

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN
DÜŞÜK TEKRARLI YORULMA DAVRANIŞINA
YÜKLEME HIZININ ETKİSİ**



DOKTORA TEZİ

Övünç TEZER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MAYIS 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN
DÜŞÜK TEKRARLI YORULMA DAVRANIŞINA
YÜKLEME HIZININ ETKİSİ**

DOKTORA TEZİ

**Övünç TEZER
(501022006)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER

MAYIS 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501022006 numaralı Doktora Öğrencisi Övünç TEZER, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “DÜŞÜK TEKRARLI YORULMA DAVRANIŞINA YÜKLEME HIZININ ETKİSİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Erdoğan UZGİDER**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof.Dr. Erdal ŞAFAK**
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Filiz PİROĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Gülay ALTAY
Boğaziçi Üniversitesi

Prof. Dr. Metin AYDOĞAN
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **31 Aralık 2012**

Savunma Tarihi : **24 Mayıs 2013**





*Bahar, ne güzel şey yaşamak seni,
Hayalim, tutkum, ışığımsın.
Işık hiç sönmesin...*



ÖNSÖZ

Dünyada yaygın kullanım alanı bulunan çelik yapıların deprem esnasında karşılaşılabilecekleri düşük tekrarlı yorulma davranışına yükleme hızının etkisini incelemek amacıyla yürütülen bu çalışma, İTÜ-TCDD ortak yönetimindeki HASLAB Laboratuvarı'nda TÜBİTAK'ın 108M585 kodlu bilimsel araştırma projesi kapsamında verdiği önemli destek sayesinde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın tüm aşamasında gösterdikleri destek, özen, ilgi ve yapıcı katkılarından dolayı başta danışmanım Prof. Dr. Erdoğan Uzgider ve bitmeyen pozitif yaklaşımından dolayı Doç. Dr. Filiz Piroğlu'na, özellikle deneysel çalışmalar sırasındaki gerek ofis ve laboratuvar, gerekse dış dünyadaki paylaşım, yardım ve katkıları için Yrd. Doç. Dr. B. Özden Çağlayan, Araş. Gör. Dr. Kadir Özakgöl ve Araş. Gör. Suat Emrah Dülger'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışma sırasında kullanılan reaksiyon çerçevesi ve deney numunelerinin projelendirilmesi, imalatı ve montajı aşamalarında ORION Ağır Çelik Yapı Mühendisliği İnş. San. ve Tic. Ltd. Şti. adına Hüdayi Kaya, ve Künye Metal Gemicilik Makine İnşaat Nakliye San. ve Tic. Ltd. Şti. personelinin her noktada büyük katkıları olmuştur. Basit bir imalat ve montaj sürecinin ötesine geçmek zorunda kaldığımız anlarda eksilmeyen sabır ve destekleri için kendilerine müteşekkirim.

Son olarak, bitmez desteğini her gün hissettiğim, eşim Bahar ve zaman zaman özellikle benden kaynaklı çok zorlandığımız bu ortak süreçte bizleri destekleyen diğer tüm aile bireylerine tüm kalbimle minnet ve şükranlarımı sunarım. İyi ki varsınız.

Aralık 2012

Övünç Tezer



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Çelik Yapıların Sünek Davranışı.....	1
1.2 Metal Yapı Elemanlarında Yorulma	3
1.2.1 Yüksek tekrarlı yorulma.....	3
1.2.2 Düşük tekrarlı yorulma	5
1.3 Amaç	6
2. MEVCUT ÇALIŞMALAR.....	9
2.1 Giriş	9
2.2 Literatür Özeti	9
3. NUMUNE BOYUTLARININ SEÇİMİ	17
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
4.1 Kapsam.....	23
4.2 Malzeme Deneyleri	23
4.2.1 Deney sonuçlarının yorumu	29
4.2.2 Nümerik ön analizler.....	30
4.3 Reaksiyon Çerçevesi	33
4.4 Büyük Ölçekli Deneyler	36
4.4.1 Test 1 (Pilot test)	37
4.4.2 Test 2 (± 60 mm, yavaş).....	39
4.4.3 Test 3 (± 60 mm, yavaş).....	41
4.4.4 Test 4 (± 90 mm, yavaş).....	43
4.4.5 Test 5 (± 60 mm, hızlı).....	45
4.4.6 Test 6 (± 90 mm, hızlı).....	47
4.4.7 Test 7 (± 90 mm, hızlı).....	49
4.4.8 Test 8 (± 90 mm, hızlı).....	50
4.4.9 Test 9 (± 60 mm, hızlı).....	52
4.4.10 Test 10 (± 60 mm, hızlı).....	54
4.4.11 Test 11 (± 90 mm, yavaş).....	56
4.4.12 Test 12 (± 90 mm, yavaş).....	57
4.4.13 Test 13 (± 90 mm, yavaş).....	59
4.4.14 Test 14 (± 90 mm, yavaş).....	60
4.4.15 Test 15 (± 60 mm, orta hızlı)	62
4.4.16 Test 16 (± 115 mm, yavaş).....	63

4.4.17 Sonuçlar.....	65
5. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ	67
5.1 Ön analizler	67
5.2 Deney simülasyonları	69
5.2.1 60Y, 60O ve 60H model kodlu deney simülasyonları	71
5.2.2 90Y ve 90H model kodlu deney simülasyonları	75
5.2.3 115Y model kodlu deney simülasyonu	77
5.3 Detaylı sonlu eleman analizleri	78
5.3.1 60Y, 60O ve 60H kodlu detaylı analizler.....	82
5.3.2 90Y kodlu detaylı analizler	83
5.3.3 115Y kodlu detaylı analizler	84
6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	85
6.1 Yavaş Yükleme Durumu	88
6.2 Hızlı Yükleme Durumu	89
6.3 Orta Hızla Yükleme Durumu	90
6.4 Deney genel sonuçları	93
KAYNAKLAR.....	95
ÖZGEÇMİŞ.....	99

KISALTMALAR

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
NTUA	: National Technical University of Athens
ELSA	: European Laboratory for Structural Assessment
CVN	: Charpy V-Notch
ASD	: Allowable Stress Design
AISC	: American Institute of Steel Construction
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
ASTM	: American Society for Testing of Materials
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
MTS	: Material Testing System
PEEQ	: Plastic Equivalent Strain Index



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1 : Çekme testi numuneleri.....	25
Çizelge 4.2 : Test sonucu elde edilen akma gerilmeleri	27
Çizelge 4.3 : Deney matrisi	65
Çizelge 5.1 : Nümerik analiz model kodları.....	70
Çizelge 6.1 : Yükleme hızlarına göre c ve C değerleri.....	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Northridge öncesi birleşim detayı ve gözlenen hasar tipleri.	2
Şekil 1.2 : Yakın ve uzak kaynaklı deprem durumları.	6
Şekil 3.1 : Referans alınan bina çerçevesi.	17
Şekil 3.2 : Northridge yer hareketi etkisiyle oluşan plastik mafsallar.	19
Şekil 3.3 : 16.kat , $t=8.20s$ kiriş ucu plastik mafsalı.	20
Şekil 3.4 : 12.kat , $t=5.58s$, kolon dibi plastik mafsalı.	20
Şekil 3.5 : 8.kat , $t=6.82s$ kiriş ucu plastik mafsalı.	20
Şekil 3.6 : 9.kat , $t=6.96s$ kiriş ucu plastik mafsalı.	21
Şekil 3.7 : 11.kat , $t=6.84s$ kiriş ucu plastik mafsalı.	21
Şekil 4.1 : ASTM'ye uygun deney numunesi.	25
Şekil 4.2 : Malzeme deneyi test sistemi.	26
Şekil 4.3 : Deney öncesi ve sonrası numuneler.	26
Şekil 4.4 : 1 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.	27
Şekil 4.5 : 5 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.	27
Şekil 4.6 : 10 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.	27
Şekil 4.7 : 50 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.	29
Şekil 4.8 : Hazırlanan sonlu eleman modelinin genel görünüşü.	30
Şekil 4.9 : Modele ait detay görünüş	30
Şekil 4.10 : Yakın kaynaklı yer hareketine ait yükleme protokolü.	31
Şekil 4.11 : Farklı hız ve önkusur durumuna göre davranışlar.	32
Şekil 4.12: A1 ve B3 nümerik modellerinin davranışları.	33
Şekil 4.13 : HASLAB Laboratuvarı genel görünüşü.	34
Şekil 4.14 : Mevcut (sarı) ve yeni (beyaz) reaksiyon çerçeveleri.	35
Şekil 4.15 : Test 1 deney numunesinin görünüşü.	36
Şekil 4.16 : Test 1 numunesi deney sonu görünüşü.	38
Şekil 4.17 : Test 1 numunesi deney sonu birleşim altbaşlık yakın görünüşü.	38
Şekil 4.18 : Birleşim detayı geometrisi.	39
Şekil 4.19 : Test 2 numunesi deney sonu görünüşü.	40
Şekil 4.20 : Test 2 numunesi deney sonu yakın görünüşü.	40
Şekil 4.21 : Test 2 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi	41
Şekil 4.22 : Test 3 numunesi deney sonu görünüşü.	41
Şekil 4.23 : Test 3 numunesi deney sonu yakın görünüşü.	42
Şekil 4.24 : Test 3 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi	42
Şekil 4.25 : Test 4 numunesi deney sonu görünüşü	43
Şekil 4.26 : Test 4 numunesi deney sonu yakın görünüşü.	44
Şekil 4.27 : Test 4 numunesi deney sonu altbaşlık civarı yakın görünüşü.	44
Şekil 4.28 : Test 4 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi	45
Şekil 4.29 : Test 5 numunesi deney sonu görünüşü	46
Şekil 4.30 : Test 5 numunesi deney sonu yakın görünüşü.	46
Şekil 4.31 : Test 5 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkii.	47
Şekil 4.32 : Tekerlekli parçalar.	47

Şekil 4.33 : Test 6 numunesi deney sonu görünüşü.....	48
Şekil 4.34 : Test sisteminin görünüşü.	48
Şekil 4.35 : Test 7 numunesi deney sonu görünüşü.....	49
Şekil 4.36 : Test 7 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	49
Şekil 4.37 : Test 7 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	50
Şekil 4.38 : Test 8 numunesi deney sonu görünüşü.....	51
Şekil 4.39 : Test 8 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	51
Şekil 4.40 : Test 8 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	52
Şekil 4.41 : Test 9 numunesi deney sonu görünüşü.....	53
Şekil 4.42 : Test 9 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	53
Şekil 4.43 : Test 9 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	54
Şekil 4.44 : Test10 numunesi deney sonu görünüşü.....	55
Şekil 4.45 : Test 10 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	55
Şekil 4.46 : Test 10 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	56
Şekil 4.47 : Test11 numunesi deney sonu görünüşü.....	56
Şekil 4.48 : Test 11 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	57
Şekil 4.49 : Test 11 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	57
Şekil 4.50 : Test12 numunesi deney sonu görünüşü.....	58
Şekil 4.51 : Test 12 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	58
Şekil 4.52 : Test 12 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	59
Şekil 4.53 : Test13 numunesi deney sonu görünüşü.....	59
Şekil 4.54 : Test13 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	60
Şekil 4.55 : Test 13 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	60
Şekil 4.56 : Test14 numunesi deney sonu görünüşü.....	61
Şekil 4.57 : Test14 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	61
Şekil 4.58 : Test 14 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	62
Şekil 4.59 : Test15 numunesi deney sonu görünüşü.....	62
Şekil 4.60 : Test15 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	63
Şekil 4.61 : Test 15 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	63
Şekil 4.62 : Test16 numunesi deney sonu görünüşü.....	64
Şekil 4.63 : Test16 numunesi deney sonu yakın görünüşü.....	64
Şekil 4.64 : Test16 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.	65
Şekil 4.65 : Test sonuçları.....	66
Şekil 5.1 : Hacimsel (solid) elemanlı model.....	67
Şekil 5.2 : Düzlem (plak) elemanlı model	68
Şekil 5.3 : Ön analiz çevrimsel eğrileri.....	69
Şekil 5.4 : Revize sonlu eleman analiz modeli	70
Şekil 5.5 : 60Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	72
Şekil 5.6 : 60Y kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.....	72
Şekil 5.7 : 60O kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	73
Şekil 5.8 : 60O kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.....	73
Şekil 5.9 : 60H kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	74
Şekil 5.10 : 60H kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.....	74
Şekil 5.11 : 90Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	75
Şekil 5.12 : 90Y kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.....	76
Şekil 5.13 : 90H kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	76
Şekil 5.14 : 90H kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.....	77
Şekil 5.15 : 115Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.....	78
Şekil 5.16 : Detaylı sonlu eleman analiz modeli	79
Şekil 5.17 : Gövde ve başlık birleşim detayları	80

Şekil 5.18 : 60Y-60O-60H modelleri için PEEQ dağılımı	82
Şekil 5.19 : 90Y modeli için PEEQ dağılımı.....	83
Şekil 5.20 : 115Y modeli için PEEQ dağılımı.....	84
Şekil 6.1 : Farklı hızlar için c katsayısının değişimi.....	91
Şekil 6.2 : Farklı hızlar için C katsayısının değişimi.....	92
Şekil 6.3 : Yavaş ve hızlı yükleme için Coffin-Manson eğrileri	93





ÇELİK KİRİŞ-KOLON BİRLEŞİMLERİNİN DÜŞÜK TEKRARLI YORULMA DAVRANIŞINA YÜKLEME HIZININ ETKİSİ

ÖZET

İnşaat mühendisliği mesleğinin bir branşı olan yapı ve deprem mühendisliği, özellikle en yıkıcı doğal afet olan deprem etkilerine maruz kalan coğrafyalarda depreme dayanıklı yapıların tasarlanması ve inşasına yoğunlaşmış durumdadır. Bir binanın depreme dayanıklı şekilde projelendirilmesi aşamasında ilgili coğrafyada ekonomik inşaat yapılmasına imkan verecek yapı malzemelerinin seçilmesi doğaldır. Ülkemizde ekonomikliği nedeniyle sıkça tercih edilen betonarme yapıların yanında, özellikle endüstriyel tesislerde yapısal çelik kullanımı yaygın olup, mimari formları gerçekleştirebilmek adına gittikçe artan şekilde, özellikle çok katlı yapılarda da çelik kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Malzeme açısından fabrika ortamında kontrollü bir malzeme kalitesi elde edilebilen yapısal çeliğin ülke refah düzeyine bağlı olarak yoğun kullanım alanı bulduğu ülkelerde, özellikle son yirmi yılda gerçekleşen büyük ve yıkıcı depremler sonucunda, bilhassa bu çelik yapıların ana taşıyıcı elemanlarını oluşturan kiriş ve kolon elemanlarının birleşim bölgelerinde çeşitli tasarım ve imalat kusurları saptanmıştır. Depremlerin ardından gerçekleştirilen hasar tespit ve değerlendirme çalışmaları sırasında, o günkü şartnamelere uygun projelendirilmiş yapılarda bile deprem performansı açısından kusurlu ve hasara açık noktalar tespit edilmiştir. Bu sorunları irdelemek ve ilgili yönetmelik ve tasarım kurallarını yenileyebilmek için yıllar süren araştırma programları yürütülmüş, elde edilen sonuçlar ışığında ülkemiz dahil tüm dünyayı etkileyen revize tasarım kuralları ortaya konmuştur.

Çelik malzemesi, hızlı yükleme sonucunda akma sınır gerilmesinde pozitif yönde değişim gösteren bir malzemedir. Bu değişim, yapının kiriş-kolon birleşimlerindeki enerji yutma kapasitesini etkilemekte, buna mukabil deprem esnasında yapının vereceği tümsel cevabı değiştirmektedir. Bahsi geçen araştırma faaliyetlerinde de vurgulandığı üzere, çelik yapıların deprem davranışını anlamının en iyi yolu tam ölçekli deneysel çalışmaların yürütülmesidir. Konu hakkında araştırmalar, elastik ötesi çevrimsel davranış sırasında enerji yutulmasını sağlayan düşük tekrarlı yorulma davranışını, gerek artan, gerekse sabit genlikli deplasman kontrollü testler yardımıyla incelemektedir.

Yapılan çalışmalar kapsamında, gerçek bir yapıdan seçilen bir kenar kiriş-kolon birleşimi geometrisiyle oluşturulmuş tam ölçekli deney numuneleri üzerinde sabit genlikli deplasman kontrollü yüklemeler yapılmış, farklı hızlarda gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda düşük tekrarlı yorulma davranışını ifade etmekte kullanılan Coffin-Manson denkleminde hareketle oluşturulup literatürde yaygın şekilde kabul görmüş Krawinkler ifadesinde yer alan ve deneyle tespit edilen parametrelerdeki değişimler yükleme hızına bağlı olarak incelenmiştir. Deneyler sonucunda, birleşimlerdeki kümülatif hasarın, hasar oluşturan hareketin etkime hızına göre de değişeceği, ve bir kiriş-kolon birleşiminin deprem performansının, o yapıya etkileyen

sismik etkinin yükleme karakteristiğine birebir bağımlı olarak ortaya çıkacağı sonucuna varılmıştır.



EFFECT OF LOADING RATE ON LOW CYCLE FATIGUE BEHAVIOUR OF STEEL BEAM-TO-COLUMN CONNECTIONS

SUMMARY

Structural engineering, which is a branch of civil engineering profession, has focused on designing and constructing resilient structures, especially in regions which are prone to the most devastating natural hazard : earthquakes. Before designing a structure, selection of building materials dominantly depends on local manufacturing, building and construction costs. In addition to wide usage of reinforced concrete due to relatively lower costs in our country, structural steel construction sector continuously has been expanding especially in industrial structures as well as building-type structures due to the need for complying with architectural design requests.

Structural steel has a predefined and documented material quality owing to the controlled production environment in steel mills. However, after the reconnaissance efforts undertaken following the earthquakes experienced in the last two decades, various design flaws and construction problems have been observed in connections of structural framing members, even in countries where structural steel has found widespread use due to the countries' welfare level.

So as to assess these observed design and construction flaws and problems, years-long research programs have been initiated under governmental financial support. After a detailed and fruitful research period, revised design rules as well as construction and fabrication recommendations have been devised, all of which have had profound effect on structural engineers' understanding of steel connection behavior and design rules and regulations throughout the world, including Turkey.

Steel is a material of which yield strength increases as rate of loading increases. This change of mechanical behaviour affects seismic energy absorption capacity of beam-to-column connection regions, which in turn affects structure's global seismic performance. As is the case during aforementioned research efforts, the best way to understand seismic behavior of structural steel connections has been to conduct full-scale experimental research. As part of outcomes of seismic testing of connections, low cycle fatigue behavior, which describes seismic energy dissipation capability in inelastic regime, has attracted many scientists who employ either multiple-step or constant amplitude displacement loading histories during laboratory works.

During this research, dimensions of an actual exterior beam-to-column connection has been used to produce full-scale specimens and these specimens have been subjected to constant amplitude displacement controlled tests. By conducting these tests with different rates of loading, changes in parametres used in Krawinkler equation which is devised based on Coffin-Manson characteristic equation have been quantitatively described. Experimental results yield that cumulative damage in beam-to-column connections differs with the change in loading rate, which is a direct reflection of seismic action characteristics of an earthquake.

This dissertation starts with a brief outline of structural engineering and how societies employ building materials based on local geological and economical conditions. As part of this, advantages of using steel as the main structural building material is summarized. As the much respected characteristic of steel, ductility –the capability of undergoing large deformations prior to onset of failure– is remembered, and how engineering community takes advantage of this excellent behavioural property is explained. Failure prone regions of a steel structure such as welded connections as well as bolts are critically emphasized remembering the outcomes of recent strong ground motions that have shaken the world as well as structural and earthquake engineering community. Albeit no damage was observed initially, in depth reconnaissance efforts have shed a bright light on hidden failures in steel beam-to-column connections. Research efforts were undertaken by government authorities and various research groups at universities and legislative bodies, and after years of intensive research efforts, a brand new era of seismic structural steel design has begun that have been transforming design codes worldwide.

Following this introduction, concepts of fatigue in structural steel material and components are explained, focusing on low cycle fatigue – that is, failure under inelastic excursions after relatively low repetitions of imposed load or displacement. This behaviour becomes extremely important during seismic events, and resistance to low cycle fatigue directly influences the overall structural resistance to seismic actions. However, low cycle fatigue behaviour is also dependant on rate of external actions, which transforms into strain rate within building components such as beams or columns, and especially at the most critical regions of a steel structure : the beam-to-column connection.

In Chapter 2, literature survey has been provided that aims to bring together the current state of knowledge about this phenomena. The readers will easily realize that much research has been carried out in European research institutions and studies complement each other.

Chapter 3 summarizes the procedure for selecting the dimensions of the full scale specimen to be tested as the key figure of this research.

The following Chapter 4 delves into experimental efforts, starting with the performance at material level. Performance of ASTM-compliant steel coupon specimens are evaluated taking loading rate into consideration. Outcomes of these preliminary tests are employed for preliminary finite element analyses of full-scale specimens. Numerical results have provided valuable information which has been transferred to design of test-rig as well as auxiliary components such as lateral restraints close to cantilever tip of the full-scale specimen. Following are the full-scale tests with varying tip displacement amplitudes and loading rates. Test results reveal that failure mode differs slightly based on displacement rate, which has never been observed previously, probably due to capabilities of testing facilities and/or widely accepted quasi-static loading, a.k.a. loading the specimens so slowly that eye can detect and trace a crack propagation for a steel structure, if occurs.

Chapter 5 deals with finite element analysis simulations of all the full-scale cyclic displacement test conducted and comparative assessment of results have been carried out. Hysteresis curves are obtained and compared with the test results accordingly. PEEQ index results are shown graphically.

Finally, Chapter 6 summarizes the assessment of test results so as to obtain material constants and base equations that may be used to describe low cycle fatigue

behaviour of welded-unreinforced flange moment connections employing a Coffin-Manson type equation.

It is believed that the outcomes of this research will broaden our understanding of inelastic damage that the structures we design have to withstand during seismic events, from which humankind has suffered a lot and inherently has no chance of isolation due to economical aspects.





1. GİRİŞ

Doğal afetlerin en büyüklerinden sayılabilecek deprem olgusu, önüne geçilememesi ve dünya çapında her yıl çok sayıda kişinin ölüm veya yaralanmasına yol açması nedeniyle, bilim dünyasının çeşitli branşlarından insanlar tarafından çok çeşitli açılardan detaylı bir şekilde incelenmesi kaçınılmaz hale gelmiş bir doğa olayıdır. Yapı mühendisleri açısından ise deprem, tasarımı yapılan yapıların karşı koyması gereken en önemli dış etkilere biri olarak karşımıza çıkar. Bu dış etkene yapının yeterince dayanım gösterecek şekilde karşı koyabilmesi, öncelikle seçilen taşıyıcı malzeme karakteristiklerine de bağlı olmaktadır. Tasarımı yapılan yapının inşa edileceği bölgenin gerek demografik gerek ekonomik, ve hatta coğrafik şartlarına bağlı olarak sıklıkla betonarme, kâgir veya çelik malzemesi ana taşıyıcının oluşturulmasında kullanılagelmiştir. Bunlardan çelik, özellikle yapıya kazandıracağı yüksek dayanım ve mimari talep ve koşulları kolayca sağlayabilmesi açısından özellikle gelişmiş ülkelerde öne çıkmaktadır. Kalitesi fabrika koşullarında üretilmesi sayesinde kontrol edilebilen çelik malzeme, süneklik adı verilen ve kırılmadan önce büyük deformasyonlar yapabilme yeteneği sayesinde sıklıkla tercih edilmektedir.

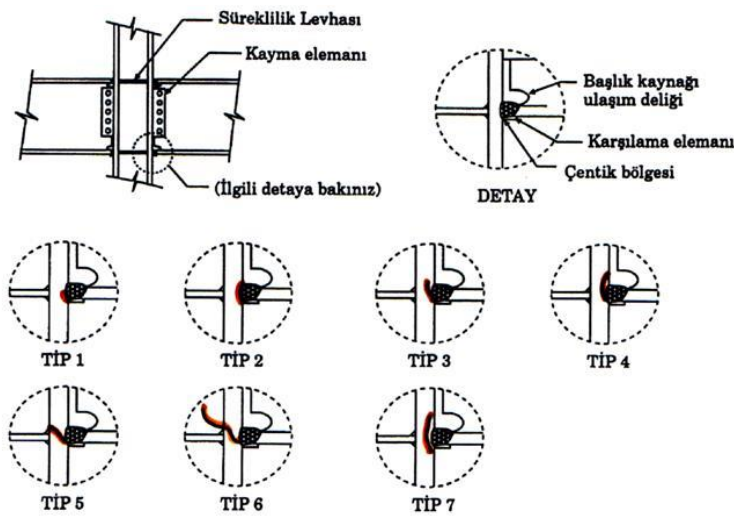
1.1 Çelik Yapıların Sünek Davranışı

Çelik yapıların sünek davranışı, tek başına çelik malzemesinin süneklik özelliği ile sağlanamaz. Buna ek olarak, taşıyıcı çerçeve sistemlerini oluşturan yapı elemanlarının birleşimlerinde istenen plastikleşmenin gerçekleşmesini sağlayacak şekilde yeterli dayanım, tasarımda dikkate alınan rijit çerçeve kabulüne ters düşmeyecek şekilde bir rijit davranış ve özellikle birleşim bölgelerinde, tekrarlı yükler altında elastik olmayan deformasyonların oluşmasına engel olmayacak bir detaylandırma gerekir. Bu sayede kiriş-kolon birleşimlerindeki panel bölgeleri, kirişler ve bir ölçüde kolonlar da plastik dönme kapasitelerini kullanmak suretiyle depremin yer hareketi ile yapıya aktardığı sismik enerjiyi sönmülemeye çalışırlar. Bahsedilen sünek davranış, ana taşıyıcı yapının tüm bölgelerinde yeterli sünek davranışın görülebilmesiyle mümkündür. Bu açıdan bakıldığında, birleşim araçları

olarak sıkça kullanılan kaynak ve bulonların sünek olmayan davranışları özel dikkat gerektirmektedir. Sözkonusu birleşim araçları, birleştirdikleri elemanlarda oluşabilecek maksimum kuvvetleri aktarabilecek kapasitede olmalıdırlar (Bruneau ve diğ., 1998).

Mevcut depreme dayanıklı yapı tasarım şartnameleri, kuvvetli yer hareketine maruz kalan yapılarda elastik olmayan şekil değiştirmelerin meydana gelmesine ekonomik nedenlerden dolayı izin vermektedirler. Bunun sağlanabilmesi için, yapılarda belirli miktarda sünek davranış kapasitesi bulunması gerekir.

Yapı malzemesi olarak çeliği çok yoğun olarak kullanan A.B.D.'de, yukarıda belirtilen davranışın halihazırdaki tasarım yönetmelikleriyle sağlandığı inancı, 1994 yılında California eyaletinin Northridge bölgesinde meydana gelen ve büyüklüğü 6.7 olan şiddetli depremle sarsılmıştır. Kuvvetli zemin hareketinin yalnızca 10 saniye sürmesine rağmen, 20 milyar dolarlık maddi zarar ile bu deprem, ülkenin o zamana dek gördüğü en yüksek mali zararlı doğal afet olmuştur (Northridge, 1995). Depremi hemen sonrasındaki ilk izlenimlere göre çelik yapılarda önemli bir hasar oluşmadığı sonucuna varılmasına rağmen, zamanla durumun pek de parlak olmadığı ortaya çıkmıştır. Örneğin asansörlerin işleyişlerinde karşılaşılan bazı problemler, dikkatleri, taşıyıcı olmayan mimari bileşenlerin arkasında gizli kalan yapısal çelik taşıyıcı elemanlara çekmiştir. İncelemeler sonucunda, Northridge öncesi çelik yapılarda yaygın olarak kullanılmış olan ve güvenli olduğu düşünülegelen tipik kiriş-kolon birleşiminin yer aldığı binalarda, özellikle kiriş başlıklarını kolon başlığına bağlayan kaynak dikişleri civarında çatlaklar oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1 : Northridge öncesi birleşim detayı ve gözlenen hasar tipleri.

Northridge depremi öncesi bir çok deneysel ve analitik çalışmalar sonucu kabul görerek tasarım yönetmeliklerine giren ve kullanılması önerilen bu birleşim noktası detayı, deprem sonrasında yayınlanan bir acil raporla, yönetmeliklerden çıkarılmıştır (Gross,1998).

Oluşan hasarın nedenlerini ve olası çözüm önerilerini ortaya çıkarabilmek amacıyla, devlet desteğiyle bir çok üniversitenin de katıldığı bir araştırma programı başlatılmıştır (SAC, 1994). Hasarın olası nedenleri hakkında yürütülen çalışmaların detaylı bir derlemesi, (Bayülke, 1996 ve 2003) referanslı yazılardan incelenebilir. Özetlemek gerekirse, hasarın ana nedenleri olarak, sünek davranışla enerji yutulabilmesini gevrek davranış göstermek suretiyle engelleyen birleşim elemanları (kaynak, bulon), beklenenin çok üstünde gerilme düzeylerine maruz kalan birleşim detayları (kaynak ulaşım deliği gibi), kompozit döşeme etkisi ve çelik malzemenin varsayılanın aksine izotropik olmaması sayılabilir (Bayülke, 1996). Tüm bunlara ek olarak, yer hareketinin hakim karakteristiği olan ve yakın kaynaklı bir deprem olması sonucu ortaya çıkan impulsif etkiler nedeniyle, yapının birleşimlerde yüksek hızlı şekil değiştirme yapabilme talebi oluşmuş, bu durum malzeme açısından dayanım fazlalığı talebi olarak ortaya çıkmış ve beklenenden daha büyük bir gerilme karşılayabilme kapasitesi gözlenmiş, tüm bunların sonucunda da daha önceki deneylerle ortaya konan düzeyden daha kısıtlı miktarda bir şekil değiştirebilme ve süneklik yeteneğine bağlı olarak daha sınırlı bir enerji yutabilme performansı gözlenmiştir (Castiglioni, 2007).

1.2 Metal Yapı Elemanlarında Yorulma

Metal yapı elemanlarında tekrarlı yükler etkisiyle çatlak oluşumu ve bu çatlakların büyümesi olayına yorulma adı verilir. Yorulma olayı, yorulmaya neden olan yük tekrarı sayısına göre temel olarak yüksek tekrarlı yorulma ve düşük tekrarlı yorulma olarak iki ana sınıfa ayrılır.

1.2.1 Yüksek tekrarlı yorulma

Çelik malzemenin üretimi sırasında kristal yapısında meydana gelen kusurlar, dislokasyonlar ve diğer mikro boyuttaki çatlaklar, tekrarlı yüklemeye maruz kalan yapısal çelik elemanlarda önem arzeden çatlaklara dönüşebilirler. Örneğin, ağır trafik yükü etkisinde kalan çelik köprülerin bir takım bileşenleri veya dalga etkisine maruz

kalan açık deniz platformlarının çeşitli yapısal elemanları, bu yapıların hizmet ömrü boyunca milyonlarca kez tekrarlı yükleme ile zorlanırlar. Metallerin veya birleşim detaylarının, çelik malzemesinin akma sınırına karşı gelen şekil değiştirmeden daha düşük değerlere karşılık oluşan şekil değiştirmelerin yüzbinlerce kez etki etmesi sonucu dayanımlarını kaybetmelerine “yüksek tekrarlı yorulma” adı verilir. Bu etkiyi karşılamak zorunda kalacak olan yapısal elemanlar, çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesine karşı yeterli dayanıma sahip olacak şekilde boyutlandırılmalı ve dikkatli bir biçimde detaylandırılmalıdırlar. Bu amaçla, tekrarlı yüklemeye maruz kalacak yapısal elemanlarda ortaya çıkabilecek maksimum gerilme aralığı genellikle akma sınırının çok altında tutulmaya çalışılır ve yapıdaki kritik noktalar, gerilme yığılmaları oluşmayacak şekilde boyutlandırılırlar.

Yüksek tekrarlı yorulma dayanımına ait hesaplarda, çeşitli detay geometrilerine sahip numunelerin sabit genlikli tekrarlı yüklemeye maruz bırakılmaları sonucunda elde edilen yorulma eğrileri kullanılır.

Çeşitli laboratuvarlarda yürütülen testler sonucunda elde edilen bu S-N eğrileri çeşitli detay kategorilerine göre log-log formunda hazırlanmıştır.

Eğrilerin hazırlanmasında sabit gerilme aralıklı yüklemeler kullanılmasına rağmen, gerçekte tekrarlı yüklemeler değişken gerilme genliklerine haizdirler. Bu değişken genliğe sahip davranışı sabit genlikli davranış cinsinden ifade edebilmek için, lineer hasar birikimi yaklaşımı kullanılır (Miner, 1945). Herhangi bir sabit gerilme aralığı için bu durum,

$$D = \frac{n_i}{N_i} \quad (1.1)$$

olarak ifade edilir. Burada D hasar veya hasar indisi, n_i terimi σ_i gerilme aralığına maruz kalma tekrar sayısını, N_i terimi σ_i gerilme aralığına ait maksimum izin verilen tekrar sayısını gösterir.

Gerilme tekrarlarının birbirlerinden farklı gerilme genliklerinde olması halinde, toplam hasarın, her bir gerilme aralığında oluşan hasarların lineer toplamı olduğu varsayılır. Bu varsayıma Miner kuralı veya Palmgren-Miner hipotezi adı verilir ve şöyle ifade edilir :

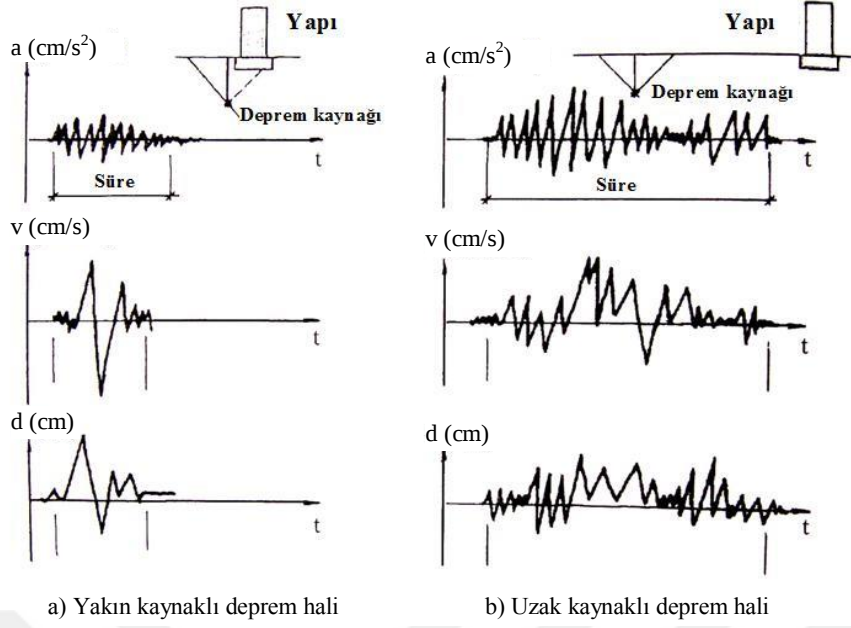
$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \quad (1.2)$$

Birikmiş hasar miktarı D 'nin 1 değerini alması, yorulma nedeniyle güç tükenmesi durumuna karşılık gelir. Bu indis, özellikle dinamik karakterli yüksek tekrarlı yük etkilerine maruz kalan köprü benzeri mevcut yapıların yorulma açısından değerlendirilmesinde de sıklıkla kullanılır.

1.2.2 Düşük tekrarlı yorulma

Bir taşıyıcı elemanın beklenen taşıyıcı fonksiyonunu yorulma nedeniyle kaybetmesi, yalnızca yüksek tekrarlı yorulma sonucu gerçekleşmeyebilir. Göçme durumu olarak tanımlanabilecek kopma hali, uygulanan elastik ötesi deformasyonlara da bağlıdır. Buradan hareketle, düşük gerilme aralığının çok yüksek sayıda etkimesi durumu olan yüksek tekrarlı yorulmadan farklı olarak, metallerin belirli sayıda ve akma sınırına karşı gelenden daha büyük değerdeki tekrarlı şekil değiştirme sonucu dayanımlarını kaybetmeleri “düşük tekrarlı yorulma” olarak adlandırılır. Yüksek veya düşük tekrarlı olsun, her iki tip yorulma biçiminde de benzer çatlak oluşumu ve çatlak ilerlemesi mekanizmaları bulunmasına rağmen, bunlardan yalnızca düşük tekrarlı yorulma durumu yapısal eleman ve birleşimlerin tekrarlı yüklere akma sınırı ötesinde gösterdikleri cevabı yansıtır.

Yapılardan bu tür bir davranış beklentisi, özellikle deprem durumunda çok önem kazanmaktadır. Bir deprem sırasında, yapı bir bütün olarak belirli sayıda tekrarlı yük etkisinde kalır. Özellikle kiriş-kolon birleşimlerinde gözlenmesi beklenen elastik ötesi davranış belirli sınırlar içinde kalmazsa, bu bölgelerde istenmeyen yerel burkulma veya kırılma gibi durumlar söz konusu olabilir. Tüm bu davranış biçimleri malzemenin tekrarlı yükler altında elastik ötesi zorlanması sonucunda oluştuğu için, bu bölgelerdeki davranış da düşük tekrarlı yorulma davranışı olarak ele alınabilmektedir.



Şekil 1.2 : Yakın ve uzak kaynaklı deprem durumları (Gioncu,2002).

Deprem kaynağının ele alınan yapıya uzaklığı da bir başka çok önemli bir etken olarak ortaya çıkar. Şekil 1.2b'deki gibi, deprem kaynağının yapıya uzak olduğu bir durumda, yapı üzerine uzun süreli ancak ani karakterde olmayan ve görece uzun süreli etkiyen tekrarlı yükleme sonucu oluşabilecek plastik mafsallarda plastik şekil değiştirmelerin önemli miktarda birikmesine yol açacak bir deprem hareketi görülmektedir. Buna karşın Şekil 1.2a'daki gibi, deprem kaynağının yapıya yakın olduğu bir durumda, yapı üzerine kısa süreli ancak yüksek hızlı ve ani bir deprem yükü etkiyecektir. Bu iki durum arasında kesin bir ayırıcı çizgi bulunmaması nedeniyle, her iki durumu birbirinden bağımsız ve ayrık düşünmemek gerekir (Gioncu, 2002). Özet olarak denebilir ki, deprem kaynağına uzak yapılarda plastik şekil değiştirmelerin birikmesi hali düşük tekrarlı yorulma konusu kapsamına giriyorsa da, ele alınan yapı ile deprem kaynağı yakın ise, düşük tekrarlı yorulma davranışına yükleme hızının etkisi de mutlaka dikkate alınmak zorundadır.

1.3 Amaç

Çelik malzemesinin yükleme hızına bağlı olarak ortaya koyduğu davranış farklarının farklı karakterdeki depremler sırasında da yapının bütünü veya birleşim detaylarında gündeme geleceği açıktır. Kiriş-kolon birleşimlerinin sismik performansını öngörebilmek ve değerlendirebilmek amacıyla laboratuvar ortamında gerçekleştirilebilecek tipik yapısal test teknikleri literatürde mevcuttur. Genel olarak

çok düşük hızlarla yükleme yapılan bu testlerde her laboratuvarın mevcut imkanları doğrultusunda yükleme hızları kullanılmaktadır.

Yapılan çalışmalar kapsamında, gerçek bir yapıdan seçilen bir kenar açıklık kiriş-kolon birleşimi geometrisiyle oluşturulmuş tam ölçekli deney numuneleri üzerinde test ekipmanının kapasitesi yardımıyla birbirinden farklı hızlarda sabit genlikli deplasman kontrollü yüklemeler yapılmış, gerçekleştirilen bu deneyler sonucunda düşük tekrarlı yorulma davranışını ifade etmekte kullanılan parametrelerdeki değişimlerin yükleme hızına göre değişimleri incelenerek literatüre yeni bir bilgi eklenmesi hedeflenmiştir.





2. MEVCUT ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Bu bölümde öncelikle çelik yapılarda ortaya çıkabilecek düşük tekrarlı yorulma davranışına ait literatürdeki mevcut çalışmalar tanıtılacak, aralarındaki farklılıklar ortaya konacaktır. Tez konusu çalışmanın literatüre ne gibi bir katkısının olabileceği vurgulanacaktır.

2.2 Literatür Özeti

Çelik yapı bileşenlerinin deprem gibi çevrimsel yükleme gerçekleştiren bir dış etkene dayanımını kestirebilmek adına, uzun yıllardır çevrimsel deplasman esaslı yükleme testi kullanılmaktadır. Bu tip testler genellikle Avrupa veya A.B.D.'deki resmi kurumlar tarafından ortaya konan ve bir deney altyapı birlikteliği sağlama amaçlı olarak ortaya atılan standart test prosedürleri ile gerçekleştirilmekte, sonuçlar da aynı dokümanlarda yer alan veri indirgeme formülasyonlarıyla irdelenmektedir. Sözü edilen bu test protokolleri, çevrimler ilerledikçe artan deplasman genliğine haiz çevrimsel deplasman grupları içermekte olup, bir bileşenin çevrimsel davranışının yeterli olup olmadığının değerlendirilebilmesi için sağlıklı bilgi sunabilmektedir. Ne var ki bu tip testler, eleman veya bileşendeki hasarı tanımlamaya yarayacak şekilde bir hasar birikimi notasyonunun ortaya konması için uygun değildir (Castiglioni, 2007). Üretilen bilginin yeni yapıların tasarımı veya mevcut yapılarda zaman içinde yapının geçirdiği depremler nedeniyle oluşmuş olabilecek hasarın düzeyi ve buna bağlı olarak ortaya konabilecek güçlendirme prosedürleri açısından işe yarar bilgi veremeyecek olması nedeniyle, farklı ülkelerden bir çok araştırmacı tarafından hasar birikimine dair tüm deneysel çalışmaların sabit genlikli çevrimsel yüklemeler altında gerçekleştirilmesi önerilmektedir (Krawinkler, 1983). Bu sayede, ele alınan birleşim veya yapısal eleman açısından hasar birikimine dair temel kavramlar ve parametreler hakkında ilgili numune dışında da genelleştirmeye müsait bilgi üretimi gerçekleştirilebileceği ifade edilmektedir.

Yukarıda verilen bu prensip ve yaklaşım, halihazırda belirli gerilme aralığını yakalayacak şekilde laboratuvar ortamında dış yüklere maruz bırakılan köprü kirişi gibi elemanların yüksek tekrarlı yorulma davranışlarını inceleyebilmek amacıyla çok yaygın olarak kullanılmakta, elde edilen sonuçların da aynı grafik veya eğriler üzerinde gösterilebilmesi imkanı doğmaktadır.

Düşük tekrarlı yorulma konusu, A.B.D., Avrupa ve kısmen de Japonya’da yapılan bilimsel araştırmalarla incelenmiştir. Bunlar içinde özellikle Avrupa’da yapılan çalışmalar, ilgili araştırma gruplarının aralarındaki ortak çalışmalarının da yardımıyla birbirleriyle benzerlik ve uyum taşımaktadır.

Avrupa’da bu konu hakkında yapılan çalışmalar, özellikle İtalya’da Politecnico di Milano’da gerçekleştirilmiş ve bunların bir kısmına Portekiz’den Instituto Superior Tecnico di Lisbon mensubu araştırmacılar da destek vermiştir. Avrupa Birliği’nden kaynaklı finansal yardımlarda yürütülen bu çalışmalara Yunanistan’dan National Technical University of Athens (NTUA) araştırmacıları da katılmıştır.

Ballio ve Castiglioni (Ballio, 1995), yüksek ve düşük tekrarlı yorulma davranışına ait tasarım ve hasar belirleme metodlarını birleştirecek bir metod önermişlerdir. Bu metoda göre, yüksek tekrarlı yorulma davranışını tanımlamak için kullanılan Wöhler eğrileri, düşük tekrarlı yorulma davranışını açıklamak için de kullanılabilmektedir. Çalışmada yerel burkulma sınır durumu bir çentik etkisi olarak düşünülmüştür. Yüksek tekrarlı yorulmada kullanılan Miner kuralının, düşük tekrarlı yorulmaya yol açan değişken genlikli yükleme durumu için de kullanılabileceği gösterilmiştir.

Bursi ve diğerleri (Bursi, 2002), bulonlu ve yarı-rijit davranış gösteren kiriş-kolon birleşimlerinin sismik etkilere düşük tekrarlı yorulma açısından cevabını deneysel ve nümerik olarak incelemişlerdir. Birebir ölçekli numuneler ve bu numunelere ait bileşenler üzerinde sabit ve değişken genliklere sahip tekrarlı yüklemeler yapılmıştır. Olumsuz davranış gözlenmeyen numuneler daha sonra mikroyapısal ve kırılma mekaniği açısından detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, ABAQUS yazılımı kullanılarak üç boyutlu ve lineer olmayan sonlu eleman modelleri üretilmiş, bu modellere ait malzeme özellikleri, deney sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Son olarak, birleşime ait tokluk istemlerini azaltabilecek ve kırılma riskini azaltabilecek yerel detayları belirleyebilmek adına, parametrik bir sonlu elemanlar analizi yürütülmüştür.

Ferreira ve diğerkleri (1998), çepeçevre kaynaklı kiriř-kolon birleřimlerinin dūřuk tekrarlı yorulma davranıřını deneysel olarak incelemiřlerdir. Bu amaçla Politecnico di Milano’da yūrūtūlen çalıřma; (i) tam penetrasyonlu kūt kaynaklı , (ii) kısmi penetrasyonlu kūt kaynaklı ve (iii) kōře kaynaklı birleřimlere sahip toplam 22 deney numunesi kullanarak gerçekleřtirilmiřtir. Kullanılan tūm numuneler, klasik çekme testi numunesine benzer enkesitte ve yaklařık 35 cm yūkseklilindeki bileřenler tipinde olup, gerçek boyutlu kiriř-kolon birleřimleri deęildir. Deneyde her bir numuneye, malzeme davranıřını plastik bōlgede zorlayan sabit genlikli ve tekrarlı deplasmanlar yūklenmiřtir. Ballio ve Castiglioni tarafından yapılan çalıřmanın sonuçlarının bu deney serisi için de uygunluęu gōsterilmiřtir.

Calado ve Castiglioni tarafından gerçekleştirilen çalışmada (Calado, 1995) , farklı tipteki kiriş-kolon birleşimlerinin dūřuk çevrimsel yorulma davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Ŭ farklı birleşim tipi içeren deney programında, her bir birleşim tipi için ũ adet birebir ūlekli test numunesi hazırlanmıştır. Testlerde sabit genlikli tekrarlı yūkleme kullanılmış ve her bir numune için çevrimsel davranış (hysteresis) eğrileri elde edilmiştir. Eurocode 3’te (Eurocode, 2000) kullanılması için elde edilen sonuçların zenginleştirilmesine yōnelik yapılan bu deneylerden elde edilen sonuçların değerlendirilmesinde, Ballio ve Castiglioni tarafından geliştirilmiş model (Ballio, 1995) kullanılmıştır. Dięer farklı birleşim tipleri için yapılacak testler yardımıyla, bu hesap modelinin kapsamının genişletilmesi gerektiği ũzerinde durulmuştur.

Calado ve diğerkleri , elik çerçevelerdeki moment aktaran kiriř-kolon birleřimleri ũzerine deneysel ve nūmerik çalıřmalar yapmıřtır (Calado, 2000). Numuneler, birleřimin performanslarını ve dūřuk tekrarlı yorulma performanslarını etkileyen ana parametreleri saptamaya yōneliktir. Beř farklı birleřim tipine ait toplam 29 adet būyūk ūlekli deney numunesi, sabit genlikli çevrimsel deplasmanlar uygulanarak test edilmiřtir. Deney numunelerine ait sonlu eleman modelleri ABAQUS yazılımı kullanarak oluřturulmuř, nūmerik modellerde malzeme ve geometri deęiřimi bakımından lineer olmama durumu dikkate alınmıřtır. Kiriř-kolon birleřim bōlgesinde oluřması beklenen yerel burkulmalara engel olmamak amacıyla, 0.02 mm gibi çok kūuk genlikli sinūs dalgası biçiminde bir ūnkusur tanımlanmıř ve modeller ile deney numunelerinin davranıřları simūle edilmiřtir.

Slecza tarafından yapılan çalışmada, köşe ve küt kaynakların birlikte guse levhasına yük aktardığı bir kiriş-kolon birleşimine ait nümerik analizler anlatılmaktadır (Slecza, 2004). Polonya’da yapılan bu çalışmada, birleşime ait olan (i) profil tipi (IPE veya HEB) , (ii) guse levhası boyutları, (iii) malzeme kalitesi, (iv) köşe kaynak boyutları gibi parametrelerin düşük tekrarlı yorulma davranışına etkisi incelenmiştir.

Vayas ve diğerleri , moment aktaran çelik yapıların deprem etkisi altındaki yorulma davranışını incelemişlerdir (Vayas, 2003). Çalışma kapsamında, moment aktaran çelik düzlem çerçeveler ele alınmış, bu çerçeveler farklı deprem hareketlerine tabi tutulmuştur. Analizlerdeki önemli parametreler (i) çerçeve geometrisi, (ii) birleşimlerin rijitlikleri, (iii) düşey deprem hareketinin düzeyi, (iv) yer hareketinin tipi ve (v) birleşimlerin yorulma dayanımıdır. Çalışmada, lineer olmayan dinamik analiz tekniği, DRAIN-2DX programı yardımıyla uygulanmıştır. Sonuç olarak dikkate alınan tüm parametrelerin birbirleriyle kombinasyonlarının birbirlerinden çok farklı sonuçlar ortaya koyduğu bulunmuştur. Yer hareketi tipi olarak, impuls tipi etkisi olan yakın kaynaklı yer hareketi ile tekrarlı yüklemeye yol açan uzak kaynaklı deprem hareketinin etkileri özetlenmiştir.

Taucer ve diğerleri, ELSA laboratuvarında iki katlı çelik bir çerçeve üzerinde deneyler yapmışlardır (Taucer, 2000). Bu çalışmada, gerçek bir yapının davranışını incelemek ve sadece kiriş-kolon birleşimini içeren diğer test tekniğiyle arasında oluşabilecek farkları araştırmak ana amaçtır. Birleşim detayında Avrupa’da yaygın olan doğrudan tam penetrasyonlu kaynak kullanılmaktadır. Panel bölgesi, K şeklinde süreklilik levhalarıyla güçlendirilmiştir. Gözlenen kırılmalar ile birlikte, birikimli plastik süneklik değerleri hesaplanmıştır.

Ballio ve diğerlerinin yaptıkları çalışmada (Ballio, 1997), 1995 yılına ait makalelerine benzer şekilde, çok numuneli bir test programı yürütülerek, özellikle kiriş-kolon birleşimlerinin düşük tekrarlı yorulma davranışı özetlenmiştir. Sabit genlikli deplasman yüklemelerinin sonucunda, yüksek tekrarlı yorulma ifadelerinin düşük tekrarlı yorulmaya uygulanabilirliği üzerinde durulmuş, değişken genlikli yükleme için de önerilen bu yaklaşımın geçerliliği gösterilmiştir. Göçme kriteri olarak, plastik deformasyonlarla yutulan enerji miktarı kullanılmıştır.

Richard ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada , üç ayrı birleşim tipine ait birebir ölçekli deney sonuçlarından bahsedilmektedir (Richard, 2001). Bu birleşimler, (i) Northridge öncesi tipik birleşim (bkz. Şekil 1.1) , (ii) Zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim (dogbone) ve (iii) delikli gövdeye sahip birleşim (slotted web) olarak ele alınmıştır. Testlerde yükleme olarak sabit genlikli tekrarlı deplasmanlar kullanılmıştır. Şekil değiştirme kontrollü yapılan bu testlerin sonuçları, “görelî kat ötelemesi – birleşimde kırılmaya yol açan yükleme tekrar sayısı” ilişkisini veren grafiklerle ifade edilmiştir. Bu eğriler kullanılarak, yapının belli bir tepe deplasmanını kaç kez yapacağı bulunursa, yapının tekrarlı yüklemelere karşı vereceği cevabın da önceden kestirilebileceği belirtilmiştir.

Dexter ve diğerleri, zayıf panel bölgesi ve kaynaklı başlık ve gövdeye sahip kiriş-kolon birleşimleri üzerinde deneyler yapmışlardır (Dexter, 2004). Toplam altı adet numune, SAC yükleme protokolüne göre test edilmiştir. Kaynak elektrodunun yeterli CVN değerine sahip olması durumunda birleşimlerin performanslarının yeterli düzeyde olabildiği gözlenmiştir. Bazı numunelerde uygulanan panel bölgesi güçlendirmesinin, birleşimin düşük tekrarlı yorulma davranışına etkisinin olmadığı ortaya çıkmıştır.

Stojadinovic tarafından yapılan çalışmada, (i) geniş başlıklı kiriş ve geniş başlıklı kolonlara sahip kiriş-kolon birleşimlerinin göçme modları, (ii) bu göçme modları nedeniyle üst sınır olarak ortaya çıkan birleşim dönme limitleri ve (iii) bu limitlere göre tasarıma nasıl yön verilmesi gerektiği üzerinde durulmuştur (Stojadinovic, 2003). Bu noktaları incelerken, ABAQUS kullanılarak oluşturulan sonlu eleman modelleri kullanılmış ve bu modeller, University of Michigan’da yapılmış olan test sonuçları kullanılarak kalibre edilmiştir. Parametrik inceleme sırasında, kiriş enkesitinin narinlik oranları, yanal harekete karşı tutulmuş uzunluk ve birleşim geometrisi ele alınmıştır. Bu makalede, Northridge sonrasında yapılan çok sayıda testlerin hiç birinde sabit genlikli deplasman yüklemesi yapılmadığı ve bu nedenle Avrupa’daki bir çok test sonucu benzeri sonuçların Amerikan tipi kesitler için üretilmediğinden bahsedilmektedir. Yazar, Avrupa’daki sonuçların yeterli yaklaşıklıkla A.B.D.’de de uygulanabileceğini önermektedir. Bu fikre dayanarak, kalibre edilmiş sonlu eleman modellerini kullanarak düşük tekrarlı yorulma analizleri gerçekleştirmiştir. Analitik bir model geliştirebilmek amacıyla, testler sırasında

özellikle kirişin üst başlığında görülen yerel burkulma hali, akma çizgileri kullanarak incelenmiştir. Test ve akma çizgisi analizlerinin karşılaştırmaları yapılmıştır.

Mander ve diğerleri, A.B.D.'de sıkça kullanılan alttan ve üstten korniyerli (top-and-seat angle) tipte birleşim üzerinde, sabit genlikli tekrarlı yüklemeye dayanan testler yapmışlardır (Mander, 2004). Yarı-rijit karakterdeki bu birleşim tipine ait deney numunesi, düzlem dışına doğru hareketi tutulu olacak şekilde bir test düzeneğine yerleştirilmiş ve kiriş ucundan sabit genlikli tekrarlı deplasmanlarla yükleme gerçekleştirilmiştir. Öncelikle monotonik karakterde yükleme yapılmış, sonuçlar değerlendirilerek etkin parametreler saptanmaya çalışılmıştır. Sonrasında ise, 11 numune üzerinde gerçekleştirilen çevrimsel yükleme testlerinin sonuçları yardımıyla, bu birleşim tipine ait düşük tekrarlı yorulma davranışı incelenmiştir.

Mander ve diğerleri tarafından yapılan bir diğer çalışmada ise, yukarıda kısaca özetlenen testler, aynı tip birleşim detayına sahip 5 adet farklı numuneye bu kez değişken genlikli yüklemeler uygulanarak tekrarlanmıştır (Mander, 1995). Numunelerin enerji yutma davranışlarının hasarın artışına bağlı olarak nasıl değiştiği incelenmiş ve enerji bazlı bir davranış modeli geliştirilmiştir. Gerçek bir deprem yüklemesini kullanan bir analizde Miner kuralının uygulanmasının çok zahmetli olacağı vurgulanmış, enerjiye dayanan yaklaşımın hesapları çok basitleştirebileceği belirtilmiştir.

Diğer bir çalışmada (Teran-Gilmore, 2005), betonarme yapı elemanlarının düşük tekrarlı yorulma davranışına ait tasarım yaklaşımları ele alınmış, hedef süneklik kavramına bağlı olarak bu davranışın nasıl dikkate alınabileceği belirtilmiştir.

Yer hareketi üzerinde duran diğer bir çalışmada (Roberts, 2003), Northridge ve Kobe depremleri sonrasında farkedilen çatlakların oluşumuna, yer hareketinin şiddetinin neden olabileceği üzerinde durulmuştur. Nümerik simülasyonlar ile dalga yayılımının etkisi incelenmiş, sonuç olarak birleşimlerde oluşan kırılmalara yakın deprem kaynağından gelen şiddetli yer hareketinin sebep olduğu ifade edilmiştir.

Bahsedilen tüm bu çalışmaların analizi sonucunda, düşük tekrarlı yorulma davranışının incelenmesi sırasında çok yavaş hızlı yüklemeler sonucunda test numunelerinin davranışlarının incelendiği, yükleme hızının davranışa ne gibi etkisi olabileceği üzerinde durulmadığı gözlenmiştir. Bu çalışma kapsamında, yükleme

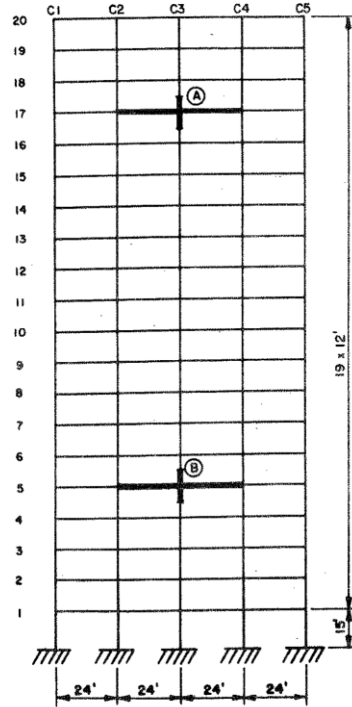
hızının düşük tekrarlı yorulma davranışına etkisi araştırılacak, bu amaçla malzeme ve büyük numune testleri gerçekleştirilecektir.





3. NUMUNE BOYUTLARININ SEÇİMİ

Çalışma kapsamında yapılacak testlerde kullanılacak numunenin seçiminde mevcut bir yapının dikkate alınması yoluna gidilmiştir. Bu amaçla gerçeği en iyi yansıtan bir kolon-kiriş bileşeninin seçimi, sismik aktivitesi olan bölgelerde yapılacak yapılar için önerilen “kuvvetli kolon-zayıf kiriş” ilkesine göre AISC (American Institute of Steel Construction) standardına göre ASD (Allowable Stress Design-Emniyet Gerilmesine Göre Hesap) yaklaşımı ile boyutlandırılmış çok katlı bir yapının dinamik analizi sonucu elde edilmiştir. Seçilen yapı sistemi üzerinde deprem hareketinin yarattığı etkileri görebilmek için, Krawinkler & Bertero ve Popov’un hazırladıkları “Inelastic Behaviour of Steel Beam-to-Column Subassemblages” isimli raporda (Krawinkler, 1971) da kullanılan çok katlı ofis binası ele alınmıştır. Bu bina 4 açıklığa ve 20 kata sahip olup, toplam yüksekliği yaklaşık 75 metredir (bkz. Şekil 3.1). Kiriş açıklıkları akstan akşa 730 cm olup, üst katlara çıktıkça azalma eğilimi gösteren kapasite istemine bağlı olarak kolon kesitleri küçülmektedir.



Şekil 3.1 : Referans alınan bina çerçevesi (Krawinkler, 1971).

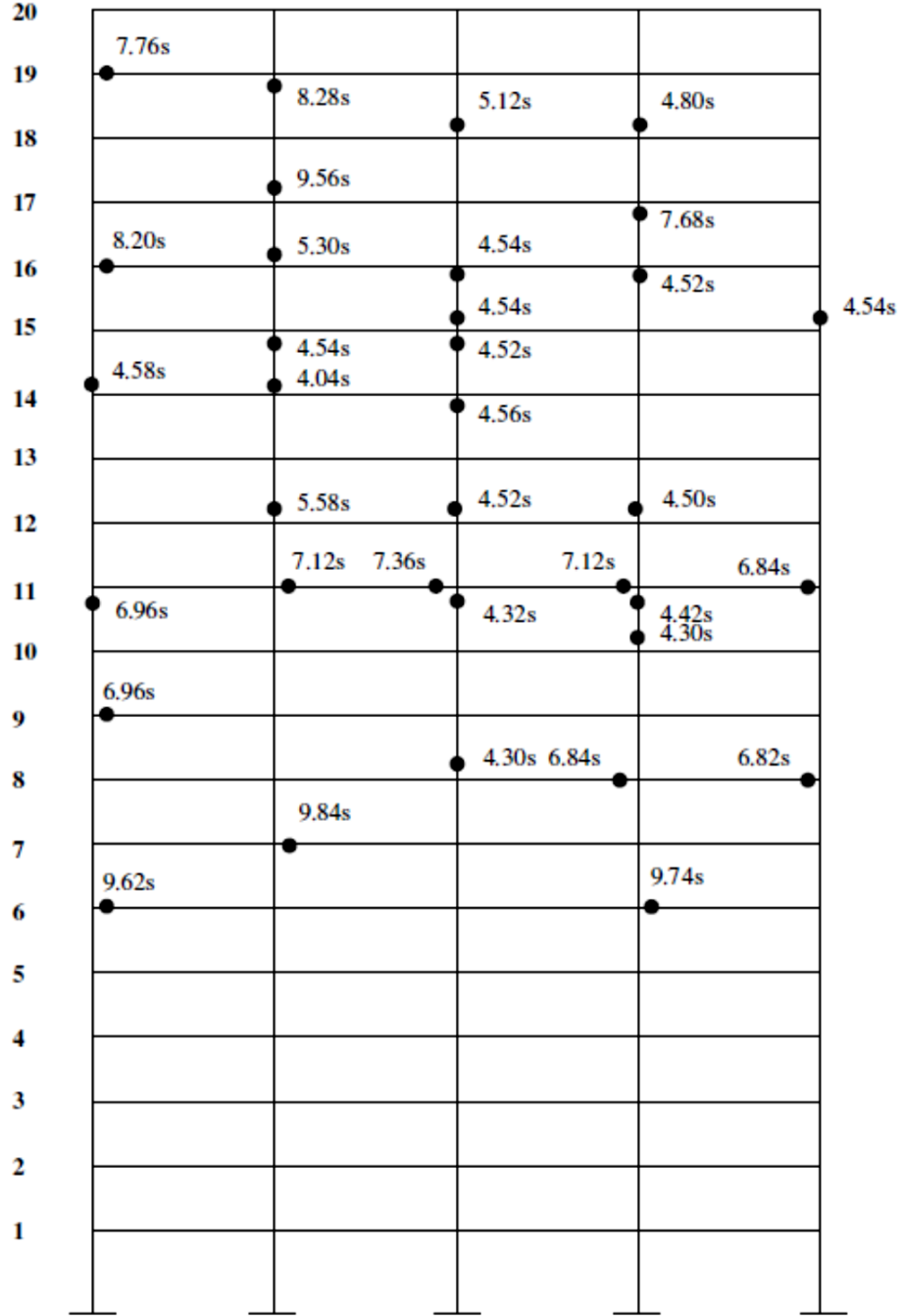
Yapıya ait analizler gerçekleştirilirken, Amerikan yerine Avrupa tipi muadil profil kesitleri kullanılmış ve kesit özellikleri benzer ve yaklaşık olan bu kesitlerle modelleme benzeştirmesi yapılmıştır. Kiriş kesitleri seçiminde en yakın özellikli IPE kesitler seçilmiş, kolon kesitlerinin seçiminde ise birebir aynı özelliklere sahip HD tipi kesitler kullanılmıştır. HD kesitlerin WF kesitler ile tam uyumlu olması, kesit seçimi açısından avantaj yaratmıştır.

Analizler, Prof.Dr.Erdoğan Uzgider tarafından yazılıp Dr. Kadir Özakgöl tarafından geliştirilen ve üç boyutlu çelik çerçevelerin üç bileşenli deprem yükleri etkisinde göçme mekanizmalarının ve sünekliğinin belirlenmesi amacıyla kullanılabilen ve FORTRAN dilinde yazılmış olan bir bilgisayar programı (Özakgöl, 2006) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Bu programda malzeme ve geometrik açıdan lineer olmama durumu dikkate alınmaktadır. Üç boyutlu analiz yapabilen bu program, bu çerçeve için iki boyutlu olarak kullanılmıştır. Bilgisayar analizlerinde, iki ayrı deprem yer hareketi dikkate alınmıştır. Bunlardan ilki, Imperial Valley (El Centro) , diğeri de Northridge depremi Sylmar County Hospital kayıdır. Bu deprem hareketlerinden El Centro uzak kaynaklı deprem, Northridge ise yakın kaynaklı deprem karakteristiğine sahiptir.

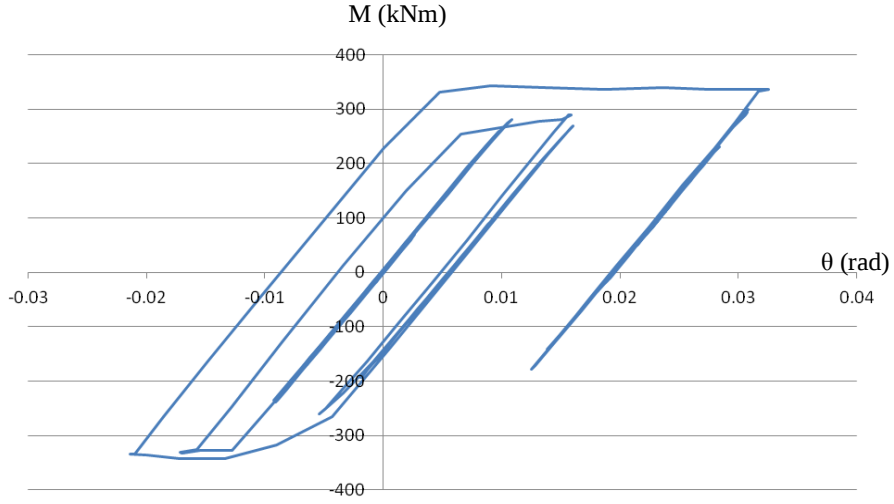
Yapılan analizler sonucu, yapıda en erken ve en çok sayıda plastik mafsall oluşumunun Northridge deprem kaydı sonucu olduğu görülmüştür.

Analizlerde kullanılan bilgisayar programı, plastik mafsall yaklaşımını esas almaktadır. Buna göre çubuk elemanların uç düğüm noktalarında plastik şekil değiştirmelerin yoğunlaştığı kabul edilmektedir. Buna bağlı olarak ele alınan yapının Northridge yer hareketi sonucu oluşan plastik mafsallarının dağılımı aşağıda verilmektedir. Şekilde, ilk 10 saniyede oluşan plastik mafsallar ve oluştukları zaman adımları gösterilmektedir.

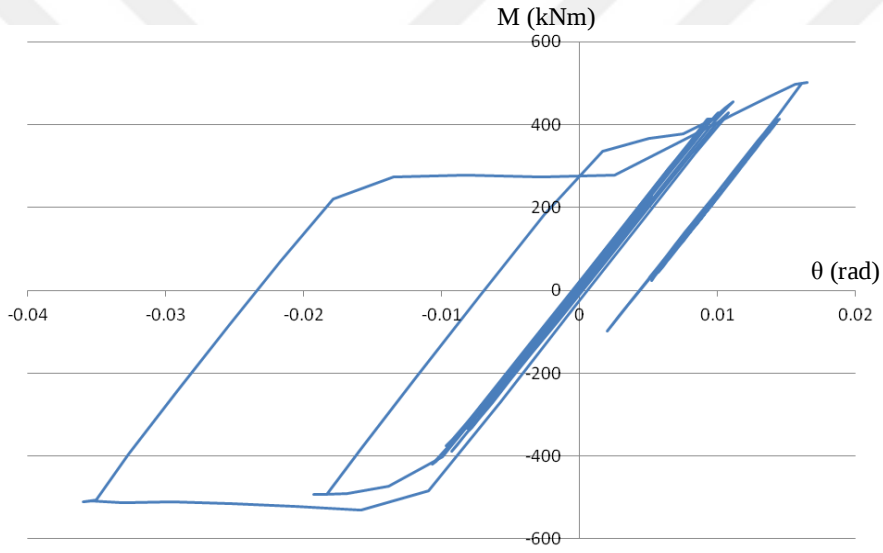


Şekil 3.2 : Northridge yer hareketi etkisiyle oluşan plastik mafsallar.

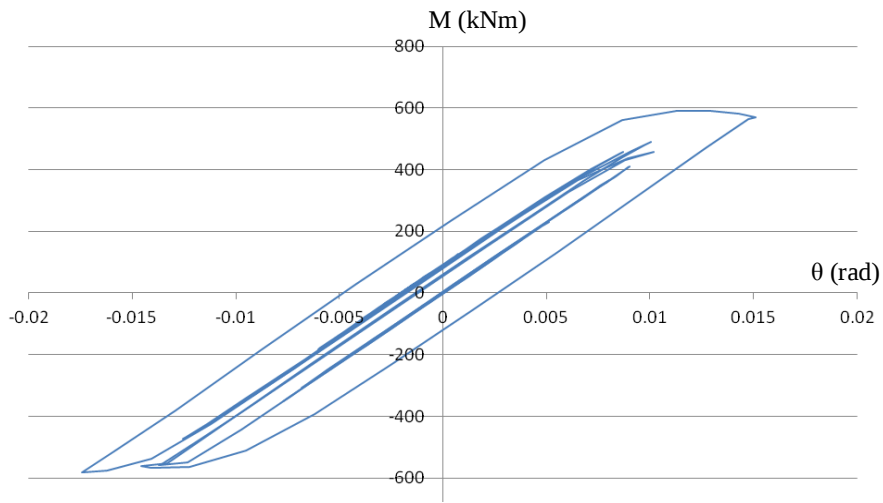
Yapıda çok daha fazla hasar oluşturan Northridge deprem kaydı sonrasında elde edilen kiriş veya kolon uç noktalarındaki moment-dönme eğrilerine ait en kritik örnekler aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



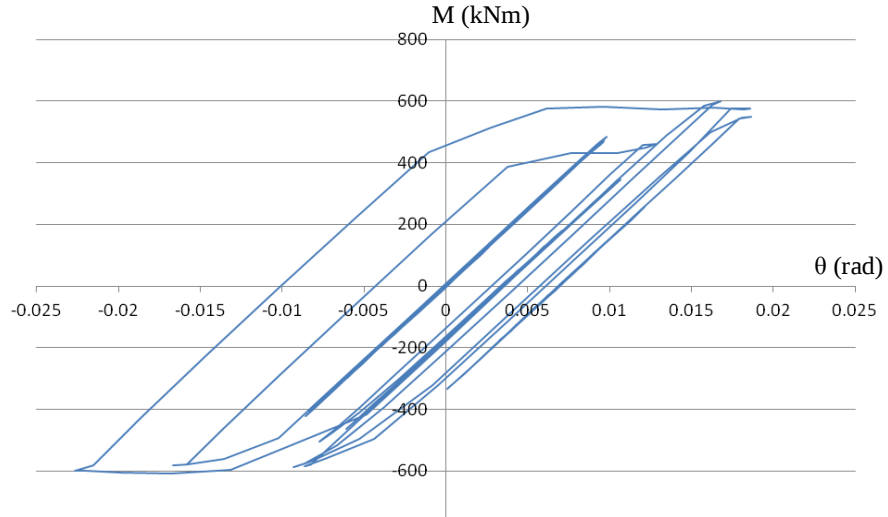
Şekil 3.3 : 16.kat , $t=8.20s$ kiriş ucu plastik mafsalı.



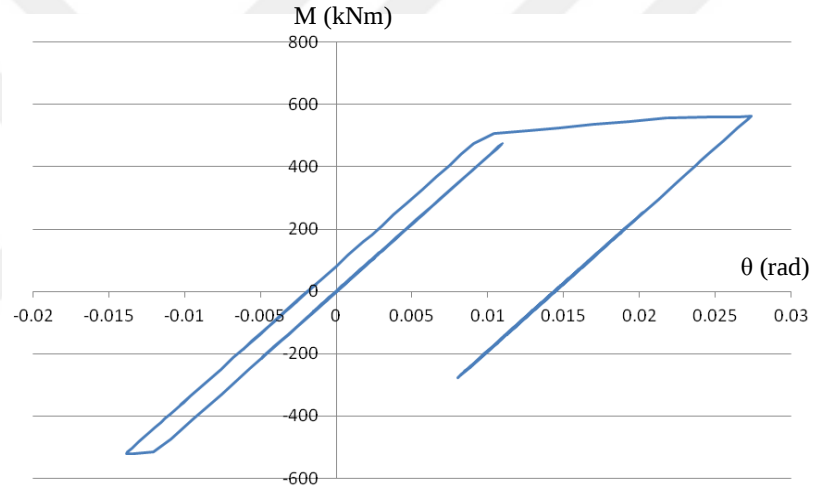
Şekil 3.4 : 12.kat , $t=5.58s$, kolon dibi plastik mafsalı.



Şekil 3.5 : 8.kat , $t=6.82s$ kiriş ucu plastik mafsalı.



Şekil 3.6 : 9.kat , $t=6.96s$ kiriş ucu plastik mafsalı.



Şekil 3.7 : 11.kat , $t=6.84s$ kiriş ucu plastik mafsalı.

Verilen bu eğrilerin seçiminde, ilgili noktanın olabildiğince erken plastik mafsall oluşumu yaşaması ve plastik bölgede olabildiğince çok sayıda tekrarlı gerilmeye maruz kalması dikkate alınmıştır. Belirtilen bu nedenlerle, 9.kat kenar kiriş-kolon birleşimi deney numunesi olarak seçilmiştir. Bu detayda, kiriş olarak IPE 550 , kolon olarak HD 360x196 kullanılmaktadır.

Belirlenen bu kesite haiz deneysel ve nümerik çalışmalar, ilerleyen bölümlerde sunulmaktadır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Kapsam

Araştırma kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmanın ilk adımı olarak, kullanılacak malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda ilk olarak malzemeye dair mekanik deneyler gerçekleştirilmiştir. Malzeme davranışına yükleme hızının etkisinin incelenmesinden sonra, gerçek boyutlu numunelerin imalatlarına yönelik çalışmalara geçilmiştir.

4.2 Malzeme Deneyleri

Gerçek boyutlu numunelerle yapılacak testler, kullanılan malzeme, harcanan enerji ve zaman açısından maliyeti yüksek çalışmalardır. Bu çalışmalara başlamadan, bunlardan elde edilecek sonuçların yükleme hızı ile değişiminin ne mertebede olacağı sorusunun cevabını verecek kısmen teorik kısmen nümerik ve deneysel bir ön çalışmanın yapılmasında fayda görülmüştür. Bu ön çalışma şöyle özetlenebilir (Bannantine, 1989) :

Coffin ve Manson, 1950’lerde plastik deformasyon (strain) – yorulma ömrü (N) datasının, log-log koordinat sisteminde lineerleştirilebileceğini göstermişlerdir.

Buna göre plastik birim uzama, bir kuvvet fonksiyonu ile ilişkilendirilebilir:

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon_f' (2N_f)^c \quad (4.1)$$

Burada, $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2}$ plastik birim uzama genliği, $(2N_f)$ yük taşıma kapasitesi kaybına kadar yarım çevrim sayısı, ε_f' yorulma süneklik katsayısı, c yorulma süneklik eksponenti olup, bu katsayılar test sonucuyla belirlenir.

Yorulma süneklik katsayısı ε_f' , yaklaşık olarak gerçek kırılma sünekliği olan ε_f değerine eşittir ve $\varepsilon_f' = \varepsilon_f$ olarak yazılabilir. Bu ifadede,

$$\varepsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1-RA}\right) \quad (4.2)$$

ve RA değeri kopma gerçekleşen noktadaki kesit kaybı olarak,

$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (4.3)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A_0 aksenal çekme etkisindeki bir çubuğun boyun bölgesi orjinal enkesit alanıdır. A_f ise kopma oluşan noktadaki son enkesit alanını ifade eder.

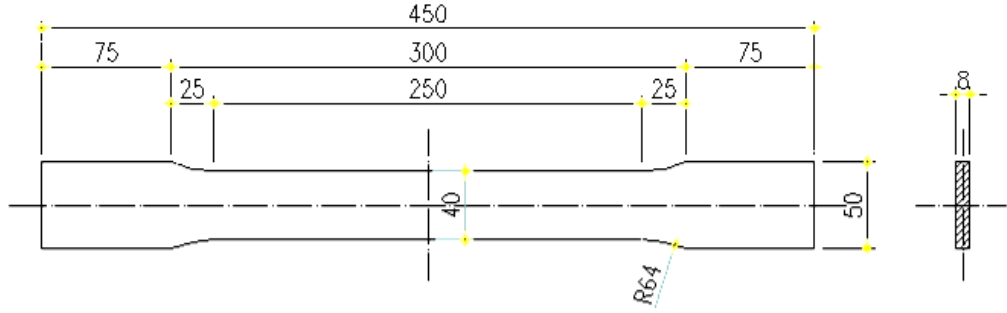
Yorulma süneklik eksponenti c ise, yükleme hızından bağımsız olarak -0.5 ile -0.7 arasında bir değer alır. Bu durumda, eğer ε_f değeri yükleme hızıyla değişirse, bu durumda plastik birim uzama-yorulma ilişkisinin de yükleme hızıyla değişeceği çıkarımı yapılabilir.

Öte yandan, çeşitli yükleme hızları için kontrollü olarak yapılan aksenal çekme testlerinden, ε_f değerinin değişip değişmediğini ve bu değişimin değerinin anlamlı olup olmadığını belirlemenin mümkün olabileceği görülmektedir.

Bu bağlamda, gerçek boyutlu kiriş-kolon numuneleriyle yapılması planlanan yorulma testlerinden evvel böyle bir testin yapılması, beklenen sonucun önden kestirilmesi açısından önem arz etmiştir.

Çalışma kapsamında yapılacak deneylerde kullanılacak malzemenin davranışı, 4 farklı yükleme hızı için hazırlanan toplam 12 adet numune üzerinde incelenmiştir.

Söz konusu testler, İTÜ Kimya ve Metalürji Fakültesi, Malzeme Mühendisliği Bölümü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan numuneler ASTM A370 standardına uygun boyutlarda ve S275 kalitesinde malzemedan hazırlanmıştır. Numune boyutları Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1 : ASTM'ye uygun deney numunesi (ölçüler mm'dir).

Deney öncesi numune boyutları kumpas yardımıyla tekrar ölçülmüştür. Boyutlar ve numunelere uygulanan çekme hızları, Çizelge 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1: Çekme testi numuneleri.

Numune no.	Kalınlık (mm)	En (mm)	Yüklemeye hızı (mm/dak)
1	8.05	39.80	1 mm/dak
2	8.05	40.05	"
3	8.05	40.10	"
4	8.05	40.20	10 mm/dak
5	8.05	40.10	"
6	8.05	40.10	"
7	8.05	40.00	50 mm/dak
8	8.05	40.10	"
9	8.05	40.10	"
10	8.05	39.80	5 mm/dak
11	8.05	40.20	"
12	8.05	40.10	"

Numuneler, 1000 kN yük kapasiteli SHIMADZU marka ve UH-F1000kNI model çekme makinesinde kopmaya kadar çekilmiştir. Adı geçen cihaz, TRAPEZIUM isimli bir yazılım yardımıyla kontrol edilmekte ve bu yazılım yardımıyla her an numune üzerine etkiyen yük ve deplasman izlenebilmektedir. Test sisteminin genel görünüşü Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Malzeme deneyi test sistemi.

Test cihazında üst başlık yerinde sabit durmakta, alt başlığın aşağıya doğru hareketiyle numuneye çekme etkisi uygulanmaktadır. Farklı hızda yüklemelerin yapılabilmesi, test cihazının alt başlığının deplasman hızını ayarlamakla mümkündür. Söz konusu cihaz, 1 mm/dak ile 70 mm/dak arası hızlarda çekme testi yapmaya olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, 1 mm/dak, 5 mm/dak, 10 mm/dak ve 50 mm/dak olmak üzere 4 farklı hızda, üçer numuneden toplamda 12 numune test edilmiştir. Halihazırda cihaz, ilgili personel tarafından rutin olarak 5 mm/dak hızla çelik çubuk çekme testlerinde kullanılmaktadır. Numunelerin test öncesi toplu görünüşü ve bir numunenin test sonundaki kopmuş tipik hali, Şekil 4.3'te verilmiştir.



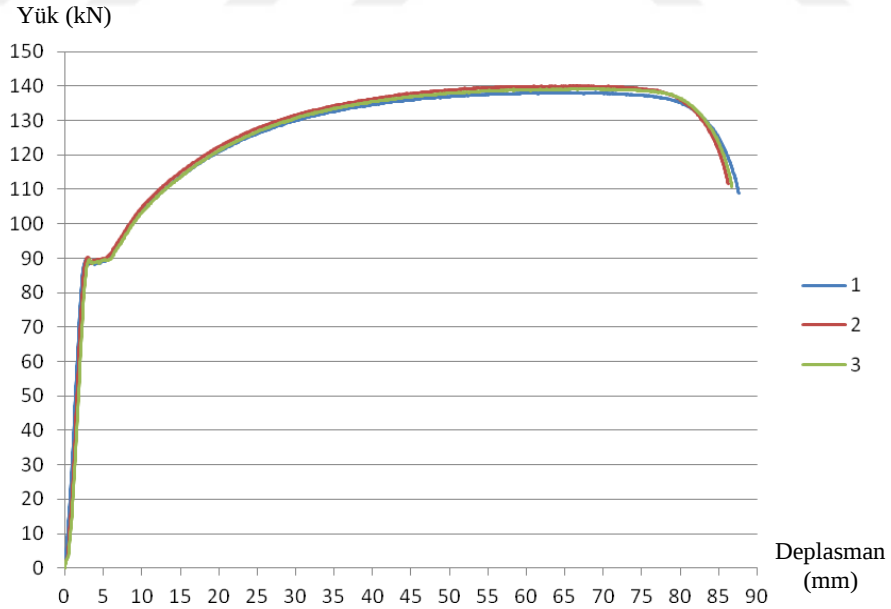
Şekil 4.3 : Deney öncesi ve sonrası numuneler.

Yapılan 12 deney sonrasında, numunelerin artan hıza bağlı olarak Çizelge 4.2’de verilen değerlerde akmaya eriştiği gözlenmiştir.

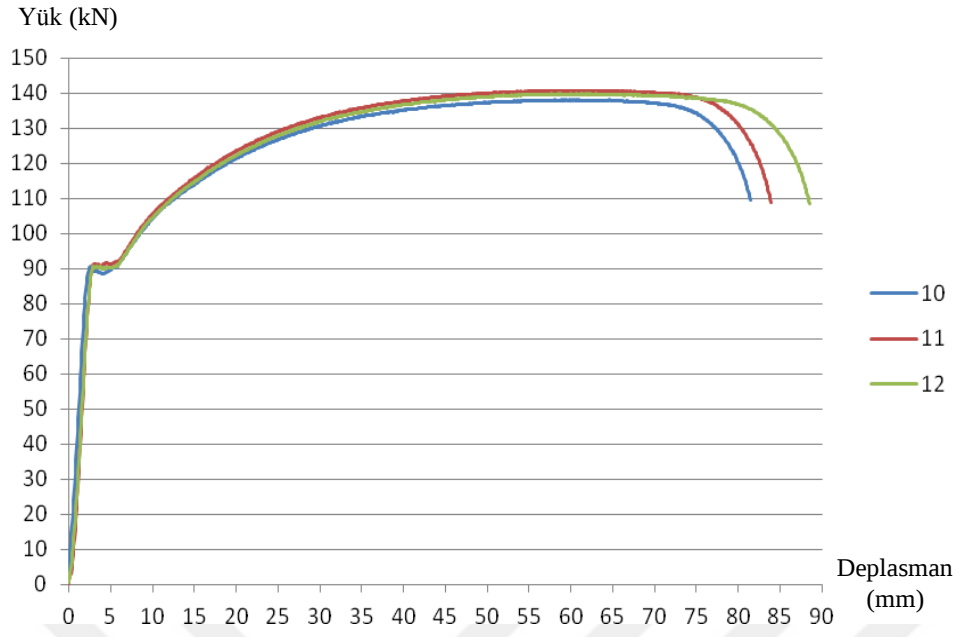
Çizelge 4.2: Test sonucu elde edilen akma gerilmeleri.

Numune no.	Yükleme hızı (mm/dak)	Akma gerilmesi (MPa)	Ortalama akma gerilmesi (MPa)
1	1 mm/dak	278.57	279.07
2		280.22	
3		278.42	
10		282.57	
11	5 mm/dak	285.22	284.04
12		284.33	
4		287.53	
5	10 mm/dak	289.65	287.65
6		285.78	
7		299.88	
8	50 mm/dak	292.17	295.58
9		294.68	

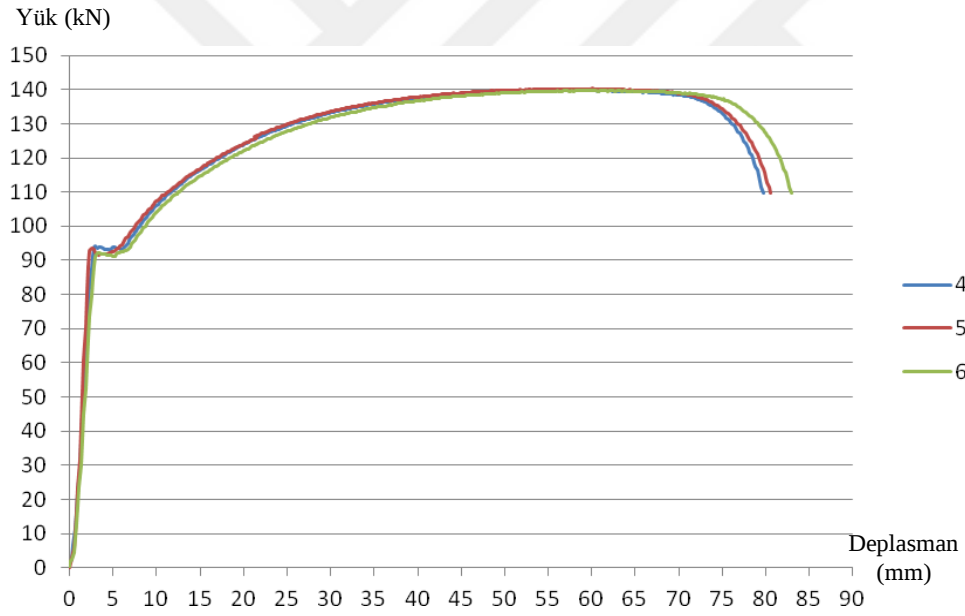
Deneyler sonucunda 4 farklı hız için gözlenen “uygulanan yük – uygulanan deplasman” ilişkisi, artan hıza bağlı olarak aşağıdaki biçimde ortaya çıkmıştır:



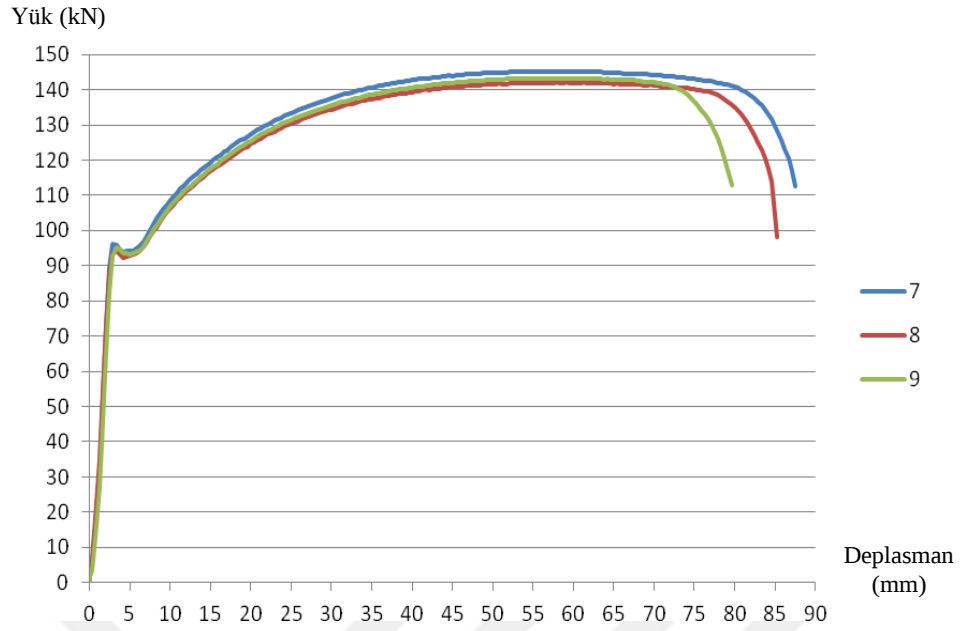
Şekil 4.4: 1 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.



Şekil 4.5 : 5 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.



Şekil 4.6 : 10 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.



Şekil 4.7 : 50 mm/dak hız için yük-deplasman ilişkisi.

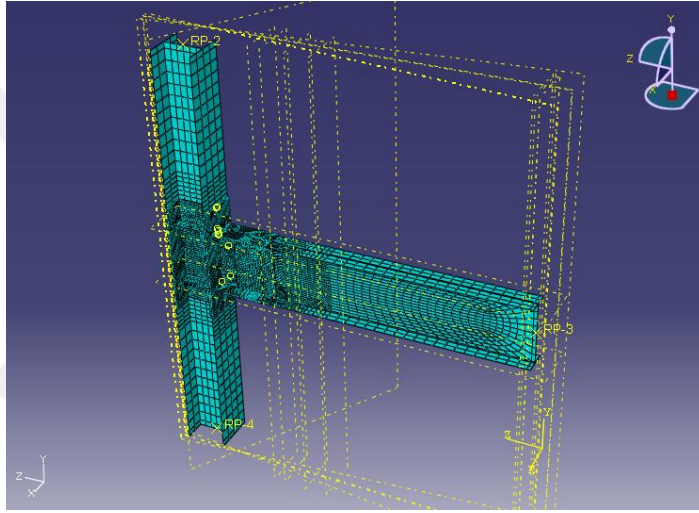
Testlerin sonunda, kopan numunelerde kopmanın olduğu noktalarda enkesit alanları ölçülmüş ve farklı hızla yükleme sonucunda her bir grup için ortalama olarak, 5 mm/dak hızla yükleme sonucu ortalama $A_f = 1.27 \text{ cm}^2$, 10 mm/dak hızla yükleme sonucu ortalama $A_f = 1.32 \text{ cm}^2$, 50 mm/dak hızla yükleme sonucu ortalama $A_f = 1.35 \text{ cm}^2$ bulunmuştur. Buna göre, (4.2) ve (4.3) bağıntıları kullanılarak, 5 mm/dak hızla yükleme sonucu $\varepsilon_f = 0.9241$, 10 mm/dak hızla yükleme sonucu $\varepsilon_f = 0.8855$, 50 mm/dak hızla yükleme sonucu $\varepsilon_f = 0.8631$ elde edilmektedir.

4.2.1 Deney sonuçlarının yorumu

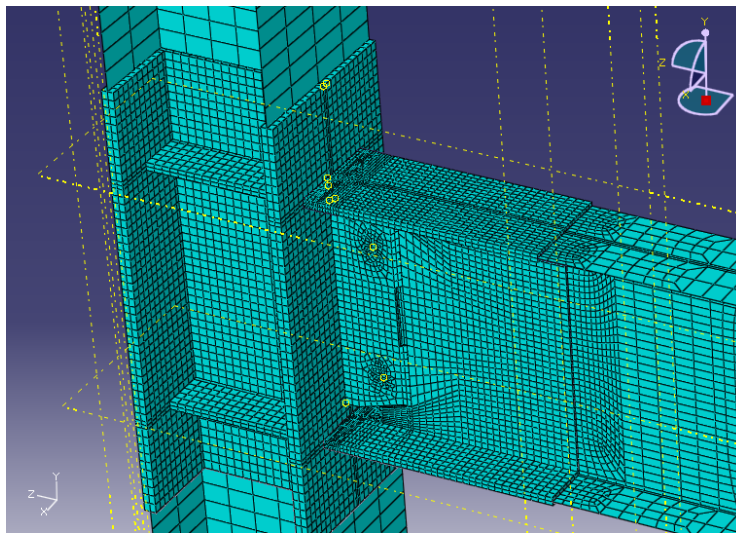
Üç farklı yükleme hızları (5 mm/dak, 10 mm/dak, 50 mm/dak) için σ_y akma gerilmesi ve ε_f parametresi farklı değerler almıştır. Buna bağlı olarak (4.1) denklemiyle tanımlanan Coffin-Manson denkleminin de yükleme hızına bağlı olarak değişim göstereceği açıktır. Deney sonucunda ε_f parametresinin değerleri için (4.1) denklemi için elde edilen değişim miktarının, gerçek boyutlu kiriş-kolon birleşimi numuneleri için de geçerli olup olmadığının araştırılması için yeterli seviyede olduğu sonucuna varılmıştır.

4.2.2 Nümerik ön analizler

Deney numunesinin davranışını simule edebilmek amacıyla, ABAQUS programı yardımıyla bir sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Modelde kullanılan malzeme karakteristikleri, bir önceki bölümde sözü edilen farklı hızlar için çekme testleri sonucu elde edilmiştir. Kiriş-kolon birleşim bölgesinde birebir geometri yakalanmaya çalışılmış ve örneğin kesme kuvvetini aktaracak kayma elemanı (shear tab) ve bunda açılacak montaj bulonu deliklerini de içeren ve üç boyutlu (solid) elemanlarla modellenmiş birleşim detayına sahip bir sonlu eleman modeli hazırlanmıştır. Modelin genel ve detay görünüşü, aşağıda Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da verilmiştir.

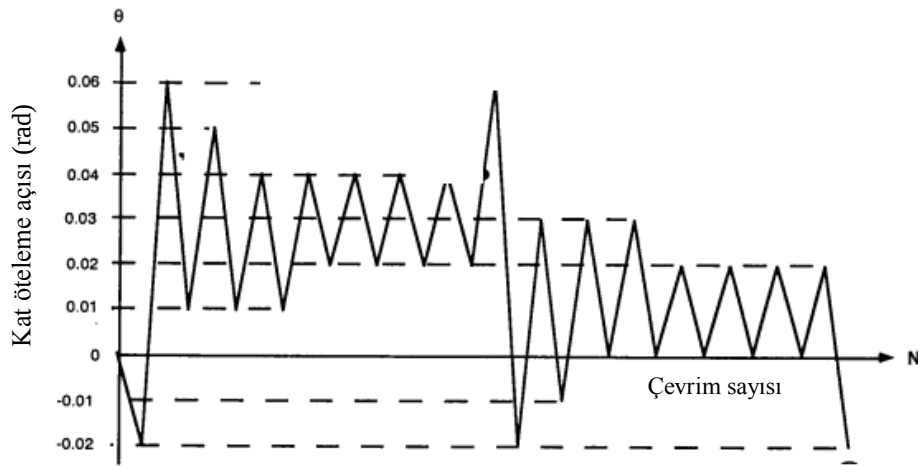


Şekil 4.8 : Hazırlanan sonlu eleman modelinin genel görünüşü.



Şekil 4.9 : Modele ait detay görünüşü.

Deprem anında yapılara etkiyen yüklerin özellikle kiriş-kolon birleşimlerinde oluşturduğu etkileri görebilmek için, yaygın olarak FEMA yükleme protokolü kullanılmaktadır. Uzak kaynaklı deprem hareketinin simulasyonunu sağlayan bu yükleme tipi yerine, yakın kaynaklı depremlerin etkisini incelemeye olanak veren ve Krawinkler tarafından önerilen bir başka yükleme protokolü de mevcuttur (Krawinkler, 2000). Bu yükleme protokolünde, büyük amplitüdlü yüklemeler ard arda kullanılmaktadır. Belli çevrim sonrasında, bu yükleme protokolü kendini tekrarlamaktadır. Yakın kaynaklı deprem hareketine dair yükleme protokolü, Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.10 : Yakın kaynaklı yer hareketine dair yükleme protokolü.

İmalatta ve montaj aşamasında gösterilen tüm özene rağmen, çelik yapı elemanları ve dolayısıyla benzer şekilde deney numunelerinde de çeşitli önkusurlar ortaya çıkabilmektedir. Bu durumu sonlu eleman modellerine yansıtabilmek amacıyla, deney numunesi modelinde çeşitli mertebelerde önkusur oluşturularak analizler gerçekleştirilmiştir.

Modellerde önkusur tanımlayabilmek için ilk olarak özdeğer (eigenvalue) analizi yapılmış ve ilk iki modun, sırasıyla üst ve alt başlıklarda yerel burkulma durumuna karşılık geldiği görülmüştür. ABAQUS ortamında bu ilk analize ait deforme olmuş geometri belirli katsayıyla ölçeklenerek esas analiz için önkusurlu model olarak kullanılabilmektedir. Bu amaçla ilk iki modun lineer kombinasyonu ile bulunan ve kiriş boyunca maksimum genliği 0.5 mm olan sinüzoidal önkusurlu başlıklara sahip model kullanılmıştır. Bu değer, yaklaşık olarak kiriş uzunluğunun $1.7 / 10,000$ 'ine

denk gelmektedir. Bu önkusur, Castiglioni tarafından yazılan referans makalede kullanılan 1/10,000 değeriyle uyumludur (Castiglioni, 2005).

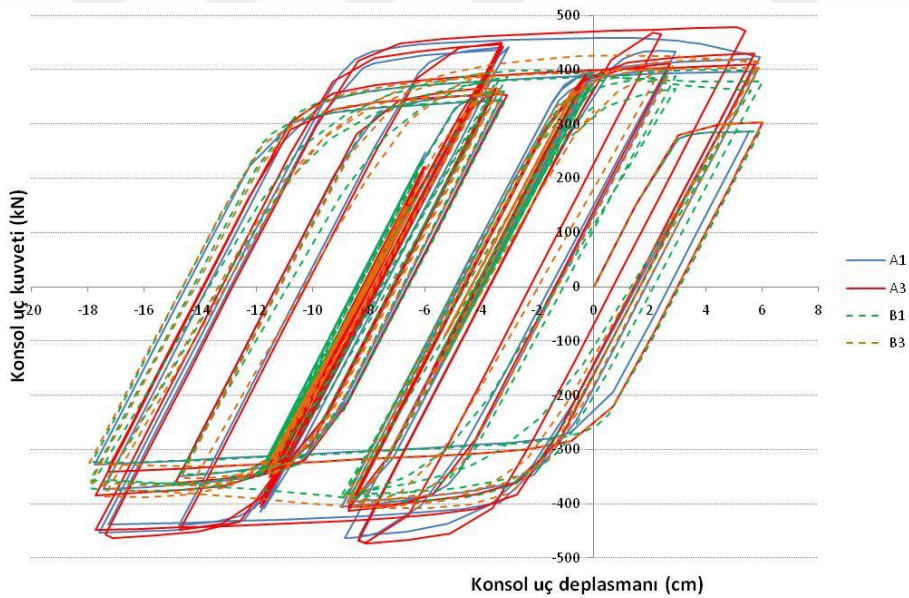
Analizlerde, yükleme hızını da dikkate alabilmek amacıyla önkusurlu ve önkusursuz modeller için yavaş ve hızlı yükleme durumları simule edilmeye çalışılmıştır. Burada, yapılan analizlerden özet olarak 4 modelin sonuçları verilecektir. Modellerin adlandırılması ve önkusur ve yükleme hızı açısından farklılıkları şöyledir :

A1 – önkusursuz , yavaş yükleme , B1 – önkusurlu , yavaş yükleme

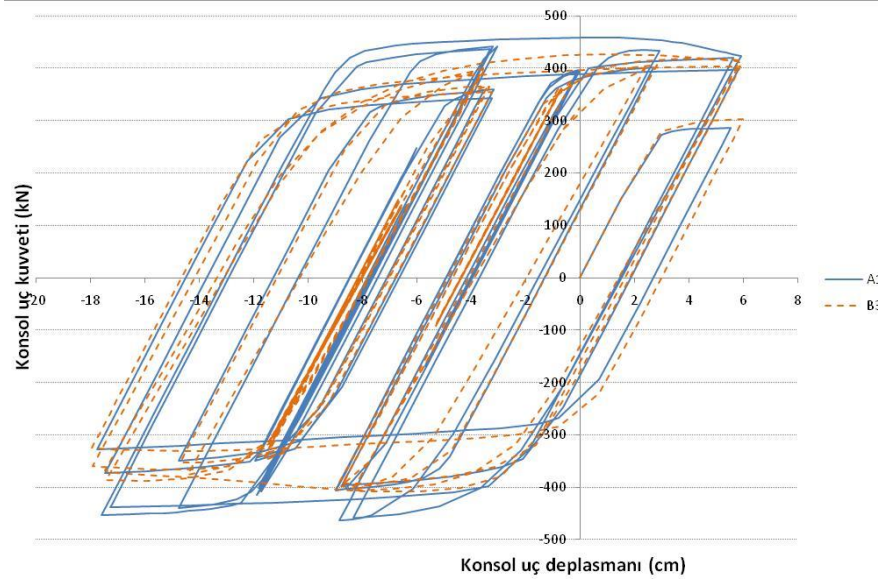
A3 – önkusursuz , hızlı yükleme , B3 – önkusurlu , hızlı yükleme

Yavaş yükleme, yaklaşık olarak Castiglioni'nin referans makalesinde kullanılan hıza karşılık gelmektedir. Hızlı yükleme olarak bunun 100 katı hız dikkate alınmıştır. Yükleme protokolü, Krawinkler tarafından önerilen yakın kaynaklı deprem etkisini yansıtan yükleme protokolüdür (Krawinkler, 2000). Analizlerde yavaş yükleme, bu protokolün (fiktif olarak) 17,000 saniyede; hızlı yükleme ise (fiktif olarak) 170 saniyede uygulanmasına karşılık gelmektedir.

Aşağıda Şekil 4.11'de dört analize ait eğriler bir arada gösterilmiştir. Daha açık olması açısından A1 ve B3 modellerine ait eğriler, Şekil 4.12'de tekrar verilmiştir.



Şekil 4.11 : Farklı hız ve önkusur durumuna göre davranışlar.



Şekil 4.12 : A1 ve B3 nümerik modellerinin davranışları.

Eğrilerin incelenmesinden görülmektedir ki, hızlı yükleme esnasında uygulanması gereken kuvvetler yavaş yüklemeye nazaran artış gösterse de, önkusurlar etkisiyle ilerleyen adımlarda davranışta belirgin değişim gözlenmekte ve ulaşılan pik kuvvet değerlerinde düşüşler ortaya çıkmaktadır. Beklenen bu durum sonucunda yutulabilecek enerjide de değişimler gözleneceği açıktır.

4.3 Reaksiyon Çerçevesi

Gerçek boyutlu numunelerin kullanıldığı tüm deneyler, HASLAB Yorulma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Bu laboratuvar, İTÜ-TCDD yakın işbirliği ve NATO Science for Stability (SfS) araştırma programınca sağlanmış destek ile 1990-1996 yılları arasında yürütülen ve başarıyla sonuçlandırılan TU-BRIDGES kodlu “Rehabilitation of Old Railway Bridges” isimli proje kapsamında 1994 yılında kurulmuştur. Proje sonunda tüm test ekipmanı ve donanım, NATO tarafından İTÜ'ye bağışlanmıştır. Kurulduğu yıldan beri, TCDD tarafından her türlü aynı yardım sağlanmaktadır.

400 m²'si kapalı, toplam 1000 m²'lik alana sahip laboratuvarda, 12.5 ton ve 5 tonluk iki adet kren çalışabilmektedir. Deney alanı 18 m × 8 m alana sahip olup, 1.2 m kalınlığında betonarme kuvvetli yer döşemesi (strong-floor) bulunmaktadır. 90 ton ağırlığa sahip yükleme çerçevesi, sonsuz yorulma ömrüne haizdir. Bu çerçeveye bağlı olarak düşey doğrultuda bağlı 2 adet 500 kN ve 250 mm stroke kapasiteli iki

adet MTS servo-actuator mevcuttur. Ayrıca bir adet de 50 kN kapasiteli MTS veren bulunmaktadır.

Yüksek frekanslı yüklemelerde enerji ve zaman kaybı olmaksızın hidrolik verenlerin beslenebilmesi için, hidrolik hat üzerine MTS manifold yerleştirilmiştir. Bu manifoldun kontrolü, kontrol odasındaki MTS konsoldan gerçekleştirilmektedir. Sistemdeki yağın dolaşımı, hava soğutmalı fana sahip 180 lt/dak kapasiteli ve bilgisayar kontrollü pompa tarafından kumanda edilebilmektedir.



Şekil 4.13 : HASLAB Laboratuvarı genel görünüşü.

Laboratuvar, bugüne kadar demiryolu köprülerinin yorulma ömürlerinin tayini ile ilgili testler kapsamında kullanılmıştır. Son zamanlarda ise, özellikle TCDD'nin yeni demiryolu hatlarında kullanacağı ray ve traverslere ait yüksek tekrarlı yorulma testlerini yürütmektedir.

Laboratuvardaki hidrolik verenlerin pozisyonları nedeniyle, deney numunelerinin uygulanan kuvveti zemine aktarabilmeleri için, bir adet reaksiyon çerçevesi yaptırılması gerekmiştir. S275 kalitesinde malzemeden yapılan bu reaksiyon çerçevesi, deney numunesinin kolon uçlarındaki reaksiyonları karşılamaktadır. Bu çerçeve, Şekil 4.14'de beyaz renkli olarak görülebilir.



Şekil 4.14 : Mevcut (sarı) ve yeni (beyaz) reaksiyon çerçeveleri.

İmal ettirilen bu yeni reaksiyon çerçevesi, 6 adet yeni ankraj bulonları ile zemine bağlanmaktadır. Ayrıca, deney numunesinin alt kolon ucunun da zemine yeni bir yastık kirişiyle bağlanması gerekmiştir. Bunlara ek olarak, deney sırasında numunenin yanal burkulma yapmasını engelleyebilmek amacıyla, yeni bir yanal tutucu bileşen imal ettirilmiştir. Numuneler hariç tüm bu yeni imalatların toplamı yaklaşık 18 ton ağırlığındadır. Tüm bulonlu birleşimlerde 8.8 kalitesinde yüksek mukavemetli bulonlar kullanılmaktadır. Tork uygulanmak suretiyle monte edilen bulonlar, sistemin oldukça rijit bir şekilde davranmasını sağlamıştır. Birebir ölçekli deney numunelerinin montaj ve söküm aşamalarında, imalatçı firmadan en az üç kişilik teknik ekip desteği gerekmiştir. Şekil 4.15'te, yerine yerleştirilmiş Test 1 deney numunesi görülmektedir.



Şekil 4.15 : Test 1 deney numunesinin görünüşü.

4.4 Büyük Ölçekli Deneyler

Literatürde, çelik kiriş-kolon birleşimlerine yönelik testlerin çoğunluğu ECCS veya FEMA tarafından tanımlanan ve artan deplasmanların belirli çevrim sayısı ile numuneye etkilendiği testlerden oluşmaktadır. Ancak, hasar birikiminin modellenmesi için, literatürde sınırlı sayıda bulunan sabit amplitüdlü deplasman yüklemesi bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

Testlerde yapılan deplasman yüklemesi, konsol ucuna temel olarak ± 60 mm ve ± 90 mm'lik deplasmanların, hidrolik verenlerin izin verdiği ölçüde iki farklı hızla etkilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Bu deplasmanlara ek olarak pilot test ve son testte farklı genlikler de mevcuttur. Yavaş hızlı yükleme için hidrolik veren hızı 0.24 cm/sn ($=14.4$ cm/dak) , hızlı yükleme için ise yavaş hızın 7 katı olan 1.68 cm/s ($=100.8$ cm/dak) kullanılmıştır. Seçilen minimum hız test sistemi kontrol yazılımının sınırlarına, maksimum hız da uygulanacak kuvvete bağlı olarak seçilmiştir. Sabit genlikli deplasmanlar, üçgen (testere dişi) formunda yüklenmiştir.

Castiglioni tarafından Politecnico di Milano’da yapılan benzer testlerde, hidrolik veren teknik karakteristiği nedeniyle tüm deplasmanlar 2.1 cm/dak’lık hızla yüklenmiştir. Farklı genliklerdeki yüklemelere rağmen hız sabittir. Proje kapsamında gerçekleştirilen ve aşağıda açıklamaları verilen testler sonucunda, Milano’daki testlerle kıyaslama imkanı olacaktır.

Bu testlerde, özellikle gevrek kırılma ile yük taşıma kapasitesi kaybı olasılığının yüksek oluşu sebebiyle tek numune sonuçlarının yanıltıcı olabileceği, bu nedenle de aynı yükleme hali için en az iki numunenin kırılması, elde edilen sonuçlar (yük taşıma kaybına kadar sürdürülebilen çevrim sayısı) arasında %15’i aşan bir fark oluşmaması halinde bu sonuçların benimsenmesi, aksi halde iki adet daha numunenin kırılması ve toplam sonuçların ortalamasının benimsenebileceği doğrultusunda literatürdeki (ASTM, 1982) tavsiyelere uyulmuştur.

4.4.1 Test 1 (Pilot test)

Pilot test olarak da düşünülen bu ilk testte, deney numunesinde konsol ucundan ± 40 mm uygulanmak suretiyle çevrimsel yükleme yapılmıştır. Tipik numune yerleşimi aşağıda Şekil 4.15’de verilmiştir. Hidrolik veren, kolon aksına 3 m mesafeden çevrimsel deplasmanı uygulamaktadır. Yük uygulama noktasına 1 m uzaklıkta numune yanal olarak tutulmuştur. Kirişte oluşturulan kaynak ulaşım deliği ile ilgili ülkemiz standartlarında herhangi bir hüküm bulunmamakla beraber, bu detayın geometrik boyutları, FEMA standardında verilen limitler dahilinde belirlenmiştir. Numunelere ait tüm imalat ve kaynak işlemleri, sertifikalı kaynakçılar tarafından gerçekleştirilmiştir.

Tekrar sayısının 100’e ulaşmasının ardından test durdurulmuş, ardından ± 75 mm deplasman verilerek numunenin göçmeye ulaşması hedeflenmiştir. Bu deplasmana ait ilk çevrim tamamlanmadan birleşimde kaynak erişim deliğinin bitiş bölgesinde kırılma oluşmuş, bu şekilde test sona erdirilmiştir. Numunenin test sonundaki yakından görünüşü Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de verilmektedir.

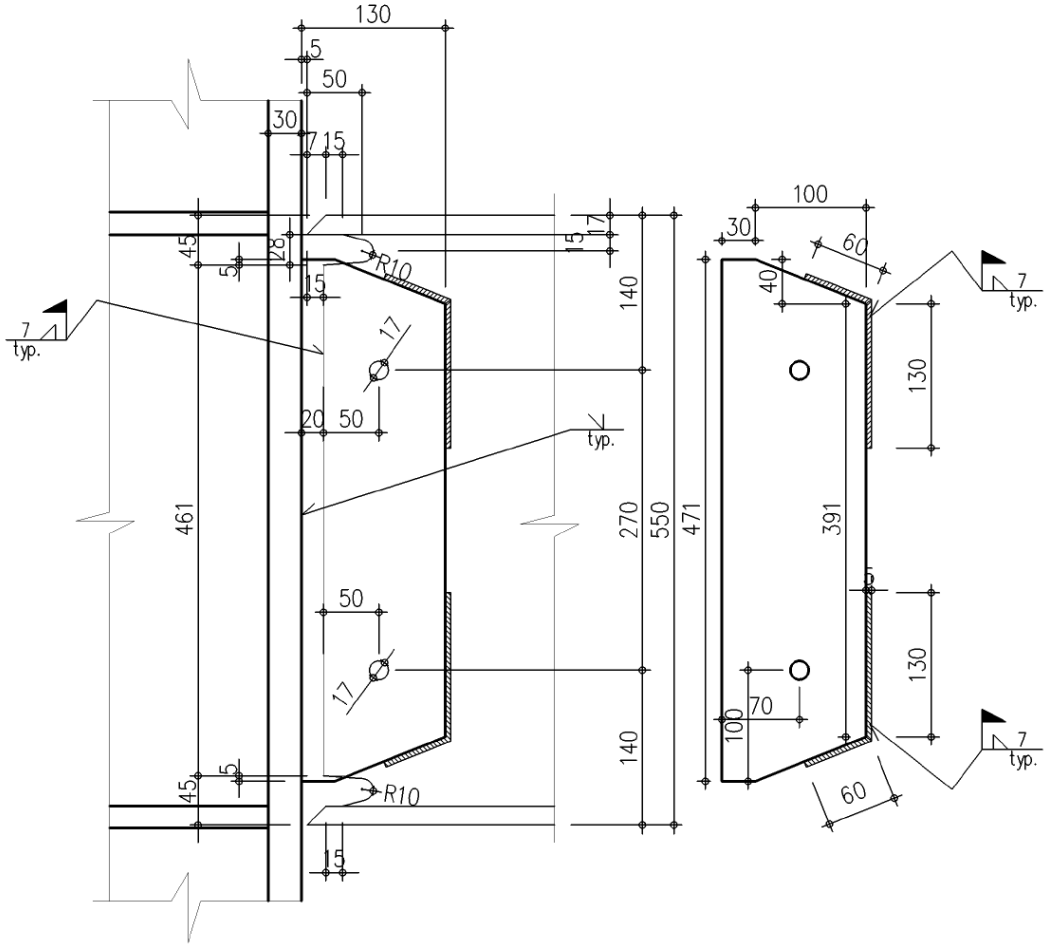


Şekil 4.16 : Test 1 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.17 : Test 1 numunesi deney sonu birleşim altbaşlık bölgesi yakın görünüşü.

Bu pilot testin ardından kaynak erişim deliğinde yine FEMA standardında tanımlanan geometrik koşulları sağlayacak şekilde bir küçültmeye gidilmiş, diğer numuneler de buna göre üretilmiştir. Detayın revize haline ait teknik çizim, Şekil 4.18’de verilmektedir.

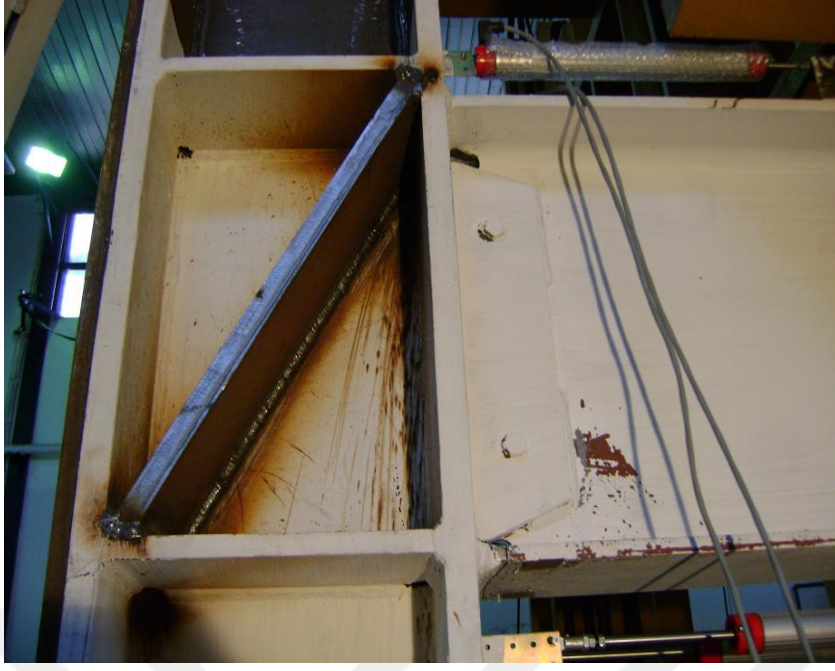


Şekil 4.18 : Birleşim detayı geometrisi.

4.4.2 Test 2 (± 60 mm, yavaş)

1 no.lu testin ardından gerçekleştirilen bu testte, numune ucuna ± 60 mm deplasman uygulanmak suretiyle çevrimsel yükleme yapılmıştır. Test öncesinde numune panel bölgesinde çapraz levha kullanılarak güçlendirme yapılmış, elastik ötesi ve lineer olmayan davranışın kiriş uç bölgesinde gerçekleşmesi amaçlanmıştır. Bu şekildeki güçlendirme, takibeden diğer tüm numuneler için de geçerli olacaktır.

Uygulanan ± 60 mm deplasman, yavaş hızlı (14.4 cm/dak) olarak uygulanmıştır. Sınırlı bir alanda plastikleşme gözlenmiş, ardından kiriş alt başlığını kolona bağlayan kaynak dikişlerinin dibinde ve kayma levhası-kolon bağlantı dikişlerinin belirli bir uzunluğunda kırılma meydana gelmiştir. Kırılmaya kadar $N=103$ çevrim yapılmıştır. Test 2'ye ait test sonu birleşimin görünüşü Şekil 4.19'da, kırılma oluşan bölgenin yakın görünüşü Şekil 4.20'de verilmektedir.

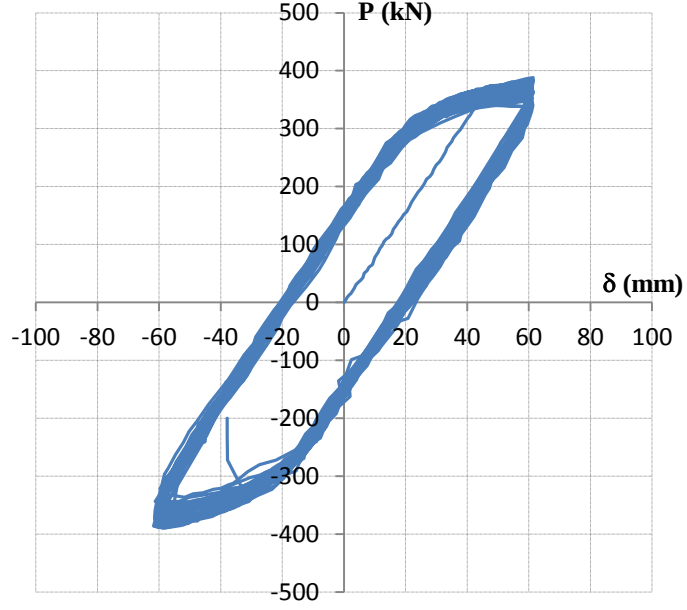


Şekil 4.19 : Test 2 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.20 : Test 2 numunesi deney sonu yakın görünüşü.

Numuneye ait uç kuvveti (P) – uç deplasmanı (δ) ilişkisi Şekil 4.21’de verilmektedir.



Şekil 4.21 : Test 2 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.3 Test 3 (± 60 mm, yavaş)

Bu testte de numune ucuna ± 60 mm'lik deplasman, yavaş hızda uygulanmıştır. Kiriş alt ve üst başlıklarının kolona yakın kısımlarında plastikleşmeler oluşmuş, N=107 tekrar sonunda kiriş alt başlığı küt kaynağı civarında kırılma gözlenmiştir. Bir önceki numuneye benzer şekilde, kiriş başlıklarında plastikleşmeler oluşmuş, numune ise aniden ve gevrek modda kırılma sonucu göçmeye ulaşmıştır. Numuneye ait test sonu görüntüler, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23'de gösterilmiştir.

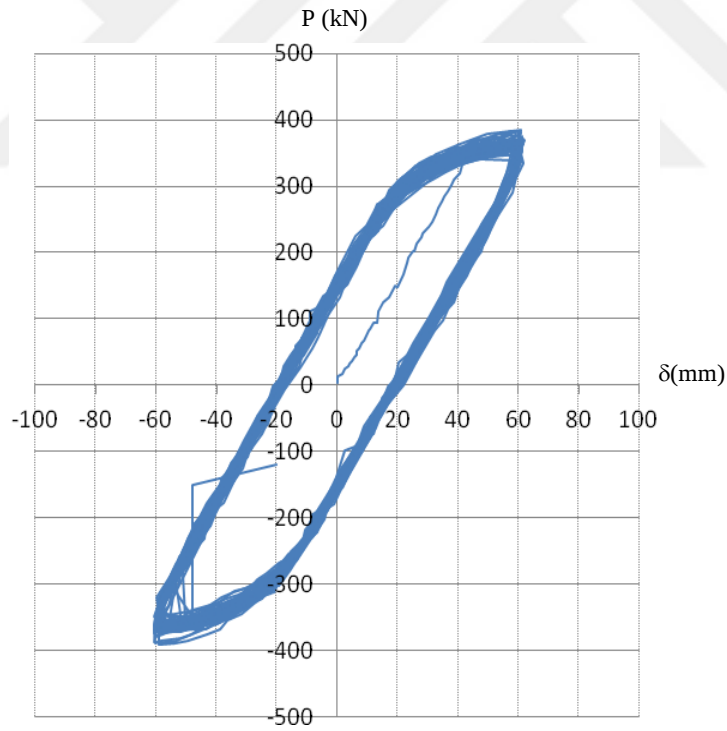


Şekil 4.22 : Test 3 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.23 : Test 3 numunesi deney sonu yakın görünüşü.

Test 3'e ait uç kevveti – uç deplasmanı ilişkisi Şekil 4.24'de verilmiştir.



Şekil 4.24 : Test 3 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.4 Test 4 (± 90 mm, yavaş)

Bu testte, öncekilerden farklı olarak ± 90 mm'lik sabit deplasman genliği kullanılmış, bu deplasman, numuneye yavaş hızda etkitilmiştir. Kiriş başlıklarında plastikleşen bölgeler olmuş, kiriş başlıklarında yerel burkulmalar meydana gelmiştir. Bu durum, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da görülmektedir. Toplam $N=40$ tekrar sonucunda alt başlık kaynaklarında ve kayma levhası-kiriş bağlantı kaynakları ucunda kırılma meydana gelmiştir (bkz. Şekil 4.27). Gözlenen göçme durumu kısmen, Castiglioni tarafından ifade edilen ve “karma göçme modu” olarak adlandırılan “büyük deplasman genliği ile yükleme sonucunda, kiriş başlıklarında oluşan yerel burkulmalarla beraber gerçekleşen kiriş-kolon birleşimi kaynak dikişlerinde gevrek kırılma” durumuna paraleldir.



Şekil 4.25 : Test 4 numunesi deney sonu görünüşü.

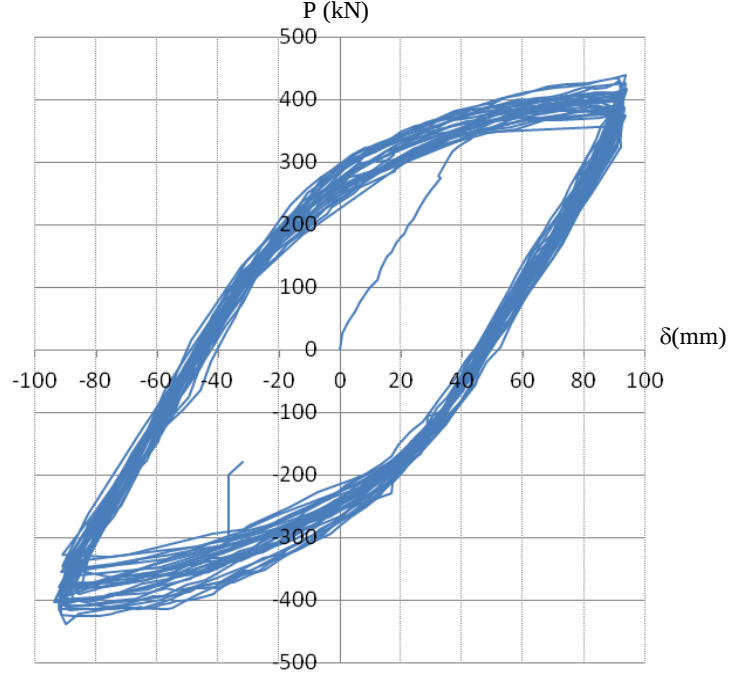


Şekil 4.26 : Test 4 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.27 : Test 4 numunesi deney sonu altbaşlık civarı yakın görünüşü.

Şekil 4.28’de, deney sonucu elde edilen yük-deplasman grafiği verilmiştir.



Şekil 4.28 : Test 4 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.5 Test 5 (± 60 mm, hızlı)

Bu testte, Test 2 ve Test 3’de uygulanan ± 60 mm’lik deplasmana ait yükleme hızında 7 kat artışa gidilmiş ($v_2=7 \cdot v_1$), numune, 100.8 cm/dak hızıyla yüklenmiştir. Bu sayede, yükleme hızının etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Test sonucunda ulaşılan tekrar sayısı $N=128$ olmuştur. Kiriş başlıklarında küçük mertebede yerel burkulma gerçekleşmiştir. Kayma levhasını kirişe bağlayan kaynak dikişlerinin ucundan başlayan çatlak, kayma levhası montaj bulonlarına kadar ilerlemiştir. Kiriş alt başlığı küt kaynak dikişlerinde de kırılma meydana gelmiştir.

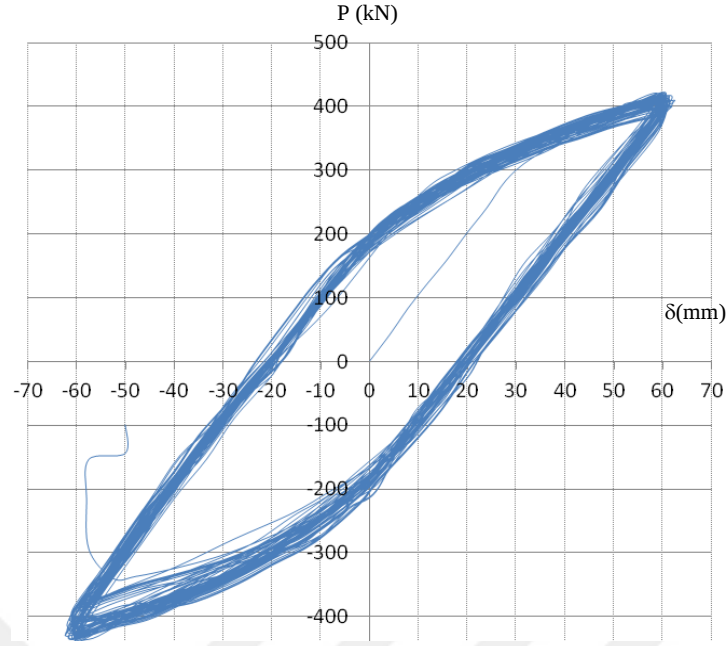
Test sonucunda numuneye ait görüntüler, Şekil 4.29 ve 4.30’da, uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi Şekil 4.31’de verilmektedir.



Şekil 4.29 : Test 5 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.30 : Test 5 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.31 : Test 5 numunesi deney sonu yakın görünüşü.

4.4.6 Test 6 (± 90 mm, hızlı)

Bu testte, Test 4’de uygulanan ± 90 mm’lik deplasmanın hızlı yüklenmesi amaçlanmıştır.

Her deneyde, kiriş konsolunun yanal burkulma yapmasını engelleyen ve konsol ucundan 1 m içeride yerleştirilen çelik dayanak sistemi ile kiriş başlıkları arasında, kirişin düşeyde rahatça hareket etmesini sağlayan, ancak yanal burkulmayı engelleyen tekerlekli parçalar kullanılmaktadır. Bu parçalar, kiriş başlıklarına kaynak dikişleri ile her numunede bağlanmaktadır. Bu parçaların yerine monte edilmiş hali, Şekil 4.32’de verilmiştir.



Şekil 4.32 : Tekerlekli parçalar.

Test esnasında, N=12 tekrara ulaşıldığı anda, Şekil 4.32’de görülen tekerlekli parçayı kirişe bağlayan kaynak dikişlerinde, numuneye yanal burkulma yaptırmaya çalışan yatay kuvvet sonucunda kopma oluşmuş, birleşim bölgesinde plastikleşmeler oluşsa bile herhangi bir göçme durumu yaşanmadan, numune yanal burkulma yapmıştır. N=12 tekrar sonucu birleşimin görünüşü Şekil 4.33’de, konsol ucundaki verenin yanal burkulma sonucu yana yatmış hali Şekil 4.34’de verilmektedir.



Şekil 4.33 : Test 6 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.34 : Test sisteminin görünüşü.

İstenmeyen bu durum sonucunda, 6 no.lu bu testin değerlendirmeye alınmaması ve iptal edilmesi yoluna gidilmiştir.

4.4.7 Test 7 (± 90 mm, hızlı)

Bu testte, Test 6'da uygulanan ± 90 mm'lik deplasmanın hızlı yüklenmesi durumu tekrarlanmıştır. Bu sayede, iptal edilen Test 6 yerine sağlıklı bir test sonucu elde edilmesi amaçlanmıştır.

Test esnasında herhangi bir sorun yaşanmamış, N=17 tekrara ulaşıldığında, giriş alt başlığını kolona bağlayan küt kaynak dikişlerinde ve gövde dikişlerinde kırılma meydana gelmiştir. ± 90 mm'lik deplasmanın yavaş yüklendiği Test 4'ten farklı olarak, Test 7'de herhangi bir yerel burkulma durumu gözlenmemiştir. Test sonucu görüntüler, Şekil 4.35 ve 4.36'da verilmiştir.

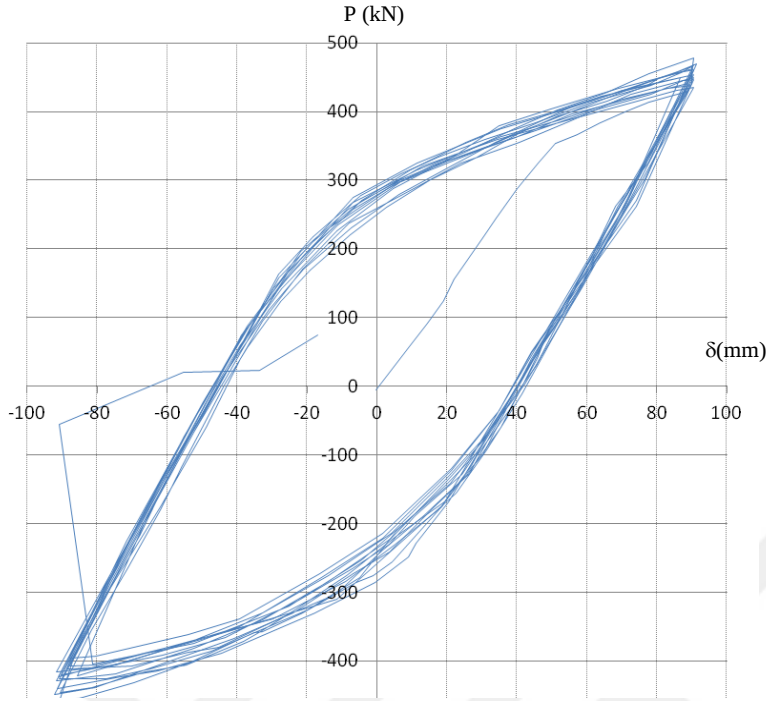


Şekil 4.35 : Test 7 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.36 : Test 7 numunesi deney sonu yakın görünüşü.

Teste ait uç kuvveti – uç deplasmanı eğrisi Şekil 4.37’de gösterilmektedir.



Şekil 4.37 : Test 7 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.8 Test 8 (± 90 mm, hızlı)

Test 7’deki yüklemenin aynısının yapıldığı bu testte (± 90 mm deplasman, hızlı yükleme) , test esnasında herhangi bir sorun yaşanmamış, N=15 tekrara ulaşıldığında kiriş üst başlığını kolona bağlayan küt kaynak dikişlerinde kopma ve kayma levhası-kolon bağlantı dikişlerinde çatlamlar oluşmuştur. Ulaşılan N=15 tekrar sayısının, benzer koşullar altında elde edilen N=17 tekrar ile %10’luk fark göstererek neredeyse üstüste düşmesi, bu tekrar sayılarının güvenilir sonuçlar olduğu kanaatine varılmasını sağlamıştır.

Numune hazırlanması aşamasında kolon panel bölgesinde kullanılan çapraz elemanın diğer numunelerden farklı olarak sola yatık olması sonucunda, kırılma üst başlık kaynaklarında oluşmuştur. Simetrik yükleme nedeniyle herhangi bir kusur yaratmayan bu durumun, diğer tüm numunelerdeki kırılmaların alt başlık birleşimlerinden olmasını açıkladığı düşünülmektedir.

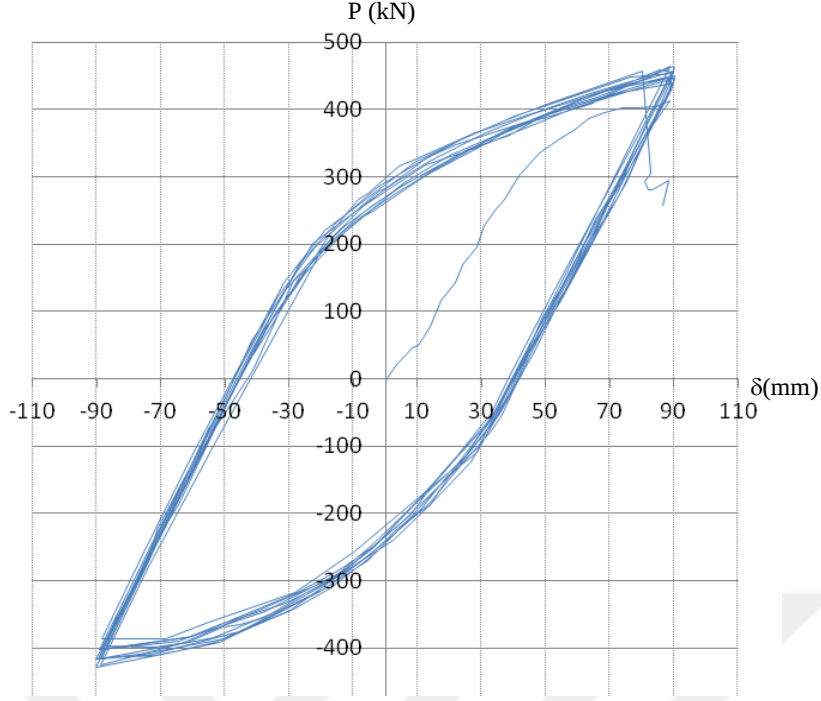
Test sonucu görüntüler, aşağıda Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da, teste ait uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.38 : Test 8 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.39 : Test 8 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.40 : Test 8 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.9 Test 9 (± 60 mm, hızlı)

Bu testte, 5. testte olduğu gibi, ± 60 mm sabit genlikli deplasman kullanılmış, bu deplasman, numuneye hızlı olarak etkilmiştir. Kiriş başlıklarında sınırlı bir alanda plastikleşme gözlenmiştir. Toplam $N=78$ tekrar sayısı sonucunda üst başlık kaynak erişim deliği civarında kırılma meydana gelmiş, numune ani ve gevrek şekilde göçme durumuna ulaşmıştır. Başlıktaki çatlağın ani ilerlemesi sonucunda, kiriş gövdesini kolon başlığına bağlayan kayma elemanı yanındaki kaynak dikişleri de kırılmıştır.

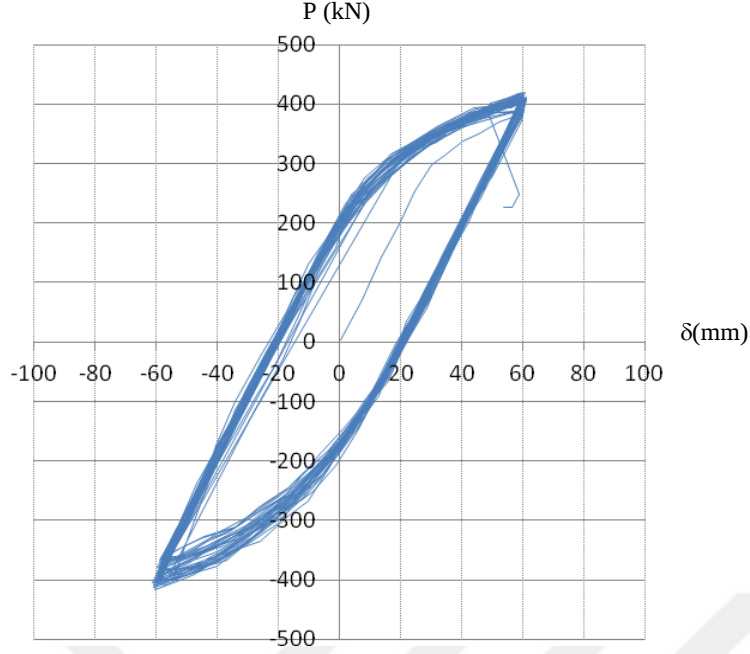
Test sonucu görüntüler, aşağıda Şekil 4.41 ve Şekil 4.42’de, teste ait uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi Şekil 4.43’de verilmiştir.



Şekil 4.41 : Test 9 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.42 : Test 9 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.43 : Test 9 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.10 Test 10 (± 60 mm, hızlı)

Bu testte, 9. testin tekrarlanması amaçlanmış, bu nedenle yine ± 60 mm sabit genlikli deplasman numune ucuna etkitilmiştir. Toplam $N=83$ tekrar sayısına ulaşıldığında numunede kırılma meydana gelmiştir. Kırılma anına kadar kiriş başlıklarında ve gövdenin bir kısmında plastikleşme söz konusudur. Bu kez kırılma, alt başlıkta oluşmuş, kırılma anındaki ani yük transferi sonucunda alttaki montaj bulonu kesme kuvveti etkisinde kopmuştur. Bu test sonucu elde edilen 83 tekrar değerinin 78 tekrara ulaşılan Test 9 ile yeterli korelasyona eriştiği sonucu çıkarılmıştır.

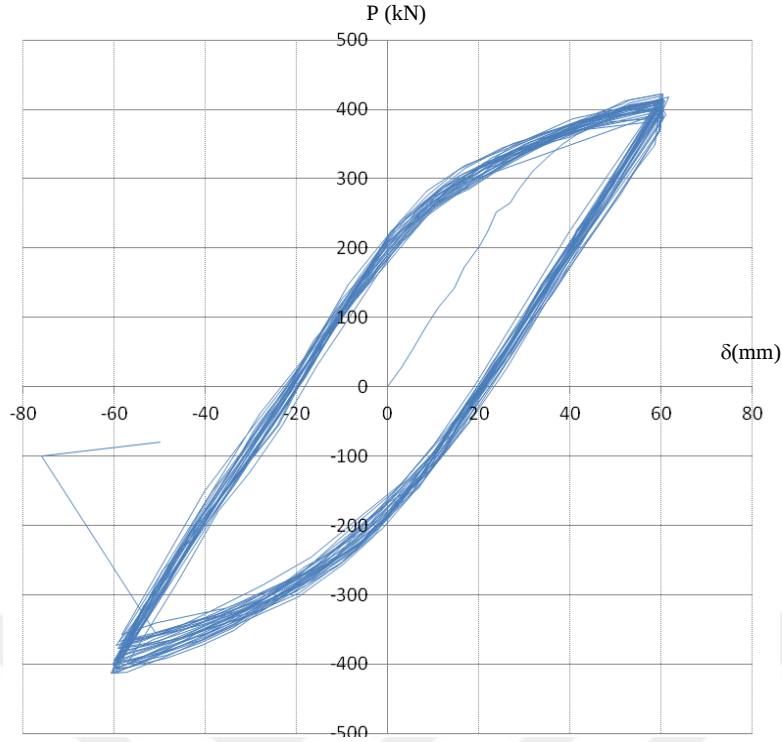
Test 10'a ait deforme olmuş numune görüntüleri Şekil 44 ve Şekil 45'de, teste ait uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi Şekil 46'da verilmektedir.



Şekil 4.44 : Test10 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.45 : Test 10 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.46 : Test 10 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.11 Test 11 (± 90 mm, yavaş)

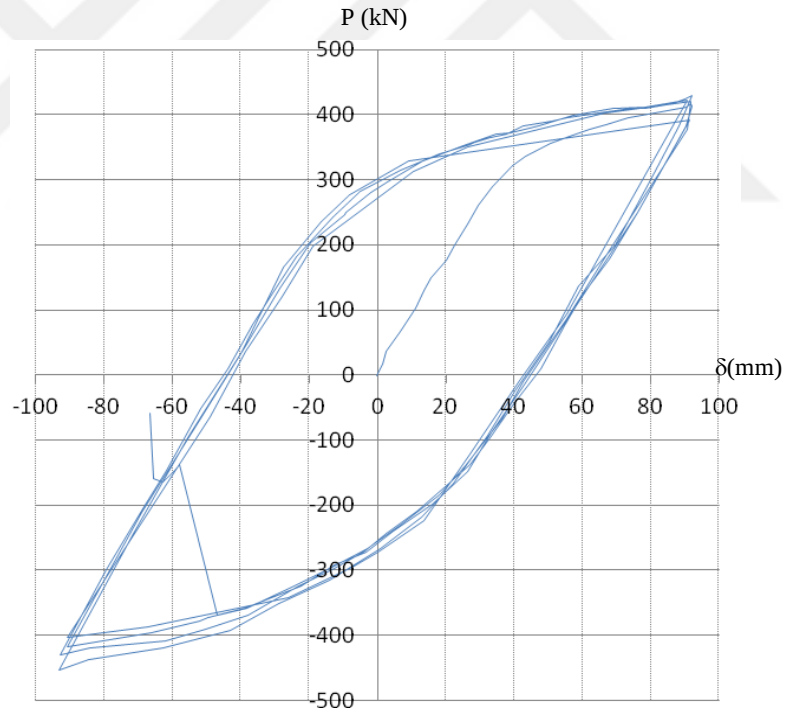
Bu testte, yavaş hızla ± 90 mm sabit genlikli deplasman uygulanmıştır. Beklenmeyen şekilde N=5 tekrar sayısına ulaşıldığında aniden gevrek kırılma gerçekleşmiştir. Sistemde herhangi bir yanal burkulma tarzı stabilite bozukluğu olmaması nedeniyle muhtemel kaynak işçiliği hatasından dolayı bu tarz bir erken kırılmanın gerçekleştiği düşünülmektedir. Numunenin test sonrası deforme olmuş haline ait görüntüler Şekil 4.47 ve Şekil 4.48’de verilmiştir.



Şekil 4.47 : Test11 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.48 : Test 11 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.49 : Test 11 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.12 Test 12 (± 90 mm, yavaş)

Bu testte, yavaş hızla ± 90 mm sabit genlikli deplasman uygulanmıştır. Toplam 14 tekrar sonucu kiriş üst başlığı kaynak ulaşım deliği ucunda gevrek kırılma meydana

gelmiştir. Kırılmanın hemen ardından üst montaj bulonunda da kesme durumu söz konusu olmuştur.

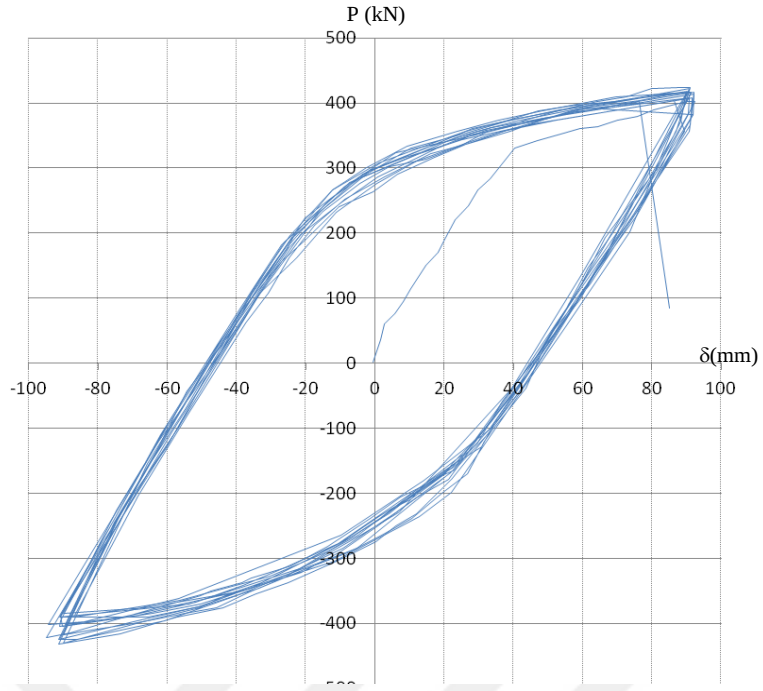
Numunenin test sonrası deforme olmuş haline ait görüntüler Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de, uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.50 : Test12 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.51 : Test 12 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.52 : Test 12 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.13 Test 13 (± 90 mm, yavaş)

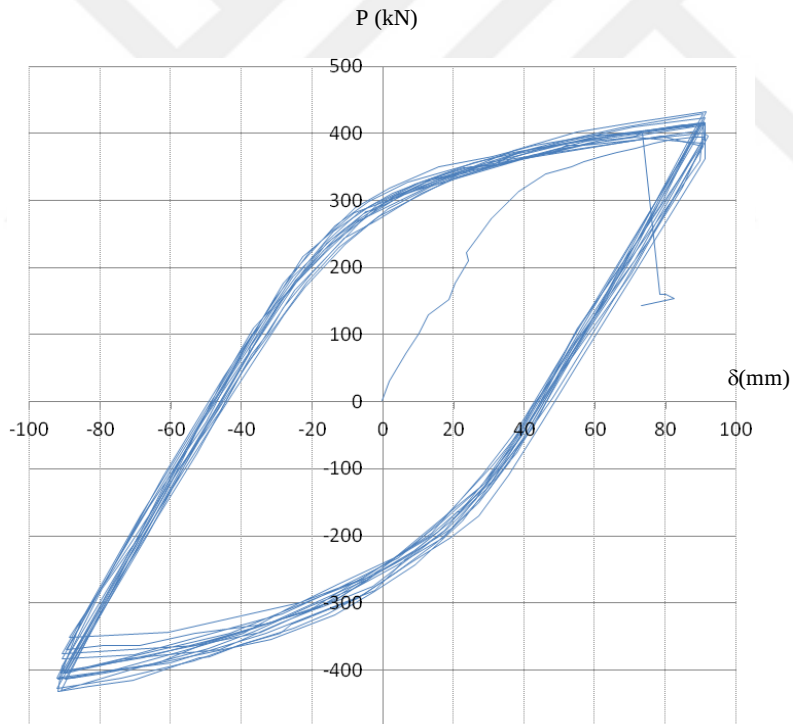
Bir önceki test gibi, Test 13'te de ± 90 mm sabit genlikli deplasman konsol ucuna etkililmiş, 15 tekrar sonucu kiriş üst başlığının kolona bağlandığı kaynakların hemen yanından gevrek kırılma sözkonusu olmuştur. Deney sırasında, özellikle son çevrimler sırasında, kiriş alt başlığında sınırlı miktarda da olsa yerel burkulmalar oluşmuştur. Deney sonrası deforme olmuş numunenin görüntüsü Şekil 4.53 ve 4.54'de, numuneye ait uç kuvveti- uç deplasmanı ilişkisi de Şekil 4.55'de gösterilmiştir.



Şekil 4.53 : Test13 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.54 : Test 13 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.55 : Test 13 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.14 Test 14 (± 90 mm, yavaş)

Bu numune için de, Test 12 ve 13’de olduğu gibi, ± 90 mm sabit genlikli deplasman kullanılmıştır. Toplam 14 tekrar sonucu kiriş üst başlığının kolona bağlandığı kaynakların hemen yanından gevrek kırılma söz konusu olmuştur. Deney sırasında,

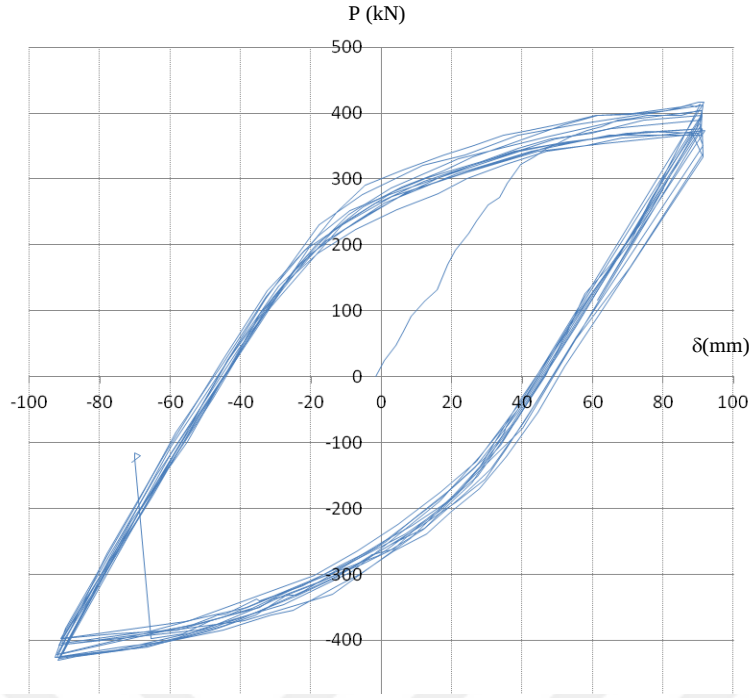
özellikle son çevrimler sırasında, kiriş alt başlığında sınırlı miktarda da olsa yerel burkulmalar oluşmuştur. Deney sonrası deforme olmuş numunenin görüntüsü Şekil 4.56 ve 4.57’de, numuneye ait uç kuvveti- uç deplasmanı ilişkisi de Şekil 4.58’de gösterilmiştir.



Şekil 4.56 : Test14 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.57 : Test 14 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.58 : Test 14 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.15 Test 15 (± 60 mm, orta hızlı)

Bu testte, ± 60 mm deplasman, orta hız olarak adlandırılacak olan $v_3=4v_1$ hızıyla yüklenmiştir. Bazı bölgelerde kireç dökülmesi gerçekleşmiş, toplam 84 tekrar sayısına ulaşıldığında gevrek kırılma meydana gelmiştir.

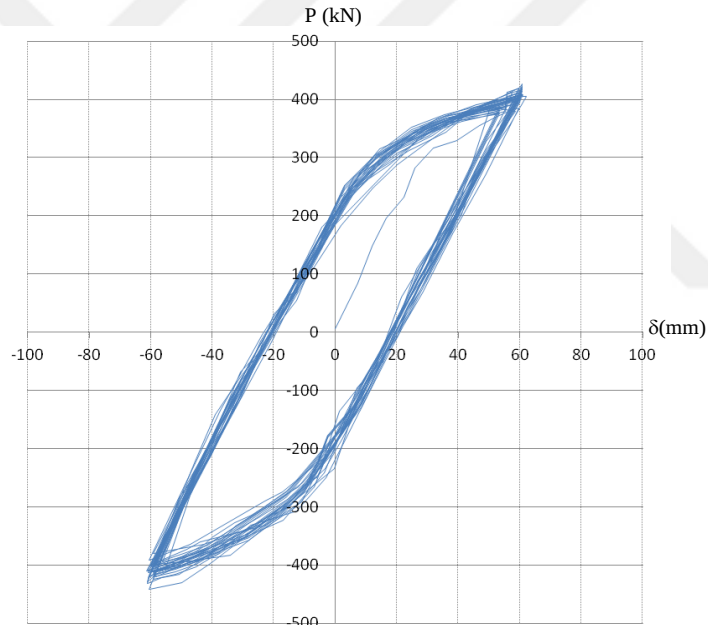
Deney sonrası deforme olmuş numunenin görüntüsü Şekil 4.59 ve 4.60’da, numuneye ait uç kuvveti- uç deplasmanı ilişkisi de Şekil 4.61’da gösterilmiştir.



Şekil 4.59 : Test15 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.60 : Test 15 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.61 : Test 15 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

4.4.16 Test 16 (± 115 mm, yavaş)

Son numunenin kullanıldığı bu testte, ± 115 mm deplasman, yavaş hızla yüklenmiştir.

Deney sonrası deforme olmuş numunenin görüntüsü Şekil 4.62 ve 4.63’de, numuneye ait uç kuvveti- uç deplasmanı ilişkisi de Şekil 4.64’de gösterilmiştir.

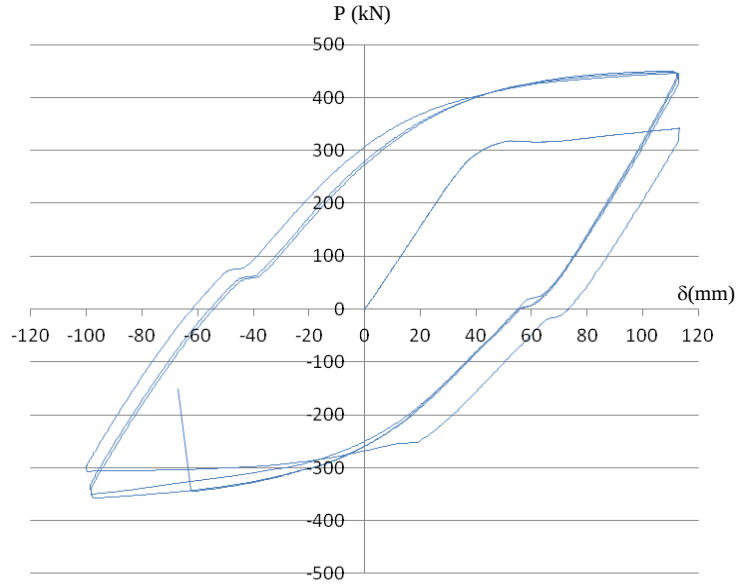
Diğer testlere göre çok daha büyük bir deplasman yüklenmesi sonucu, davranış eğrisinde sapma gerçekleşmiştir. Buna neden olarak, numune uç bağlantılarındaki kaymaların neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.62 : Test16 numunesi deney sonu görünüşü.



Şekil 4.63 : Test 16 numunesi deney sonu yakın görünüşü.



Şekil 4.64 : Test 16 uç kuvveti-uç deplasmanı ilişkisi.

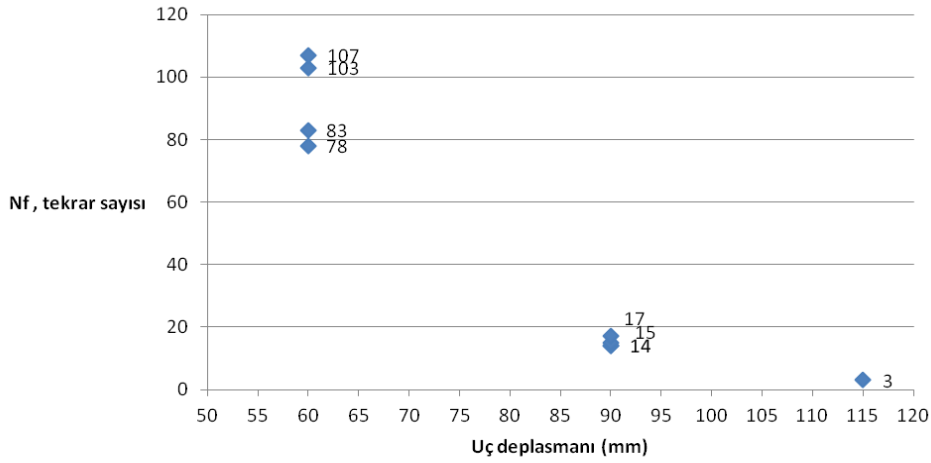
4.4.17 Sonuçlar

Gerçek boyutlu numunelerin kullanıldığı tam ölçekli 16 deneyin tablo halinde özeti şu şekilde olmaktadır:

Çizelge 4.3: Deney matrisi.

Test no.	Yükleme hızı	Uygulanan uç deplasmanı ($\pm$ mm)	N_f göçme tekrar sayısı
1	Yavaş	40	Pilot test
2	Yavaş	60	103
3	Yavaş	60	107
4	Yavaş	90	40
5	Hızlı	60	128
6	Hızlı	90	İptal
7	Hızlı	90	17
8	Hızlı	90	15
9	Hızlı	60	78
10	Hızlı	60	83
11	Yavaş	90	5
12	Yavaş	90	14
13	Yavaş	90	15
14	Yavaş	90	14
15	Orta	60	84
16	Yavaş	115	3

Dikkate alınacak test sonuçlarının grafiksel gösterimi aşağıdaki şekildeki gibidir .



Şekil 4.65 : Test sonuçları.

Deney sonuçlarının incelenmesi sonucu,

i) Aynı hız ve aynı deplasman genliği için 2’şer adet numunenin test edildiği durumlarda (bkz. Test 2-3, 7-8, 9-10, 12-13-14 gibi), tekrar sayıları arasında yaklaşık %10’luk sapma gözlenmiş, buna göre, göçme tekrar sayıları arasında yeterli korelasyonun elde edilebildiği sonucuna varılmıştır.

ii) Aynı deplasmanların daha hızlı yüklenmesi sonucunda, küçük deplasmana ait göçme tekrar sayısında (103/107’den 78/83’e) azalmaya rağmen, büyük deplasmanın hızlı yüklenmesi durumunda, tekrar sayısında (17/15’den 15/14’e) kaydadeğer bir azalma olmamaktadır.

iii) Literatürdeki çalışmalarda, büyük deplasman yüklenmesi durumunda, küçük deplasmanlarda görülen ve aniden gelişen gevrek göçme modunun, öncelikle yerel burkulmayla gevrek kırılmanın bileşik olarak görüldüğü “karma mod” a kaydığı, çok daha büyük deplasman genliklerinde ise kırılma olmaksızın tamamen sünek göçme modu gözlemlendiği belirtilmektedir.

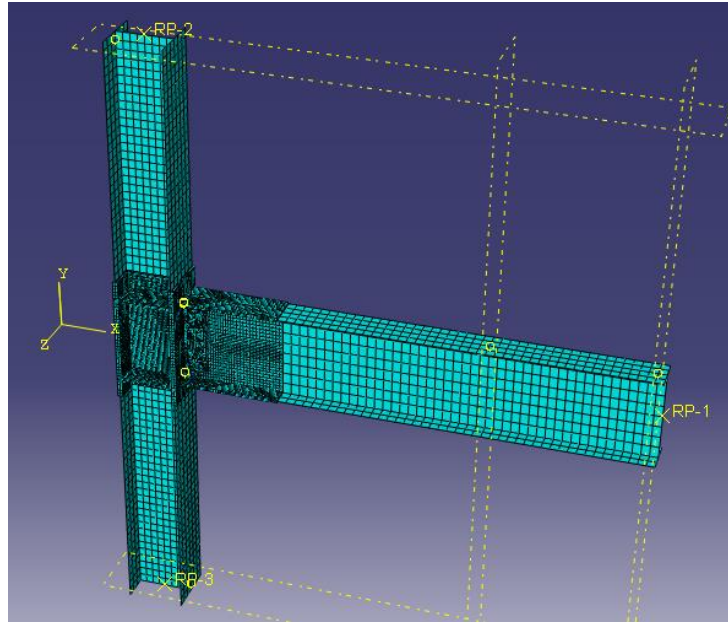
Büyük deplasmanın yavaş yüklenmesi (Test 13 ve 14) sonucunda kırılma ile birlikte gözlenen yerel burkulma durumu, aynı numunenin hızlı yüklenmesi (Test 7 ve 8) sonucunda gözlenmemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, aynı deplasman genliğinin farklı hızda yüklenmesi sonucunda, göçme modunun da karma moddan gevrek moda doğru kayması sözkonusudur. Özellikle bu testler sonucunda, yükleme hızının düşük tekrarlı yorulma davranışında göçme moduna etkisi ortaya çıkmış olup, literatürdeki mevcut yoruma ek bir bilgi üretilmektedir.

5. SONLU ELEMAN ANALİZLERİ

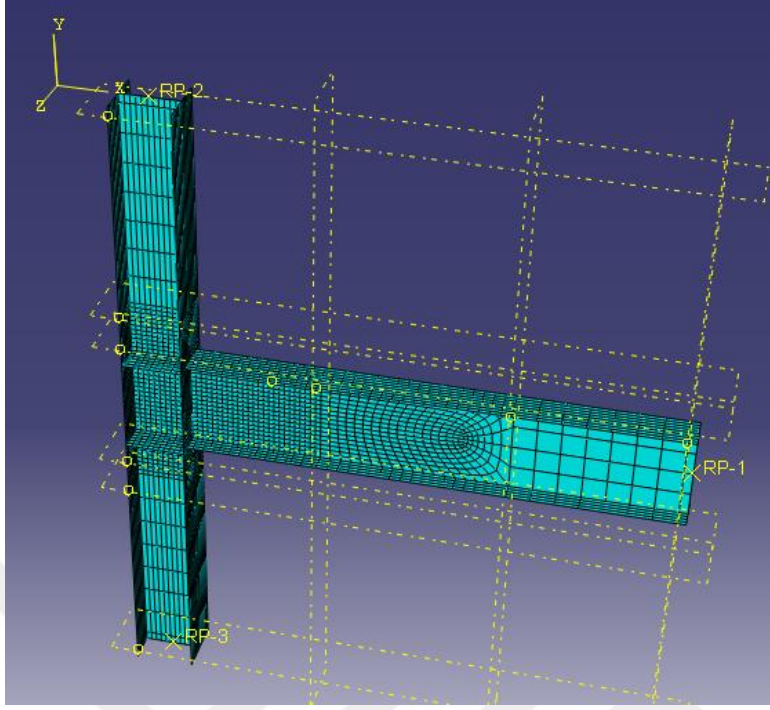
Çalışmalar kapsamında, deneysel olarak düşük tekrarlı yorulma davranışı incelenen kiriş-kolon birleşimi için sayısal ortamda sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak deneysel çalışmalara paralel nümerik analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalar sırasında ABAQUS (v.6.7.1) yazılımı kullanılmış olup, modellemeye dair genel bilgiler ve deney numunelerinin her bir tipi için genel modelleme farklılıkları ilerleyen alt bölümlerde aktarılmaktadır.

5.1 Ön analizler

Deney numunelerinin sonlu eleman analiz modellerini oluşturmak amacıyla program kütüphanesinde tanımlı olan eleman tipleri içinden seçim yapılarak detaylı modelleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. İlk etapta iki farklı analiz modeli oluşturulmuş olup, bunlardan ilki üç boyutlu hacimsel (solid) elemanlar içermekte, ikinci yaklaşımda ise iki boyutlu levha (shell) eleman tipi ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Oluşturulan bu iki sonlu eleman analiz modelinin genel görünüşleri aşağıda sunulmaktadır.



Şekil 5.1 : Hacimsel (solid) elemanlı model.



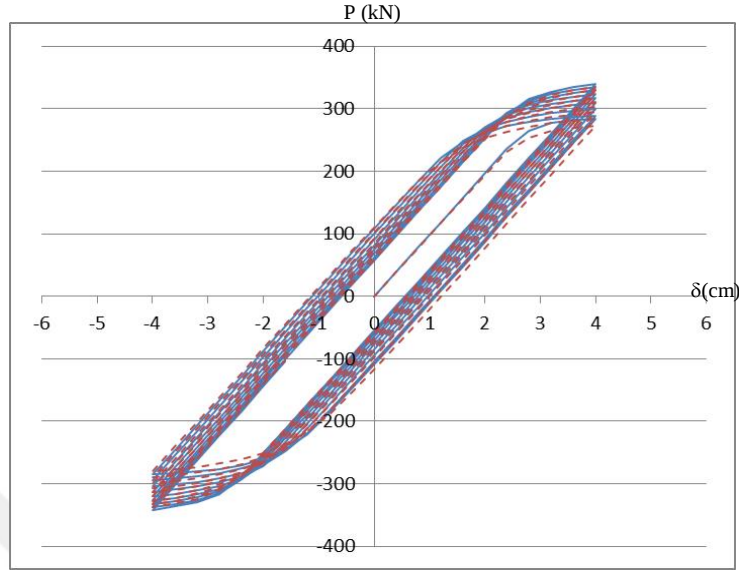
Şekil 5.2 : Düzlem (plak) elemanlı model.

Tüm sonlu eleman modellerinde kesit kalınlıkları numune ebatlarına uygun olacak şekilde tanımlanmıştır. Malzeme özellikleri önceki bölümlerde detaylı şekilde aktarılan malzeme kupon test sonuçları uyarınca programa tanıtılmış olup, çelik malzemesinin gerilme-şekil değiştirme bünye bağıntısı, şekil değiştirme hızının etkisini de içerecek şekilde analiz modellemesinde yer almaktadır.

Ön analizler kapsamında, söz konusu bu iki model için aynı yapısal kesit ebatları, malzeme özellikleri, numune test düzeneği sınır koşulları, zamana bağlı konsol uç deplasmanı şeklinde harici yükleme durumları geçerli olup, ön analizler sonuçları ışığında bu iki sonlu eleman modeli arasında tercih yapılabilmesi amaçlanmıştır.

Bu ön analizlerde, konsol ucunda düşeyde çevrimsel yükleme oluşturacak şekilde $\pm 40\text{mm}$ 'lik mesnet düşey deplasmanları zamana bağlı olarak tanımlanmaktadır. Konsol ucunda bu deplasmanı oluşturmak için uygulanması gerekecek konsol uç kuvveti, ilgili deplasmanın verildiği noktadaki mesnet reaksiyonunun analiz sonrasında tablo halinde okunmasıyla elde edilebilmektedir. Analiz sonucunda elde edilen ve zamana bağlı olarak değişkenlik gösteren bu mesnet reaksiyonları uygulanan deplasmana bağlı olarak çizdirilmiş ve çevrimsel eğriler elde edilmiştir. Şekil 5.3'te verilen bu eğriler içinde kesikli çizgi ile hacimsel (solid) eleman ağırlıklı

modelin davranışı, sürekli çizgi ile de düzlemsel (shell) elemanlarla oluşturulan modelin davranışı gösterilmektedir.



Şekil 5.3 : Ön analiz çevrimsel eğrileri.

Sonlu eleman ön analizlerinin sonucunda, düzlemsel elemanlar içeren sonlu eleman modelinin kalitatif anlamda yeterli yaklaşık sonucu verebildiği gözlenmiş olup, deney numunelerinin deneysel davranışlarının simülasyonunun yapılabilmesi için düzlemsel elemanlar içeren modellerin analizleri gerçekleştirilmiştir. İki boyutlu düzlem elemanların kullanıldığı üç boyutlu analiz modelleri ile çok sayıda çevrim içeren deney simülasyonu amaçlı nümerik analizlerin bellek ve disk anlamında ekonomik kullanılması imkanı yakalanmıştır.

5.2 Deney simülasyonları

Deney numunelerinin farklı genliklere haiz konsol uç deplasmanı şeklindeki dış yüklemelere verdikleri cevabın nümerik anlamda incelenmesi ABAQUS programıyla mümkün olmuştur.

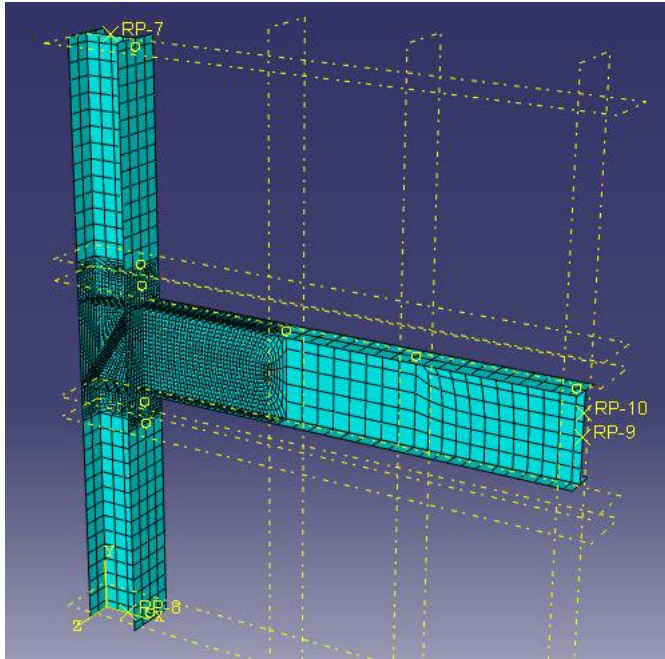
Deneyler sırasında üç ayrı hızda gerçekleştirilen deplasman yüklemeleri, sırasıyla yavaş (0.24 cm/sn) , orta hızlı ($4 \times 0.24 = 0.96$ cm/sn) ve hızlı ($7 \times 0.24 = 1.68$ cm/sn) karakterli yüklemeler şeklinde olup, bu hızlar uyarınca mesnet deplasmanlarının zamana bağlı değişimleri tablolar halinde programa tanıtılarak analizler yürütülebilmektedir.

Bu kapsamda, deneysel çalışmada kullanılan ve Çizelge 4.3'te özetlenmiş olan uç deplasmanı ve yükleme hızı (yavaş/orta/hızlı) karakterdeki durumlar, nümerik analizler sırasında aşağıda Çizelge 5.1'e göre sınıflandırılmıştır. Pilot test kapsamında deneye tabi tutulan ve deney koşul ve ekipmanının uygunluğunu teyitleme amacı güden 1 no.lu pilot test ise nümerik analizlere dahil edilmemiştir.

Çizelge 5.1: Nümerik analiz model kodları

Model kodu	Yükleme hızı	Uç deplasmanı (mm)
60Y	Yavaş	±60
60H	Hızlı	±60
60O	Orta	±60
90Y	Yavaş	±90
90H	Hızlı	±90
115Y	Yavaş	±115

Kiriş-kolon birleşimlerinin deneysel performanslarının incelenmesi aşamasında pilot test olarak gerçekleştirilen deney sonucunda pilot testi takip eden deneylerde birleşimde kolon gövdesine çapraz rijitleştirici levha eklenmiş idi. Bu durumu Çizelge 5.1'de verilen nümerik analiz modellerine de yansıtmak amacıyla sonlu eleman modeline de çapraz rijitleştirici levha eklenmiş olup, deney simülasyonlarında kullanılan revize sonlu eleman modeli Şekil 5.4'te sunulmaktadır.



Şekil 5.4 : Revize sonlu eleman analiz modeli.

İlerleyen alt bölümlerde, Çizelge 5.1’de özetlenen kodlamaya göre gerçekleştirilen analizlerin sonuçları sunulmakta, bu sonuçlar ilgili numunelere dair deney sonuçlarıyla karşılaştırmalı olarak irdelenmektedir.

5.2.1 60Y, 60O ve 60H model kodlu deney simülasyonları

Üç farklı hızda $\pm 60\text{mm}$ deplasman yüklemesi içeren bu üç analiz modeli, genliklerin aynı, fakat yükleme hızlarının farklı olmaları nedeniyle deney ortamında olduğu gibi nümerik analiz ortamında da birbirinden farklı toplam deney sürelerine sahiptir. Örneğin, buna göre, yavaş yükleme için sözkonusu olan 2.4 mm/sn ’lik deplasman hızı kullanılarak sıfır pozisyonundan 60mm ’lik çevrimsel pik deplasmana çıkılma süresi $60/2,4=25$ sn sürmekte, buna göre bir tam çevrim de $4*25=100$ sn zaman almaktadır. Benzer hesaplama hızlı yükleme durumu (1.68 cm/sn) için gerçekleştirildiğinde, $\pm 60\text{mm}$ ’lik hızlı karakterde yükleme için çevrim periyodu 14.28 sn olarak gerçekleşmektedir.

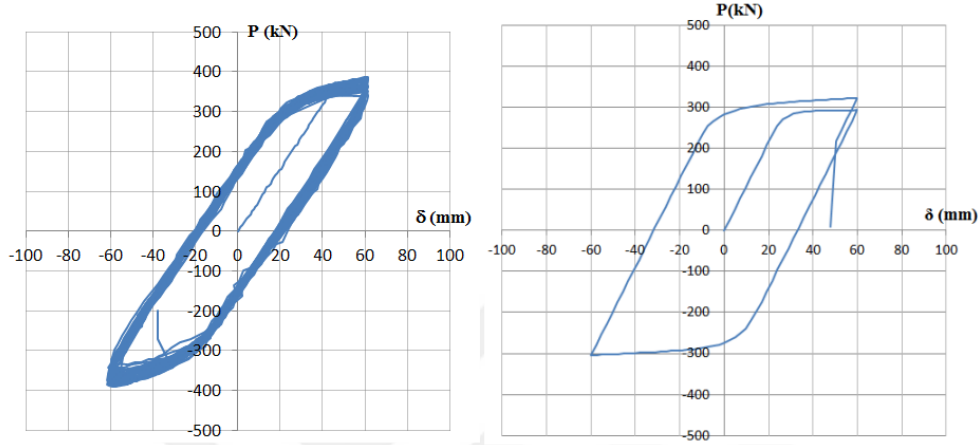
Bu bağlamda, numunelerin simülasyonlarına dair fiktif toplam süreler, 60Y-60O-60H için sırasıyla 12000-2500-1428 saniyedir. Zamansal bitiş farklarından dolayı aynı genlik için üç farklı hızda yüklemeye dair numune çevrimsel cevapları aynı zaman tanım alanında gösterilmeyecek, numune sınıflarının deneysel performanslarıyla karşılaştırmak amacıyla ayrı ayrı sunulacaktır.

Sonlu eleman modellerinde genel olarak 4776 sonlu eleman ve 4866 düğüm noktası bulunmaktadır. Analiz süresi en kısa analiz için yaklaşık 4.5 saat sürmektedir.

Sonlu eleman analizi tamamen simülasyon hedefli nümerik bir hesaplama yöntemi olup, ileri düzeyde elastik ötesi deformasyonlar içeren deneylere dair modellerin çözümlenmesi aşamasında modelde bir çok bölgede büyük plastikleşmeler ve buna bağlı nümerik instabilite durumu oluşmuş olup, deneyde hedeflenen fiktif süreler tam anlamıyla gerçekleşememiştir. Daha önceki bölümlerde artan çevrimsel deplasman protokolleri kullanılan nümerik analizlerin sonuçlarının başarılı şekilde elde edilmesine karşın, sabit genlikli deplasman yüklemesinde birebir süreç ve sonuç bütünlüğü sağlanamamış olmasının nedeninin, tekrarlayan büyük deplasmanlar sonucunda belirli bölgelerde yoğunlaşarak biriken elastik ötesi deformasyonlar (dolayısıyla buna bağlı nümerik hesaplama zorlukları) olduğu düşünülmektedir.

Aynı deplasman genlikleri altında benzer çevrimsel cevap ve birbirlerine yakın göçme tekrar sayıları içeren numunelerden birer grafik baz alınarak karşılaştırma yapılarak yorumlanacaktır.

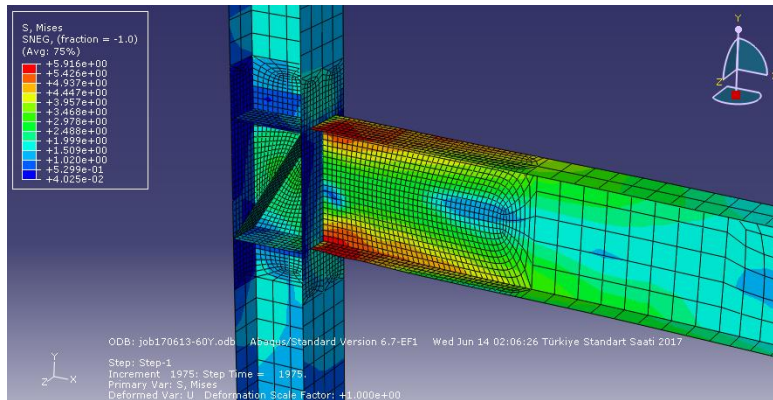
60Y kodlu $\pm 60\text{mm}$ 'lik yavaş karakterde yüklemeye dair deney ve sonlu eleman analiz sonuçları aşağıda Şekil 5.5'te yanyana sunulmaktadır.



Şekil 5.5 : 60Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

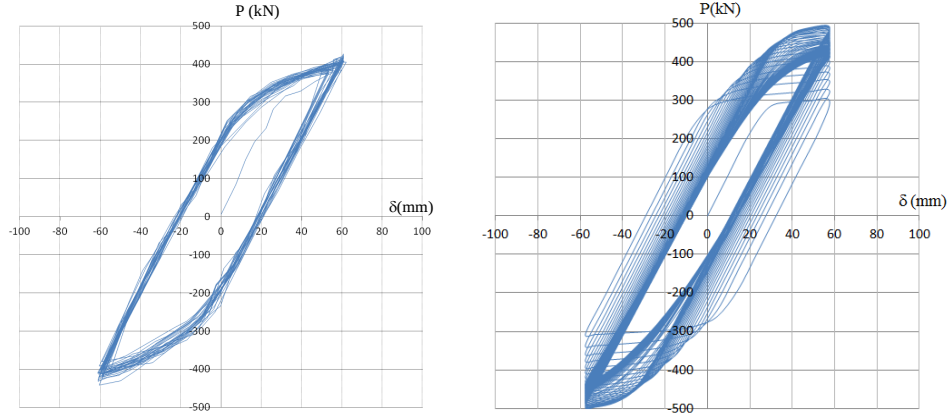
Deney ve nümerik analizler sonucu elde edilen eğrilerin birbirleriyle büyük oranda uyumlu olduğu görülmektedir. Artan tekrarlı yükleme çevrim sayısı ile nümerik analiz sonuçlarının deney sonuçlarıyla uyumlu şekilde devam edeceği ortaya çıkmaktadır.

60Y kodlu yüklemeye dair sonlu eleman analizi sonucu gerilme dağılımı Şekil 5.6'da örnek olarak verilmektedir. Buna göre, en büyük gerilme yoğunlaşmasının beklediği şekilde kiriş-kolon birleşimi kiriş dip bölgesi civarında gerçekleştiği görülmektedir. Kiriş alt başlığında düzlem dışı deformasyonlar az miktarda mevcut olmasına rağmen kaydadeğer herhangi bir yerel burkulma durumu gözlenmemiştir.



Şekil 5.6 : 60Y kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.

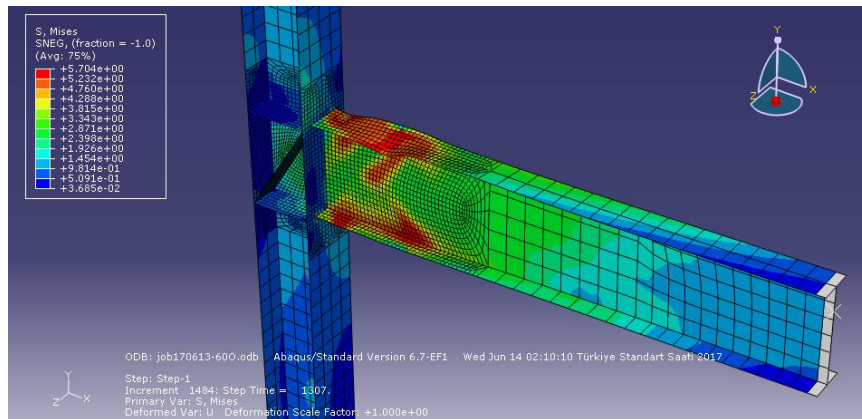
Orta hızlı karakterde $\pm 60\text{mm}$ 'lik konsol uç deplasman yüklemesine dair deney ve sonlu eleman analizi sonuçları Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : 600 kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

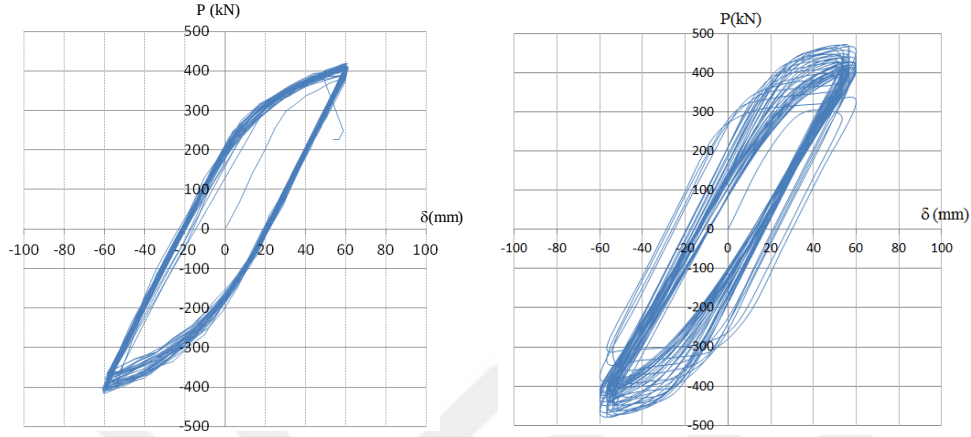
Şekil 5.7'deki eğrilerin karşılaştırılması ile test sonuçlarına benzer nümerik sonuçlar yakalanabildiği görülmektedir. Ancak nümerik analizde, deneyden farklı olarak artan yükleme konsol uç kuvvetleri gözlenmektedir. Nümerik modelleme sırasında programa girilen malzeme davranış modeli nedeniyle bu farklılaşmanın ortaya çıktığı düşünülmektedir. Nümerik analizin ilerleyen adımlarında 500 kN uç kuvveti değerine yakınsama durumu söz konusudur.

600 kodlu yüklemeye dair analiz sonucunda elde edilen gerilme dağılımının genel görüntüsü Şekil 5.8'de verilmektedir. Özellikle o esnadaki yük uygulama doğrultusuna bağlı olarak kiriş üst başlığında yerel burkulma durumu gözlenmektedir.



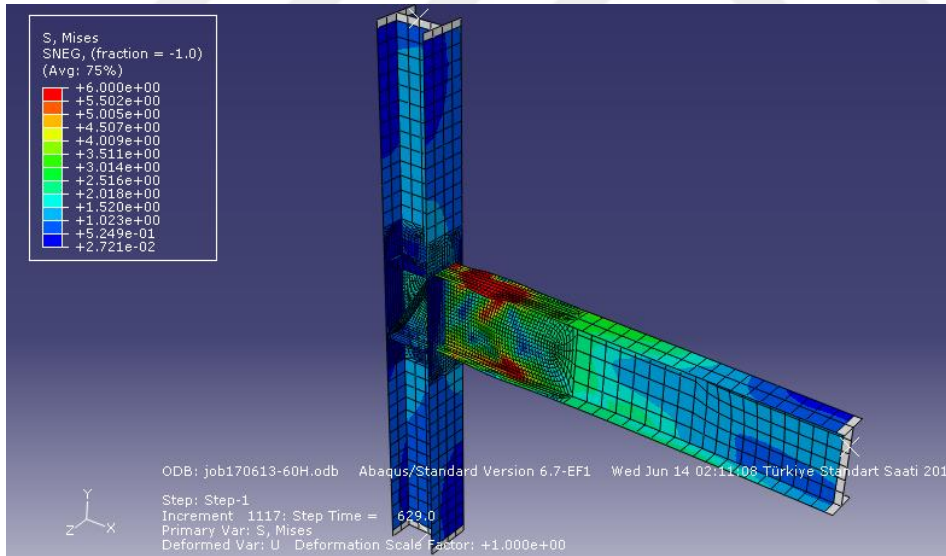
Şekil 5.8 : 600 kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.

$\pm 60\text{mm}$ deplasman genliğinin uygulandığı son model, 60H kodlu olup, bu deplasman genliğinin hızlı karakterde yüklenmesi halinin simulasyonuna yöneliktir. 60H kodlu analizin ilgili deney ile konsol uç deplasmanı-uç kuvveti açısından karşılaştırmalı durumu, Şekil 5.9’da sunulmaktadır.



Şekil 5.9 : 60H kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

60H kodlu sonlu eleman analizi sonucunda elde edilen genel gerilme dağılımı, Şekil 5.10’da sunulmaktadır.



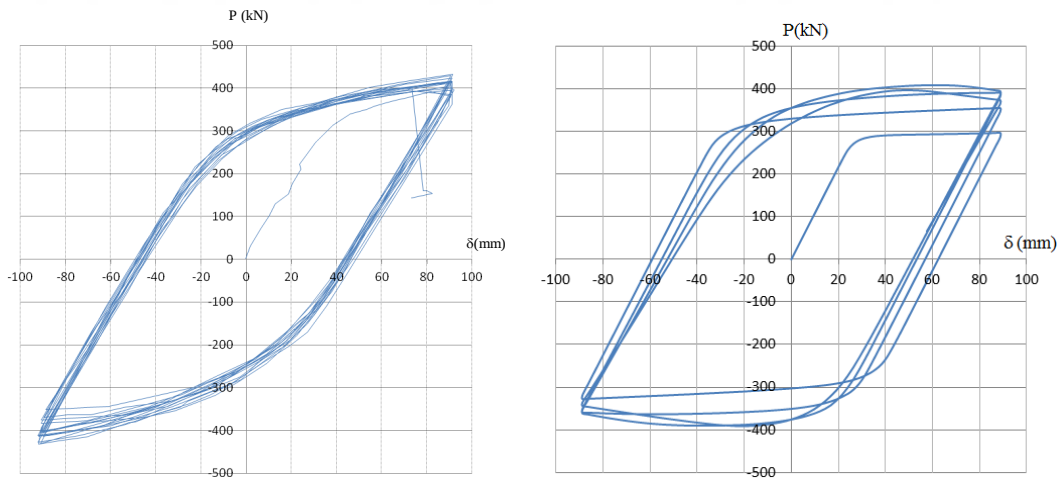
Şekil 5.10 : 60H kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.

Şekil 5.10’da da görüleceği üzere, sonlu eleman analizi sırasında kiriş başlıklarında yerel burkulma gözlenmektedir. Bu durum deneyler sırasında gözle görülebilir mertebede ortaya çıkmamış, göçme sınır durumu kiriş-kolon dip noktasında kırılma şeklinde gerçekleşmiştir.

5.2.2 90Y ve 90H model kodlu deney simülasyonları

Deneyler sırasında $\pm 90\text{mm}$ genlikli konsol uç deplasman yüklemesi yavaş ve hızlı karakterde deney numunesine uygulanmış idi. Bu iki farklı yükleme hızının nümerik simülasyonları da farklı toplam süreye haiz iki farklı sonlu eleman analizi ile gerçekleştirilmiştir. Yavaş karakterde (2.4 mm/sn) yükleme için sıfır pozisyonundan 90mm 'lik çevrimsel pik deplasmana çıkış süresi 37.5 sn , hızlı yükleme için bu deplasman genliğine yükselme süresi 5.36 sn olarak ortaya çıkmaktadır. Buna göre yavaş yükleme için çevrimsel period 150 sn , hızlı karakterde yükleme için çevrimsel periyot 21.44 sn 'dir. Analiz modelleri için öngörülen toplam hesaplama sanal süresi, deneylerde gözlenen tekrar sayıları ile 150 ve 21.44 sn değerlerinin çarpımı şeklinde olup, programda analizin bitiş süresini programa bildirme amaçlıdır. Buna göre 90Y modeli için 3000 sn , 90H modeli için 428 sn fiktif analiz süreleri program analiz modülüne tanıtılmıştır. Belirli bir fiktif hesap adımına (süresine) erişildiği durumda program tarafından nümerik çözümleme sonuçlanmıştır. Her iki analiz modeli ve yükleme durumu için genel sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

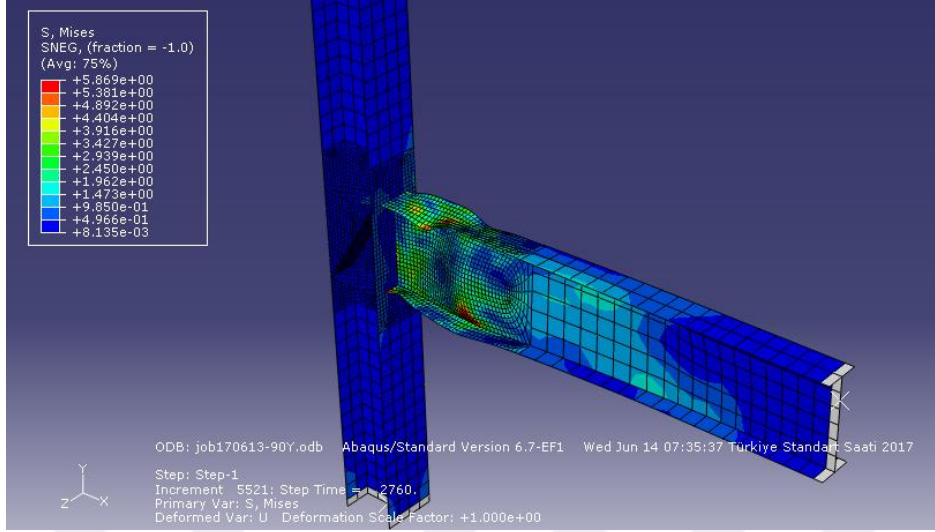
Karşılaştırma yapabilmek amacıyla, 90Y kodlu yükleme ve deplasman durumuna dair deneysel ve nümerik analiz sonuçları Şekil 5.11'de gösterilmektedir.



Şekil 5.11 : 90Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

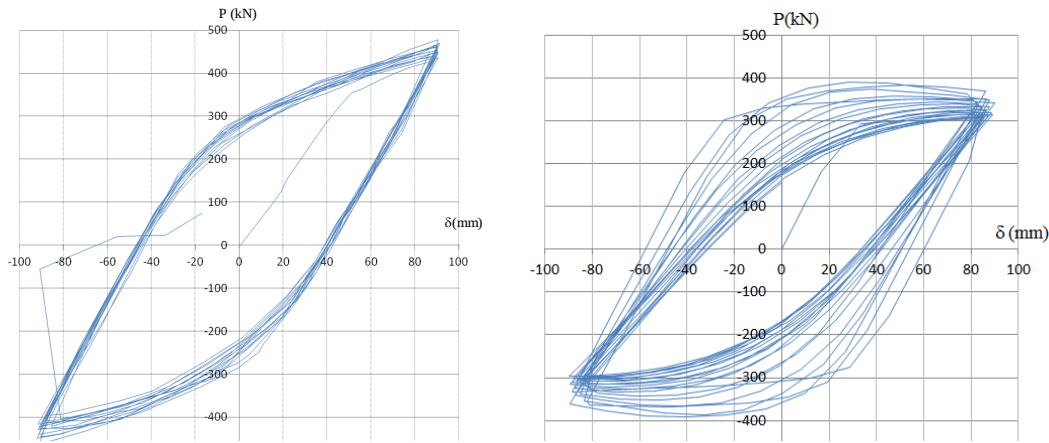
İki eğrinin karşılaştırılması sonucunda, nümerik modelin analizi sırasında konsol ucuna uygulanması gereken uç kuvveti değerinin belirli bir plato bölgesi sergilediği, yani artan deplasmanlar altında uç kuvvetinin sabit kalarak deformasyon oluşturduğu gözlenmektedir. Özellikle nümerik modelde gözlemlenen yerel burkulma durumu,

deney sırasında kısıtlı düzeyde gözlemlenmiştir. Sonlu eleman analiz sonuçlarından örnek bir görüntü Şekil 5.12’de verilmektedir.



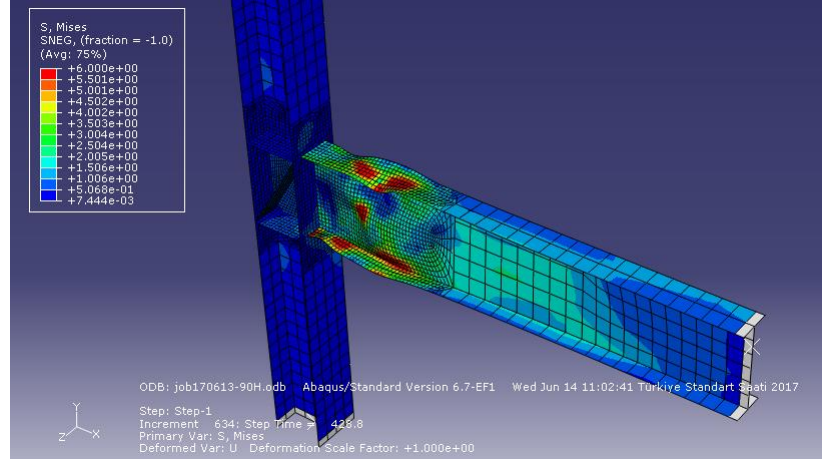
Şekil 5.12 : 90Y kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.

± 90 mm deplasman genliğinin uygulandığı son model, 90H kodlu olup, bu deplasman genliğinin hızlı karakterde yüklenmesi halinin simülasyonuna yöneliktir. 90H kodlu analizin ilgili deney ile konsol uç deplasmanı-uç kuvveti açısından karşılaştırmalı durumu, Şekil 5.13’de sunulmaktadır



Şekil 5.13 : 90H kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

Nümerik modelde, deneyden farklı olarak, konsol ucuna uygulanması gereken yük değerinin zamanla değişiminde düzleşen bölgeler gözlenmektedir. Bu durumun nedeni olarak, büyük deplasmanlı yükleme sırasında yükleme çerçevesinde yapılan iyileştirmeler ve nümerik analizler sırasında kullanılan malzeme modelinden daha rijit bir malzeme davranışının deneyler sırasında gözlenmiş olduğu düşünülmektedir. Sonlu eleman analiz sonuçlarından örnek bir görüntü Şekil 5.14’te verilmektedir.



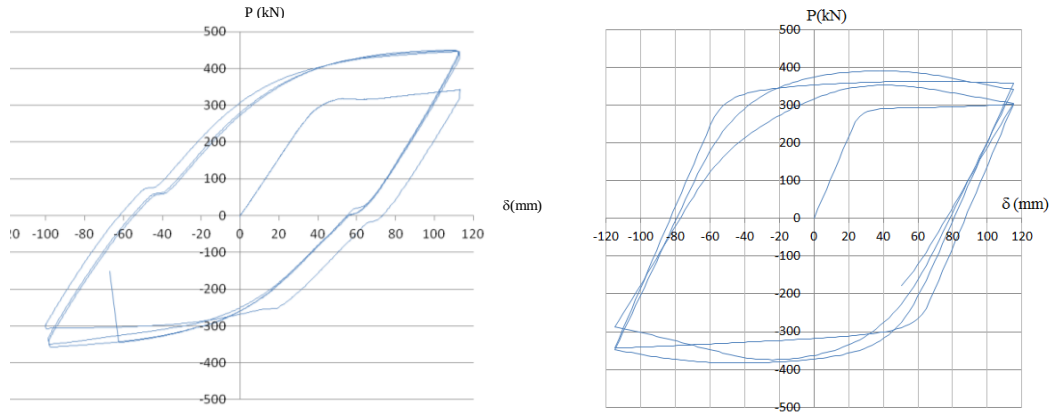
Şekil 5.14 : 90H kodlu sonlu eleman analizi gerilme dağılımı.

Deneyle sırasında $\pm 90\text{mm}$ genlikli deplasman uygulanması sırasında, nümerik modelde görülen düzeyde yayılı değil, belli bir bölgeye yoğunlaşmış bir yerel burkulma davranışı gözlenmemiş, deney numunesi yerel ve tümsel stabilitesini nümerik modele nazaran daha kararlı bir şekilde korumuştur. Bunun sonucunda yük-deplasman eğrisi nümerik analizlere nazaran daha rijit bir şekilde ortaya çıkmıştır.

5.2.3 115Y model kodlu deney simülasyonu

$\pm 115\text{ mm}$ uç deplasman genliği, toplam bir adet numune üzerinde yavaş karakterde uygulanarak, deney düzeneğinin deplasman kapasitesini maksimum düzeyde kullanacak şekilde test gerçekleştirilmiş idi. Bu teste dair sonlu eleman analiz modelinde sıfır pozisyonundan 115mm pik deplasman değerine çıkış süresi yaklaşık 48 sn olup, yavaş karakterli yükleme hali için bir çevrim periyodu 180 sn olarak gerçekleşmektedir. Deneylede gözlenen tekrar sayısına binaen, nümerik simülasyon aşamasında fiktif deney süresi olarak 1920 sn 'lik bir analiz süresi programa tanıtılmıştır.

115Y kodlu yükleme ve deplasman durumuna dair deneysel ve nümerik analiz sonuçları Şekil 5.15'te gösterilmektedir.



Şekil 5.15 : 115Y kodlu deneysel ve sonlu eleman analizi sonuçları.

Deney ve nümerik analiz sonuçlarının genel anlamda benzer karakterde ortaya çıktığı, ancak büyük deplasman içeren modellerdeki rijitlik kaybını deneysel performanslarda görülmediği gözlenmektedir. 115Y kodlu deneye dair eğrilerde yer alan ve test düzeneğindeki yatay hareketten kaynaklanan kayma, nümerik analiz sonuçlarında ortaya çıkmamaktadır.

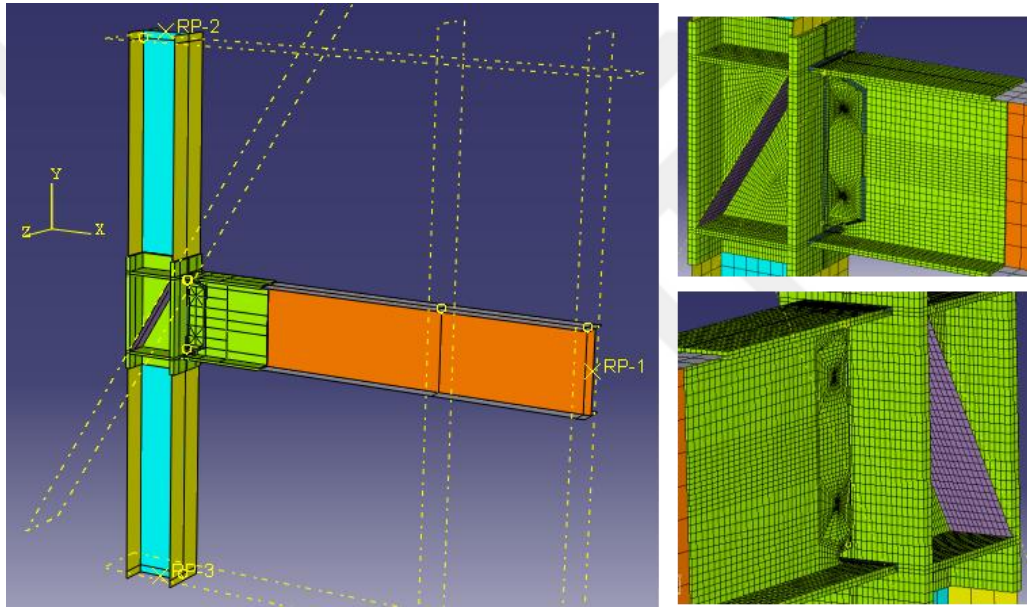
5.3 Detaylı sonlu eleman analizleri

Bir üst bölümde ilk olarak iki boyutlu (shell) plak elemanlar kullanılarak üç boyutlu hacimsel (solid) eleman kullanılan sonlu eleman analiz modellerine eşdeğer sonuçlar elde edilebileceği gösterilmişti. Numunelere dair gerçekleştirilen tam ölçekli deneyler sırasında, özellikle belli noktalarda gerilme yığılmaları ortaya çıkmış, bu yığılmaların neticesinde özellikle düşük genlikli konsol uç deplasmanının sisteme yüklendiği deneylerde gevrek kırılmalar gözlenmiştir. Deplasman genliklerinin artmasıyla habersiz gevrek kırılma şeklindeki gevrek göçme durumundan yerel burkulmaların da devreye girdiği karma modlu göçme durumları ortaya çıkmıştır. Bu tespit, Castiglioni ve ekibinin gerçekleştirdikleri deneysel çalışmaların sonuçlarıyla uyum göstermektedir.

Literatürde, kırılma sınır durumu ve çatlak tespiti konularında özellikle nümerik çalışmalar mevcut olup, bu çalışmalar sırasında üç boyutlu sonlu eleman analiz modelleri kullanılmaktadır (El-Tawil ve diğ., 1999). Bu çalışmalarda, özellikle birleşimde yer alan gövde levhası, kaynak ulaşım deliği ve montaj bulonu gibi birleşim elemanları modellenmekte, lokal gerilme durumları çeşitli performans indisleri yardımıyla takip edilmektedir.

Bu bölümde, birleşimdeki tüm bileşenleri kapsayacak şekilde hazırlanmış ve en üst düzeyde detaylı üç boyutlu modelleme içeren sonlu eleman modelleri tanıtılacak, sabit genlikli çevrimsel deplasman yüklemesine verdikleri cevap irdelenecektir.

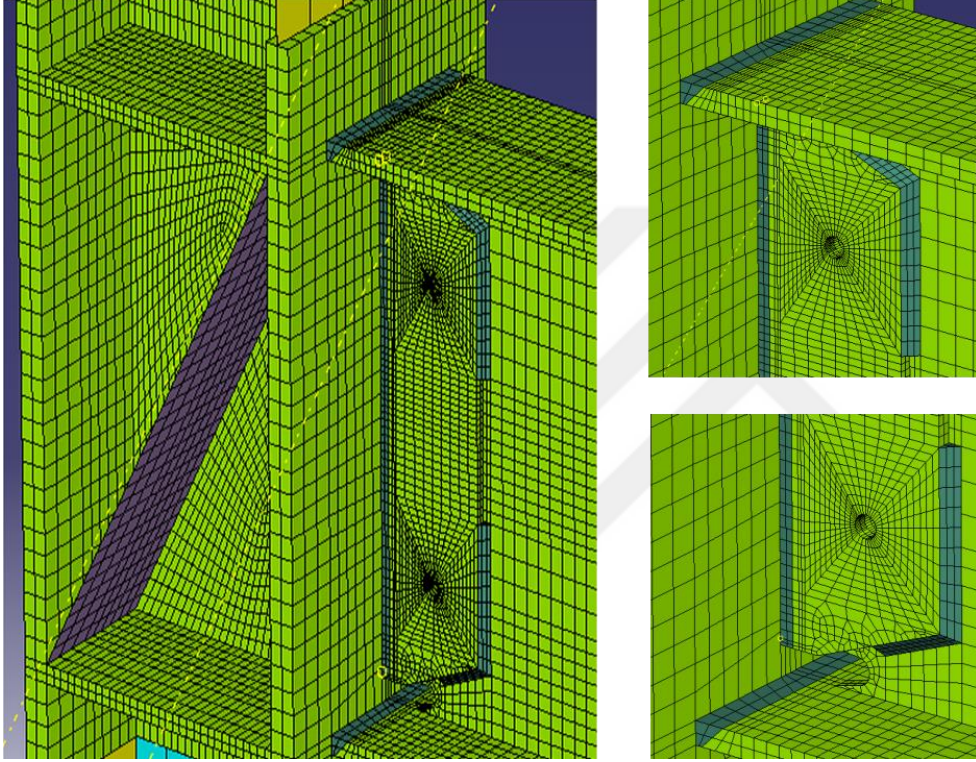
Birleşimlere dair sonlu eleman modelleri, ABAQUS ortamında hazırlanmıştır. Özellikle birleşim bölgesinde yoğun miktarda üç boyutlu hacimsel elemanlar kullanılmış olup, shell-solid tipi eleman geçişlerinde programda yer alan kaplin özelliğinden yararlanılmıştır. Bu sayede, farklı serbestlik derecesine sahip elemanlar arasında geçiş imkânı doğmakta, davranışta oluşabilecek tüm süreksizlikler bertaraf edilmektedir. Detaylı sonlu eleman modelinin genel görünüşü Şekil 5.16'da verilmektedir.



Şekil 5.16 : Detaylı sonlu eleman analiz modeli.

Şekil 5.16'da gösterildiği üzere, gövde kayma levhası kiriş gövdesinin yalnızca tek tarafında yer almakta olup, arka yüzdeki sonlu eleman ağı yalnızca ön taraftaki ağın bir yansıması olarak ortaya çıkmaktadır. Detaylı modelleme esnasında, kiriş gövdesi ile kolon gövdelerinin kalınlık doğrultularındaki orta düzlemleri çakışacak şekilde modelleme yapılmıştır. Bu durumda, birleşimdeki kayma levhası birleşim panel bölgesine kiriş gövde kalınlığının yarısı mertebesinde eksantrik bağlanmaktadır. Kolona kaynaklı gelecek bu kayma levhasına montaj sırasında kirişin bağlanması, ilk olarak iki adet montaj bulonu vasıtasıyla kirişin pozisyonuna getirilmesi, bu şekilde kotuna kaldırılarak sabitlenen kirişin kolon başlığına temas edecek kısımlarının saha kaynağı ile birleştirilmesi şeklinde olmaktadır.

Kiriş başlık ve gövdelerini kolona bağlayan kaynak dikişleri için, özellikle kiriş başlıklarında kaynak erişim delikleri belli geometriler çerçevesinde FEMA kuralları uyarınca şart koşulmaktadır. Mevcut depreme dayanıklı tasarım yönetmeliğimizdeki çelik yapıların tasarımına dair hükümler içinde de benzer geometri koşulları daha hafifletilmiş şekliyle yer almaktadır. Özellikle Northridge depremi sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar, kaynak erişim delik geometrisinin ne kadar önemli bir parametre olduğunu ortaya koymuştur (Bruneau ve diğ., 1998).



Şekil 5.17 : Gövde ve başlık birleşim detayları.

Şekil 5.17’de gövde kayma levhasının kiriş gövdesine kaynak dikişleriyle bağlanmış hali gösterilmektedir. Özellikle ileri düzey plastikleşmelerin beklendiği durumlarda bu kaynak dikişlerinin ek güvenlik sağlayacağı ilgili ifadeler yönetmeliklerde yer almakta ve uygulanması tavsiye edilmektedir. Deney numunelerinde uygulanan bu kaynak dikişi, sonlu eleman analiz modellerine de yansıtılmıştır.

Sonlu eleman analizi için model oluşturulurken, gövde kayma levhasının yalnızca bu sözü edilen kaynak dikişleri ile kiriş gövdesine bağlandığı, kayma levhası arka yüzeyinin ise kiriş gövdesinden bağımsız kaldığı ve sürtünmesiz ve temassız şekilde davrandığı gerçek durum modele yansıtılmaya çalışılmıştır. Yerel olarak kiriş gövdesinden kolon gövdesine transfer olan kesit tesirleri, bu bölgede küçük bir

miktar da olsa dışmerkezlik etkisine maruz kalmaktadırlar. Bu durum, analizler sırasında davranışa etki eden bir durum olarak ortaya çıkmış olup, ilerleyen kısımlarda bu duruma değinilecektir.

Pilot test akabinde sisteme dahil edilen kolon panel bölgesi diyagonal rijitleştirme levhası, kolon başlıklarını oluşturan üç boyutlu solid elemanlarla uyumlu olacak şekilde 20 mm kalınlığında düzlem plak elemanlar ile modellenenerek, kolon panel bölgesine yerleştirilmiştir. Birleşimdeki kaynak dikişlerine dair malzeme modeli olarak, literatürde E70 tipi elektrod için öngörülen malzeme gerilme-şekil değiştirme bağıntısı dikkate alınmıştır (El-Tawil ve diğ., 1999). Kaynak dikişlerine dair model bileşenleri, Şekil 5.17’de koyu yeşil renkle gösterilmektedir. Çelik malzemesine dair gerilme-şekil değiştirme bağıntısı, bir önceki bölümde olduğu gibi şekil değiştirme hızına bağlı olarak gerçekleştirilen malzeme deneylerinin sonuçlarına göre analiz programına tanıtılmıştır. Bu sayede mevcut bilgiler ışığında eksiksiz bir üç boyutlu modelleme yapılabilmektedir.

Detaylı sonlu eleman analizi modellerinde çatlak ilerlemesi modellenmemiş, bunun yerine herhangi bir önkusur veya çentik benzeri kırılma tetikleyici bir durumda potansiyel çatlak başlangıç noktalarını belirleyebilmek amacıyla yerel gerilme ve şekil değiştirme yığılmalarını inceleme yoluna gidilmiştir. Bu yaklaşım, literatürdeki bir çok çalışmada da kullanılmakta olan bir teknik olup, özellikle kaynak erişim deliği geometrisine dair araştırmalar sırasında gerçekleştirilen parametrik analizlerde yoğun şekilde kullanılmıştır (El-Tawil ve diğ., 1999).

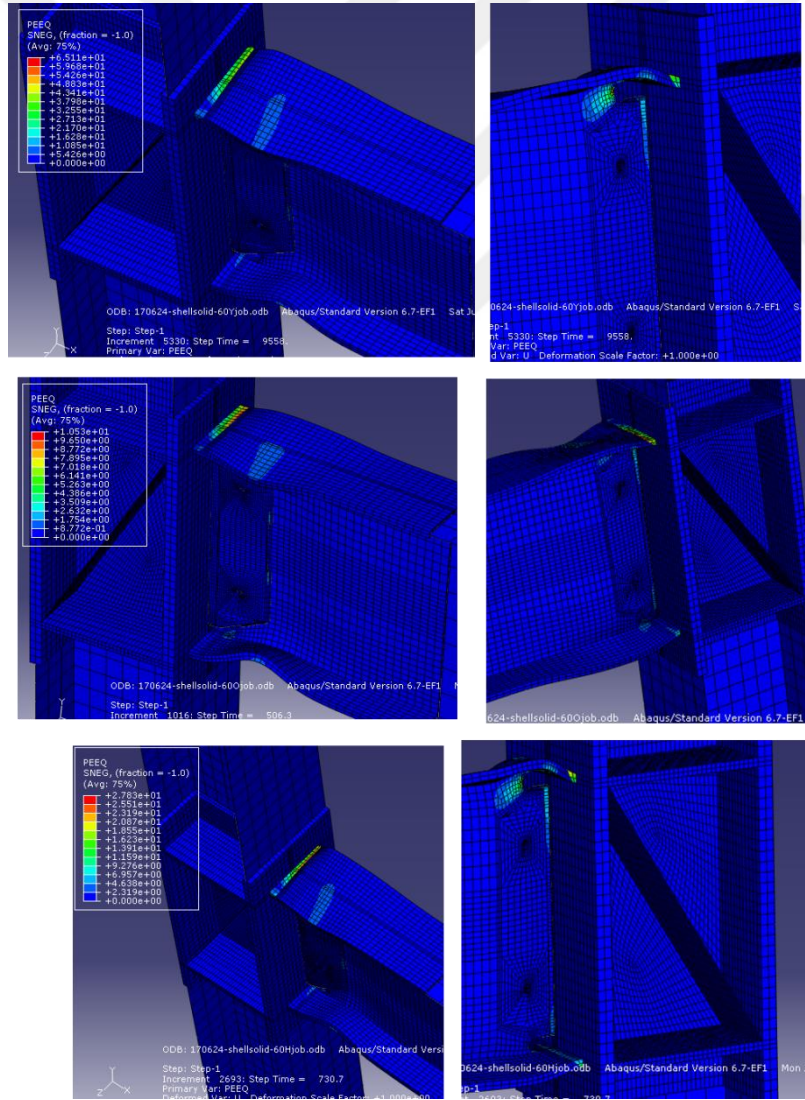
Bu bölümdeki detaylı nümerik analizler kapsamında, birleşimlerin yerel ve noktasal davranışlarını inceleyebilmek amacıyla, plastik eşdeğer şekil değiştirme indisi (PEEQ) sonuçları elde edilmiştir. PEEQ indisi, dış etkiler nedeniyle birleşimdeki çeşitli kritik noktalarda oluşan yerel elastik ötesi şekil değiştirme talebinin bir ölçüsü olarak kullanılmaktadır. PEEQ indisi, program tarafından otomatik olarak hesaplanmakta ve görsel olarak izlenebilmektedir. Bu sayede noktasal bazda ortaya çıkan elastik ötesi şekil değiştirmeye maruz kalacak noktaların tespiti yapılabilecektir.

PEEQ indisi literatürde, özellikle FEMA/SAC protokolü olarak da adlandırılan biçimde artan çevrimsel yükleme protokolüne uygun sonlu eleman analizi gerçekleştirilmesi durumunda, kabul kriteri olan 0.03 rad görelî kat ötelemesi

aşamasındaki yerel elastik ötesi şekil değiştirme talebini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Örneğin kaynak erişim deliğinde yapılabilecek çeşitli geometrik varyasyonlar yardımıyla 0.03 radyan dönmeye karşılık gelen anda PEEQ indisini minimumda tutulması veya belli bir noktaya yığılması önlenerek birleşimde göçmenin lokal bir noktadan tetiklenmesinin önüne geçilmeye çalışılmaktadır. Bu çalışma kapsamında ise artan genlikler ve belirli bir kabul kriteri mevcut olmaması nedeniyle, her bir deney simülasyonu için kritik anlara dair PEEQ indisi dağılımı sunulacak ve irdelenecektir.

5.3.1 60Y, 60O ve 60H kodlu detaylı analizler

60Y-60O-60H kodlu deneye dair analiz sonuçları, Şekil 5.18’de topluca sunulmaktadır.



Şekil 5.18 : 60Y-60O-60H modelleri için PEEQ dağılımı

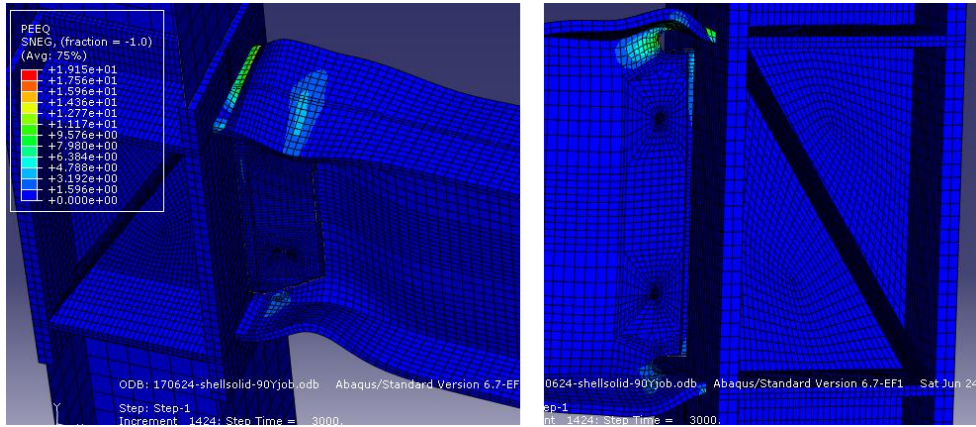
Gösterilen PEEQ indisi dağılımlarının incelenmesi sonucu, özellikle kiriş başlığını kolon başlığına bağlayan kaynak dikişi bölgesinde birleşimin büyük miktarda elastik ötesi şekil değiştirme talebi olduğu, bu bölgeyi kaynak erişim deliğinin kırılma potansiyeli açısından takip ettiği görülmektedir. Nümerik olarak elde edilen bu sonuçlar, deney numunelerinde gözlemlenen deneysel performans ve lokalize olmuş hasarlar ile uyum göstermektedir.

Aynı deplasman genliğine haiz üç farklı hızda yapılan yükleme sonucunda çatlak başlangıcı için kritik olan noktanın değişmediği görülmüştür. Bu durum, deney sonuçlarıyla uyumlu bir sonuçtur.

Analiz sonucunda dikkat çeken bir nokta, başlıkları birbirine bağlayan kaynak dikişlerinde PEEQ indisi dağılımının kaynak dikişinin bir kenarında odaklanmasıdır. Bu durumun, kiriş kolona bağlayan kayma levhası hattında yükün transferi sırasında meydana gelen dışmerkezlik etkisi nedeniyle olduğu açıktır. Deneylerle birebir uyumlu olan bu kırılma formasyonu, kayma levhasının arka bölgesinden (ters tarafından) ilk çatlağın oluştuğunu, birleşime gelen moment ve dönme etkisi nedeniyle bu çatlağın kiriş başlık genişliği boyunca diğer uca ulaşması anında birleşimin göçme sınır durumuna ulaştığını göstermektedir.

5.3.2 90Y kodlu detaylı analizler

90Y kodlu deneye dair PEEQ analiz sonuçları Şekil 5.19’da verilmektedir.



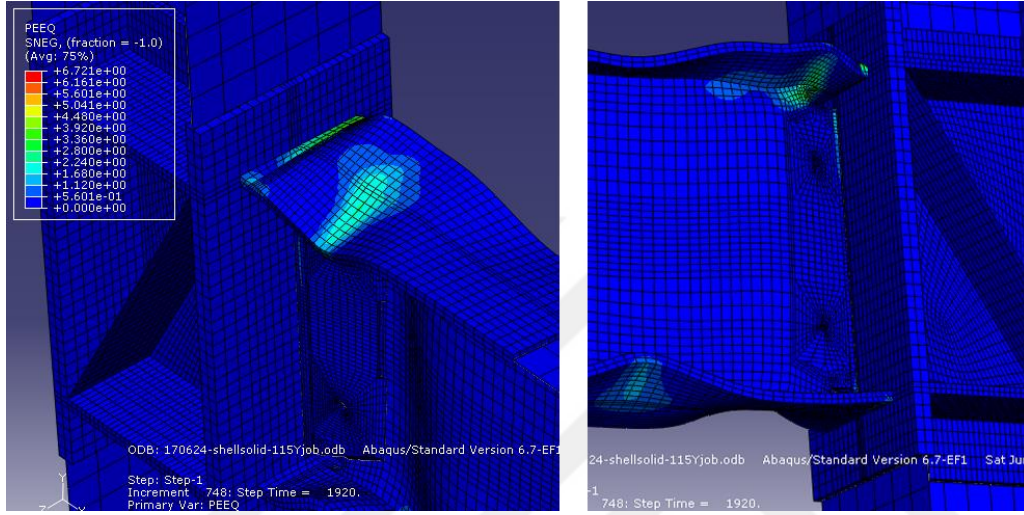
Şekil 5.19 : 90Y modeli için PEEQ dağılımı

Analiz sonucunda, PEEQ indisinin maksimum değerlere ulaştığı bölgelerin bir önceki deplasman genliğine benzer şekilde kiriş başlıklarını kolon başlığına bağlayan kaynak dikişleri civarı olduğu görülmektedir. Ancak sisteme uygulanan deplasman

genliğinin büyümesi nedeniyle kiriş başlıklarında yerel burkulma hareketleri başlamakta olup, kaynak dikişleri bölgesine ek olarak yerel burkulma yapan kiriş başlıklarında da çatlak oluşumu riski ortaya çıkmaktadır.

5.3.3 115Y kodlu detaylı analizler

Tersinir karakterde 115 mm konsol uç deplasmanı etkisi altındaki sonlu eleman analiz modelinde ortaya çıkan PEEQ indisi dağılımı Şekil 5.20’de yer almaktadır.



Şekil 5.20 : 115Y modeli için PEEQ dağılımı

Analiz sonucuna göre çatlak oluşum riskinin en yüksek düzeyde olduğu bölge değişmemekte, kiriş başlıklarının ucundaki kaynak dikişleri bölgesindeki yoğunlaşma devam etmektedir. Ancak, büyük genlikli deplasman sonucunda özellikle kiriş başlıklarında oluşan yerel burkulma durumu ve düzlem dışı burkulma genliği nedeniyle çatlak oluşumu beklenebilecek noktalar çoğalmakta, kaynak erişim deliği ve deliğin hemen yanındaki kiriş başlık bölgesi de büyük risk taşıyan bölgeler olarak öne çıkmaktadır.

Bu bölüm kapsamında sunulan iki ve üç boyutlu detaylı sonlu eleman analizleri ile deneysel şartlar birebir oluşturulmaya çalışılarak farklı deplasman genlikleri altında birleşimin performansı incelenmiştir. Malzeme kupon testleri ve literatürdeki kaynak malzemesi bünye bağıntıları kullanılarak modelleme yapılmış, elde edilen sonuçların deneysel performansa benzer şekilde elde edilebildiği görülmüştür. Ancak, özellikle kaynak sırasında sistemde en kritik noktalarda devreye giren ısı etkisi nedeniyle, en sağlıklı değerlendirmenin çok sayıda numune kullanılan deneysel çalışmalar ışığında yapılabileceği düşünülmektedir.

6. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Yapısal bileşenlerin yorulma ömürlerinin tayini için çeşitli yaklaşımlar bulunmakta olup, bu yaklaşımlar yapı, bileşen veya birleşime etkiyen dış yük veya bu bölgede oluşan iç tesirlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Literatürdeki mevcut yaklaşımlar çerçevesinde, (i) dış yüklerden dolayı oluşan gerilme aralığının ölçümü yeterli yaklaşıklıkla yapılabilen ve özellikle bir bütün olarak dış etkilere cevap inceleniyor ise S-N eğrileri yaklaşımıyla $\Delta\sigma$ nominal gerilme aralığı, (ii) bir bileşen veya detayın yerel ve/veya noktasal boyutta lineer olmayan şekil değiştirme durumu inceleniyor ise yerel şekil değiştirme yaklaşımıyla $\Delta\epsilon$ yerel lineer ötesi şekil değiştirme aralığı, (iii) bu bölge veya nokta civarında yerel kırılma mekaniği yaklaşımı kullanılacak ise ΔK gerilme yoğunluğu katsayısı ana inceleme parametresi olarak öne çıkmaktadır.

Bu yaklaşımlardan ikincisi olan yerel şekil değiştirme yaklaşımı ile lineer ötesi şekil değiştirme aralığı $\Delta\epsilon$ parametresine bağlı ifadeler, Bölüm 4.2’de malzeme kupon testlerinin sonuçlarının değerlendirilmesinde kullanılmış olup, büyük ölçekli numune deneylerinin sonuçları için uygun değildir. Bunun nedeni, gerçek bir yapı bileşeninin bir bütün olarak deneyde göstereceği performansın, sadece tek eksenli çekme kuvvetine maruz bırakılan ve göçme mekanizmasının yalnızca kupon boyun bölgesinde gerçekleşecek kopma davranışından çok daha karmaşık olacak olmasıdır.

Sismik etkiler sonucunda bir çelik yapı veya bileşenin göçme sınır durumuna ulaşma süreci birbirinden farklı bir çok etkinin kendi aralarında etkileşimiyle ortaya çıkmaktadır. Bu etkilerden bazıları tümsel veya yerel burkulma, gerilme pekleşmesi, malzemede kırılma sınır durumu, bulon veya kaynak dikişi gibi birleşim elemanlarında kesme, kırılma veya kopma, bileşende yanal burkulma veya bileşende güç tükenmesine yol açacak düşük tekrarlı yorulma şeklinde ortaya çıkabilmektedir. Tasarım öncesinde bir muhakeme öngörebilmek için, yapı veya bileşenin davranışı hakkında fikir yürütebilmek şart olup, yukarıda sayılan etkilerden her birinin payına düşeni öngörebilmek mümkün olamamaktadır. Bu nedenle, genel bileşen davranışını kestirebilmek adına deplasman, düğüm noktası dönmesi ve eğilme momenti gibi

temel parametreler dikkate alınabilmektedir (Castiglioni, 2007). Bu yaklaşım, literatürdeki diğer tavsiyelerle uyumludur (Krawinkler, 1983). Literatürde çok çeşitli şekillerde deney yükleme parametresi mevcut olup, bazıları artan genlikte, bazıları simetrik veya asimetrik artan formlu yük veya deplasman çevrimleri içermektedir. Yapılan çalışmaların farklılıklarını ortadan kaldıracı bir amaçla Krawinkler ve ekibi tarafından bir deney kılavuzu oluşturulmuş, testler arasında bir uyum yakalanması hedeflenmiştir.

Malzeme bilimi kapsamında gerçekleştirilen yorulma deneyleri genellikle belli bir gerilme veya şekil değiştirme sabit genliğinin numuneye uygulanması şeklinde yürütülmektedir. Bu yolla göçme sınır durumuna kadar uygulanan çevrim sayısı N_f ile testin ana uygulama parametresi olan gerilme veya şekil değiştirme genlikleri arasında bir bağıntı elde edilmesi hedeflenir. Düşük gerilme aralığı altında ortaya çıkan yüksek tekrarlı yorulma durumunu açıklamak için Basquin tarafından

$$\sigma = B \cdot N_f^b \quad (6.1)$$

ifadesi öngörülmüştür. Denkleminde yer alan B ve b katsayıları malzemeye bağlı değerler almaktadır. Yüksek şekil değiştirme (birim uzama) aralığının etkimesi sonucunda ortaya çıkan düşük tekrarlı yorulma davranışının da benzer formda ifade edilebilmesi fikri Coffin ve Manson'un çalışmaları sonrasında ortaya konmuş olup,

$$\varepsilon_p = C \cdot N_f^c \quad (6.2)$$

şeklindeki bu benzer ifadede de C ve c katsayıları malzemeye bağlı değerler almaktadır. Bir numunede veya yapı bileşenindeki toplam şekil değiştirme değeri ise, (6.1) ifadesinin elastisite modülüne bölünmesiyle elde edilecek elastik şekil değiştirme değeri ile (6.2)'de verilen plastik şekil değiştirmenin toplamı olarak ortaya çıkar. Deprem gibi büyük plastik şekil değiştirmelerin söz konusu olacağı durumlar için toplam şekil değiştirmenin elastik bileşeni önemini yitirir ve bir bileşenin sabit genlikli çevrimsel yükleme altında göçme tekrar sayısı N_f , (6.2) ifadesiyle yeterli yaklaşıklıkla ortaya konabilir.

Bir yapısal bileşende davranışta gözlenen düşüş veya göçme durumu o bileşenin malzemesinin yorulma davranışı ile alakalıysa, malzeme hasar modelinin yapı bileşenine teşmili mümkün hale gelebilir. Özellikle deprem etkisi altında zorlanan

yapısal bileşenler, bu etki altında az sayıda ancak büyük plastik deformasyon genlikleri altında stabilitelerini koruyarak deprem tesirlerini karşılamak zorundadır. Bu tarzda oluşan kesit tesir dinamiği, düşük tekrarlı yorulma kapsamında ele alınabilir, ve bu amaçla, her bir şekil değiştirme çevrimini ifade edecek şekilde $\Delta\delta_p$ olarak gösterilecek bir deformasyon parametresi kullanılabilir. Bu parametre lokal birim uzama olabileceği gibi, bir düğüm noktasının plastik mafsallık dönme miktarı şeklinde daha global bir parametre şeklinde de seçilebilir. Ancak, bu parametre kullanılarak belirli bir etki altında hasar modellemesi yapılacak ise, bu parametrenin sabit genlikli şekilde uygulanmasıyla elde edilebilecek temel davranış bilgisine (baz eğrilere) ihtiyaç vardır. Bu sayede seçilen parametrenin genel performansa etkisi ortaya konabilir. Düşük tekrarlı yorulma deney ve analizleri kapsamında seçilen parametre $\Delta\delta_p$ plastik konsol uç deplasmanı (bir çevrim için toplam deplasmanın plastik bileşeni), genel performans parametresi de N_f düşük tekrarlı yorulmaya karşılık gelen tekrar sayısı olarak ele alınmıştır.

Yukarıda (6.2) ile verilen ifade ana performans parametresi olan tekrar sayısı N_f baz alınarak logaritmik invers işlemi ile aşağıdaki şekilde yazılabilir ve bu sayede malzeme modelleme amaçlı oluşturulan Coffin-Manson bağıntısı yapısal bileşenlerin plastik deformasyon içeren davranışlarını modelleyecek şekilde kullanılabilir:

$$N_f = C^{-1}(\Delta\delta_p)^{-c} \quad (6.3)$$

Düşük tekrarlı yorulmadan kaynaklanan birikimsel hasarın saptanması için, gerçek boyutlu kolon kiriş birleşimleri üzerinde farklı yükleme hızlarında yapılmış olan ve önceki bölümlerde verilmiş olan test sonuçlarına göre elde edilen $(N_f, \Delta\delta_p)$ değerleri kullanılarak, Coffin-Manson düşük tekrarlı yorulma modelinde yer alan C ve c katsayıları iki farklı yükleme hızı için hesaplanmıştır.

Bu bölümde, deney sonuçlarının nümerik olarak değerlendirilmesi yapılmış, davranışı ifade eden c ve C katsayıları yavaş ve hızlı yükleme durumlarına göre tespit edilmiştir. Sonuçlarla ilgili yorumda bulunulmuş, çalışmanın geliştirilmesi anlamında gerekli görülen noktalarla ilgili öneriler verilmiştir.

6.1 Yavaş Yükleme Durumu

İki farklı deplasman genliği için c ve C katsayıları hesaplanacaktır.

± 60 mm deplasman için ;

Test 2' de $\Delta\delta_p \cong 38$ mm ve $N_f = 103$ cycle ve

Test 3' de $\Delta\delta_p \cong 39$ mm ve $N_f = 107$ cycle değerleri elde edilmiştir.

Bu değerlerin ortalaması alınarak, ± 60 mm için $\Delta\delta_p \cong 39$ mm ve

$N_f^{ort} = 105$ cycle değerleri bulunmuştur.

± 90 mm deplasman için ;

Test 12' de $\Delta\delta_p \cong 92$ mm ve $N_f = 14$ cycle ve

Test 13' de $\Delta\delta_p \cong 90$ mm ve $N_f = 15$ cycle değerleri elde edilmiştir.

Bu değerlerin ortalaması alınarak, ± 90 mm için $\Delta\delta_p \cong 91$ mm ve

$N_f^{ort} = 15$ cycle değerleri bulunmuştur.

Coffin – Manson ifadesi, her iki tarafın logaritması alınarak,

$\log N_f = -\log C - c \log \Delta\delta_p$ şekline dönüştürülür ve bu formülasyon,

$\log N_f = A_1$ ve $\log \Delta\delta_p = A_2$ eşitlikleri kullanılarak yeniden düzenlendiğinde,

$cA_2 + \log C = -A_1$ eşitliği elde edilecektir.

Test 2 ve **Test 3** sonuçları için bu eşitliğin A_1 ve A_2 katsayıları,

$$A_1 = \log N_f = 2,0211893 \text{ ve } A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,59106$$

ve buradan $-2,0211893 = 1,59106c + \log C$

eşitliği elde edilecektir.

Benzer şekilde **Test 12** ve **Test 13** sonuçları için de,

$$A_1 = \log N_f = 1,17609 \quad \text{ve} \quad A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,95904$$

ve buradan $-1,17609 = 1,95904c + \log C$ ifadesi elde edilecektir.

Bu iki denklem kullanılarak,

$$-2,0211893 = 1,59106c - 1,17609 - 1,95904c$$

denklemini ve buradan da

$$c = \frac{-0,8450933}{-0,3679800} = 2,297 \quad \text{ve} \quad C = 2,1086 \times 10^{-6} \quad \text{değerleri hesaplanmıştır.}$$

6.2 Hızlı Yükleme Durumu

Benzer şekilde, iki farklı deplasman genliği için hesaplar tekrarlanacaktır.

±60 mm deplasman için ;

Test 9' da $\Delta\delta_p \cong 42 \text{ mm}$ ve $N_f = 78 \text{ cycle}$ ve

Test 10' de $\Delta\delta_p \cong 40 \text{ mm}$ ve $N_f = 83 \text{ cycle}$ değerleri elde edilmiştir.

Bu değerlerin ortalaması alınarak, $\pm 60 \text{ mm}$ için $\Delta\delta_p \cong 41 \text{ mm}$ ve

$$N_f^{ort} = 81 \text{ cycle} \quad \text{değerleri bulunmuştur.}$$

±90 mm deplasman için ;

Test 7' de $\Delta\delta_p \cong 88 \text{ mm}$ ve $N_f = 17 \text{ cycle}$ ve

Test 8' de $\Delta\delta_p \cong 91 \text{ mm}$ ve $N_f = 15 \text{ cycle}$ değerleri elde edilmiştir.

Bu değerlerin ortalaması alınarak, $\pm 90 \text{ mm}$ için $\Delta\delta_p \cong 90 \text{ mm}$ ve

$$N_f^{ort} = 16 \text{ cycle} \quad \text{değerleri bulunmuştur.}$$

Hızlı yüklemeye ait **C** ve **c** değeri de, yukarıdaki gibi,

$$cA_2 + \log C = -A_1$$

denklemini kullanarak aşağıdaki gibi elde edilecektir.

Test 9 ve **Test 10** sonuçları için A_1 ve A_2 katsayıları,

$$A_1 = \log N_f = 1,908485 \quad A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,612800$$

ve buradan $-1,908485 = 1,612800c + \log C$ eşitliği elde edilecektir.

Benzer şekilde **Test 7** ve **Test 8** sonuçları içinde,

$$A_1 = \log N_f = 1,204120 \quad , \quad A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,954243$$

ve buradan da $-1,20412 = 1,954243c + \log C$ elde edilir.

Bu iki denklem kullanılarak,

$$-1,908485 = 1,6128c - 1,20412 - 1,954243c \quad \text{ifadesi ve buradan da,}$$

$$c = \frac{-0,704365}{-0,341443} = 2,063 \quad \text{ve} \quad C = 5,81135 \times 10^{-6} \quad \text{değerleri hesaplanmıştır.}$$

6.3 Orta Hızla Yükleme Durumu

Yavaş ve hızlı yükleme yapılan bu sözkonusu testlere ek olarak, Test 15’de, $v_3=4v_1$ hızıyla orta hız olarak adlandırılan ek bir test yapılmıştır. Bu testin sonuçlarına göre, **c** ve **C** katsayılarının hesabı şu şekilde olmaktadır:

Test 15’de $\pm 60 \text{ mm}$ için $\Delta\delta_p \cong 42 \text{ mm}$ ve $N_f = 84 \text{ cycle}$; ve $\pm 90 \text{ mm}$ için

$\Delta\delta_p \cong 90 \text{ mm}$ ve $N_f = 14 \text{ cycle}$ kabul edilerek , Test 15 için,

$$A_1 = \log N_f = 1,9243 \quad A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,6233$$

ve buradan $-1,9243 = 1,6233c + \log C$ eşitliği elde edilecektir.

Benzer şekilde, $\pm 90 \text{ mm}$ için,

$$A_1 = \log N_f = 1,954 \quad , \quad A_2 = \log \Delta\delta_p = 1,1461$$

ve buradan da $-1,1461 = 1,954c + \log C$ elde edilir. Bu iki denklem kullanılarak,

$-1,9243 = 1,6233c - 1,1461 - 1,954c$ ifadesi ve buradan da,

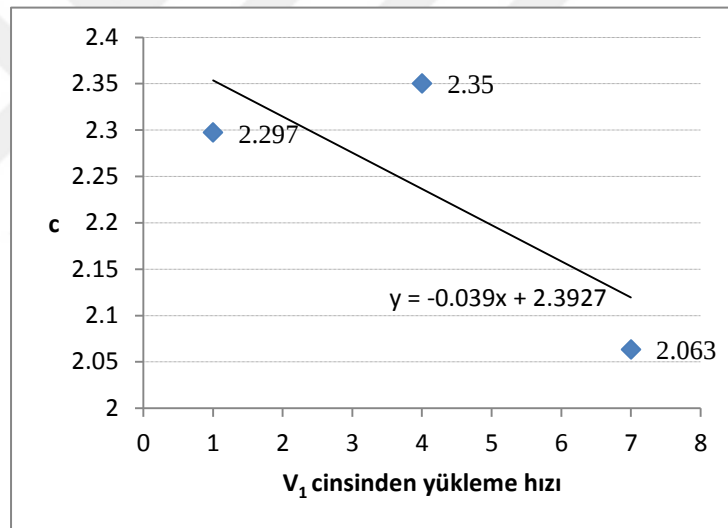
$$c = \frac{-0,77782}{-0,3307} = 2,35 \text{ ve } C = 1,8237 \times 10^{-6} \text{ de\u011ferleri hesaplanm\u0131\u015ft\u0131r.}$$

Bu hesaplamaların sonucunda c ve C de\u011ferleri \u015fu \u015fekilde ortaya \u00e7ıkmaktadır:

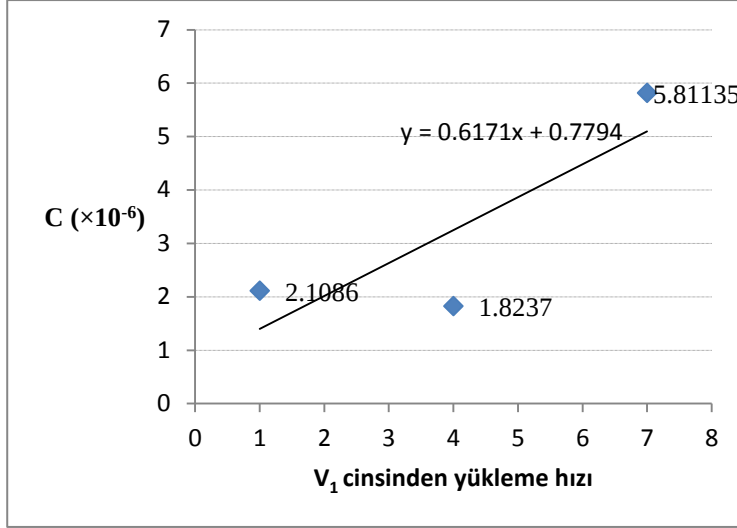
\u00c7izelge 6.1 : Y\u00fckleme hızlarına g\u00f6re c ve C de\u011ferleri.

Y\u00fckleme hızı	c	C ($\times 10^{-6}$)
Yavaş	2.297	2.1086
Orta	2.35	1.8237
Hızlı	2.063	5.81135

Bu de\u011ferlerin grafiksel g\u00f6sterimi ise \u015fu \u015fekildedir :



\u015ekil 6.1 : Farklı hızlar i\u00e7in c katsayısının de\u011fi\u015fimi



Şekil 6.2 : Farklı hızlar için C katsayısının değişimi

Tablodaki değerlere en küçük kareler yaklaşımı ile lineer değişimi ifade eden doğrular uydurularak, farklı hızlar için c ve C katsayılarının saptanması gerçekleştirilmiştir. Buna göre,

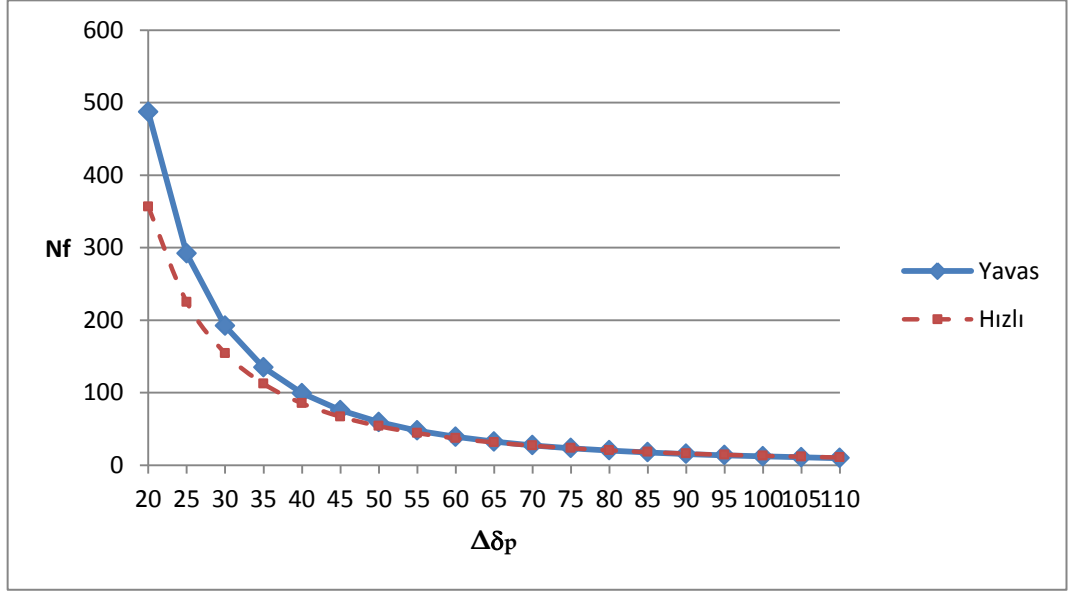
c için

$$c = -0.039v + 2.3927$$

C için

$$C = 0.6171v + 0.7794$$

ifadeleri elde edilmiştir. Bunların kullanılması suretiyle, Miner kuralının farklı hızlar için kullanılması mümkün olabilecektir. Bulunan bu c ve C katsayıları kullanılarak, yavaş ve hızlı yüklemeler için, iki farklı Coffin-Manson ifadesi elde edilir. Elde edilen bu katsayıların $N_f = C^{-1}(\Delta\sigma_p)^{-c}$ ifadesinde yerine konması sonucu, şu eğriler elde edilir:



Şekil 6.3 : Yavaş ve hızlı yükleme için Coffin-Manson eğrileri

115 mm'den büyük deplasman yüklenmesi halinde, eğrinin sağ ucuna dair daha sağlıklı bilgi üretimi mümkün olabilecektir. Ancak hem mevcut ekipmanın stroke değerinin yetmemesi hem de numune kalmaması sonucunda bu bölge yeterince incelenememiştir. Yeni çalışmalarla bu alanda bilgi üretilebileceği düşünülmektedir.

6.4 Deney genel sonuçları

Deneyler sırasında yavaş, hızlı ve orta hızlı karakterde deplasman yüklemeleri gerçekleştirilmiş, numunelerin genel davranışlarına bu yükleme hızlarının etkileri gözlenmiştir. Buna göre,

- 1) Aynı hız ve deplasman genliğine haiz deneylerde numunelerin davranışları arasında çok küçük sapmalar gözlenmiş, göçmeye kadar karşılanabilen tekrar sayıları açısından yeterli korelasyon elde edilmiştir.
- 2) Belli bir deplasman değerinin hızlı yüklenmesi hali küçük deplasmanlar için göşme tekrar sayısında fark yaratmakta, ancak büyük deplasmanlar açısından dikkate değer bir sapma ortaya çıkmamaktadır.
- 3) Artan yükleme hızları c katsayısında azalma, C katsayısında ise artış ortaya çıkarmaktadır. Bu sayede (6.3) ifadesinin farklı yükleme hızlarında farklı eğrileri tanımlaması söz konusudur.

- 4) Elde edilen katsayıları dikkate alarak farklı yükleme hızları altında oluşacak hasarın Miner lineer hasar birikimi ifadesiyle hesaplanabileceği, bu sayede örneğin bir kiriş-kolon birleşiminin geçmiş depremlerde yaşamış olduğu hasarın üstüne yeni bir deprem etkisinde karşılayabileceği artık hasar düzeyi belirlenebilecektir.



KAYNAKLAR

- ASTM, (1982). Standard Practice Of Load Tests For Shear Resistance Of Framed Walls For Buildings, *ASTM Standard E564*, Draft No.8.
- Ballio, G., Castiglioni, C.A., (1995). A unified approach for the design of steel structures under low and/or high cycle fatigue, *Journal Of Constructional Steel Research*, **34**(1), 75-101.
- Ballio, G., Calado, L., Castiglioni, C.A.(1997). Low cycle fatigue behaviour of structural steel members and connections, *Fatigue And Fracture of Engineering Materials And Structures*, **20**(8), 1129-46.
- Bannantine, J.A., Handrock, J.L., Comer, J.J.,(1989). *Fundamentals Of Metal Fatigue Analysis*, Prentice Hall.
- Bayülke, N. (1996). Moment taşıyan çelik kolon kiriş birleşim yerlerinin 1994 Northridge Kaliforniya depremindeki davranışı, *TMH Türkiye Mühendislik Haberleri*, **382**.
- Bayülke, N., (2003). 1994 Northridge Kaliforniya depremi sonrasında moment taşıyan çelik kiriş-kolon birleşim yerleri üzerinde yapılan deneyler, araştırma ve geliştirmeler, *TMH Türkiye Mühendislik Haberleri*, **425-2003/3**.
- Bleich, F., (1952). *Buckling Strength Of Metal Structures*, McGraw-Hill, New York.
- Bruneau, M., Uang, C.M., Whittaker, A.,(1998). *Ductile Design Of Steel Structures*, McGraw Hill, New York,.
- Bursi, O.S, Ferraio, F., Fontanari, V., (2002) Non-linear analysis of the low-cycle fracture behaviour of isolated tee stub connections, *Computers And Structures*, **80**, 2333-60.
- Calado, L., Castiglioni, C.A., (1995). Low Cycle Fatigue Testing Of Semi-Rigid Beam-To-Column Connections, *3rd International Workshop On Connections In Steel Structures*, Trento-Italy,
- Calado, L., Castiglioni, C.A., Bernuzzi, C.,(2000). Seismic Behaviour Of Welded Beam-To-Column Joints: Experimental And Numerical Analysis, *4th International Workshop On Connections In Steel Structures*, Roanoke-VA.
- Castiglioni, C.A. (2005). Effects Of The Loading History On The Local Buckling Behavior And Failure Mode Of Welded Beam-To-Column Joints In Moment-Resisting Steel Frames, *ASCE Journal Of Engineering Mechanics*, **131**(6).
- Dexter, R.J., Hajjar, J.F., Lee, D.,(2004). Effect Of Column Stiffener Detailing And Weld Fracture Toughness On The Performance Of Welded Moment Connections, *5th International Workshop On Connections In Steel Structures*, Amsterdam.

- El-Tawil, S. ve diğ.,** (1999). Inelastic Behavior and Design of Steel Panel Zones, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, **125**(2), Sf. 183-193.
- Eurocode 3 Part 1.9,** (2000). Fatigue Strength Of Steel Structures, *European Committee For Standardisation*, Pre-N 1993-1-9.
- Ferreira, J., Castiglioni, C.A., Calado, L., Agatino, M.R.,** (1998). Low Cycle Fatigue Strength Assessment Of Cruciform Welded Joints, *Journal Of Constructional Steel Research*, **47**, 223-44.
- Gioncu, V., Mazzolani, F.M.,** (2002). *Ductility Of Seismic Resistant Steel Structures*, Spon Press, Sf: 392-394.
- Gross, J.L.,** (1998). Design Guidelines For The Seismic Modification Of Welded Steel Moment Buildings, *NIST Sp 931*.
- Krawinkler, H., Bertero, V.V., Popov, E.P.,**(1971). Inelastic Behavior Of Steel Beam-To-Column Subassemblages, **UCB/EERC -71/07**, *Earthquake Engineering Research Center*, University Of California, Berkeley.
- Krawinkler, H.,**(2000). Loading Histories For Seismic Performance Testing Of SMRF Components And Assemblies, **SAC/BD-00/10**.
- Mander, J.B., Chen, S.S., Pekcan, G.** (1994). Low-Cycle Fatigue Behaviour Of Semi-Rigid Top-And-Seat Angle Connections, *AISC Engineering Journal*, 3rd Quarter, 111-22.
- Mander, J.B., Pekcan, G., Chen, S.S.** (1995). Low-Cycle Variable Amplitude Fatigue Modeling Of Top-And-Seat Angle Connections, *AISC Engineering Journal*, 2nd Quarter, 54-62.
- Miner, M.A.,** (1945). Cumulative Damage In Fatigue, *Journal Of Applied Mechanics*, **101**, Sf.1578-1806.
- Nortridge Earthquake Reconnaissance Report** (1995). Vol:1, *Earthquake Spectra*, Suppl.C To Vol.11.
- Özalgül, K.,** (2006) *Üç Boyutlu Çerçevelerin Üç Bileşenli Deprem Yükleri Etkisinde Göçme Mekanizmaları Ve Sünekliğinin Belirlenmesi*, (doktora tezi), İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Richard, R., Allen, J., Partridge, J.E.** (2001). Accumulated Seismic Connection Damage Based Upon Full Scale Low Cycle Fatigue Connection Tests, *Proceedings Of The Structural Engineers Association Of California 70th Annual Convention*, Sf: 43-48.
- Roberts, M.W., Lutes, L.D.** (2003). Potential For Structural Failure In The Seismic Near Field, *ASCE Journal Of Engineering Mechanics*, **129**(8).
- SAC Joint Venture** (1994), Invitational Workshop on Steel Seismic Issues, *Proceedings*.
- Slecicka, L.,** (2004). Low Cycle Fatigue Strength Assessment Of Butt And Fillet Weld Connections, *Journal Of Constructional Steel Research*, **60**, 701-12.
- Stojadinovic, B.** (2003). Stability and Low-Cycle Fatigue Limits Of Moment Connection Rotation Capacity, *Engineering Structures*, **25**, 691-700.

- Taucer, F., Negro, P., Colombo, A.,** (2000). Low-Cycle Fatigue Cyclic And PSD Testing Of A Two-Storey Moment Resisting Steel Frame With Beam-To-Column Welded Connections, *Journal Of Earthquake Engineering*, **4**(4), 437-77.
- Teran-Gilmore, A., Jirsa, J.O.,** (2005). A Damage Model For Practical Seismic Design that accounts for Low Cycle Fatigue, *Earthquake Spectra*, **21**(3), 803-32.
- Uang, C.M., Yu, Q.S., Gilton, C.S.,** (2000). Effects Of Loading History On Cyclic Performance Of Steel RBS Moment Connections, *12th World Conference On Earthquake Engineering*, Canterbury-New Zealand.
- Vayas, I., Sophocleous, A., Dinu, F.,** (2003). Fatigue Analysis Of Moment Resisting Steel Frames, *Journal of Earthquake Engineering*, **7**(4), 635-54.





ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Övünç Tezer

Doğum Yeri ve Tarihi: Fethiye, 1977

E-Posta: otezer@hotmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi

Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Uzgider, E.A., Çağlayan, B.Ö., Özakgöl, K., ve **Tezer, Ö.**, “Çelik kiriş-kolon birleşimlerinin düşük tekrarlı yorulma davranışına yükleme hızının etkisi”, *4. Ulusal Çelik Yapılar Sempozyumu*, 24-26 Ekim 2011, İstanbul.