



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEPO RAF SİSTEMLERİNİN BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SİSMİK
PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Muhammed Emre HABERDAR

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Seda Öncü DAVAS

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Mart, 2023

TEZ KABUL VE ONAYI

Muhammed Emre HABERDAR tarafından, Dr. Öğr. Üyesi Seda Öncü DAVAS danışmanlığında hazırlanan " DEPO RAF SİSTEMLERİNİN BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ " başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından 27/03/2023 tarihinde yapılan sınav sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

	İmza	Sonuç
DANIŞMAN	Dr. Öğr. Üyesi Seda Öncü DAVAS	<input checked="" type="checkbox"/>
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yapı Anabilim Dalı	Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Prof. Dr. Cenk ALHAN	<input checked="" type="checkbox"/>
	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Yapı Anabilim Dalı	Kabul <input type="checkbox"/> Ret
ÜYE	Doç. Dr. Arcan YANIK	<input checked="" type="checkbox"/>
	İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı	Kabul <input type="checkbox"/> Ret

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve bilimsel etik kuralları içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını ve her türlü hukuki sorumluluğu aldığımı kabul ederim.

Muhammed Emre HABERDAR

(İmza)



Aileme ve tez danışmanım Seda Öncü Davas'a ithaf ediyorum...

BÜTÇE DESTEKLERİ

DEPO RAF SİSTEMLERİNİN BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

Bu çalışma İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon
Birimi tarafından desteklenmiştir. Proje numarası: 36297

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi, birikim ve tecrübesini hiç esirgemeyen, tez hazırlanması süresindeki rehberliği, tavsiyeleri ve eleştirileri için tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Seda Öncü Davas'a teşekkürlerimi sunarım.

Öğrenim hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen tüm olanakları ile birlikte zorlukların üstesinden gelebilmemde hep yanımda olan aileme sonsuz teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ülkemize ve literatüre faydalı olmasını ve ardından yapılacak herhangi bir çalışmaya yardımcı olmasını temenni ederim.

Mart 2023

Muhammed Emre HABERDAR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

TEZ KABUL VE ONAYI.....	ii
BEYAN	iii
BÜTÇE DESTEKLERİ	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ	x
TABLO LİSTESİ.....	xiv
ÖZET	xvi
ABSTRACT	xviii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. ÇALIŞMANIN AMACI.....	4
1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI	4
2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE	6
2.1. DEPO RAF SİSTEMİ TÜRLERİ.....	6
2.1.1. Yüksek İrtifalı Depolama Sistemleri.....	6
2.1.2. Düşük İrtifalı Depolama Sistemleri.....	11
2.2. RAF SİSTEMİ ELEMANLARI	13
2.2.1. Kirişler.....	14
2.2.2. Kiriş Uç Konektörleri.....	14
2.2.3. Kolonlar.....	15
2.3. YÖNETMELİKLER.....	16
2.4. DEPREM DURUMUNDA RAF SİSTEMLERİNİN OLASI HASARLARI	19
2.4.1. 1992 Landers Depreminde Raporlanan Hasar	19
2.4.2. 1994 Northridge Depreminde.....	20
2.4.3. 2001 Nisqually Depreminde Raporlanan Hasarlar.....	21
2.4.4. 2003 San Simeon Depreminde Raporlanan Hasar	22
2.5. LİTERATÜR TARAMASI	22
2.5.1. Çevrim Sıkışması (Pinching Effect).....	26

3. YÖNTEM	29
3.1. DENEY PROSEDÜRÜ	29
3.1.1. Deney Düzeneginin Özellikleri	29
3.1.2. Çevrimsel Test Prosedürü ve Test Numunelerinin Tarifi	31
3.2. SONLU ELEMANLAR MODELİ	33
3.2.1. OpenSees TCL Deney Modeli	33
3.2.2. SAP2000 Deney Modeli	35
4. BULGULAR	39
4.1. ÇEVİRİMSSEL YÜKLEME DENEYLERİ	39
4.1.1. 01K_DD50x75 Numunesinin Deney Sonuçları	42
4.1.2. 02K_40x100 Numunesinin Deney Sonuçları	44
4.1.3. 03K_DD50x130 Numunesinin Deney Sonuçları	46
4.1.4. 04K_40x80 Numunesinin Deney Sonuçları	48
4.1.5. 05K_DD50x105 Numunesinin Deney Sonuçları	50
4.1.6. 06K_50x150 Numunesinin Deney Sonuçları	51
4.1.7. 07K_DD50x170 Numunesinin Deney Sonuçları	54
4.1.8. Deney Sonuçlarının Sönümlenen Enerji Açısından İncelenmesi	56
4.2. OPENSEES BİRLEŞİM MODELİNE AİT SONUÇLAR	58
4.2.1. 01K_DD50x75 Numunesinin OpenSees Sonuçları	58
4.2.2. 02K_40x100 Numunesinin OpenSees Sonuçları	60
4.2.3. 03K_DD50x130 Numunesinin OpenSees Sonuçları	61
4.2.4. 04K_40x80 Numunesinin OpenSees Sonuçları	62
4.2.5. 05K_DD50x105 Numunesinin OpenSees Sonuçları	64
4.2.6. 06K_50x150 Numunesinin OpenSees Sonuçları	65
4.2.7. 07K_DD50x170 Numunesinin OpenSees Sonuçları	67
4.2.8. OpenSees Sonuçlarının Sönümlenen Enerji Açısından İncelenmesi	68
4.3. SAP2000 BİRLEŞİM MODELİNE AİT BULGULAR	70
4.3.1. 01K_DD50x75 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	71
4.3.2. 02K_40x100 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	74
4.3.3. 03K_DD50x130 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	76
4.3.4. 04K_40x80 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	79
4.3.5. 05K_DD50x105 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	81
4.3.6. 06K_50x150 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	84
4.3.7. 07K_DD50x170 Numunesinin SAP2000 Sonuçları	86

4.3.8. SAP2000 Sonuçlarının Sönümlenen Enerji Açısından İncelenmesi.....	89
5. TARTIŞMA.....	91
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR.....	95



ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1: Depo raf sistemi doğrultuları.	2
Şekil 1.2: Raf sistemi elemanları (Simoncelli, ve diğ., 2020).	2
Şekil 2.1: Dış giydirme raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 19.10.2021).	7
Şekil 2.2: Genel görünüş (www.rafgrup.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021) (a) sırt sırta raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021) (b).	7
Şekil 2.3: Mekanik raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	8
Şekil 2.4: İçine girilebilir raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	8
Şekil 2.5: As/Rs otomatik depolama (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	9
Şekil 2.6: Hafif yük raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	10
Şekil 2.7: Hareketli raf sistemi (www.rafsistem.com,Erişim Tarihi: 13.10.2021).	10
Şekil 2.8: Kayar raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	11
Şekil 2.9: Mezanin raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).	11
Şekil 2.10: Sipariş hazırlama raf sistemi (www.rafax.com.tr,Erişim Tarihi: 20.10.2021).	12
Şekil 2.11: Konsol kollu raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 20.10.2021).	12
Şekil 2.12: Raf sistemi elemanları.	13
Şekil 2.13: Raf sistemi doğrultuları.	14
Şekil 2.14: Kiriş uç konektörü.	14
Şekil 2.15: (a) Kolonun üç boyutlu görünüşü (b) kolon kiriş birleşimi.	15
Şekil 2.16: Taban plakası ve çaprazlar.	16
Şekil 2.17: Çapraz koridor doğrultusundaki yapı malzemelerinin uğradığı hasar (FEMA-460, 2005).	20
Şekil 2.18: Çapraz koridor doğrultusundaki seramiklerin uğradığı hasar (FEMA-460, 2005).	20
Şekil 2.19: Histerezis üzerinde çevrim sıkışması olgusu	27

Şekil 3.1: Deney düzeneği.....	30
Şekil 3.2: Birleşimin şematik gösterimi (ölçüler mm'dir).....	31
Şekil 3.3: Çevrimsel yükleme prosedürü.....	31
Şekil 3.4: Deplasman dönme şeması.	32
Şekil 3.5: Birleşim bölgesi elemanı.	34
Şekil 3.6: OpenSees modeli.....	34
Şekil 3.7: Yapısal eleman kesit parametreleri.	36
Şekil 3.8: Link eleman tanımları.	37
Şekil 3.9: Kolon kiriş birleşim modellemesi.	38
Şekil 4.1: Döngüsel yükleme kontrolü.	39
Şekil 4.2: Numuneleri yerleştirilmiş deney düzeneği.....	40
Şekil 4.3: 01K_DD50x75 numunesinin moment dönme grafikleri.....	42
Şekil 4.4: 01K_DD50x75 numunesinin deney fotoğrafları.....	43
Şekil 4.5: 02K_40x100 numunesinin moment dönme grafikleri.	44
Şekil 4.6: 02K_40x100 numunesinin deney fotoğrafları.	45
Şekil 4.7: 03K_DD50x130 numunesinin moment dönme grafikleri.....	46
Şekil 4.8: 03K_DD50x130 numunesinin deney fotoğrafları.....	47
Şekil 4.9: 04K_40x80 numunesinin moment dönme grafikleri.	48
Şekil 4.10: 04K_40x80 numunesinin deney fotoğrafları.	49
Şekil 4.11: 05K_DD50x105 numunesinin moment dönme grafikleri.....	50
Şekil 4.12: 05K_DD105x50 numunesinin deney fotoğrafları.....	51
Şekil 4.13: 06K_50x150 numunesinin moment dönme grafikleri.	52
Şekil 4.14: 06K_50x150 numunesinin deney fotoğrafları.	53
Şekil 4.15: 07K_DD50x170 numunesinin moment dönme grafikleri.....	54
Şekil 4.16: 07K_DD50x170 numunesinin deney fotoğrafları.....	55
Şekil 4.17: 01K_DD50x75 sol kiriş OpenSees grafikleri.....	59
Şekil 4.18: 01K_DD50x75 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	59

Şekil 4.19: 02K_40x100 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	60
Şekil 4.20: 02K_40x100 sol kiriş OpenSees grafikleri.	61
Şekil 4.21: 03K_DD50x130 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	61
Şekil 4.22: 03K_DD50x130 sol kiriş OpenSees grafikleri.....	62
Şekil 4.23: 04K_40x80 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	63
Şekil 4.24: 04K_40x80 sol kiriş OpenSees grafikleri.	63
Şekil 4.25: 05K_DD50x105 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	64
Şekil 4.26: 05K_DD50x105 sol kiriş OpenSees grafikleri.....	65
Şekil 4.27: 06K_50x150 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	66
Şekil 4.28: 06K_50x150 sol kiriş OpenSees grafikleri.	66
Şekil 4.29: 07K_DD50x170 sağ kiriş OpenSees grafikleri.....	67
Şekil 4.30: 07K_DD50x170 sol kiriş OpenSees grafikleri.....	68
Şekil 4.31: SAP2000 modeli.	70
Şekil 4.32: 01K_DD50x75 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.....	72
Şekil 4.33: 01K_DD50x75 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	72
Şekil 4.34: 01K_DD50x75 sağ kiriş SAP2000 grafiği.....	73
Şekil 4.35: 01K_DD50x75 sol kiriş SAP2000 grafiği.	73
Şekil 4.36: 02K_40x100 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.	74
Şekil 4.37: 02K_40x100 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	75
Şekil 4.38: 02K_40x100 sağ kiriş SAP2000 grafiği.	75
Şekil 4.39: 02K_40x100 sol kiriş SAP2000 grafiği.	76
Şekil 4.40: 03K_DD50x130 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.....	77
Şekil 4.41: 03K_DD50x130 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	77
Şekil 4.42: 03K_DD50x130 sağ kiriş SAP2000 grafiği.....	78
Şekil 4.43: 03K_DD50x130 sol kiriş SAP2000 grafiği.	78
Şekil 4.44: 04K_40x80 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.	79
Şekil 4.45: 04K_40x80 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	80

Şekil 4.46: 04K_40x80 sağ kiriş SAP2000 grafiği.	80
Şekil 4.47: 04K_40x80 sol kiriş SAP2000 grafiği.	81
Şekil 4.48: 05K_DD50x105 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.	82
Şekil 4.49: 05K_DD50x105 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	82
Şekil 4.50: 05K_DD50x105 sağ kiriş SAP2000 grafiği.	83
Şekil 4.51: 05K_DD50x105 sol kiriş SAP2000 grafiği.	83
Şekil 4.52: 06K_50x150 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.	84
Şekil 4.53: 06K_50x150 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	85
Şekil 4.54: 06K_50x150 sağ kiriş SAP2000 grafiği.	85
Şekil 4.55: 06K_50x150 sol kiriş SAP2000 grafiği.	86
Şekil 4.56: 07K_DD50x170 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.	87
Şekil 4.57: 07K_DD50x170 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.	87
Şekil 4.58: 07K_DD50x170 sağ kiriş SAP2000 grafiği.	88
Şekil 4.59: 07K_DD50x170 sol kiriş SAP2000 grafiği.	88

TABLO LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3.1: Yükleme adımları.....	32
Tablo 3.2: S235 sınıfı çelik özellikleri.	35
Tablo 4.1: Deneyde kullanılan kolon ve kiriş kesit bilgileri.	40
Tablo 4.2: Numune kesit özellikleri.	41
Tablo 4.3: Deneyde sağ kirişte sönmömlenen enerji.....	56
Tablo 4.4: Deneyde sol kirişte sönmömlenen enerji.	56
Tablo 4.5: Deneyde sönmömlenen toplam enerji.....	56
Tablo 4.6: Numuneler için moment değęrleri.	57
Tablo 4.7: 01K_DD50x75 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	58
Tablo 4.8: 02K_40x100 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	60
Tablo 4.9: 03K_DD50x130 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.....	61
Tablo 4.10: 04K_40x80 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	62
Tablo 4.11: 05K_DD50x105 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	64
Tablo 4.12: 06K_50x150 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	65
Tablo 4.13: 07K_DD50x170 numunesinin OpenSees iskelet eğri değęrleri.	67
Tablo 4.14: Deney ve OpenSees sönmömlenen enerji.....	69
Tablo 4.15: OpenSees modeli ile deney arasındaki sönmömlenen enerji sapma miktarı.	70
Tablo 4.16: 01K_DD50x75 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	71
Tablo 4.17: 02K_40x100 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	74
Tablo 4.18: 03K_DD50x130 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	76
Tablo 4.19: 04K_40x80 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	79
Tablo 4.20: 05K_DD50x105 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	81

Tablo 4.21: 06K_50x150 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	84
Tablo 4.22: 07K_DD50x170 numunesinin iskelet eğrisi verileri.	86
Tablo 4.23: SAP2000 birleşimde sönmömlenen enerji.	89
Tablo 4.24: SAP2000 sönmömlenen toplam enerji.	89



ÖZET

[YÜKSEK LİSANS TEZİ]

DEPO RAF SİSTEMLERİNİN BİRLEŞİM BÖLGESİNİN SİSMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ

[Muhammed Emre HABERDAR]

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

[Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Seda Öncü DAVAS]

Çelik depo raf sistemleri üretim sektörü ve lojistik sektörünün vazgeçilmez bir zincir halkasıdır. Üretimin artmasıyla beraber depolama alanının efektif kullanılması amacıyla tasarlanmış dikey depolama çözümü olan depo raf sistemlerinde hammadde, ara ürün ve son ürünler depolanmaktadır. Ülkemizde sadece üretim sektöründe değil perakende kullanımında da depo raf sistemleri yaygınlaşmıştır. Raf sistemlerinde depolanan ürünlerin maddi değerinin yüksek olması ve bu sistemlerin bulunduğu alanlardaki insan hareketleri depo raf sistemlerinin yapısal davranışlarının incelenmesi hususuna dikkat çekmektedir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan depo raf sistemi paletli depo raf sistemidir. Paletli depo raf sisteminin yapısal elemanları arasında kirişler, kirişlerin elemanın uzunluğu boyunca açılan yuvalara yerleşiminin sağlanacağı kolonlar, çapraz koridor doğrultusunda dayanımın sağlanabilmesi için çaprazlar bulunmaktadır. Aşağı koridor doğrultusunda ise palet yüklerini taşıyacak kirişler ve kirişlerin kolonlarla birleşmesini sağlayan kirişin iki ucuna da kaynak ile bağlanan kiriş uç konektörleri bulunmaktadır. Kolon kiriş birleşiminin konfigürasyondaki kolaylık açısından yarı-rijit davranan tırnaklı birleşim yaygın olarak kullanılmaktadır. Tırnaklı birleşim koridor

doğrultusundaki deprem etkilerini moment aktararak karşılarken, birleşim bölgesinde oluşan büyük dönme etkileri çerçevelerin deprem doğrultusunda büyük deplasmanlar yapmasına sebep olurlar. Yarı-rijit birleşim bölgesinin doğrusal olmayan davranışı depo raf sistemlerinin koridor doğrultusundaki deprem performansını dolayısıyla depo raf sisteminin performansını etkilemektedir.

Bu tez kapsamında, yarı-rijit tırnaklı kolon kiriş birleşimi davranışını inceleyebilmek amacıyla RMI-2012 test prosedürüne uyularak oluşturulan birleşim bölgesi deney numunelerine çevrimsel tersinir yüklemeler uygulanmıştır. Bu sayede, yarı-rijit birleşim bölgesinin davranışı moment dönme ilişkisi ve birleşim bölgesinde sönmölenen enerji açısından ortaya konmuştur. Deney sonuçlarında iki tip göçme görölmüştür. Bunlar kiriş uç konektörünün kaynak bölgesinden yırtılması ve kolon kiriş birleşimini sağlayan tırnakların kırılmasıdır. Tez kapsamında, OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar yazılımları aracılığıyla, deney numunelerini temsil eden nümerik modeller oluşturulmuş ve çevrimsel tersinir yüklemeler altında zaman tanım alanında analiz edilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar moment ve dönme kapasitesi ile birleşim bölgesinde sönmölenen enerji açısından karşılaştırılmıştır. |

Mart 2023 , [100] sayfa.

Anahtar kelimeler: | Çelik depo raf sistemi, birleşim bölgesi, çevrimsel yükleme deneyi |

ABSTRACT

[M.Sc. THESIS]

[INVESTIGATION OF SEISMIC PERFORMANCE OF STEEL STORAGE BEAM TO COLUMN CONNECTION RACKING SYSTEMS]

[Muhammed Emre HABERDAR]

İstanbul University-Cerrahpaşa

Institute of Graduate Studies

Department of Civil Engineering

Civil Engineering Programme

[Supervisor : Assist. Prof. Dr. Seda Öncü DAVAS]

Steel storage racking systems are an indispensable link in the chain between the production sector and the logistics sector. With the increase in production, steel storage rack systems, which are vertical storage solutions designed for the effective use of storage space for raw materials, intermediate products, and end products, have been used. Storage rack systems have become widespread in our country, not only in the production sector but also in retail use. The fact that the material value of the products stored in the rack systems is high and the human movements in the areas where these systems are located draw attention to the examination of the structural behavior of the warehouse rack systems. The steel storage racking system that is widely used in our country is the pallet warehouse racking system. Among the structural elements of the pallet warehouse racking system are beams, columns where the beams will be placed in the slots opened along the length of the element, and braces to provide strength in the direction of the cross aisle. In the down aisle direction, there are beams that will carry the pallet loads and beam end connectors connected to both ends of the beam by welding, which allows the beams to join with the columns. In terms of ease of configuration of column-beam joint, semi-rigid hook joint is widely used. While the beam to column joint meets the earthquake effects in the corridor direction by transferring moment, the large rotational effects occurring

in the connection cause the frames to make large displacements in the earthquake direction. The non-linear behavior of the semi-rigid connection affects the seismic performance of the warehouse rack systems in the corridor direction, thus, the performance of the storage rack system.

Within the scope of this thesis, reversible cyclic loading was applied to the test specimens of the beam to column connection, which was formed by following the RMI-2012 test procedure, in order to examine the behavior of the semi-rigid hook joint. In this way, the behavior of the semi-rigid joint region is revealed in terms of the moment rotation relationship and the energy dissipated in the joint region. Two types of failure modes were observed in the test results. These are the tearing of the beam end connector from the weld area and the breaking of the hooks that provide the column-beam connection. By means of OpenSees and SAP2000 finite element software, numerical models representing the test samples were created and analyzed in time history under reversible cyclic loading. The results obtained from the numerical models and the experiments were compared in terms of moment and rotation curve and the energy absorbed in the connection region.

March 2023, 100 pages.

Keywords: Steel storage rack systems, beam to column joint, cyclic loading experiment

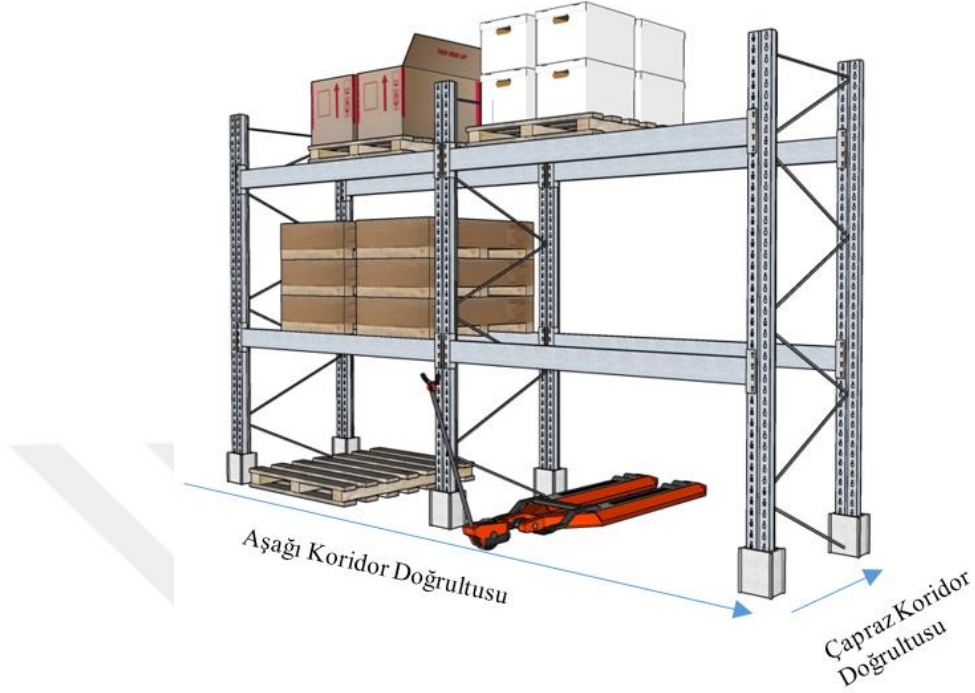
1. GİRİŞ

Dünyada artan nüfus ile birlikte endüstriyel ürünlerin tüketim ve üretim miktarları artmaktadır. Birbirinden çok farklı üretim ve imalat sektörlerinde faaliyet göstermekte olan özel sektör ve kamu kuruluşları artan talebi karşılamak için üretim miktarında artışa gitmiş, üretim sürecinde kullanılacak olan hammadde veya üretimi tamamlanmış olan endüstriyel ürünlerin depolanması ihtiyacı doğmuştur. Tedarik zincirinin vazgeçilmez parçası olan depolamada amaç, depo birim alanından yüksek verimlilikle faydalanmak ve depolanacak ürünlerin zarar görmemesini sağlamaktır. Böylece hem üretim bandına girmiş hem de üretim bandından çıkmış olan ürünlerde hasar ve/veya zayıt görülmemiş olacaktır.

Depolama ihtiyacının fabrika ve/veya üretim tesislerinde karşılanması için raf sistemleri kullanılmaktadır. Depo raf sistemleri alışılmış olan inşaat mühendisliği yapılarından farklı olarak raf sisteminin kendi ağırlığı üzerinde taşıdığı yüklere göre hafif kalmaktadır. Çelik raf sisteminin kendi ağırlığı üzerinde taşıdığı paletli yüklerin ağırlığının %5'ini geçmediği görülmüştür (Simoncelli, ve diğ., 2020). Depo raf sistemleri yüksek miktarda hareketli yük taşıma kapasitesine sahip olup yükseklikleri hatırı sayılır seviyelere kadar çıkabilmektedir.

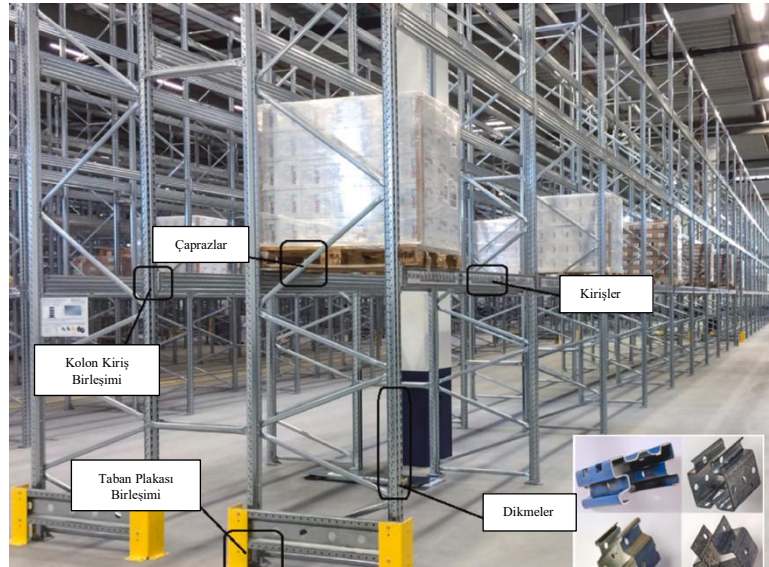
Depo raf sistemleri, kullanılacağı tesisin ihtiyaçlarına ve ürünlerin ebatlarına göre ikiye ayrılmaktadır. Bu gruplandırma işlemi raf sisteminin yüksekliklerini baz alarak yapılmış olup yüksek irtifalı depolama sistemleri ile düşük irtifalı depolama sistemleri şeklindedir. Yüksek irtifalı raf sistemleri 40 metreye kadar çıkabilirken, alçak irtifalı raf sistemlerinde ise 6 ila 10 metre arası maksimum yükseklik olmaktadır. Depo raf sistemleri gruplandırmadan bağımsız, bütünsel olarak incelendiğinde dikdörtgen prizmaya benzer yapıları nedeniyle iki doğrultusu olduğu görülmektedir. Şekil 1.1'de görüleceği üzere bu doğrultular, çapraz koridor doğrultusu (cross aisle direction) ve aşağı koridor doğrultusu (down aisle direction) olarak adlandırılmaktadır. Çapraz koridor doğrultusu diyagonal elemanların yerleştirildiği depo raf

sisteminin kısa kenarını, aşağı koridor doğrultusu ise depo raf sisteminin momente dayanımlı çerçevesinden oluşan uzun kenarını ifade etmektedir.



Şekil 1.1: Depo raf sistemi doğrultuları.

Depo raf sistemlerinin elemanları incelendiğinde ise özel sektör ve/veya kamu kuruluşunun depolama ihtiyaçları doğrultusunda kolay kurulumu sahip ve yeniden yapılandırılmaya izin veren özel tasarlanmış çelik elemanlardan oluştuğu görülmektedir. Şekil 1.2’de görülebileceği üzere tipik bir raf sistemi kolonlar, kirişler, kolon-kiriş birleşim bağlantıları, taban plakaları ve diyagonal elemanlardan oluşmaktadır.



Şekil 1.2: Raf sistemi elemanları (Simoncelli, ve diğ., 2020).

Depo raf sistemlerinde kolonlar, diğ er bir deyiş le dikmeler, uzunlukları boyunca düzenli deliklere sahip olan ç elik elemanlardır. Kolon elemanlarının uzunluğ u boyunca bu deliklerin oluş turulmasının sebebi raf sisteminin kolay konfigüre edilip istenilen yüksekliğ e kiriş lerin oturtulmasını sağ lamaktır. Arka arkaya yerleş tirilmiş olan raf sistemlerinde kolonlar birbirlerine olan kenetlenmelerini ç aprazlar ve/veya yatay kiriş lerle cıvatalı bir biç imde sağ lamaktadır. Kiriş ler, kolonlara bağ lanmak için iki ucunda da konektörlere sahip olan yatay elemanlardır. Kiriş lerin kolonlara bağ lanması konektörlerin kolonlara tırnaklı, kaynaklı birleş imi veya cıvatalı bağ lantılarıyla sağ lanmaktadır. Kolonun istenilen yüksekliğ ine bağ lanacak olan kiriş elemanı kiriş uç konektörü ile kolona kenetlenmiş olacaktır. Kiriş ile kolon birleş imi tamamlandıktan sonra raf sistemine yerleş tirilecek yükler kiriş ler üzerine gelecektir.

Olası bir deprem durumunda rafların üzerine yerleş tirilmiş olan yükler ile raf sistemine etki edecek ek deprem kuvvetlerinin sisteme hasar vermesi kaçınılmazdır. Hasarın görü leceğ i yer, deprem kuvvetlerine karş ı dayanımı az olan kolon kiriş birleş im bölgeleridir. Kolon kiriş bağ lantısının göç mesi gibi olası durumlarda raf sistemi üzerinde depolanan paletlerin dü ř mesi, yalnızca mal sahibinin ürünlerini değ il aynı zamanda burada alış veriş yapan mü ř terilerin ve/veya iş ç ilerinin hayatlarını tehlikeye atabilmektedir. Depo raf sistemlerinin deprem yükleri altında ař aę i koridor doç rultusunda oluş an moment tesirleri tırnaklı ve/veya cıvatalı birleş imler ile karş ılanır. Moment tesiri etkisinde birleş im bölgesinde oluş an büyük dönmeler sebebiyle depo raf sistemi yatayda büyük yer değ iş tirmeler yapabilir (Filiatrault ve diğ ., 2006). Shah ve diğ . (2016) ç alış masında, birleş im bölgesini oluş turan yapısal elemanların geometrik özelliklerindeki değ iş imin birleş imin performansını etkilediğ i belirtilerek; özellikle tırnakların kırılmasının birleş imin göç mesinde temel unsur olduğ u vurgulanmış tır. Depo raf sistemlerinin yapısal bütünlüğ ü konusunda rol oynayan tırnaklı birleş im bölgelerinin performansı deneysel ve nümerik ç alış malar kapsamında incelenmiş tir. Bu kapsamda, tırnaklı birleş imlerin tersinir çevrimsel yüklemeler altında histeretik davranış ı incelenen bir ç alış mada (Zhao ve diğ ., 2018) raf sisteminin birleş im bölgesinin dönme rijitliğ ine dair bir matematiksel model sunmuş tur. Asawasongkram ve diğ . (2019) ise birleş imin mekanik olarak modellenmesi için bir diğ er yaklaş ım olan konsol test ve portal test üzerinde ç alış malar gerç ekleş tirmiş tir. Konsol testin, depo raf sisteminin gerç ek kullanım koş ullarındaki servis yüklemesinin etkilerini karakterize etmekte yetersiz olduğ u belirtilmiş tir. Portal test ile kolon kiriş bağ lantıları, bağ lantıların gerç ek davranış ını temsil edebilen kesme kuvvetine, eę ilme momentine ve eksenel kuvvete maruz

bırakılmıştır. Portal testin sonuçları, çelik depolama raf sistemlerinin birleşiminin davranışını tahmin etmek için önerilen mekanik modeli değerlendirmek için kullanılabilir. Elkadı (2019) çalışmasında, tırnaklı ve cıvatalı birleşimleri çevrimsel yükleme deneyine tabi tutmuştur. Bir sonlu elemanlar programında hem birleşim modeli oluşturulmuş ve analiz sonucu ile deney sonucu kıyaslanmıştır. Çalışmada farklı birleşim tiplerini içeren çerçeve modelleri için lineer olmayan statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma neticesinde, tırnaklı birleşimlere cıvataların eklendiği durumların raf sistemi deprem performansını önemli ölçüde artırdığı belirtilmiştir. Filiatrault (2006), depolama raflarının deprem etkileri altında aşağı koridor yönlerinde çökmeyi önlemesini doğrulamak için yer değiştirmeye dayalı basit bir sismik tasarım prosedürü önermektedir. Önerilen tasarım prosedürü desteklemek için, rafların aşağı koridor yönündeki sismik davranışını modelleyen analitik model geliştirilmiştir. Modelin doğrulanması için sarsma tablasında tam ölçekli deneyler gerçekleştirilmiştir.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Deprem etkileri altındaki depo raf sistemlerinin birleşim bölgelerinde oluşan moment tesirleri ve büyük dönme deplasmanları neticesinde aşağı koridor doğrultusunda büyük ötelemeler oluşabilir. Bu sistemlerin deprem etkileri gibi çevrimsel yüklemeler altında en çok zorlanan kısımları genellikle tırnaklı yapıda olan ve yarı-rijit davranan kolon-kiriş birleşimleri olduğundan, hasarlar en çok bu bölgelerde görülebilmektedir. Kolon-kiriş birleşim bölgelerinde yarı-rijit bağlantı noktaları hasar alıp birbirinden ayrılacağı gibi, bu durum raf sistemi üzerinde bulunan yüklerin yapı üzerindeki etkisini alt seviyelerde kademeli olarak arttırarak dinamik çöküşü tetikleyebilmektedir. Tez çalışması ile depo raf sistemlerinin yarı-rijit kolon-kiriş bağlantılarının çevrimsel yüklemeler altındaki performansının deneysel ve nümerik olarak araştırılması amaçlanmaktadır.

1.2. ÇALIŞMANIN KAPSAMI

Tez çalışması kapsamında, ilk olarak ülkemizde ve dünyada hali hazırda kullanımda olan çelik depo raf sistemleri tanıtılmıştır. Ardından, kullanım kolaylığı sebebiyle ülkemizde yaygın olarak tercih edilen tırnaklı birleşime sahip depo raf sistemlerinin elemanları ve birleşim bölgeleri anlatılmış, depo raf sistemlerinin tarihi depremlerde aldıkları hasarlara değinilmiştir. Raf sisteminin kolon kiriş birleşiminin performansının incelenmesi için ilgili şartnameler ile yönetmelikler araştırılmıştır. Araştırılan yönetmeliklerden kolon kiriş birleşiminin

performansının ölçülmesi için ampirik yöntemler kullanıldığı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında, birleşimin performansını belirlemek için RMI (Rack Manufacturers Institute) kapsamında belirtilen prosedüre göre yorulma deneyi gerçekleştirilmiştir. Yorulma deneyi, kiriş uçlarından hidrolik yükverenler ile kirişlerin tersinir deplasman yüklemesi altında oluşan kuvveti ölçen böylece birleşimin performansını kuvvet deplasman açısından belirlenmesini sağlayan deneydir. Deney sırasında kullanılan ve iki kiriş ile bir kolondan oluşan numune setinde, deney prosedürü gereğince kolon ve kirişlerin uzunluğu sabit tutulmuştur. Numunelerde, kolon kesit ebatları ile kolon kiriş bağlantı plakasındaki tırnak sayısı sabit olup, kiriş kesit ebatları değişkenlik göstermektedir. Deney verilerinden moment, dönme değerleri ile sönmülenen enerji bulguları elde edilerek yorumlanmıştır. Ardından, her deney için oluşturulan moment dönme eğrileri kullanılarak iskelet eğrileri belirlenmiştir. İskelet eğrileri, sonlu elemanlar modelinde kirişlerin plastik mafsallı davranışının tanımlanmasında kullanılmıştır. Deney prosedürü gereğince numunelere zamana bağlı olarak uygulanan deplasman verileri, sonlu elemanlar modelinde yorulma deneyini temsilen zaman tanım alanında tanımlanmıştır. Sonlu elemanlar modellerinden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar moment ve dönme kapasitesi açısından karşılaştırılmıştır. Sonlu elemanlar modellerinin çevrimsel yükleme altında sönmülediği enerji de sunulmuştur.

2. KAVRAMSAL ÇERÇEVE

Bu bölümde, öncelikle depo raf sistemi türlerine dair bilgiler verilmiş olup tez kapsamında incelenecek olan palet depo raf sisteminin kullanım avantajları ve yapısal elemanları açıklanmıştır. Depo raf sistemlerinin tasarlanması ve birleşim bölgelerinin performansının belirlenmesinde kullanılan yönetmelikler incelenmiştir. Ardından raf sistemlerinin tarihi depremlerde aldıkları hasarlar araştırılmıştır. Ayrıca, depo raf sistemlerindeki birleşim bölgesinin performansını belirleyen fiziksel bir olgu olan çevrim sıkışması açıklanmıştır. Ardından deney prosedürü ve sonlu elemanlar modelleme adımları anlatılmıştır.

2.1. DEPO RAF SİSTEMİ TÜRLERİ

Hammadde veya son ürünün depolanması ihtiyacının karşılanması ve ürünlerin zarar görmeden depo alanından verimli bir şekilde istifade edilmesi için depo raf sistemleri kullanılmaktadır. Depolanacak ürünün özelliklerine göre raf sisteminin cinsi değişebileceği gibi depo yapısının yüksekliği de raf sisteminin türünün belirlenmesi için önemli bir etkidir. Depolama ihtiyacına göre raf sistemleri iki ana başlık altında incelenebilmektedir. Bu gruplandırma raf sisteminin yüksekliğine göre yapılmış olup; yaklaşık 16 metre yükseklikten itibaren yüksek irtifalı depo sistemleri ve bunun altındakiler ise düşük irtifalı depolama sistemleri olarak isimlendirilmektedir.

2.1.1. Yüksek İrtifalı Depolama Sistemleri

2.1.1.1. Dış Giydirme Raf Sistemi

Son ürünlerin ve/veya hammaddelerin depolanması sırasında, ayrıca depo yapısının inşasına vakit ve bütçe ayrılmak istenmediği durumlarda kullanılan raf sistemidir. Dış giydirme raf sistemi modüler yapıda olup raf sisteminin kurulumu tamamlanıp işlevini tamamladıktan sonra yeni bir konumda tekrar kurulmak üzere kolayca sökülüp yeniden birleştirilebilmektedir. Raf sisteminde çatı ve dış cephe gerekliliği ortadan kalktığı gibi yapıda herhangi bir betonarme veya çelik taşıyıcı eleman bulunmamasından kaynaklı olarak depolama alanından oldukça verimli bir şekilde istifade edilmiş olacaktır.

Dış giydirme raf sisteminin dikey taşıyıcı elemanları olan kolonlar, dikmeler aynı zamanda raf sisteminin de taşıyıcı elemanlarıdır. Böylece depolama sırasında koridor genişliği istenilen miktarlarda ayarlanabilecek olup depolama sürecinde kullanılacak olan forklift gibi geleneksel depolama araçlarının manevra alanları da ayarlanmış olacaktır (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 19.10.2021).



Şekil 2.1: Dış giydirme raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 19.10.2021).

2.1.1.2. Sırta Sırta Raf Sistemi (Back to Back System)

Diğer adı ikili derinliğe sahip raf sistemi olan sırt sırta raf sisteminde, raf modülleri Şekil 2.2 (a)'da görüleceği gibi aşağı koridor yönünde arka arkaya gelecek şekilde yerleştirilecek raf düzeni sağlanmaktadır.



Şekil 2.2: Genel görünüş (www.rafgrup.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021) (a) sırt sırta raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021) (b).

Raf modülleri arasındaki bağlantı Şekil 2.2 (b)'deki gibi iki raf sisteminin kolonları arasında çift taraflı bağlantı ile sağlanmaktadır (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021) Böylece raf sistemi üzerine yerleştirilmiş olan yüklere erişim kolaylıkla sağlanabilmektedir (www.rafgrup.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.1.3. Mekanik Raf Sistemi

İnsana dayalı iş gücünü azaltmak ve raf sistemine ürünler yerleştirilirken forkliftlerin depo koridorlarında gezmesine gerek kalmadan, raf sistemi elamanlarına forkliftin yükleme boşaltma işlemleri sırasında çarpıp kaza sonucunda yapısal elemanlara verecekleri zararın önüne geçilen, otomatik taşıyıcı ile raflara yüklenmesinin ve boşaltılmasının sağlandığı depolama sistemidir. İçine girilebilir raf sistemi ile işleyiş mantığı aynı olmaktadır. Mekanik taşıma sistemi ile rafların ürünlerle doldurup boşaltılması sürecinde vakitten yana kazanç hedeflenmektedir (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021; www.cmrinsaat.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).



Şekil 2.3: Mekanik raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.1.4. İçine Girilebilir Raf Sistemi (Drive-in System)

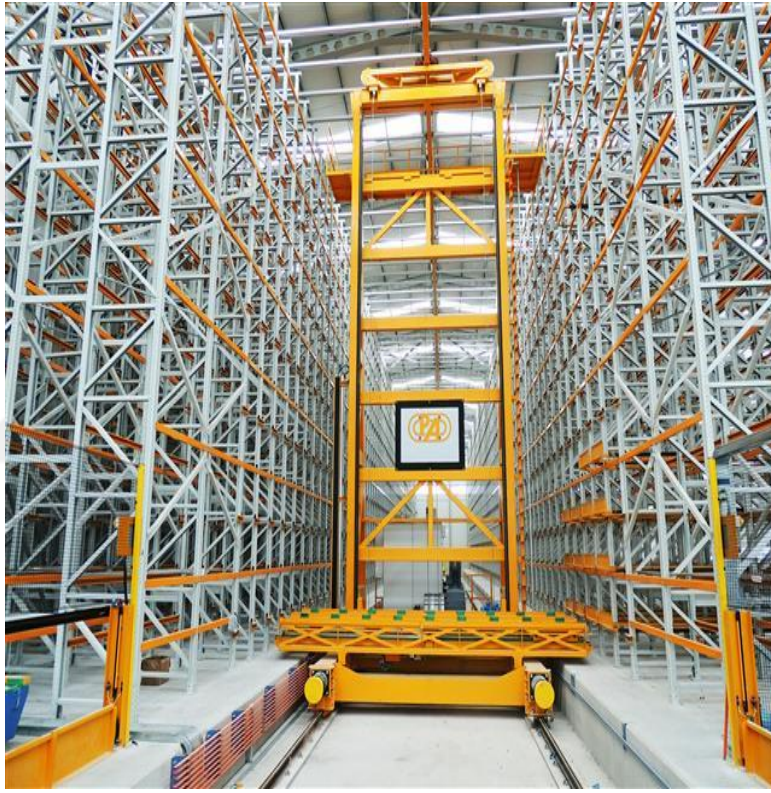
Üzerine eş boyutlardaki paletlerin depolandığı raf sistemidir. Bu sistemde ürünlerin istiflenmesi forklift aracılığıyla raf sisteminin derinliğine doğru olmaktadır. Raf sisteminde tek giriş ve tek çıkış olduğu için ilk giren ürünün ilk çıktığı veya son giren ürünün ilk çıktığı sirkülasyon düzeni görülmektedir (www.mecalux.com.tr,Erişim Tarihi: 14.10.2021).



Şekil 2.4: İçine girilebilir raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.1.5. As/Rs Otomatik Depolama

Adını Automated Storage and Retrieval System açılımının baş harflerinden almış olan raf sisteminin Türkçe adlandırması ise Otomatik Depolama ve Alma Sistemi'dir. Bu raf sistemi akıllı bir depolama sistemi olup depolama sırasında gerçekleşecek olan tüm aksiyon bilgisayar tarafından önceden sensörler ve barkodlar tarafından tanıtılarak gerçekleşmektedir. Böylece ürünlerin raflara depolanmasında insana bağıllık ortadan kalkmakta sistem tam otomatik çalışmaktadır. Oluşturulan raf sisteminin yüksekliği 40 m mertebelerine kadar çıkabilmektedir. Raf sistemi hem dikey hem de yatay olarak hareket kabiliyetine sahip kule robot tarafından sağlanmaktadır (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

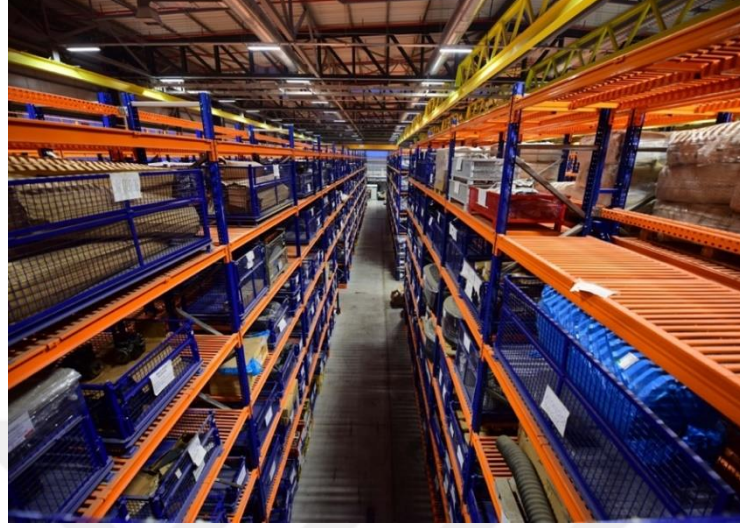


Şekil 2.5: As/Rs otomatik depolama (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.1.6. Hafif Yük Raf Sistemi

Depolanacak olan ürünler genellikle orta ve küçük hacimli ürünler olup bu ebatlardaki ürünlerin en verimli şekilde yerleşiminin sağlandığı raf sistemidir. Raf sistemi üzerine depolanacak olan ürünler direkt insan gücüyle, herhangi bir araç kullanılmadan raflara

yerleştirildiğinden elle ulaşılabilecek her türlü malın istiflenmesi uygun olacaktır (www.rafgrup.com,Erişim Tarihi: 13.10.2021).



Şekil 2.6: Hafif yük raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.1.7. Hareketli Raf Sistemi (Mobile Rack System)

Bu raf sisteminde raflar tekli modüller halinde arka arkaya sıralanmaktadır. Raf sisteminin kolonlarının, dikmelerinin altına yerleştirilen ve tek eksenle hareket etmesini sağlayan motorlar ile öne veya arkaya hareket ettirilen raf modüllerine çok sayıda paletli yük yerleştirilebilmektedir (www.retamuhendislik.com.tr,Erişim Tarihi: 13.10.2021), (www.rafsistem.com,Erişim Tarihi: 13.10.2021).

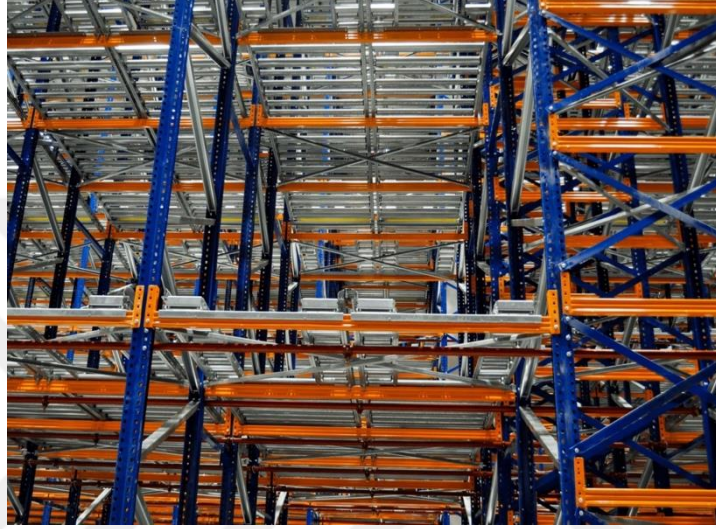


Şekil 2.7: Hareketli raf sistemi (www.rafsistem.com,Erişim Tarihi: 13.10.2021).

2.1.2. Düşük İrtifalı Depolama Sistemleri

2.1.2.1. Kayar Raf Sistemi (Push Back System)

Raf sisteminde depolanacak olan küçük ve orta büyüklükteki ürünlerin eğimli raflar üzerine yerleştirildiği raf sistemidir. Raf sistemine ürünlerin yüklendiği yer, eğimli rafın görece eğiminin yüksek olduğu kenarı olup boşaltıldığı yer ise eğimin görece düşük olduğu kenardır. Bu şekilde yükleme ve boşaltma tarafları ayrılmıştır (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).



Şekil 2.8: Kayar raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.2.2. Mezanin Raf Sistemi

Raf dikmelerine platformların montajının yapıldığı raf sistemidir. Bu şekilde elle yükleme imkânı sağlandığı gibi paletli olmayan daha küçük taşınılabılır ürünlerin istenilen yere istiflenmesi ve istenildiğinde kolay ulaşılabilmesi için uygundur.



Şekil 2.9: Mezanin raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 14.10.2021).

2.1.2.3. Sipariş Hazırlama Raf Sistemleri

Genellikle perakende kullanıma uygun olan raf sistemi olup doğrudan çalışan personelin ürünleri yükleyip ve boşaltabildiği sistem olmaktadır (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 20.10.2021).



Şekil 2.10: Sipariş hazırlama raf sistemi (www.rafex.com.tr,Erişim Tarihi: 20.10.2021).

2.1.2.4. Konsol Kollu Raf Sistemi

Bu raf sisteminde tek taraflı veya çift taraflı olarak konsollar tasarlanabilmektedir. Kurulacak raf sisteminde depolanacak ürünlerin uzun olması düşünülerek tasarlanmıştır.



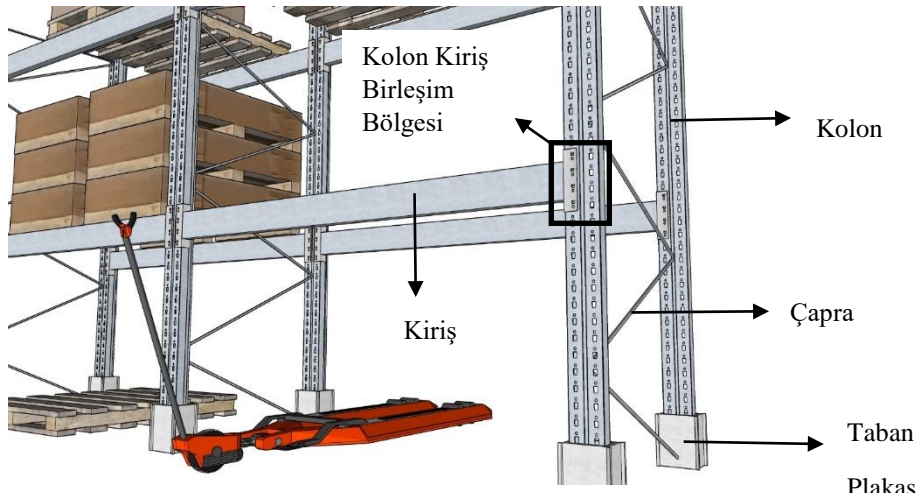
Şekil 2.11: Konsol kollu raf sistemi (www.temesist.com,Erişim Tarihi: 20.10.2021).

2.2. RAF SİSTEMİ ELEMANLARI

Soğukta haddelenmiş çeliğin kullanımının birçok yapı çeşidinde olağan hale gelmesiyle soğuk haddeli çeliğin davranışının anlaşılması ve soğuk haddeli çelikten oluşturulacak yapılara ait çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu çalışmalarla birlikte soğuk haddeli çeliğin raf sistemlerinde kullanılmasının uygun olduğu görülmüş olup sıcak haddeli çeliğe göre daha avantajlı olduğu çıkarımı yapılmıştır (Yu, ve diğ., 2020). Bu avantajlara bakıldığında:

1. Sıcakta haddelenmiş çelikten üretilen elemanların ağır olduğu, açıklık miktarının fazla olduğu durumlarda kullanıldığı ve üzerlerine soğuk haddeli çeliğe göre daha ağır yükler aldığı görülmektedir. Soğuk haddeli çeliğin raf sistemlerinde kullanılmasının sebepleri ise hafif olup taşınabilir olması ile dar depolama alanlarında daha küçük açıklıklarda kullanılabilmesidir. Soğuk haddeli çelik raf sisteminin kendi ağırlığı, üzerinde taşıdığı paletli yüklerin ağırlığının %5'ini geçmemektedir (Simoncelli, ve diğ., 2020).
2. Depo raf sistemlerinin kesit geometrileri incelendiğinde alışlagelmiş olan sıcakta haddelenmiş çelik kesitleri olan I, H ve U gibi profillerden farklı olup; bu kompleks kesit geometrileri soğuk haddelendirme yöntemiyle ekonomik olarak üretilebilmektedir.
3. Soğuk haddeli çelikten üretimi süresince kalıba ihtiyaç duyulmamakta olup seri üretimi sağlanabilmektedir (Yu, ve diğ., 2020; Aghlara & Tahir, 2018).

Depo raf sisteminin üzerine etki eden yükler incelendiğinde, raf sisteminde yükün elemanlara göre akışı sırasıyla paletin konulduğu kiriş ile başlayıp kirişten kiriş uç konektörü vasıtasıyla kolona, kolondan sonra ise eğer taban plakası var ise oraya yok ise direkt zemine olacak şekilde gerçekleşmektedir.



Şekil 2.12: Raf sistemi elemanları.

2.2.1. Kirişler

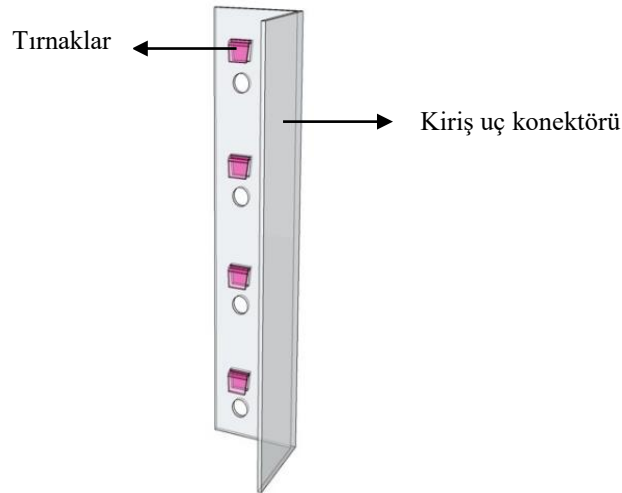
Kirişler paletlerin üzerlerine yerleştiği yatay elemanlar olup düşey yükleri taşıyan ana elemanlardır. Kirişlerin iki ucuna da kolonla birleşim tipine göre üretimi esnasında kiriş uç konektörü kaynatılmaktadır. Kaynatılan kiriş uç konektörü ile kirişten kolona yük aktarımı sağlanmış olacaktır. Kirişler, kiriş uç konektörleri ile incelendiğinde aşağı koridor doğrultusunda basit çelik çerçeve gibi davranacak olup herhangi bir deprem durumunda Şekil 2.13'teki aşağı koridor doğrultusunda davranışı sınırlandıracaktır.



Şekil 2.13: Raf sistemi doğrultuları.

2.2.2. Kiriş Uç Konektörleri

Kirişlerin ucuna kaynatılan kiriş uç konektörleri, kirişler ile kolonların birleşimini sağlamaktadır. Kolon boyunca bulunan yuvalara yerleşecek olan kiriş uç konektöründeki



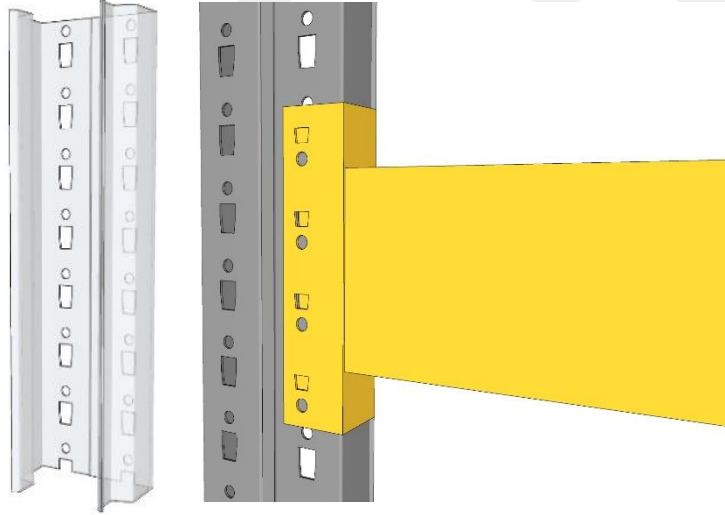
Şekil 2.14: Kiriş uç konektörü.

bağlantılar üç çeşittir. Bunlar, ankastre, sabit ve yarı rijit bağlantılar şeklindedir. Bu çalışma kapsamında ülkemizde en yaygın olan yarı rijit bağlantı olan tırnaklı birleşim incelenmiştir. Şekil 2.14'te tırnak detayının da gösterildiği kiriş uç konektörü sunulmaktadır.

Şekil 2.14'te görüleceği üzere, tırnaklar pembe renk ile gösterilmiş olup kiriş uç konektörüne kaynaklanır. Kiriş uç konektörü ise kiriş ile kaynaklanarak birleştirilir. Kiriş uç konektöründeki tırnaklar aracılığıyla kiriş ile kolon bir araya getirilir. Kirişe yük yerleştirildiğinde, tırnakların kolona ait yuvadan çıkmaması için yük ile kavrama yönü aynıdır. Şekil 2.14'te görüleceği gibi kaynatılmış olan kiriş uç konektöründeki tırnakların kolon yuvalarına yerleşmesiyle yarı rijit kolon kiriş birleşimi oluşacaktır.

2.2.3. Kolonlar

Kirişlerden başlayan yük aktarımı kiriş uç konektöründen sonra kolona iletilmekte olup kolonlar uzunlukları boyunca tırnakların paletlerin ebatlarına göre istenilen yüksekliklerde birleşmeleri için yuvalı olmaktadır. Ayrıca kolonların kesit geometrisine bakıldığında, görece kalınlıklarının az olması (yaklaşık 2 mm) kolonları burulmaya karşı dayanıksız bırakmaktadır. Şekil 2.15'te kolon ve kolon kiriş birleşim görünüşlerine yer verilmiştir.



Şekil 2.15: (a) Kolonun üç boyutlu görünüşü (b) kolon kiriş birleşimi.

Şekil 2.16’da görüleceği üzere, kolon ve kiriş gibi taşıyıcı elemanların yanı sıra, depo raf sistemlerinde çaprazlar ve taban plakaları da kullanılmaktadır. Taban plakası, depo raf sisteminden kolon boyunca aktarılan yükün tabana iletilmesini sağlamaktadır. Çapraz elemanlar ise raf sisteminin yanal stabilitesinin sağlanabilmesi için kısa koridor yönünde konumlandırılmaktadır. Böylece raf sisteminin alan açısından kullanılabilirliğinden feragat etmeden dayanıklılığı artırılmış olmaktadır.

2.3. YÖNETMELİKLER

Depo raf sistemleri, kullanımı, taşıyacağı yükler, çelik yapı elemanlarının geometrik boyutları ve üretim şekli gibi raf sisteminin temel unsurlarıyla binalardan ayrılmaktadırlar. Depo raf sistemleri, esas olarak soğukta haddelenmiş ince profillerden ve kolon uzunluğu boyunca sürekliliği sağlayacak şekilde tırnakların oturacağı yuvalardan teşkil edilmektedir. Bu şekilde depo raf sistemleri üzerlerinde depolanacak ürünler için gereken işlevsellik ve esneklik sağlanmaktadır. Depo raf sistemleri üzerine yükler paletler vasıtasıyla yerleştirilmektedir. Bu



Şekil 2.16: Taban plakası ve çaprazlar.

yükler kirişler üzerine konumlandırılmaktadır. Depo raf sistemine yerleşen palet yükleri hareketli yük olup depo raf sisteminin kendi ağırlığının yaklaşık olarak 2 ile 3 katı olabilmektedir (Michael, ve diğ., 2010). Bu nedenle, depo raf sistemleri deprem durumu öngörülerek tasarlanırken sismik özelliklerin yapıda nasıl dikkate alınacağını belirlemek gerekmektedir. Çünkü depremin doğrultusu ve büyüklüğü raf sisteminin deprem ivmesine karşı göstereceği tepkiyi etkilemektedir.

Deprem sırasında çok sayıda faktör depo raf sistemlerinin yapısal davranışlarını etkilemektedir. Bu faktörlerden biri, raflarda depolanmış ürünlerin depremde alacakları hasara veya deformasyona bağlı olarak ek deprem enerjilerinin sönmülenebilmesidir (Castiglioni, 2016). Ayrıca, paletler ve kirişler arasında hem ivme değerlerine hem de temas yüzeyleri arasındaki gerçek sürtünmeye bağlı olarak sismik kuvvetler belirli sınırları aştığında meydana gelebilecek kayma etkisi olabilmektedir. Paletler veya raflar üzerinde bulunan diğer raf yükleri gibi değişken yükler, sabit ağırlığın ve kalıcı yüklerin genel olarak önemli bir yüzdede toplandığı binalardan farklı olarak toplam kütlenin %95'inden fazlasını oluşturabilir (Simoncelli, ve diğ., 2020). Bu da depo raf sisteminin ağırlığının, taşıdığı yüklerin çok küçük kısmı kadar ağırlığı olduğunu göstermektedir. Bu nedenle, raf sistemindeki yükün miktarı ve dağılımı, raf sisteminin deprem durumundaki tepkisini etkilemektedir.

Depo raf sistemlerinde güvenlik söz konusu olduğunda, raf sistemlerinin depreme karşı dayanıklılığı ne olursa olsun, depolanan eşyaların olası bir hareket durumunda destek kirişlerinin de hasar alıp çerçeveden ayrılabilceği gerçeği büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, düşme riskini ve buna bağlı olarak çarpma, hasar ve hatta kademeli olarak alt raflara doğru artan çökme durumunu mümkün olduğunca azaltmak için raf sistemlerine sismik dayanıklılığı arttırmak için tasarlanmış ürünler eklenmelidir. Depolanan ürünlerin hareket etmesini veya raftan düşmesini önlemek, sismik kuvvetleri ve raf salınımlarını azaltmak için sismik izolasyon yöntemleri üzerinde çalışılmaktadır.

Raf sistemlerinin sismik tasarımı için, Avrupa'da, Federation Europeenne de la Manutention (FEM), Avrupa Birliği için sismik tasarım standardı geliştirme araştırma faaliyetleri yürütmüştür. Bu araştırma faaliyetlerinin sonucu, 2005 FEM sismik tasarım standardı, FEM10.2.08, Static Steel Pallet Racks (Statik Çelik Palet Raflarının Sismik Tasarımı)'dir. Bunun dışında Avrupa'da yapısal tasarım yönetmeliği olan Eurocode 3'te soğukta haddelenmiş çelik elemanların tasarımı ve birleşim bölgesinin tasarımı için prosedürler açıklanmıştır. Hali hazırda ülkemizde raf sistemlerinin yapısal elemanlarının tasarlanması ve deprem durumundaki performansının ölçülmesi için spesifik bir yönetmelik bulunmasa da Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği-2018'de deprem etkisi altında yapısal olmayan bina elemanlarının tasarım esaslarının yönetmelik prosedürüne göre eşdeğer deprem yüklere ve deplasman sınırları gibi deprem etkileri altındaki davranışı belirleyecek koşullar açıklanmıştır.

Ayrıca, 1970'lerin başından beri, ABD'de RMI (Rack Manufacturers Institute), Cornell Üniversitesi'nde çelik depo raf sistemleri üzerine yürütülen birçok analitik ve deneysel araştırma projesine sponsor olmuştur. Bu çalışmalar, sıcak ve soğuk haddelenmiş yapı elemanları, kirişler, kolonlar, kolon boyunca oluşturulmuş yuvalar, kolon kiriş bağlantıları, taban plakaları, eğilme ve burulma burkulmasına odaklanan yükleme ve test prosedürlerini de kapsayan tam ölçekli, bileşen ve eleman testlerini içermektedir.

Bu yönetmelik içerisinde raf sisteminin performansının belirlenmesi için farklı test prosedürleri bulunmaktadır. Bunlar; sıcakta ve soğukta haddelenmiş olan çelik kolon elemanlarının kolon uçlarının bir plaka ile kaynatılmasıyla üzerine aksel kuvvet uygulanacak alan oluşturularak basınç deneyi yapılması, bir ucu sabit diğer ucu kayar mesnet olan kiriş numunesine iki noktadan yük uygulanarak akma momenti, maksimum momenti ve eğilme rijitliği değerleri elde edilmesidir. Kolon kiriş birleşim bölgesinin performansının ölçülmesi için de deneyler yapılmaktadır. Kurulan deney düzeneğinde, kolona tırnaklarıyla bağlanan kiriş ucu sabit mesnet görevi görmekte ve kirişin diğer ucu ise kayar mesnet olarak bağlanan kirişin, kolon yüzünden itibaren belirli mesafeden yükleme deneyi yapılarak kirişin moment kapasitesi ölçülmektedir. Böylece elde edilen deney sonuçlarıyla kiriş tasarımı gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, kolon kiriş birleşim bölgesinin döngüsel deplasman yüklemesi altında birleşimin moment ve dönme değerlerinin elde edildiği çevrimsel yükleme deneyi bulunmaktadır. Böylece gerçek yükleme koşullarına en yakın model elde edilmiş olacaktır. Bunların dışında, kolonların yükleme altında taban plakasının göçme yapacağı veya en alt seviyedeki kiriş ile birleşimin göçmesinin gerçekleşeceği kuvvete ulaşılan dik çerçeve testleri bulunmaktadır.

Depo raf sistemleri soğuk haddeli çelik elemanlardan oluşmaktadır. Bu nedenle tasarımları sürecinde, Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü'nün (American Iron and Steel Institute AISI) Soğuk Haddeli Çelik Yapısal Elemanların Tasarım Yönetmeliği'nin (Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members) tam olarak anlaşılmasına ve uygulanmasına bağlıdır. AISI, sismik yüklere maruz kalan depo raf sistemlerinin tasarımı için detay gereksinimleri sağlayabilecek, soğuk şekillendirilmiş çelik elemanlar kullanan yapıların sismik tasarımı için bir standart geliştirmiş ve bunu 2017 yılında yayınlamıştır.

2.4. DEPREM DURUMUNDA RAF SİSTEMLERİNİN OLASI HASARLARI

Depo raf sistemlerinin sismik performansını değerlendirmek için, meydana gelen deprem yer hareketlerini, raf sisteminin tasarım kapasitesini, rafların deprem anındaki yüklü olma koşullarını belirlemek gerekmektedir. Deprem meydana geldiğinde, yer hareketleri birçok faktöre bağlı olmaktadır. Bu faktörler depremin büyüklüğü, depremin derinliği, depreme maruz kalan alanın deprem kaynağına olan mesafesi ve sahadaki zemin koşullarından oluşmaktadır. Özellikle dikkat edilmesi gereken konu, yer hareketinin, ilgili yönetmeliğin belirttiği tasarım seviyesi yer hareketine eşit veya onu aştığı durumlardır (Fema 460 Building Seismic Safety Council, 2005). Depo raflarının doğası gereği, bir diğer önemli konu, depolama rafının nominal kapasitesine göre deprem anında gerçek palet yüklemesidir. Bu nedenle, deprem sırasında, rafın yüklü miktarının az olması veya arazideki yer hareketinin şiddetli olmaması nedeniyle raf sisteminde hasar meydana gelmeyebilir. Bu kısımda, raporlanmış olan bazı depremlerde hasar alan raf sistemlerine ait örnekler verilmiştir (Fema 460 Building Seismic Safety Council, 2005).

2.4.1. 1992 Landers Depreminde Raporlanan Hasar

Moment büyüklüğü (M_w) 7.3 olan Landers depremi 28 Haziran 1992'de 17.2 km derinlikte meydana gelmiştir. Depremin merkez üssü, Los Angeles şehir merkezinin yaklaşık 190 km doğusunda, California'nın yüksek çöl bölgesindeki Landers kasabası yakınlarında bulunmaktadır. Burada, nispeten iki veya üç yıl önce açılmış olan mega mağaza, fayın kırılma bölgesinden 100 m'den daha az bir mesafede bulunmaktadır. Depremin ardından mağazada ağır hasar görülmüştür. Kirişler, duvar kolonlarındaki ankrajlarından kopmuş olup bazı yerlerde duvarlarda kalıcı hasara sebep olmuştur. Traversler neredeyse tamamen hasara uğramıştır. Bağlantısız gondol raf üniteleri ciddi şekilde hasar görmemiş ve tekrar kullanıma alınmıştır, ancak çok sayıda küçük mal raflardan düşmüş olup ve durumlarda ise raf üniteleri ilk konumlarına göre 30 cm'den fazla yer değiştirmiştir.

2.4.2. 1994 Northridge Depreminde

Moment büyüklüğü (M_w) 6.7 olan Northridge depremi, 17 Ocak 1994'te 17.6 km derinlikte meydana gelmiştir. Depremin yeryüzüne dik izdüşümü (epicenter, merkez üssü) San Fernando Vadisi'ndeki Reseda'dadır. Fay yönelimi ve kırılma yönü nedeniyle, yer hareketleri vadinin kuzey ucunda tasarım seviyelerinde veya üzerinde olmuştur.



Şekil 2.18: Çapraz koridor doğrultusundaki yapı malzemelerinin uğradığı hasar (FEMA-460, 2005).



Şekil 2.17: Çapraz koridor doğrultusundaki seramiklerin uğradığı hasar (FEMA-460, 2005).

Norridge'de bulunan bir mağazada (Price Club) yapılan incelemede, uzun kenar doğrultusunda hasar alan "soda duvar" rafları (meşrubat kutuları ile tamamen dolu depolama rafları) dışında hiçbir yapıda hasar gözlenmemiştir. Bu hasarın, zeminde istiflenmiş malların devrilip raflara çarpması sonucu ağır hasara yol açtığı çıkarımına varılmış olup, benzeri veya daha ağır yüklerle kullanılan özdeş raflar hasar görmemiştir.

Ayrıca, California'nın Santa Clarita ilçesinde depremden birkaç günce açılmış olan yapı marketin (Home Depot) birkaç raf bölmesi çapraz koridor yönünde tamamen hasar almış ve ayrıca önemli miktarda üründe zayıt meydana gelmiştir. Depremi ardından yapılan araştırmada, hasarlı rafların nominal kapasitelerinin %50'sinden fazla yüklendiği ortaya çıkarılmıştır. California'nın Canoga Park semtinde yine aynı şirkete ait başka bir yapı markette (Home Depot) rafların ciddi bir şekilde hasar görmesi nedeniyle raflara yerleştirilen paletlerin yüzde 32'sinin konumları değişmiştir. Mağazanın deprem anında halka açık olması halinde ciddi yaralanmaların ve belki de can kayıplarının olabileceğinden şüphe duyulmamıştır. Arızaların nedeninin, Santa Clarita'da olduğu gibi, esasen rafların aşırı yüklenmesi olduğuna inanılmaktadır.

Yukarıda bahsedilen yapı marketlerinde raf sistemleri palet başına 6,8 kN ağırlığındaki yükler için tasarlanmıştır. Tasarım yükünün aksine raf sistemlerine yerleştirilen yükler depolama alanı eksikliğinden kaynaklı olarak 16,8 kN'a çıkarılmıştır.

Bu eski mağazanın daha ağır raf tasarımlarına uygun hale getirilmesi planlanmıştı ancak daha uzun raf tasarımlarını barındıramayacak kadar alçak bir tavana sahiptir. Bu nedenle, düşük tavan sorunu nedeniyle güçlendirme iptal edilmiş olup ancak daha güçlü raflar gerekli olmadan daha ağır yüklere geçiş yapılmış gibi görünmektedir. Bu şekilde meydana gelen hasarlar ve raf sistemlerinin çökmesi büyük ölçüde gözetim eksikliğinden kaynaklanmaktaydı. Bu mağazadaki raflar daha sonra daha yüksek kapasiteli 4 m yüksekliğinde tasarımlarla değiştirilmiştir.

2.4.3. 2001 Nisqually Depreminde Raporlanan Hasarlar

Moment büyüklüğü (M_w) 6.8 olan Nisqually depremi, 28 Şubat 2001'de 49.6 km derinlikte meydana gelmiştir. Depremi merkez üssü Puget Sound bölgesindedir. Büyük derinlik nedeniyle, Nisqually depreminin büyüklüğü daha büyük olmasına rağmen, yüzey yer hareketleri Norridge depreminden önemli ölçüde daha azdır. Ölçülen yer hareketleri, yönetmelik seviyesindeki tasarım yer hareketlerinden önemli ölçüde daha azdır. Biri ıslah

edilmiş arazide, biri yıkılmış otoyol üst geçitlerine bitişik ve biri Olympia'nın güneyinde olmak üzere Seattle'daki mağazalar araştırılmıştır.

Washington'ın Olympia şehrinde incelenen bir mağazada depo raflarındaki bazı çapraz desteklerin burkulmasından oluşan hasarlar görülmüştür. Raflardan çok az eşya düşmüş olup düşenlerin neredeyse çok düşük bir kısmı belirgin can güvenliği tehlikesi oluşturan çok küçük eşyalardan oluşmaktadır.

2.4.4. 2003 San Simeon Depreminde Raporlanan Hasar

Moment büyüklüğü (M_w) 6.5 olan San Simeon depremi, 22 Aralık 2003'te Kaliforniya'da 7.2 km derinlikte meydana gelmiştir. Deprem merkez üssü, San Simeon'un 9,6 km kuzeyinde ve bölgenin palet depolama raflarına sahip en büyük kutu mağazasının bulunduğu Atascadero'nun yaklaşık 48 km kuzeyinde bulunmaktadır. Ölçülen yer hareketleri yönetmelik seviyesindeki yer hareketlerinden çok daha az olup ve mağazada herhangi bir depolama rafı hasarı gözlemlenmemiştir. Sadece küçük bir hasar meydana gelmiş olup, çelik palet üzerindeki küçük bir çim biçme makinesi bir rafın tepesinden kaymıştır ve yalıtım kutuları önemli bir yükseklikten raftan düşmüştür. Çim biçme makinesinin çelik paletler üzerine düşmesi, geleneksel ahşap paletlere göre daha düşük sürtünme katsayısına sahip (örneğin çelik ve plastik) paletlerin kullanımının artmasıyla ilgili sorunları gündeme getirmektedir.

Deprem sonrası yapılan gözlemlere dayalı olarak, raf sistemlerinde depolanmış olan ürünlerin deprem durumunda raftan düşüp ekonomik açıdan mağaza ve depoları zarara uğratabilecek olup ayrıca burada bulunan insanların da can güvenliğini tehlikeye atabileceği söylenebilir. Bu sebeple, raf sisteminin sismik etkilere karşı dayanıklılığını arttıracak önlemlerin alınması gereklidir.

2.5. LİTERATÜR TARAMASI

Depo raf sistemlerinin sismik performansını değerlendirmek için tasarım yaklaşımları, kiriş ve kolon elemanları için kullanılan farklı geometriler ve bu elemanların birleşim detaylarındaki farklılıklar nedeniyle yetersiz kalabilmektedir. Bu sebeple, depo raf sistemlerinin sismik performansını anlamaya yönelik deneysel ve analitik çalışmalar, bu sistemlerin sismik tasarımı açısından temel teşkil etmektedir.

Bajoria ve Talikoti (2006) çalışmasında kolon kiriş birleşiminin esnekliğinin analizi için iki farklı yöntem incelemiştir. Kolon kiriş birleşimi moment dönme ilişkisi bakımından, öncelikle konsol testi yöntemi kullanılarak incelenmiş ardından bir diğer yaklaşım olan çift konsol yöntemi ile incelenmiştir. Yapılan birleşim testlerinin ardından tam ölçekli çerçeve testi ayrıca gerçekleştirilmiştir. Çift konsol testi ile tam ölçekli çerçeve testinin sonuçlarının birbiriyle örtüştüğü belirtilmiştir. Konsol yöntemi kapsamında, kirişin kolona bağlanmamış olan ucundan eksenel kuvvet uygulanarak kirişin hareketinden moment ve dönme hesaplanmaktadır. Çift konsol deneyinde ise kirişler iki taraftan da kolonlara bağlanır ve yüklem kolon üst ucundan uygulanarak kolon başlangıç konumundan aşağıya hareket ettirilir. Bunun için kirişlerin kolona ters tırnak birleşimiyle bağlanması gerekmektedir. Bu durum raf sisteminin standart kullanımı ile örtüşmemektedir. Ancak, çift konsol testinden elde edilen moment dönme değerleri ile tam ölçekli çerçeve testinden elde edilen değerlerin örtüştüğü belirtilmiştir.

Crosier ve diğ. (2010) 8 Eylül 2010'da meydana gelen Darfield depreminin saha gözlemini gerçekleştirmiş ve buna dair çıkarımlar yapmıştır. Gözleme dayalı olan bu çalışmada, binalardaki yapısal hasarın raf sistemine göre çok düşük olduğunu ve raf sistemlerindeki hasarların ise yıkıcı olduğunu belirtmiştir. Raf sistemi üzerine yerleştirilen malzemelerin davranışa etkisi ve yapısal eleman tiplerine göre sonuçlara ulaşılmıştır. Raf sistemlerine üzerine taşınması gereken yükten fazlasını aldığı durumlarda karşılaşılan yapısal hasarlara örnek olarak kolon kiriş birleşimine yakın olan kolon uçlarında birleşimin hemen üstünden kolonların yırtıldığı ve yüklemenin düzensizliğinden raf sisteminin devrildiği görülmüştür. Bu durum, raf sistemleri için sismik tasarım yapılmadığını ve rafa ait herhangi bir yüklem standardı olmadığını göstermiştir.

Shah ve diğ. (2016) yapmış olduğu çalışmada depo raf sistemlerinin deprem anında kolon kiriş birleşim bölgesinin yapısal davranışı ve davranışı etkileyen geometrik özellikleri incelemiştir. Çalışmada soğuk şekillendirilmiş kolon ve kiriş yapısal elemanlarıyla birlikte sıcak haddelendirilmiş kiriş uç konektörü kullanılmıştır. Kolon ile kirişin birleşimi kiriş uç konektörü ile sağlanıp bağlantı yarı rijit olarak seçilmiş olup cıvatasızdır. Deneyin gerçek kullanım ile örtüşmesi için tırnak yönleri aşağıya doğru olarak seçilmiştir. Deney sonucunda üç tip göçme türü gözlemlenmiştir. Bunlar; dikmelerdeki tırnak yuvalarının yırtılması, kiriş ucu bağlantısının akması ve tırnakların kırılması şeklindedir. Göçme durumunda kiriş uç konektöründe gözle görülür deformasyonlar kaydedilmiş olup bu deformasyona bağlı olarak

tırnaklar öncelikle kolon yuvalarını yırtmış ardından kopmuştur. Bu çalışmada dikkat edilmesi gereken unsur ise her bir yükleme durumunda kirişte gözle görülür bir göçme oluşmamasıdır. Bu deney sonuçlarından yararlanılarak bilgisayarda sonlu elemanlar modelleri oluşturularak birleşimin performansını arttırmak için kolon et kalınlığı, kiriş derinliği ve konektördeki tırnak sayısı arttırılmıştır. Nümerik modellerde sıralanan parametrelerdeki artışlar yapıldığında deprem durumunda konektörlerin göçmeden daha yüksek miktarda enerji sönümleyebileceği gösterilmiştir.

Zhao ve diğ. (2017) çalışmasında, deneysel yollardan farklı olarak soğuk haddelenmiş çelik depo raf sistemlerinde kolon-kiriş bağlantılarının başlangıçtaki dönme rijitliğini tahmin etmek için bileşen yöntemine dayalı mekanik bir model sunmaktadır. Bu modelin oluşturulması sırasında daha önceden tamamlanmış olan deney çıktıları kullanılmıştır. Başlangıç dönme rijitliği, bağlantı rijitliğinin üst sınırındadır ve bu nedenle tasarımda doğrudan kullanılamaz. Ancak, bir bağlantının moment dönme davranışını belirlemek için önemli bir parametredir.

Zhao ve diğ. (2018) kolon kiriş bağlantısı üzerine gerçekleştirdikleri çalışmada, kolon et kalınlığı, kiriş yüksekliği ve tırnak sayısı gibi geometrik parametrelerin başlangıç dönme rijitliği, moment ve süneklığe olan etkilerini incelemiştir. Yarı-rijit tırnaklı cıvatasız bağlantıdan oluşan kolon kiriş birleşiminin döngüsel davranışı üzerinde, özellikle rijitlik, mukavemet, süneklilik ve enerji yutma kapasitesi açısından en etkili faktörün tırnak sayısı olduğu sonucuna varılmıştır.

Asawasongkram ve diğ. (2019) çalışmasında kolon kiriş birleşiminin başlangıç dönme rijitliği ve eğilme mukavemetini tahmin etmek için kolon kiriş birleşiminin mekanik modelinin geliştirilmesine odaklanmıştır. Depo raf sistemlerinin yanal davranışını tahmin etmek için önerilen mekanik modelin uygulaması da bu çalışmada değerlendirilmiştir. Bağlantı modeli, Eurocode 3 (EN 1993-1-1,2005) kapsamında önerilen bileşen yöntemi kavramına dayalı olarak geliştirilmiştir. Önerilen mekanik modeli kontrol etmek için konsol kiriş deneyi testi ve çelik depolama raf tasarım şartnamesinde belirtilen portal testleri üzerinde kapsamlı çalışmalar yapılmıştır. Basitleştirilmiş doğrusal moment-dönme ilişkisi ile birlikte mekanik modelden elde edilen başlangıç dönme rijitliği ve eğilme mukavemeti, eğilme momenti altında herhangi bir çelik raf bağlantısının tahmini özellikleri olarak kullanılabilir.

Galeotti ve diğ. (2021) kolon kiriş birleşim bölgesinin yarı-rijit davranan tırnaklı bağlantısı ile rijit davranan cıvatalı bağlantısının döngüsel yükleme altındaki performansını

incelemiştir. Yarı-rijit tırnaklı birleşim yapısında olan depo raf sistemleri kullanım konusunda kolaylığa sahip olup istenildiği zaman raf yükseklikleri değiştirilebilmektedir. Rijit bağlantıya sahip tırnaklı ve cıvatalı birleşim yapısında olan birleşimde ise raf yüksekliğinin ayarlanması süreci kısmen daha zor olabilmektedir. Bu çalışmada, monotonik yükleme ile kolona konsol olarak bağlanan kirişlerin taşıma kapasitesi ölçülmüştür. Cıvatalı birleşim tırnakların bulunduğu yüzeydeki üst ve alt cıvata boşluklarına yerleştirilerek birleşim sağlanmıştır. Tırnaklı birleşim ise kolon yuvalarına yerleşen kirişler ile sağlanıp deneye hazır hale getirilmiştir. Tırnaklı birleşime sahip bağlantıların grafiklerinde çevrim sıkışması etkileri rahatça görülürken cıvatalı birleşime sahip numunelerin histeretik döngüler tırnaklı birleşime göre daha geniş olmaktadır. Cıvatalı birleşime ait grafiklerde maksimum moment değerleri, süneklik ve döngüsel yükleme sonucunda sönmölenen enerji tırnaklı birleşime göre daha yüksektir.

Bové ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, depo raf sistemlerinde kolon kiriş birleşim bölgelerinin histeretik davranışı incelenmiş, dayanım, rijitlik ve süneklik gibi temel parametreler değerlendirilmiştir. Depo raf sistemleri aşağı koridor doğrultusunda yanal rijitliğinin ve dayanımının az olması yanı sıra bu doğrultuda bulunan hareketli yükler sebebiyle, genellikle bu doğrultuda hasar alır. Aşağı koridor doğrultusunda bulunan kolon kiriş birleşimi deprem etkileri altında en çok zorlanan yapısal elemandır. Bu yüzden kolon kiriş birleşimleri raf sisteminin sismik performansı için öncelik taşımaktadır. Çalışmada, tırnaklı birleşime sahip depo raf sistemlerinin aşağı koridor doğrultusunda sismik performansının arttırılması için kiriş uç plakasının kirişe kaynaklandığı bölge üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada, göçme modları ve birleşimin kaynak tipinin performansının ölçülmesi için iki tip deney düzeneği kullanılmıştır. Deneyde kullanılan numunelerde kiriş uç plakası kirişe 4 tip kaynak yöntemiyle eklenmiştir. Bunlar; sadece kirişin uzun kenarları doğrultusunda kaynaklanması, kirişin tüm çevresine kaynaklanması, kirişin kısa kenarlarına kaynaklanması ve kiriş çerçevesinde yapılan kaynağa ek olarak iç kısımda da plakasının temas ettiği kiriş kısımlarının da kaynaklanmasıdır. Öncelikle monotonik yükleme deneyi yapılmış olup kolonun bir yüzüne ankastre mesnet gibi yerleşen kiriş numunesine birleşim göçene kadar deplasman yüklemesi verilmiştir. Bu yükleme ile kiriş üzerine etki eden palet yükleri simüle edilmiştir. Ardından çevrimsel yükleme yapıлып birleşim bölgesinin sönmölediği enerji hesaplanmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen moment dönme grafikleri incelendiğinde kaynak bölgesine dair göçme olup olmadığını belirlemek için çevrim sıkışmasına bakılmıştır. Çevrim sıkışmasının olduğu gözlemlendiğinde tırnakların göçerek enerji sönmöünde azalma olduğuna ulaşılmıştır. Çevrim sıkışmasının daha

az belirgin olduğu deneylerde ise sönümlenen enerjinin arttığı, buna kaynağın sünek davranışının sebep olduğu belirtilmiştir. Kaynak performansı incelendiğinde monotonik yüklemelerde elde edilen sonuçlarda kaynak bölgesinin yırtılmasından kaynaklanan göçme modları kirişin üst bölgesinde başlamıştır. Deney sonucunda dayanımı en yüksek olan numunenin hem içeriden hem de dışarıdan kaynaklanmış olan kiriş uç plakasının bulunduğu numune olduğu gözlemlenmiştir. Döngüsel yükleme deneyinde elde edilen veriler ile monotonik yüklemelerdeki veriler kıyaslandığında monotonik yükleme verileri döngüsel yükleme deneyinde oluşturulan iskelet eğrisiyle örtüştüğü görülmüştür. Çalışmada sonuç olarak kiriş uç plakasının kiriş ile kaynatılması sırasında kaynak uzunluğunun artmasının bağlantının performansını doğrudan arttırdığı gözlemlenmiştir. Kaynak bölgesi kirişin sadece uzun kenarlarında bulunduğu sönümlenen enerji, kaynak bölgesinin kirişin dış çevresinde olması durumundan yaklaşık olarak üçte biri oranında az enerji sönümlemiş olup; hem iç hem de dış çevresi kaynaklanmış olan numunenin ise beşte biri kadar enerji sönümlemiştir. Böylece kiriş uç plakasının kiriş ile kaynağının yapılmasında kullanılacak olan hem iç hem de dış alanın kaynaklanması durumunda maksimum dayanımın elde edildiği belirtilmiştir.

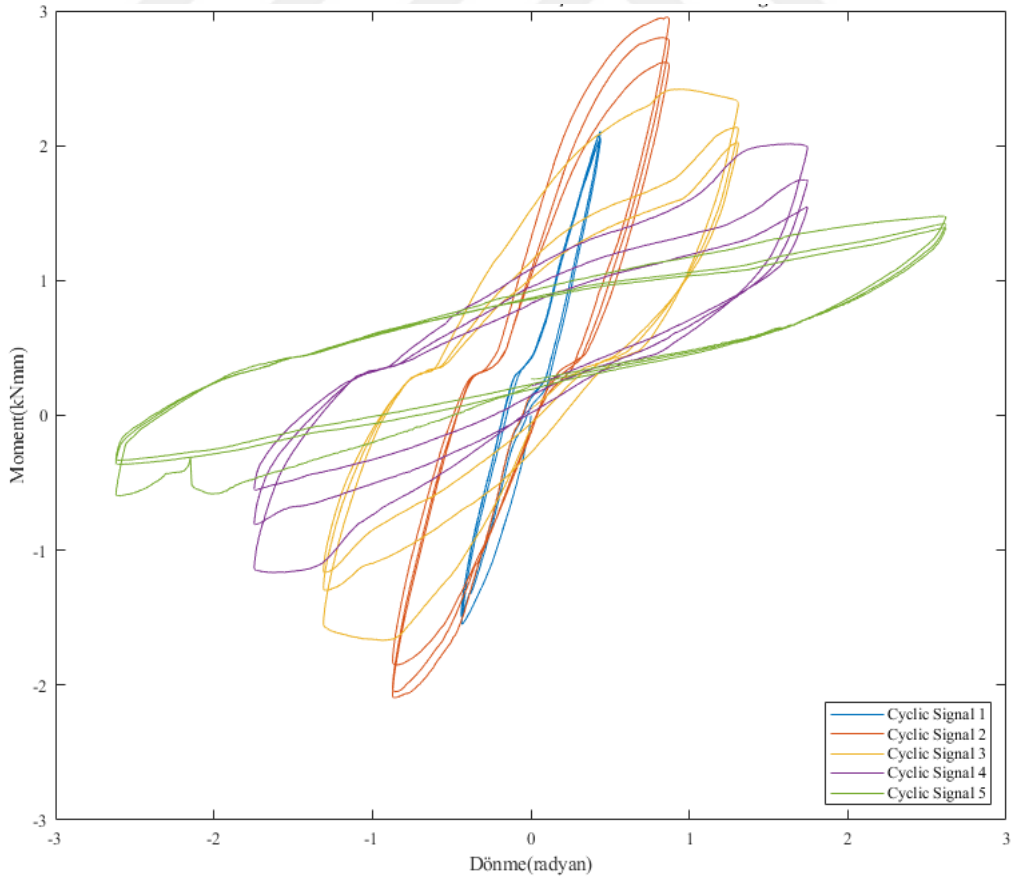
2.5.1. Çevrim Sıkışması (Pinching Effect)

Depo raf sistemlerinin deprem etkileri altında iki doğrultuda da farklı tepkiler verdiği bilinmektedir. Depo raf sisteminin deprem dayanımını artırmak için kullanılan çaprazlar, çapraz koridor yönünde (kısa kenar doğrultusunda) kullanılırken; aşağı koridor yönünde depo raf sisteminin kullanımı sırasında yerleştirilmiş olan paletlere erişimi zorlaştıracığından kullanılmamaktadır. Bu durum, aşağı koridor yönünde momente dayanımı olan basit çelik çerçeve gibi davranmasını sağlamaktadır. Aşağı koridor yönünde, sadece iki kolon ve kolona uç konektörlerle birleşmiş bir kiriş bulunmaktadır. Deprem etkileri altında aşağı koridor yönündeki kiriş elemanlarda burkulma oluşabilir.

Kolon-kiriş birleşim bölgesi kısaca kirişin her iki ucuna da kiriş uç konektörünün kaynatılması ve kaynatılan konektördeki tırnak veya kancaların kolonda dikey yönde bulunan düzenli aralıktaki yuvalara oturtulmasıyla oluşmaktadır. Birleşim bölgesi aşağı koridor yönünde çerçeve yapıda olan depo raf sisteminde depreme karşı dayanımını belirleyen önemli faktörlerden biridir. Birleşim bölgesinin deprem durumundaki performansının ölçülmesi için yorulma deneyleri yapılmaktadır. Depo raf sistemlerinde kolon kiriş birleşim bölgelerinin davranışı histeresiz döngü ile belirlenmektedir.

Histerezis döngü, birleşim bölgesinin her bir yükleme adımında birleşime etki ettirilen çevrimsel kuvvet altında meydana gelen deplasman verileri ile elde edilebilmektedir. Benzer şekilde, moment dönme verileri ile de oluşturulabilmektedir. Her bir yükleme adımında oluşacak histerezis döngününün altında kalan kapalı alan ise birleşimin sönmülediği enerjiyi vermektedir.

Çevrim sıkışması, Şekil 2.19’da gösterildiği gibi her bir yükleme adımında artan yer değiştirme ile azalan taşıma kapasitesini karakterize eder. Şekil 2.19’da sönmülenen enerji değerlerinin azalmaya başlaması çevrim sıkışmasının bir sonucu olup sönmülenen enerjinin büyüklüğünü hesaplamakta kullanılabilir (Sutoyo, 2009). Depo raf sistemleri genellikle elastik tasarım ilkelerine göre tasarlanırken tasarlanır, ancak deprem etkisi altında bu sistemler elastik ötesi davranış sergileyebilmektedirler. Bu durumda plastik şekil değiştirmeler görülmekte ve geri dönüşü olmayan hasarlar oluşmaktadır. Kolon kiriş birleşim bölgesinde çevrim sıkışmasının olup olmadığını anlamak için bu histerezis döngününün doğru bir şekilde oluşturulması gerekmektedir.



Şekil 2.19: Histerezis üzerinde çevrim sıkışması olgusu

Histeresiz üzerinden görülebileceği gibi, birleşim bölgesi her bir yükleme adımında artan çevrimsel tersinir yer değiştirme etkilerine maruz kalmaktadır. Yükleme durumunda, tırnaklar kolon yuvalarını zorlayıp deforme edebilmekte veya tırnak deforme olup kopabilmektedir. Yüklemenin her bir adımı içerisinde ilk maksimum genliğe ulaşıldığında birleşimin sınırları zorlanmaktadır. Böylece birleşimi sağlayan kolon ve kiriş uç plakasındaki tırnaklar hasar alabilmektedir. Tersinir davranış altında tırnaklar kolon yuvasında deforme olmuş alandan rahatça geçer veya tırnakların kopmasıyla tersinir yükleme durumunda herhangi bir zorlama oluşmaz. Tırnakların kiriş uç konektöründen ayrılmadığı durumda etki ettirilecek her yer değiştirme döngüsü altında tırnaklar kolon yuvasında daha fazla deformasyona sebep olmaktadır. Bu da tersinir kuvvetler altında tırnağın yer değiştireceği fazla boşluklar yaratacaktır.



3. YÖNTEM

Bu bölümde, deney prosedürüne ve sonlu elemanlar modellerine dair bilgiler verilmiştir. Deney prosedürü kısmında bu tez çalışmasında kullanılan deney cihazı hakkında kapsamlı bilgiler verilmiş olup; RMI-2012 (Rack Manufacturers Institute-2012) kapsamında uygulanan çevrimsel tersinir yükleme prosedürü anlatılmıştır. Çalışma kapsamında, deneye ilişkin nümerik modeller sonlu elemanlar yöntemine dayalı olarak SAP2000 ve OpenSees programları ile oluşturulmuştur. Oluşturulan nümerik modellere ilişkin bilgilere de bu bölümde yer verilmiştir.

3.1. DENEY PROSEDÜRÜ

Depo raf sistemlerinde kolon kiriş bağlantısının davranışını anlamak ve karakterize etmek amacıyla bileşen testleri yapılmaktadır. Bileşen testleri ile nümerik modeller kalibre edilebilmekte ve tam ölçekli testlerin doğru yorumlanması sağlanmaktadır (Castiglioni, 2016). Kolon kiriş birleşimlerinin sismik performansını etki eden unsurlar aynı şekilde bağlantının statik durumda da performansını etkilemektedir. Bu unsurlar:

1. Profilin geometrisi, profil incelendiğinde dikeyde simetrik olmayan kesit yapısından oluşmaktadır. Ayrıca kiriş ve kolonların ince cidarlı olmasıdır.
2. Bağlantının asimetrik yapısıdır. Kolon kiriş bağlantısında eğimli tırnaklardan ve güvenlik civatasının sadece kiriş uç plakası konektörünün üst tarafında olmasıdır.

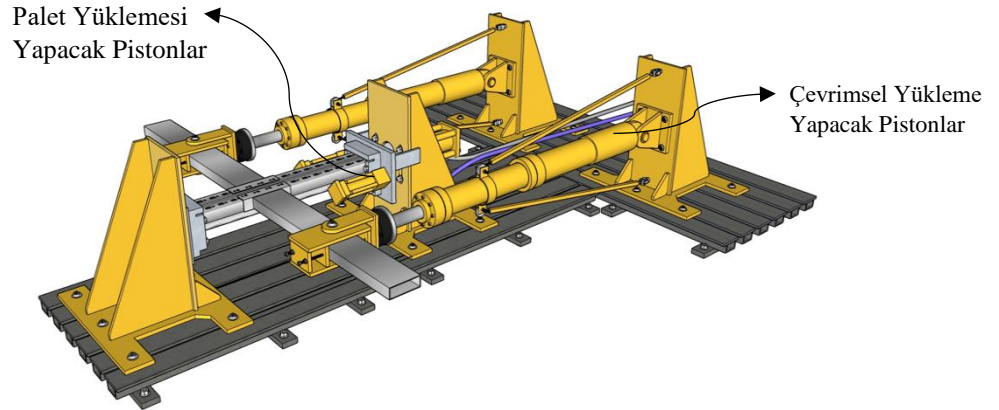
Numunelerin testi İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Büyükçekmece Yerleşkesinde bulunan kolon kiriş bağlantı noktası yorulma testi cihazında gerçekleştirilmiştir. Kolon kesitinin sabit ve kiriş kesitlerinin değişken olduğu; kolon kiriş birleşimin çeşidinin ise yarı-rijit tırnaklı birleşim olarak dikkate alındığı numuneler için deney programı oluşturulmuştur.

3.1.1. Deney Düzeninin Özellikleri

Deney kapsamında belirlenmiş olan test parametrelerinin değerlendirilmesi için izlenecek olan yöntem, RMI-2012 Yönetmeliğinde (Approved American National Standard, 2008) bulunan Bölüm 9.6'da sunulan Kiriş-Kolon Bağlantılarının Döngüsel Test prosedürüdür. Yönetmeliğin ilgili bölümünde, raf sisteminin kolon-kiriş birleşim bölgesi için yapılması gereken çevrimsel yükleme testinin aşamalarına yer verilmiştir.

Deneyde kolonların deney prosedürü gereğince ankastre mesnetli davranacak şekilde sabitlenmesi gerekmektedir. Mesnet koşulunun sağlanması için deney cihazında kolonun yerleşeceği bölümün her iki ucuna da kesit ölçülerine uygun kolon uç tablası kullanılmaktadır. Test edilecek birleşime ait kolon kesiti deney düzeneğinde kolon uç birleştirme aparatları arasına yatay olarak yerleştirilir. Kolonun yerleştirildiği doğrultuda deney cihazında bulunan pistonlar aracılığıyla kolona 50 kN aksenal yük uygulanır.

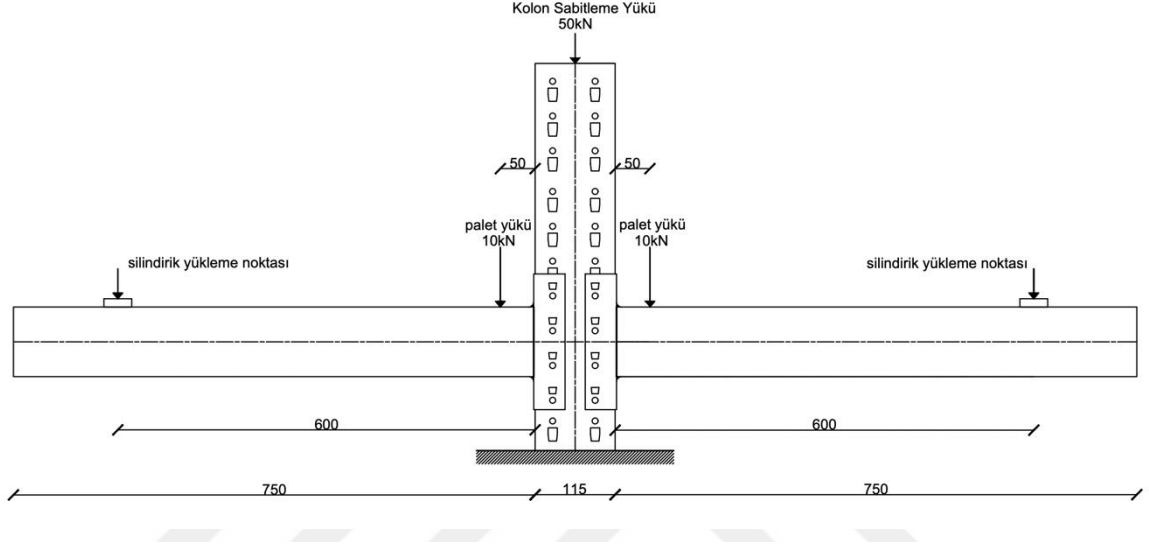
Kolonun yerleştirilmesinin ardından, raf sisteminde olduğu gibi kirişler tırnaklı birleşim aracılığıyla kolonlara kenetlenir. Çevrimsel yüklemenin kirişlerin her iki ucunda da gerçekleştirilebilmesi için deney düzeneğinde Şekil 3.1’de gösterildiği gibi hidrolik pistonlar bulunmaktadır.



Şekil 3.1: Deney düzeneği.

Kirişlerin pistonlardaki sabit bağlantısı ise kelepçelerle sağlanmakta olup kuvvet ve deplasman uygulayabilmektedir. İki adet pistonun her biri bağlı olduğu kirişe 100 kN kapasiteyle kuvvet verebilmekte olup kuvvetin uygulanması ise senkronize bir şekilde sağlanabilmektedir. Hidrolik pistonların sisteme vereceği kuvvetin dögüsel formu ile kolon kiriş birleşim bölgesinin deprem durumu gibi dinamik etkiler altındaki davranışı simüle edilebilmektedir. Bu sebeple, yükveren hidrolik piston yer değiştirme modunda ve iki kirişte tersinir eşit büyüklükte yer değiştirme yapacak şekilde kullanılır. Test boyunca ölçülecek olan yerdeğiştirme ise kirişleri sabitleyen kelepçenin bağlı olduğu hidrolik yükverenin içerisinde bulunan doğrusal yer değiştirme ölçer ile her kiriş için ayrı ölçülmektedir.

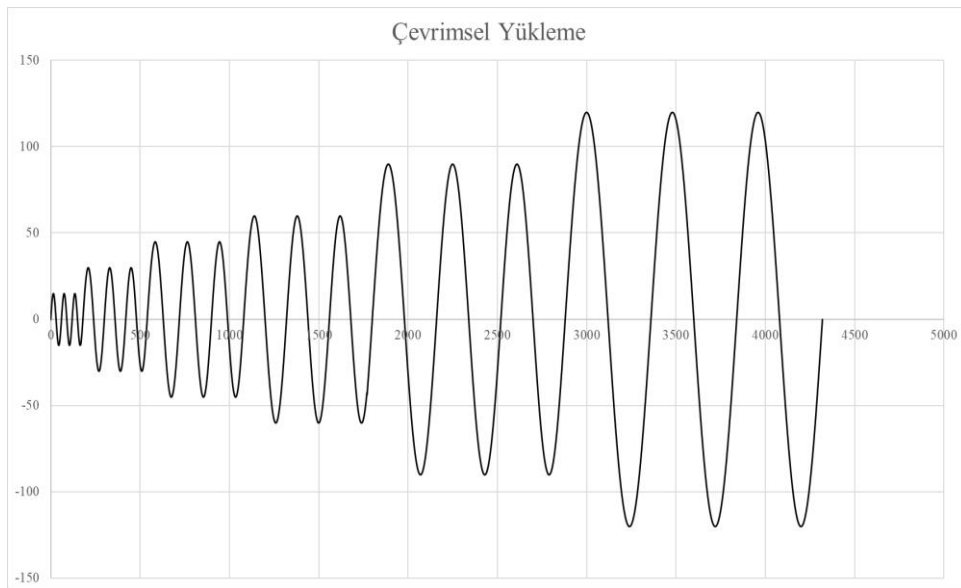
Kiriş üzerinde çevrimsel yüklemeyi yapacak olan yükveren haricinde, RMI-2012 yönetmeliğinin tarif ettiği biçimde kirişlere palet yükünü uygulayacak iki adet piston bulunmaktadır. Bu pistonların her biri deney süresince sabit 10 kN yük uygulayacaktır. Şekil 3.2’de test prosedürü uygulanacak birleşimi ve birleşime uygulanan yüklerin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2: Birleşimin şematik gösterimi (ölçüler mm'dir).

3.1.2. Çevrimsel Test Prosedürü ve Test Numunelerinin Tarifi

RMI-2012 yönetmeliğinin tarif ettiği şekilde test hızı 1 mm/sn olarak belirlenmiş olup pistonların ters yönlü olarak senkronize uyguladığı çevrimsel yükleme protokolü sağ ve sol hidrolik yükverenler için tersinir olacak şekilde Şekil 3.3'teki gibi uygulanmıştır.

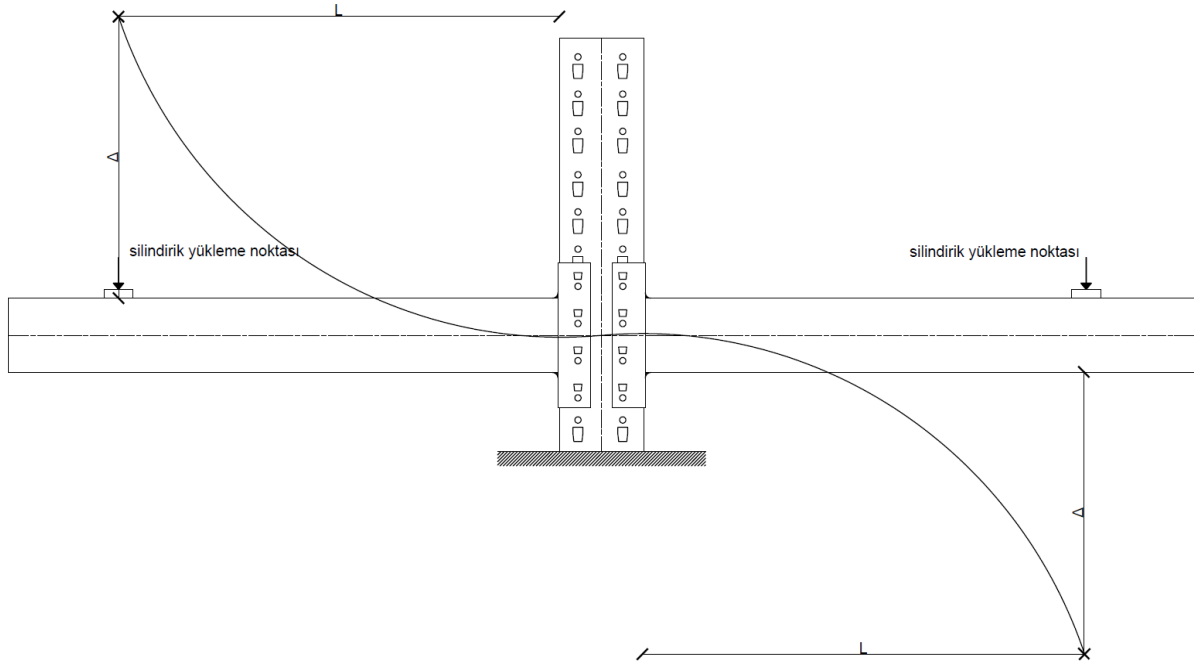


Şekil 3.3: Çevrimsel yükleme prosedürü.

Buna göre, altı yükleme adımı ve bu adımlara denk gelen hedef dönme açıları vardır. Deneysel cihazı deplasman kontrollü olduğundan, söz konusu yükleme adımlarındaki dönmelere denk gelen hedef deplasmanlar (Tablo 3.1) numunelere uygulanmaktadır. Tablo 3.1’de de görüleceği gibi, ilk dört test adımı için üç çevrim, sonraki iki test adımı için iki çevrim gerçekleştirilmektedir. Dönme açısı, kirişe uygulanacak deplasmanın kiriş uzunluğuna oranı şeklinde ifade edilebilir. Çevrimsel yükü kirişlere veren yükverenlerin kolon yüzeyine olan mesafeleri 600 mm’dir. Pistonun hedef deplasmanı ise yönetmelikteki dönme açısı değerlerinin hidrolik yükveren ile kolon yüzeyine kadar olan kiriş uzunluğuyla çarpılmasıyla elde edilmektedir. Kiriş uzunluğunun sabit 600 mm olduğu için her yükleme adımında yaptırılacak olan deplasman için değişken o adıma dair olan dönme açısı olacaktır. Şekil 3.4’te görüleceği üzere, yapılacak olan deplasmanların tersinir şekilde olacağı ve hesapta kullanılacak kiriş uzunluğunun başlangıç bitiş noktası görülmektedir.

Tablo 3.1: Yükleme adımları.

Yükleme Adımı	Çevrim Sayısı	Dönme Açısı (radyan)	Yaptırılacak Deplasman Miktarı (mm)
1	3	0.025	15
2	3	0.05	30
3	3	0.075	45
4	3	0.1	60
5	2	0.15	90
6	2	0.2	120



Şekil 3.4: Deplasman dönme şeması.

3.2. SONLU ELEMANLAR MODELİ

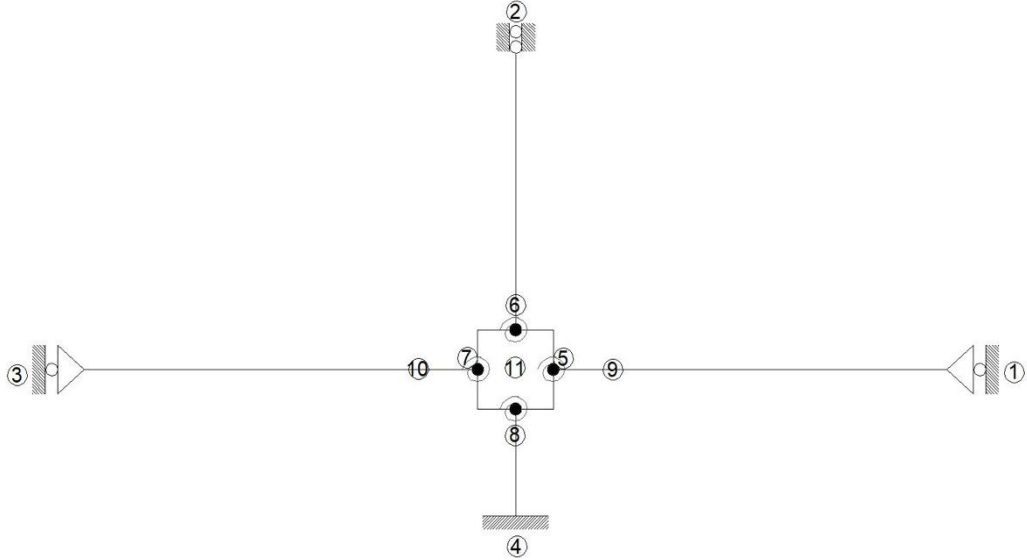
Sonlu elemanlar modellerinin oluşturulması için OpenSees yazılımı ve SAP2000 programı kullanılmıştır. SAP2000 programı “Structural Analysis Program” sözcüklerinin baş harflerinin birleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. SAP2000 programı “Computer and Structures Inc.” tarafından oluşturulmuş bir program olup bu tez kapsamında kullanılan sürümü SAP2000 V22’dir. OpenSees yazılımı ise Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) sponsorluğunda oluşturulmuş araştırma, eğitim gibi ticari olmayan kullanımlar için geliştirilmiş nesne yönelimli bir yazılımdır.

3.2.1. OpenSees TCL Deney Modeli

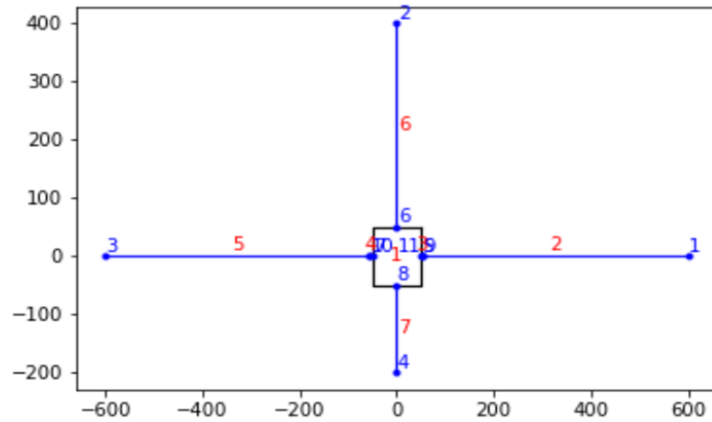
OpenSees yazılımı içerisinde kolon kiriş birleşim modellerinin oluşturulması için TCL kodlama dili kullanılmıştır. Modellemesi yapılacak olan bütün numuneler için öncelikle modellenecek uzay alan parametreleri belirlenmiştir. Modellemeler iki boyutlu ve her bir düğüm noktasındaki serbestlik derecesi ise üç olacak şekilde uzay parametreleri belirlenmiştir. Ardından bütün deney numunelerinde sabit değişken olan kolon kiriş uzunluklarına göre düğüm noktaları ataması yapılmıştır. Deneye ait mesnet koşulları, sonlu elemanlar modelinde oluşturulmuştur. Buna göre, deney düzeneğine yerleştirilen kolonun alt uç noktası ankastre mesnet şartlarını sağladığından, model de ankastre mesnet tanımlanmıştır. Kirişlerde ayrıca hidrolik yükverenlerin bulunduğu düğüm noktalarında deplasman yüklemesinin yapılacağı ekseninde harekete izin verilmiştir. Deney numunelerinde S235 sınıfı çelik kullanıldığı için sonlu elemanlar modelinde de S235 malzeme sınıfı tanımlanmıştır. İzotropik malzeme olan çeliğin malzeme parametrelerinin tanımı yapılırken kinematik sertleşmeyi ifade edecek olan malzeme komutu seçilmiştir (www.opensees.berkeley.edu, Erişim Tarihi: 12.03.2023). Böylece, yükleme altında histeretik döngü içerisinde maksimum ve minimum moment noktalarının deney ile benzer sonuçlar vermesi hedeflenmiştir (Galeotti ve diğ., 2021). Ardından, kolon kiriş yapısal elemanların kesitleri tanımlanmış; kolon ve kiriş elemanlarının lokal eksenlerine göre tanımlanmış olan rijitlik ve eleman kesit tesirlerini içeren matrislerin global matrise dönüşümleri sağlanmıştır. Kolon ve kiriş elemanların tanımlanmasının ardından, kolon kiriş birleşim bölgesi elemanı oluşturulmuştur. Birleşim bölgesi Şekil 3.6’te görülen Joint2D elemanı ile modellenmiştir. Birleşim elemanının birincil işlemi, merkezi bir düğüm oluşturmak ve bu merkezi düğümü kinematik kısıtlamalar aracılığıyla birleşimin etrafındaki dört düğüm noktasına bağlamaktır (Galeotti, ve diğ., 2021). Kolon kiriş birleşiminde her kiriş ucuna ve kolon uçlarına birer adet yay eleman tanımlanmaktadır. Birleşim bölgesiyle kolon bağlantısını

teşkil eden 6 ve 8 numaralı yaylar rijit davranış sergilemektedir. Birleşim bölgesini kiriş ucunu teşkil eden 7 ve 5 numaralı yayların deplasman yüklemesi altında yapacağı histeretik davranışın modellenmesi için deneyden elde edilen moment dönme değerlerinden oluşturulan iskelet eğrisi kullanılmıştır (www.opensees.berkeley.edu,Erişim Tarihi: 11.03.2023). Kiriş ucunun yüklemesi altında yapacağı Böylece Joint2D elemanı ile deneyde elde edilen kolon kiriş birleşim bölgesi davranışı sisteme entegre edilmiştir (Altoontash, 2004).

Şekil 3.5’de modellemeye ait eleman ve düğüm noktaları görülmektedir. Yapısal modellemede, deneyde elemanlara etki eden kolon aksenal yükü ile palet yüklerini temsil eden sabit piston yükleri de tanımlanmıştır. Son olarak, modele RMI-2012 yüklemesi prosedürü kiriş uçlarına tersinir şekilde etki ettirilerek deney simülasyonu gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.6: Birleşim bölgesi elemanı.



Şekil 3.5: OpenSees modeli.

3.2.2. SAP2000 Deney Modeli

RMI-2012 yönetmeliğine göre tarifi yapılmış olan kolon kiriş birleşim bölgesi yorulma deneyi, SAP2000 sonlu elemanlar programında birleşim bölgesi modellenip çevrimsel yüklemeler altında simüle edilmiştir. Deney düzeneğinde test edilen numunelerin kesitleri, malzemeleri, mesnet şartları ve yükleme koşulları SAP2000 sonlu elemanlar programında modellenmiştir. Tablo 3.2’de kullanılan malzeme S235 sınıfı çeliğin malzeme parametreleri gösterilmiştir.

Tablo 3.2: S235 sınıfı çelik özellikleri.

Çelik Sınıfı	S235
Birim Hacim Ağırlığı (N/mm ³)	7,69 x 10 ⁻⁵
Elastisite Modülü (N/mm ²)	210000
Poisson Oranı	0,3
En Küçük Akma Dayanımı (Mpa)	235
En Küçük Kopma Dayanımı (Mpa)	360
Beklenen Akma Dayanımı (Mpa)	258,5
Beklenen Kopma Dayanımı (Mpa)	396

Deney numunesi olarak kullanılmış olan kolon ve kiriş kesitleri, kesit tasarım modülünde oluşturulmuştur. Örnek bir kolon kesitine ait kesit özelliklerini gösteren parametreler Şekil 3.7’de gösterilmiştir.

Section Name	W100_40		
Section Notes	Modify/Show Notes...		
Base Material	+	S235	▼
Design Type			
	<input checked="" type="radio"/>	No Check/Design	
	<input type="radio"/>	General Steel Section	
	<input type="radio"/>	Concrete Column	
Section Name	W100_40		
Properties			
Cross-section (axial) area	545,2971	Section modulus about 3 axis	15529,357
Moment of Inertia about 3 axis	776467,8	Section modulus about 2 axis	6462,3127
Moment of Inertia about 2 axis	309973,51	Plastic modulus about 3 axis	0,
Product of Inertia about 2-3	0,	Plastic modulus about 2 axis	0,
Shear area in 2 direction	212,3978	Radius of Gyration about 3 axis	37,7351
Shear area in 3 direction	271,8626	Radius of Gyration about 2 axis	23,8422
Torsional constant	742,6652	Shear Center Eccentricity (x3)	0,

Şekil 3.7: Yapısal eleman kesit parametreleri.

Kolon ve kiriş kesitleri oluşturulmasının ardından birleşim bölgesinin modellenmesi için her bir kirişin kolon ile temas edecek yüzeyine link eleman tanımlaması yapılmıştır. Link elemanın tanımlanması için deney etkiltilmiş olan yükleme değerlerinden oluşturulan moment dönme grafikleriyle iskelet eğrisi oluşturulmuştur. Bu eğri link elemana tanımlanmış olup histeretik davranış sağlanması için kinematik model kullanılmıştır. Kinematik model genellikle çelik plakalarda görülen kinematik sertleşme davranışından kaynaklı seçilmiştir (Cao ve diğ., 2009). Sünek davranış sergileyen link elemanlar için uygun olan kinematik model ile link elemanın kopma aşamasına gelmeden deformasyon geçirmesi sağlanacaktır (Computer and Structures Inc., 2018). Şekil 3.8’de örnek olarak seçilen sol kiriş bağlantı noktasına ait link eleman parametreleri görülmektedir.

Link elemanlar ile deneydeki pozitif ve negatif dönme momentlerinden kaynaklanan histeretik davranışın modellenmesi amaçlanmıştır. Böylece, sönmülenen enerjinin hesaplanması sağlanmaktadır (Gusellaa ve diğ., 2017).

Link/Support Type: MultiLinear Plastic

Property Name: Beam Left End Set Default Name

Property Notes: Modify/Show...

P-Delta Parameters

Shear Couple

Equal End Moments

Advanced Modify/Show

Total Mass and Weight

Mass: 0

Weight: 0

Rotational Inertia 1: 0

Rotational Inertia 2: 0

Rotational Inertia 3: 0

Factors For Line, Area and Solid Springs

Property is Defined for This Length In a Line Spring: 1

Property is Defined for This Area In Area and Solid Springs: 1

Directional Properties

Direction	Fixed	NonLinear	Properties	Direction	Fixed	Nonlinear	Properties
<input checked="" type="checkbox"/> U1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U1...	<input checked="" type="checkbox"/> R1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R1...
<input checked="" type="checkbox"/> U2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U2...	<input checked="" type="checkbox"/> R2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for R2...
<input checked="" type="checkbox"/> U3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Modify/Show for U3...	<input checked="" type="checkbox"/> R3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Modify/Show for R3...

Fix All Clear All

Stiffness Options

Stiffness Used for Linear and Modal Load Cases: Effective Stiffness from Zero, Else Nonlinear

Stiffness Used for Stiffness-proportional Viscous Damping: Initial Stiffness (K0)

Stiffness-proportional Viscous Damping Coefficient Modification Factor: 1

Identification

Property Name: Beam Left End

Direction: R3

Type: MultiLinear Plastic

NonLinear: Yes

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Kinematic

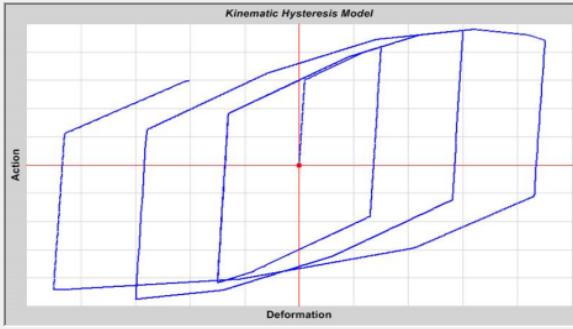
No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

Properties Used For Linear Analysis Cases

Effective Stiffness: 0,

Effective Damping: 0,

Hysteresis Definition Sketch



Multi-Linear Force-Deformation Definition

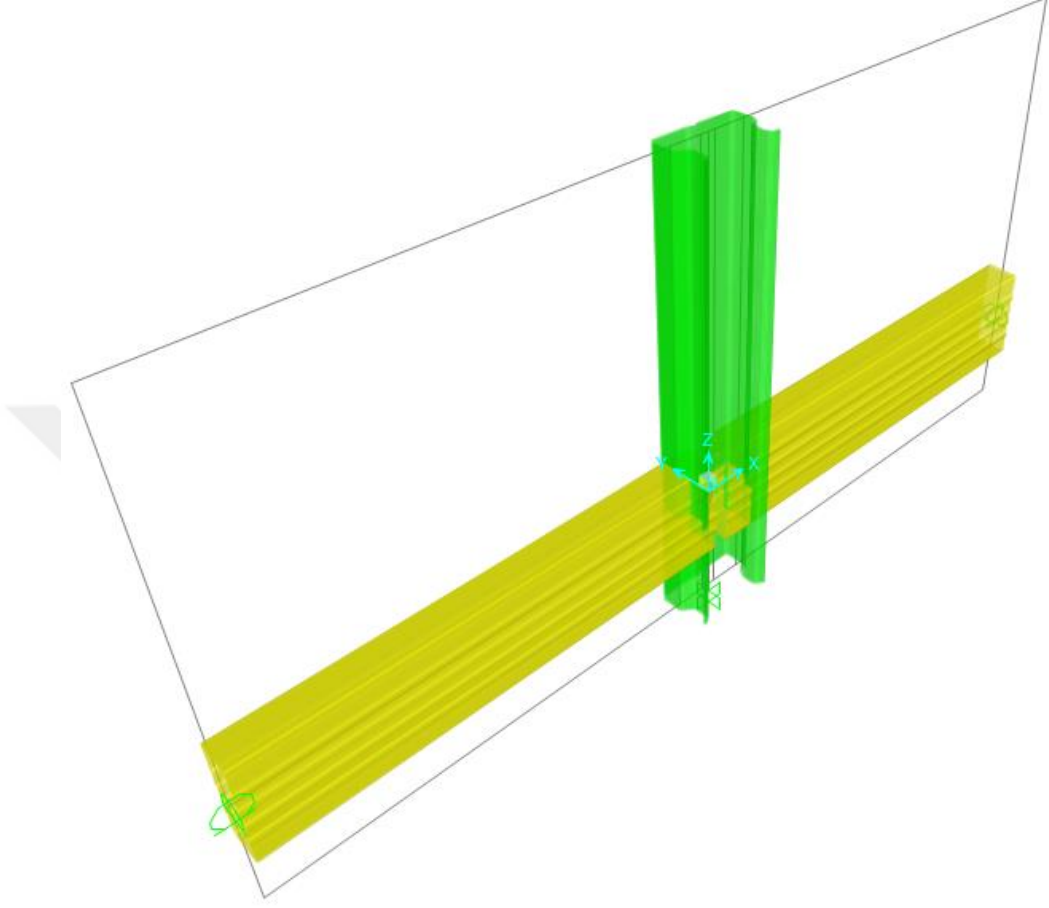
Rotation	Moment
4	-0,05
5	-0,03
6	0,03
7	0,05

Order Rows Delete Row 10 Add Row 11

Şekil 3.8: Link eleman tanımları.

Modellenen kolonun alt uç noktası için ankastre mesnet tanımı yapılmış olup üst uç noktasına deney düzeneğindeki gibi kolonu sabitlemek için uygulanan 50 kN eksenel yük uygulanmıştır. Ayrıca, kirişlere palet yükünü temsilen 10 kN noktasal yük etkilmiştir. Kiriş uç noktalarında ise döngüsel yüklemenin tanımlanması için hareket doğrultusunda tutulu olacak şekilde kiriş uç noktalarında tersinir birim yük uygulanmıştır. Deneyde numunelere uygulanan döngüsel yüklemenin tanımlanması için zaman tanım alanı fonksiyonu oluşturulmuştur. Şekil

3.9'da örnek olarak 03K_DD50x130 numunesinin modellenmesi sunulmuştur. Tamamlanan modellemenin ardından zaman tanım analizleri gerçekleştirilmiştir.



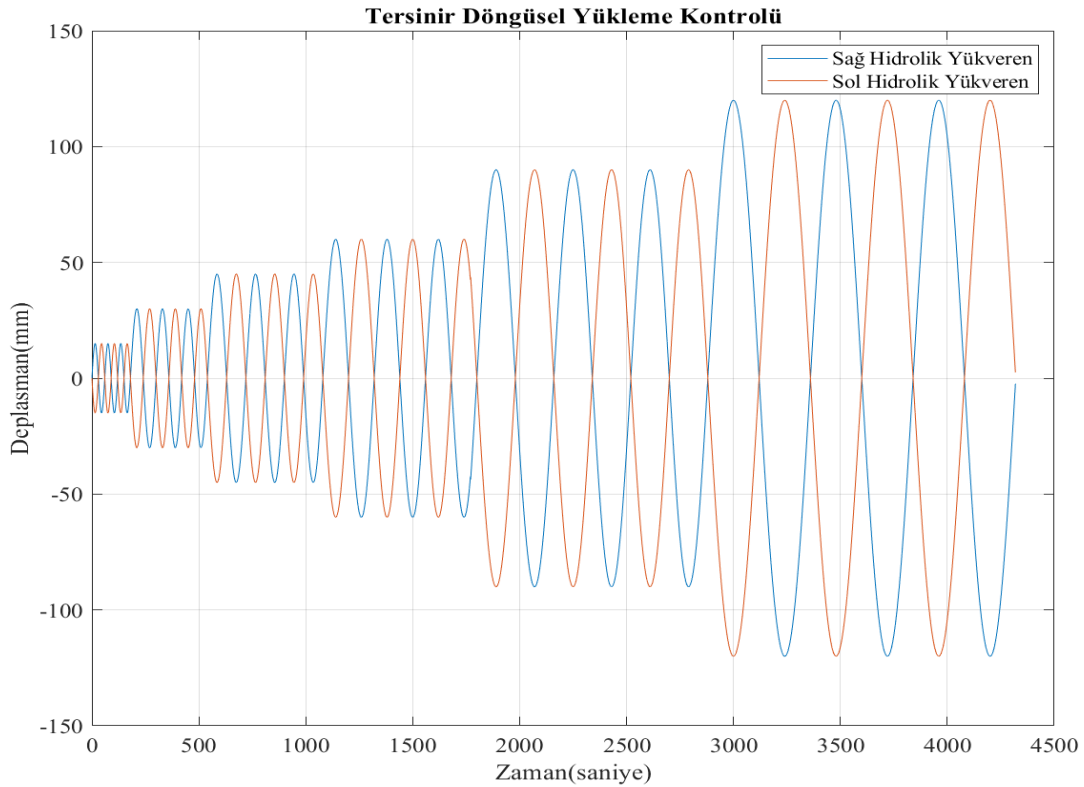
Şekil 3.9: Kolon kiriş birleşim modellemesi.

4. BULGULAR

Bu bölümde, öncelikle RMI-2012 yönetmeliğine göre çelik depo raf sisteminin yarı-rijit tırnaklı kolon kiriş birleşim bölgesinde uygulanan çevrimsel tersinir deplasman yüklemeleri anlatılmıştır (Bölüm 4.1). Deney sonucunda, yarı-rijit tırnaklı birleşim bölgesinin histeretik davranışı elde edilmiştir. Bu davranış üzerinden sönmülenen enerji değerleri hesaplanmıştır. Ardından, Bölüm 4.2 ve Bölüm 4.3'te deneyde ele alınan birleşim bölgesine ait nümerik modeller OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar programları ile oluşturulmuştur. Nümerik modellere deneyde uygulanan çevrimsel yükleme prosedürü zaman tanım alanında etkiltilmiştir. Nümerik modellerden edilen birleşim bölgesinin moment dönme bulguları ile kiriş kesitleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Sonrasında, bu veriler ile birleşim bölgesinde sönmülenen enerji hesaplanmıştır. Son olarak elde edilen tüm veriler deney verileriyle kıyaslanmış, model ile deney sonuçlarının farklılıklarının sebepleri irdelenmiştir.

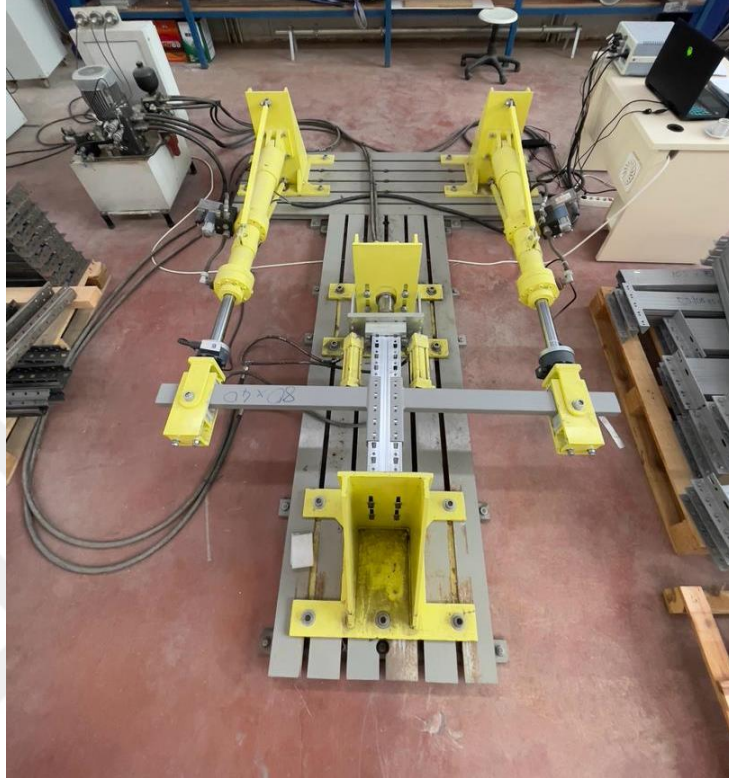
4.1. ÇEVİRİSEL YÜKLEME DENEYLERİ

Tez kapsamında, çevrimsel yükleme deneyleri RMI-2012 yönetmeliğinde tanımlanmış olan açısız yükleme adımlarının yer değiştirme değerlerine dönüştürülmesiyle (Tablo 3.1)



Şekil 4.1: Döngüsel yükleme kontrolü.

gerçekleştirilmiştir. Sağ ve sol yükverenlerin, deney sırasında RMI şartnamesine göre numuneye etkilenecek tersinir yükleme özellikleri Şekil 4.1’de sunulmuştur. Yapılan deneylere ait isimler ve bu deneylerde kullanılan numunelere ait kesit boyutları Tablo 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.2: Numuneleri yerleştirilmiş deney düzeneği.

Tablo 4.1: Deneyde kullanılan kolon ve kiriş kesit bilgileri.

Deney Adı	Kiriş Kesiti (mm)	Kolon Kesiti (mm)
01K_DD50x75	DD 75x50	115x70
02K_40x100	100x40	115x70
03K_DD50x130	DD 130x50	115x70
04K_40x80	80x40	115x70
05K_DD50x105	DD 105x50	115x70
06K_50x150	50x150	115x70
07K_DD50x170	DD 170x50	115x70

Deney sırasında tek değişken kirişlerin kesitleri olmuştur. Her bir numuneye ait kesit bilgileri Tablo 4.2’de yer almaktadır.

Tablo 4.2: Numune kesit özellikleri.

Numune Adı	Kesit Alanı (mm ²)	Atalet Momenti (mm ⁴)
01K_DD50x75	624	188992
02K_40x100	518.8	149600
03K_DD50x130	561.3	181400
04K_40x80	438.8	120700
05K_DD50x105	501.3	152600
06K_50x150	758.8	361900
07K_DD50x170	645.3	221700

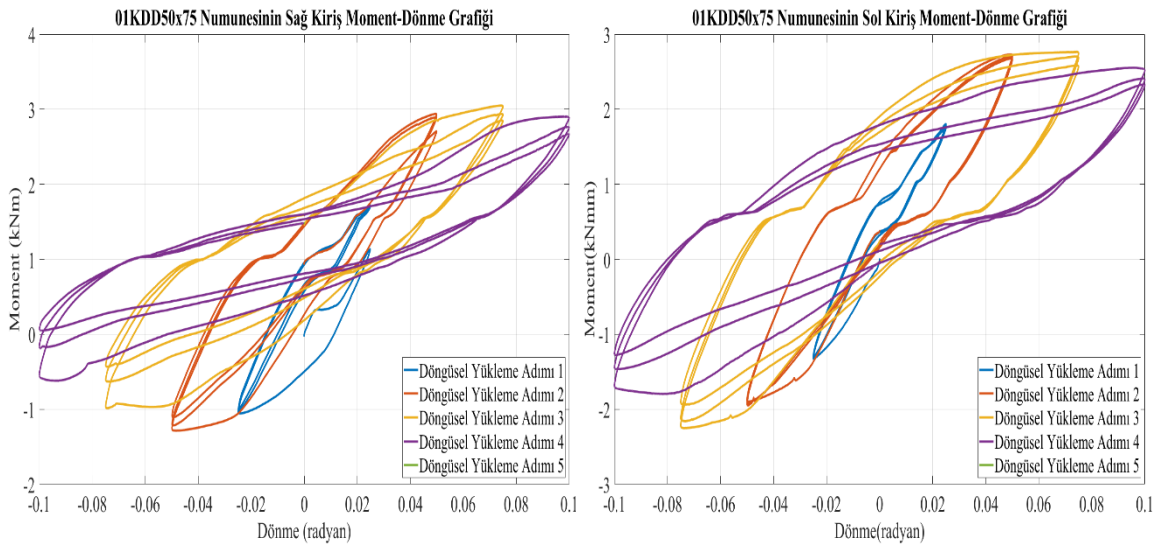
Hesaplanmış olan kesit bilgileri irdelendiğinde, sönümlenen enerji ile atalet momenti arasındaki ilişki incelenmelidir. Hesaplanan atalet momenti değerleri, deneyde hidrolik yükverenlerin deplasman yüklemesinin yapıldığı doğrultudadır. Atalet momenti, enerji sönümlemesi bakımından tek parametre değildir. Bunun dışında sönümlenen enerji kolon kiriş birleşiminin performansı ile doğru orantılı olup, kolon kiriş birleşiminin kiriş ucundaki kaynak kalitesi, kolon kiriş birleşim plakasının kalınlığı ve tırnakların yükleme adımları boyunca birleşim üzerindeki sürekliliğiyle de ilişkilidir. Atalet momentinin tek parametre olmadığının gösterilmesi için örnek olarak en büyük atalet momenti değerine sahip 06K_50x150 deneyi incelenmiştir. Bu numunenin atalet momenti 361900 mm⁴ olup sönümlendiği enerji toplam enerji 4.0706 kNmrad'dır. Bu değerler, 03K_DD50x130 numunesi için kıyaslanacak olursa, atalet momentinin 181400 mm⁴, sönümlendiği enerjinin ise 8.3480 kNmrad olduğu görülmektedir. Anlaşılacağı üzere, atalet momenti birleşim performansının ölçülmesindeki tek parametre değildir.

Markazi ve diğ.,(2001) yaptıkları çalışmada depo raf sistemlerinin birleşim bölgelerinin göçme şekillerini genel olarak üç başlıkta gruplandırmıştır. Bunlar:

- Kolon kiriş birleşimindeki tırnakların kolon yuvalarını kesmesi,
- Tırnakların yükleme döngüleri boyunca kopması,
- Kolon kiriş birleşimini sağlayan kiriş uç plakasının kaynak bölgesinden ayrılması şeklinde gruplandırılabilir.

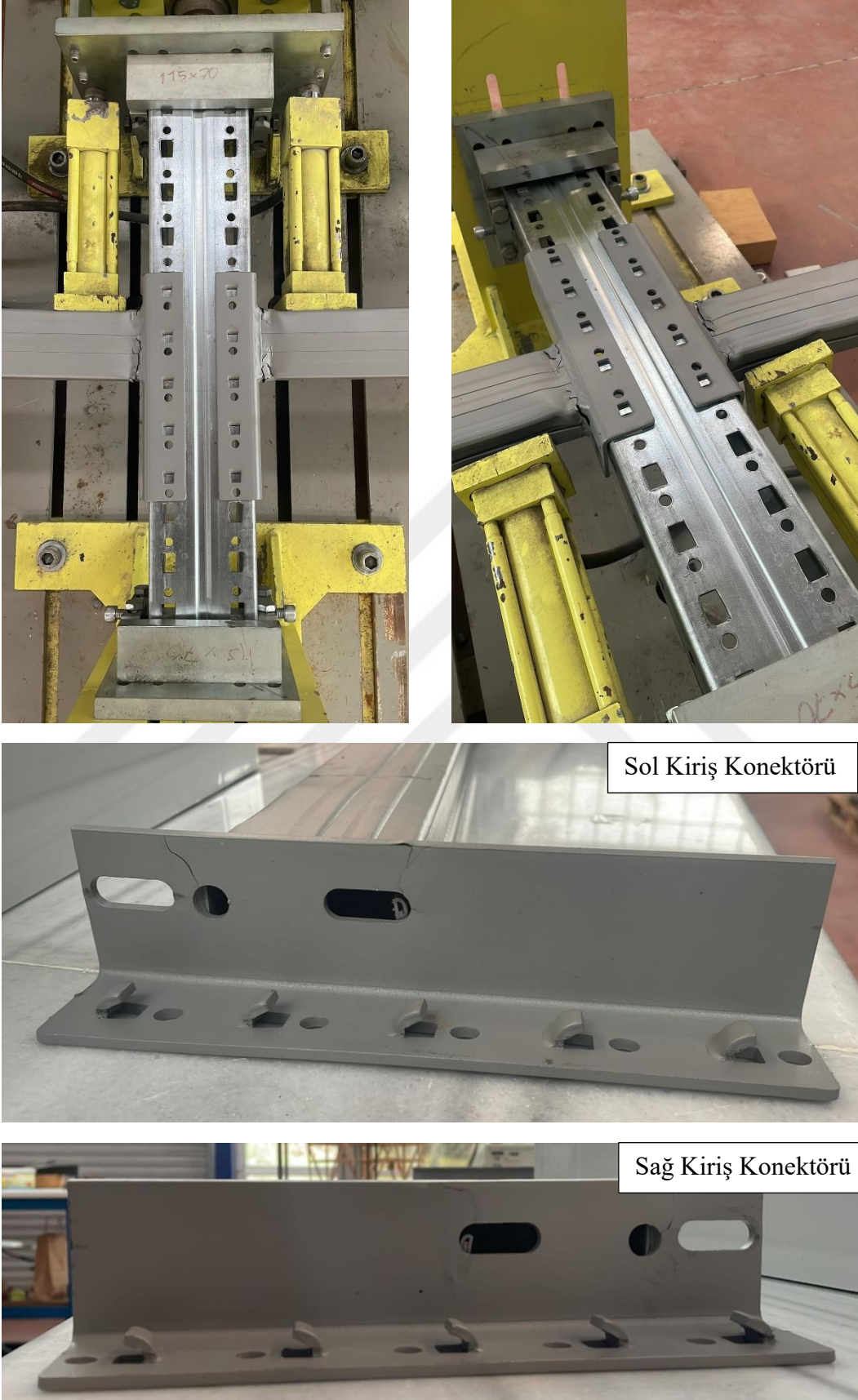
4.1.1. 01K_DD50x75 Numunesinin Deney Sonuçları

01K_DD50x75 numunesinin çevrimsel yükleme deneyi sonuçlarından elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.3'te sunulmuştur. Deney sonuçları incelendiğinde, yükleme adımlarının ardışık olarak etkililmesi sırasında dördüncü yükleme adımına kadar kolon kiriş birleşiminin dayanım gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.3'te görüleceği üzere, ilk dört yükleme adımı boyunca yükleme gerçekleştirilmiş beşinci yükleme adımına geçilememiştir. Diğer bir deyişle, kiriş kolon birleşimi beşinci yükleme adımında maruz kalacağı maksimum dönme miktarı olan 0.15 radyan karşılığı olan 90 mm maksimum kiriş deplasmanına dayanım sergileyememiştir.



Şekil 4.3: 01K_DD50x75 numunesinin moment dönme grafikleri.

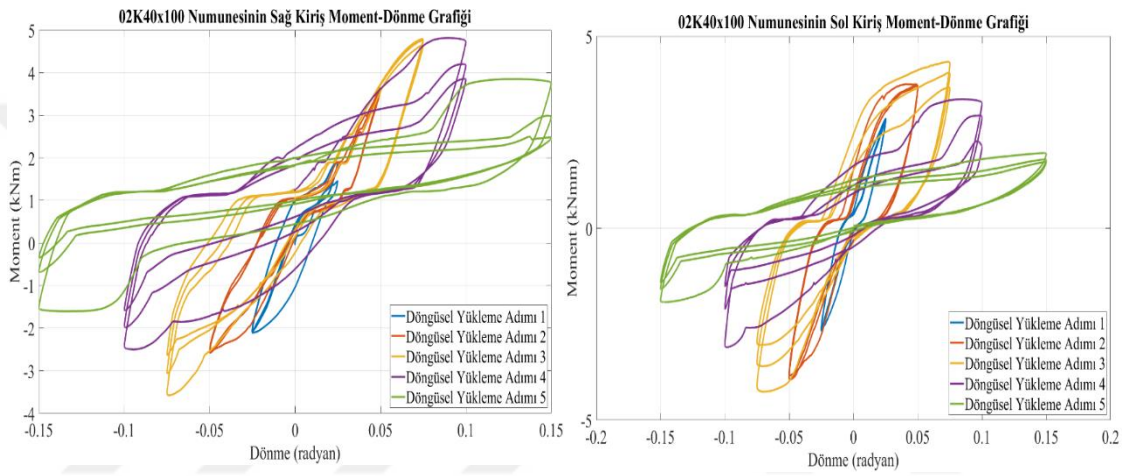
Deney sırasında oluşan hasarlar, Şekil 4.4'te sunulmuştur. Sağ ve sol kirişin yükleme adımlarında, birleşimin tırnaklarında herhangi bir hasar görülmemiştir. Şekil 4.4'te, göçme şeklinin kiriş uç konektörünün kirişe bağlantısını sağlayan kaynağın artan deplasman değerleri sebebiyle oluşan momente dayanım gösterememesinden meydana geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 4.4: 01K_DD50x75 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.2. 02K_40x100 Numunesinin Deney Sonuçları

Çevrimsel tersinir yükleme deneyine tabi tutulan 02K_40x100 numunesinin yer değiştirme kuvvet değerlerinden elde edilen moment dönme değerleri Şekil 4.5'te görülmektedir. Deneyde, RMI-2012 yönetmeliğine göre belirlenmiş olan beş ardışık döngüsel yükleme adımını sağ ve sol kiriş için de tamamlamıştır. Döngüsel yükleme adımları boyunca tınaklarda herhangi bir hasar görülmemiştir. Deney boyunca artan deplasman yüklemesi altında kolon kiriş birleşim plakasını kiriş ucuna bağlayan kaynak bölgesinde kopma görülmüştür (Şekil 4.6).



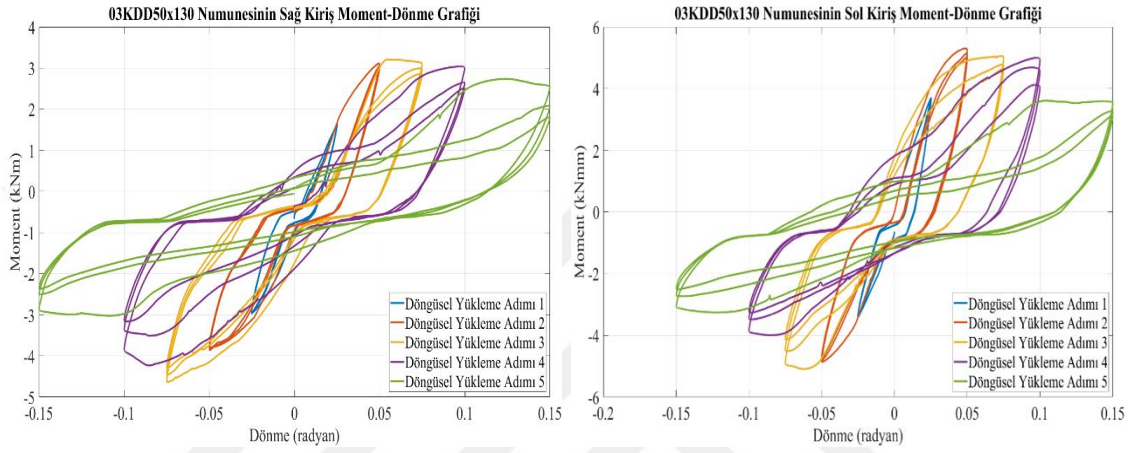
Şekil 4.5: 02K_40x100 numunesinin moment dönme grafikleri.



Şekil 4.6: 02K_40x100 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.3. 03K_DD50x130 Numunesinin Deney Sonuçları

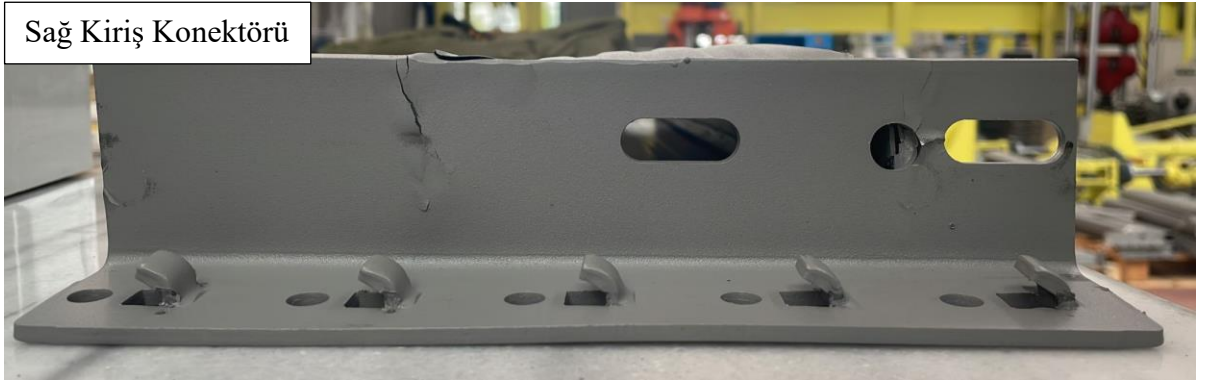
03K_DD50x130 numunesinin çevrimsel tersinir yükleme deneyi sonuçlarından elde edilen moment dönme grafikleri (Şekil 4.7) incelendiğinde, yükleme adımlarının tümü sağlanarak deney tamamlanmıştır. Böylece, sağ ve sol kirişin deney sonuna kadar enerji sönmülemeye devam ettiği söylenebilir. Şekil 4.8’de sunulan deney sonrasına ait görsellerde, kolon kiriş birleşim plakasının kiriş ucuna bağlayan kaynak bölgesinde kopma olduğu görülmektedir.



Şekil 4.7: 03K_DD50x130 numunesinin moment dönme grafikleri.



Sol Kiriş Konektörü

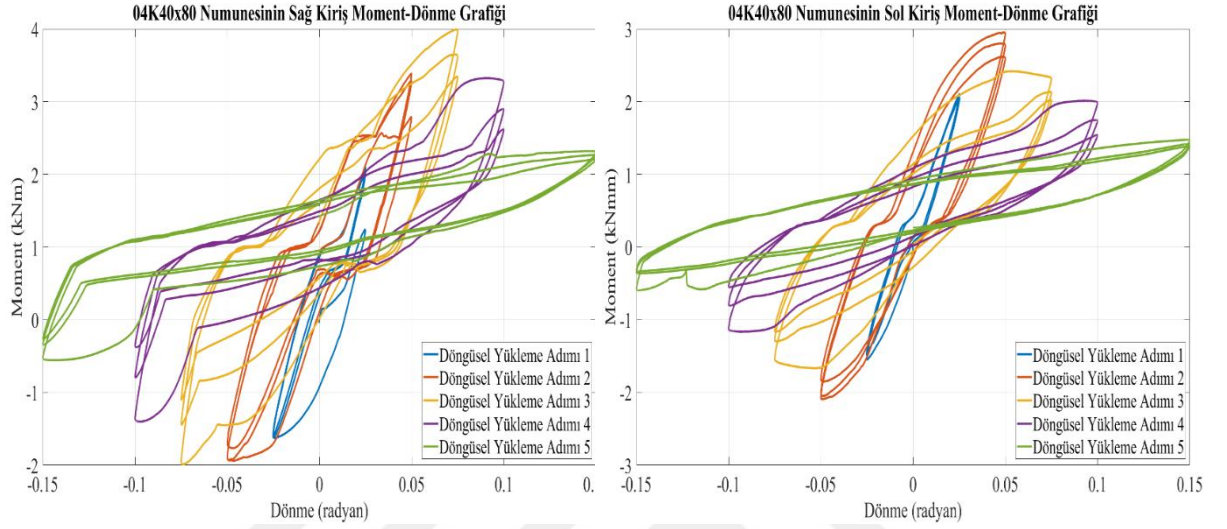


Sağ Kiriş Konektörü

Şekil 4.8: 03K_DD50x130 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.4. 04K_40x80 Numunesinin Deney Sonuçları

04K_40x80 numunesinin yer değiştirme kuvvet değerlerinden elde edilen moment dönme değerleri Şekil 4.9’da görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, sağ ve sol kiriş numunelerinin RMI-2012 yönetmeliğine göre belirlenmiş olan beş ardışık döngüsel yükleme adımını tamamladığı görülmektedir.



Şekil 4.9: 04K_40x80 numunesinin moment dönme grafikleri.

Deneyin tamamlanmasının ardından çekilen fotoğraflar Şekil 4.10’da görülmektedir. Sağ ve sol kiriş numunelerinde birleşim bölgesinin artan deplasman sebebiyle kaynak bölgesinden göçtüğü gözlemlenmiştir.



Sağ Kiriş Konektörü



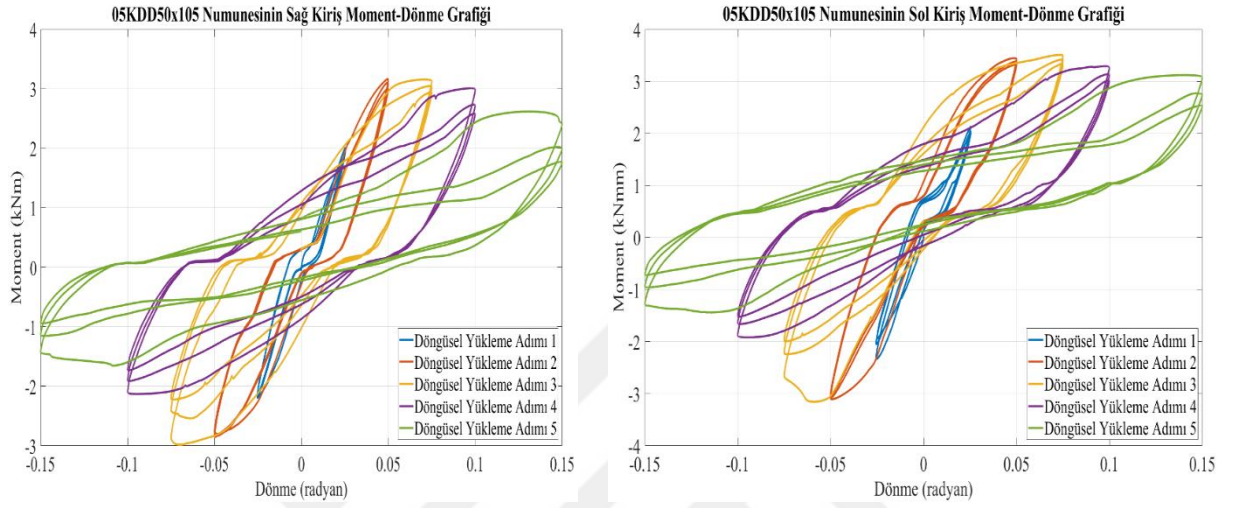
Sol Kiriş Konektörü



Şekil 4.10: 04K_40x80 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.5. 05K_DD50x105 Numunesinin Deney Sonuçları

05K_DD105x50 numunesinin yer değiştirme zaman değerlerinden elde edilen moment dönme değerleri Şekil 4.11’de görülmektedir. Grafikler incelendiğinde, sağ ve sol kirişlerin RMI-2012 yönetmeliğine göre belirlenmiş olan beş ardışık döngüsel yükleme adımını tamamladığı görülmüştür.



Şekil 4.11: 05K_DD50x105 numunesinin moment dönme grafikleri.

Tamamlanan deneyin ardından çekilen fotoğraflar Şekil 4.12’de bulunmaktadır. Deney sonrasında kiriş numuneleri incelendiğinde birleşim bölgesindeki tırnaklarda herhangi bir yapısal hasar ve deformasyon görülmemiş olup birleşim plakasının boydan boya çatlayarak hasar aldığı görülmüştür. Göçme birleşim plakasını kirişe bağlayan kaynak bölgesinde gerçekteşmiştir.

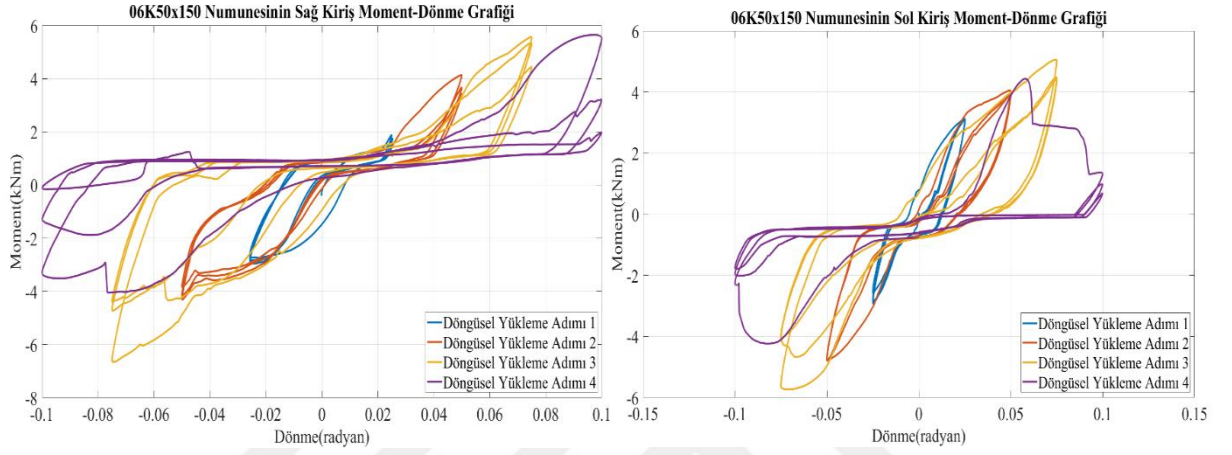


Şekil 4.12: 05K _ DD105x50 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.6. 06K_50x150 Numunesinin Deney Sonuçları

06K_DD50x150 numunesinin deney sonuçları incelendiğinde yükleme adımlarının ardışık yüklenmesi sırasında dördüncü yükleme adımının tamamlanmasının ardından birleşim deplasman yüklemesi altında herhangi bir dayanım sergileyememiştir. Deneye ait moment dönme grafikleri Şekil 4.13'te sunulmuştur. Sağ kiriş numunesi incelendiğinde birinci yükleme adımının pozitif deplasman yüklemesi sırasında bir tırnağın koptuğu, ardından her bir yükleme adımında tırnakların birleşim plakasından ayrıldığı gözlemlenmiştir. Sol kiriş numunesinde, tırnakların birleşim plakasından ayrılması ikinci yükleme adımında başlamış olup her bir yükleme adımında birleşim plakasından tırnakların koptuğu görülmüştür. Şekil 4.13'te sağ kiriş numunesinin dördüncü yükleme adımı incelendiğinde, numunenin dördüncü yükleme adımının ilk turunda kiriş uç konektöründe kalan tırnak ile ilk turu tamamlamasının ardından gelen iki tur içerisinde son tırnakların da hasar aldığı moment değerlerinden de yorumlanabilir.

Dördüncü yüklemenin son turunda tüm tırnakların işlevini yitirmesi sebebiyle, birleşimin maksimum yer değiştirme değerlerine ulaşırken dayanım göstereceği moment değerinin oldukça aniden düştüğü görülmüştür. Kirişlerin deney sonrasında çekilmiş olan fotoğrafları (Şekil 4.14) incelendiğinde kirişlerin göçme şeklinin tırnakların kopmasına dayandığı rahatça görülebilir.



Şekil 4.13: 06K_50x150 numunesinin moment dönme grafikleri.

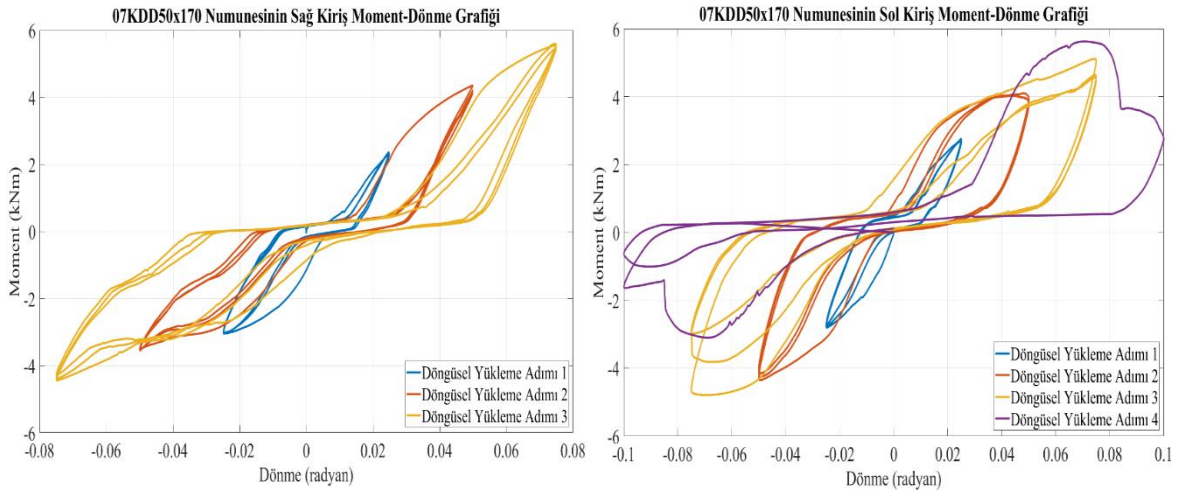


Şekil 4.14: 06K_50x150 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.7. 07K_DD50x170 Numunesinin Deney Sonuçları

07K_DD50x170 numunesinin çevrimsel tersinir yükleme deneyi sonuçları (Şekil 4.15) incelendiğinde, ardışık yükleme adımları sırasında sağ kirişte üçüncü yükleme adımının tamamlanmasının ardından sol kirişte ise dördüncü yükleme adımının tamamlanmasının ardından dayanımını kaybetmiştir. Şekil 4.15'te görüldüğü üzere, sağ kiriş 0.075 radyan dönmeye denk gelen 45 mm deplasmanın ardından dayanımını yitirmiştir. Sol kiriş ise 0.1 radyan dönme değerine denk gelen 60 mm'lik maksimum deplasman yüklemesinin ardından dayanımını kaybetmiştir.

Şekil 4.15'te sağ kiriş numunesinin ilk yükleme adımından itibaren tırnakları kopmuş olup üçüncü yükleme adımının ardından kiriş uç konektöründe tırnak kalmamıştır. Sol kiriş incelendiğinde ise tırnakların kırılması ikinci yükleme adımının ardından gerçekleşmiş olup dördüncü yükleme adımıyla beraber kiriş birleşim plakasında tırnak kalmadığı görülmüştür.



Şekil 4.15: 07K_DD50x170 numunesinin moment dönme grafikleri.

Şekil 4.16'da deneyin tamamlanmasının ardından çekilmiş olan fotoğraflar mevcuttur. Deney boyunca yükleme adımları boyunca kopan tırnaklar göçme şeklini de belirlemiştir. Kolon kiriş birleşim plakasında bulunan tırnakların kopmasının haricinde herhangi bir yapısal hasar görülmemiştir.



Şekil 4.16: 07K_DD50x170 numunesinin deney fotoğrafları.

4.1.8. DeneY Sonuçlarının Sönümlenen Enerji Açısından İncelenmesi

Deneyde her numunenin sönümlendiği toplam enerji Tablo 4.3 ve Tablo 4.4'te gösterilmiştir.

Tablo 4.3: Deneyde sağ kirişte sönümlenen enerji.

Numune Adı	1.Yükleme Adımı (kNmrad)	2.Yükleme Adımı (kNmrad)	3.Yükleme Adımı (kNmrad)	4.Yükleme Adımı (kNmrad)	5.Yükleme Adımı (kNmrad)
01K_DD50x75	0.0583	0.2506	0.4733	0.4595	-
02K_40x100	0.1027	0.2533	0.6863	1.0528	0.9574
03K_DD50x130	0.0939	0.3130	0.7323	1.0312	1.1816
04K_40x80	0.0470	0.2927	0.6621	0.5261	0.5065
05K_DD50x105	0.0628	0.2804	0.7114	0.8860	0.9047
06K_50x150	0.1708	0.4167	0.9243	0.6593	-
07K_DD50x170	0.1154	0.2368	0.6236	-	-

Tablo 4.4: Deneyde sol kirişte sönümlenen enerji.

Numune Adı	1.Yükleme Adımı (kNmrad)	2.Yükleme Adımı (kNmrad)	3.Yükleme Adımı (kNmrad)	4.Yükleme Adımı (kNmrad)	5.Yükleme Adımı (kNmrad)
01K_DD50x75	0.0571	0.3131	0.7112	0.7765	-
02K_40x100	0.1080	0.5422	1.0555	0.8542	0.9017
03K_DD50x130	0.1359	0.5651	1.1960	1.4657	1.6332
04K_40x80	0.0569	0.3878	0.6105	0.5936	0.9116
05K_DD50x105	0.0785	0.3640	0.7958	0.8600	1.0153
06K_50x150	0.1550	0.4286	0.8236	0.4921	-
07K_DD50x170	0.1254	0.5635	0.9079	0.4667	-

Numunelerden elde edilen sönümlenen enerji değerlerinin toplanmasıyla her kirişin sönümlendiği toplam enerji ve deneyde sönümlenen enerji toplam değerleri elde edilmiştir.

Tablo 4.5: Deneyde sönümlenen toplam enerji.

Numune Adı	Sağ Kirişte Sönümlenen Enerji (kNmrad)	Sol Kirişte Sönümlenen Enerji (kNmrad)	Toplam Sönümlenen Enerji (kNmrad)
01K_DD50x75	1.2420	1.8579	3.099
02K_40x100	3.0529	3.4617	6.5141
03K_DD50x130	3.3520	4.9960	8.3480
04K_40x80	2.0344	2.5605	4.5949
05K_DD50x105	2.8454	3.1137	5.9591
06K_50x150	2.1712	1.8994	4.0706
07K_DD50x170	0.9759	2.0636	3.0395

Tablo 4.5'te deneyde sönümlenmiş olan toplam enerji değerleri görülmektedir. Deneysel sırasındaki kiriş kesitleri incelendiğinde iki tip göçme şekli gözlemlenmiştir. Bunlar kiriş ile kiriş uç plakasını birbirine bağlayan kaynağın ayrılması ve tırnakların kopmasıdır. İki tip göçme şekli de kirişlere etki ettirilen deplasmanın sonucu oluşan dönme ve moment değerlerinden meydana gelmektedir. Tablo 4.6'da her bir kiriş numunesinin maruz kaldığı maksimum moment değerleri sıralanmıştır.

Tablo 4.6: Numuneler için moment değerleri.

Numune Adı	Sol Kiriş		Sağ Kiriş	
	Negatif Moment (kNm)	Pozitif Moment (kNm)	Negatif Moment (kNm)	Pozitif Moment (kNm)
01K_DD50x75	2.253	2.7654	1.2852	3.0498
02K_40x100	4.2588	4.3338	3.5772	4.818
03K_DD50x130	5.094	5.308	4.6374	3.2088
04K_40x80	2.4456	2.6814	2.5602	2.6208
05K_DD105x50	3.1572	3.5076	2.982	3.165
06K_50x150	5.7318	5.0592	6.6564	5.6484
07K_DD50x170	4.7934	5.6250	4.4448	5.5944

Tablo 4.6'da sunulan moment değerleri, Tablo 3.1'de RMI-2012 yönetmeliğinde belirtilmiş olan yükleme prosedürüne göre etki ettirilmiş olan 5 adet yükleme döngüsünden elde edilen deplasman değerleri ile hesaplanan moment değerlerinin maksimum pozitif ve minimum negatif değerlerinin seçilmesiyle oluşturulmuştur. Tabloda yer alan veriler, kiriş numuneleri göçmeden önceki son yükleme adımlarında elde edilen maksimum pozitif ve minimum negatif moment değerleridir. Moment değerlerinin belirlenmesindeki en önemli kavram çevrim sıkışmasıdır. Çevrim sıkışması olgusunu etkileyen parametre ise kolon kiriş birleşim bölgesindeki tırnakların artan deplasman yüklemesi sonucunda kolon yuvasıyla olan temas yüzeyini kaybetmesinden kaynaklanmaktadır. Çevrim sıkışması gibi fiziksel bir olguda kaybedilen temas yüzeyi ile yükleme rijitliğinde düşüş meydana gelmektedir (Galeotti, ve diğ., 2021). Bunun sonucu olarak, ardışık yükleme adımları sırasında kiriş numunelerinin göstereceği dayanım düşmekte ve sönümleyeceği enerji azalmaktadır. Örnek olarak Şekil 4.7 incelendiğinde, 03K_DD50x130 numunesinin moment dönme grafiklerinin yükleme boşaltma eğrisinde ilk yükleme adımlarında dar histerezis davranış gözlemlenmiş, artan deplasman yüklemelerindeki maksimum moment değerlerine yaklaştıkça histerezis döngüsü genişlemiştir. Oysa Şekil 4.13'e bakıldığında hem sağ hem de sol kiriş numunesi için ilk yükleme adımından

İtibaren oluşan gevrek kırılmalar sonucunda da azalan yükleme rijitliğiyle yükleme boşaltma sırasında dayanımın düşmesi sebebiyle çevrim sıkışması bölgesinin daraldığı gözlemlenmiştir.

Çevrim sıkışması bütün numunelerde gözlemlenmiş olup kiriş derinliğinin 150 mm ve üzeri olduğu kesitlere ait numunelerde daha dar olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak, kiriş kesit derinliğinin 150 mm altında olduğu numunelerinde kirişlerin kaynaklarından yırtılması dolayısıyla gevrek davranış sergilemesi gösterilebilir.

4.2. OPENSEES BİRLEŞİM MODELİNE AİT SONUÇLAR

OpenSees sonlu elemanlar yazılımı içerisinde hazırlanmış olan kolon kiriş birleşim modelleri Bölüm 3.2.1’de açıklandığı gibi deney koşullarına benzer şekilde sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller deneyde her bir kirişten elde edilen deplasman değerleriyle yüklenmiştir. Modelleme sırasında histeretik döngünün tanımlanması için maksimum üç pozitif üç negatif moment dönme noktası girilmesi gerekmektedir. Bunun için iskelet eğrisi üzerinden değişimin belirgin olduğu noktalar dikkate alınmıştır.

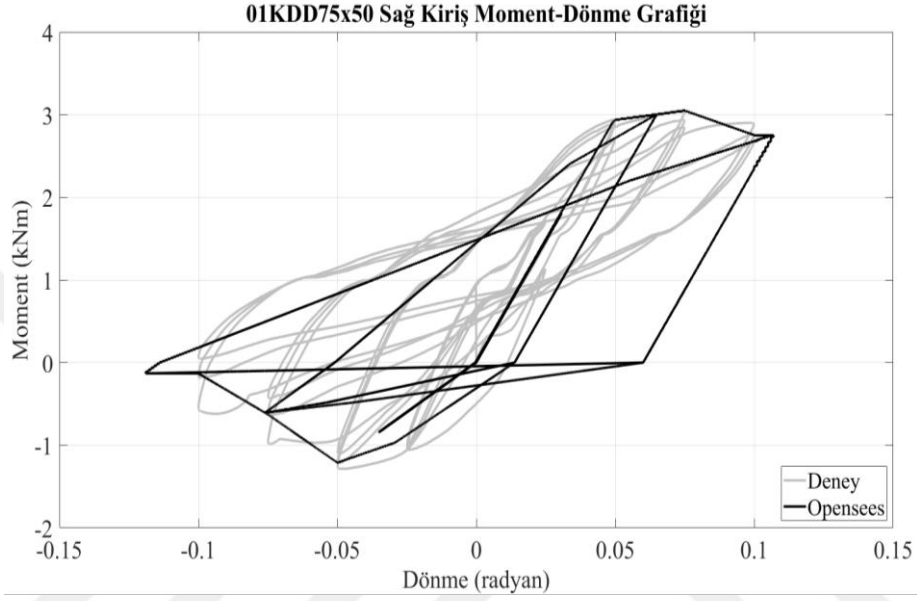
4.2.1. 01K_DD50x75 Numunesinin OpenSees Sonuçları

Deneyden elde edilen moment ve dönme değerleri kullanılarak oluşturulan iskelet eğrisine ait noktalar Tablo 4.7’deki gibidir.

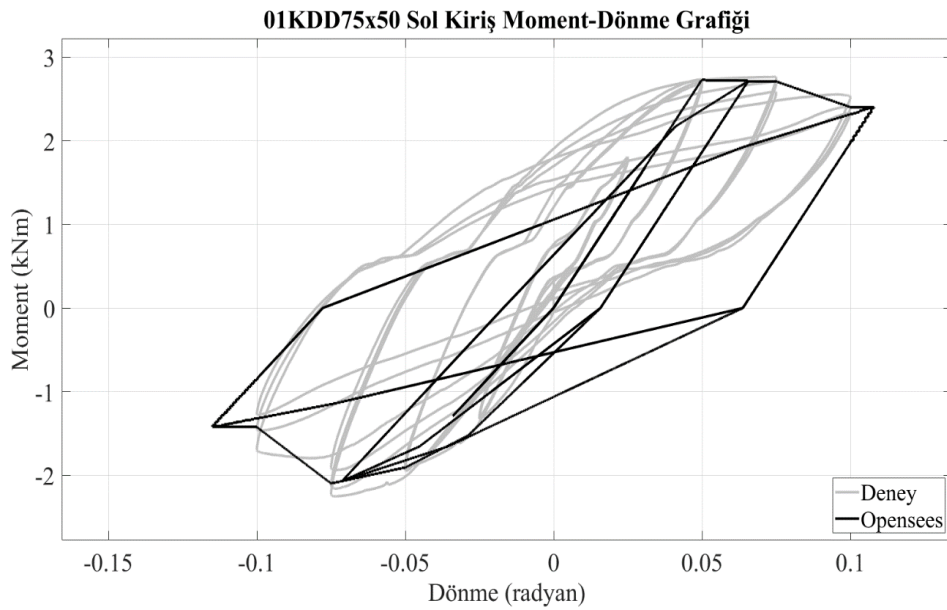
Tablo 4.7: 01K_DD50x75 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.1	2.7528	2.4024
0.075	3.0486	2.7084
0.05	2.9370	2.7258
-0.05	-1.2108	-1.9056
-0.075	-0.6276	-2.0970
-0.1	-0.1314	-1.4238

Tanımlanan bu moment dönme değerlerinden oluşturulan sonlu elemanlar modelinin kolon kiriş birleşim bölgesine ait moment dönme grafikleri Şekil 4.18 ve Şekil 4.17'deki gibidir. Grafiklere bakıldığında hem sağ hem sol kirişin üçüncü yükleme adımına kadar analiz edildiği görülmektedir. İlgili deneyi temsil eden sonlu elemanlar modeli moment ve dönme değerleri açısından deney ile uyum sağlamış, ancak çevrim sıkışması açısından deney ile yeteri kadar uyum gösterememiştir.



Şekil 4.18: 01K_DD50x75 sağ kiriş OpenSees grafikleri.



Şekil 4.17: 01K_DD50x75 sol kiriş OpenSees grafikleri.

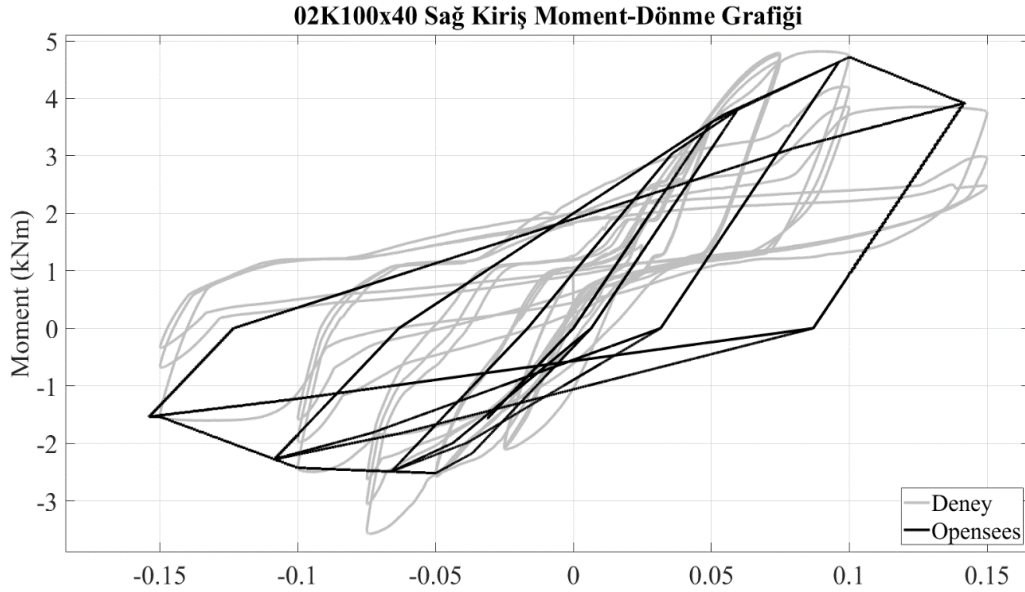
4.2.2. 02K_40x100 Numunesinin OpenSees Sonuçları

İlgili deney numunesine ait üç adet pozitif ve üç adet negatif moment ve dönme değerinden oluşturulan iskelet eğrisine ait veriler Tablo 4.8’de görülmektedir.

Tablo 4.8: 02K_40x100 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

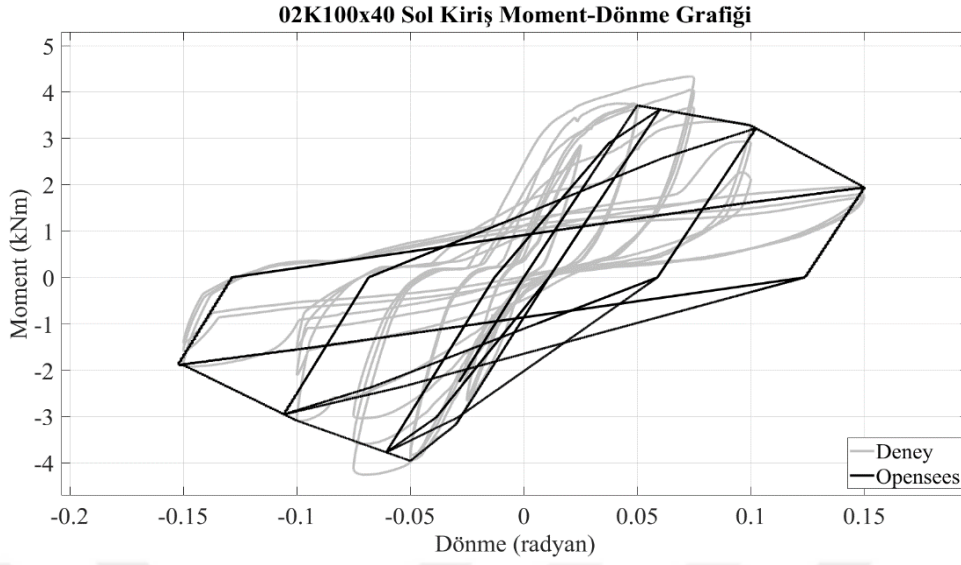
Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	3.7530	1.9410
0.1	4.7172	3.2766
0.05	3.5844	3.7092
-0.05	-2.5218	-3.9588
-0.1	-2.4294	-3.0906
-0.15	-1.5384	-1.8918

Tanımlanan bu moment dönme değerlerinden oluşturulan sonlu elemanlar modelinin kolon kiriş birleşim bölgesine ait moment dönme grafikler Şekil 4.19 ve Şekil 4.20’deki gibidir.



Şekil 4.19: 02K_40x100 sağ kiriş OpenSees grafikleri.

Grafikler incelendiğinde hem sağ hem sol kirişin dördüncü yükleme adımına kadar moment ve dönme değerlerini deney ile uyumlu olacak şekilde temsil ettiği görülmektedir. İlk üç yükleme adımının yükleme boşaltma eğrisi için gereken moment değerleri 0.025, 0.05 ve 0.075 radyan dönme değerlerine karşılık gelen değerlerdir. Seçilen 0.05 ve 0.1 dönme değerleri ve bunlara karşılık gelen moment değerlerinden oluşan iskelet eğrisi deney eğrisiyle örtüşmekte olup çevrim sıkışması etkilerinin daha kolay bir şekilde gözlemlendiği dördüncü ve beşinci yükleme adımında OpenSees modeli çevrim sıkışmasını deneyde oluşan çevrim sıkışmasına belirli ölçüde yakındır.



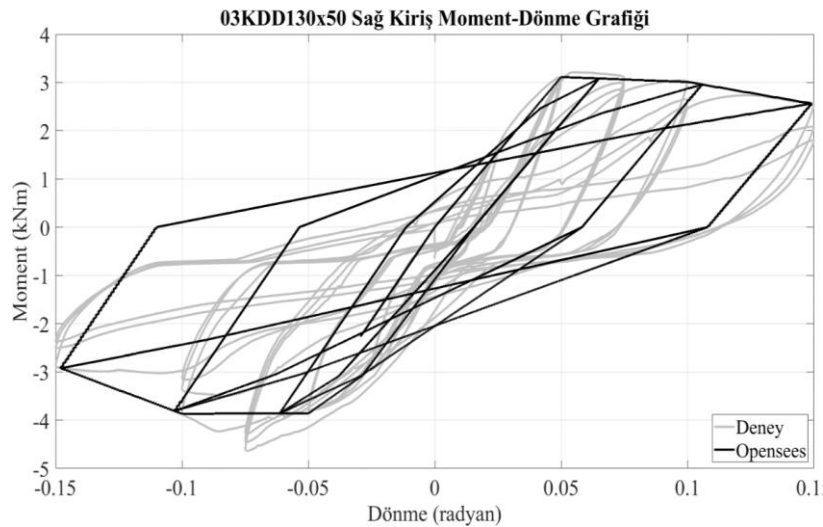
Şekil 4.20: 02K_40x100 sol kiriş OpenSees grafikleri.

4.2.3. 03K_DD50x130 Numunesinin OpenSees Sonuçları

İskelet eğrisini oluşturan veriler 'da verilmiştir. Birleşim bölgesine ait moment dönme grafikleri Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'teki gibidir.

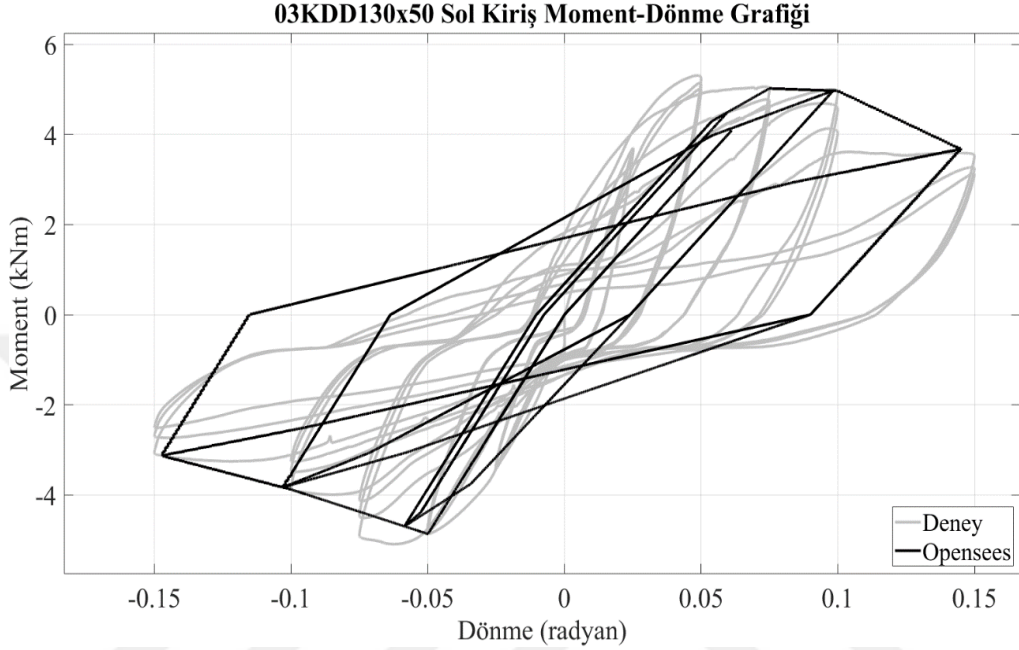
Tablo 4.9: 03K_DD50x130 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	2.5530	3.5290
0.1	3.0096	4.9640
0.05	3.1122	5.3010
-0.05	-3.8592	-4.8642
-0.1	-3.8670	-3.8784
-0.15	-2.8860	-3.0882



Şekil 4.21: 03K_DD50x130 sağ kiriş OpenSees grafikleri.

Sonlu elemanlar analizi sonuçlarından elde edilen moment ve dönme değerleri incelendiğinde beşinci yükleme adımı için analiz sonuçlarının deney sonuçları ile uyum gösterdiği görülmektedir.



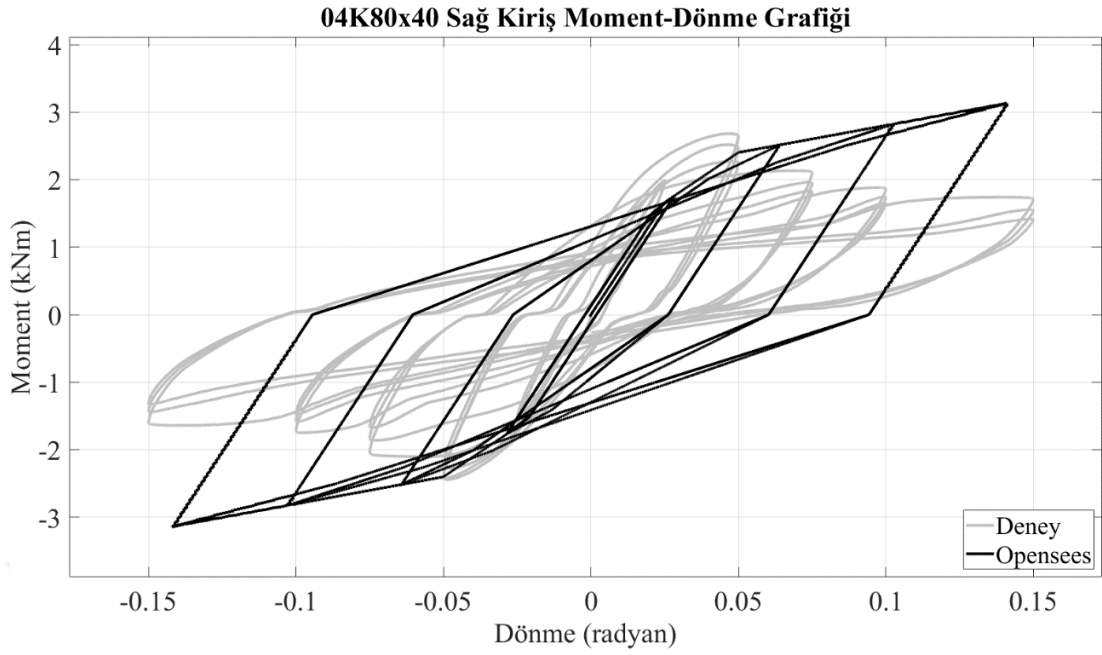
Şekil 4.22: 03K_DD50x130 sol kiriş OpenSees grafikleri.

4.2.4. 04K_40x80 Numunesinin OpenSees Sonuçları

Deneyden elde edilen üç adet pozitif ve üç adet negatif moment dönme değerinden oluşturulan iskelet eğrisine ait veriler Tablo 4.10'da görülmektedir.

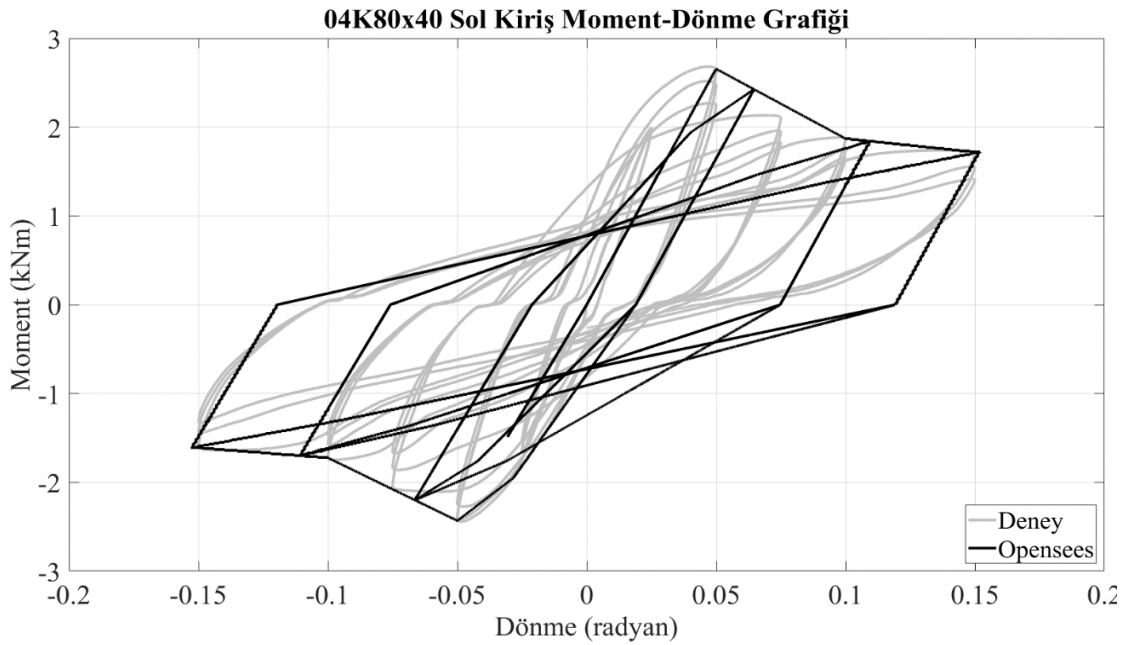
Tablo 4.10: 04K_40x80 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	0.9210	1.7178
0.1	1.9344	1.8702
0.05	2.4018	2.6550
-0.05	-2.5554	-2.4330
-0.1	-1.7616	-1.7250
-0.15	-0.9456	-1.6116



Şekil 4.23: 04K_40x80 sağ kiriş OpenSees grafikleri.

Sağ kirişe ait moment dönme grafiği (Şekil 4.23) incelendiğinde, ilk döngüden itibaren gözlemlenen kiriş uç konektörünün kiriş kaynak bölgesindeki kopmalar, histerezis döngüsündeki genişliğin düşmesine neden olmuş, bu değişim sonlu elemanlar modelinin sonuçlarında deneye kıyasla farklar oluşturmuştur.



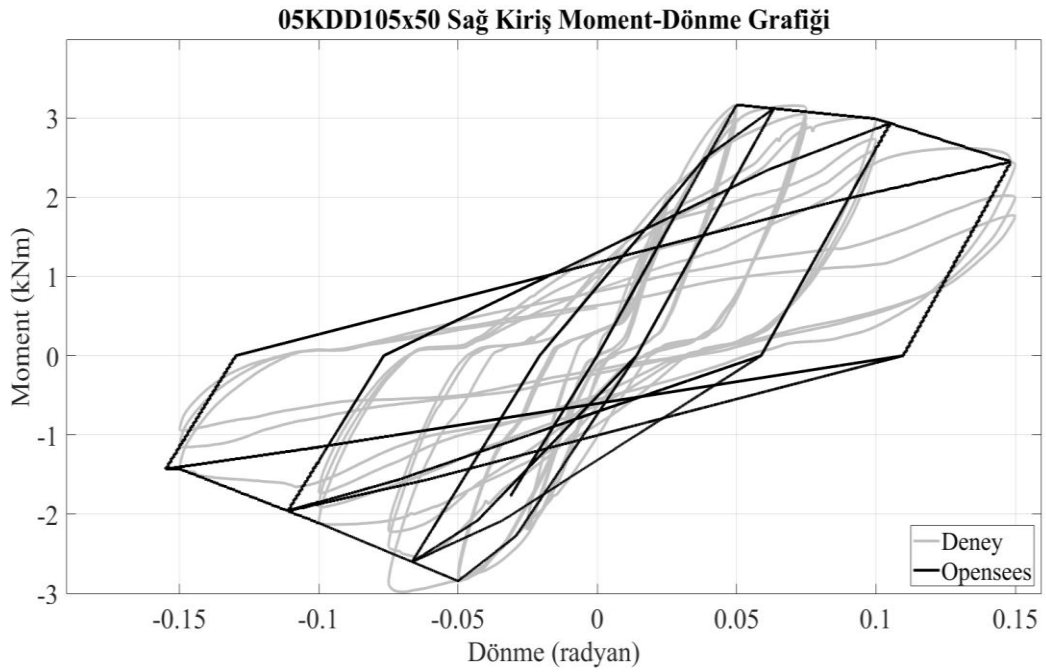
Şekil 4.24: 04K_40x80 sol kiriş OpenSees grafikleri.

4.2.5. 05K_DD50x105 Numunesinin OpenSees Sonuçları

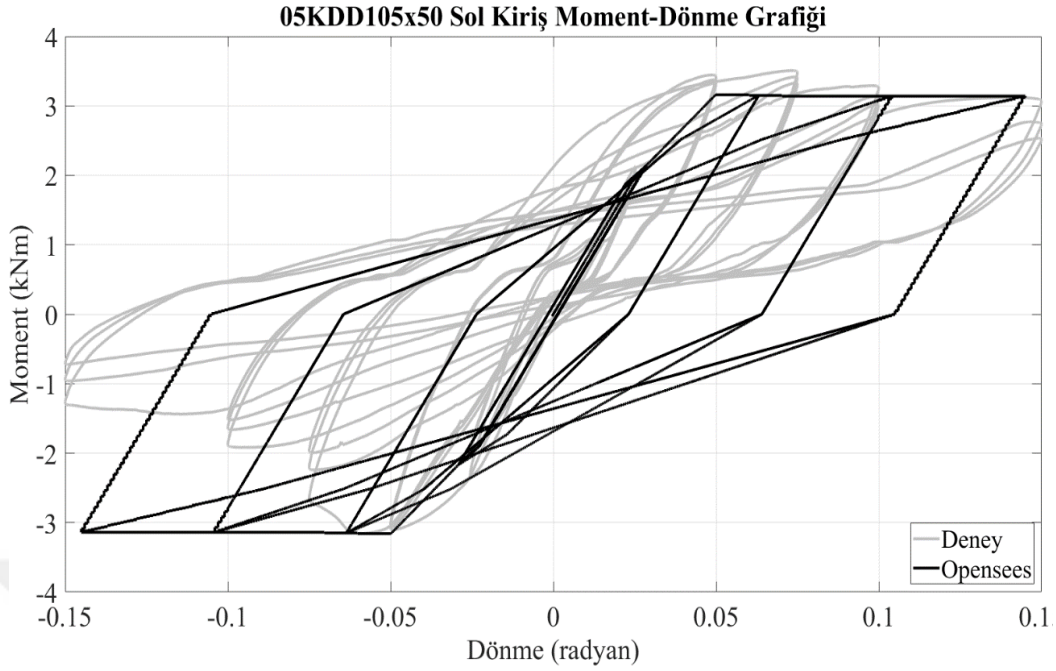
Deneyden elde edilen moment dönme değerlerinden oluşturulan iskelet eğrisindeki noktalar Tablo 4.11'deki gibidir. Birleşim bölgesinin moment dönme grafikleri Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'daki gibidir.

Tablo 4.11: 05K_DD50x105 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	2.4288	3.0732
0.1	2.9880	3.2760
0.05	3.1650	3.4140
-0.05	-2.8434	-3.1032
-0.1	-2.1120	-1.8768
-0.15	-1.4280	-1.2912



Şekil 4.25: 05K_DD50x105 sağ kiriş OpenSees grafikleri.



Şekil 4.26: 05K_DD50x105 sol kiriş OpenSees grafikleri.

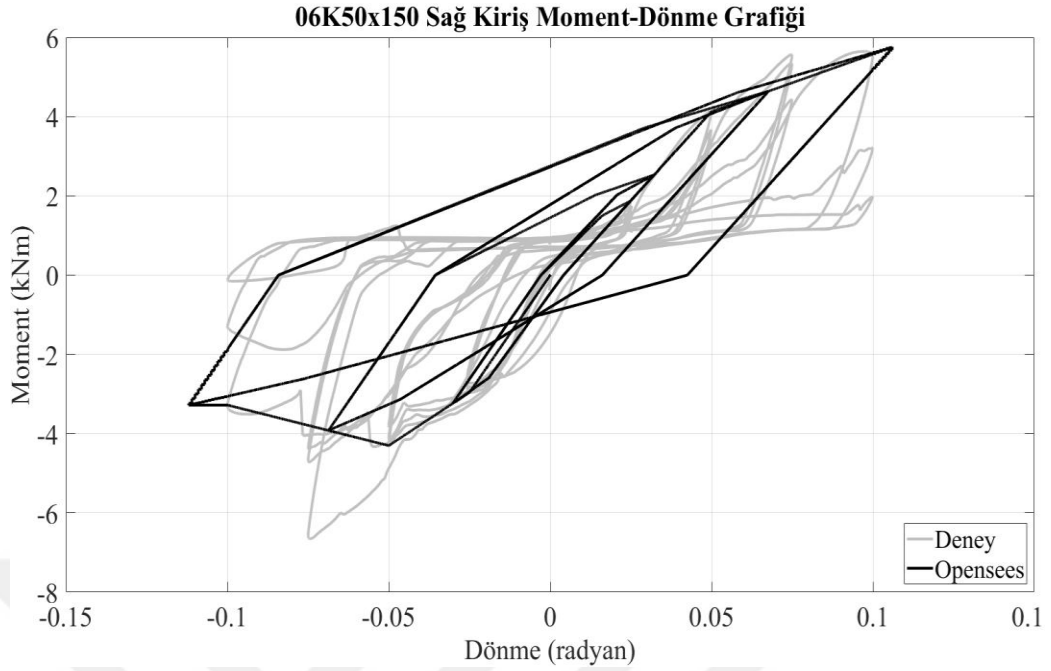
Oluşturulan moment dönme grafikleri incelendiğinde sol kirişteki -0.15 radyana karşılık gelen moment değerinin iskelet eğrisinde tanımlanmasına rağmen OpenSees modelinden elde edilen dönme değerlerinin deney verilerinden elde edilen dönme değerlerine ulaşamadığı gözlemlenmiştir.

4.2.6. 06K_50x150 Numunesinin OpenSees Sonuçları

İskelet eğrisini oluşturan veriler Tablo 4.12’de verilmiştir. Birleşim bölgesinin moment dönme grafikleri Şekil 4.27 ve Şekil 4.28’deki gibidir.

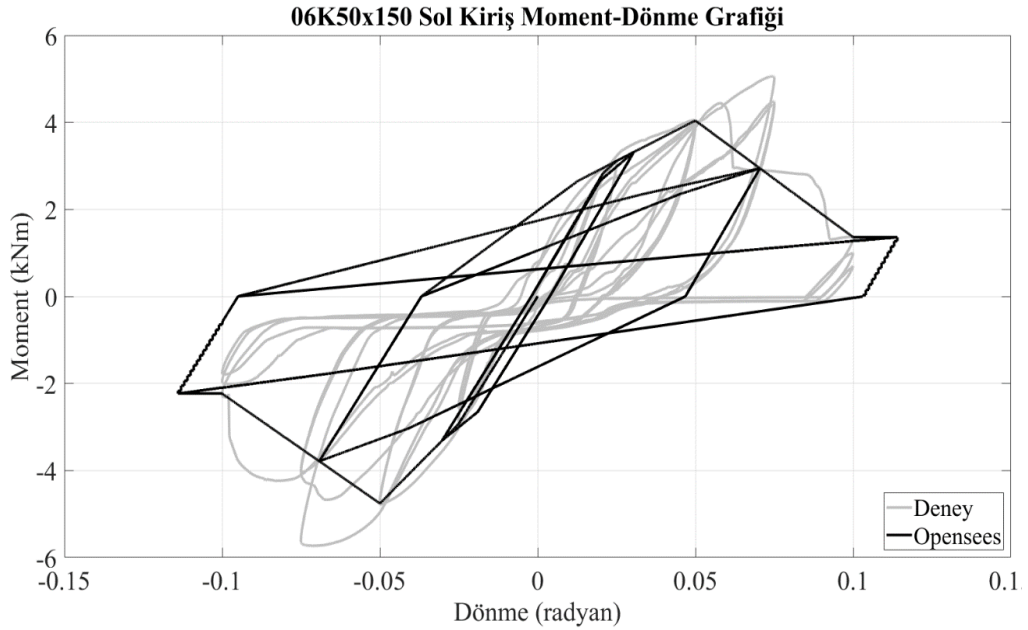
Tablo 4.12: 06K_50x150 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.1	3.0732	1.3608
0.05	3.4890	4.0410
0.025	3.4140	3.1134
-0.025	2.1054	-2.9244
-0.05	-2.3106	-4.7580
-0.1	-2.6928	-2.2338



Şekil 4.27: 06K_50x150 sağ kiriş OpenSees grafikleri.

Analiz sonrasında elde edilen verilerden oluşturulan grafikler incelenmiştir. OpenSees verileri ile deney verileri ile elde edilen histeresis üstünde gözlemlenen çevrim sıkışması farkı en rahat bu numunede gözlemlenmiştir. Deney numunesi incelendiğinde, ilk yükleme adımından itibaren oluşan tırnak kırılmaları sebebiyle daha dar histeretik döngü oluştuğu gözlemlenmiştir. OpenSees modelinde ise çevrim sıkışması etkileri deneye uygun şekilde temsil edilemediğinden birleşim bölgesi deney sonucuna göre daha fazla enerji sönmlemiştir.



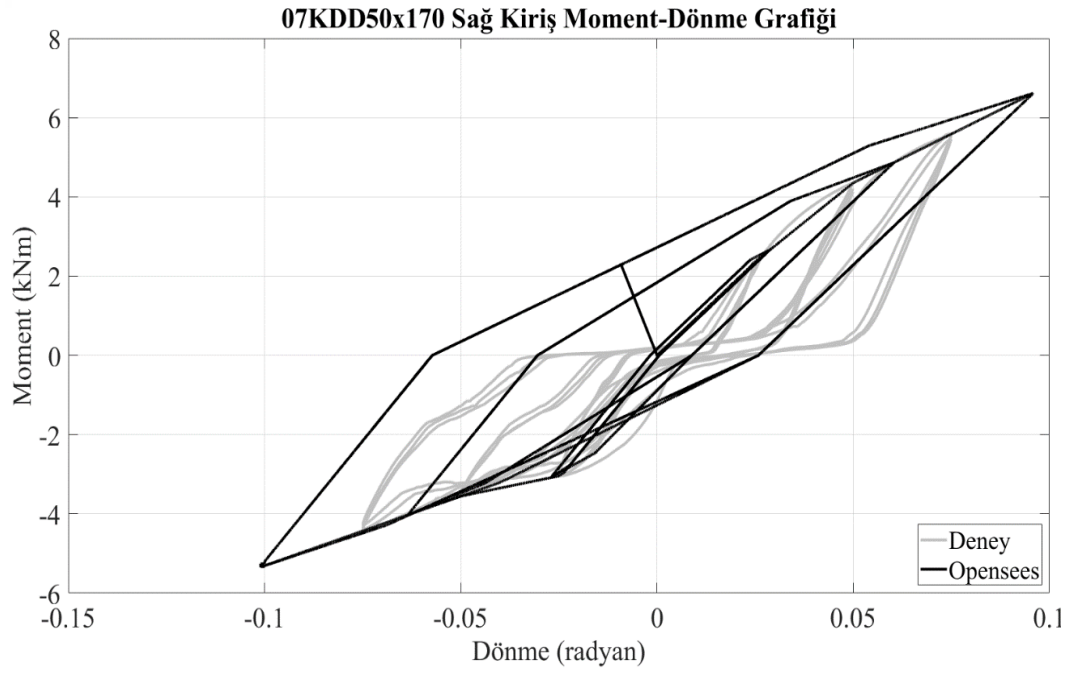
Şekil 4.28: 06K_50x150 sol kiriş OpenSees grafikleri.

4.2.7. 07K_DD50x170 Numunesinin OpenSees Sonuçları

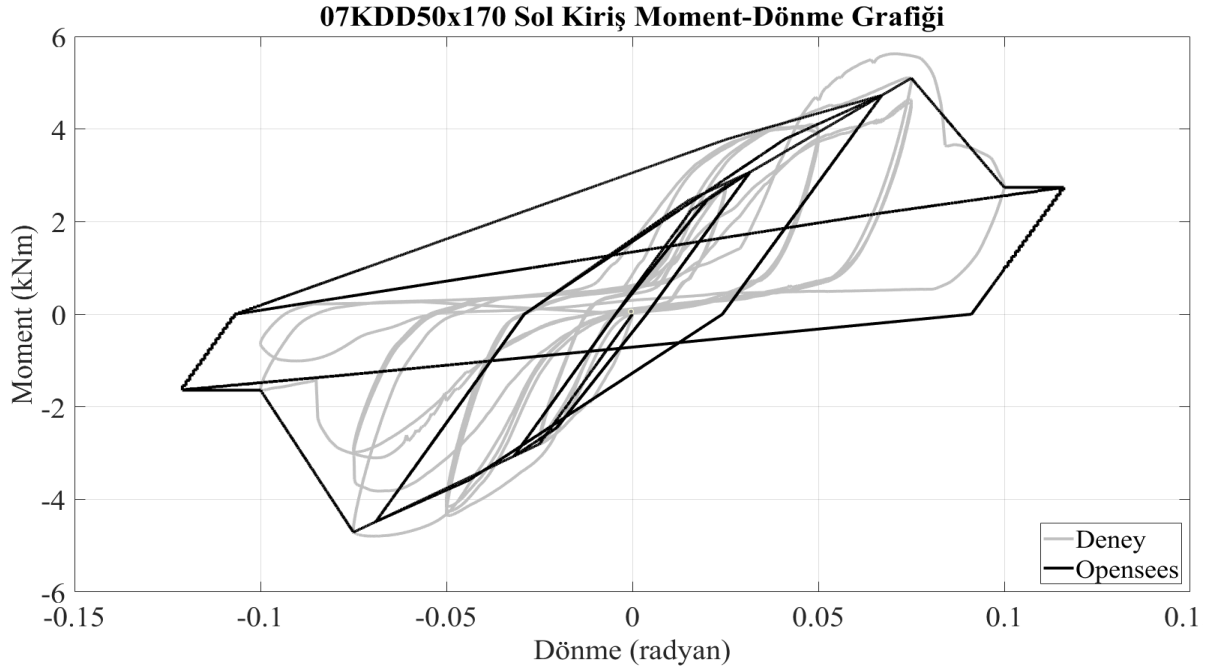
İskelet eğrisini oluşturan veriler Tablo 4.13'te verilmiştir. Birleşim bölgesinin moment ve dönme grafikleri Şekil 4.29 ve Şekil 4.30'de sunulmuştur.

Tablo 4.13: 07K_DD50x170 numunesinin OpenSees iskelet eğri değerleri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.075	5.5848	5.0988
0.05	4.3524	4.0056
0.025	2.3610	2.7582
-0.025	-3.0444	-2.8050
-0.05	-3.5526	-4.3518
-0.075	-4.4298	-4.7094



Şekil 4.29: 07K_DD50x170 sağ kiriş OpenSees grafikleri.



Şekil 4.30: 07K_DD50x170 sol kiriş OpenSees grafikleri.

Kirişin kesit alanının artmasıyla birlikte çevrim sıkışması etkileri ve sönmölenen enerjiler açısından deney ve model arasındaki fark belirgin olmaktadır. Bunun sebebi, deneyde kirişlerin yükleme boşaltma eğrisinde her döngünün uç moment dönme değerine ulaşana kadar yükleme rijitliğinin düşük olmasıdır. Ayrıca, OpenSees modelinde kullanılan kinematik modelde tırnak kopmasına bağlı etkiler temsil edilemediğinden histerezis döngüsü daha geniş olup sünek davranış sergilemesidir.

4.2.8. OpenSees Sonuçlarının Sönmölenen Enerji Açısından İncelenmesi

Tez kapsamında RMI-2012 yönetmeliğine göre gerçekleştirilen kolon kiriş bölgesi çevrimsel yükleme deneyleri OpenSees programı aracılığıyla simüle edilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde elde edilen moment dönme grafiklerinin altında kalan alanlardan birleşim bölgesinde sönmölenen enerji hesaplanmıştır. Benzer şekilde, OpenSees sonlu elemanlar modellerinin her birinin analiz sonuçlarından elde edilen moment dönme değerleri ile sönmölenen enerjiler hesaplanmıştır. Tablo 4.14'de belirlenen numunelerin yarı-rijit davranan tırnaklı birleşim bölgelerinde sönmölenen enerji OpenSees sonlu elemanlar modeli ve deneyler ile kıyaslanmıştır.

Tablo 4.14: Deneysel ve OpenSees sönümlenen enerji.

Numune Adı	Kiriş Tarafı	Deneysel Sönümlenen Enerji (kNmrad)	OpenSees'de Sönümlenen Enerji (kNmrad)
01K_DD50x75	Sağ	1.2420	1.1958
01K_DD50x75	Sol	1.8579	1.2636
02K_40x100	Sağ	3.0529	3.8485
02K_40x100	Sol	3.4617	3.7043
03K_DD50x130	Sağ	3.3520	3.8800
03K_DD50x130	Sol	4.9960	3.9461
04K_40x80	Sağ	2.0344	3.7784
04K_40x80	Sol	2.5605	2.8086
05K_DD50x105	Sağ	2.8454	3.0530
05K_DD50x105	Sol	3.1137	4.3271
06K_50x150	Sağ	2.1712	2.8006
06K_50x150	Sol	1.8994	2.4059
07K_DD50x170	Sağ	0.9759	1.8825
07K_DD50x170	Sol	2.0636	2.4171

Elde edilen deneysel verileri ile OpenSees analizi sonucunda elde edilen verilerden hesaplanan sönümlenen enerji değerleri arasındaki sapma miktarı Tablo 4.15'de görülmektedir. Deneysel sünek davranışın görüldüğü numuneler (01K_DD50x75, 02K_40x100, 03K_DD50x130, 04K_40x80, 05K_DD50x105) ile ilgili numunelerin nümerik modellerinden hesaplanan sönüm enerjisinin daha tutarlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Gevrek davranışın görüldüğü numunelerde (06K_50x150, 07K_DD50x170) ise sönümlenen enerjide sapma miktarı fazla olmaktadır. Sünek davranışın sapma miktarının az olmasının sebebi yazılımda bulunan iki boyutlu birleşim elemanının tanımı sırasında kullanılan kinematik modelin çevrim sıkışması etkisini yansıtmamasından kaynaklanan histeretik döngünün orijin bölgesine yakın koordinatlarda daha geniş olmasıdır. Gevrek davranışın olduğu numuneler incelendiğinde ise; nümerik modelin yükleme boşaltma eğrisindeki rijitlik kaybını kinematik modelde simüle edememesinden kaynaklı olarak sönümlenen enerjide deneysel ile nümerik modeldeki sapma miktarının arttığı görülmüştür. Örneğin, 07K_DD50x170 deneyinde meydana gelen enerji sönümünün nümerik modelde hesaplanana göre sapma miktarı yüksektir. Bu durum deneysel elde edilen deplasman verilerinin sağ ve sol giriş numunelerinde farklılık göstermesinden kaynaklanmaktadır. Sağ girişin birleşim bölgesindeki tırnaklar çevrimsel yükleme etkisinde üçüncü yükleme adımına kadar dayanmış, ardından tırnakların gevrek kırılması ile birlikte dayanımını kaybetmiştir. Sol giriş numunesinde ise aynı göçme şekli dördüncü yükleme

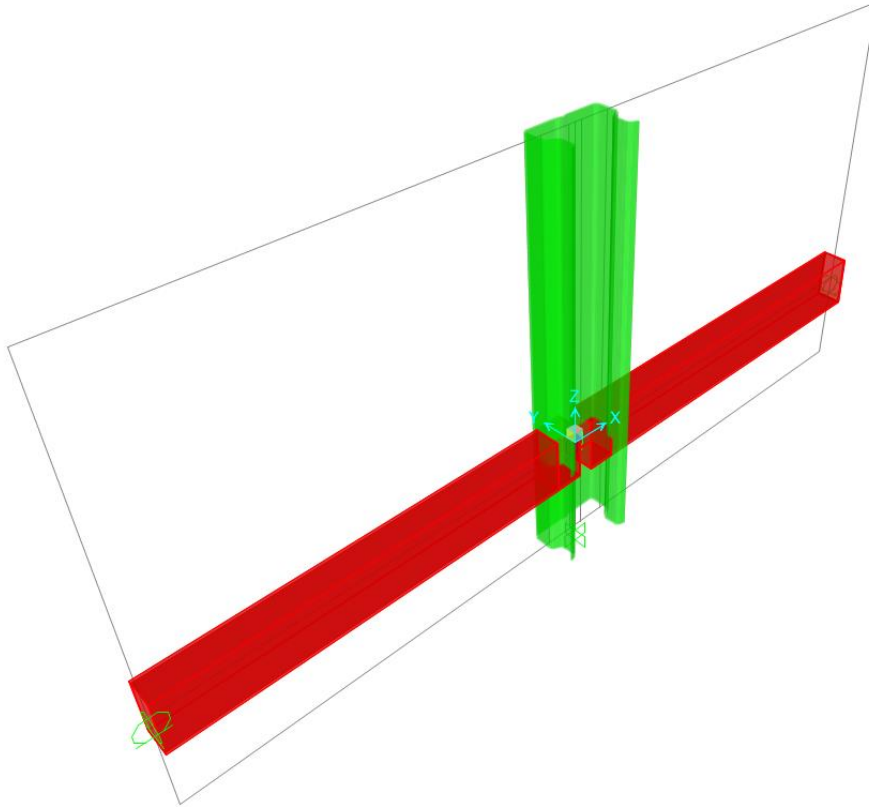
adımında gerçekleşmiş ve dayanımını kaybetmiştir. Nümerik modelde çevrimsel yüklemenin tanımlanması sırasında tersinir yükleme koşulu birleşim bölgesinde tek bir yükleme prosedürüne bağlı kalınarak gerçekleştirilebildiğinden, nümerik modeldeki deneyin dördüncü yükleme adımına göre uygulanmıştır.

Tablo 4.15: OpenSees modeli ile deney arasındaki sönmölenen enerji sapma miktarı.

Numune Adı	Deneyde Sönmölenen Toplam Enerji (kNmrad)	OpenSees'de Sönmölenen Toplam Enerji (kNmrad)	Sapma Yüzdesi (%)
01K_DD50x75	3.100	2.459	20.677
02K_40x100	6.515	7.553	15.932
03K_DD50x130	8.348	7.826	6.252
04K_40x80	4.595	6.587	43.351
05K_DD50x105	5.959	7.380	23.846
06K_50x150	4.071	5.207	27.904
07K_DD50x170	2.064	4.300	108.333

4.3. SAP2000 BİRLEŞİM MODELİNE AİT BULGULAR

Bölüm 3.2.2'de anlatıldığı üzere, deney numunelerinden elde edilen moment dönme verileri kullanılarak SAP2000 (CSI, 2022) sonlu elemanlar programı aracılığıyla kolon giriş



Şekil 4.31: SAP2000 modeli.

birleşimi modellenmiştir (Şekil 4.31). Deneyde elde edilen moment ve dönme değerleri kullanılarak her model için ayrı ayrı iskelet eğrisi oluşturulmuştur. Deney sırasında her numuneye etki ettirilen çevrimsel deplasman zaman değerleri sonlu elemanlar modelinde kirişlere tersinir olarak etki ettirilerek deney simüle edilmiştir.

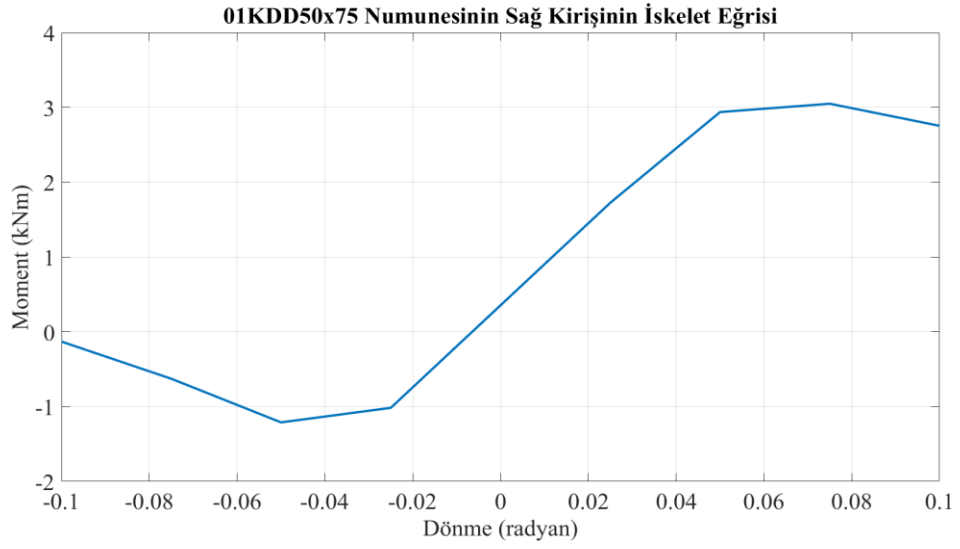
Tez kapsamında RMI-2012 yönetmeliğine göre gerçekleştirilen kolon kiriş bölgesi çevrimsel yükleme deneyleri SAP2000 sonlu elemanlar programında simüle edilmiştir. Kolon kiriş birleşim bölgesi çevrimsel yükleme davranışının incelendiği SAP2000 modelinde birleşim bölgesinin yarı-rijit davranışını temsil etmek amacıyla link elemanlar oluşturulmuştur. Yarı-rijit birleşimin çevrimsel yükleme deneyi altındaki histeretik davranışı deneylerden elde edilen moment dönme değerleri dikkate alınarak oluşturulan iskelet eğrileri ile tanımlanmıştır. Tanımlanan link elemanlar için kinematik model kullanılmıştır. Kinematik model fiziksel bir olgu olan çevrim sıkışması etkisini (pinching effect) yansıtamamaktadır. Çevrim sıkışması çevrimsel yükleme sırasında artan yer değiştirmeler sonucu birleşim bölgesinde meydana gelen tırnakların kopması ve/veya kiriş uç plakasının kaynak bölgesinden yırtılması sonucu rijitliğin giderek düşmesi sonucu oluşmaktadır. Sonlu elemanlar modelinde ise tırnak yapısı modellenememekte olup ayrıca kaynak bölgesi tanımlanamadığından link elemanın tanımlanmasından kullanılan kinematik model çevrim sıkışması davranışını yansıtamamaktadır.

4.3.1. 01K_DD50x75 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

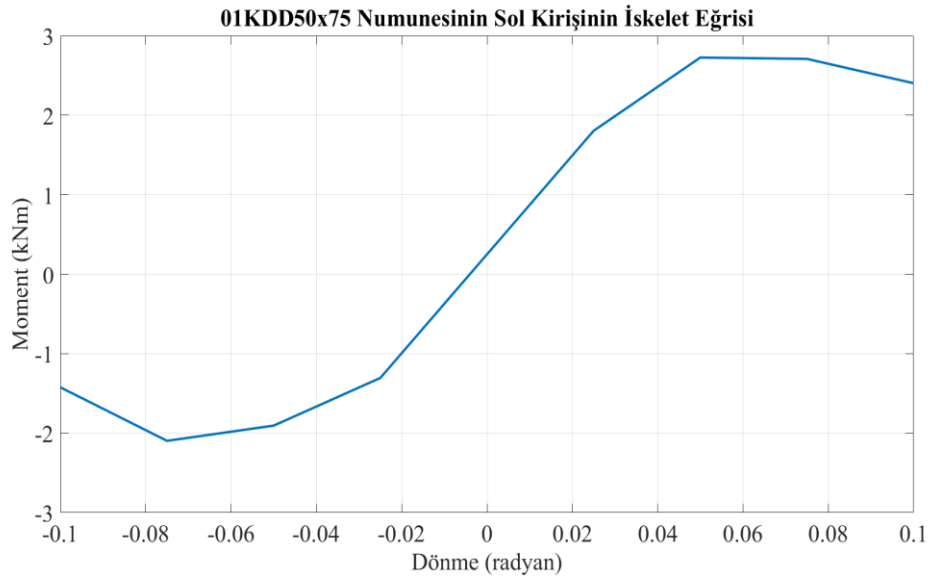
Deney verilerinden oluşturulmuş olan iskelet eğrisi Tablo 4.16'da görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler Şekil 4.32 ve Şekil 4.33'te görselleştirilmiştir.

Tablo 4.16: 01K_DD50x75 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.1	2.7528	2.4024
0.075	3.0486	2.7084
0.05	2.9370	2.7258
0.025	1.7250	1.8042
-0.025	-1.0164	-1.3056
-0.05	-1.2108	-1.9056
-0.075	-0.6276	-2.0970
-0.1	-0.1314	-1.4238

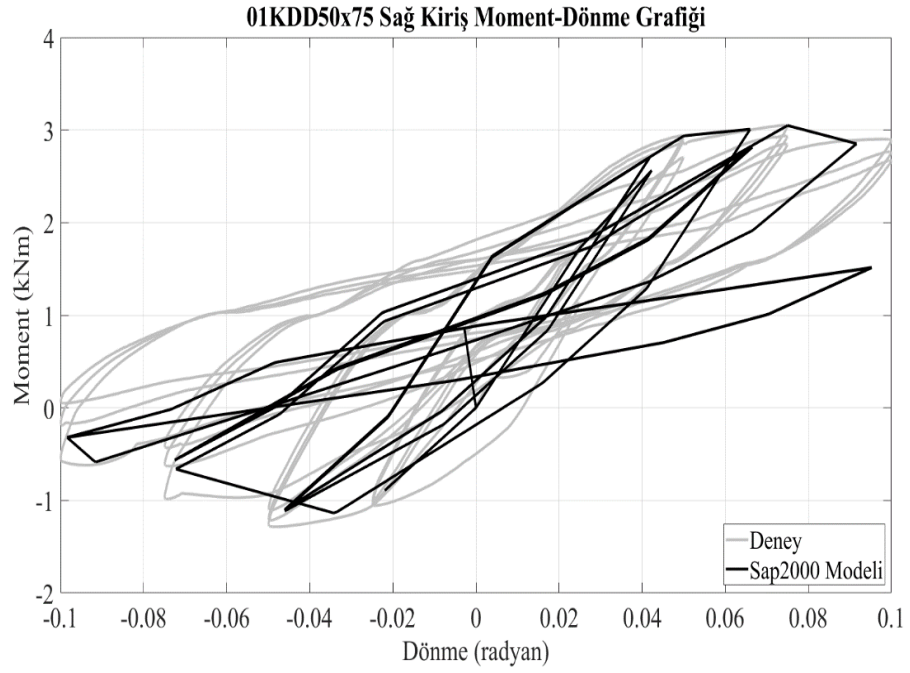


Şekil 4.32: 01K_DD50x75 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

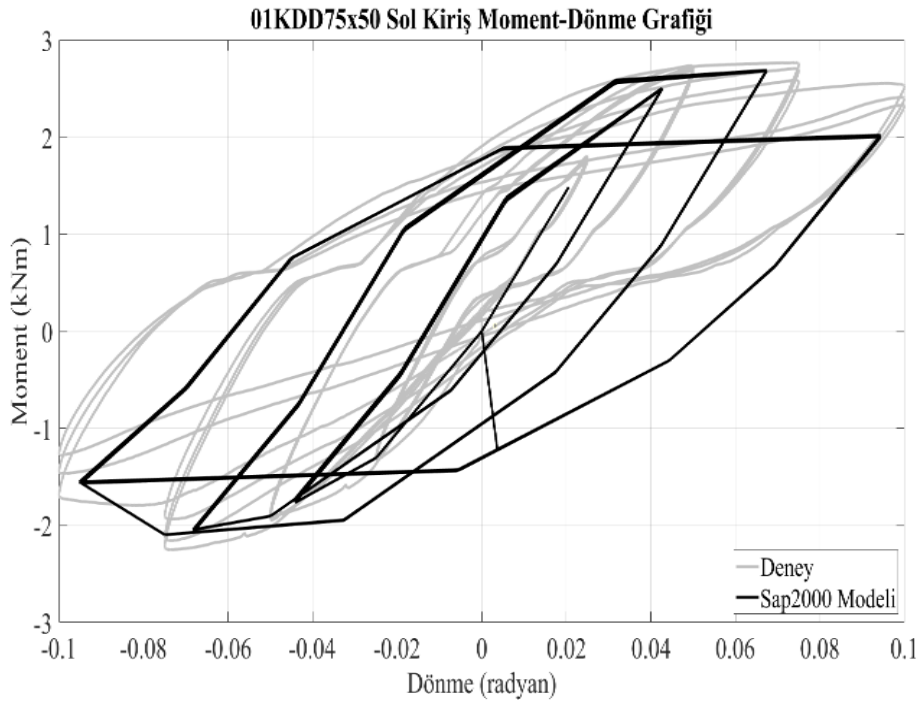


Şekil 4.33: 01K_DD50x75 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

Tablo 4.16’de sunulan moment dönme değerleri kiriş ucundaki link elemanlara atandıktan sonra analiz gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35’te gösterilmiştir.



Şekil 4.34: 01K_DD50x75 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



Şekil 4.35: 01K_DD50x75 sol kiriş SAP2000 grafiği.

Sağ ve sol kiriş için elde edilen grafikler incelendiğinde SAP2000 programında birleşim bölgesindeki davranışı temsil eden link eleman kinematik model ile tanımlandığı için çevrim sıkışması etkileri görülmemektedir. Diğer bir deyişle, deney sırasında kirişte meydana gelen

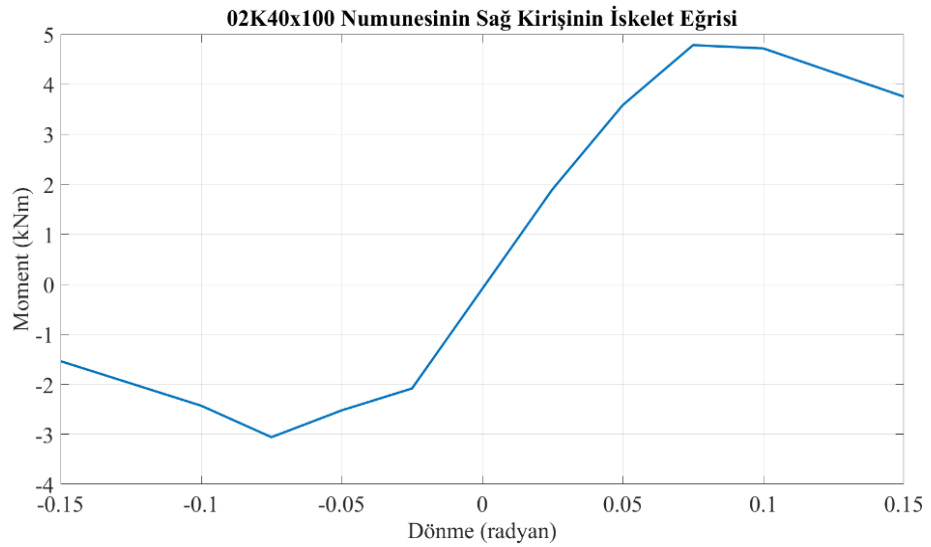
kiriş uç plakasının kaynaktan ayrılmasından kaynaklanan göçme mekanizması sebebiyle meydana gelen rijitlik kayıpları yansıtılmamıştır.

4.3.2. 02K_40x100 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

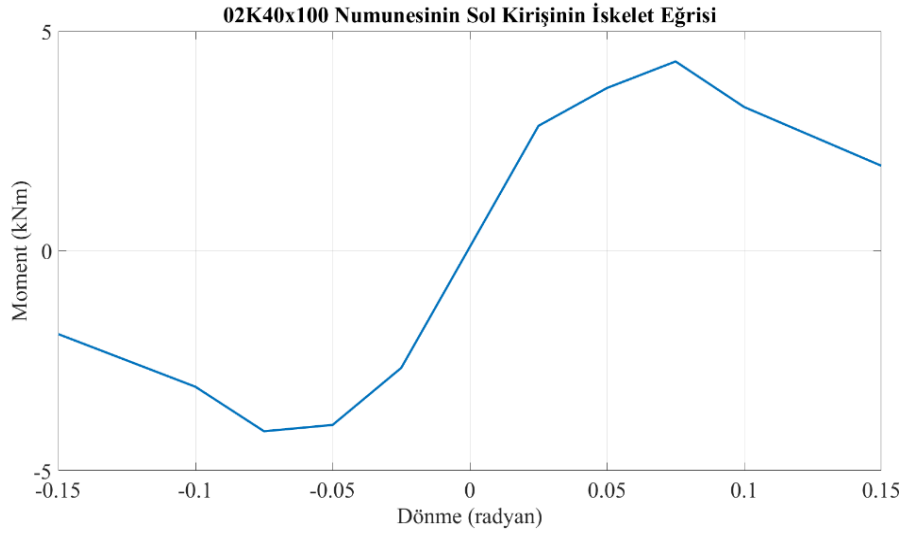
Deney verilerinden oluşturulmuş olan iskelet eğrisi Şekil 4.36 ve Şekil 4.37’de görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.17’de görülmektedir.

Tablo 4.17: 02K_40x100 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	3.7530	1.9410
0.1	4.7172	3.2766
0.075	4.7832	4.314
0.05	3.5844	3.7092
0.025	1.9008	2.8488
-0.025	-2.0844	-2.6604
-0.05	-2.5218	-3.9588
-0.075	-3.0588	-4.1034
-0.1	-2.4294	-3.0906
-0.15	-1.5384	-1.8918

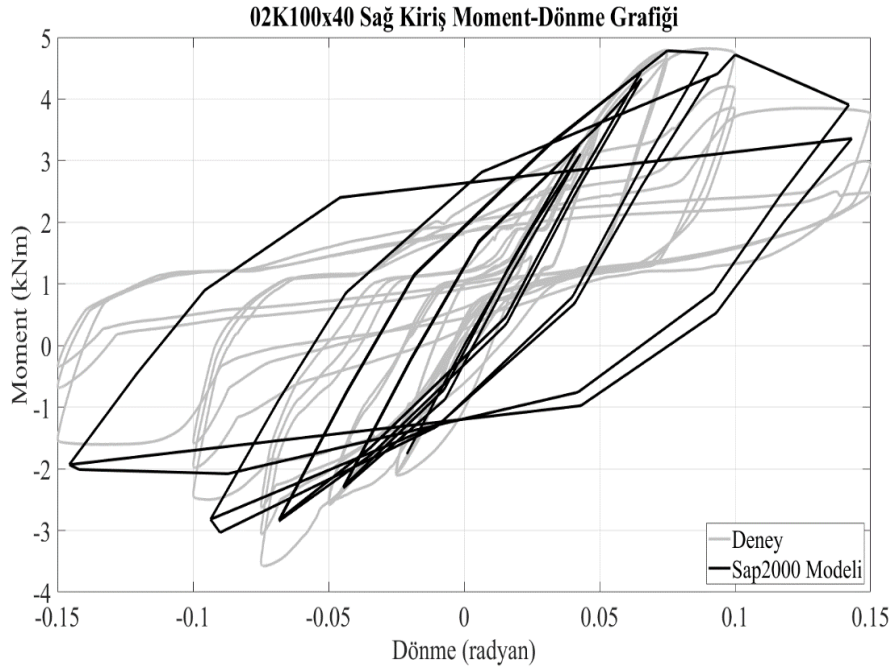


Şekil 4.36: 02K_40x100 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

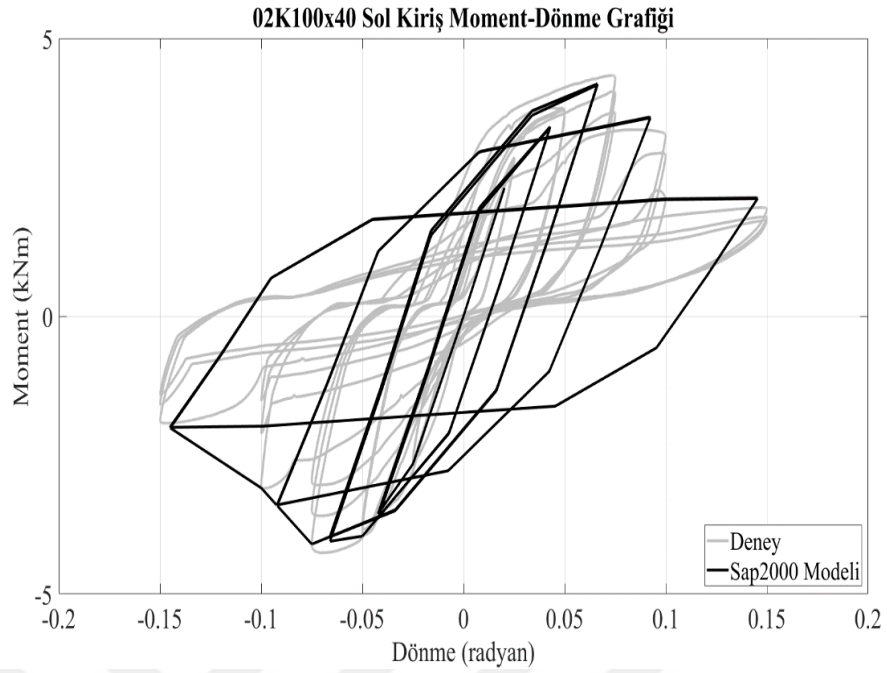


Şekil 4.37: 02K_40x100 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

Tablo 4.17’de moment dönme değerleri kiriş ucundaki link elemanlara atandıktan sonra analiz gerçekleştirilmiştir. SAP2000 sonlu elemanlar programı analizi sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.38 ve Şekil 4.39’da gösterilmiştir.



Şekil 4.38: 02K_40x100 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



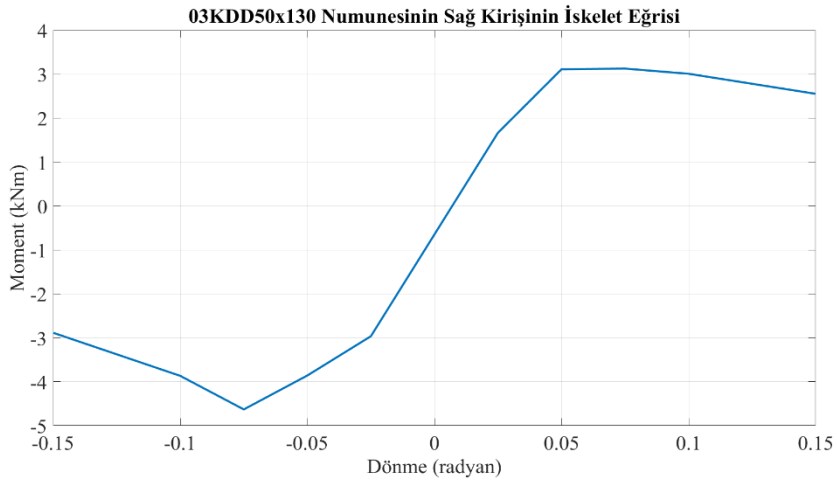
Şekil 4.39: 02K_40x100 sol kiriş SAP2000 grafiği.

4.3.3. 03K_DD50x130 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

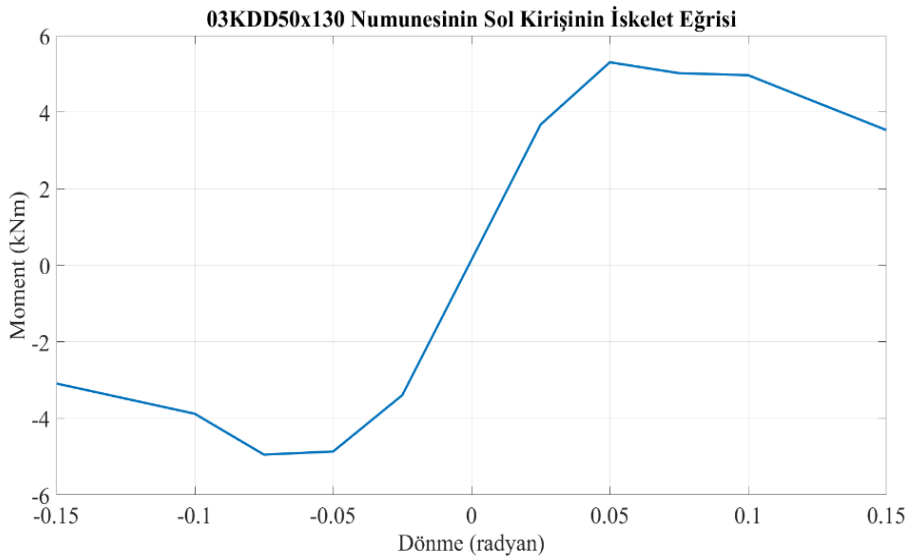
Deney verilerinden oluşturulmuş olan iskelet eğrisi Şekil 4.40 ve Şekil 4.41’de görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.18’de görülmektedir.

Tablo 4.18: 03K_DD50x130 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	2.5530	3.5290
0.1	3.0096	4.9640
0.075	3.1272	5.0170
0.05	3.1122	5.3010
0.025	1.6656	3.6750
-0.025	-2.9652	-3.3924
-0.05	-3.8592	-4.8642
-0.075	-4.6314	-4.9458
-0.1	-3.8670	-3.8784
-0.15	-2.8860	-3.0882

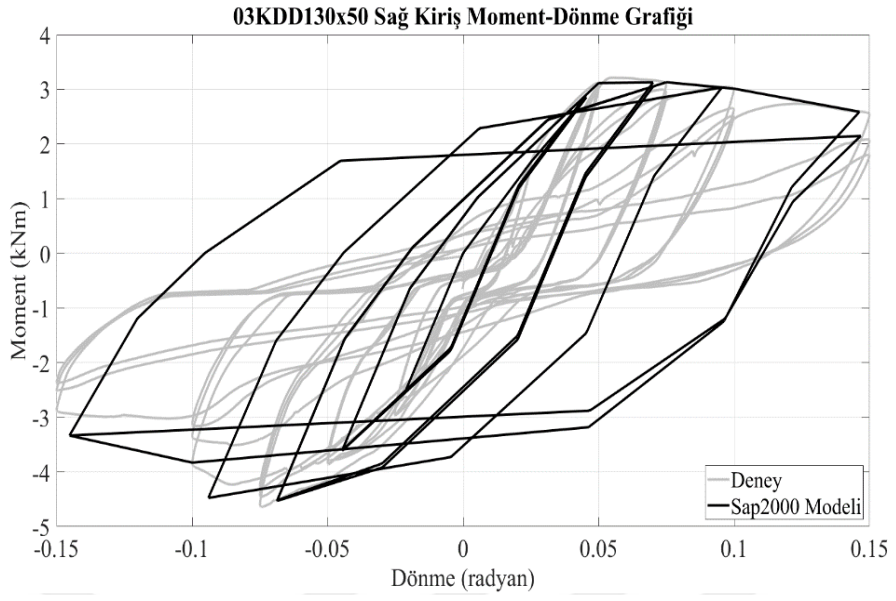


Şekil 4.40: 03K_DD50x130 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

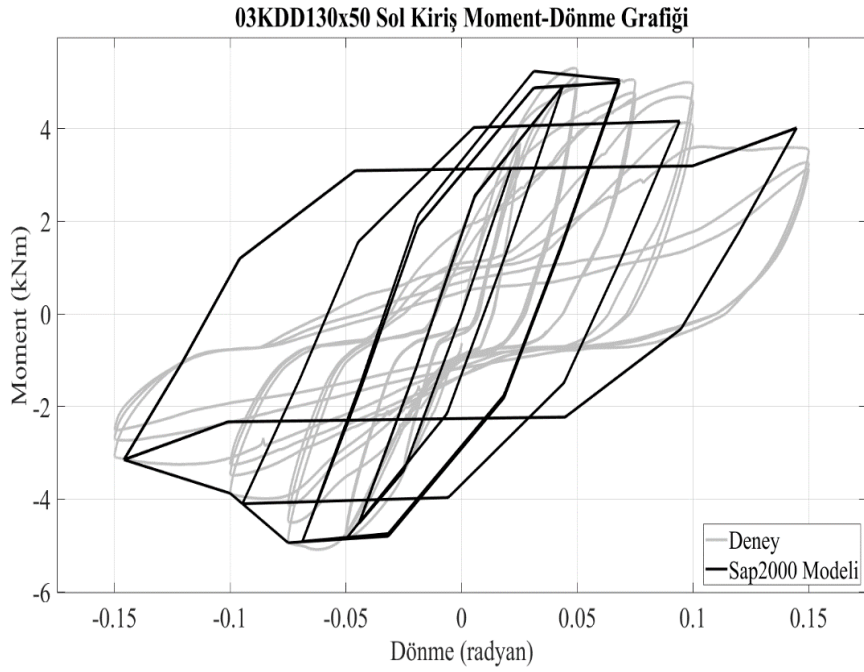


Şekil 4.41: 03K_DD50x130 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

İskelet eğrisinde belirlenen moment dönme değerleri kiriş ucundaki link elemanlarda oluşturulan kinematik modele atandıktan sonra çevrimsel tersinir yükleme analizi zaman tanım alanında gerçekleştirilmiştir. SAP2000 sonlu elemanlar programı analizi sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri sağ ve sol kiriş için sırasıyla Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'te gösterilmiştir.



Şekil 4.42: 03K_DD50x130 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



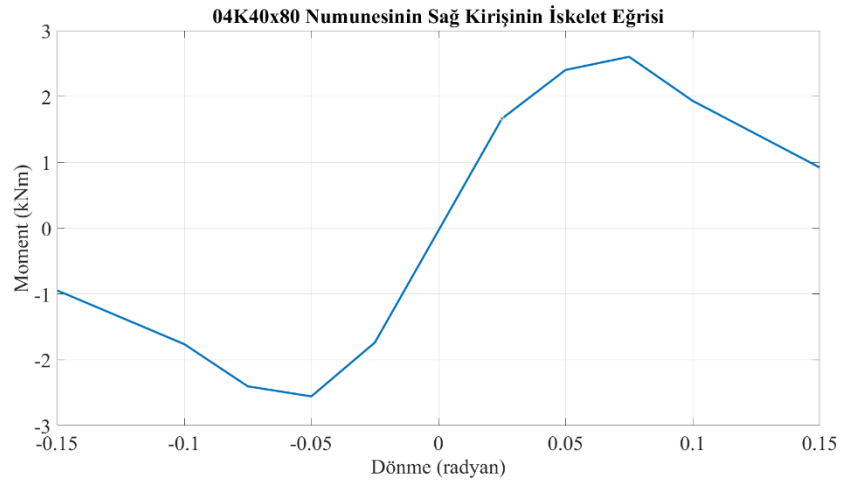
Şekil 4.43: 03K_DD50x130 sol kiriş SAP2000 grafiği.

4.3.4. 04K_40x80 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

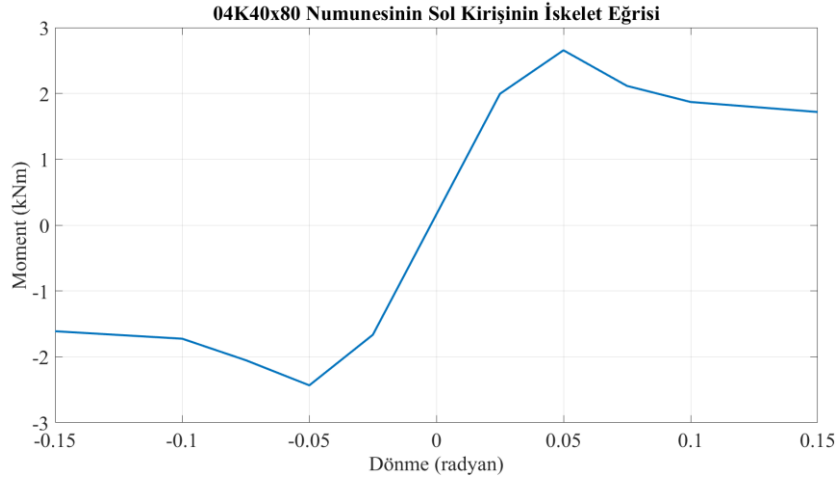
Deney verilerinden oluşturulmuş iskelet eğrisi Şekil 4.44 ve Şekil 4.45'te görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.19'de görülmektedir.

Tablo 4.19: 04K_40x80 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	0.9210	1.7178
0.1	1.9344	1.8702
0.075	2.6022	2.1138
0.05	2.4018	2.6550
0.025	1.6632	1.9944
-0.025	-1.7370	-1.6650
-0.05	-2.5554	-2.4330
-0.075	-2.4024	-2.0520
-0.1	-1.7616	-1.7250
-0.15	-0.9456	-1.6116

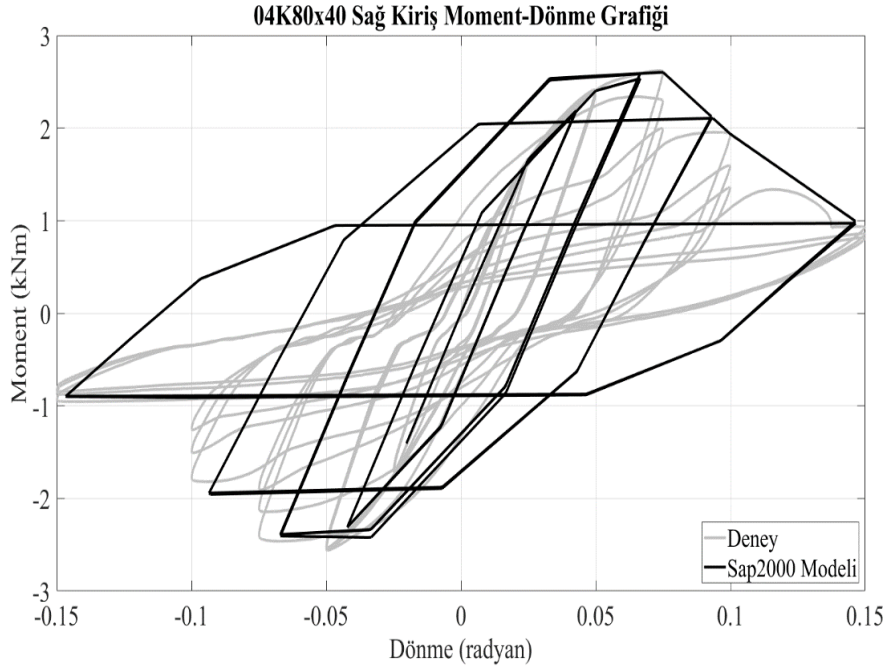


Şekil 4.44: 04K_40x80 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

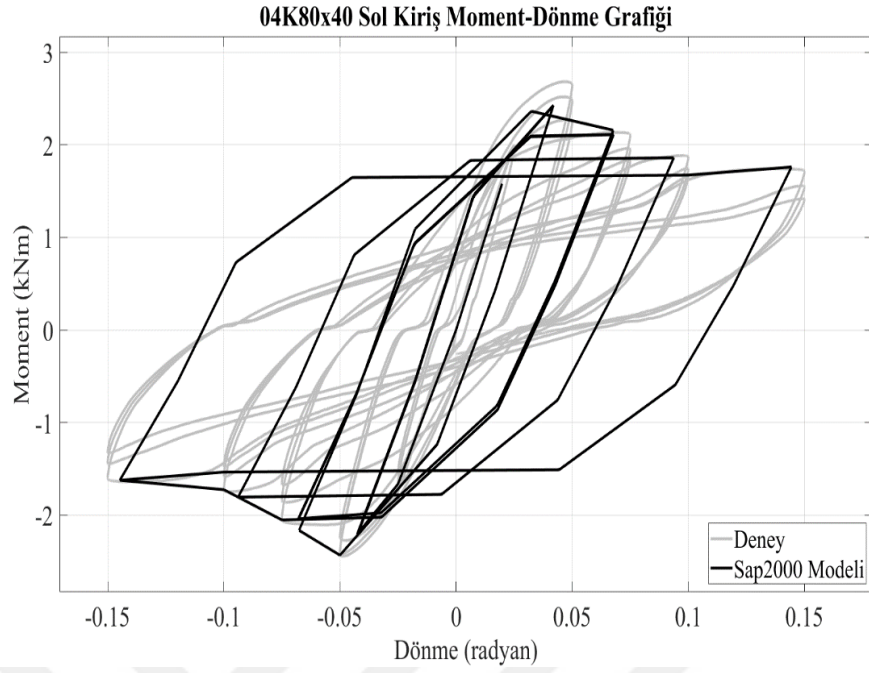


Şekil 4.45: 04K_40x80 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

Tablo 4.19'deki moment dönme değerleri SAP2000 sonlu elemanlar programındaki deney modelinde kiriş ucunda oluşturulan link elemanlara atandıktan sonra zaman tanım alanında tersinir çevrimsel yükleme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.46 ve Şekil 4.47'de gösterilmiştir.



Şekil 4.46: 04K_40x80 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



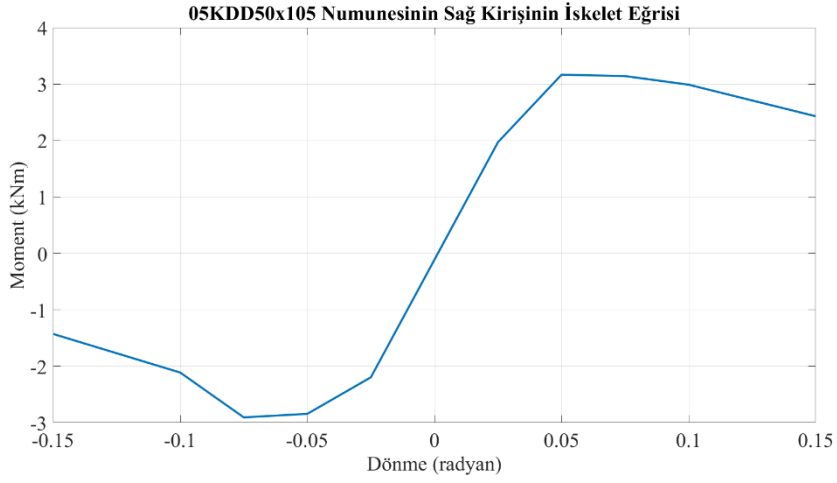
Şekil 4.47: 04K_40x80 sol kiriş SAP2000 grafiği.

4.3.5. 05K_DD50x105 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

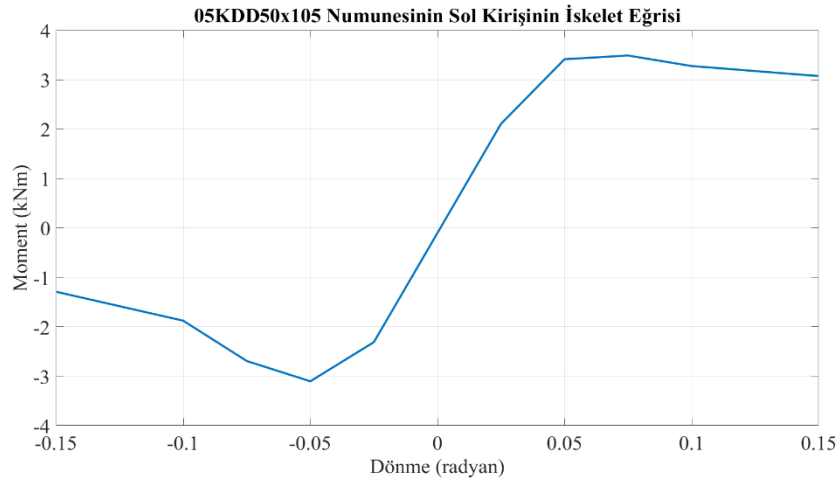
Deney verilerinden oluşturulmuş olan iskelet eğrisi Şekil 4.48 ve Şekil 4.49'da görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.20'da görülmektedir.

Tablo 4.20: 05K_DD50x105 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.15	2.4288	3.0732
0.1	2.9880	3.2760
0.075	3.1404	3.4890
0.05	3.1650	3.4140
0.025	1.9692	2.1054
-0.025	-2.1960	-2.3106
-0.05	-2.8434	-3.1032
-0.075	-2.9064	-2.6928
-0.1	-2.1120	-1.8768
-0.15	-1.4280	-1.2912

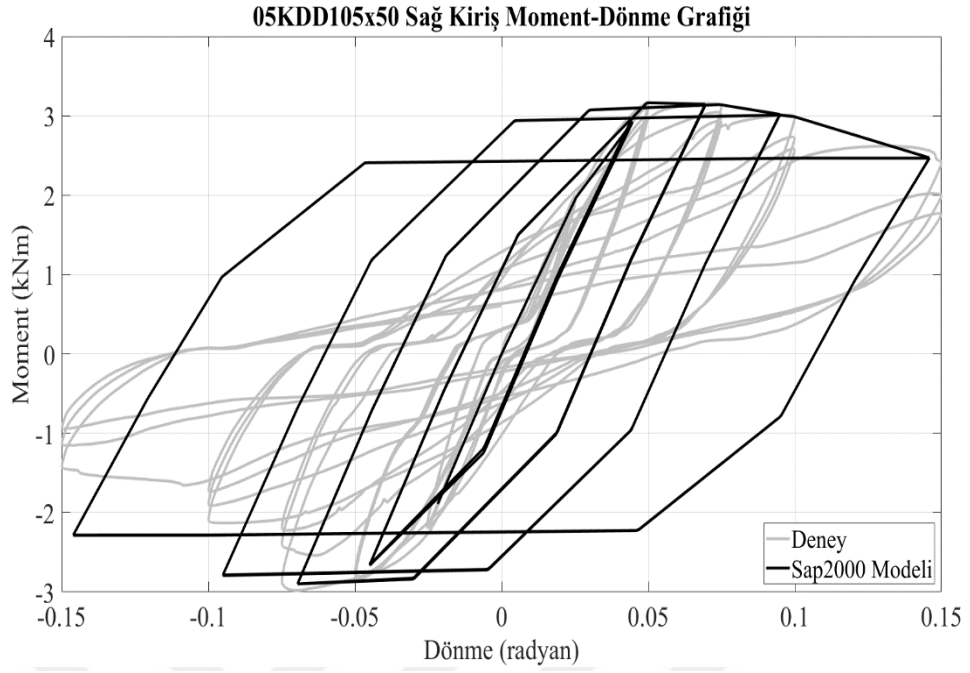


Şekil 4.48: 05K_DD50x105 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

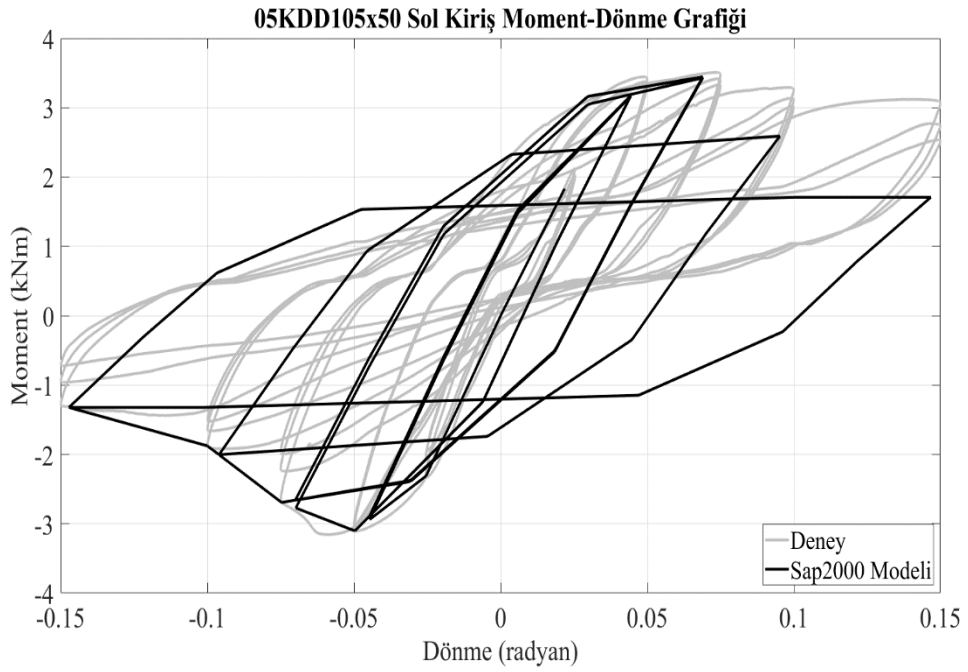


Şekil 4.49: 05K_DD50x105 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

Numuneye ait deneyden elde edilen ve Tablo 4.20’de sunulan moment dönme değerleri SAP2000 sonlu elemanlar programında oluşturulan birleşim modelinde kiriş ucundaki link elemanlara atandıktan sonra çevrimsel yükleme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri sağ ve sol kiriş için Şekil 4.50 ve Şekil 4.51’de sunulmuştur.



Şekil 4.50: 05K_DD50x105 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



Şekil 4.51: 05K_DD50x105 sol kiriş SAP2000 grafiği.

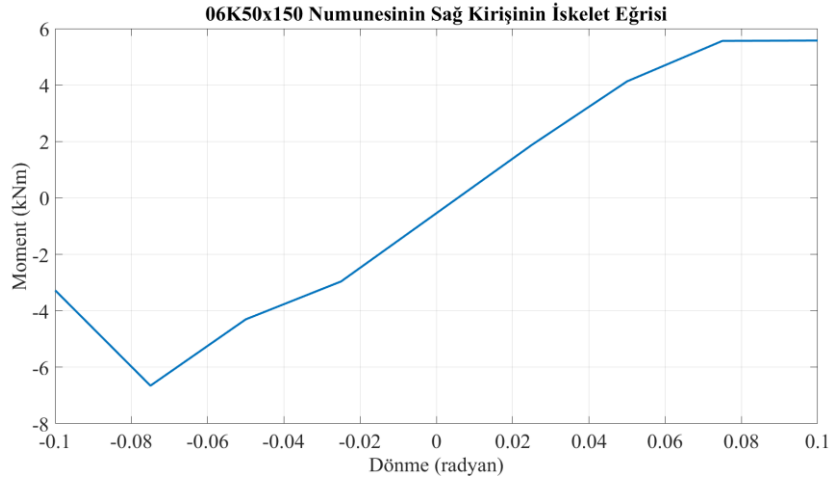
4.3.6. 06K_50x150 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

Deney verilerinden oluşturulmuş iskelet eğrileri sağ ve sol kirişler için Şekil 4.52 ve Şekil 4.53'te görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.21'de görülmektedir.

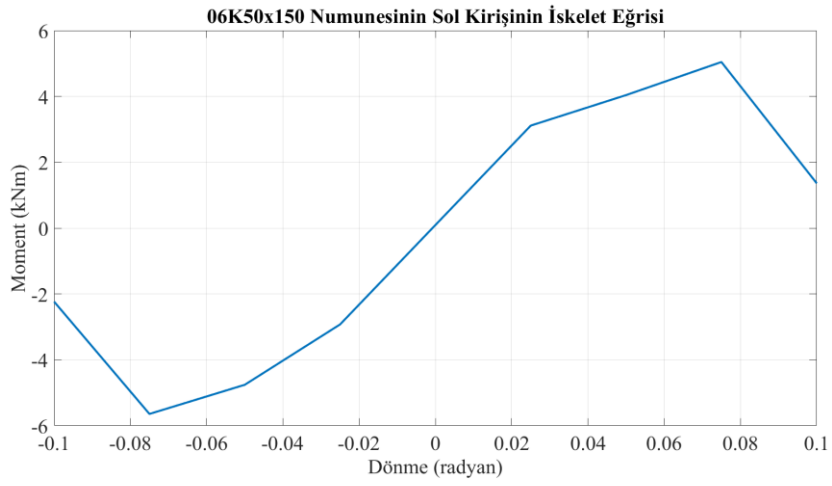
Tablo 4.21: 06K_50x150 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.1	3.0732	1.3608
0.075	3.2760	5.0448
0.05	3.4890	4.0410
0.025	3.4140	3.1134
-0.025	2.1054	-2.9244
-0.05	-2.3106	-4.7580
-0.075	-3.1032	-5.6436
-0.1	-2.6928	-2.2338

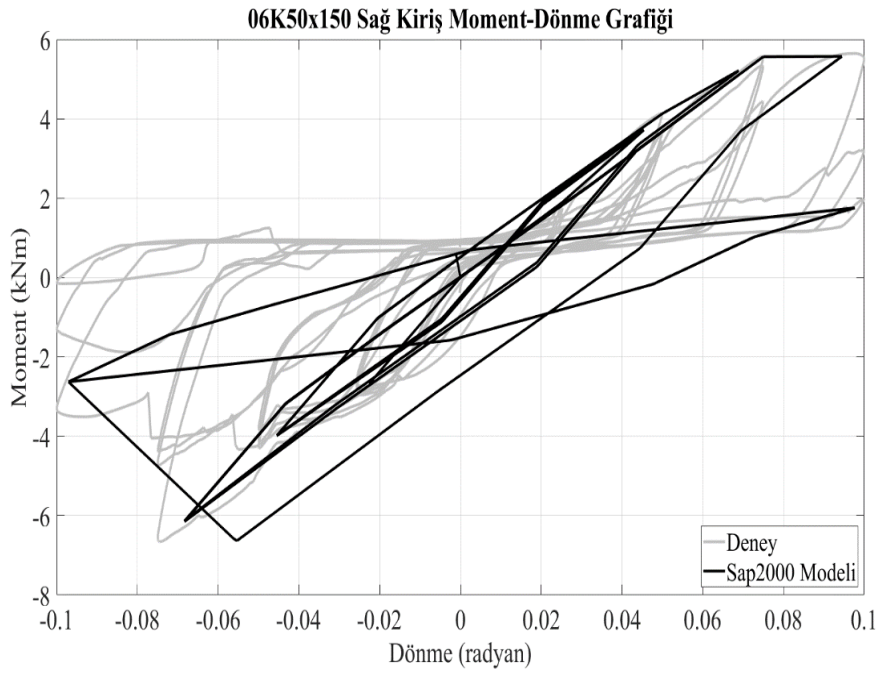
Şekil 4.52'deki moment dönme değerleri SAP2000 sonlu elemanlar programında oluşturulan nümerik modelde kiriş ucundaki link elemanlara atandıktan sonra zaman tanım alanında çevrimsel yükleme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.54 ve Şekil 4.55'te gösterilmiştir.



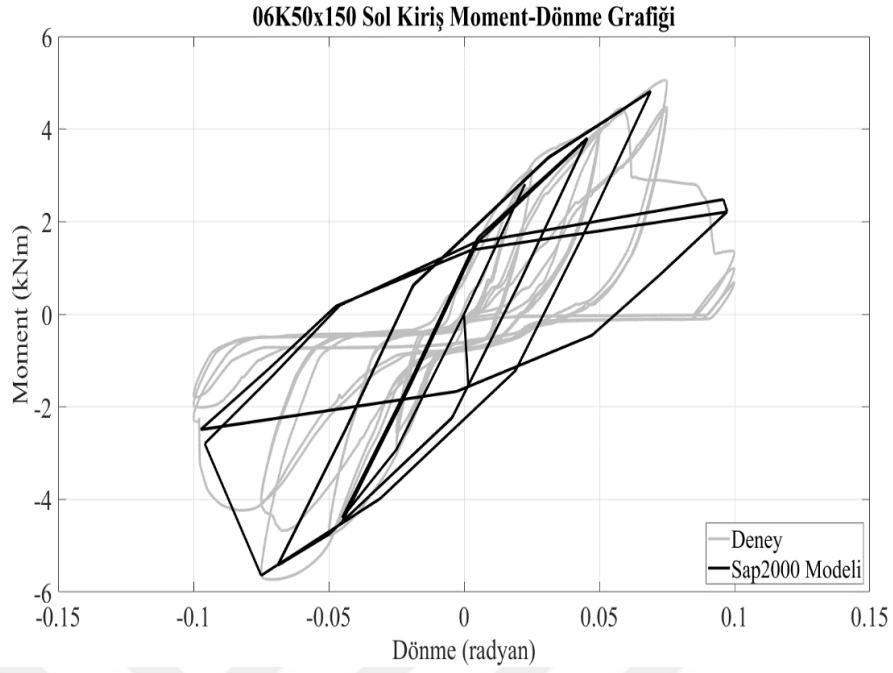
Şekil 4.52: 06K_50x150 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.



Şekil 4.53: 06K_50x150 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.



Şekil 4.54: 06K_50x150 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



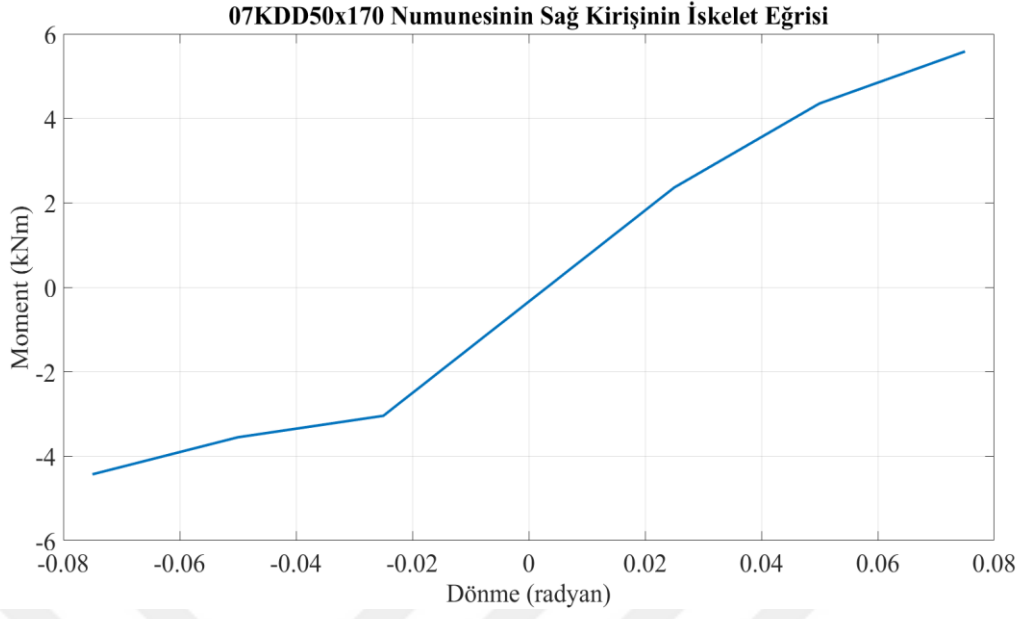
Şekil 4.55: 06K_50x150 sol kiriş SAP2000 grafiği.

4.3.7. 07K_DD50x170 Numunesinin SAP2000 Sonuçları

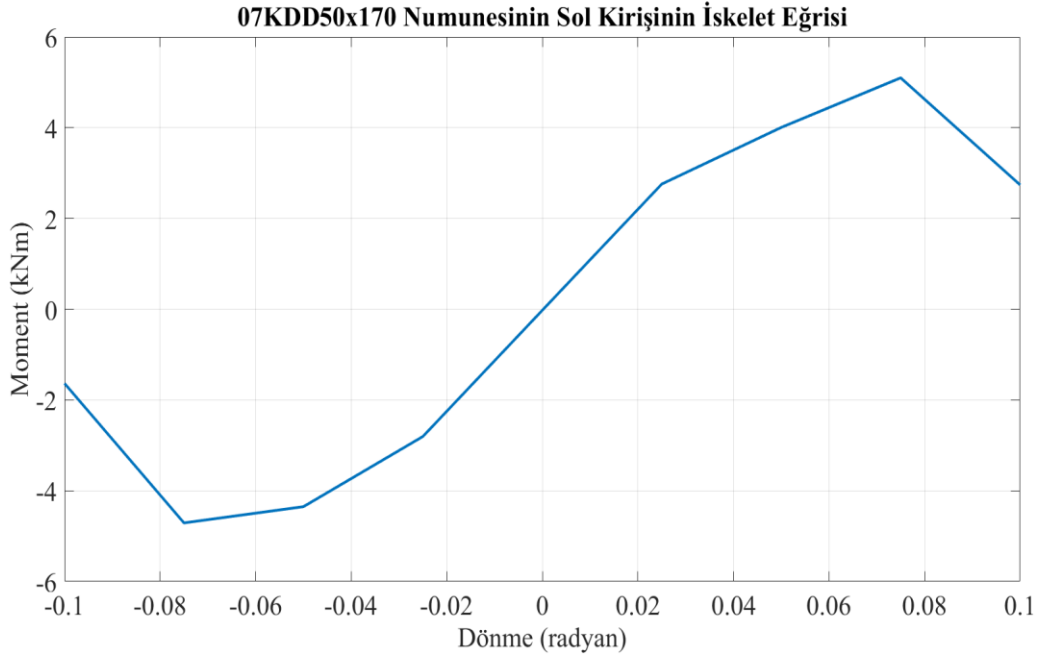
07K_DD50x170 isimli deney numunesine ait verilerinden elde edilen iskelet eğrisi sağ ve sol kiriş için Şekil 4.56 ve Şekil 4.57’de görülmektedir. İskelet eğrisindeki kırılma noktalarına dair veriler ise Tablo 4.22’de görülmektedir.

Tablo 4.22: 07K_DD50x170 numunesinin iskelet eğrisi verileri.

Dönme (radyan)	Sağ Kiriş Moment Değerleri (kNm)	Sol Kiriş Moment Değerleri (kNm)
0.1	-	2.7390
0.075	5.5848	5.0988
0.05	4.3524	4.0056
0.025	2.3610	2.7582
-0.025	-3.0444	-2.8050
-0.05	-3.5526	-4.3518
-0.075	-4.4298	-4.7094
-0.1	-	-1.6356

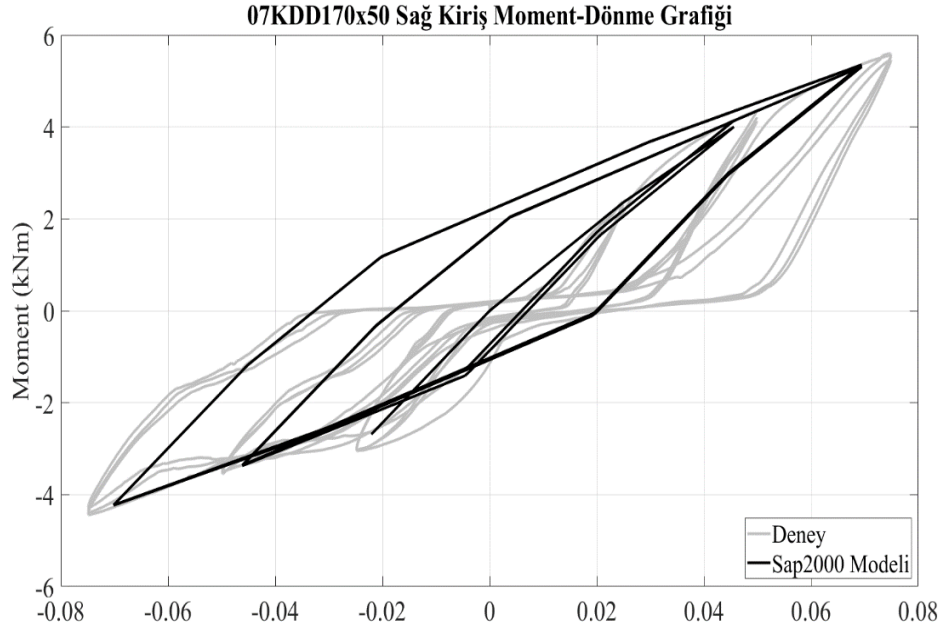


Şekil 4.56: 07K_DD50x170 numunesinin sağ kiriş iskelet eğrisi.

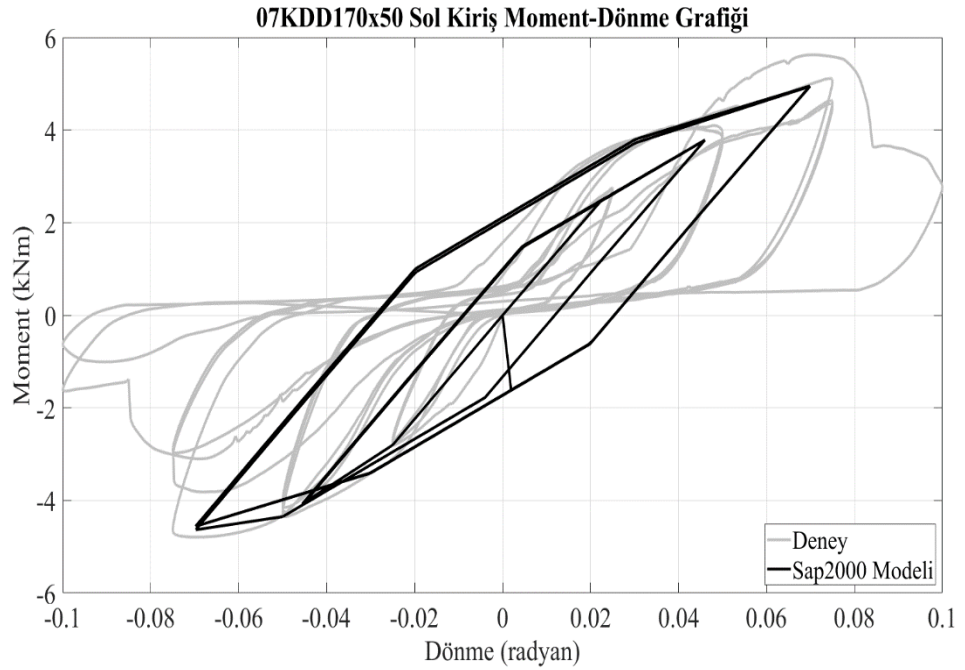


Şekil 4.57: 07K_DD50x170 numunesinin sol kiriş iskelet eğrisi.

İskelet eğrisinde sunulan moment dönme değerleri SAP2000 sonlu elemanlar programında oluşturulan yarı-rijit birleşime sahip numunelere ait nümerik modelin kiriş ucundaki link elemanlarına atandıktan sonra çevrimsel yükleme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonrasında elde edilen moment dönme grafikleri Şekil 4.58 ve Şekil 4.59'da sunulmuştur.



Şekil 4.58: 07K_DD50x170 sağ kiriş SAP2000 grafiği.



Şekil 4.59: 07K_DD50x170 sol kiriş SAP2000 grafiği.

Şekil 4.59’da sunulan sol kiriş numunesine ait moment dönme davranışı incelendiğinde, nümerik modeldeki dönme değerlerinin deneyi yakalayamadığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, SAP2000 programında çevrimsel yükleme için tanımlanan deplasman-zaman verilerinin her kiriş için ayrı ayrı oluşturulamamasına dayanmaktadır. İlgili numune deneyinde, sağ kiriş üçüncü yükleme adımına kadar sol kiriş ise dördüncü yükleme adımına kadar dayanım gösterdiği için SAP2000 programında çevrimsel yükleme için tanımlanan deplasman-zaman verileri sağ kirişin dayanım gösterdiği dördüncü yüklemeye ait verilerdir.

4.3.8. SAP2000 Sonuçlarının Sönümlenen Enerji Açısından İncelenmesi

SAP2000 sonlu elemanlar programında her bir deney numunesini temsil edecek şekilde oluşturulan nümerik modellerin yarı-rijit birleşim bölgesinde sönümlenen toplam enerji her iki kiriş için ayrı ayrı Tablo 4.23’te sunulmuştur.

Tablo 4.24’te birleşim bölgesinde sönümlenen toplam enerji değerleri her deney ve SAP2000 nümerik modeli için sunulmuştur. Tabloda sönümlenen enerji değerleri için sapma yüzdeleri de sunulmuştur.

Tablo 4.23: SAP2000 birleşimde sönümlenen enerji.

Numune Adı	Sağ Kiriş (kNmrad)	Sol Kiriş (kNmrad)
01K_DD50x75	0.6046	1.9350
02K_40x100	4.4039	5.7419
03K_DD50x130	6.3186	8.2064
04K_40x80	3.4756	4.1575
05K_DD50x105	6.0881	4.3725
06K_50x150	1.4619	2.7015
07K_DD50x170	1.1880	1.3799

Tablo 4.24: SAP2000 sönümlenen toplam enerji.

Numune Adı	Deneyde Sönümlenen Toplam Enerji (kNmrad)	SAP2000’de Sönümlenen Toplam Enerji (kNmrad)	Sapma Miktarı (%)
01K_DD50x75	3.099	2.5396	18.0509
02K_40x100	6.5141	10.1458	55.7513
03K_DD50x130	8.3480	14.5250	73.9937
04K_40x80	4.5949	7.6331	66.1211
05K_DD50x105	5.9591	10.4606	75.5399
06K_50x150	4.0706	4.1634	2.2797
07K_DD50x170	3.0395	2.5679	15.5157

Kaynak hasarına bağlı olarak sünek davranış gözlemlenen deney numuneleri için hesaplanan enerji ile nümerik model için hesaplanan enerji arasındaki sapma miktarı yüksek çıkmıştır. Bu durum, nümerik modellerde yükleme boşaltma eğrisinde yükleme rijitliğinde yüksek oranda bir kayıp görülmemesi sebebiyle histeretik döngünün orijin etrafında geniş alanda oluşmasından kaynaklanmıştır. Deney sırasında ise artan deplasman yüklemeleriyle kiriş uç konektörünü tutan kaynaklar yırtıldığından yükleme rijitliğinde düşüş görülmüştür. Sapma yüzdesinin düşük olduğu deneylerde ise kirişler gevrek davranış sergilemiş olup artan deplasman yüklemesi altında tırnakları kopmuştur. Nümerik modellerin analizi sonucunda gevrek davranış sergileyen numunelerin sönmölenen enerji açısından deneye daha yakın sonuç verdiği görülmüştür. Örneğin, deney sırasında gerçekleştirilen çevrimsel yükleme sırasında tırnakların kırıldığı numuneler 06K_50x150 ve 07K_DD50x170'dir.

Tablo 4.24'ten göröleceği gibi tırnak kırılması sebebiyle dayanımını yitiren bu numunelerde deney verilerinden hesaplanan enerji değerleri ile SAP2000 nümerik modellerinden hesaplanan enerji değerleri kaynak bölgesinin yırtıldığı diğer numunelere kıyasla daha yakındır.

5. TARTIŞMA

Tez kapsamında, çelik depo raf sistemlerinin yarı-rijit davranan kolon kiriş birleşimlerinin çevrimsel yüklemeler altındaki performansının belirlenmesi için RMI-2012 yönetmeliğine uygun olarak deney prosedürleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında, kiriş kesit boyutları ve kesit geometrisi bağımsız değişkendir. Kolon ve kiriş numunelerinin uzunlukları deney prosedürü gereğince sabit tutulmuştur. Tersinir çevrimsel yükleme deneyleri sonucunda birleşim bölgesinin hasar türü değerlendirilmiştir. Ardından, deneylerden elde edilen verilerden moment dönme cinsinden histeretik döngüler oluşturulmuş ve bu döngüler üzerinden iskelet eğrileri belirlenmiştir. Ardından, moment dönme histeresizleri üzerinden birleşim bölgesinin sönmülediği enerji hesaplanmıştır. OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar programları aracılığıyla oluşturulan depo raf sistemi yarı-rijit bağlantılı birleşimine ait nümerik modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde tırnaklı birleşim bölgesi bağlantısının yarı-rijit davranışını temsil etmek için iskelet eğrileri kullanılmıştır. Tersinir çevrimsel yükleme prosedürüne uygun olan deplasman zaman ilişkisi nümerik modeller üzerinde simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, nümerik model sonuçlarının deney sonuçlarını moment dönme ilişkisi bakımından temsil etme kabiliyeti incelenmiştir. Ayrıca, elde edilen moment dönme histerezis ilişkileri aracılığıyla birleşim bölgesinde sönmülenen enerjiler hem deney hem nümerik modeller için hesaplanmış ve kıyaslanmıştır.

Deney boyunca iki tip göçme şekli gözlenmiş olup; bunlardan biri tırnakların kopması ve diğeri ise kiriş ile uç konektörü arasındaki kaynak bölgesinin yırtılmasıdır. Kirişlerin kaynak bölgesinden göçtüğü deneyler incelendiğinde, kirişlerin artan deplasman yüklemesi altında kaynak bölgesinin kademeli olarak kiriş uç plağından yırtıldığı görülmüştür. Kaynağın yırtılması boyunca tersinir çevrimsel yüklemelere dayanım gösterirken çevrim sıkışması, histeresiz döngü içerisinde daha geniş alanda gözlemlendiğinden kolon kiriş birleşiminin sünek davranış sergilediği söylenebilir. Sünek davranış gerçekleşirken dikkat edilmesi gereken husus, yükleme boşaltma eğrisine bakıldığında artan deplasman yüklemesiyle yırtılan kaynağın maksimum ve minimum moment değerlerine ulaşırken histeretik döngüde daralma meydana gelmesidir. Burada artan deplasman yüklemelerinin yırttığı kaynak bölgesi yükleme rijitliğini düşürmüştür. Tırnakların kırılmasıyla göçme gözlemlenen numuneler incelendiğinde ise, deplasman yüklemesi altında her bir döngüsel yükleme adımında numunelerin ulaşabileceği

maksimum ve minimum moment değerlerinin tırnakların kopmasıyla ilgili yükleme adımı tamamlanmaya kadar koruyamayarak düştüğü görülmüştür.

OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar programlarında oluşturulan nümerik modellerin çıktıları incelendiğinde deneyden elde edilen verilerden oluşturulan iskelet eğrilerinin kolon kiriş birleşim bölgesinin yarı-rijit davranışının temsil edilmesinde moment ve dönme değerleri açısından yeterli olduğu görülmüştür. Nümerik modellerde yarı-rijit bağlantının davranışını simüle etmekte kullanılan kinematik model, deneylerde birleşim bölgesinde meydana gelen göçme türlerinin çevrim sıkışmasının formunu temsil etmekte özellikle tırnak kopması ile dayanımını kaybeden numunelerde yeteri kadar başarılı değildir.

Birleşim bölgesinde sönmölen enerji değerleri dikkate alındığında, sünek davranışın yani kaynak yırtılmasının gerçekleştiği durumda deneylerde hesap edilen sönmö enerjişinin nümerik modelde hesaplanan sönmö enerjişinden daha düşük olduğu gözlemlenmektedir. Oluşturulan modellere bakıldığında kolon kiriş birleşimindeki tırnakların davranışı iki analiz programında da tam olarak gevrek davranışının simüle edilememesinden kaynaklı olarak farklı sonuçlar vermiştir. Tırnakların gevrek davranışını SAP2000 modelinde tanımlanan iskelet eğrisi değerlerinin çokluğuyla birlikte OpenSees modelindekinden deneye daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yatay depolama yöntemlerinin yetersiz olduğu, depo alanının verimli şekilde kullanılmasını amaçlayan depo raf sistemleri, depoların vazgeçilmez unsurlarından biri haline gelmiştir. Ülkemizde de yaygın olarak kullanılan depo raf sistemlerinin önemi depolanacak olan ham madde veya perakende ürünlerinin istiflenmesi ihtiyacıyla artmıştır. Depo raf sistemlerinin kendi ağırlıkları genellikle üzerinde taşıdıkları ağırlıkların %5'ini geçmediği görülmüştür (Simoncelli, ve diğ., 2020). Bu durumda depo raf sistemlerinin yapısal elemanlarının dayanımı ciddi bir önem arz etmektedir. Depo raf sistemleri deprem anında hem kendi ağırlıkları ve üzerine yüklenen malzemeler hem de deprem etkilerine karşı dayanıklı olmalıdır. Deprem anında en fazla zorlanan doğrultu aşağı koridor doğrultusu olup bu doğrultuda basit bir çerçeve davranışı sergileyen depo raf sisteminin en çok zorlanan bölgelerinden biri de kolon kiriş birleşim bölgesidir. Birleşimin özellikle tırnaklı uç konektörü ile sağlandığı durumlarda yatay yükler etkisinde oldukça büyük dönme talepleri oluşabilmektedir. Büyük dönme talepleri ise aşağı koridor doğrultusunda büyük yanal deplasmanların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir. Bu sebeple, birleşim bölgesinin yarı-rijit davranışının incelenmesi önem arz etmektedir. Bu tez kapsamında, ülkemizde de sıklıkla kullanılan tırnaklı birleşime sahip depo raf sistemlerinin yarı-rijit birleşim bölgelerinin davranışı hem deneysel olarak hem de nümerik modeller ile incelenmiştir. Bu amaçla, depo raf sistemlerinin yarı-rijit birleşim bölgesini temsil eden kiriş kesit ölçüsü ve geometrisi farklı numune setlerine çevrimsel tersinir yükleme testleri uygulanmıştır. Tez kapsamında, OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar yazılımları aracılığıyla, deney numunelerini temsil eden nümerik modeller oluşturulmuş ve çevrimsel tersinir yüklemeler altında zaman tanım alanında analiz edilmiştir. Nümerik modellerden elde edilen sonuçlar ile deneylerden elde edilen sonuçlar moment ve dönme kapasitesi ile birleşim bölgesinde sönmölenen enerji açısından karşılaştırılmıştır.

Gerçekleştirilen tüm deneyler ve nümerik simülasyonlar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

- Deney sonucunda 130 mm derinliğe kadar olan bütün kirişlerin sünek davranış sergilediği görülmüş olup, bu numunelerdeki hasarın kiriş uç konektöründeki kaynak bölgesinin yırtılmasından kaynaklandığı gözlemlenmiştir. Yüksekliği 130 mm'yi geçen numunelerde ise tırnakların kopmasına dayanan gevrek davranış gözlemlenmiştir.

Kullanılacak kesit yüksekliğinin yarı-rijit birleşim bölgesinin sünek ve gevrek davranışı açısından önem arz ettiği söylenebilir.

- Herhangi bir deprem anında kolon kiriş birleşiminin sönümleyebildiği enerji raf sisteminin stabilitesinin korumasında önem taşımaktadır. Deneyde sönümlenen enerji miktarına ve göçme şekillerine bakıldığında sünek davranışın görüldüğü numunelerin deprem etkisi altında daha iyi performans sergileyeceği söylenebilir.
- Birleşim bölgesinde sönümlenen enerjiler değerlendirildiğinde, deney numunesinin gevrek davranış sergileyen deney numuneleri SAP2000 programında oluşturulan modellere yakın sonuçlar verirken; sünek davranış sergileyen numuneler OpenSees yazılımında oluşturulan modellere yakın sonuçlar vermiştir. Örneğin, sönümlenen enerjilerin deneye göre sapma miktarları, sünek davranış sergileyen 03K_DD50x130 numunesinin OpenSees nümerik modeli için % 6.25 iken SAP2000 nümerik modeli için % 73.99'dur. Gevrek davranışın görüldüğü 06K_50x150 numunesi için sapma değeri SAP2000 nümerik modeli için % 2.28 olup OpenSees nümerik modeli için % 27.9'dur.
- Deney verileri dikkate alınarak OpenSees ve SAP2000 sonlu elemanlar programlarında oluşturulan yarı-rijit birleşim bölgesi nümerik modelleri çevrimsel tersinir yüklemeler altında analiz edildiğinde, birleşim bölgesinde elde edilen moment dönme kapasitelerinin deney verileri ile uyumlu olduğu görülmüştür.
- Yarı-rijit tırnaklı birleşim bölgelerinin çevrimsel yükleme deneylerinden elde edilen histeretik davranışa ait parametreler tam ölçekli depo raf sisteminin tasarımında kolon kiriş birleşim bölgesinin davranışının modellenmesinde dikkate alınmalıdır. Böylece birleşim bölgesindeki kolon ve kirişi birbirine bağlayan yarı-rijit tırnaklı kiriş uç konektör bağlantısının sismik etkiler altındaki davranışı daha gerçekçi şekilde değerlendirilebilir.
- Tam ölçekli depo raf sistemi sismik deneylerinin yapılması yüksek maliyetli olabileceğinden, kolon kiriş birleşim bölgesinin çevrimsel tersinir yükleme deneyi verilerinin kullanıldığı tam ölçekli sonlu elemanlar modelinde hızlı ve maliyeti düşük bir yöntem olarak tercih edilebilir.

KAYNAKLAR

- Aghlara, R. & Tahir, M. M., 2018, A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures, *Engineering Structures*, 159, 185-197.
- Altoontash, A., 2004, Simulation And Damage Models For Performance Assessment of Reinforced Concrete Beam-Column Joints, Thesis (PhD), Stanford University.
- Annalisa, F., Simone, M. & Royer-Carfagni, G., 2015, Passive Control of Steel Storage Racks for Parmigiano Reggiano Cheese Under Seismic Accelerations, *Journal of Earthquake Engineering*, 29(8), 1222-1259.
- Approved American National Standard, 2008. *Specification for the Design, Testing and Utilization of Industrial Steel Storage Racks*, Ameika Birleşik Devletleri, Material Handling Industry.
- 2021, *As/Rs Otomatik Depolama*, <http://www.arcea.com.tr/hizmetlerimiz/asrs-otomatik-depolama>, Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2021.
- Asawasongkram, N., Chomchuen, P. & Premthamkorn, P., 2019, Development and Application of A Mechanical Model of Beam-To-Column Connections of Steel Storage Racks, *Advanced Steel Construction*, 15(3), 297-305.
- Bajoria, K. & Talikoti, R., 2006, Determination of Flexibility of Beam-To-Column Connectors Used In Thin Walled Cold-Formed Steel Pallet Racking Systems, *Thin-Walled Structures*, 44(3), 372-380.
- Beattie G. J. & Deam B. L., 2006, *Seismic Design of High Level Storage Racking Systems with Public Access*, BRANZ Design Guide, Judgeford, New Zealand.
- Bové, O., L'opez-Almansa, F., Ferrer, M. & Roure, F., 2022, Ductility Improvement of Adjustable Pallet Rack Speed-Lock Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 188.
- Cao, J. ve diğerleri, 2009. Experimental and Numerical Investigation of Combined Isotropic-Kinematic Hardening Behavior of Sheet Metals, *International Journal of Plasticity*, 25, 942-972.
- Castiglioni, C. A., 2016, *Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems*, Milan, SpringerNature.
- 2021, *Mekanik Raf Sistemi*, <http://www.cmrinsaat.com/mekanik-raf-sistemi/>, Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2021.
- Computer and Structures Inc., 2018, Hysteresis Models, *CSI Analysis Reference manual*, Berkeley, 86-89.

- Crosier, J., Hannah, M. & David, M., 2010, Damage To Steel Storage Racks In Industrial Buildings In The Darfield Earthquake, *Bulletin Of The New Zealand Society For Earthquake Engineering*, 43(4), 425-428.
- Elkadı, B., 2019, *Behavior of Cold Formed, Thin-Walled, Rack Type Frames and Their Use In Building Structures*, Thesis (PhD), Istanbul University-Cerrahpasa Institute Of Graduate Studies.
- Fema 460 Building Seismic Safety Council, 2005. *Seismic Considerations For Steel Storage Racks Located In Areas Accessible To The Public*, Washington D.C., National Institute of Building Sciences.
- Ferrari, M., 2019, LOKIBASE: The Device for Seismic Isolation of Pallet Racking Systems. *Costruzioni Metalliche*, 3, 82-91.
- Galeotti, C., Gusella, F., Orlando, M. & Spinelli, P., 2021, On the Seismic Response of Steel Storage Pallet Racks With Selective Addition, *Structures*, 34, 3806-3817.
- Gusellaa, F., Orlando, M. & Vignoli, A., 2017, Effects of Pinching in the Hysteresis Loop of Rack Connections, *Pisa University Press*, pp. 82-91.
- Markazi, F., Beale, R. & Godley, M., 2001, Numerical Modelling of Semi-Rigid Boltless Connectors, *Computers and Structures*, 79, 2391-2402.
- 2021, *Kompakt Palet Rafi*, <https://www.mecalux.com.tr/palet-rafi/kompakt-palet-rafi>, Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2021.
- Michael, R. ve diğeri, 2010, *Development Of A New Base Isolation System For Seismic Isolation Of Steel Pallet Storage Racks*, Toronto, The Canadian Association for Earthquake Engineering.
- 2021, *Hafif Yük Raf Sistemleri*, <https://www.rafgrup.com/urunler/hafif-yuk-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2021.
- 2021, *Sirt Sirta Raf Sistemleri*, <https://www.rafgrup.com/urunler/agir-yuk-depo-raf-sistemleri/sirt-sirta-raf-sistemi/>, Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2021.
- 2021, *Mobil Raf Sistemleri*, <http://www.rafsistem.com/raf-sistemleri/imalat/mobil-raf-sistemleri>, Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2021.
- 2021, *Sipariş Hazırlama Raf Sistemi*, <https://www.rafex.com.tr/kutulu-raf-sistemleri/siparis-hazirlama-raf-sistemi#konum-govde>, Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2021.
- 2021, *Sirt Sirta Raf Sistemi*, <https://www.rafex.com.tr/paletli-raf-sistemleri/sirt-sirta-raf-sistemi>, Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2021.
- 2021, *Mobil Raf Sistemleri*, <https://www.retamuhendislik.com.tr/portfolio/mobil-raf-sistemi/>, Ziyaret Tarihi: 13 Kasım 2021.
- Shah, S. ve diğeri, 2016, Behavior of Industrial Steel Rack Connections, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 3(70-71), 725-740.

Simoncelli, M., Tagliafierro, B. & Montuori, R., 2020, Recent Development on the Seismic Devices for Steel Storage Structures, *Thin-Walled Structures*, 155.

2002, *AS/NZS 1170.1 structural design actions—Permanent, imposed and other actions—Commentary*, Standards Australia&Standards New Zealand.

Sutoyo, D., 2009. *Hysteretic Characteristics of Wood-Frame Structures Under Seismic Motions*. Thesis (PhD), California Institute of Technology

Tang, Z. ve diğeri, 2017, *Increasing Seismic Resilience of Pallet Racking Systems Using Sliding Friction Baseplates*, New Zealand, NZSEE Conference.

2021, *As/Rs Otomatik Depolama*, <https://www.temesist.com/asrs-otomatik-depolama-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi:13 Kasım 2021.

2021, *Hafif Yük Raf Sistemleri*, <https://www.temesist.com/hafif-ve-orta-yuk-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2021.

2021, *Konsol Kollu Raf Sistemleri*, <https://www.temesist.com/konsol-kollu-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 20 Ekim 2021.

2021, *Dış Giydirmeye Raf Sistemleri*, <https://www.temesist.com/dis-giydirme-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 19 Ekim 2021.

2021, *Mekanik Raf Sistemleri*, <https://www.temesist.com/mekik-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2021.

2021, *Drive-In Depolama Sistemleri*, <https://www.temesist.com/drive-in-depolama-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi: 14 Ekim 2021.

2021, *Kayar Raf Sistemleri*, <https://www.temesist.com/kayar-raf-sistemleri/>, Ziyaret Tarihi:14 Ekim 2021.

Yu, W.W., Laboube, R. A. & Chen, H., 2020, *Cold Formed Steel Design*. 5th Edition, Wiley.

Zhao, X., Dai, L. & Rasmussen, K. J., 2018, Hysteretic behaviour of steel storage rack beam-to-upright boltless connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 144, 81-105.

Zhao, X. ve diğeri, 2017, A theoretical model for the rotational stiffness of storage rack beam-to-upright connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 269-281.

Filiatrault, A., Wanitkorkul, A., and Higgins, P., 2006, Experimental stiffness and seismic response of pallet-type steel storage rack connectors, *ASCE Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 11 (3),161-170.

Computers and Structures Inc., 1998, “Sap2000 : integrated finite element analysis and design of structures : basic analysis reference”, V.22, Berkeley, California.

European Commission, 1993, *Eurocode 3: Design of Steel Structures*.

Federal Emergency Management Agency, 2005, *Seismic Considerations for Steel Storage Racks Located in Areas Accessible to the Public*.

Scott M. H., Filippou F., *Hysteretic Material*,
www.opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Hysteretic_Material, Ziyaret tarihi:11.03.2023

Filippou F., *Steel01*, www.opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/Steel01_Material, Ziyaret tarihi:12.03.2023

McKenna, F., Fenves G. L., Scott, M. H., Mazzoni S., 2000, "Open System for Earthquake Engineering Simulation", University of California, Berkeley.



İNTİHAL RAPORU İLK SAYFASI

4801200223-Muhammed Emre HABERDAR

ORJİNALLİK RAPORU

% 5	% 3	% 1	% 2
BENZERLİK ENDEKSİ	İNTERNET KAYNAKLARI	YAYINLAR	ÖĞRENCİ ÖDEVLERİ

BİRİNCİL KAYNAKLAR

1	Submitted to The Scientific & Technological Research Council of Turkey (TUBITAK) Öğrenci Ödevi	% 2
2	acikbilim.yok.gov.tr İnternet Kaynağı	% 1
3	docplayer.biz.tr İnternet Kaynağı	<% 1
4	ses.library.usyd.edu.au İnternet Kaynağı	<% 1
5	9lib.net İnternet Kaynağı	<% 1
6	Carlo Andrea Castiglioni. "Seismic Behavior of Steel Storage Pallet Racking Systems", 'Springer Science and Business Media LLC', 2016 İnternet Kaynağı	<% 1
7	acikerisim.sakarya.edu.tr İnternet Kaynağı	<% 1
8	nek.istanbul.edu.tr:4444 İnternet Kaynağı	<% 1