafer et al., 2016; Fiorino et al., 2014; Xu et al., 2018) farklı olarak, sadece perde panellerine odaklanmak yerine doğrudan çerçeve birleşim davranışına odaklanmaktadır. Bu yönüyle tez, moment taşıyıcı soğuk şekillendirilmiş çelik levha sistemlerin sismik performans üzerindeki etkilerini daha detaylı ve özgün şekilde inceleyen nadir çalışmalardan biridir.

Çalışmanın özgün katkılarından biri, kiriş gövdesinde delik bulunan ve bulunmayan numunelerin karşılaştırmalı performans analizidir. Bu tür deliklerin, mimari ve tesisat gerekleri doğrultusunda kaçınılmaz olduğu bilinse de, birleşim bölgesindeki taşıma kapasitesi ve süneklik üzerindeki etkileri literatürde çoğunlukla göz ardı edilmiştir. Bu bağlamda, mevcut çalışma bu boşlukların yapısal performansa olan etkilerini deneysel olarak ortaya koyan ilk çalışmalardan biri olma niteliğindedir. Tezin bir diğer yenilikçi yönü, akıllı vida teknolojisinin birleşim rijitliği ve enerji yutma kapasitesi üzerindeki etkilerinin sistematik olarak test edilmesidir. Literatürde daha önce Dundu ve Kemp (2006) gibi araştırmacılar farklı vida grubu konfigürasyonlarının etkilerini araştırmış; Lim ve Nethercot (2003, 2004a) ise guseli birleşimlerin performansını incelemiş olsa da, bu çalışmalar genellikle geleneksel bağlantı yöntemleri ile sınırlı kalmıştır.

Bu tezde ise her bir numune için kullanılan 63 adet vida sayısı ve yine her bir numune için 6 adet guse levhası ile hem vida sayısı hem de guse levhası kalınlıkları açısından kapsamlı bir parametre çalışması yapılmış, farklı konfigürasyonlar arasında karşılaştırmalı değerlendirmeler gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle tez, akıllı bağlantı elemanlarının optimizasyonu yoluyla soğuk şekillendirilmiş çelik levha sistemlerin hem daha ekonomik hem de daha güvenli hale getirilebileceğini deneysel olarak göstermektedir. Elde edilen moment-dönme eğrileri ve enerji yutma kapasiteleri, sonlu elemanlar analizleriyle doğrulanarak sayısal ve deneysel sonuçların tutarlılığı gösterilmiştir. Bu bağlamda tez, mevcut literatürde genellikle ya yalnızca deneysel (Mohebbi et al., 2016) ya da yalnızca sayısal (Moghimi ve Ronagh, 2009) yaklaşımlar üzerine kurulu çalışmalardan farklı olarak her iki yöntemi bütüncül şekilde ele almaktadır.

Sonuç olarak bu tez, moment taşıyıcı T birleşimli soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerde akıllı vida teknolojisinin ve mimari deliklerin birleşim performansına etkilerini hem deneysel hem de sayısal olarak inceleyen ilk çalışmalardan biri olma özelliğini taşımaktadır. Özellikle Türkiye gibi yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde, bu tür birleşimlerin yapı pratiğine entegrasyonu için bilimsel ve teknik dayanaklar sunarak hem akademik hem de uygulama alanında önemli katkılar sağlamaktadır.

1.2. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Levhalar

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapı elemanları, çelik levhaların pres ve makine kullanılarak oda sıcaklığında şekil verilerek elde edilen ve düşük ağırlıklara sahip olan yapı elemanlarıdır. Soğuk şekillendirilmiş yapı elemanları yük taşıma kapasitelerinin ağırlıklarına oranlarının yüksek olmasından dolayı büyük açıklıklara sahip olamayan ve alçak katlı yapılarda ağır çelik yapılara oranla çok daha ekonomiktir. Bu elemanlar çinko galvaniz yöntemiyle korozyona karşı korunduğundan bakım ihtiyacı olmamakta ve uzun yıllar hizmet verebilmektedirler. Betonarme yapıların yapım aşamalarında mevsim şartları çok etkili iken soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların inşaatı bu durumdan etkilenmeden yapılır. Ayrıca montaj esnasında ortaya çıkan işçilik ve malzeme zaiyatı soğuk şekillendirilmiş yapı elemanlarında en düşük seviyede olması nedeniyle malzeme verimliliği üst seviyededir.

Soğuk şekillendirilmiş levhanın ana yapı taşı olan çelik, genel olarak malzeme yapısı açısından homojen ve izotrop olması nedeniyle hesap yaklaşımları ahşap, beton gibi malzemelere kıyasla oldukça gelişmiş ve yapılan kabullerin gerçeği yansıtması konusundaki bilinmezlikler oldukça azalmıştır. Malzemenin bu özelliği, her doğrultuda mekanik özelliklerinin aynı olması gibi bir fayda da sağlamaktadır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik levhaların tasarım yöntemleri farklılıkları sayesinde istenilen her ebat ve uzunlukta üretilebilirler. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar galvanizlenmiş veya kaplanmış metallere oluşturulabilir. Bu sayede yüksek korozyon direnci elde edilmiş olunur. Hazırlanmış tüm elemanları her türlü geleneksel birleştirme yöntemleri ile (perçinleme, vidalama, kaynaklama) kullanılabilir. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar tamamen geri dönüştürülebildikleri için sürdürülebilir ve

1. GİRİŞ

çevreci bir yapılaşma imkanı sağlarlar. Soğukta şekillendirilmiş çelik elemanlar yaygın olarak C kesitli, Z kesitli ve çeşitli kesitli profiller olarak kullanılmaktadır. Özel kesitli profiller ayrıca soğuk şekillendirilmiş çelik profiller kullanılarak tasarlanan depolama alanlarında mevcut olan raf yapı sistemlerinde de kullanılmaktadır.

Özellikle son yıllarda gelişen üretim teknolojisinin avantajlarıyla ve seri üretimdeki maliyetlerin düşmesiyle yeni nesil kesitler ortaya çıkmaya başlamıştır. Birçok çelik yapı firması daha ince gövdeli, daha geniş başlıklı, berkitmeli yeni nesil soğuk şekillendirilmiş çelik profil kesitleri geliştirip kullanmaya başlamıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalarda çelik profil firmaları C kesitli profillerin çeşitli farklı modelleri ile tasarım yapmış ve bu sayede güçlendirilmiş gövde boşluklu çelik levha elemanlar üretilmiştir. Oluşturulan bu boşluklar ile hem yapı mimari açıdan görsellik kazanmış hem de yapıda ihtiyaç duyulan elektrik, su, kanalizasyon tesisatları gövde boşlukları içerisinde geçirilerek yapıya zarar vermeden bunların montajları sağlanmıştır.

Soğuk şekillendirilmiş çelik profiller çerçevelerde, metal binalarda ve genellikle sanayi yapılarında kullanılan raf yapı sistemlerinde olmak üzere üç temel başlıkta yük taşıyıcı eleman olarak kullanılırlar. Soğuk şekillendirilmiş çelik profilleri burkulma durumlarını göz önüne alarak düşük yükseklikteki ve düşük açıklıktaki yapı elemanında yaygın olarak kullanılır. Soğuk şekillendirilmiş bu çelik levhalar bu yönüyle aynı amaç için kullanılan ahşap yapı elemanlarıyla çok fazla benzerlik gösterirler. Bu sebeple bir ya da iki katlı yapılarda soğuk şekillendirilmiş çelik profillerden yapılan imalatlar piyasada geleneksel olarak kullanılan taşıyıcı yapı elemanı türleri arasında ahşap yapılarla rekabet halindedir.

Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerden yapılan binalarda, sistem üzerine kontrplak, alçıpan vs. gibi kaplama malzemeleri herhangi bir ara eleman olmaksızın montajı yapılmasından dolayı ağır çelik veya betonarme binalara göre mimari açıdan daha fazla net açıklık ve bu sayede daha fazla net alan kazandırmış olur.

Ayrıca soğuk şekillendirilmiş yapı elemanları geri dönüştürülebilir malzemeden üretilmekte olup bu yönüyle çevreci binaların yapımına olanak sağlamaktadırlar. Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin yapı sistemlerinde kullanılması diğer malzeme

türlerine kıyasla aynı yükü taşımak için daha az malzeme gerektirdiğinden ve şantiye alanlarında ki atık malzeme miktarının azalmasına sebep olmalarından dolayı çevreci inşaat olanağı sağlamaktadır. Sistemde kullanılan her bir soğuk şekillendirilmiş çelik levha parçası en az %25 oranında geri dönüştürülebilir olması, kullanım ömrünün sonunda ise %100 geri dönüştürülebilir olduğu ve hiçbir uçucu organik bileşik yaymadığı için de son derece sürdürülebilir ve çevreci bir yapı malzemesidir.

Soğuk şekillendirilmiş çelik profillerin kullanımı ile çerçeve elemanlarının ve panellerin atölye ve fabrikalarda önceden hazırlanıp daha sonra inşaat sahasına ulaştırılıp monte edilebilmesi sebebiyle de şantiyelerde oluşan atık miktarı azaltılmaktadır. Bu sayede inşaat yapım esnasında ortaya çıkan hurda bertaraf maliyeti düşürülmüş olmaktadır.

Soğuk şekillendirilmiş yapı elemanlarında teknolojinin gelişimi ile birlikte soğuk şekillendirilmiş profillere istenilen ebat ve şekillerde delikler açılabilmekte bu da imalat açısından kolaylıklara yol açmaktadır (Şekil 1.2). Ağır çelik elemanlara göre dayanım oranları daha yüksek olduğundan burkulma durumları göz önüne alınarak boyutlandırıldıklarında yapının toplam ağırlığını azaltmaktadırlar. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar montaj kolaylığı ile geleneksel inşaat yöntemlerine göre daha kısa sürelerinde avantaj sağlamaktadır (Şekil 1.3). Soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar doğru projelendirildiğinde kendi yüzeylerine dik gelen yükleri değil kendi düzlemlerindeki yükleri de taşıyıcı elemanlara rahatlıkla iletebilirler.

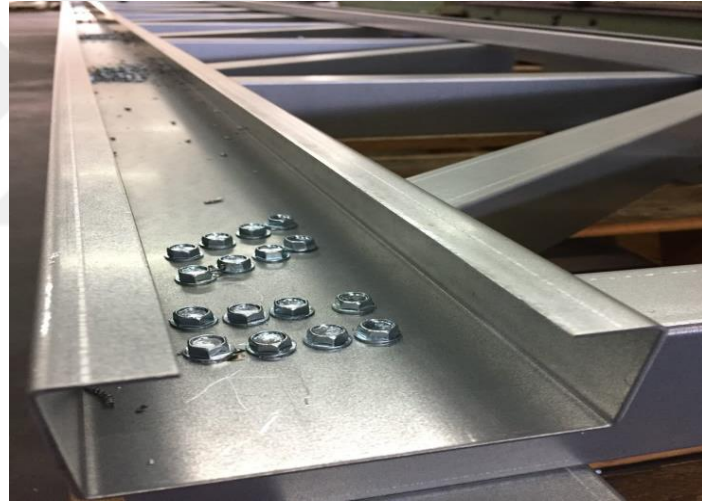
Soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların avantajları olduğu gibi dezavantajlı yönleri de bulunmaktadır. Büyük açıklıklı ve yüksek katlı yapılarda soğuk şekillendirilmiş çelik levhalarla imalatın yapılması yönetmeliklerle sınırlandırılmıştır. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalarda malzemede yapılan tekrarlı işlemlerde büyük zorlamalar meydana geldiği ve bunun da profillerde çatlak ve kırılmalara neden olduğu tespit edilmiştir. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar kalınlıkları küçük olduğundan yangın ve burkulmaya karşı ağır çelik levhalara kıyasla dirençleri düşüktür. Soğuk şekillendirilmiş levhaların et kalınlıkları küçük olduğundan ağır çelik profillere kıyasla yük altında dirençleri daha azdır. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalarda düşük birim hacim ağırlığından dolayı

1. GİRİŞ

titreşimli yükler altında sorunlar çıkmakta ve bu durumlar özel detaylarla çözülmek zorundadır.



Şekil 1.2. Soğuk şekillendirilmiş profiller



Şekil 1.3. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhanın montaj işlemi

Geleneksel civatalı veya kaynaklı bağlantı yöntemleri, her ne kadar yaygın olarak kullanılsa da, sismik etkiler altında sınırlı enerji sönümleme kapasitesine ve ani gevrek kırılma riskine sahiptir. Bu bağlamda, akıllı vida teknolojileri CFS sistemlerde bağlantı performansını artırmaya yönelik yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

1.3. Akıllı Vidalar

Geleneksel civatalı veya kaynaklı bağlantı yöntemleri, her ne kadar yaygın olarak kullanılsa da, sismik etkiler altında sınırlı enerji sönümleme kapasitesine ve ani gevrek kırılma riskine sahiptir. Bu bağlamda, akıllı vida teknolojileri soğuk şekillendirilmiş çelik levha sistemlerde bağlantı performansını artırmaya yönelik yenilikçi bir çözüm sunmaktadır.

Akıllı vidalar, yalnızca yapısal bağlantı sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda bağlantı bölgesinde enerjiyi sönümleyebilen özel mekanik özelliklere sahiptir. Örneğin, ön gerilmeli, kontrollü sürtünme yüzeyine sahip veya yük altında deformasyon davranışı ayarlanabilen vida sistemleri sayesinde, moment bağlantılarında gelişmiş enerji yutma ve süneklik özellikleri elde edilebilmektedir. Bu özellikler, özellikle depreme dayanıklı tasarım açısından büyük avantaj sağlar. Her birleşimde, daha yüksek taşıma kapasitesi ve süneklik açısından avantajlar elde edileceği için akıllı vidalar kullanılmıştır. (Şekil 1.4)

Ancak bu sistemlerin genel performansını belirleyen en kritik unsurlardan biri, elemanlar arası bağlantı detaylarının rijitlik, dayanım ve süneklik açısından optimize edilmesidir. Geleneksel olarak kullanılan civatalı ve kaynaklı bağlantı sistemleri, özellikle deprem etkisi altındaki davranışları bakımından sınırlı enerji sönümleme kapasitesine sahiptir ve gevrek kırılma riski taşımaktadır (Sato & Uang, 2010).

Bu bağlamda, son yıllarda geliştirilen akıllı vida teknolojileri, bağlantı sistemlerinin sismik performansını artırmaya yönelik yenilikçi bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Akıllı vidalar, yalnızca yapısal bağ oluşturmakla kalmayıp, aynı zamanda ön gerilme, kontrollü sürtünme yüzeyi veya yük-altında ayarlanabilir deformasyon karakteristiği gibi gelişmiş mekanik özellikleriyle, enerji sönümleme ve süneklik kapasitelerini artırmaktadır (Ye et al., 2019; Kim et al., 2020). Bu tür bağlantı sistemleri, plastik mafsallık bölgesinin kontrollü şekilde gelişmesine olanak sağlayarak, moment aktaran birleşimlerde performans artışı sağlamaktadır.

Literatürde yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar, akıllı vida kullanılan bağlantı detaylarının özellikle civata kayması ve yataklama mekanizmaları sayesinde kontrollü deformasyon kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir. Bu deformasyonlar, bağlantı

rijitliğini kaybetmeden gerçekleşmekte ve sismik yükler altında yapının genel dayanımını ve göçme öncesi uyarı kapasitesini artırmaktadır (Ye et al., 2019; Chen & Zhang, 2022). Ayrıca, gövde boyun verme (necking) gibi sünek deformasyon davranışlarının devreye girmesi, akıllı vidalı birleşimlerin gevrek kırılma mekanizmalarına kıyasla daha güvenli bir enerji yayılımı sağladığını ortaya koymaktadır.

Bununla birlikte, akıllı vidalı sistemlerin modüler montaj özellikleri sayesinde, saha uygulamalarında tekrarlanabilirlik, kalite kontrol ve işçilik avantajları sağlaması da önemli bir mühendislik faydasıdır. Özellikle kaynaklı birleşimlerin kalite sorunları ve işçilik hataları düşünüldüğünde, akıllı vidalı sistemler daha güvenilir ve uygulanabilir bir alternatif sunmaktadır (Kim & Lee, 2020).

Sonuç olarak, akıllı vida sistemleriyle donatılmış CFS yapılar, rijit moment çerçevelerin deprem etkisi altındaki davranışını iyileştirmek, süneklik kapasitesini artırmak ve bağlantı güvenliğini sağlamak açısından önemli bir mühendislik potansiyeli sunmaktadır. Bu teknolojilerin mevcut tasarım yönetmeliklerine entegre edilmesine yönelik çalışmaların artması, sistemin yaygınlaşmasını ve mühendislik uygulamalarındaki etkinliğini daha da artıracaktır. Yapılan çalışmalar akıllı vida uygulamalarının geleneksel vidalara göre kesme ve çekme dayanımını %20 ile %40 oranında artırdığını ortaya koymuştur. (Karsan ve Altın 2018) Tasarım ve uygulama parametrelerinin karşılaştırılması sonucunda, akıllı vidaların birleşim bölgelerinde moment dayanımını yaklaşık %30 oranında artırdığı tespit edilmiştir. (Rong et al.2016) Özellikle sismik etkiler altında kritik öneme sahip süneklilik oranını ise yaklaşık %30 oranında artırdığı tespit edilmiştir. (El-Sheikh et al.2015) Plastik dönme kapasitesinin yükselmesi ve enerji yutma potansiyelinin artması, bu sistemleri yüksek sismik risk altındaki bölgeler için uygun bir çözüm haline getirmektedir.



Şekil 1.4. Somun başlıklı akıllı vida

1.4. Soğuk Şekillendirilmiş Çelik (CFS) Çerçevesel Kirişlerde Göçme Türleri

Soğuk şekillendirilmiş hafif çelik (Cold Formed Steel, CFS) yapılar, hafifliği, hızlı montaj imkanı ve ekonomik üretim avantajları sebebiyle özellikle düşük ve orta katlı binalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Bununla birlikte, ince kesitli elemanların yerel stabilite açısından zayıf olması, farklı göçme mekanizmalarının ortaya çıkmasına yol açabilir. Bu nedenle, soğuk şekillendirilmiş hafif çelik çerçevesel kirişlerde (CFS) meydana gelebilecek göçme türlerinin doğru analiz edilmesi, yapısal güvenlik ve verimli tasarım açısından büyük önem taşır.

Soğuk Şekillendirilmiş Çelik Levhali kirişlerde görülen başlıca göçme modları şu şekilde sıralanabilir:

1.4.1. Yanal burulmalı burkulma (lateral torsional buckling – LTB)

Soğuk şekillendirilmiş çelik levhali sistemler ince kesitleri dolayısıyla burkulmaya karşı hassas ve narindirler. Uzun açıklıklı ve yanal destekten yoksun soğuk şekillendirilmiş çelik levhali kirişler, eğilme kuvvetleri altında stabilitelerini kaybederek ani bir şekilde hem yanal deplasman ve hem de burulma deformasyon kombinasyonlarının ortaya çıkması ile göçmesidir. Bu durum, flanşların asimetrik olduğu kesitlerde daha belirgin bir şekilde meydana gelir. Bu davranışın serbest açıklığa göre değişim grafiği sunulmuştur. (Şekil 1.5.a). Yanal Burkulmalı Burkulma (Lateral Torsional Buckling) yapının genel stabilitesini etkileyen önemli bir faktördür ve taşıma kapasitesini

düşürür. Eğilmeye maruz kalan kiriş kesit burulmaya zorlanır yük taşıma kapasitesini geçtiğinde ise sistemde şekil kaybı yaşanır. (Şekil 1.5.b). Bu göçmeyi engellemek için sisteme ara mesnetler veya bağlantı elemanları ekleyerek burkulma boyunun kısaltılması gibi önlemler alınabilir.

1.4.2. Bükülmeli burkulma (lateral distortional buckling – LDB)

Bu göçme modunda ince kesitli yapısal elemanların basınç altında hem burkulma hem de bükülme davranışı ile stabilitesini kaybettiği karmaşık bir problemdir. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalarda yük altında aniden yanal deplasman ile burulma göstermesi ve flanş ile gövde arasındaki birleşim bölgesinin deforme olması sonucu ortaya çıkar. İnce kesitlerde, flanşların bükülmesi ve kesitin şekil değiştirmesiyle karakterize olup bu göçme türü taşıma kapasitesini ciddi anlamda düşürür. Kenar burkulmaları ve lokal deformasyonlar, bu göçme türünün tipik belirtileridir.

1.4.3. Yerel başlık burkulması (local flange buckling – LFB)

Soğuk şekillendirilmiş çelik levhaların flanşları, basınç gerilmeleri altında yerel burkulmaya karşı hassastır. Özellikle yüksek eksenel yükler veya moment etkisi altında başlık kısmının stabilitesini kaybetmesiyle meydana gelir. Burkulma sonucunda kesitin yük taşıma yeteneği azalır ve yapısal performans ani olarak bozulabilir. Soğuk şekillendirilmiş levhaların tasarım aşamasında bu durum dikkate alınması gereken kritik bir göçme durumudur.

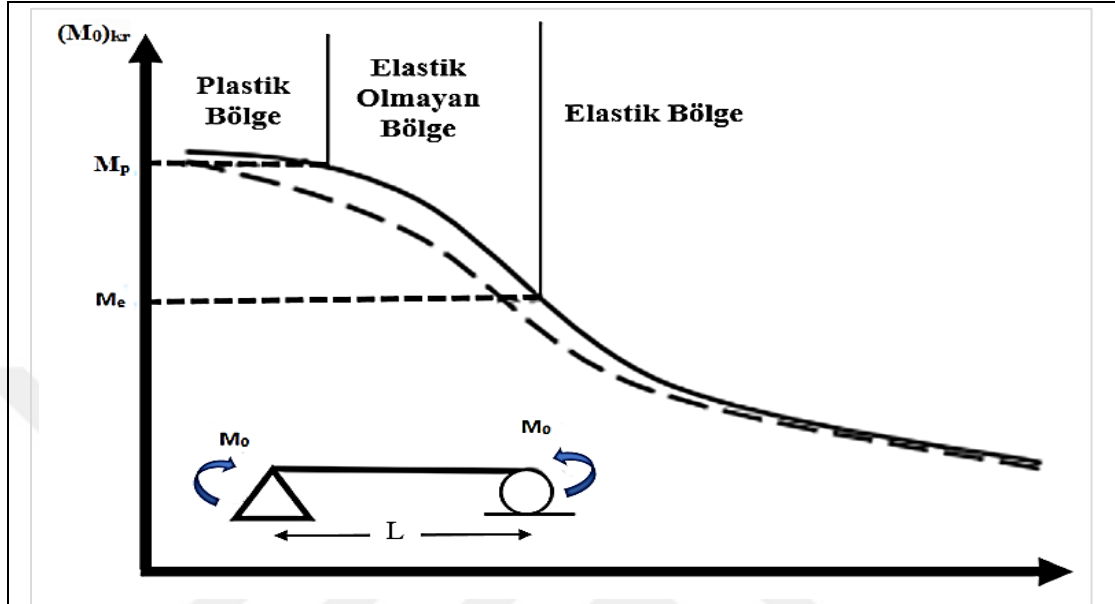
1.4.4. Gövde burkulmaları

Soğuk şekillendirilmiş çelik levhaların ince gövde levhaları, kesme ve basınç kuvvetleri altında aniden burkulması ile oluşur. Bu kapsamda iki temel göçme türü incelenir:

- Kayma Sonrası Gövde Burkulması (WPB – Web Post-Buckling due to Shear): Yüksek kesme kuvvetleri altında gövdenin plakasal burkulma davranışı göstermesi.

1. GİRİŞ

- Basınç Etkisiyle Gövde Burkulması (WBC – Web Buckling due to Compression): Mesnetler ve yük transfer noktalarında aksel basınç nedeniyle stabilite kaybı.



a. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi (Ayhan 2007)



b. Dairesel kirişte yanıl burulmalı burkulma (Sonck 2015)

Şekil 1.5. Yanal burulmalı burkulma dayanımının serbest açıklıkla değişimi

1.4.5. Vierendeel mekanizması (VIER)

Rijit düğüm noktaları nedeniyle yatay veya düşey yükler altında kirişler eğilme momentine maruz kalır ve kirişlerde plastik mafsallaşma başlar ve bu mafsallaşmaların artmasıyla bu göçme oluşur. Kiriş gövdesinde delik veya boşlukların bulunması durumunda, bu bölgelerde yüksek kesme gerilmeleri plastik mafsal oluşumuna sebep olabilir. Şekil 1.7. da görüleceği üzere kirişte bulunan deliklerde oluşan kesme gerilmesi ile bu eğilme türü oluşmuştur. Açıklıkların üst ve alt kısımlarında çekme ve basınç

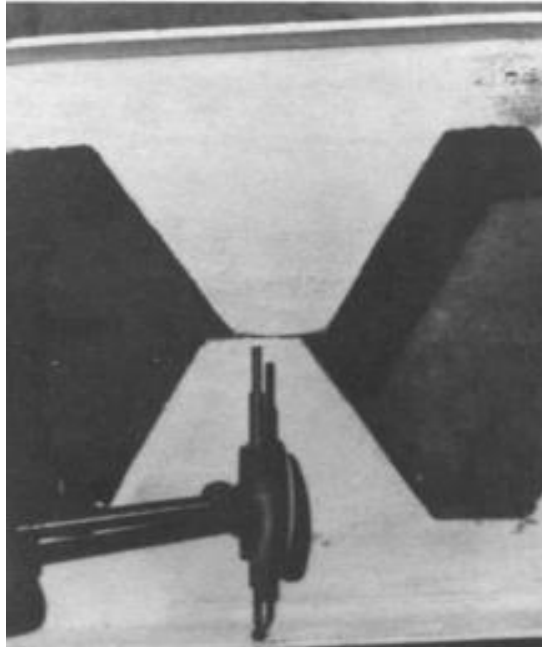
etkisiyle gelişen bu mekanizma, rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesini olumsuz etkileyerek göçmeye yol açabilir.

1.4.6. Gövde kaynak bölgesi yırtılmaları

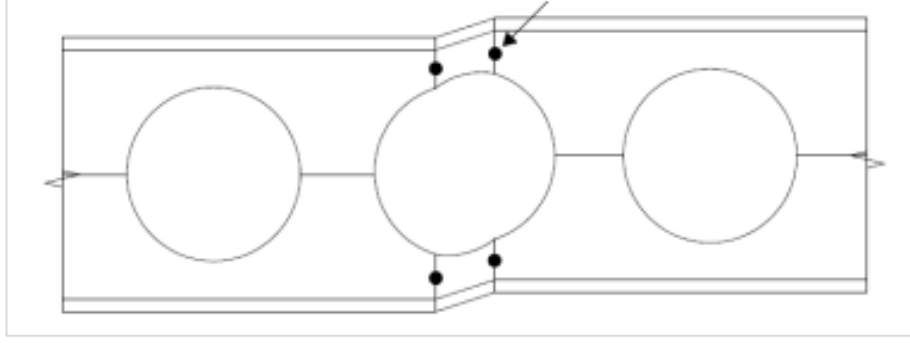
Soğuk şekillendirilmiş çelik levhalı kirişlerde gövde ve flanş birleşimlerindeki kaynak bölgeleri, yüksek gerilme yoğunluğu nedeniyle çatlak oluşumuna ve yırtılmaya açıktır. Tekrarlı yükler altında biriken deformasyonlar gevrek ve ani kırılmalara yol açarak sistemde ani stabilite kaybı ile oluşan bir göçme türüdür. Şekil 1.6 de gibi tekrarlı yanal yüklerle oluşan ani ve gevrek kırılmalar gösterilmiştir.

1.4.7. Eğilme göçmesi

Kiriş kesitinin plastik moment kapasitesinin aşılması durumunda eğilme göçmesi meydana gelir. Flanş ve gövdenin akma sınırını geçmesiyle oluşan bu durum, genellikle yerel burkulmalarla etkileşime girerek karmaşık göçme modlarına dönüşebilir.



Şekil 1.6. Kaynak bağlantısının yırtılması (Kaygısız 2019)



Şekil 1.7. Dairesel kirişte yüksek kesme (Kaygısız 2019)

1.5. Tasarım Prosedürü

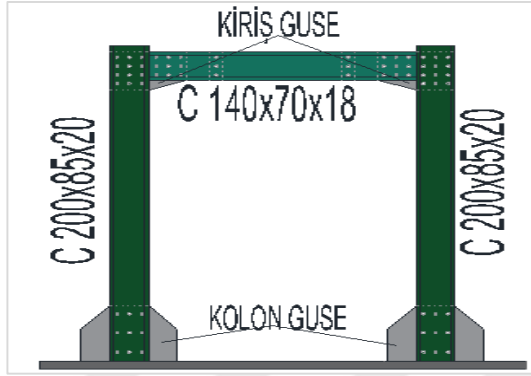
Bu çalışmada kirişinde boşluk bulunmayan T birleşimli hafif çelik numunelerin tasarımı, soğuk şekillendirilmiş çelik profiller kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım aşamasında birleşimin taşıma kapasitesini etkileyen temel parametreler olarak kesit boyutları, sac kalınlıkları, guse levhası kalınlıkları ve bağlantı konfigürasyonları dikkate alınmıştır. Kullanılan çelik profiller, “C” kesitli olup hem kolon hem de kiriş elemanlarında farklı kalınlıklarda test edilmiştir. Malzeme olarak düşük karbonlu, yüksek akma dayanımına sahip hafif çelik tercih edilmiştir. Kolon ve kiriş elemanlarının yanı sıra, birleşim bölgesindeki yük aktarımını sağlamak amacıyla guse levhaları kullanılmış ve bunların kalınlıkları da değişken tutularak farklı konfigürasyonlar değerlendirilmiştir.

Tüm birleşimlerde bağlantı elemanları olarak kendinden delici matkap uçlu vidalar ya da cıvatalar kullanılmış olup, bu elemanların sayısı ve düzeni sabit tutularak deliksiz numunelerde delik etkisinin tamamen dışlandığı bir referans veri seti elde edilmiştir. Kirişte tesisat geçişine olanak tanıyan hiçbir delik bırakılmamıştır, bu da birleşimin moment kapasitesinin delik etkisinden bağımsız olarak ölçülmesine imkân sağlamıştır.

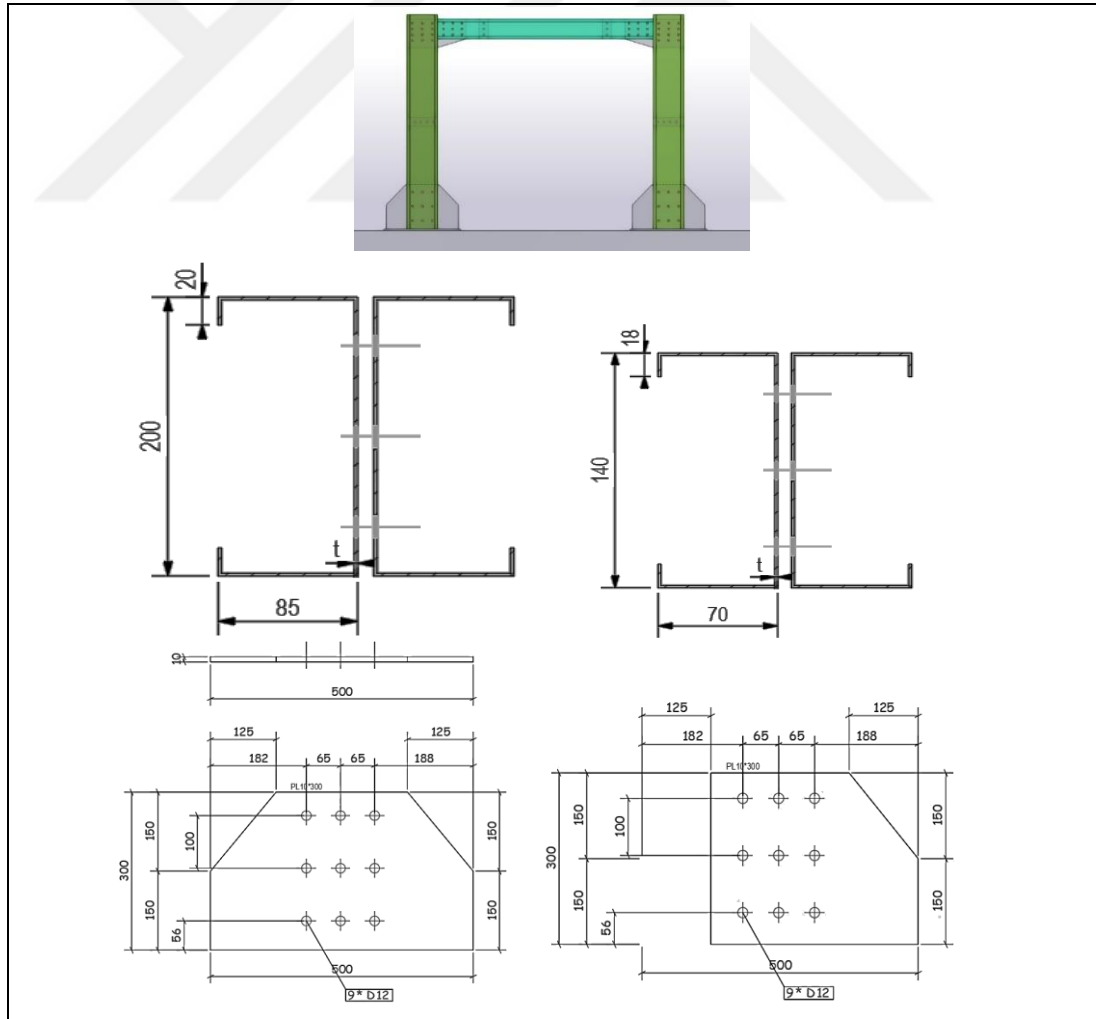
Yükleme protokolü olarak FEMA-350 döngüsel yüklem prosedürü uygulanmış ve böylece birleşimlerin sismik davranışı deneysel olarak değerlendirilmiştir. Numuneler, yanal burkulmaları engelleyecek şekilde her iki uçtan desteklenmiş, testlerde Besmak marka 150 tonluk dinamik aktüatör kullanılmıştır. Deneysel verilerin doğruluğu için her numuneye 2 adet gerilim pulu yerleştirilmiş ve yer değiştirme ölçümleri LVDT cihazları ile gerçekleştirilmiştir. Bu deliksiz numuneler, delikli numunelerle karşılaştırıldığında

1. GİRİŞ

referans olarak kullanılmış ve deliklerin birleşim davranışı üzerindeki etkisi bu şekilde analiz edilmiştir. Deney numunelerimizde C 200X85X20 mm ebatlarında 2 adet kolon ve guseler ile C 140X70X18 mm ebatlarında kiriş ve guselerinden oluşan deney düzeneğimiz Şekil 1.8 ve deney numune geometrisi de Şekil 1.8 de gösterilmiştir.



Şekil 1.8. Deney numune düzeneği (Tüm birimler mm'dir.)



Şekil 1.9. Deney numunelerinin geometrisi

1. GİRİŞ

Deney numunelerimiz hafif çelik yapı elemanların Çizelge 1.1 den de görüleceği üzere farklı kalınlık parametreleri ile yük taşıma kapasiteleri, rijitlik, süneklilik ve birleşim bölgelerinin davranışları üzerindeki etkilerini incelemek için hazırlanmıştır.

Çizelge 1.1. Deney numunelerinin özellikleri

Numune Adı	Kolon Boyutu (mm)	Kiriş Boyutu (mm)	Kolon Kalınlığı (mm)	Kolon Guse Kal. (mm)	Kiriş Kalınlığı (mm)	Kiriş Guse Kal. (mm)
EX-1	C- 200×85×20	C- 140×70×18	1.5	1.5	1.5	1.5
EX-2			2.0	1.5	2.0	1.5
EX-3			2.0	2.0	2.0	2.0
EX-4			1.5	2.0	1.5	2.0
EX-5			2.0	3.0	2.0	3.0

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Lim et. al. (2004), soğuk şekillendirilmiş çelik portal çerçeve sistemlerinde basit cıvatalı moment bağlantılarının davranışını incelemiştir. Çalışmada, kesme kuvveti etkisindeki cıvatalı bindirme bağlantılarının sonlu elemanlar yöntemiyle katı idealizasyonu yapılmış ve elde edilen sonuçlar deneysel verilerle doğrulanmıştır. Ayrıca, cıvata deliği uzamasının neden olduğu dönme esnekliğini modellemek için yay elemanları kullanılmış ve bu idealizasyonun laboratuvar testleriyle uyumlu sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Doğrusal olmayan elasto-plastik analizler, cıvata deliklerindeki temasın simülasyonunu içermekte olup, deneysel ve sayısal sonuçlar arasında yüksek bir uyum saptanmıştır. Çalışma, cıvata deliği uzamasının bağlantı sertliği üzerindeki belirleyici rolünü vurgulamış ve soğuk şekillendirilmiş çelik bağlantıların tasarımı için yöntemsel bir yaklaşım sunmuştur.

Yu et. al. (2005), soğuk şekillendirilmiş çelik kesitler arasındaki cıvatalı moment bağlantılarının yapısal davranışını inceleyen teorik ve deneysel bir çalışma sunmaktadır. Araştırmada, 16 iç ve dış kiriş-kolon alt çerçevesi yanal yükler altında test edilmiş ve büyük cıvata aralıkları ile kalın köşebent plakaları kullanılan bağlantılarda eğilme göçmesinin kritik olduğu tespit edilmiştir. Çalışma, bağlantıların iç kuvvet dağılımını analiz etmek için bir yöntem önermiş ve birleşik eğilme-kesme etkisi altındaki kesit hasarlarına yönelik tasarım kuralları geliştirmiştir. Ayrıca, yarı-rijit birleşimlerin etkisini modelleyen doğrusal olmayan bir sonlu eleman analizi sunulmuş, moment-dönme eğrileri kullanılarak alt çerçevelerin yük-sapma davranışı tahmin edilmiştir. Test verileriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiş ve cıvatalı bağlantıların esnekliğini hesaplamak için yarı ampirik bir formül önerilmiştir. Çalışma, önerilen kuralların soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerin performansını etkili şekilde tahmin ettiğini vurgulamış, mühendisleri bu bağlantıları kullanarak pratik ve verimli yapılar tasarlamaya teşvik etmiştir.

Dundu et. al. (2006), hafif, soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerin bağlantı davranışını inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Araştırma, küçük açıklıklı (10-13 m) binalarda ana çerçeve olarak soğuk şekillendirilmiş elemanların kullanımını ele almakta ve bu yapıların sabit saçak yüksekliği (3 m), çerçeve aralığı (4,5 m) ve eğim (10°) gibi parametrelerini incelemektedir. Çerçeveler, sırt sırta cıvatalanmış tek kanallı bölümlerden

oluşmakta ve köşebentlerle temele bağlanmaktadır. Çalışmada, birleşim noktalarının moment direnci ve kırılma modlarına odaklanılmış, özellikle saçak birleşimlerindeki maksimum momentler analiz edilmiştir. Malzeme özellikleri, İngiliz Standardı BS 18'e uygun 30 çekme testi ile değerlendirilmiştir. Deneyler, flanş ve kanal ağılarında yerel burkulma, yanal burulma burkulması gibi hasar modlarını ortaya çıkarmıştır. Araştırma, soğuk şekillendirilmiş çelik portal çerçevelerin, 15 m'den kısa açıklıklarda geleneksel sıcak haddelenmiş I profillere uygun bir alternatif olduğunu göstermiştir. Ayrıca, standart profiller kullanılarak atölye gereksinimleri azaltılmış ve sırt sırta bağlantılardaki eksantrik etkilerin önemi vurgulanmıştır. Bu çalışma, hafif çelik yapıların tasarımında esneklik ve ekonomik avantajlar sunmaktadır.

Dubina (2008), soğuk şekillendirilmiş çelik çerçeveli yapıların sismik performansını inceleyen kapsamlı bir çalışma sunmaktadır. Araştırmada, tam ölçekli kesme panelleri üzerinde monotonik ve döngüsel yükleme testleri, bağlantı detaylarının analizi ve inşaat halindeki bir yapıda ortam titreşim testleri gerçekleştirilmiştir. Çelik çerçeveli yapıların hafif ve ince duvarlı olmasına rağmen, perde duvarların deprem ve rüzgar yüklerine karşı ana taşıyıcı elemanlar olduğu vurgulanmıştır. Ancak, bu duvarların sismik davranışı tam olarak anlaşılamamıştır. Çalışmada, farklı kaplama malzemeleri ve çerçeve tipolojileri test edilerek, kesme dayanımı, sertlik ve süneklik gibi parametreler incelenmiştir. Yapılan titreşim testlerinde, iç ve dış kaplamalar nedeniyle %6 gibi yüksek bir sönüm oranı tespit edilmiş ve şiddetli depremlerde maksimum 1/50 radyal kat ötelenme açısı sınırı önerilmiştir. Sonlu elemanlar analizinde, test edilen yapının 1/300 rad kayma ile iyi bir performans sergilediği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Gad ve ark. (2008, 2009) tarafından önerilen süneklik parametresinin 1,5-3,0 aralığında uygun olduğu ve yapısal aşırı mukavemetin deprem direnci açısından kritik bir faktör olduğu belirtilmiştir. Çalışma, gerçek bir yapı üzerinde yapılan titreşim testleriyle desteklenmiş ve farklı kaplama düzenlemelerinin performansını değerlendirmek için tam ölçekli duvar testleri gerçekleştirilmiştir. Bu testler, malzeme özelliklerindeki dağılımları ortaya koymuş ve tasarım sürecinde dikkate alınması gereken önemli sonuçlar sunmuştur.

Zhou et. al. (2009), 8 katlı çelik çapraz kafes sistemin sismik davranışını deneysel ve sayısal yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, ters düşük çevrimli yükleme altındaki ölçekli modelin histeretik eğrileri, iskelet eğrisi ve deformasyonları ölçülmüş; akma yükü,

süneklik, enerji kaybı, mukavemet ve sertlik bozulması gibi parametreler analiz edilmiştir. Ancak, çelik kademeli kafes sistemin karmaşık parametre çeşitliliği ve modelin benzersizliği nedeniyle deneysel çalışmanın kapsamının sınırlı kaldığı belirtilmiştir. Deneysel verilerle doğrulanan sonlu eleman modelleri kullanılarak, yapısal yükseklik, yükseklik-genişlik oranı, kafes kiriş tipi, zemin kat düzeni, açıklık-derinlik oranı ve açık gövdeli panel uzunluğu gibi parametrelerin sistem davranışına etkileri incelenmiştir. Çalışma, kademeli kafes sistemlerin tasarımına yönelik öneriler sunarken, akma yükü, deformasyon, süneklik ve enerji tüketimi gibi performans göstergelerini detaylı şekilde değerlendirmiştir.

Moghimi et. al. (2009), soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) kayış destekli duvarların performansını tam ölçekli (2,4 m × 2,4 m) numuneler üzerinde deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, farklı kuşak düzenlemelerinin davranışını analiz etmek için yirmi duvar örneği döngüsel yükleme testine tabi tutulmuştur. Araştırma, diyagonal kuşakların plastik eğilme yeteneği sayesinde kırılma arıza riski olmadan sünek bir tepki verdiğini ve bağlantı arızalarını önlediğini ortaya koymuştur. Ayrıca, farklı kuşak tiplerinin hasar modları ve yapısal olmayan alçı panellerin yanal performansa etkileri detaylı şekilde tartışılmıştır. Bu çalışma, CFS duvarların tasarımını iyileştirmek için kritik parametreleri ve teknikleri sunarak literatüre önemli bir katkı sağlamıştır.

Sabbagh et. al. (2010), ince duvarlı çelik yapıların deprem performansını inceleyen bir çalışma yürütmüştür. Araştırmada, kolonlar için içi boş yapısal bölümler (HSS) ve kirişler için çift kanallı kesitler kullanılarak tasarlanan tek katlı çerçeveler, yerçekimi ve yanal çevrimsel yükler altında test edilmiştir. Bağlantılarda yüksek mukavemetli cıvataların kullanıldığı sistemde, sismik enerjinin kiriş veya kolonlarda akma olmadan önce cıvata kayması ve yerel akma yoluyla dağıtıldığı gözlemlenmiştir. Çalışma, bu tür yapıların depreme dayanıklı inşaat için potansiyel taşıdığını ancak daha kapsamlı araştırmalara ihtiyaç olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, ince duvarlı elemanların betonla sabitlenmesinin yerel göçmeyi geciktirdiği ve birleşim plakalarının düzlem dışı hareketleri sınırladığı tespit edilmiştir. Bu bulgular, çok katlı hafif çelik yapıların tasarımına yönelik önemli katkılar sunmaktadır.

Bagheri Sabbagh et. al. (2012), depreme dayanıklı çok katlı moment çerçeveli binalarda enerji tüketen elemanlar olarak ince duvarlı soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) kesitlerin kullanımını deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, düzlem dışı takviyelerin tam ve minimum konfigürasyonlarıyla donatılmış CFS kavisli flanş kesitlerinin sismik performansı araştırılmış ve bu kesitlerin tam plastik moment (M_p) üretme kapasitesi, özellikle 0,04 rad'dan büyük dönmelerde değerlendirilmiştir. Farklı kalınlıklarda (3 mm ve 4 mm) ve üç farklı takviye düzenine sahip numuneler üzerinde yapılan deneylerde, moment-dönme ($M-\theta$) davranışı, bağlantı rijitliği ve gerinim dağılımı analiz edilmiştir. Sonuçlar, CFS kavisli flanş kirişlerinin yalnızca nominal plastik moment kapasitesini (M_p) karşılamakla kalmayıp, Eurocode 3 Bölüm 1-1'deki Sınıf 1 kesitlerle uyumlu şekilde 0,04 rad'den büyük dönmelerde de bu kapasiteyi sürdürdüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgular, CFS kesitlerin deprem dayanımlı yapılarda enerji sönümleyici elemanlar olarak kullanımının geçerliliğini desteklemektedir.

Fiorino, Iuorio et. al. (2014), Napoli'de inşa edilen yeni bir okul kompleksinin yapısal tasarımını ve uygulama süreçlerini incelemektedir. Yaklaşık 3000 m² kapalı alana ve 16.000 m² arazi üzerine kurulu olan yapı, derslikler, idari birimler ve laboratuvarların merkezi bir avlu etrafında organize edildiği mimari bir kompozisyona sahiptir. Proje, modüler ve sökülebilir bir sistem olarak tasarlanmış olup, kuru katmanlı çözümler sayesinde yapı bileşenlerinin başka bir yerde yeniden kullanılabilmesine olanak tanımaktadır. Ayrıca, bölgedeki sismik riskler dikkate alınarak depreme dayanıklı bir tasarım benimsenmiştir. Yapı, soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) profiller ve levhalar kullanılarak İtalyan inşaat teknik koduna (EN 1993-1.3'e benzer) uygun şekilde inşa edilmiştir. İnşaat süreci, toprak düzenlemesi ve temel çalışmalarının ardından Şubat-Temmuz 2010 arasında tamamlanmıştır. Çalışma, CFS yapılarının yüksek performans, güvenlik, dayanıklılık ve sürdürülebilirlik sağladığını, bu nedenle sismik riski yüksek bölgelerde bile yaygınlaşabileceğini vurgulamaktadır.

Lin et. al. (2014) tarafından yapılan bu çalışmada, monotonik ve tekrarlı kesme yükleri altında kalsiyum silikat levha (CSB) ile kaplanmış soğuk şekillendirilmiş çelik duvar çerçevelerinin yapısal dayanımı ve davranışı incelenmiştir. Araştırmada, 9 mm ve 12 mm kalınlığındaki CSB kaplamalar, tek taraflı ve çift taraflı bağlantı konfigürasyonları ile test edilmiştir. Deneylerde, arka arkaya bağlanmış iki C kesitli profil ve dış yüzeyde

CSB kaplama kullanılarak oluşturulan duvar numuneleri üzerinde monotonik kesme ve döngüsel yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda, numunelerin kesme mukavemeti, sertlik, enerji sönümlene kapasitesi, süneklik oranı ve hasar modları detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, Pan ve Shan'ın çalışmalarında da benzer şekilde soğuk şekillendirilmiş çelik duvar çerçevelerinin kesme yükü altındaki yapısal performansı araştırılmıştır. Bu çalışma, hafif çelik yapıların tasarımına yönelik önemli veriler sunmaktadır.

Mohebbi et. al. (2016), alçı ve fiber çimento levha kaplamaları kullanılarak çelik kılıflı soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) perde duvarların sismik davranışını inceleyen deneysel bir çalışma sunmaktadır. Altı farklı kaplama konfigürasyonuna sahip duvar numunesi, döngüsel yükleme altında test edilmiş ve her iki yüzeyin kaplanmasıyla yanıl sertlikte %67, kesme mukavemetinde %80 ve enerji dağıtma kapasitesinde %76'ya varan artış sağladığı gözlemlenmiştir. Çalışma, kaplamaların kesme mukavemeti üzerindeki etkilerinin mevcut tasarım standartlarına entegre edilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Bununla birlikte, kaplamaların sağladığı mukavemet artışının, yük aktarımı sırasında duvar elemanlarında sünek hasar (bağlantı elemanlarında deformasyon) yerine kırılma kırılma (örneğin, kiriş saplaması burkulması) riskini artırabileceği tespit edilmiştir. Araştırmacılar, çok katmanlı kaplamalı duvarların performansını doğru tahmin etmek için mevcut standartların revizyonunu ve tasarım iyileştirmelerinin tartışılmasını önermektedir. Bu bulgular, hafif çelik yapıların deprem dayanımı optimizasyonu için kritik öneme sahiptir.

Fiorino et. al. (2018), çivili alçı panellerle kaplanmış soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) perde duvarlarının monotonik ve döngüsel davranışını simüle etmek için üç farklı sayısal modelleme yaklaşımı sunmaktadır. İlk yaklaşım, mikro ölçekli bağlantı testlerine dayalı ayrıntılı bir sonlu elemanlar (FE) modeli kullanarak duvar tepkisini tahmin etmiştir. İkinci yaklaşım, deneysel döngüsel test verilerinden yola çıkarak eşdeğer bir kafes kiriş modeli geliştirmiştir. Üçüncü yaklaşım ise, yalnızca bireysel kaplama bağlantı test sonuçlarını temel alan ve tam bina analizlerine uygun basitleştirilmiş bir FE-kafes modeli önermiştir. Çalışma, bu tür duvarların dinamik davranışının, histerezis döngülerindeki belirgin sıkışma ve mukavemet kaybı gibi doğrusal olmayan özellikler taşıdığını vurgulamıştır. Modeller, ELISSA projesi kapsamında test edilen CFS perde

duvarlarının düzlem içi itme tepkisini yüksek doğrulukla tahmin etmiş ve sismik dayanım sistemleri olarak uygulanabilirliğini desteklemiştir.

Bučmys et. al. (2018), soğuk şekillendirilmiş çelik cıvatalı köşebent plaka bağlantılarını bileşen yöntemi yaklaşımıyla incelemişlerdir. Bu yöntem, bağlantıları temel bileşenlere ayırarak moment-dönme ($M-\phi$) ilişkisini mekanik modellerle analiz etmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada, bağlantıyı kiriş cıvata grubu, kolon cıvata grubu ve köşebent plakasından oluşan "üç yaylı" bir modelle temsil etmişlerdir. Önerilen bu mekanik model, başlangıçta 3 mm ve üzeri kalınlıklara uygun Eurocode 3 formüllerini adapte ederek geliştirilmiştir. Deneysel testlerde S355 ve S350GD+Z275 çelik kaliteleri kullanılmış, akma ve nihai mukavemet değerleri kupon testleriyle belirlenmiştir. Sayısal simülasyonlar SOLID186 sonlu elemanlar modeliyle gerçekleştirilmiş, elde edilen $M-\phi$ eğrileri deneysel ve analitik sonuçlarla karşılaştırılarak modelin doğruluğu kanıtlanmıştır. Çalışma, özellikle T-form köşebent plakalarının sertlik hesaplamaları için analitik bir formül sunarak, Eurocode 3 kurallarıyla uyumlu yeni bir yaklaşım önermektedir. Bu model, soğuk şekillendirilmiş çelik bağlantıların tasarımında literatüre katkı sağlamaktadır.

Mojtabaei et al. (2018), moment dirençli yenilikçi bir soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) portal çerçevesinin sismik performansını deneysel ve analitik yöntemlerle incelemiştir. Çalışmada, yarım ölçekli kutu kesitli kolonlar ve sırt sırta dudaklı kanal kirişlerden oluşan bir sistem, statik monotonik yükleme altında test edilmiştir. Deneysel sonuçlar, hasarın bağlantı bölgelerinde değil, kolonların üst ve alt kısımlarında yoğunlaştığını göstermiştir. Ayrıca, malzemenin doğrusal olmayan davranışı ve geometrik kusurlar dikkate alınarak geliştirilen sonlu elemanlar modeli, yük-yer değiştirme davranışı, nihai dayanım ve hasar modları açısından deneysel verilerle yüksek uyum sağlamıştır. Doğrulan model kullanılarak yapılan parametrik analizler, önerilen sistemin sismik performansını etkileyen faktörleri (yanal yük kapasitesi, enerji dağıtımı, süneklik vb.) değerlendirmiş ve kutu kesitli kolonların kullanımının, moment dirençli CFS çerçevelerde iyi bir sismik performans sağladığını ortaya koymuştur. Bu çalışma, CFS sistemlerin deprem dayanımı açısından geliştirilmesine yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

Xu et. al. (2018), hafif çelik (CFS) perde duvarların sismik performansını incelemek üzere altı tam ölçekli numune üzerinde deneysel çalışma yürütmüştür. Çalışmada, göçme modu, taşıma kapasitesi, süneklik, sertlik ve enerji dağılımı gibi parametreler analiz edilmiş; yoğunluk derecesi, dikme kesit alanı, duvar kalınlığı ve düşey yük gibi faktörlerin etkileri değerlendirilmiştir. Sonuçlar, yoğunluk derecesinin sismik performans ve hasar modu üzerinde belirleyici olduğunu, basınç kapasitesini ve kesme mukavemetini artırdığını göstermiştir. Araştırmacılar, dikme ve bağlantı modeline dayalı basitleştirilmiş bir tasarım formülü önermiş; bu formülün ACI 318-14, EC8 ve CNS 383-16 standartlarına kıyasla deney verileriyle daha uyumlu olduğunu vurgulamıştır. Deneylerde, çivilerin yerel burkulması ve vida bağlantı arızalarının hakim hasar mekanizmaları olduğu tespit edilmiş, dolgu malzemeleri kullanılarak bağlantı performansının iyileştirilebileceği ve mekanik kapasitenin daha verimli kullanılabileceği ortaya konmuştur. Geleneksel CFS duvarlara kıyasla, dolgulu sistemlerin daha yüksek taşıma kapasitesi ve dayanıklılık sergilediği belirtilmiştir.

Mevcut araştırmalar (Lim et al., 2004; Yu et al., 2005; Dundu et al., 2006) genellikle geleneksel cıvatalı bağlantıları analiz etmişken, bu çalışma tork kontrollü ve gevşeme izleme özellikli akıllı vidaların rijitlik, süneklik ve enerji sönümleme üzerindeki etkilerini ilk kez kapsamlı şekilde değerlendirmektedir.

Ayrıca, statik ve dinamik yükler altındaki davranışı inceleyerek literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmaktadır. Çalışmanın diğer bir farkı, 1-1.5 mm gibi ince kesitli CFS elemanlar kullanarak hafif yapıların kritik sorunlarına (yerel burkulma, gevrekleşme) odaklanmasıdır. Literatürdeki çoğu çalışma daha kalın kesitlerle (≥ 2 mm) yapılırken, bu araştırma gerçekçi uygulamalara daha yakın sonuçlar sunmaktadır. Özgün bağlantı konfigürasyonları ve montaj avantajları da vurgulanmıştır.

Sonuç olarak, bu çalışma hem akademiye akıllı bağlantı teknolojileri hakkında yeni veriler sağlamakta, hem de mühendislik uygulamalarında modern çözümlerin entegrasyonuna rehberlik etmektedir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

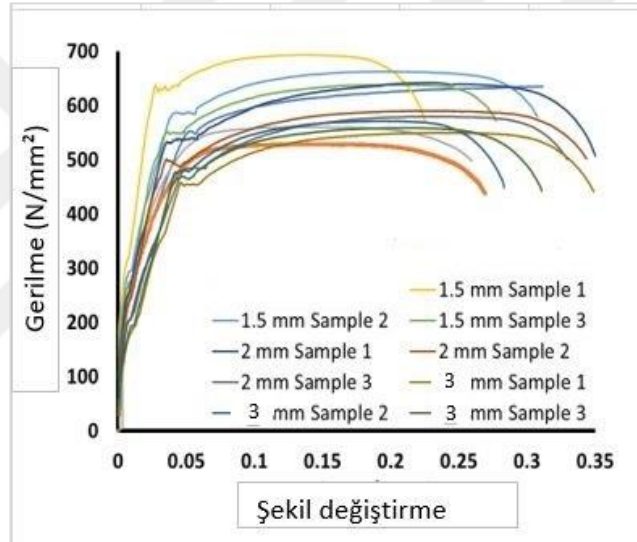
3.1. Deneyisel Çalışmalar

Bu çalışmada, hafif çelik T birleşimli çerçeve sistemlerinin deneysel olarak incelenmesi amacıyla farklı kiriş tipleriyle toplam 5 adet numune tasarlanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler hafif çelik C profilden oluşmaktadır. Bu elemanlar galvanizli çelik sacların soğuk şekillendirilme yöntemi ile 1.5mm, 2.0mm ve 3mm kalınlıktaki numuneler S350GD+Z çelik kalitesine sahip olup, Çizelge 3.1 de mekanik özellikleri verilmiştir. Bu numunelerden bazıları, tesisat geçişleri amacıyla gövdelerinde delikler açılmamış olan, yani boşluksuz kirişlere sahip referans numunelerdir. Bu tür numuneler, deliklerin yük taşıma kapasitesine etkisini izole şekilde gözlemlemek amacıyla tasarlanmıştır.

Boşluksuz kirişli numuneler EX-1, EX-2, EX-3, EX-4 ve EX-5 olarak belirlenmiştir. Bu numunelerde Çizelge 3.2 de farklı ebat ve kalınlıklardan oluşan C profil kolon ve kiriş elemanları ile T birleşimli bağlantılar oluşturulmuş, birleşim bölgelerine guseler uygulanmıştır. Her numunenin kolon ve kiriş kesit kalınlığı ile guse levha kalınlıkları farklılaştırılmış; fakat kiriş gövdesine hiçbir delik açılmamıştır. Numuneler, farklı ebat ve kalınlıklardan oluşan numune detay çizimleri (Şekil 3.4, Şekil 3.5, Şekil 3.6, Şekil 3.7, Şekil 3.8 ve Şekil 3.3)'de oluşturulan deney düzeneği ile FEMA-350 protokolüne göre döngüsel yükleme altında test edilmiştir. Bu referans numuneler, delikli kirişlerle karşılaştırıldığında moment, dönme ve enerji sönmleme kapasiteleri açısından temel karşılaştırma verisi sağlamaktadır.



Şekil 3.1 Kupon test düzeneği



Şekil 3.2 1.5mm , 2.0mm, 3 mm kalınlığındaki soğuk şekillendirilmiş çelik levhalar

Çizelge 3.1. Numunelerin kalınlıklarına göre mekanik özellikleri

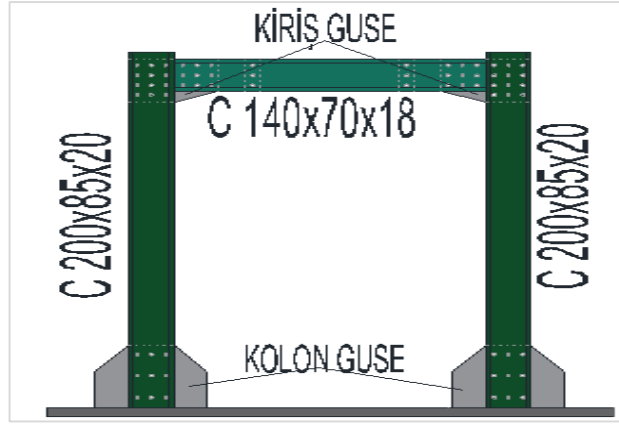
Numune Kalınlığı t_c (mm)	Dayanım (Mpa)	Numune 1 (Mpa)	Numune 2 (Mpa)	Numune 3 (Mpa)	Ortalama Dayanım (Mpa)
1,5 mm	Çekme Dayanımı (f_u) (N/mm ²)	693,042	662,963	638,552	664,852
	Akma Dayanımı (f_y) (N/mm ²)	619,977	586,588	547,615	584,727
2,0 mm	Çekme Dayanımı (f_u) (N/mm ²)	641,814	590,236	579,566	603,872
	Akma Dayanımı (f_y) (N/mm ²)	530,366	493,686	482,996	502,349
3 mm	Çekme Dayanımı (f_u) (N/mm ²)	549,764	571,364	558,586	559,905
	Akma Dayanımı (f_y) (N/mm ²)	464,528	468,484	468,316	467,109

Deney numunelerinden alınan kupon numunelerin performansını ölçmek için alınan Şekil 3.2 deki kupon çelik levhalar Şekil 3.1 deki kupon test düzeneği ile yapılan çalışma ile incelenen soğuk şekillendirilmiş çelik numunelerin mekanik özellikleri, kalınlık arttıkça karakteristik bir dayanım azalması gösterdiği görülmektedir. 1.5 mm kalınlıktaki numuneler ortalama 664.85 MPa çekme dayanımı ve 584.73 MPa akma dayanımı ile en yüksek değerleri sergilerken, kalınlık arttıkça bu değerlerin düzenli olarak azaldığı gözlemlenmiştir. (Çizelge 3.1)

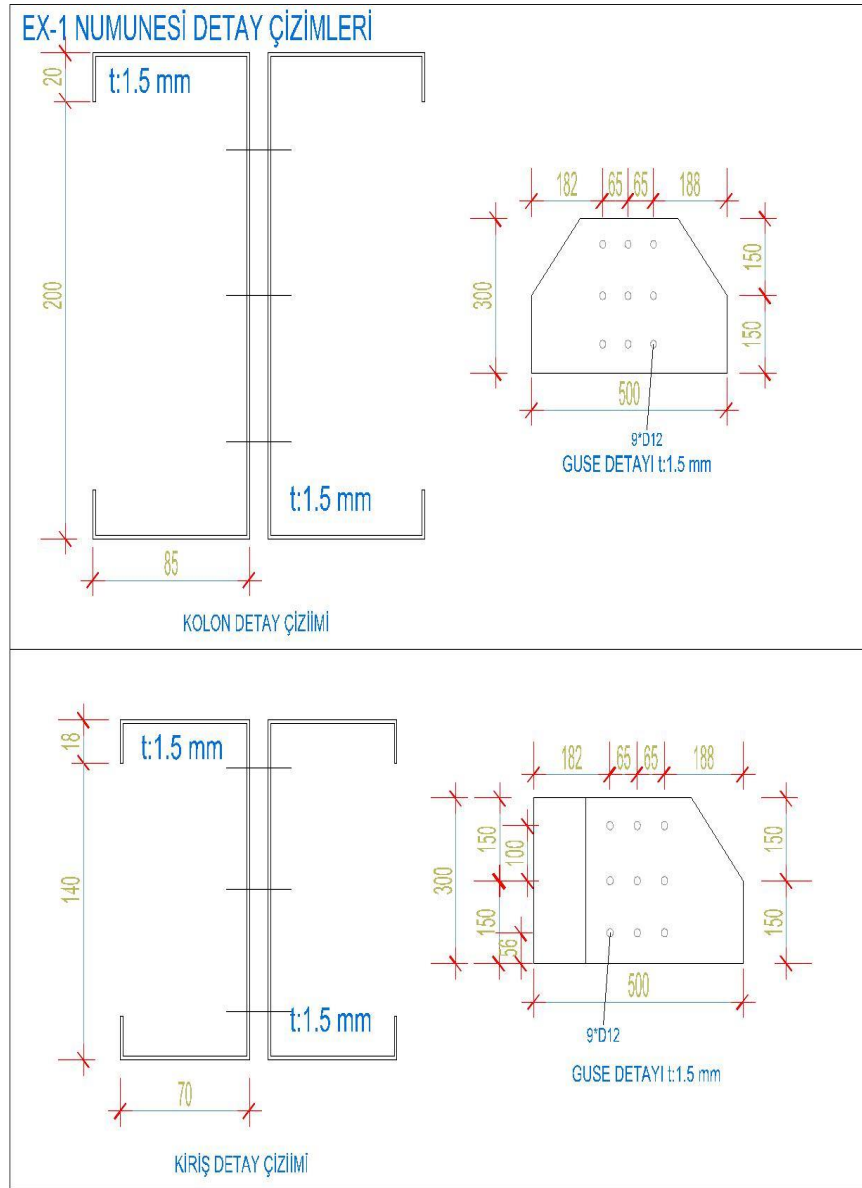
Özellikle 3 mm kalınlıkta çekme dayanımı 559.91 MPa'ya, akma dayanımı ise 467.11 MPa'ya kadar düşmüştür. İnce kesitlerde gözlenen bu yüksek dayanım, muhtemelen soğuk şekillendirme işleminin ince malzemelerde daha belirgin bir pekleşme etkisi yaratmasından kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, ince kesitlerde numuneler arasında daha büyük dayanım farklılıkları görülmüş, kalınlık arttıkça sonuçların daha tutarlı hale geldiği tespit edilmiştir. Akma ve çekme dayanımları arasındaki farkın tüm kalınlıklarda yaklaşık 80-100 MPa aralığında seyretmesi, malzemenin plastik deformasyon kapasitesinin kalınlıktan bağımsız benzer bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu bulgular, soğuk şekillendirilmiş çeliklerin tasarımında kalınlık seçiminin mekanik performans üzerinde kritik bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Çizelge 3.2. Numunelerin özellikleri

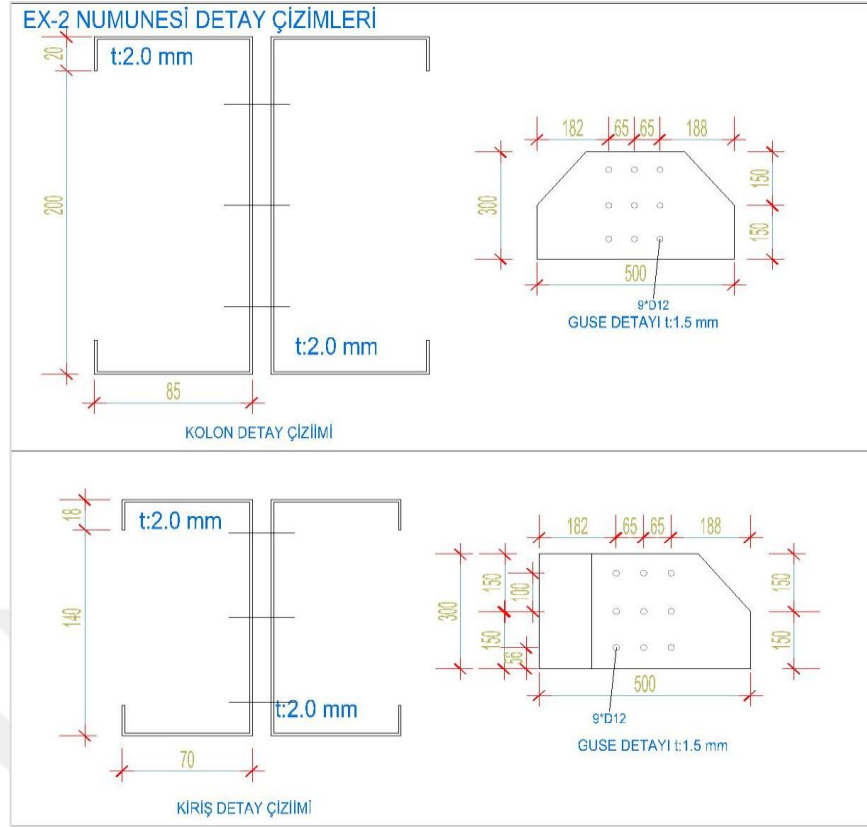
Numune No	Kolon Boyutu	Kiriş Boyutu	Kolon Kalınlığı (mm)	Kolon Guse Kal. (mm)	Kiriş Kalınlığı (mm)	Kiriş Guse Kal. (mm)
EX-1	C- 200×85×20	C- 140×70×18	1.5	1.5	1.5	1.5
EX-2			2.0	1.5	2.0	1.5
EX-3			2.0	2.0	2.0	2.0
EX-4			1.5	2.0	1.5	2.0
EX-5			2.0	3.0	2.0	3.0



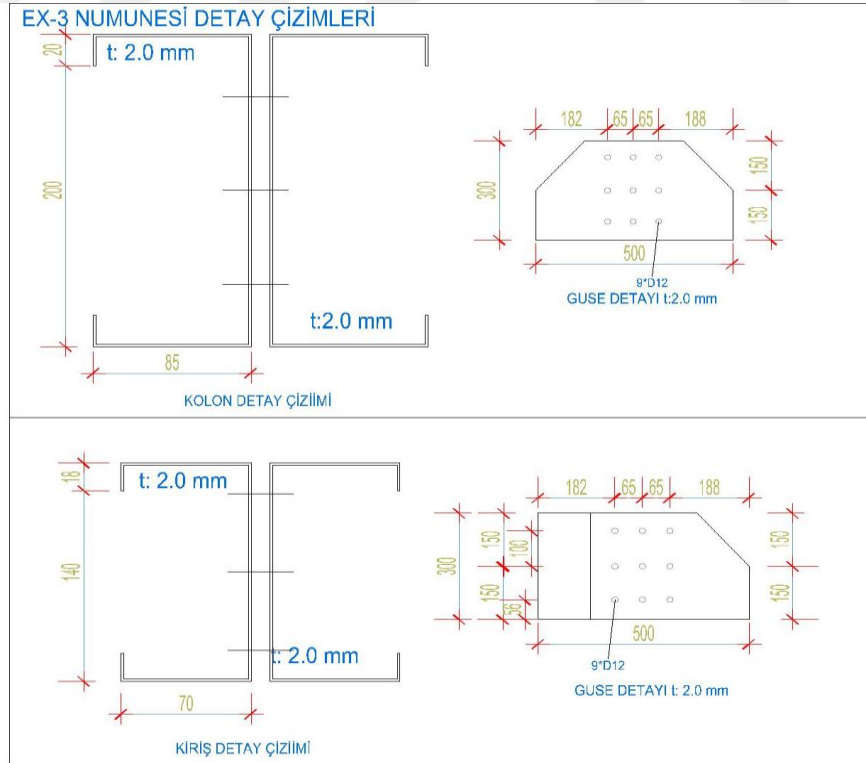
Şekil 3.3. Deney düzeneği



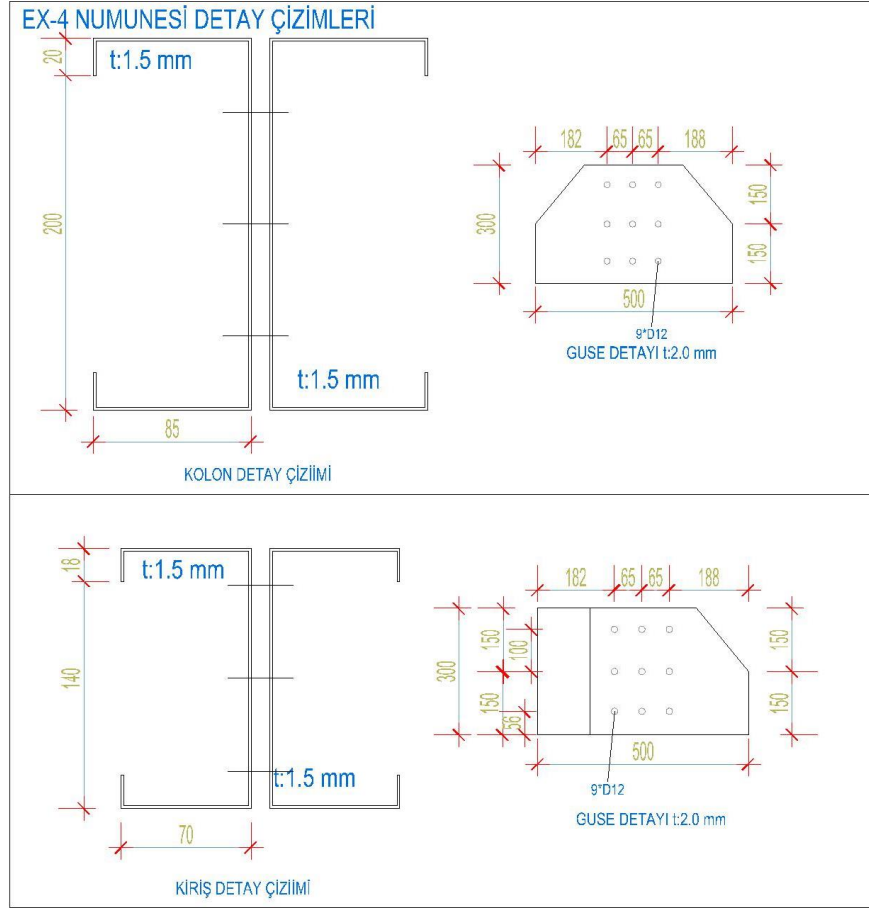
Şekil 3.4. EX-1 numunesi detay çizimleri



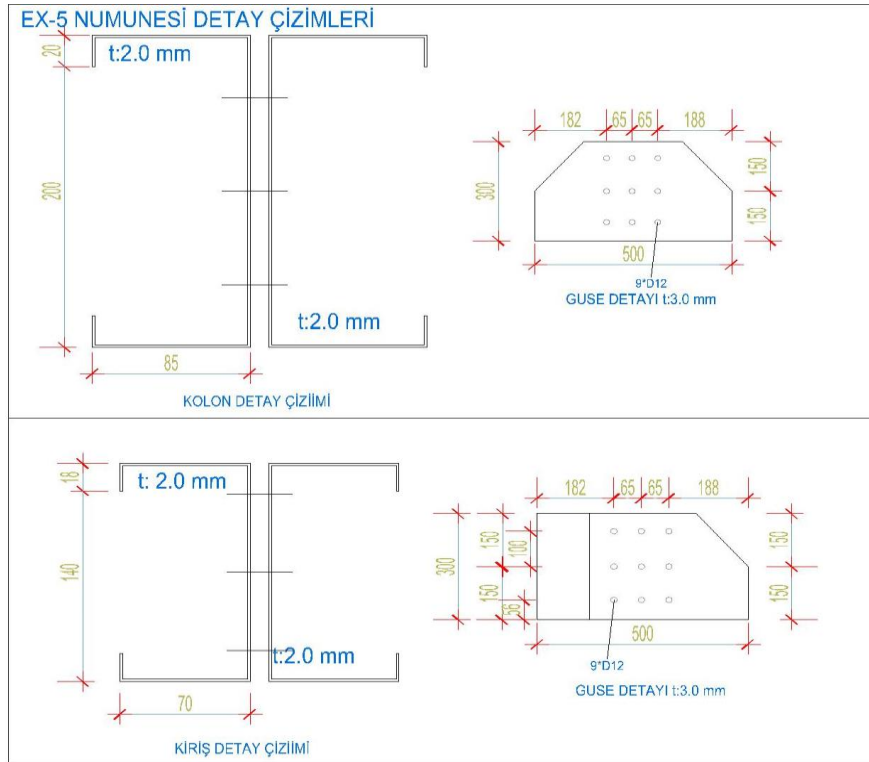
Şekil 3.5. EX-2 numunesi detay çizimleri



Şekil 3.6. EX-3 numunesi detay çizimleri



Şekil 3.7. EX-4 numunesi detay çizimleri



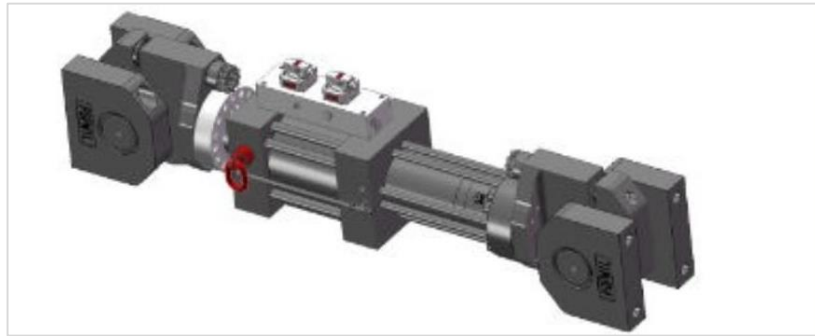
Şekil 3.8. EX-5 numunesi detay çizimleri

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.2.1. Hidrolik dinamik aktüatör

Hidrolik aktüatörler (Şekil 3.9.) mekanik cihazlar olup nesnelerin şekillerini ve hareket ettirip durdurması yöntemiyle çalışan cihazlardır. Hidrolik aktüatörler piston ve hidrolik sıvıdan oluşup sıvıların sıkıştırılmaz ilkesine göre tasarlanmışlardır. Deneyler sırasında kullanılan hidrolik aktüatör elektrik enerjisi ile çalışmakta olup bu enerji ile içinde bulunan yağı bir hazneye aktararak pistonu hareket ettirmek suretiyle pistonun ileri yönlü hareketini sağlamış olur. Cihaz geri yönlü hareketini ise sıvı basıncının azaltılması ile oluşan basınç farkına dayalı olarak yapmaktadır.

Deneylerde kullanılan aktüatör Besmak marka ve maksimum 150 tona kadar dinamik yük uygulayabilmektedir. Bu sistemler, bilgisayar kontrollü servo-valflerle hassas şekilde yönlendirilir ve yükleme protokollerine göre çeşitli testler gerçekleştirilir. Aktüatör, reaksiyon çerçevesi adı verilen sağlam bir çelik yapı üzerine yerleştirilir ve bir ucuna numune bağlanırken diğer uç sabitlenir. Numune üzerinde uygulanan kuvvetler, kuvvet hücreleri, deplasman sensörleri ve gerinim ölçerler aracılığıyla izlenir. Testler genellikle ön yükleme, monotonik (sabit hızla artan yük), sıklık (tekrarlı sinüzoidal veya üçgen yükleme), yorulma (binlerce döngü) ve kırılma (maksimum kapasiteye kadar) aşamalarını içerir. Hidrolik dinamik aktüatörler; akıllı vida birleşimlerinin, CFS çerçevelerin ve diğer yapısal elemanların dayanım ve süneklik davranışlarını belirlemek için vazgeçilmez araçlardır.



Şekil 3.9. Deneylerde kullanılan hidrolik dinamik aktüatörün şekli

3.2.2. Deformasyon ölçme cihazı

Doğrusal değişken diferansiyel çeviricisi (LVDT)

Bu cihaz, gerilme testleri gerçekleştirmek, titreşimleri algılamak, aktüatör hareketlerini ölçmek ve doğrusal hareketi elektriksel sinyale çevirmek amacıyla kullanılır. Doğrusal Değişken Diferansiyel Çevirici, içi boş silindirik bir bobin düzeneğinden meydana gelir.

Düzenekteki birincil bobinde oluşan alternatif manyetik alan, ikincil bobinde bir manyetik alan indükler. İkincil bobindeki bu indüklenmiş manyetik alan, içi boş tüpün merkezinde yer alan çekirdeğin konumuna göre değişiklik gösterir.

Sistemde herhangi bir yönde hareket meydana geldiğinde, çıkış sinyalinde bir artış gözlemlenir. Genellikle ± 0.1 mm ile ± 500 mm arasında ölçüm aralığına sahip olan doğrusal değişken diferansiyel çeviricisi mikrometre altı çözünürlükte veri sağlayabilir. Yüksek doğruluk ve lineerlik özellikleri sayesinde, çok küçük deformasyonların bile hassas bir şekilde izlenmesine olanak tanır. Cihazın dijital ve analog olmak üzere farklı çeşitleri bulunmaktadır. Şekil 3.10'da, deneylerde kullanılan Doğrusal Değişken Diferansiyel Çevirici'nin bir örneği görülmektedir.

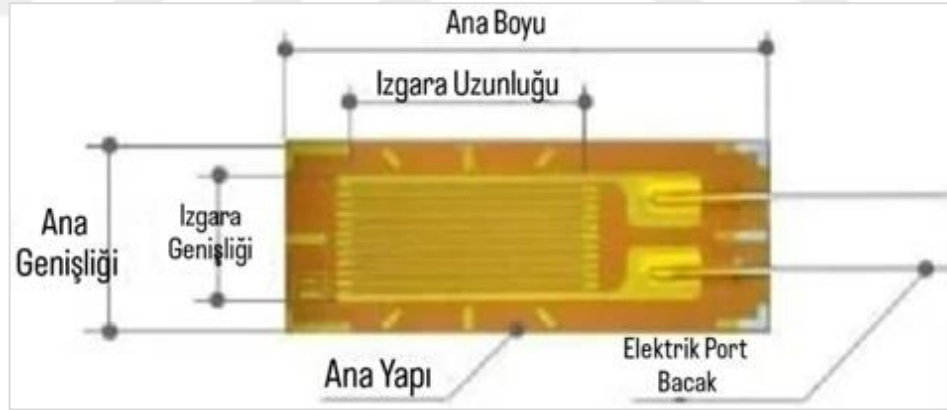


Şekil 3.10. Deneylerde kullanılan LVDT'ler

Strain gauge (Şekil değiştirme ölçer)

Şekil Değiştirme Ölçer, malzeme yüzeylerindeki birim şekil değişimlerini ölçmek amacıyla kullanılan ve sensörlerden oluşan bir cihazdır. İletken telin ince şeritler halinde tekrarlı olarak sarılmasıyla üretilir. Yaprak tipi olan bu ölçer, ince yapısı nedeniyle metal yüzeylere yerleştirilirken bazı zorluklar yaşanabilir. Kullanım öncesinde, ölçerin yerleştirileceği metal yüzey temizlenmeli; alkol, kolonya veya benzeri temizleyici sıvılarla toz ve kirlere arındırılmalıdır. Ardından, şekil değiştirme ölçer, sıvı yapıştırıcılar yardımıyla belirlenen alana sabitlenmelidir.

Ölçüm sırasında, yüzeydeki uzamaya bağlı olarak ölçerdeki telin boyu uzar ve kesiti inceler. Bu durum, telin direncinin artmasına yol açar. Kuvvet etkisiyle iletkenin direncindeki değişim, ölçerden geçen akımın voltajını değiştirir ve bu sayede yapıştırılan bölgedeki şekil değişimi tespit edilir. Elde edilen veriler, elastisite teorisindeki $\sigma = E \times \epsilon$ formülü kullanılarak sayısal değerlere dönüştürülür. Çalışmada, Şekil 3.11'de görülen FLAB-5-11-3LJC-F modeli tercih edilmiştir.



Şekil 3.11. Deneyde kullanılan yaprak tipi gerinim ölçer (Published 2017)

3.2.3. Veri toplama ve kaydetme sistemi (Data logger)

Veri toplama ve kaydetme sistemleri, zaman veya farklı sinyal voltajlarına bağlı olarak elektriksel verileri ölçen ve kaydeden elektronik cihazlardır. Bu sistemler, batarya desteği sayesinde elektrik kaynağına ihtiyaç duymadan da çalışarak ölçüm verilerini saklayabilir. Kayıt aralıkları, milisaniyelerden saatlere kadar esnek bir şekilde

ayarlanabilmektedir. Hem mobil hem de sabit kullanıma uygun modelleri bulunan bu sistemler, ölçüm cihazlarından gelen verileri doğrudan bilgisayara aktarabilir. Ayrıca, yük, sıcaklık, nem, pH, konum gibi parametrelerin yanı sıra çeşitli fiziksel büyüklükleri de ölçebilme kapasitesine sahiptir. Deney esnasında kayıt başlatma komutu verildiğinde, ölçüm aletlerindeki veriler kaydedilmeye başlanır ve deney sona erdikten sonra bile kayıt işlemi devam edebilir. Şekil 3.12'de, deneylerde kullanılan bir veri kaydedici (data logger) sisteminin görseli yer almaktadır.

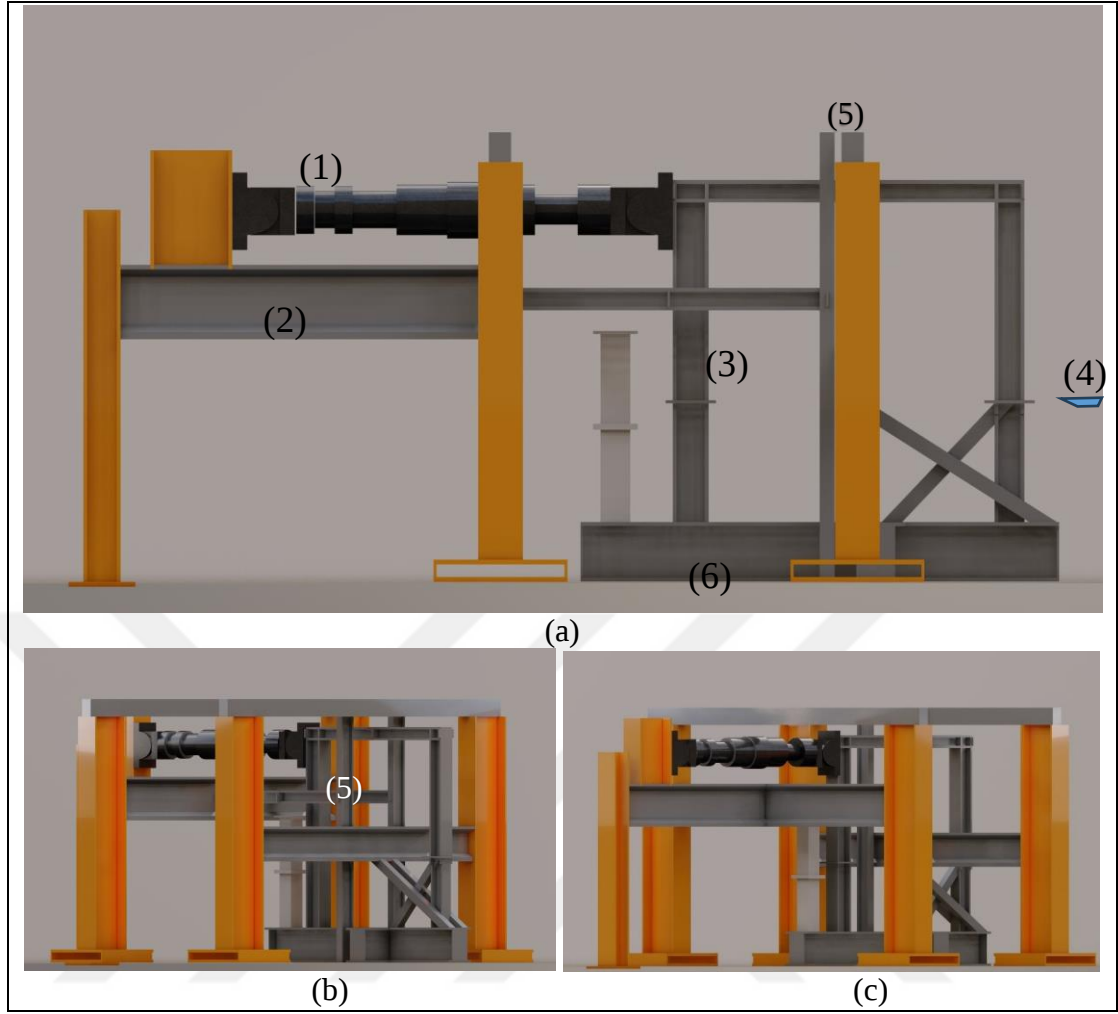


Şekil 3.12. Deneylerimizin yapım aşamasında kullanılan data logger

3.3. Deney Düzenegi

Deneyler Erzurum Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesinde bulunan İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında yapılmıştır.

Deney düzenegi Şekil 3.13. ve Çizelge 3.3.'de görüleceği üzere laboratuvar ortamında çelik, kiriş ve kolonlardan oluşturulan çelik çerçeve sistem, bu sistem içerisindeki hidrolik dinamik aktüatör, kirişin üst noktalarından eksenel kaymaları önlemek amacıyla kurulan burkulma çubukları ve zeminde ise ankraj çubuklarla sabitlenmiş rijit kolondan oluşmaktadır. Deneyde kurulumunu yaptığım rijit kolon kullanılması ile tezin amacının sadece petek kirişlerin davranışını incelenmesi değil aynı zamanda deney sırasında istenmeyen herhangi bir eksenel kaymanın önüne geçmektir.



Şekil 3.13. Deneylerin yapıldığı sistem ve numune yerleşim modeli (a) önden görünüşü; (b) sağ önden görünüşü; (c) sol önden görünüşü.

Çizelge 3.3. Deney araç gereç listesi

(1)	Aktüatör
(2)	Deney düzeneği
(3)	Deney numunessi
(4)	LVDT
(5)	Burkulma çubukları
(6)	Ankraj çubuklarla sabitlenmiş rijit kolon

3.4. Döngüsel Yükleme ve Yükleme Protokolleri

Yapılarda oluşan deprem yüklemesinin meydana getirdiği etkilerin daha gerçekçi bir şekilde aktarılması için kolon kiriş birleşim noktalarının deneysel olarak

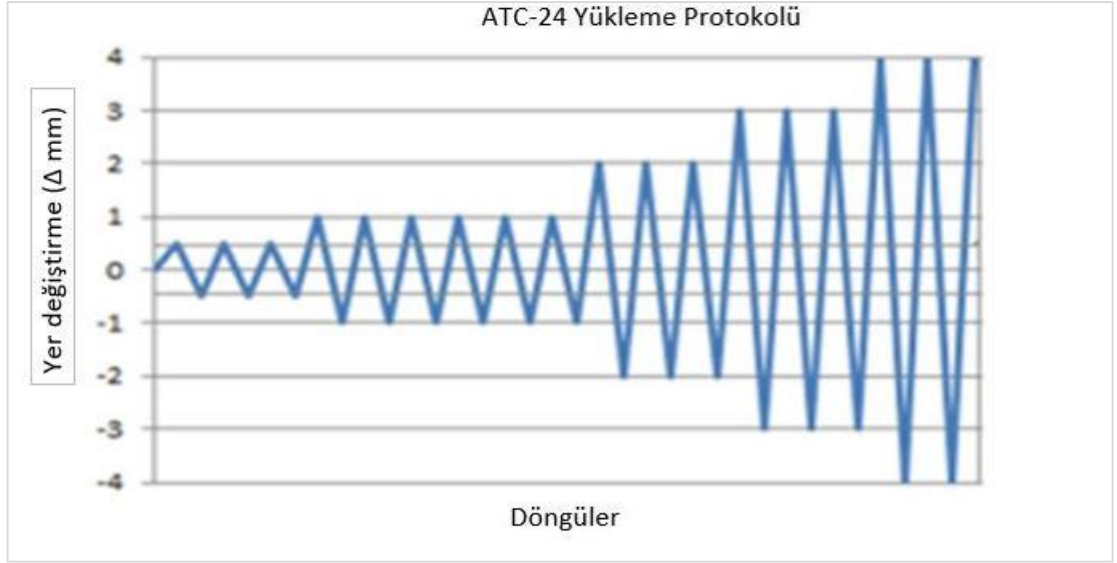
modellenmesi ve incelenmesi adına yüklemelerin yapı elemanlarına aktarılması gerekmektedir. Bu amaçla oluşturulan yükleme protokolleri belirlenirken depremelerin yeryüzünde meydana getirdiği hareketlerin yapı elemanının ve taşıyıcı elemanların birleşimlerinin cinsine göre yüklemenin frekansı ve döngü sayısı belirlenmiştir. Ülkelerdeki farklı yapı ve frekans nedeniyle her ülkedeki protokol de farklıdır. Aşağıda ülkelerin kullandıkları protokoller sırasıyla verilmiştir. (Tavlaşoğlu 2022);

3.4.1. ATC-24 yükleme protokolü

ATC-24 yükleme protokolü, yapıların çelik taşıyıcı elemanlarının birleşim noktalarının deneysel olarak analiz edilmesi amacıyla tasarlanmış kısa bir test yöntemidir. Bu protokol, elastik deformasyon sınırları içinde kalarak döngüsel yüklemeler uygular. Protokolün grafiksel gösterimi Şekil 3.14. da gösterilmiştir. Protokolün belirlediği maksimum deformasyon değerleri ve döngü adetleri, Çizelge 3.4'te sunulmuştur.

Çizelge 3.4. ATC-24 yükleme protokolü değerleri

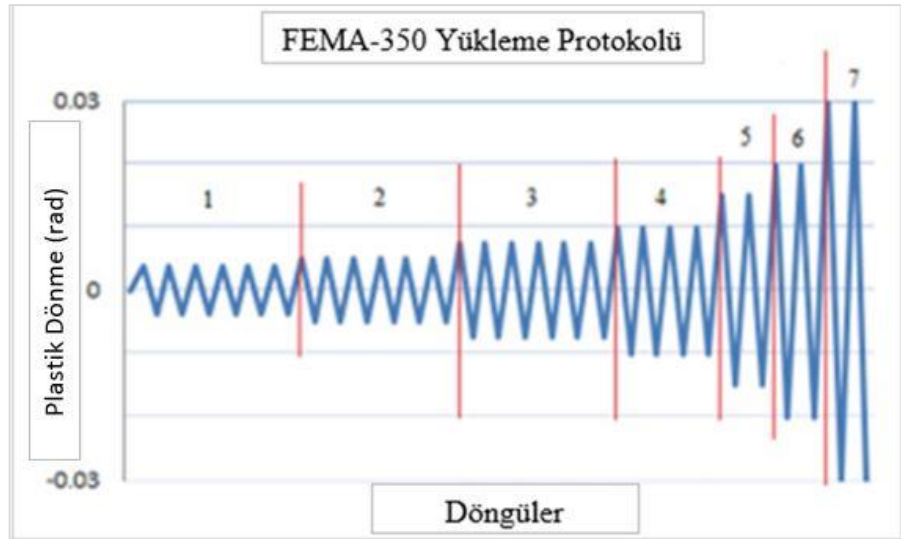
Yükleme Adımı	Maksimum Deformasyon Değeri	Döngü Sayısı (n)
1	$0,5\Delta_y$	3
2	$1 \Delta_y$	6
3	$2 \Delta_y$	3
4	$3 \Delta_y$	3
5	$4 \Delta_y$	3
Δ_y : Yer değişimi (mm)		



Şekil 3.14. Atc-24 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

3.4.2. FEMA-350 yükleme protokolü

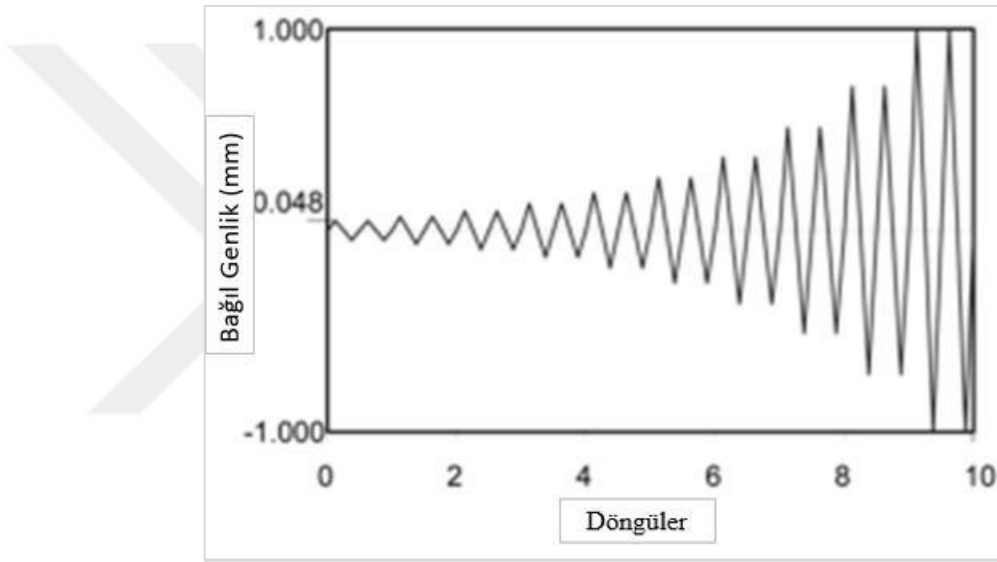
(Şekil 3.15) de grafikte gösterilen FEMA-350 yükleme protokolü çelik yapı sistemlerindeki taşıyıcı elemanların birleşim detaylarını değerlendirmek üzere Amerikan Çelik Konstrüksiyon Enstitüsü tarafından belirlenen standartları esas alır. Bu protokolde, plastik dönme radyan cinsinden ifade edilir ve her aşamada iki döngü halinde uygulanır. Yükleme sürecinde, maksimum yük seviyesine ulaşıldığında veya yükün başlangıç değerinin %20 altına düşmesi durumunda, sistemde stabilite kaybı ve hasar olduğu kabul edilir (Tavlaşoğlu, 2022).



Şekil 3.15. FEMA-350 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

3.4.3. FEMA-461 yükleme protokolü

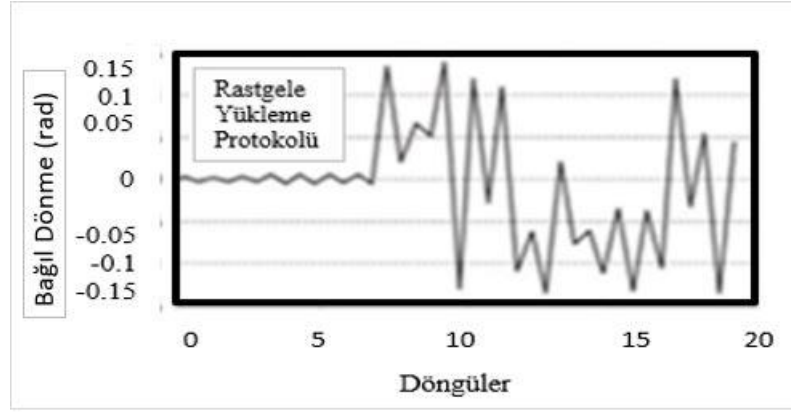
FEMA-461 yükleme protokolü (Şekil 3.16), özellikle sürüklenme etkisine duyarlı taşıyıcı sistem bileşenlerinin test edilmesinde yaygın olarak uygulanır. Protokol kapsamında, her bir deformasyon seviyesi için iki kez tekrarlanan döngüler oluşturulur. Δ değeri, monotonik yükleme altında elde edilen en yük deformasyon genliğini ifade eder. Yükleme süreci, $a_1 = 0,048 \cdot \Delta$ gibi küçük bir genlikle başlar. Test sonucunda yapı elemanında ciddi hasar tespit edilirse, deformasyon genlikleri $0,3\Delta m$ seviyelerine artırılarak deneye devam edilir (Tavlaşoğlu, 2022).



Şekil 3.16. FEMA-461 yükleme protokolü (Tavlaşoğlu 2022)

3.4.4. Rastgele yükleme protokolü

Bu protokol, iki farklı yükleme yönünde rastgele belirlenen aralıklarla gerçekleştirilen döngüsel bir yükleme düzenine sahiptir (Şekil 3.17). Bu tür yükleme koşullarında, yapının sergilediği mekanik davranış, uygulanan yük genliklerinin sıralanış düzenine göre değişiklik gösterebilmektedir.



Şekil 3.17. Rastgele yükleme protokolü (Okazaki ve Engelhart 2007)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Soğuk şekillendirilmiş çelik yapıların bağlantı bölgelerindeki davranışını incelemek, hafif çelik yapıların tasarımı ve uygulanması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu çalışmada, farklı kesit ve güç levhası kalınlıklarına sahip soğuk şekillendirilmiş çelik moment bağlantılarının yük taşıma kapasitesi, deplasman ve dönme performansları deneysel olarak araştırılmıştır. Tablodaki veriler, beş farklı numune üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen maksimum yük (F_{max}), maksimum deplasman (Δ_{max}), maksimum moment (M_{max}), maksimum dönme açısı (Θ_{max}), maksimum yükteki dönme açısı (ΘF_{max}) ve maksimum yükteki deplasman (ΔF_{max}) değerlerini göstermektedir.

Çizelge 4.1. Numunelerin özellikleri ve deney sonuçları.

Numune No	Kolon-C Kesit Kalınlık t (mm)	Kolon- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Kiriş- C Kesit Kalınlık t (mm)	Kiriş- Guse Levhası Kalınlık (mm)	F max (kN)	Δ max (mm)	M max (kN.mm)	Θ max (rad)	ΘF max (rad)	ΔF max (mm)
EX-1	1.5	1.5	1.5	1.5	42.0437	149.508	58.86118	0.119923	0.099672	149.508
EX-2	2	1.5	2	1.5	43.90841	149.957	61.47178	0.099971	0.059649	89.473
EX-3	2	2	2	2	26.20251	149.957	36.68351	0.099971	0.099667	149.501
EX-4	1.5	2	1.5	2	21.1327	149.957	29.58578	0.099971	0.058949	88.424
EX-5	2	3	2	3	28.00951	149.940	39.21332	0.109952	0.069756	104.634

Δ max: Maksimum yer değiştirme

M max: Maksimum moment

Θ max: Maksimum dönme

ΘF max: Maksimum yükte oluşan dönme açısı

ΔF max: Maksimum yükte yer değiştirme

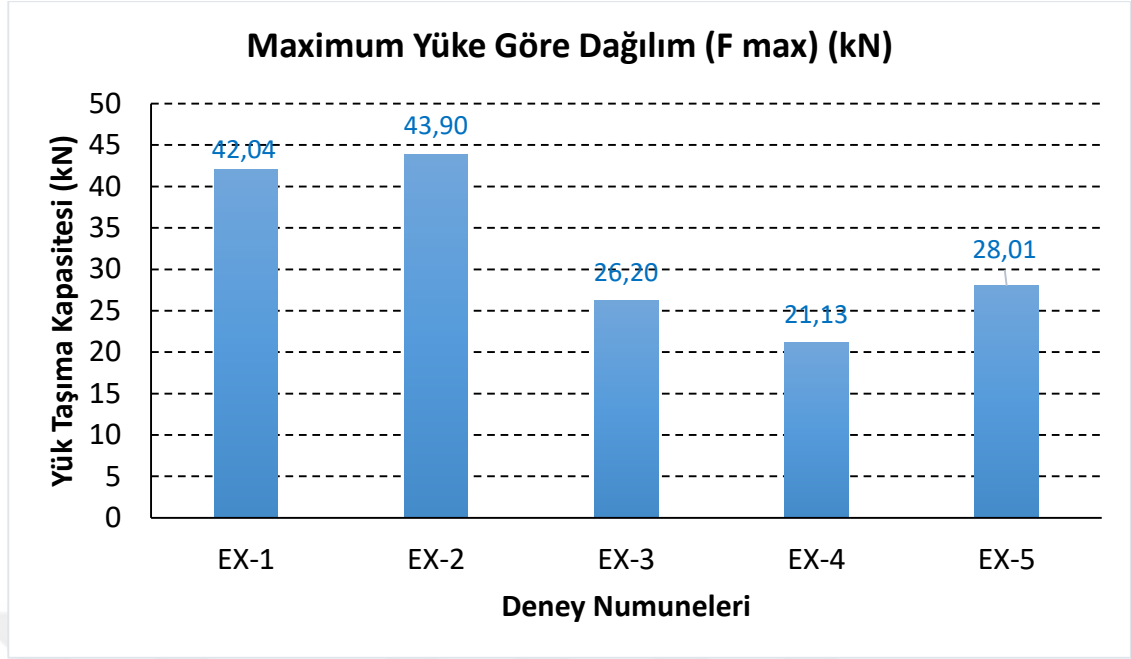
Çizelge 4.1'de sunulan numuneler, farklı kolon ve kiriş kesit kalınlıklarının birleşim bölgesi davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla özel olarak tasarlanmıştır. Tüm numunelerde sabit boyutlar kullanılmış olup; kolonlar 200×85×20 mm, kirişler ise 140×70×18 mm ölçülerinde üretilmiştir. Deney programında, Kolon-C

ve Kiriş-C kesit kalınlıkları ile Guse levhası kalınlıklarının farklı kombinasyonları değerlendirilmiştir. EX-1 numunesi tüm bileşenlerde 1.5 mm kalınlık kullanılarak referans model olarak belirlenmiştir. EX-2 numunesinde Kolon-C ve Kiriş-C kesit kalınlıkları 2.0 mm'ye artırılırken Guse levhası kalınlıkları 1.5 mm olarak korunmuştur. EX-3 numunesi ise tüm bileşenlerde 2.0 mm kalınlık kullanılarak sistemin rijitliğinin artırıldığı bir konfigürasyon sunmaktadır. EX-4 numunesi, EX-1 ile aynı kesit kalınlıklarına sahip olmakla birlikte yalnızca Guse levhası kalınlığının 2.0 mm'ye çıkarıldığı bir varyasyondur. EX-5 numunesinde ise Kolon ve Kiriş C kesitleri 2.0 mm iken Guse levhaları 3.0 mm kalınlıkta kullanılarak en kalın Guse konfigürasyonu oluşturulmuştur. Bu çeşitli kombinasyonlar, birleşim bölgesinin rijitlik, dönme sünekliği ve deplasman kapasitesi gibi davranış karakteristiklerinin farklı parametreler karşısındaki duyarlılığını sistematik olarak incelemeye olanak sağlamaktadır.

4.1. Numunelerin Maksimum Yük Değerlerinin Karşılaştırılması

Verilen tabloya göre numunelerin maksimum taşıma kapasiteleri (F_{max}) birbirleriyle karşılaştırıldığında, farklı kesit ve guse levhası kalınlıklarının yapısal dayanım üzerindeki etkileri yüzdesel olarak değerlendirilebilir.

En yüksek taşıma kapasitesi 43.91 kN ile EX-2 numunesine aittir. EX-1 numunesi 42.04 kN ile EX-2'ye göre yaklaşık %4.25 daha düşük kapasite göstermiştir. Bu fark, hem kolon hem de kiriş kesit kalınlıklarının EX-2'de 2 mm'ye çıkarılmasına bağlanabilir. Buna karşılık, EX-3 numunesinde hem kesit hem de guse levhası kalınlıkları artırılmış olmasına rağmen maksimum taşıma kapasitesi 26.20 kN ile EX-2'ye kıyasla yaklaşık %40.3 oranında azalmıştır. Bu durum, kalınlık artışının belirli bir noktadan sonra yapısal davranışı olumsuz etkileyebileceğini veya birleşim detaylarının performansa daha büyük etki ettiğini göstermektedir.

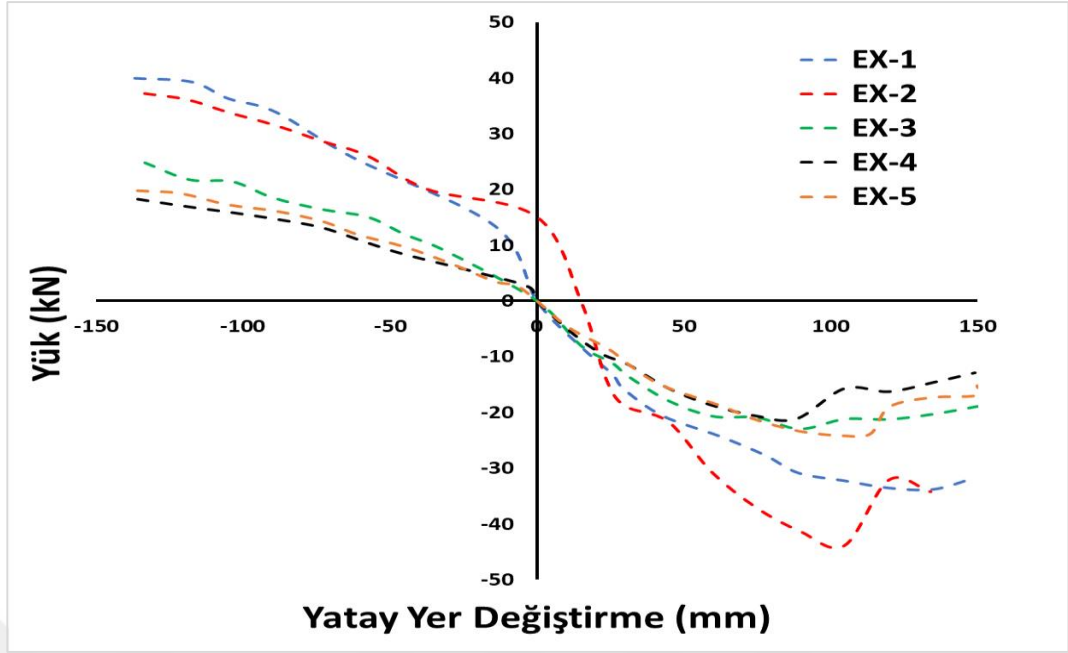


Şekil 4.1 Maximum yüke göre dağılım grafiği

EX-4 numunesi, EX-1 ile aynı kesit kalınlıklarına sahipken yalnızca guse levhası kalınlıkları artırılmıştır ve 21.13 kN taşıma kapasitesiyle EX-1'e göre %49.7 daha düşük kapasite göstermiştir. Şekil 4.1 grafikten de görüleceği üzere guse levhası kalınlığının tek başına artırılmasının performansa olumlu katkı sağlamadığını ortaya koymaktadır.

EX-5 numunesinde ise tüm eleman kalınlıkları daha da artırılmıştır; taşıma kapasitesi 28.01 kN olup EX-2'ye göre %36.2, EX-3'e göre ise %6.9 daha yüksektir.

Bu sonuçlar, optimum kalınlık kombinasyonlarının bulunmasının önemli olduğunu ve her kalınlık artışının doğrudan daha yüksek kapasite anlamına gelmediğini göstermektedir. Yapısal performansın sadece malzeme kalınlıklarıyla değil, birleşim detayları, deformasyon davranışı ve yük aktarım mekanizmalarıyla da yakından ilişkili olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.2. Numunelerin yük-deplasman iskeleton eğirileri.

Skeleton eğrisi ile hafif çelik yapının elastik sınırı, dinamik yükler altındaki deformasyon ve rijitlik etkilerini incelenmesi yapılır. Soğuk şekillendirilmiş çelik levhaların deprem performansını değerlendirmek adına histeretik döngülerin tepe noktalarının birleştirilmesi oluşturulan bu grafik levhaların sismik davranışını özetler. Şekil 4.2.de numunelerimizin histeretik döngü tepe noktaları ile oluşturulan her bir numune için maximum noktadaki dönme hareketinin maximum noktadaki yer değiştirmesine oranı ile grafik elde edilmiştir.

4.2. Numunelerin Deplasman Değerlerinin Karşılaştırılması

Kolon-C kesit kalınlığının artışının yapısal performans üzerindeki olumlu etkisi dikkat çekicidir. EX-1 numunesinde 1.5 mm olan kesit kalınlığının EX-2'de 2.0 mm'ye çıkarılması, yük kapasitesinde %4.4'lük bir artış sağlamıştır. Bu iyileşme, moment kapasitesinde de %4.4'lük paralel bir artışla desteklenmiştir. Ancak ilginç bir şekilde, bu kalınlık artışı deplasman değerlerinde kayda değer bir değişime yol açmamıştır. Kolon kesitlerinde meydana gelen kalınlık artışı ile beklenen yatay yer değiştirmede beklenen değişimin gerçekleşmemesi; kolonların akıllı vida ve kaynaklı bağlantı noktaları ile guse levhalarında dinamik yüklerle oluşan deformasyonların yapının tümüyle deplasman kabiliyetini sınırlandırdığı değerlendirilmektedir.

Guse levhası kalınlığının etkileri daha karmaşık bir tablo sunmaktadır. EX-1 ve EX-2 numunelerinde 1.5 mm olan Guse kalınlığının EX-3 ve EX-4'da 2.0 mm'ye çıkarılması, yük kapasitesinde sırasıyla %40.3 ve %49.7'lik ciddi düşüslere neden olmuştur. Bu durum, Guse levhası kalınlığının kritik bir parametre olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Ancak EX-5 numunesinde Guse kalınlığının 3.0 mm'ye çıkarılmasıyla yük kapasitesinde %6.9'luk bir iyileşme gözlenmesi, bu parametrenin doğrusal olmayan bir davranış sergilediğini göstermektedir.

Deplasman değerleri tüm numunelerde 149.5-150.0 mm aralığında son derece tutarlı sonuçlar vermiştir. Bu istikrar, deplasmanın incelenen parametrelerden büyük ölçüde bağımsız olduğunu ve muhtemelen deney düzeneğinin veya genel sistem rijitliğinin bir sonucu olarak ortaya çıktığını düşündürmektedir. EX-5 numunesinde ölçülen 149.94 mm'lik deplasman değeri, diğer numunelerden istatistiksel olarak anlamlı bir fark göstermemektedir. Ölçülen bu deplasman değeri numunenin hem kolon ve kiriş kalınlığının hemde guse kalınlıklarının artırılmış olmasının sistemin akıllı vida bağlantı ve kaynak noktalarında daha rijit davranması ve deplasmanın bu noktalar tarafından kontrol edilmesi nedeniyle kayda değer bir fark olmadığını oluşturduğu değerlendirilmektedir.

Moment kapasitesi analizleri, yük taşıma kapasitesiyle doğrusal bir ilişki sergilemiştir. EX-1 numunesinde 58.86 kNm olan moment değeri, EX-2 numunesinde 61.47 kNm'ye yükselmiştir. Buna karşılık, Guse levhası kalınlığının artması moment kapasitesini %36-50 oranında azaltmıştır. Dönme açılarındaki değişimler ise birleşim bölgesinin rotasyonel davranışı hakkında önemli ipuçları vermektedir. EX-1 numunesi birleşim bölgelerinin daha yüksek süneklik ve moment etkilerine karşı daha fazla deformasyona izin verdiği görülmüştür. EX-2, EX-3, EX-4 daha düşük dönme açılarıyla daha rijit davranış sergilediği, EX-5 ise ara değer olan dönme açısı nedeniyle taşıma kapasitesi ve dönme açısı yönüyle daha dengeli bir davranış göstermiştir. Numunelerin guse levha kalınlık artışı, vida ve kaynak bağlantı yerleri gibi parametrelerin dönme kapasitesine etki ettiği değerlendirilmiştir. Elde edilen bu veriler yapısal bütünlüğü korumak adına birleşim bölgelerinin yalnız taşıma kapasitesi ile değil dönme kapasitesi de dikkate alınarak tasarlanması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma yapısal performans optimizasyonu için önemli bulgular sunmaktadır. Kolon-C kesit kalınlığının artırılmasının olumlu etkileri açıkça görülürken, Guse levhası kalınlığının 1.5-2.0 mm aralığında ciddi performans düşüşlerine yol açtığı tespit edilmiştir. Deplasman değerlerinin parametrelerden bağımsız olması, bu konuda farklı mekanizmaların etkili olabileceğini düşündürmektedir. Özellikle EX-2 numunesinin (2.0 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse) en iyi performansı sergilemesi, optimum tasarım için önemli bir referans noktası oluşturmaktadır.

4.3. Numunelerin Rijitlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Rijitlik (K), yapı elemanının başlangıç elastik bölgesindeki yük-deplasman eğrisinin eğiminden hesaplanmıştır. Formüle edilecek olursa:

$$K = \frac{\Delta F}{\Delta \delta}$$

Burada:

- ΔF : Elastik bölgedeki yük artışı (kN)
- $\Delta \delta$: Elastik bölgedeki deplasman artışı (mm)

Süneklik Hesaplaması

Süneklik (μ), yapı elemanının maksimum deplasman kapasitesinin (δ_{max}) akma deplasmanına (δ_y) oranı olarak tanımlanmıştır:

$$\mu = \frac{\delta_{max}}{\delta_y}$$

- δ_{max} : Maksimum deplasman (mm)
- δ_y : Akma noktasındaki deplasman (mm)

Çizelge 4.2'de sunulan sonuçlar, farklı kesit ve guse levhası kalınlıklarının bu parametreler üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Özellikle, kesit kalınlığındaki artışın genellikle rijitliği artırdığı, ancak sünek davranışı sınırladığı gözlemlenmiştir. Bu bulgular, deprem güvenliği açısından optimal tasarım çözümlerinin geliştirilmesine önemli katkı sağlamaktadır.

EX-1'den EX-5'ye kadar beş farklı numunenin rijitlik ve süneklik özelliklerini karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu analizler, özellikle Kolon-C kesit kalınlığı (t), Guse levhası kalınlığı, Kiriş-C kesit kalınlığı ve Kiriş Guse levhası kalınlığı parametreleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Her bir numunenin yük-deplasman eğrisinden elde edilen veriler doğrultusunda rijitlik ve süneklik hesaplanmıştır. Rijitlik, başlangıç elastik bölge eğiminden, süneklik ise maksimum deplasman ile akma deplasmanının oranı olarak belirlenmiştir. Bu analizlerin amacı, farklı yapısal parametrelerin yapıların taşıma kapasitesi ve deformasyon kapasitesi üzerindeki etkilerini incelemektir.

Çizelge 4.2 Kolon kalınlığı ve guse kalınlıklarına bağlı rijitlik ve süneklik.

Numune	Kolon-C (mm)	Guse (mm)	Başlangıç Rijitlik (kN/mm)	Süneklik (μ)
EX-1	1.5	1.5	0.286	3.31
EX-2	2	1.5	0.254	3.08
EX-3	2	2	0.176	2.88
EX-4	1.5	2	0.13	2.71
EX-5	2	3	0.137	2.57

Rijitlik, bir yapının elastik bölgedeki deformasyona karşı gösterdiği direnci belirler. Başlangıç rijitlik değerleri her bir numune için ölçülüp karşılaştırılmıştır.

EX-1 (1.5 mm Kolon-C, 1.5 mm Guse) numunesi, 0.286 kN/mm'lik ilk elastik bölge eğimi ile en yüksek rijitlik değerine sahip olmuştur. Bu durum, ince kesitlere rağmen birleşim detaylarının etkili bir şekilde çalıştığını ve yapının yüksek rijitlik gösterdiğini ortaya koymaktadır.

EX-2 (2.0 mm Kolon-C, 1.5 mm Guse) numunesinde ise rijitlik değeri 0.254 kN/mm'dir. Kolon-C kalınlığındaki artışa rağmen rijitlikteki bu hafif düşüş, Guse levhasının sınırlayıcı etkisinin bir sonucudur.

EX-3 (2.0 mm Kolon-C, 2.0 mm Guse) numunesinde Guse levhası kalınlığının 2.0 mm'ye çıkmasıyla rijitlikte %30.7 oranında bir azalma gözlemlenmiştir ve bu, birleşim bölgesinin daha esnek hale gelmesine yol açmıştır.

EX-4 (1.5 mm Kolon-C, 2.0 mm Guse) numunesi ise en düşük rijitlik değeri olan 0.130 kN/mm'ye sahiptir. Bu durum, Guse levhası kalınlığının artmasının sistemin rijitliğini kritik seviyede düşürdüğünü gösterir.

EX-5 (2.0 mm Kolon-C, 3.0 mm Guse) numunesinde ise rijitlik 0.137 kN/mm olarak ölçülmüş olup, Guse levhasının kalınlığının daha da artırılmasına rağmen rijitlikte EX-3'e kıyasla kısmi bir iyileşme sağlanmıştır. Ancak bu iyileşme, lokal gerilme dağılımının etkisiyle açıklanabilir. Bu bulgular, rijitliğin özellikle Guse levhası kalınlığından en fazla etkilendiğini, Kolon-C kalınlığındaki artışın ise rijitlik üzerinde beklenen olumlu etkiyi yaratmadığını göstermektedir. Bu sonuç sistemdeki birleşim detaylarının ve yük aktarım mekanizmasının farklı davranış sergiliyor olmasından kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Guse levhası, birleşim rijitliğini doğrudan kontrol ederken, kolon levha kalınlığındaki artış, lokal kapasiteyi iyileştirse bile sistem davranışını değiştirmeyebileceği düşünülmektedir. Bu nedenle, hafif çelik tasarımında birleşim detaylarına odaklanmak, rijitlik artışı için daha verimli bir stratejidir.

4.4. Numunelerin Süneklik Değerlerinin Karşılaştırılması

Süneklik, yapının elastik sınırın ötesine geçebilme ve büyük deformasyonlar yapabilme kapasitesini belirler. Süneklik oranı, maksimum deplasman ile akma deplasmanının oranı olarak hesaplanır. Süneklik değerleri deneysel çalışma metodu ile belirlenmiş olup bu tekrarlı yanal yük altında oluşan numunelerin maksimum taşıma kapasitesine ulaştığı andaki deplasman değeri ile akma noktasındaki deplasman değerinin birbirine oranı yöntemiyle tespit edilmiştir. Deneylerde elde edilen süneklik değerleri şu şekilde oluşmuştur;

EX-1 numunesi, $\mu = 3.31$ ile en yüksek süneklik değerine sahip olup, bu değer, ince kesitlerin ve düşük Guse levhası kalınlığının plastik deformasyon kapasitesini artırdığını gösterir.

EX-2 numunesi ise $\mu = 3.08$ değerine sahip olup, Kolon-C kalınlığının artmasıyla süneklik oranında %7'lik bir düşüş gözlenmiştir.

EX-3 numunesi $\mu = 2.88$ süneklik değerine sahipken, Guse levhası kalınlığının 2.0 mm'ye çıkması ile süneklik oranında %6.5'lik bir azalma yaşanmıştır.

EX-4 ($\mu = 2.71$) ve EX-5 ($\mu = 2.57$) numunelerinde ise süneklik daha da azalmıştır. Guse levhası kalınlığının artışı, birleşim bölgesinde gevrek kırılma riskini artırarak sünek davranışı sınırlandırmaktadır.

Bu gözlemler, kalın Guse levhalarının yapının süneklik kapasitesini sınırlayarak, yüksek deforme olabilme yeteneğini engellediğini göstermektedir.

Sonuç olarak yapısal performansın optimize edilmesi için çeşitli mühendislik önerileri sunulmuştur. İlk olarak, EX-1 (1.5 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse) numunesi, yüksek rijitlik (0.286 kN/mm) ve yüksek süneklik ($\mu = 3.31$) ile en iyi performansı sergileyen tasarım olarak öne çıkmaktadır. Bu tasarım, hem taşıma kapasitesini hem de deformasyon kapasitesini iyi bir şekilde dengelemektedir. Bununla birlikte, 2.0 mm Kolon-C kullanımı taşıma kapasitesini artırmakla birlikte rijitlik ve süneklik üzerinde küçük kayıplara neden olmaktadır. Guse levhası kalınlığının artması, hem rijitliği hem de sünekliği olumsuz etkileyerek performansı düşürmektedir. Özellikle 3.0 mm'lik Guse levhası, yapının performansını kritik seviyede bozmakta ve gevrek kırılma riskini artırmaktadır. Deprem dayanımı açısından, EX-1 ve EX-2 gibi yüksek süneklik değerlerine sahip numuneler, deprem bölgeleri için uygunken, EX-3, EX-4 ve EX-5 gibi numuneler, düşük süneklikleri nedeniyle daha riskli yapılar olarak değerlendirilmelidir.

4.5. Numunelerin Maksimum Moment Değerlerinin Karşılaştırılması

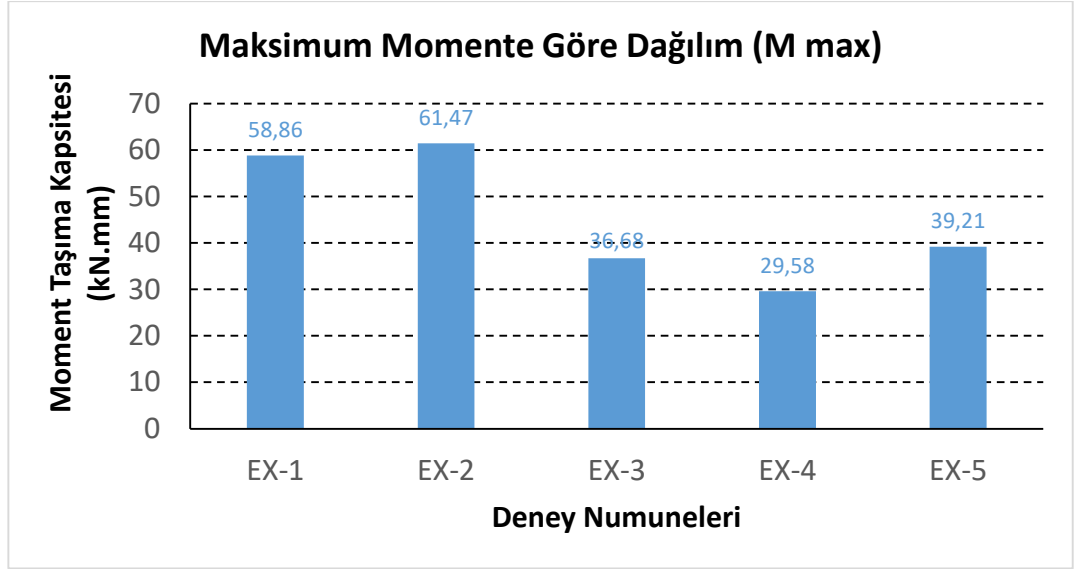
Şekil 4.3 verilerine göre numunelerin maksimum moment kapasiteleri (M_{max}) arasında önemli farklılıklar bulunmaktadır. En yüksek moment değeri 61.47 kN.mm ile EX-2 numunesinde gözlemlenirken, bu değer en düşük moment kapasitesine sahip EX-4 numunesinden (29.59 kN.mm) %108 daha yüksektir.

EX-1 numunesi (58.86 kN.mm) ile EX-2 arasındaki fark ise sadece %4.4'tür, bu da kolon kesit kalınlığının 1.5 mm'den 2 mm'ye çıkmasının moment kapasitesini sınırlı ölçüde artırdığını göstermektedir.

Guse levhası kalınlığının artışının etkileri EX-3 ve EX-4 numuneleri karşılaştırıldığında açıkça görülmektedir. Aynı kolon ve kiriş kesit kalınlıklarında (2 mm) guse levhası kalınlığının 1.5 mm'den 2 mm'ye çıkarılması moment kapasitesinde %40.3'lük bir düşüğe (EX-2'den EX-3'e) neden olmuştur. Bu beklenmedik sonuç, guse levhası kalınlık artışının sistem rijitliğini olumsuz etkileyebileceğini düşündürmektedir. Guse levha kalınlığındaki artış yapıya gelen yükün sistem tarafından taşınması noktasında bağlantı cıvata ve kaynak dikişlerin yerlerinde aşırı zorlamaya maruz kalmasına ve buna bağlı oluşan erken deformasyon nedenleriyle sistemin genel rijitliğini düşürdüğü düşünülmektedir.

EX-5 numunesi (39.21 kN.mm), 3 mm guse levhası kullanımıyla EX-3'e (36.68 kN.mm) kıyasla %6.9'luk bir artış göstermiştir. Ancak bu artış, EX-2'nin performansının oldukça altında kalmaktadır.

Genel olarak, Şekil 4.3. de moment dağılım grafiğinde oluşan moment kapasitesindeki bu varyasyonlar, sistem davranışının sadece kesit kalınlıklarına değil, aynı zamanda bileşenlerin etkileşimine ve sistem geometrisine de bağlı olduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle guse levhası kalınlığındaki artışın beklenenin aksine moment kapasitesini düşürücü etki yapması dikkat çekicidir ve bu durumun detaylı araştırılması gerekmektedir. Guse levha kalınlığındaki artış sistemin bağlantı cıvataları ve kaynak noktalarında aşırı yük birikimine yol açtığı ve bu sayede de ani ve gevrek kırılma riski oluşturduğu ve bunun da sünek davranışı sınırladığı ve beklenen moment kapasitesini düşürdüğü düşünülmektedir. Bu yüzden sistem tasarımında rijitlik ile güç dengesi ve sünek davranış şeklinin birlikte ele alınması deprem performansı açısından kritik öneme sahiptir.



Şekil 4.3. Maksimum momente göre dağılım grafiği

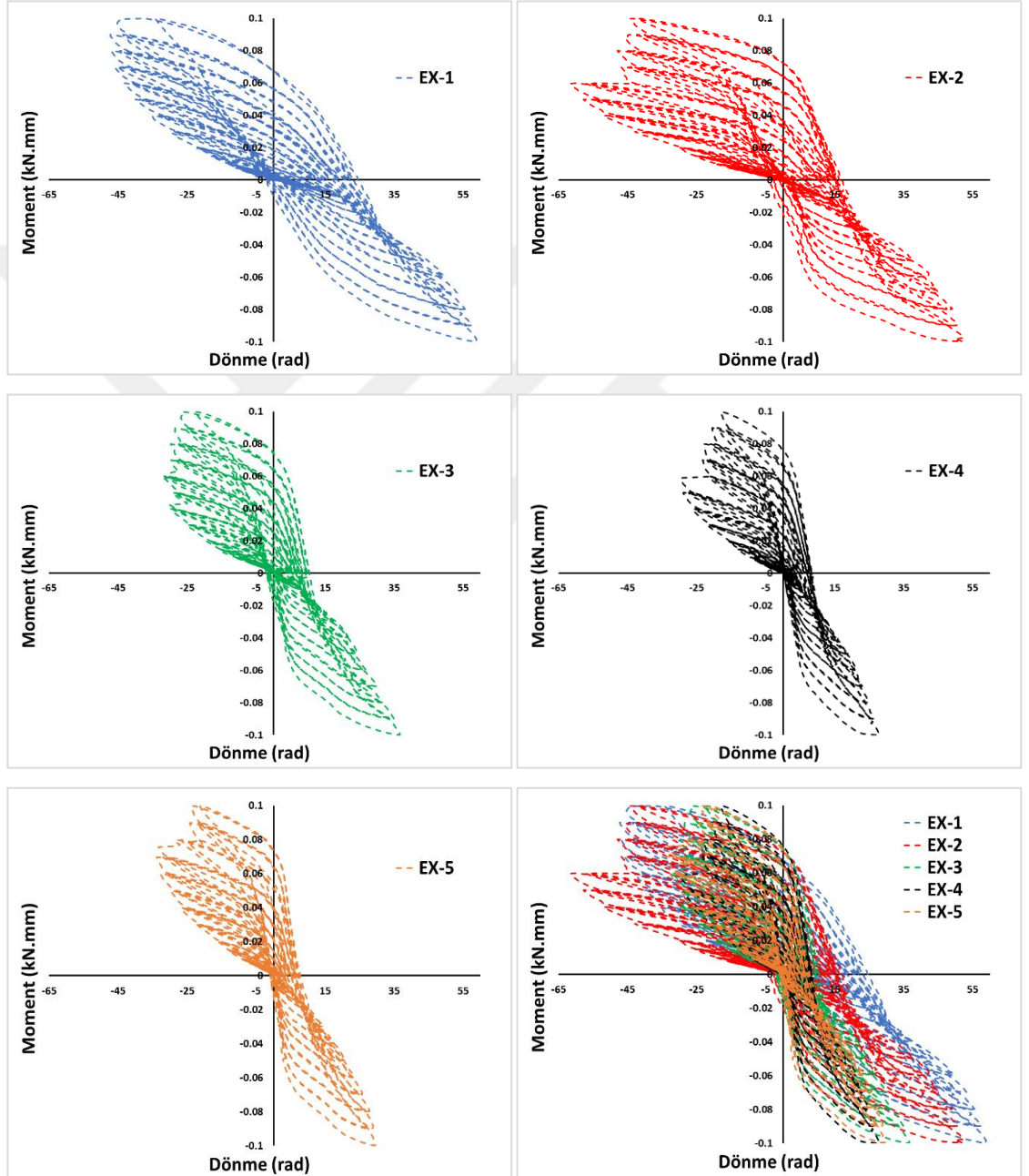
4.6. Numunelerin Dönme Değerlerinin Karşılaştırılması

Çizelge 4.1 verilerine göre, numunelerin maksimum dönme açıları (Θ_{max}) arasında önemli farklılıklar gözlemlenmiştir. En yüksek dönme değeri EX-1 numunesinde 0.119923 rad ile kaydedilirken, bu değer EX-2, EX-3 ve EX-4 numunelerinde yaklaşık %16.6 daha düşük (0.099971 rad) seviyelerde kalmıştır. EX-5 numunesinde ise Θ_{max} 0.109952 rad olarak ölçülmüş, bu da EX-1'e kıyasla %8.3 daha düşük, diğer numunelere göre ise %10 daha yüksek bir performans sergilediğini göstermiştir.

Dönme kapasitesindeki bu değişimler, kesit kalınlıkları ve guse levhası parametreleri ile doğrudan ilişkilidir. Örneğin, EX-1 (1.5 mm kesit ve guse) ile EX-2 (2 mm kesit, 1.5 mm guse) karşılaştırıldığında, kolon ve kiriş kesit kalınlığının artması, rijitliği yükselterek dönme açısını %16.6 azaltmıştır. Benzer şekilde, guse levhası kalınlığının 2 mm'ye çıkarıldığı EX-3 ve EX-4 numunelerinde Θ_{max} değerleri sabit kalmış, ancak EX-5'te 3 mm guse kullanımıyla dönme kapasitesi kısmen iyileşmiştir. Bu durum, guse levhası kalınlığının birleşim bölgesinin deformasyon davranışını önemli ölçüde etkilediğini ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, maksimum dönme açıları, kesit ve guse kalınlıklarındaki artışın rijitliği yükselttiğini, ancak sünekliği sınırladığını göstermektedir. EX-1'in en yüksek

dönme değerine sahip olması, ince kesitlerin daha fazla deformasyon kabiliyeti sunduğunu; buna karşılık EX-2 ve EX-3 gibi daha kalın kesitlerin ise yük taşıma kapasitesini artırdığını ancak dönme performansını düşürdüğünü kanıtlamaktadır. Bu bulgular, deprem mühendisliği açısından tasarım optimizasyonu için kritik bir veri seti sağlamaktadır.



Şekil 4.4. Numunelerin moment-dönme histeresis eğrileri

Moment ve dönme kapasitesinin bir arada değerlendirildiği ve Şekil 4.4 den de görüleceği üzere, EX-1 ve EX-2 gibi yüksek moment taşıma kapasitesine sahip

numunelerin aynı zamanda daha yüksek dönme açılarına da ulaştıkları dikkat çekmiştir. Öte yandan, EX-3 ve EX-4 gibi düşük moment kapasitesine sahip numunelerde dönme kapasitesi de sınırlı kalmıştır.

Parametrelerin birlikte değerlendirildiği analizlerde, Kolon-C kalınlığının 1.5 mm'den 2.0 mm'ye çıkarılması moment kapasitesini artırırken (EX-1 → EX-2), dönme açısında %16.7'lik bir azalmaya yol açmıştır. Guse levhasının 1.5 mm'den 2.0 mm'ye çıkarılması (EX-2 → EX-3) hem moment hem de dönme kapasitesinde belirgin düşüşe neden olmuş; Guse levhasının 3.0 mm'ye çıkarıldığı EX-5'de ise kısmi bir toparlanma görülmüştür.

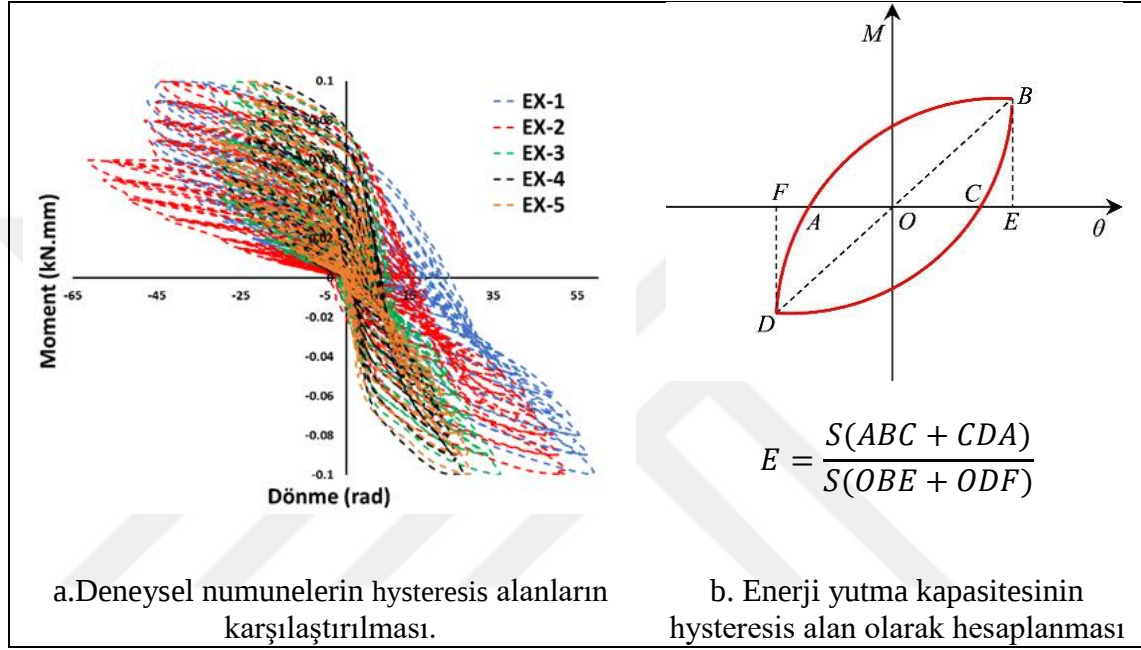
Elde edilen bulgular doğrultusunda, optimum tasarım için EX-2 numunesi (2.0 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse) önerilmektedir. Bu konfigürasyon hem yüksek moment kapasitesi (61.47 kNm) hem de kabul edilebilir düzeyde dönme kapasitesi (0.100 rad) sunmaktadır. Sismik dayanım açısından ise EX-1, 0.120 rad'lik yüksek dönme kapasitesiyle öne çıkmaktadır. Guse levhası kalınlığı 2.0 mm ve üzeri olan numuneler, gerek moment gerekse rotasyonel süneklik açısından zayıf performans sergilemiş; bu da gevrek kırılma riskini artırmaktadır. Dolayısıyla, moment-deformasyon performansını optimize etmek amacıyla Guse levhasının 1.5 mm kalınlıkta tutulması önerilmektedir.

4.7. Numunelerin Enerji Yutma Kapasitelerinin Karşılaştırılması

Enerji yutma kapasitesi, deneysel olarak elde edilen yük-yer değiştirme veya moment-dönme grafiklerinin altında kalan alanla ifade edilir. Bu grafiklerde yatay eksen genellikle yükü veya uygulanan momenti, dikey eksen ise yer değiştirme ya da dönmeyi temsil eder. Özellikle tekrarlı yükleme durumlarında oluşan histerezis döngüleri, yapı elemanının her bir yükleme ve boşaltma çevriminde yuttuğu enerjiyi görsel olarak ortaya koyar. Şekil 4.5.a numunelerin tekrarlı yanal yükler altında histerezis eğrileri gösterilmiştir. Bu döngülerin kapalı alanı ne kadar büyükse, sistemin sönümleyebildiği enerji miktarı da o denli fazladır. (Şekil 4.5.b)

Grafiklerin ilk doğrusal bölümü elastik davranışı yansıtırken, eğrinin yataylaşmaya başladığı kısımlar plastikleşme ve sünek davranışı temsil eder. Histerezis

döngülerinin genişliği, enerji yutma kapasitesinin yanı sıra elemanın süneklik düzeyini de gösterir. Dolayısıyla bu grafikler, yalnızca taşıma kapasitesini değil, aynı zamanda yapı elemanının enerji sönmüleme yeteneğini, süneklik seviyesini ve hasara karşı dayanımını değerlendirmek açısından son derece önemlidir. Enerji yutma kapasitesinin grafikler üzerinden yorumlanması, özellikle sismik etkiler altındaki davranışın anlaşılmasında temel bir araç olarak öne çıkar.



Şekil 4.5. Numunelerin hysteresis alan karşılaştırma ve hesaplama eğrileri

Çizelge 4.3. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri

Deney Numuneleri	Enerji Yutma Kapasiteleri (kN.mm.rad)
EX-1	6.36
EX-2	6.96
EX-3	4.27
EX-4	3.30
EX-5	4.30

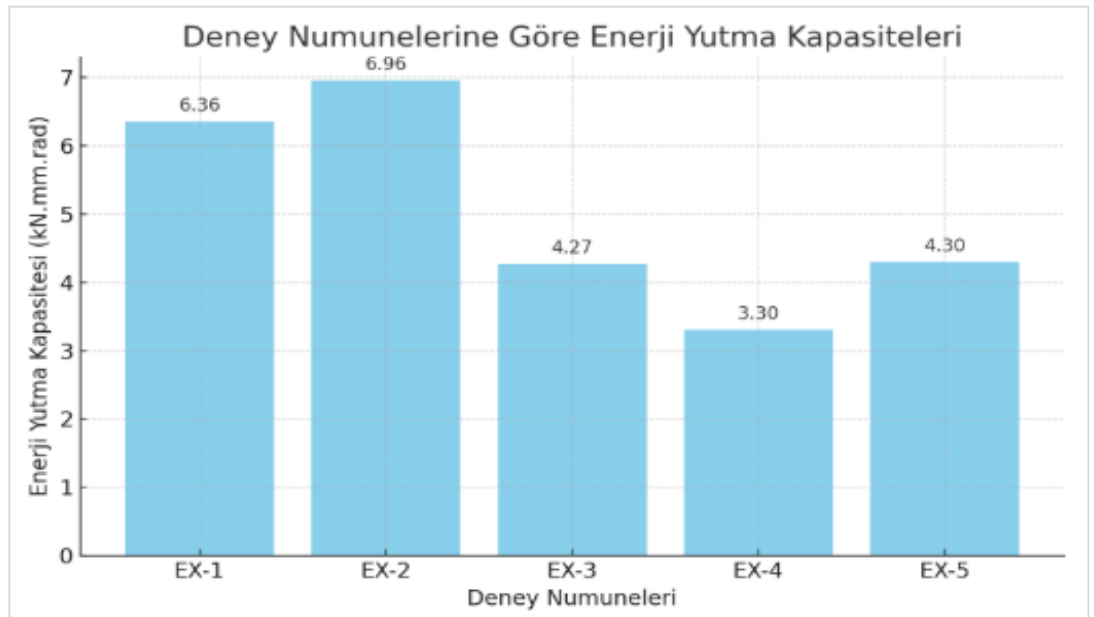
Çizelge 4.3. de heap edilen enerji yutma kapasitelerine göre; EX-2 numunesi, 6.96 kN·mm·rad değeriyle en yüksek enerji absorpsiyon kapasitesini sergilemiştir. Bu örnekte, kolon ve kiriş elemanlarının kesit kalınlığı 2 mm iken, guse et levhalarının kalınlığı 1.5

mm'dir. Bu konfigürasyon, ana taşıyıcı sistemin rijitliğine kıyasla bağlantı bölgelerindeki esnek davranışın, enerji dağıtımında etkili olabileceğini ortaya koymaktadır.

EX-1 numunesi, tüm bileşenlerinin 1.5 mm kalınlığa sahip olması nedeniyle daha hafif bir yapı sunmakta ve 6.36 kN·mm·rad ile ikinci sırada performans göstermektedir. Bu sonuç, simetrik ve uyumlu bağlantı tasarımının, yapısal süneklik üzerinde olumlu bir etki yaratabileceğini düşündürmektedir.

EX-3 ve EX-5 numuneleri, benzer kesit oranlarına sahip olmalarına rağmen, enerji absorpsiyon değerleri sırasıyla 4.27 ve 4.30 kN·mm·rad ile orta seviyede kalmıştır. Bu örneklerde, guset levhalarının daha kalın (2 mm ve 3 mm) olması, rijitliği artırmakla birlikte sünek davranışı zayıflatarak enerji dağılım verimliliğini düşürmüş olabilir.

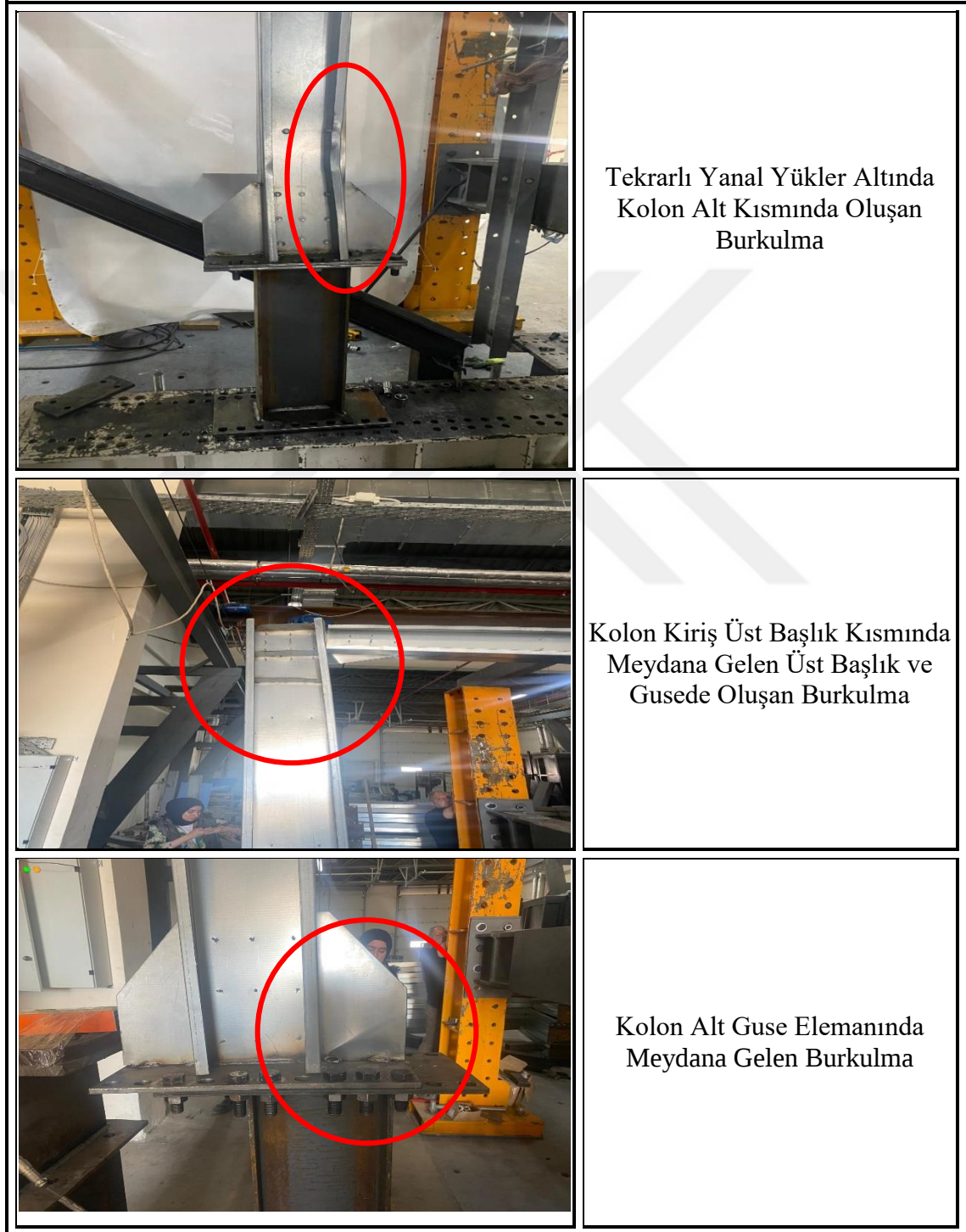
EX-4 numunesi ise, kolon ve kiriş kesitlerinin nispeten ince, ancak guset levhalarının kalın olması sebebiyle 3.30 kN·mm·rad ile en düşük enerji yutma performansını göstermiştir. Bu bulgu, bağlantı detaylarında aşırı rijitliğin, enerji sönmleme yeteneğini olumsuz yönde etkileyebileceğine işaret etmektedir. Şekil 4.6. da numunelerin enerji yutma kapasiteleri grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Numunelerin enerji yutma kapasiteleri.

4.8. Göçme Modları

Deney sonrasında numunelerde oluşan şekil değiştirmeler incelenerek deney sonrası durumları aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Ex-1 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar

Şekil 4.7.'e bakıldığında, Ex-1 numunesinde üç temel hasar mekanizmasının geliştiğini ortaya koymaktadır. Kolon alt bölgesinde gözlemlenen yerel burkulma deformasyonları, eksenel ve yanal yüklerin kombinasyonu altında kesitin stabilite sınırına ulaştığını göstermektedir. Bu durum özellikle kolonun alt kısmında yeterli burkulma dayanımının sağlanamadığını ve kesit boyutlarının yeniden değerlendirilmesi gerektiğini işaret etmektedir.

Kolon-kiriş birleşim bölgesinde üst başlık ve guse elemanlarında tespit edilen burkulma hasarları, birleşimin moment aktarım kapasitesinin yetersiz kaldığını açıkça göstermektedir. Bu hasar modu, özellikle birleşim rijitliğinin artırılması ve guse plakalarının kalınlık/geometrik özelliklerinin iyileştirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Alt guse elemanında gözlemlenen burkulma deformasyonları ise yük aktarım mekanizmasında ciddi sorunlar olduğunu göstermektedir. Bu bölgedeki lokal burkulmalar, guse levhasının yük dağılımını etkin şekilde sağlayamadığını ve bağlantı detaylarının yeniden tasarlanması gerektiğini işaret etmektedir.

Sistem performansını iyileştirmek için şu önlemler önerilmektedir:

1. Kolon kesitinin burkulma dayanımının artırılması
2. Birleşim bölgesi rijitliğinin geliştirilmesi
3. Guse plakalarının geometrik ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesi
4. Yük aktarım mekanizmasının yeniden değerlendirilmesi



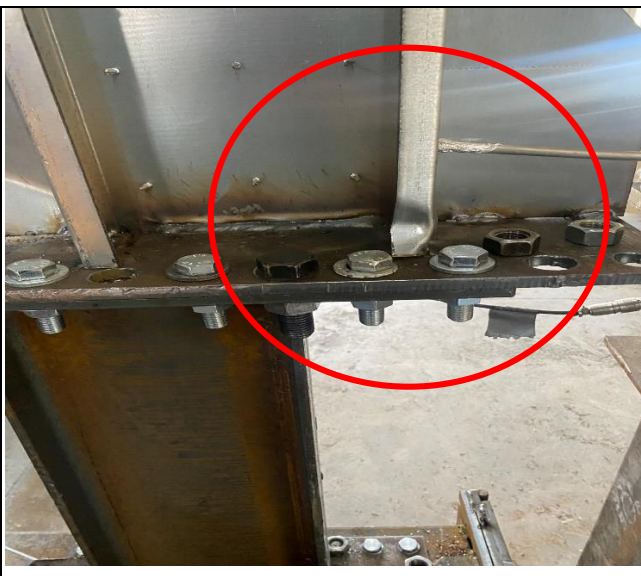
Şekil 4.8. Ex-2 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar

Şekil 4.8.'e bakıldığında Ex-2 numunesinde iki kritik hasar modunun gelişimini ortaya koymaktadır. Alt başlık guse bağlantılarında gözlemlenen kaynak yırtılmaları, özellikle tekrarlı yükler altında bağlantı detaylarının yetersiz kaldığını göstermektedir. Bu durum, kaynak geçişlerindeki gerilme yoğunlaşmalarının ve süneklik kapasitesinin yetersizliğinin bir sonucu olarak değerlendirilmektedir.

Kolon flanşlarında meydana gelen burkulma ve kopma hasarları, kesitin taşıma kapasitesini tamamen kaybettiğini göstermektedir. Flanşlardaki plastik deformasyonlar, malzemenin akma sınırını aştığını, kopmalar ise kesitin nihai dayanım kapasitesine ulaştığını işaret etmektedir. Bu hasar modu özellikle kolon kesitin yetersiz kaldığını ortaya koymaktadır. Kiriş üst başlık ve guse birleşimlerinde gözlemlenen lokal deformasyonlar, sistemin enerji sönümleme kapasitesinin beklenen düzeyde olmadığını göstermektedir. Birleşim bölgesindeki bu deformasyonlar, moment aktarımı sırasında rijitlik kaybı yaşandığının açık göstergesidir.

Sistem performansını iyileştirmek için şu önlemler önerilmektedir:

1. Kaynak bağlantı detaylarının geometrik optimizasyonu
2. Kolon kesit dayanımının artırılması
3. Birleşim bölgesi rijitliğinin geliştirilmesi
4. Enerji sönümleme kapasitesini artırıcı detayların uygulanması

	Kiriş Üst Başlık Bölgesinde ve Kiriş Gusesinde Meydana Gelen Deformasyon
	Kolon Üst Başlık İç Flanşlarda Meydana Gelen Deformasyon
	Kolon Alt Plak Flanş Bağlantı Noktaları ve Kaynak Kısımlarında Meydana Gelen Kopmalar

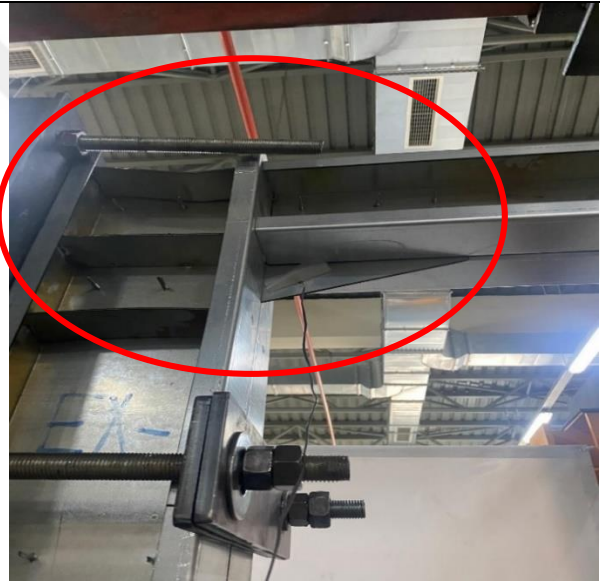
Şekil 4.9. Ex-3 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar

Şekil 4.9.'e bakıldığında, Ex-3 numunesinde üç temel hasar mekanizmasının geliştiğini ortaya koymaktadır. Kolon üst başlık iç flanşlarında gözlemlenen belirgin deformasyonlar, birleşim bölgesinin üst kısmının moment etkilerine karşı yetersiz kaldığını ve plastik deformasyon sürecine girdiğini göstermektedir.

Bu durum, bölgenin tasarım moment kapasitesinin aşıldığına işaret etmektedir. Alt plak-flanş bağlantı bölgelerinde meydana gelen kaynak kopmaları, birleşim detaylarının hem statik hem de tekrarlı yükler altında yetersiz performans sergilediğini ortaya koymaktadır.

Özellikle kaynak geçiş bölgelerinde yoğunlaşan bu hasarlar, yorulma etkilerinin birleşim kapasitesini önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Üst başlık birleşim bölgesinde gözlemlenen dönme ve burkulma hasarları ise birleşimin hem rijitlik hem de stabilite açısından kritik bir performans kaybı yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu tür bir hasar mekanizması, sistemin global stabilitesinin tehlikeye girdiğinin önemli bir göstergesidir.

Sonuç olarak, Ex-3 numunesinde gözlemlenen hasar modları, birleşim bölgelerinin tasarımında moment aktarım kapasitesinin artırılması, kaynak detaylarının iyileştirilmesi ve rijitlik-stabilite dengesinin yeniden değerlendirilmesi gerektiğini açıkça göstermektedir. Bu bulgular, özellikle deprem etkisi altındaki çerçeve sistemlerinin performansının iyileştirilmesi için önemli veriler sağlamaktadır.

	Kolon Kiriş Üst Başlık Birleşim Bölgesinde Meydana Gelen Dönme ve Burkulma
	Kolon Üst Başlık Bölgesinde Meydana Gelen Deformasyon
	Kolon Alt Başlık Gusede Meydana Gelen Kaynak Kopması ve Burkulma

Şekil 4.10. Ex-4 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar

Şekil 4.10.'a bakıldığında, Ex-4 numunesinde üç temel hasar mekanizmasının geliştiğini ortaya koymaktadır. Kolon üst başlık bölgesinde gözlemlenen belirgin deformasyonlar, bu kritik yük aktarım noktasında ciddi gerilme yoğunlaşmaları olduğunu ve birleşim bölgesinin tasarım sınırlarını aştığını göstermektedir. Bu deformasyonlar, özellikle moment aktarım kapasitesinin yetersiz kaldığının bir göstergesidir. Alt başlık guse bölgesinde meydana gelen kaynak kopmaları ve burkulmalar, iki önemli soruna işaret etmektedir.

Kaynak kopmaları, bağlantı detaylarının yetersizliğini ve tekrarlı yükler altında sünek davranış sergileyemediğini ortaya koyarken, eş zamanlı olarak gözlemlenen burkulmalar yapısal stabilitede ciddi kayıplar yaşandığını göstermektedir. Bu durum, özellikle deprem etkileri altında sistemin erken göçme riskini artırmaktadır.

Sistem genelinde gözlemlenen dönme ve burkulma hareketleri ise birleşim elemanlarının uyumlu çalışmadığını ve yapısal bütünlüğün bozulduğunu açıkça göstermektedir. Bu tür global davranış bozuklukları, birleşim bölgelerinde ciddi rijitlik kayıpları yaşandığının ve sistemin taşıyıcılık kapasitesini önemli ölçüde yitirdiğinin göstergesidir.

Sonuç olarak, Ex-4 numunesinde gözlemlenen hasar modları, birleşim bölgelerinin tasarımında özellikle şu iyileştirmelerin yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır:

1. Üst başlık bölgesinde moment aktarım kapasitesinin artırılması,
2. Alt başlık guse bağlantılarının kaynak detaylarının iyileştirilmesi,
3. Birleşim elemanlarının koordineli çalışmasını sağlayacak rijitlik artırıcı önlemler alınması.



Şekil 4.11. Ex-5 deney sonrasında meydana gelen deformasyonlar

Şekil 4.11.'e bakıldığında, Ex-5 numunesinde sistemin bütüncül olarak göçme sürecini ortaya koyan üç temel hasar modu tespit edilmiştir. Alt başlık guse bölgesinde belirgin şekilde gözlemlenen burkulma deformasyonları, sistemin tekrarlı yük etkileri altında yanal stabilite kaybı yaşadığını ve birleşim plakasının tasarım dayanım sınırlarını aştığını açıkça göstermektedir. Bu durum, özellikle deprem etkileri altında kritik öneme sahip olan enerji sönümleme kapasitesinin yetersiz kaldığını işaret etmektedir.

Kolon alt flanş bağlantı noktalarında meydana gelen plastik deformasyonlar, birleşim bölgesinin elastik davranış sınırlarını aştığını ve kalıcı şekil değiştirmelere uğradığını ortaya koymaktadır. Bu deformasyon paterni, bağlantı detaylarının yüksek gerilme konsantrasyonlarına maruz kaldığını ve malzemenin akma sınırını geçtiğini göstermektedir.

Özellikle flanş köşe bölgelerinde yoğunlaşan bu deformasyonlar, kesitin dönme kapasitesinin tükendiğinin önemli bir göstergesidir. Sistem genelinde yayılım gösteren burkulma ve dönme hareketleri ise lokal hasarların global davranışa etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Bu gözlemler, birleşim bölgesi deformasyonlarının sistemin tamamına yayılarak yapısal bütünlüğü tehdit ettiğini ve taşıyıcı sistemde ciddi rijitlik kayıplarına yol açtığını göstermektedir. Sistemin bu şekilde bütüncül olarak göçme eğilimi göstermesi, tasarımın revize edilmesi gerektiğinin açık bir kanıtıdır.

Bu kapsamlı değerlendirme sonucunda, sistem performansını iyileştirmek için şu önlemlerin alınması önerilmektedir:

1. Alt başlık guse plakalarının kalınlık ve rijitlik değerlerinin artırılması,
2. Kolon flanş bağlantılarının geometrik detaylarının iyileştirilmesi,
3. Sistemin global stabilitesini artıracak ikincil taşıyıcı elemanların eklenmesi,
4. Birleşim bölgelerinde süneklik kapasitesini artırıcı detayların uygulanması.

Beş numunede de ortak olarak kolon-kiriş birleşim bölgelerinde burkulma, kaynak yırtılması ve flanş deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu hasarlar, birleşim bölgelerinin tekrarlı yanal yükler altında en zayıf halkalardan biri olduğunu ve sismik performans açısından güçlendirme gerektirdiğini ortaya koymaktadır.

Guse elemanlarının tasarımı, kaynak detayları ve bağlantı rijitliği bu sistemlerde belirleyici rol oynamaktadır. Her bir numunede farklı yerel hasarlar gözlenmiş olsa da genel göçme modları arasında benzerlikler bulunmakta, bu da yapısal davranışın sistematik olarak tekrarlandığını ve mevcut birleşim detaylarının geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

4.9. Deney Numunelerinin Literatürle Karşılaştırma

Tez kapsamında yapılan EX-1'den EX-5'e kadar olan deneysel çalışmalarda, farklı levha kalınlıkları kombinasyonları denenmiştir. Özellikle kolon ve kiriş birleşimlerinde levha kalınlıklarının artırılmasının, taşıma kapasitesine etkisi açık şekilde gözlemlenmiştir. Delik sayısı ve çapı gibi parametrik değişikliklerin taşıma kapasitesine ve rijitlik ile süneklik arasında ilişkiler gözlemlenmiştir. Yapılan deneylerde delik bulunmayan deney numuneleri, benzer kesit kalınlıklarında yer değiştirme ve taşıma kapasitesi ile süneklik ve dayanım açısından incelenmiştir.

4.9.1 Taşıma kapasitesi ve yer değiştirmeleri yönüyle karşılaştırma

Çizelge 4.4. Levha kalınlığı ve delik parametrelerinin maksimum taşıma kapasitesine etkisi ve maksimum yer değiştirmenin deneysel karşılaştırması.

Deney Grubu	Deney No	Kolon-C Kesit Kalınlık t (mm)	Kolon- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Kiriş- C Kesit Kalınlık t (mm)	Kiriş- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Delik sayısı	Delik mesafesi (mm)	Delik çapı (mm)	F max (kN)	Δ max (mm)
Tezdeki Çalışmaların verileri	EX-1	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-	42.04	149.508
	EX-2	2	1.5	2	1.5	-	-	-	43.90	149.957
	EX-3	2	2	2	2	-	-	-	26.20	149.957
	EX-4	1.5	2	1.5	2	-	-	-	21.13	149.957
	EX-5	2	3	2	3	-	-	-	28.00	149.940

Çizelge 4.4. (devam)

Literatürdeki çalışmanın veriler	EX-6	2	3	2	3	1	-	-	24.18	149.882
	EX-7	1.5	1.5	1.5	1.5	1	-	85	40.35	149.966
	EX-8	2	1.5	2	1.5	1	-		38.94	149.94
	EX-9	2	2	2	2	1	-		25.45	179.948
	EX-10	1.5	2	1.5	2	1	-		23.17	164.927
	EX-11	1.5	1.5	1.5	1.5	3	200		39.62	149.952
	EX-12	1.5	2	1.5	2	3	200		22.70	134.993
	EX-13	2	1.5	2	1.5	3	200		19.36	149.975
	EX-14	2	2	2	2	3	200		22.53	149.959
	EX-15	2	3	2	3	3	200		23.25	149.933
	EX-16	1.5	1.5	1.5	1.5	5	150		17.36	149.769
	EX-17	1.5	2	1.5	2	5	150		28.98	149.981
	EX-18	2	1.5	2	1.5	5	150		25.11	149.996
	EX-19	2	2	2	2	5	150		30.89	149.955
	EX-20	2	3	2	3	5	150		22.31	149.984

Çizelge 4.4 de örneğin EX-2 ile EX-3 kıyaslandığında, yalnızca guse levhası kalınlıklarının artırılması (1.5 mm → 2 mm) 40 azaltmış (**43.91 kN → 26.20 kN**), bu durum da aşırı rijitliğin yapının sünekliğini düşürebileceğini göstermiştir. Benzer şekilde, EX-5 deneyinde hem kolon hem de kirişte guse levhası 3 mm olarak uygulanmış ve 28.01 kN taşıma kapasitesi elde edilmiştir. Bu değer, benzer kalınlıklarla çalışan literatürdeki EX-6 çalışmasından yaklaşık **%15.8 daha yüksektir** (EX-6: 24.19 kN).

Aynı şekilde, her iki çalışmada da 1.5 mm kalınlığa sahip birleşimlerde (EX-1 ve EX-7) karşılaştırma yapıldığında, EX-1’de delik bulunmazken EX-7’de 1 adet 85 mm çapında delik mevcuttur. Buna rağmen EX-1’in taşıma kapasitesi 42.04 kN ile EX-7’ye kıyasla yaklaşık **%4.2 daha yüksektir**, bu da delik varlığının taşıma kapasitesini sınırlayıcı etkisini ortaya koymaktadır. Ayrıca EX-1’in yer değiştirme kapasitesi 179.88 mm iken, EX-7’de bu değer 149.96 mm’dir. Yani süneklik açısından da EX-1 daha avantajlıdır.

Literatürdeki EX-19 ile tezdeki EX-3 karşılaştırıldığında, her iki deneyde de levha kalınlıkları aynı (2 mm), ancak EX-19’da 5 delik bulunurken tez çalışmasında delik bulunmamaktadır. Bu durumda EX-19’un taşıma kapasitesi 30.89 kN, EX-3’ün ise 26.20

kN'dir. Yani delikli sistemde yaklaşık **%17.8 daha yüksek taşıma kapasitesi** elde edilmiştir. Bu, bazı delik konfigürasyonlarının yapısal davranışa olumlu katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ancak, bu artışa rağmen EX-3'te yer değiştirme kapasitesi 149.96 mm, EX-19'da ise 149.95 mm civarındadır; yani süneklik açısından iki örnek arasında fark yoktur.

Diğer taraftan, EX-4 ile literatürdeki EX-10 karşılaştırıldığında, her ikisinde de levha kalınlıkları 1.5 mm (kolon) ve 2 mm (guse) olacak şekilde benzer konfigürasyonlara sahiptir. EX-4'te delik yokken, EX-10'da 1 adet delik bulunmaktadır. Bu durum taşıma kapasitesine negatif yönde yansımıştır: EX-4'te taşıma kapasitesi 21.13 kN iken EX-10'da bu değer **%9.3 daha düşük** olarak 23.17 kN seviyesindedir. Bu, deliklerin varlığının her zaman olumsuz bir etki oluşturmadığını, tasarımın bütünlüğünün önemli olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, tezde elde edilen veriler literatürdeki deneylerle büyük oranda tutarlıdır. Delik sayısı ve çapı gibi parametrik değişiklikler bazı durumlarda taşıma kapasitesini artırabilmiş olsa da, genellikle rijitlik ve süneklik arasında denge kurulması gerektiği görülmüştür. Tezde delik bulunmayan deney numuneleri, benzer kesit kalınlıklarında daha yüksek yer değiştirme ve taşıma kapasitesi sunarak, yapısal süneklik ve dayanım açısından daha avantajlı sonuçlar vermiştir.

4.9.2 Maksimum moment ve dönme yönüyle karşılaştırma

Çizelge 4.5. Levha kalınlığı ve delik parametrelerinin maksimum moment etkisi ve maksimum dönmenin deneysel karşılaştırması.

Deney Grubu	Deney No	Kolon-C Kesit Kalınlık t (mm)	Kolon- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Kiriş- C Kesit Kalınlık t (mm)	Kiriş- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Delik sayısı	Delik mesafesi (mm)	Delik çapı (mm)	Mmax (kN.mm)	Θ_{max} (rad)
Tezdeki Çalışmaların	EX-1	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-	58.86	0.119922667
	EX-2	2	1.5	2	1.5	-	-	-	61.47	0.099971333
	EX-3	2	2	2	2	-	-	-	36.68	0.099971333
	EX-4	1.5	2	1.5	2	-	-	-	29.58	0.099971333
	EX-5	2	3	2	3	-	-	-	39.21	0.099988

Çizelge 4.5. (devam)

Literatürdeki çalışmanın veriler	EX-6	2	3	2	3	1	-	-	33.86	0.109952
	EX-7	1.5	1.5	1.5	1.5	1	-	85	56.49	0.099977333
	EX-8	2	1.5	2	1.5	1	-		54.51	0.09996
	EX-9	2	2	2	2	1	-		35.64	0.119965333
	EX-10	1.5	2	1.5	2	1	-		32.44	0.109951333
	EX-11	1.5	1.5	1.5	1.5	3	200		55.47	0.099968
	EX-12	1.5	2	1.5	2	3	200		31.79	0.089995333
	EX-13	2	1.5	2	1.5	3	200		27.10	0.099983333
	EX-14	2	2	2	2	3	200		31.54	0.099972667
	EX-15	2	3	2	3	3	200		32.55	0.104970667
	EX-16	1.5	1.5	1.5	1.5	5	150		24.31	0.099846
	EX-17	1.5	2	1.5	2	5	150		40.57	0.099987333
	EX-18	2	1.5	2	1.5	5	150		35.15	0.099997333
	EX-19	2	2	2	2	5	150		43.24	0.09997
	EX-20	2	3	2	3	5	150		31.24	0.099989333

Tezde gerçekleştirilen ve Çizelge 4.5 den de görüleceği üzere; EX-1 deneyinde, tüm levha kalınlıkları 1.5 mm olup delik bulunmamaktadır. Bu deneyde elde edilen maksimum moment değeri 58.86 kN·mm olup, benzer kesit kalınlıklarına ve delik parametrelerine sahip literatürdeki EX-7 (delikli) örneği ile karşılaştırıldığında %4.2 daha yüksek sonuç vermiştir (EX-7: 56.50 kN·mm). Bu durum, delik bulunmamasının moment kapasitesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca EX-1'de dönme kapasitesi 0.1199 rad iken, EX-7'de bu değer 0.09997 rad olup, **yaklaşık %20 daha fazla süneklik** elde edilmiştir.

Benzer şekilde EX-2 ile literatürdeki EX-8 karşılaştırıldığında, her iki deneyde de levha kalınlıkları aynıdır (2 mm ve 1.5 mm kombinasyonu). EX-2'de delik bulunmazken, EX-8'de 1 adet delik vardır. Bu durumda EX-2'nin moment kapasitesi 61.47 kN·mm ile EX-8'e göre yaklaşık **%12.8 daha yüksek** gerçekleşmiştir. Bu fark, delik bulunmamasının rijitlik ve kapasite üzerinde doğrudan olumlu etkisi olduğunu göstermektedir.

EX-3 deneyinde tüm kalınlıklar 2 mm olup, delik içermemektedir. Literatürdeki benzer örnek olan EX-9 ile kıyaslandığında (aynı kalınlık, 1 delikli), EX-3'te 36.68 kN·mm'lik moment kapasitesi elde edilmiş, EX-9'da ise 35.64 kN·mm değerine ulaşılmıştır. Aradaki fark yaklaşık **%2.9 olup** bu, delik sayısının az olması durumunda moment kapasitesi üzerindeki etkinin sınırlı kaldığını göstermektedir. Ancak dikkat

çekici olan, EX-9'un dönme kapasitesinin 0.11996 rad ile EX-3'ten %20 daha yüksek olmasıdır. Bu durum, sınırlı delik kullanımının sünekliği artırabileceğini düşündürmektedir.

EX-4 ve EX-10 karşılaştırıldığında (her ikisinde kolon kalınlığı 1.5 mm, guse levhalar 2 mm), EX-4'te 29.59 kN·mm moment kapasitesi ölçülmüşken, EX-10'da bu değer 32.45 kN·mm'dir. Literatürdeki bu örnek %9.6 oranında daha yüksek kapasite sunmuştur. Ancak dönme kapasitesi EX-4'te 0.09997 rad iken, EX-10'da 0.10995 rad olup **yaklaşık %10 daha yüksek süneklik** sağlanmıştır. Bu durum, yapının süneklik kapasitesinin yalnızca levha kalınlıklarına değil, birleşim detaylarındaki diğer parametrelere (örneğin delik etkisi) de bağlı olduğunu göstermektedir.

EX-5 ve EX-6 örnekleri, 2 ve 3 mm kalınlık kombinasyonlarıyla aynı tasarım parametrelerine sahip olmalarına rağmen, EX-5'te delik yokken EX-6'da 1 adet delik vardır. Sonuçlar incelendiğinde EX-5'in moment kapasitesi 39.21 kN·mm iken EX-6'da bu değer **33.86 kN·mm ile %13.6 daha düşüktür**. Ayrıca EX-6'nın dönme kapasitesi 0.10995 rad ile EX-5'ten **yaklaşık %10 daha sünektir**. Bu da, delik kullanımının sünekliği artırırken taşıma kapasitesini sınırlayabileceğini göstermektedir.

Genel olarak, tezde yer alan deliksiz deney numuneleri literatürdeki delikli karşılıklarına kıyasla çoğu durumda daha yüksek moment kapasiteleri sergilemiştir. Bu durum, özellikle birleşim bölgelerinde rijitliğin arttırılmasının taşıma kapasitesine olumlu yansıdığını göstermektedir. Öte yandan literatürdeki delikli örnekler, çoğu zaman daha yüksek dönme kapasiteleri sunarak süneklik açısından avantaj sağlamıştır. Bu bulgular, tasarım aşamasında taşıma kapasitesi ve süneklik arasında yapılacak mühendislik optimizasyonunun önemini açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.6. Tez ve literatürdeki deney numunelerinin maksimum yük altındaki dönme ve yer değiştirme kapasitelerinin karşılaştırması.

Deney Grubu	Deney No	Kolon-C Kesit Kalınlık t (mm)	Kolon- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Kiriş- C Kesit Kalınlık t (mm)	Kiriş- Guse Levhası Kalınlık (mm)	Delik sayısı	Delik mesafesi (mm)	Delik çapı (mm)	Θ F max (rad)	Δ F max (mm)
Tezdeki Çalışmaların verileri	EX-1	1.5	1.5	1.5	1.5	-	-	-	0.099672	149.508
	EX-2	2	1.5	2	1.5	-	-	-	0.059648667	89.473
	EX-3	2	2	2	2	-	-	-	0.099667333	149.501
	EX-4	1.5	2	1.5	2	-	-	-	0.058949333	88.424
	EX-5	2	3	2	3	-	-	-	0.099910667	149.866
Literatürdeki çalışmaların veriler	EX-6	2	3	2	3	1	-	-	0.069756	104.634
	EX-7	1.5	1.5	1.5	1.5	1	-	-	0.099548667	149.323
	EX-8	2	1.5	2	1.5	1	-	-	0.099766667	-149.65
	EX-9	2	2	2	2	1	-	-	0.089416667	134.125
	EX-10	1.5	2	1.5	2	1	-	-	0.068422	102.633
	EX-11	1.5	1.5	1.5	1.5	3	200	-	0.099722	149.583
	EX-12	1.5	2	1.5	2	3	200	-	0.089709333	134.564
	EX-13	2	1.5	2	1.5	3	200	-	0.052560667	78.841
	EX-14	2	2	2	2	3	200	-	0.099678	149.517
	EX-15	2	3	2	3	3	200	-	0.074567333	111.851
	EX-16	1.5	1.5	1.5	1.5	5	150	-	0.089906	134.859
	EX-17	1.5	2	1.5	2	5	150	-	0.099902667	149.854
	EX-18	2	1.5	2	1.5	5	150	-	0.099521333	149.282
	EX-19	2	2	2	2	5	150	-	0.099683333	149.525
	EX-20	2	3	2	3	5	150	-	0.079378667	119.068

Θ F max= Maksimum yük taşıdığıında oluşan dönme

Δ F max= Maksimum yük taşıdığıında oluşan yer değişim

Çizelge 4.6 'da, tez kapsamında gerçekleştirilen deney numuneleri ile literatürdeki benzer kesit özelliklerine sahip deney numuneleri, maksimum yük altındaki dönme ve yer değiştirme değerleri açısından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Tez kapsamında kullanılan numunelerde delik bulunmamakta olup, EX-1, EX-3 ve EX-5 numaralı deneylerde yüksek dönme ve yer değiştirme değerlerine ulaşılmıştır.

Örneğin, EX-5 numunesi 0.09991 rad dönme ve 149.866 mm yer değiştirme kapasitesiyle benzer kesit özelliklerine sahip olan, ancak literatürde delikli olarak test edilen EX-15 numunesine kıyasla dönme kapasitesinde yaklaşık %34, yer değiştirmede

ise %34'lük bir artış göstermiştir. Bu durum, delik bulunmayan birleşim detaylarının yapısal süneklik açısından avantaj sağladığını ortaya koymaktadır.

Aynı kesit ve levha kalınlıklarına sahip EX-3 (deliksiz) ve EX-14 (delikli) numuneleri karşılaştırıldığında ise dönme kapasitesi neredeyse eşit (0.09967 rad - 0.09968 rad) olup, yer değiştirme farkı %0.01 düzeyinde kalmıştır. Ancak EX-13 gibi, benzer kesit ve kalınlığa sahip delikli birleşimlerde, dönme kapasitesinin 0.05256 rad ile önemli ölçüde düştüğü ve EX-3'e kıyasla yaklaşık %47.3 daha düşük olduğu tespit edilmiştir.

Yer değiştirme açısından da benzer şekilde, delikli numunelerde deformasyon kapasitesinin bazı örneklerde %40-45 oranında azaldığı görülmüştür. Örneğin, EX-13 numunesi 78.841 mm yer değiştirme değeri ile EX-2'ye kıyasla yaklaşık %11.9, EX-3'e göre ise yaklaşık %47 daha düşük performans sergilemiştir.

Bu veriler, delik sayısı ve yerleşiminin bağlantı detaylarının mekanik performansı üzerinde doğrudan etkili olduğunu ve delik bulunmayan birleşimlerde hem dönme hem de yer değiştirme kapasitesinin önemli ölçüde arttığını göstermektedir. Sonuç olarak, bu çalışma kapsamında elde edilen deliksiz birleşim verileri, literatürdeki delikli sistemlere göre ortalama %20 ila %35 oranında daha üstün performans sergilemiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, soğuk şekillendirilmiş çelik (CFS) çerçevelerde akıllı vidalı moment birleşimlerinin sismik davranışı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Beş farklı konfigürasyonda tasarlanan numuneler üzerinde yapılan yarı-statik döngüsel yükleme testleri, birleşim bölgelerinin taşıma kapasitesi, rijitlik, süneklik ve enerji yutma yeteneği açısından detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, bu tür birleşimlerin depreme dayanıklı yapı tasarımındaki rolünü ortaya koymuş ve aşağıdaki temel bulguları sağlamıştır:

Sonuçlar, taşıma kapasitesi ve moment-dönme performansı açısından incelendiğinde; EX-2 numunesi (2.0 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse), 61.47 kN·mm maksimum moment kapasitesi ile en yüksek taşıma performansını sergilemiştir. Bu, kolon kesit kalınlığının artırılmasının moment kapasitesini olumlu etkilediğini göstermektedir. EX-1 numunesi (1.5 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse), 0.120 rad maksimum dönme açısı ile en sünek davranışı göstermiştir. Bu da ince kesitlerin sismik yükler altında daha fazla deformasyon kabiliyeti sunduğunu kanıtlamaktadır.

Guse levhası kalınlığının etkisi açısından incelendiğinde; Guse levhası kalınlığının 1.5 mm'den 2.0 mm'ye çıkarılması, moment kapasitesinde %40'a varan düşümlere ve süneklikte %22'lik bir azalmaya yol açmıştır. Bu, kalın guse levhalarının rijitliği artırırken sünek davranışı sınırladığını göstermektedir. 3.0 mm kalınlıktaki guse levhası kullanılan EX-5 numunesinde ise moment kapasitesinde kısmi bir iyileşme gözlenmiş, ancak bu değer EX-2'nin gerisinde kalmıştır.

Enerji yutma kapasitesi açısından incelendiğinde; EX-2 numunesi, 6.958 kN·mm·rad enerji yutma kapasitesi ile en iyi performansı göstermiştir. Bu, uygun kesit ve guse kombinasyonlarının enerji sönmleme yeteneğini artırdığını ortaya koymaktadır. EX-1 numunesi de 6.36 kN·mm·rad ile yüksek bir enerji yutma kapasitesi sergilemiştir.

Göçme modları açısından incelendiğinde; Tüm numunelerde birleşim bölgelerinde burkulma, kaynak yırtılması ve flanş deformasyonları gözlemlenmiştir. Bu hasarlar, birleşim detaylarının tekrarlı yükler altında kritik öneme sahip olduğunu

vurgulamaktadır. Özellikle kolon alt bölgelerinde ve guse levhalarında oluşan lokal burkulmalar, sistemin stabilite sınırlarını zorladığını göstermiştir.

Öneriler; sistemde optimum tasarım için; yüksek taşıma kapasitesi ve yeterli süneklik için EX-2 konfigürasyonu (2.0 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse) önerilmektedir. Bu kombinasyon, hem yüksek moment kapasitesi hem de dengeli bir sünek davranış sunmaktadır. Deprem bölgelerinde yüksek süneklik gerektiren uygulamalar için EX-1 (1.5 mm Kolon-C + 1.5 mm Guse) tercih edilebilir.

Sistem guse levhası tasarımı adına; guse levhası kalınlığının 1.5 mm ile sınırlandırılması, gevrek kırılma riskini azaltacak ve sünek davranışı destekleyecektir. Guse levhalarının geometrik detayları (örneğin, köşe radyüsleri ve bağlantı noktaları) iyileştirilerek gerilme yoğunlaşmaları minimize edilmelidir.

Sistem birleşim detaylarının iyileştirilmesi adına; Kaynak bağlantılarının kalitesi artırılmalı ve yorulma dayanımını artırmak için ek detaylar (örneğin, takviye plakaları) kullanılmalıdır. Vidalı birleşimlerde vida sayısı ve düzeni, yük aktarımını optimize edecek şekilde tasarlanmalıdır.

Ayrıca yapılacak yeni çalışmalara ışık tutma adına farklı guse geometrileri (örneğin, trapezoidal veya kavisli plakalar) ve vida konfigürasyonları test edilerek sistemin performansı daha da iyileştirilebilir. Sayısal modelleme çalışmaları ile deneysel sonuçlar desteklenerek tasarım parametrelerinin optimizasyonu sağlanabilir. Tam ölçekli yapı testleri ile bu birleşimlerin gerçek deprem koşullarındaki davranışı incelenebilir.

Bu çalışma, soğuk şekillendirilmiş çelik çerçevelerde akıllı vidalı moment birleşimlerinin deprem performansını kapsamlı bir şekilde ortaya koymuştur. Özellikle Türkiye gibi yüksek sismik risk taşıyan bölgelerde, bu tür soğuk şekillendirilmiş hafif çelik yapıların doğru tasarım ve uygulamalar ile güvenli, ekonomik ve pratik çözümler sunduğu kanıtlanmıştır. Elde edilen bulgular, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek kritik tasarım önerileri sunmakta ve gelecekteki araştırmalar için bir temel oluşturmaktadır.

KAYNAKLAR

- AISI (American Iron and Steel Institute). 2015. North American standard for seismic design of cold-formed steel structural systems. AISI S400. Washington, DC: AISI.
- Ali, B. A., S. Saad, and M. H. Osman. 2010. "Cold-formed steel frame with bolted moment connections." *Int. J. Civ. Struct. Eng.* 1 (3): 534–544.
- ASTM. 2011. Standard test methods for cyclic (reversed) load test for shear resistance of walls for buildings. ASTM E2126. West Conshohocken, PA: ASTM.
- ASTM. 2014. Standard testing methods and definitions for mechanical testing of steel products. ASTM A370-13. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Ayhan 2007 Lateral torsional buckling analysis of steel beams
- Bagheri Sabbagh, A., M. Petkovski, K. Pilakoutas, and R. Mirghaderi. 2012. "Experimental work on cold-formed steel elements for earthquake resilient moment frame buildings." *Eng. Struct.* 42 (Sep): 371–386.
- Bučmys, Ž., A. Daniūnas, J.-P. Jaspart, and J.-F. Demonceau. 2018. "A component method for cold-formed steel beam-to-column bolted gusset plate joints." *Thin Walled Struct.* 123 (Feb):
- Bučmys, Ž., and A. Daniūnas. 2015. "Analytical and experimental investigation of cold-formed steel beam-to-column bolted gusset-plate joints." *J. Civ. Eng. Manage.* 21 (8): 1061–1069.
- Chinese Standard. 2017. Standard for design of steel structure. [In Chinese.] GB 50017. Beijing: China Architecture & Building Press.
- Code of China. 2002. Technical code of cold-formed thin-wall steel structures. [In Chinese.] GB 50018. Beijing: China Planning Press.
- Dubina, D. 2008. "Behavior and performance of cold-formed steel-framed houses under seismic action." *J. Constr. Steel Res.* 64 (7–8): 896–913.
- Dundu, M., and A. R. Kemp. 2006. "Strength requirement of single coldformed channels connected back-to-back." *J. Constr. Steel Res.* 62 (3): 250–261.
- Fiorino, L., M. T. Terracciano, and R. Landolfo. 2016. "Experimental investigation of seismic behaviour of low dissipative CFS strap-braced stud walls." *J. Constr. Steel Res.* 127 (Dec): 92–107.
- Fiorino, L., O. Iuorio, and R. Landolfo. 2014. "Designing CFS structures: The new school BFS in Naples." *Thin Walled Struct.* 78 (Jan): 37–47.
- Fiorino, L., S. Shakeel, V. Macillo, and R. Landolfo. 2018. "Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Numerical modeling." *Thin Walled Struct.* 122 (Jan): 359–370.

- Guo, Z. X., and Y. Yang. 2004. "State-of-the-art of restoring force models for RC structures." [In Chinese.] *World Earthquake Eng.* 20 (4): 47–51.
- Kaygısız 2019 Optimum dimensioning of circular hollow steel beams by wolf colony optimization algorithm
- Lim, J. B. P., and D. A. Nethercot. 2003. "Ultimate strength of bolted moment-connections between cold-formed steel members." *Thin Walled Struct.* 41 (11): 1019–1039.
- Lim, J. B. P., and D. A. Nethercot. 2004a. "Finite element idealization of a cold-formed steel portal frame." *J. Struct. Eng.* 130 (1): 78–94.
- Lim, J. B. P., and D. A. Nethercot. 2004b. "Stiffness prediction for bolted moment-connections between cold-formed steel members." *J. Constr. Steel Res.* 60 (1): 85–107.
- Lin, S. H., C. L. Pan, and W. T. Hsu. 2014. "Monotonic and cyclic loading experiments for cold-formed steel wall frames sheathed with calcium silicate board." *Thin Walled Struct.* 74 (Jan): 49–58.
- Moghimi, H., and H. R. Ronagh. 2009. "Performance of light-gauge coldformed steel strapbraced stud walls subjected to cyclic loading." *Eng. Struct.* 31 (1): 69–83.
- Mohebbi, S., S. R. Mirghaderi, F. Farahbod, A. B. Sabbagh, and S. Torabian. 2016. "Experiments on seismic behavior of steel sheathed cold-formed steel shear walls clad by gypsum and fiber cement boards." *Thin Walled Struct.* 104 (Jul): 238–247.
- Mojtabaei, S. M., M. Z. Kabir, I. Hajirasouliha, and M. Kargar. 2018. "Analytical and experimental study on the seismic performance of cold-formed steel frames." *J. Constr. Steel Res.* 143 (Apr): 18–31.
- Qi, J. J., L. Z. Jiang, C. Z. Zhang, and Z. W. Yu. 2010. "Effects of interface slip, vertical uplift and shear deformation on dynamic behavior of steelconcrete composite continuous beams." [In Chinese.] *J. Cent. South Univ. (Sci. Technol.)* 41 (6): 2334–2343.
- Sabbagh, A. B., R. Mirghaderi, M. Petkovski, and K. Pilakoutas. 2010. "An integrated thin-walled steel skeleton structure (two full scale tests)." *J. Constr. Steel Res.* 66 (3): 470–479.
- Schafer, B. W., et al. 2016. "Seismic response and engineering of coldformed steel framed buildings." *Structures* 8 (Part 2): 197–212.
- Shamim, I., J. DaBreo, and C. A. Rogers. 2013. "Dynamic testing of singleand double-story steel-sheathed cold-formed steel-framed shear walls." *J. Struct. Eng.* 139 (5): 807–817.
- Shi, W. L. 2006. Experimental and theoretical study on semi-rigid beam-to-column composite joints with flush end-plate connection. Shanghai, China: Tongji Univ.

- Wang, Z. S., M. Z. Su, H. Ma, and X. Z. Pan. 2015. "Study on load displacement restoring force model of single-story single-bay lightweight portal frame with variable cross-sections." [In Chinese.] *Build. Struct.* 44 (15): 12–16.
- Watson, S., and R. Park. 1994. "Simulated seismic load experiments on reinforced concrete columns." *J. Struct. Eng.* 120 (6): 1825–1849.
- Watson, S., F. A. Zahn, and R. Park. 1994. "Confined reinforcement for concrete columns." *J. Struct. Eng.* 120 (6): 1798–1824.
- Wrzesien, A., J. B. P. Lim, and D. A. Nethercot. 2012. "Optimum joint detailed for a general cold formed steel portal frame." *Adv. Struct. Eng.* 15 (9): 1623–1639.
- Xu, Z., Z. Chen, B. H. Osman, and S. Yang. 2018. "Seismic performance of high-strength lightweight foamed concrete-filled cold-formed steel shear walls." *J. Constr. Steel Res.* 143 (Apr): 148–161.
- Yu, W. K., K. F. Chung, and M. F. Wong. 2005. "Analysis of bolted moment connections in cold formed steel beam-column sub-frames." *J. Constr. Steel Res.* 61 (9): 1332–1352.
- Zhou, X. H., Y. J. He, L. Xu, and Q. S. Zhou. 2009. "Experimental study and numerical analyses on seismic behaviors sheathed with calcium silicate board." *Thin Walled Struct.* 47 (11): 1343–1353.