İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÖNÜRETİMLİ BETONARME YAPILARDA MOMENT AKTARAN YENİ BİR KİRİŞ-KOLON BAĞLANTISI

DOKTORA TEZİ

Erkan ŞENOL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

MART 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ÖNÜRETİMLİ BETONARME YAPILARDA MOMENT AKTARAN YENİ BİR KİRİŞ-KOLON BAĞLANTISI

DOKTORA TEZİ

Erkan ŞENOL
(501122004)

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ercan YÜKSEL

MART 2023

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

A NEW MOMENT RESISTING BEAM TO COLUMN CONNECTION FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

Ph.D. THESIS

Erkan ŞENOL
(501122004)

Department of Civil Engineering

Structural Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Ercan YÜKSEL

MARCH 2023

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501122004 numaralı Doktora Öğrencisi Erkan ŞENOL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÖNÜRETİMLİ BETONARME YAPILARDA MOMENT AKTARAN YENİ BİR KİRİŞ-KOLON BAĞLANTISI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Ercan YÜKSEL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Konuralp GİRGİN** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Bilge DORAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Cem YALÇIN Boğaziçi Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 13 Aralık 2022
Savunma Tarihi : 27 Mart 2023

Biricik eşim İnci'ye,

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının tüm aşamalarında değerli bilgi ve tecrübesine başvurduğum, saygıdeğer hocam Prof. Dr. Ercan YÜKSEL'e göstermiş olduğu destek, sabır ve anlayış için en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması süresince yaptıkları değerli öneriler, katkılar ve eleştiriler için Prof. Dr. Konuralp GİRGİN ve Prof. Dr. Bilge DORAN'a minnet ve şükran borçluyum.

Prefabrik yapılarda kullanılmak üzere özel bir mekanik plastik mafsal geliştirilen ve kiriş kolon birleşimlerinin moment aktaracak şekilde bağlantılarının sağlanarak performansının irdelendiği bu tez çalışması, 5190016 nolu TEYDEP 1505 projesinin sağladığı katkı ile TÜBİTAK'ın ve İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı ile MATİL Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarlarının sağlamış olduğu imkanlar ile gerçekleştirilmiştir. Bu kuruluşlara vermiş oldukları destekten ötürü teşekkür ederim.

Değiştirilir mekanik plastik mafsalın tasarım süreci, prototip üretimleri, deneylerin yapılması ve sayısal analizlerin gerçekleştirilmesi sırasında engin bilgi ve tecrübesini esirgemeyen Doç. Dr. Hasan ÖZKAYNAK, Dr. Öğr. Üyesi Melih SÜRMELİ, Dr. Öğr Üyesi Cihan SOYDAN ile sektörün ileri gelenlerinden İnş.Müh. Günkut BARKA ve İnş.Y.Müh. Hakan ATAKÖY'e katkılarından ötürü teşekkürlerimi sunarım. İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Labotaruvarı personelinden başta İnş.Y.Müh. Hakan SARUHAN olmak üzere İnş.Y.Müh. Fatih ŞAHİN ve Teknisyen Mahmut ŞAMLI'ya da teşekkür ederim.

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneylerde kullanılan kiriş, kolon ve soket temel elemanlarının üretimi sırasında değerli katkılarından ötürü BETAŞ Beton ve Prefabrik Yapı Elm. San. Tic. A. Ş., Sağlamtaş Madencilik İnşaat Taahhüt Nakliye San. ve Tic.Ltd.Şti. ve Prekast Beton San. ve Tic. A.Ş.'ye özel bir teşekkür borçluyum.

Son olarak, tarif edilemez desteği, anlayışı, sabrı ve özverisi için sevgili eşim İnci ŞENOL'a sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2022

Erkan ŞENOL
(İnş. Yük. Müh.)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **ix**
İÇİNDEKİLER ..... **xi**
KISALTMALAR ..... **xiii**
SEMBOLLER ..... **xv**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xvii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xix**
ÖZET ..... **xxvii**
SUMMARY ..... **xxix**
1. ÖNÜRETİMLİ BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE KİRİŞ-KOLON BAĞLANTILARI **1**
1.1 Giriş 1
1.2 Geleneksel Yöntemler 2
1.3 Güncel Yaklaşımlar 4
1.4 Hipotez 29
2. DEĞİŞTİRİLEBİLİR MEKANİK PLASTİK MAFSAL **33**
2.1 Kavram ve Tanımlar 33
2.2 Sigorta Tipi Mekanik Manşon 37
2.3 Kesme Bileşeni 44
2.4 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsalın Uygulanması 45
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR **51**
3.1 Sigorta Tipi Mekanik Manşonun Geliştirilmesine Yönelik Deneyler 51
3.1.1 Ön deneyler 52
3.1.2 Sigorta tipi mekanik manşonun geliştirilmesine yönelik deneyler 60
3.2 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsalın Kullanıldığı Kiriş - Kolon Bağlantısı Deneyleri 77
3.2.1 Hazırlık deneyleri 78
3.2.1.1 Pilot kiriş kolon bağlantı deneyleri 78
3.2.1.2 Çelik ceket öncesi deneyler 98
3.2.2 Çelik ceket kullanılan deneyler 128
3.2.2.1 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi 129
3.2.2.2 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi 137
3.2.2.3 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi 144
3.2.2.4 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi 153
3.2.2.5 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi 162
3.2.3 Deneysel sonuçların karşılaştırılması 170
3.2.4 Çerçeve deneyi 179
3.2.4.1 Çerçeve deney düzeneği 180
3.2.4.2 Çerçeve deneyine ait numunelerin ürettirilmesi 183
3.2.4.3 STMM düzeni, ölçüm düzeneği ve hasar oluşumları 190

4. SAYISAL HESAP MODELLERİ OLUŞTURULMASI VE DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRMALAR……207
4.1 Sigorta Tipi Mekanik Manşon Sonlu Eleman Modeli....207
4.1.1 Model tanımlamaları....207
4.1.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar....209
4.2 Sigorta Tipi Mekanik Manşon için Eşdeğer Çubuk Modeli....210
4.2.1 Model tanımları....210
4.3.2.1 Çekme rijitliği....211
4.2.1.2 Basınç rijitliği....212
4.2.1.3 Dayanım....214
4.2.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar....214
4.3 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsal için Eşdeğer Çubuk Modeli....216
4.3.1 Model tanımları....216
4.3.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar....217
4.3.2.1 2 numaralı deney numunesine ait karşılaştırmalar....218
4.3.2.2 4 numaralı deney numunesine ait karşılaştırmalar....219
4.4 Düzlem Çerçeve Deneyi için Eşdeğer Çubuk Modeli....220
4.4.1 Model tanımları....220
4.4.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar....222
5. SONUÇLAR....225
KAYNAKLAR....229
ÖZGEÇMİŞ....235

KISALTMALAR

ACI374.1-05 **:** Guide for Testing Reinforced Concrete Structural Elements under Slowly Applied Simulated Seismic Loads
FEMA 356 **:** Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings
ISO 15835 **:** Steels for the Reinforcement of Concrete – Reinforcement Couplers for Mechanical Splices of Bars
İTÜ **:** İstanbul Teknik Üniversitesi
LDP **:** Large Displacement Pattern
STMM **:** Sigorta Tipi Mekanik Manşon
TDY 2018 **:** Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği

SEMBOLLER

α^+ **:** Değiştirilebilir plastik mafsalın pozitif moment taşıma kapasitesinin kirişe ait pozitif akma momenti kapasitesine oranı

α^- **:** Değiştirilebilir plastik mafsalın negatif moment taşıma kapasitesinin kirişe ait negatif akma momenti kapasitesine oranı

α_1 **:** Pozitif kuvvetten sıfıra boşaltma sırasında pivot noktasını bulan katsayı

α_2 **:** Negatif kuvvetten sıfıra boşaltma sırasında pivot noktasını bulan katsayı

β_1 **:** Sıfır yükten pozitif kuvvete doğru ters yükleme için pivot noktasını konumlandırma katsayısı

β_2 **:** Sıfır yükten negatif kuvvete doğru ters yükleme için pivot noktasını konumlandırma katsayısı

η **:** Plastik şekildeğiştirmeden sonra oluşacak dayanım azalımının katsayısı

A_{fuse} : Sigorta elemanın kesit alanı

A_{jacket} : Çelik ceketin kesit alanı

$A_{\text{steel mace}}$: Gürzün kesit alanı

$A_{\text{mace bolt}}$: Gürz yuvasının kesit alanı

$A_{\text{main coupler1}}$: Ana manşonun kesit alanı

$A_{\text{main coupler2}}$: Ana manşonun çelik ceket içinde kalan kesitinin alanı

E_s : STMM elemanlarında kullanılan çeliğin elastisite modülü

$E_{\text{s_fuse}}$: Sigorta elemanın elastisite modülü

E_s^T : Sigorta elemanının tanjant modülü

f_y : Paslanmaz çeliğin akma dayanımı

F_y : Sigorta elemanının çekme kuvveti kapasitesi

k_c^e : Sigorta eleman akmadan ve ceket devreye girmeden STMM eşdeğer basınç rijitliği

k_{c_j} : Basınç etkisi altında STMM eşdeğer basınç rijitliği

$k_{c_j}^T$: Önce çekme kuvvetine maruz kalan STMM'nin ceket devreye girdikten sonra sahip olduğu eşdeğer basınç rijitliği

k_c^T : Basınç durumundaki STMM'nin akma durumunda ortaya çıkan rijitlik

k_{contact} : Çelik ceketin devreye girmesi ile sisteme dahil olan rijitlik

k_{fuse}^T : Sigorta elemanın çekme etkisindeki eşdeğer rijitliği

k_{eq1}^e : Basınç durumunda ortak rijitlik terimi

k_{eq2}^{e} : Çekme durumunda ortak rijitlik terimi

k_{eq2}^{T} : Sigorta elemanın akmasından sonra eşdeğer tanjant rijitliği

k_{eq3} : Çelik ceketin teması ile oluşan basınç rijitliği

k_{jacket} : Çelik ceket rijitliği

k_{t}^{e} : STMM elastik çekme rijitliği

k_{t}^{T} : STMM'nin akma sonrası çekme rijitliği

$k_{\text{steel mace}}$: Gürzün eşdeğer rijitliği

$k_{\text{mace bolt}}$: Gürz yuvasının eşdeğer rijitliği

$k_{\text{main coupler1}}$: Ana manşonun eşdeğer rijitliği

$k_{\text{main coupler2}}$: Ana manşonun çelik ceket içerisinde kalan kesitinin eşdeğer rijitliği

k_{fuse}^{e} : sigorta elemanın eşdeğer elastik çekme rijitliği

L_1 : Sigorta elemanının uzunluğu

L_2 : Ana manşonun çelik ceket içinde kalan bölümünün uzunluğu

L_3 : Çelik ceket uzunluğu

L_4 : Ana manşonun serbest bölgesinin uzunluğu

L_5 : Gürz yuvasının uzunluğu

$M^{+}_{\text{u_con}}$: Değiştirilebilir plastik mafsalın pozitif moment taşıma kapasitesi

$M^{-}_{\text{u_con}}$: Değiştirilebilir plastik mafsalın negatif moment taşıma kapasitesi

$M^{+}_{\text{y_beam}}$: Önüretimli kirişin pozitif akma momenti kapasitesi

$M^{-}_{\text{y_beam}}$: Önüretimli kirişin negatif akma momenti kapasitesi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : İyileştirilmiş çelik ceketli STMM numunelerinin değerlendirilmesi. **.. 72**
Çizelge 3.2 : STMM prototip 3 numunenelerinin değerlendirilmesi. **..... 76**
Çizelge 3.3 : Çelik ceket öncesi deneylerin test matrisi **..... 99**
Çizelge 3.4 : Pilot deneylere ait yerdeğiştirme, moment ve sönümlenen enerji değerleri **..... 170**
Çizelge 3.5 : %3,5 göreli ötelenme seviyesindeki yük ve en büyük kuvvet değerleri **..... 178**
Çizelge 3.6 : Başlangıç rijitlikler ve sekant rijitlikleri**..... 178**
Çizelge 3.7 : Bağıl enerji sönümleme oranları **..... 179**
Çizelge 4.1 : STMM bileşenleri için hesaplanan sertlik değerleri**..... 215**
Çizelge 4.2 : STMM bileşenleri için hesaplanan sertlik değerleri**..... 215**
Çizelge 4.3 : Değiştirilebilir mekanik mafsal ve deney kirişlerinin eğilme momentleri **..... 218**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : TDY 2018'de belirtilen MAB1 birleşimi **2**
Şekil 1.2 : TDY 2018'de belirtilen MAB2 birleşimi **3**
Şekil 1.3 : TDY 2018'de belirtilen MAB3 birleşimi **3**
Şekil 1.4 : TDY 2018'de belirtilen MAB4 birleşimi **4**
Şekil 1.5 : SAFECAST projesinde incelenen iki tip moment aktaran kolon-kiriş birleşimi,[11]. **5**
Şekil 1.6 : SAFECAST projesinde incelenen bir moment aktaran kolon-kiriş birleşimi için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması, [11] **5**
Şekil 1.7 : Girgin vd.'nin deney numunesi, [12,13] **6**
Şekil 1.8 : Ala-Sawa yöntemi ile gerçekleştirilen kolon-kiriş birleşimi, [15] **7**
Şekil 1.9 : RS 25/40 ürünü ile oluşturulan kolon-kiriş birleşim detayı, [16]..... **7**
Şekil 1.10 : Moment aktaran kolon kiriş birleşimi uygulama örnekleri, [17] **8**
Şekil 1.11 : Nzabonimpa vd oluşturduğu hibrit tasarım, [18] **9**
Şekil 1.12 : Aninthaneni vd. tarafından oluşturalan sökülebilir mekanik kolon-kiriş bağlantı detayı, [21] **10**
Şekil 1.13 : Monolitik ve prekast kiriş kolon bağlantı deneyi numuneleri, [22] **10**
Şekil 1.14 : Kolon – temel birleşimleri a) vidalanmış çıkıntılı çubuklar b) cıvatalı soketler c) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler d) Kuplörler, [23]. **11**
Şekil 1.15 : Moment – tepe öteleme oranı grafikleri a,b) vidalanmış çıkıntılı çubuklar c,d) cıvatalı soketler e,f) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler g,h) Kuplörler, [23]..... **12**
Şekil 1.16 : Her bir kolona ait Moment – dönme grafikleri a) vidalanmış çıkıntılı çubuklar b) cıvatalı soketler c) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler d) Kuplörler, [23]..... **13**
Şekil 1.17 : Hsen-Han Khoo vd. oluşturduğu hibrit tasarım ve alt tasarımlara ait görseller, [24] **14**
Şekil 1.18 : Ghayeb vd. kiriş kolon birleşimleri ve detaylarına ait görseller [25]..... **15**
Şekil 1.19 : Baran vd. tasarladığı kiriş kolon birleşimleri ve detayları, [26,27]..... **16**
Şekil 1.20 : Dywidag Ductile connector kullanılan kiriş kolon birleşimleri, [28] **17**
Şekil 1.21 : Li vd. tasarlandığı mekanik kiriş-kolon birleşimine ait detaylar, [29]... **18**
Şekil 1.22 : Chun-Lin Wang vd. tarafından tasarlanan bambu şekilli enerji sönümleyici ve yorulma test düzeneği, [30] **19**
Şekil 1.23 : Bambu şekilli enerji sönümleyici içeren ardgermeli kiriş kolon bağlantısına ait detaylar, [30] **19**
Şekil 1.24 : Önüretimli kolon kiriş bağlantısı için Kang ve Lee'nin önerdiği kuru birleşim yöntemi, [33]. **20**
Şekil 1.25 : Choi vd tarafından geliştirilmiş kolon – kiriş birleşim yöntemi, [34].... **20**
Şekil 1.26 : Wu vd'nin betonarme kolon – çelik kiriş birleşimleri, [35]..... **21**
Şekil 1.27 : Zhang vd'nin önüretimli hibrit kiriş kolon birleşimleri:(a) Sünek rodlarla birleştirilmiş uç plakalar (b) çelik plaka ile birleştirilmiş uç plakalar, [36] **22**
Şekil 1.28 : Zhong vd'nin guseli önüretimli kiriş kolon birleşim yöntemi, [37]..... **23**

Şekil 1.29 : Esmaelli ve Ahooghalandary tarafından önerilen yarı kuru yarı ıslak kiriş kolon birleşim yöntemi, [38] **24**
Şekil 1.30 : Li vd. kendiliğinden merkezlenen kolon kiriş birleşimi, [39] **24**
Şekil 1.31 : Lu vd. nin harç dolgulu kapsül birleşimi, [40] **24**
Şekil 1.32 : Alcocer vd.'nin ıslak birleşimli kiriş kolon numuneleri, [42] **25**
Şekil 1.33 : Prekast kiriş kolon birleşim karşılaştırması a) konvansiyonel yöntem b) Alternatif başlıklı yöntem, [45] **26**
Şekil 1.34 : Lacerda vd'nin harç dolgulu guseli kolon kiriş birleşimleri, [46] **27**
Şekil 1.35 : Lu vd. tarafından önerilen kolon kiriş ıslak birleşimi, [47] **28**
Şekil 1.36 : Yan vd. tarafından önerilen kolon kiriş ıslak birleşimi, [48] **29**
Şekil 2.1 : Betonarme çerçevelerde yanal kuvvetlerin sonucu oluşan karakteristik çatlak oluşumu, [51] **33**
Şekil 2.2 : Tipik bir kiriş kolon birleşimi ve kiriş uç kuvvetleri **34**
Şekil 2.3 : Tipik bir kiriş kolon birleşiminde uç kuvvetlerinin tekil yüklere indirgenmesi **35**
Şekil 2.4 : Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın genel tasarımına ait ana fikir ... **36**
Şekil 2.5 : STMM prototip 1'e ait üç boyutlu görsel tasarım **37**
Şekil 2.6 : STMM prototip 1'e ait montaj öncesi üç boyutlu görsel tasarımı **38**
Şekil 2.7 : STMM prototip 1'e ait montaj sonundaki üç boyutlu görsel tasarımı **39**
Şekil 2.8 : Üretilmiş STMM prototip 1 ..... **39**
Şekil 2.9 : STMM prototip 2'ye ait üç boyutlu tasarım görselleri **40**
Şekil 2.10 : STMM prototip 2'de gerçekleştirilen ilk değişiklikler **42**
Şekil 2.11 : STMM prototip 2'de gerçekleştirilen çelik ceket eklentisi **42**
Şekil 2.12 : STMM prototip 3'e ait üç boyutlu tasarım görselleri **43**
Şekil 2.13 : Kayma bileşenine ait üç boyutlu tasarım görselleri **44**
Şekil 2.14 : Alın levhalarının ve manşonların hazırlanması; a) kolon alın levhası ve manşonları b) kiriş alın levhası ve manşonları **46**
Şekil 2.15 : Kayma bileşenlerinin tamamlanmış montajı **47**
Şekil 2.16 : Gürzlü vida montajlama aşamaları **47**
Şekil 2.17 : Sigorta eleman ve ana manşonun montajlama aşamaları **48**
Şekil 2.18 : Çelik ceketlerin montajlama aşamaları **49**
Şekil 3.1 : Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneyleri **53**
Şekil 3.2 : Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneylerine ait hasar görünümleri **53**
Şekil 3.3 : Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneylerine ait gerilme-şekildeğiştirme karşılaştırma grafiği **54**
Şekil 3.4 : Alüminyumdan üretilen ön tasarım numunelerinin hasar durumları **55**
Şekil 3.5 : Alüminyumdan üretilmiş ön tasarım deneylerinin gerilme-şekildeğiştirme karşılaştırma grafiği **56**
Şekil 3.6 : A316 paslanmaz çelikten üretilmiş numunelerin görselleri ve grafikleri **56**
Şekil 3.7 : Farklı diş adımlarına sahip numunelerin deney sonu görselleri **58**
Şekil 3.8 : Farklı diş adımlarına sahip numunelerin gerilme - şekildeğiştirme grafikleri **59**
Şekil 3.9 : Farklı diş adımlarına sahip numunelerin %5 şekildeğiştirme değerine kadar sahip olduğu gerilme-şekildeğiştirme grafikleri **60**
Şekil 3.10 : ISO 15835-2009 düşük çevrimli yorulma testi yükleme protokolü,[59] **62**
Şekil 3.11 : ISO 15835-2009 düşük çevrimli yorulma testleri **62**
Şekil 3.12 : Düşük çevrimli yorulma testlerine ait gerilme - şekildeğiştirme grafikleri **63**
Şekil 3.13 : Sigorta tipi mekanik manşon prototip 2'e ait çekme deneyi **64**

Şekil 3.14 : Sigorta tipi mekanik manşon prototip 2 deney etkileşim diyagramı **65**
Şekil 3.15 : Malzeme testlerinde kulanılan coupon deney numuneleri **66**
Şekil 3.16 : Silindirik numunelerin çevrimsel ve monotonik test sonuçları **66**
Şekil 3.17 : Altıgen numunelerin çevrimsel ve monotonik test sonuçları **67**
Şekil 3.18 : Yerdeğiştirme protokolü (ISO 15835-2-2018), [61] **67**
Şekil 3.19 : 510mm uzunluğundaki çelik ceketli STMM kesit geometrileri **68**
Şekil 3.20 : Çelik cekete sahip numunelerin kuvvet - yerdeğiştirme etkileşim diyagramları **69**
Şekil 3.21 : Çelik ceketli numunelerin hasar görselleri **69**
Şekil 3.22 : J-STMM-50-B'nin hasar gözlemleri **69**
Şekil 3.23 : Çelik ceketli STMM'lerin geliştirilmiş elemanları **70**
Şekil 3.24 : Uygulanan yükleme protokolleri **70**
Şekil 3.25 : J-STMM-100-I'nın kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri **71**
Şekil 3.26 : J-STMM-100-I'nın enerji değişimleri **71**
Şekil 3.27 : J-STMM-150-I'nın kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri **72**
Şekil 3.28 : İyileştirilmiş çelik ceketli numunelerin hasar gözlemleri **73**
Şekil 3.29 : STMM porotoip 3'e ait bileşenler, boyutlar ve deney numuneleri (tüm boyutlar mm'dir.) **73**
Şekil 3.30 : STMM prototip 3 monotonik testler **73**
Şekil 3.31 : STMM prototip 3 düşük çevrimli yorulma testleri **75**
Şekil 3.32 : STMM prototip 3-T1 numuneleri LDP testleri **75**
Şekil 3.33 : STMM prototip 3-T2 numuneleri LDP testleri **76**
Şekil 3.34 : Yığışımlı enerji sönümleme kapasiteleri **76**
Şekil 3.35 : Pilot kiriş kolon bağlantı deney taslağı **78**
Şekil 3.36 : Pilot kolona ait teknik çizimler **80**
Şekil 3.37 : Pilot kirişe ait teknik çizimler **81**
Şekil 3.38 : Pilot kolonun üretim görselleri **82**
Şekil 3.39 : Pilot kirişin üretim görselleri **83**
Şekil 3.40 : Pilot kolon ve kirişlerin tamamlanmış üretim görselleri **83**
Şekil 3.41 : Pilot kiriş kolon bağlantısı deney alanı ve tasarımı **85**
Şekil 3.42 : Pilot deneylerin yükleme protokolü **86**
Şekil 3.43 : Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon deneyi **87**
Şekil 3.44 : 22,0mm hedef yerdeğiştirmede yalın birleşim bölgesi görünümü **88**
Şekil 3.45 : Kayma levhasının teması ve sebep olduğu iş sıyrılması **88**
Şekil 3.46 : Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon deney sonu **89**
Şekil 3.47 : Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon karşılıklı etki diyagramları **90**
Şekil 3.48 : Beton dolgulu pilot kolon kiriş bağlantısı ıslak birleşim yapımı **91**
Şekil 3.49 : Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon deneyi **93**
Şekil 3.50 : Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon – ilk çatlaklar **94**
Şekil 3.51 : 22,0mm hedef yerdeğiştirmede beton dolgulu birleşim görünümü **95**
Şekil 3.52 : Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon deney sonu **96**
Şekil 3.53 : Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon karşılıklı etki diyagramları **97**
Şekil 3.54 : Çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı deney taslağı **98**
Şekil 3.55 : Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait kirişlerin teknik çizimi **100**
Şekil 3.56 : Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait kiriş görselleri **101**
Şekil 3.57 : Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait tamamlanmış kiriş görselleri **102**
Şekil 3.58 : Çelik ceket öncesi deneylerin yükleme protokolü **103**
Şekil 3.59 : 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi **104**

Şekil 3.60 : 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **105**
Şekil 3.61 : 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **107**
Şekil 3.62 : 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri..... **107**
Şekil 3.63 : 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi – karşılıklı etki diyagramları..... **108**
Şekil 3.64 : 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları..... **110**
Şekil 3.65 : 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi..... **111**
Şekil 3.66 : 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **112**
Şekil 3.67 : 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **112**
Şekil 3.68 : 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri..... **113**
Şekil 3.69 : 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi – karşılıklı etki diyagramları..... **114**
Şekil 3.70 : 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları..... **115**
Şekil 3.71 : 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi..... **116**
Şekil 3.72 : 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **117**
Şekil 3.73 : 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **117**
Şekil 3.74 : 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri..... **119**
Şekil 3.75 : 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi – karşılıklı etki diyagramları..... **120**
Şekil 3.76 : 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları..... **121**
Şekil 3.77 : 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testine ait taslak görseli **122**
Şekil 3.78 : 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi..... **122**
Şekil 3.79 : 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **123**
Şekil 3.80 : 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri..... **124**
Şekil 3.81 : 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi – karşılıklı etki diyagramları..... **126**
Şekil 3.82 : 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları..... **127**
Şekil 3.83 : Çelik ceket kullanılan deneylerin yükleme protokolü..... **128**
Şekil 3.84 : 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi..... **129**
Şekil 3.85 : 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü..... **130**
Şekil 3.86 : Kiriş alt ve üst yüzeylerinden alınan görseller **131**
Şekil 3.87 : Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi **132**
Şekil 3.88 : 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri..... **133**
Şekil 3.89 : 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları **134**
Şekil 3.90 : 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – STMM elemanlarının şekildeğştirme ölçüm diyagramları **135**

Şekil 3.91 : 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları **135**
Şekil 3.92 : 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi **137**
Şekil 3.93 : 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü **138**
Şekil 3.94 : Kiriş alt ve üst yüzeylerinden alınan görseller **139**
Şekil 3.95 : Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi **140**
Şekil 3.96 : 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri **141**
Şekil 3.97 : 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları **142**
Şekil 3.98 : 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları **143**
Şekil 3.99 : 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi **145**
Şekil 3.100 : 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü **146**
Şekil 3.101 : Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller **147**
Şekil 3.102 : Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi **148**
Şekil 3.103 : 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri **149**
Şekil 3.104 : 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları **151**
Şekil 3.105 : 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları **152**
Şekil 3.106 : 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi **154**
Şekil 3.107 : 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü **155**
Şekil 3.108 : Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller **156**
Şekil 3.109 : Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi **157**
Şekil 3.110 : 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri **158**
Şekil 3.111 : 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları **160**
Şekil 3.112 : 4 nolu çelik ceketl kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları **161**
Şekil 3.113 : 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi **163**
Şekil 3.114 : 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü **164**
Şekil 3.115 : Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller **165**
Şekil 3.116 : Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi **165**
Şekil 3.117 : 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri **166**
Şekil 3.118 : 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları **168**
Şekil 3.119 : 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları **169**
Şekil 3.120 : Pilot deneyler gerçekleştirilen çevrimlerdeki sönümlenen enerji değerleri **171**
Şekil 3.121 : Çelik ceket öncesi deney numunelerine ait yük-yerdeğiştirme etkileşim diyagramları ve bu diyagramlara ait iskelet eğrileri **172**

Şekil 3.122 : Çelik ceket öncesi numunelerinde sönümlenen enerji değerleri – göreli ötelenme etkileşim diyagramları **173**
Şekil 3.123 : Çelik ceketli deney numunelerine ait yük-yerdeğiştirme iskelet eğrileri **174**
Şekil 3.124 : Çelik ceket kullanılan deney numunelerine ait rijitlikler ile normaliz edilmiş rijitlik – göreli ötelenme karşılaştırmaları. **175**
Şekil 3.125 : Çelik ceketli numunelerde sönümlenen enerji değerleri – göreli ötelenme etkileşim diyagramları **176**
Şekil 3.126 : Sönümlenen enerji değerleri – göreli ötelenme etkileşim diyagramları **177**
Şekil 3.127 : Çerçeve deneyi için oluşturulan öntasarım **180**
Şekil 3.128 : Yükleme duvarı önündeki çerçeve deneyinin görünümü **181**
Şekil 3.129 : Çerçeve deneyi için oluşturulan yükleme protokolü **182**
Şekil 3.130 : Çerçeve deneyine ait kirişlerin teknik çizimleri **184**
Şekil 3.131 : Çerçeve deneyine ait kolonların teknik çizimleri **185**
Şekil 3.132 : Çerçeve deneyine ait soket temelllerin teknik çizimleri **186**
Şekil 3.133 : Soket temel üretim görselleri **187**
Şekil 3.134 : Düzlem çerçeveye ait kolon ve kirişlerin üretim görselleri **188**
Şekil 3.135 : Düzlem çerçeve taşıyıcı elemanların üretim görselleri **189**
Şekil 3.136 : Düzlem çerçeve deneyine ait STMM düzeni **190**
Şekil 3.137 : Düzlem çerçeve deneyine ait genel görünüm **191**
Şekil 3.138 : Düzlem çerçeve ölçüm düzeneğine ait yerdeğiştirme ölçerler **192**
Şekil 3.139 : 3mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar **193**
Şekil 3.140 : 4,5mm, 6,5mm ve 10mm yerdeğiştirme hedeflerinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar **194**
Şekil 3.141 : 15mm ve 20mm yerdeğiştirme hedeflerinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar **195**
Şekil 3.142 : 30mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar ... **196**
Şekil 3.143 : 55mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar ... **197**
Şekil 3.144 : 70mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar ... **198**
Şekil 3.145 : 95mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar ... **199**
Şekil 3.146 : Düzlem çerçeveye ait taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirmesi etkleşim grafiği **200**
Şekil 3.147 : Düzlem çerçeveye ait kolon elemanlarının taban kesiti eğilme deformasyonları **200**
Şekil 3.148 : En büyük çatlak genişliği dağılımları. **201**
Şekil 3.149 : Kolon alt kesitlerine ait mutlak en büyük dönmeler **201**
Şekil 3.150 : Kiriş-kolon bağlantılarına ait dönmeler **202**
Şekil 3.151 : Kiriş-kolon bağlantılarına ait mutlak en büyük dönme değerlerinin FEMA356 iileri düzey hasar durumuyla karşılaştırılması **203**
Şekil 3.152 : Yanal rijitlik dağılımları **204**
Şekil 3.153 : Dayanım azalımları **204**
Şekil 3.154 : Düzlem çerçeveye ait kümülatif enerji sönümleme grafiği **205**
Şekil 4.1 : STMM'nin sonlu eleman ağıyla oluşturulmuş sayısal modellemesi **208**
Şekil 4.2 : ABAQUS ile gerçekleştirilmiş eksenel çekme ve yorulma testleri **209**
Şekil 4.3 : ABAQUS modelleri ile deney sonuçlarını karşılaştırma grafikleri **210**
Şekil 4.4 : STMM prototip 3 sayısal modellemesi **211**
Şekil 4.5 : Çelik ceketli STMM için rijitlik, boşluk ve mukavemet tanımlarına sahip tipik bir döngü **214**

Şekil 4.6 : ISO protokolüne tabi tutulan numunelerin deneysel ve sayısal kuvvet-yerdeğiştirme etki diyagramlarının karşılaştırılması **215**
Şekil 4.7 : LDP protokolüne tabi tutulan numunelerin deneysel ve sayısal kuvvet-yerdeğiştirme etki diyagramlarının karşılaştırılması **216**
Şekil 4.8 : Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın sayısal modellemesi **216**
Şekil 4.9 : Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal deneylerinin sayısal modellemesi **218**
Şekil 4.10 : 2 numaralı deney numunesine ait farklı histeretik modeller için sayısal ve deneysel sonuçların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması **219**
Şekil 4.11 : 4 numaralı deney numunesine ait farklı histeretik modeller için sayısal ve deneysel sonuçların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması **220**
Şekil 4.12 : Düzlem çerçevenin üç boyutlu analiz modeli **221**
Şekil 4.13 : Beton ve çelik için düzlem çerçevenin üç boyutlu analiz modeli **222**
Şekil 4.14 : İki katlı düzlem çerçevenin sayısal çubuk modeli **222**
Şekil 4.15 : Deneysel ve sayısal çalışmaların kuvvet – yerdeğiştirme etkileşim diyagramları ve zarf eğrileri **223**

ÖNÜRETİMLİ BETONARME YAPILARDA MOMENT AKTARAN YENİ BİR KİRİŞ-KOLON BAĞLANTISI

ÖZET

Bu tez çalışmasında, önüretimli betonarme kiriş ve kolon elemanların birbirleri ile bağlantılarını gerçekleştirebilmek için geleneksel yöntemlerden farklı olarak yeni bir mekanik bağlantı detayı geliştirilmiştir. Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal olarak adlandırılan ve eğilme momenti dâhil olmak üzere kiriş uç kuvvetlerini kolon üstündeki düğüm noktasına aktaran birleşim ile ilgili detaylar verilmiştir. Basit, mekanik, yivli, çabuk monte edilebilen ve değiştirilebilir kabiliyetlere sahip olan birleşim yöntemi ile ilgili gerçekleştirilen araştırmalar, tez kapsamında üç ana bölümde toplanmıştır. İlk bölüm değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın tasarlanması ve onu oluşturan mekanizmaların oluşturulmasına ayrılmıştır. Kiriş uç kuvvetlerinin aktarımı için etkin bir geometri geliştirilerek ve montaj kriterlerinin tamamını karşılanarak özgün bir birleştirme yöntemi geliştirilmiştir. İkinci bölümde, değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve alt bileşenlerini içerecek şekilde kiriş kolon birleşimini temsil eden düğüm noktası ve çerçeve deneyleri ile tasarım iyileştirmeye yönelik çok sayıda deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın deney sonuçlarının bilgisayar ortamında oluşturulması ve sayısal modelleme yapılarak çerçeve sistemlerde analizler gerçekleştirilmesi de çalışmanın üçüncü bölümünü oluşturmaktadır.

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal, birbirinden bağımsız olarak çalışan iki alt bileşenden meydana gelen ve kiriş iç kuvvetlerini kolonlara aktaran bir mekanizmadır. Bu alt bileşenler kesme kuvvetini aktaran kayma bileşeni ile sigorta tipi mekanik manşon olarak adlandırılan ve eğilme momentinden oluşan kuvvet çiftlerini aktaran moment bileşenidir. Bu çalışma kapsamında aşamalı olarak geliştirilen plastik mafsal mekanizması, yapısal kusurları tolere edebilme, taşıyıcı eleman kesitlerine kıyasla daha küçük akma moment kapasitesine sahip, değiştirilebilir, mekanik bir birleşim yöntemidir. Islak birleşime ihtiyaç duyulmadığından montaj süresi kısadır. Yeter mertebede basit bir tasarıma sahip olması nedeniyle işçilik harcaması azalmaktadır.

Ön tasarımın iyileştirilmesi ve mevcut kusurlarının tespit edilerek giderilmesi amacıyla, değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın sigorta tipi mekanik manşonu için "Betonarme eleman için kullanılan çeliklerin mekanik birleşimlerini sağlayan manşonlar standardı (ISO 15835-2018)" na uygun olarak çok sayıda çekme ve basınç deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen pek çok sonuç baz alınarak tespit edilen kusurlar geometrik değişiklikler ve yeni parçalar eklenmesi yolu ile hedeflenen tasarıma ulaşılmıştır. Bu tez kapsamında basınç kapasitesi elastik sınırlar içerisinde kalan, çekme kapasitesi ise tasarımcının belirlediği düzeyde olan bir *"sigorta tipi mekanik manşon"* geliştirilmiştir.

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve onun alt bileşenleri olan kayma ve moment bileşenlerinin performans kapasitelerinin tespiti için kolon kiriş birleşim bölgesini ve düğüm noktasını temsil eden 1/1 ölçekli numuneler tersinir tekrarlı çevrimsel

yüklemeler etkisinde test edilmiştir. Oluşturulan ölçüm düzenekleri ile kiriş uç yerdeğiştirmesi, düğüm noktasında meydana gelen dönme, kolon-kiriş birleşim bölgesi dönmesi, kirişte meydana gelen düzlem dışı yerdeğiştirmeleri, kayma bileşeninde meydana gelen eksenel doğrultudaki yerdeğiştirmeler, sigorta tipi mekanik manşonlarda meydana gelen eksenel boy değişimleri, şekildeğiştirmeler, sisteme dışarıdan verilen kuvvet değişimleri kayıt altına alınmıştır. Çevrimsel davranış ile elde edilen genlikler, süneklikler, enerji sönümleme değerleri, iç kuvvet taşıma kapasiteleri ve dayanım kaybı gibi parametreler irdelenmiştir.

Düğüm noktası deneylerinden elde edilen sonuçların yeterli görülmesi sonrasında, değiştirilebilir mekanik plastik mafsal fikri ½ ölçekli bir açıklıklı ve iki katlı bir düzlem çerçevede uygulanmıştır. Soket temellerin üstünde kalan bölümün yüksekliği 3m, kolonlar arası net açıklığın ise 2.8m olduğu düzlem çerçevedeki bütün kiriş kolon bağlantıları değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ile gerçekleştirilmiş ve her iki katın kiriş hizasında oluşturulan yükleme noktaları ile tersinir tekrarlı çevrimsel harekete maruz bırakılmıştır. Başarıyla tamamlanan deneyler sonucunda %5 göreli kat öteleme değerine kadar düğüm noktaları ve değiştirilebilir mekanik plastik mafsalların etkin olarak çalışmaya devam ettiği görülmüştür. Sigorta tipi mekanik manşonlarda %25'e ulaşan eksenel uzama değerleri elde edilmiştir. Büyük genlikli ve oldukça sünek kuvvet – tepe yerdeğiştirmesi grafikleri elde edilmiş, görece yüksek çevrimsel enerjiler elde edilmiştir.

Sigorta tipi mekanik manşonun ve değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın doğrusal ve doğrusal olmayan yay ve link elemanlar kullanılarak sayısal modellemesi yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılan yükleme protokolünün zamana bağlı yerdeğiştirme değerleri sayısal analiz modellerine de uygulanmıştır. Deneysel sonuçlar sayısal modeller kullanılarak yeterli başarı ile temsil edilebilmiştir. Buna ek olarak, düzlem çerçeve deneyleri değiştirilebilir mekanik plastik mafsalların "link elemanlar" ile modellendiği bir eşlenik sayısal örnekle de çözülmüştür. Basit modelleme tekniğinin de yeter doğrulukta sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Bu tezde gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde bir düzlem çerçeve üzerinde plastik mafsal oluşumunun tasarlanan mekanizmada meydana gelmesi sağlanmıştır. İleri düzey hasar seviyeleri sırasında kiriş elemanlar ve kolon elemanlarda hasar oluşumu engellenmiş, düğüm noktasında kabul edilebilir seviyelerde hasar oluşmuştur. Düğüm noktası hasarlarının ise düzlem çerçeve deneylerinde kullanılan numuneye yerleştirilen kayma levhalarının yeter mertebede ölçülendirilememesi olduğu düşünülmektedir. Hasar düzeyinin düşük olması sebebiyle gerçek yapı uygulamalarında bu durumun önüne geçilebileceği düşünülmektedir.

Doktora tez çalışmasının konusunu oluşturan "bağlantı mekanizması" başarılı sonuçları ile hem özgün ve yenilikçi hem de mekanik ve değiştirilebilir bir yöntemin sektöre ve literatüre kazandırılması sağlanmıştır.

A NEW MOMENT RESISTING BEAM TO COLUMN CONNECTION FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

SUMMARY

In this thesis, a new mechanical connection detail has been developed, different from traditional methods, in order to connect precast concrete beam and column elements with each other. Details are given about the connection called the replaceable mechanical plastic hinge, which transfers the beam end forces, including the bending moment, to the joint on the column. The researches on the simple, mechanical, threaded, quick-assembled and replaceable joint method are gathered in three main sections within the scope of the thesis. The first section is devoted to designing the replaceable mechanical plastic joint and developing the mechanisms that create the hinge. A unique connection method has been developed by improving an effective geometry for the transferring of beam end forces and fullfilling all the assembly criteria. In the second part, a large number of experimental studies were carried out for design improvement with joint point and frame experiments representing beam-column connection including replaceable mechanical plastic hinges and sub-components. The third part of the study is to simulate the test results of the replaceable mechanical plastic hinge in computer programs using the finite element method and to perform analyzes in frame systems by creating numerical models.

The replaceable mechanical plastic hinge is a mechanism that consists of two sub-components that work independently of each other and transfers the beam's internal forces to the columns. These sub-components are the shear component that transfers the shear force and the moment component that transfers the force couples, which is called the fuse-type mechanical coupler and consists of bending moment. The plastic hinge mechanism, which was developed gradually within the scope of this study, is a replaceable, mechanical joining method that can tolerate structural defects and has a smaller yield moment capacity compared to load bearing element sections. As there is no need for wet connections, the assemblage time is short. Because of its simple enough design, labor expenditure is reduced.

In order to improve the preliminary design and to detect and eliminate existing defects, numerous tensile and compression tests have been carried out in accordance with the mechanical couplings standard ISO 15835-2018 (Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars) for the fuse type mechanical coupler of the replaceable mechanical plastic hinge. Based on the many results obtained, geometric changes and new parts were added gradually in order to eliminate the detected defects, therefore the final design was finally reached. Within the scope of this thesis, a "fuse type mechanical coupler" has been developed with a compressive capacity within elastic limits and a tensile capacity at the level determined by the designer.

1/1 scaled experimental specimens representing the column-beam connection and joint section were tested under by applying a reversible cyclic loading protocol in order to

determine the performance capacities of the replaceable mechanical plastic hinge and its sub-components, shear and moment components. During the tests, two different arrangement of longitudinal reinforcement of beam specimens, symmetrical and asymmetrical, were carried out. In the symmetrical arrangement, there are two rows of longitudinal reinforcement at the top and two rows at the bottom, while in the asymmetric arrangement, there are four rows of longitudinal reinforcement at the top and two rows of longitudinal reinforcement at the bottom. Beam end displacement, rotation at the joint, rotation of the beam-column connection, out-of-plane displacements in the beam, displacements in the axial direction that occur in the shear component, axial length changes in the fuse type mechanical couplers, deformations, changes of external forces given the system were recorded with the experiment measurement setups. Parameters such as amplitudes, ductility, energy dissipation values, internal force loading capacities and strength loss obtained by cyclic behavior are examined seperately one by one.

After the results obtained from the joint tests were deemed satisfactory, the idea of the replaceable mechanical plastic hinge was implemented in a two-storey plane frame with a ½ scale opening. All beam-column connections in the plane frame, where the height of the section above the socket foundations is 3m and the net spacing between the columns is 2,8m, were made with replaceable mechanical plastic hinges. Both floors were exposed to reversible cyclic displacement with the loading points created at the beam level. As a result of the successfully completed experiments, it has been observed that the joint points and replaceable mechanical plastic hinges continue to work effectively up to the 5% relative floor drift value. Axial elongation values of up to 25% were obtained in fuse type mechanical couplings. Large amplitude and highly ductile force-peak displacement graphs are obtained, and relatively high cyclic energies are obtained.

Numerical modeling of the fuse type mechanical coupler and the replaceable mechanical plastic hinge was done using linear and non-linear spring and link elements. During the comparison of the experimental and numerical studies, two different hysteresis models which are kinematic and pivot were used to model the link elements used in fuse-type mechanical couplers. Time-dependent displacement values of the loading protocol used in the experimental studies were also applied to the numerical analysis models. Experimental results could be represented with sufficient success using numerical models. In addition, beam-column connection using steel jackets and plane-frame experiments are also solved with a conjugate numerical examples in which replaceable mechanical plastic hinges are modeled with "link elements". The interaction diagrams of the base shear force-peak displacement values obtained from the numerical analyzes were compared with the graphs obtained from the experiments by comparing both the energy dissipation capacity and the skeletal curves. It has been determined that the simple modeling technique performed with the pivot model gives results with sufficient accuracy.

As a result of the studies carried out in this thesis, it has been ensured that the plastic hinge formation on a plane frame occurs in the designed mechanism. During advanced damage levels, damage to beam elements and column members was prevented, and acceptable levels of damage occurred at the joint point. The joint damage is thought to be due to the inability to measure the shear plates placed on the sample used in the plane frame tests. Due to the low level of damage, it is thought that this situation can be avoided in real building constructions.

With the successful results of the "connection mechanism", which is the subject of the thesis, a method that is both original and innovative, as well as mechanical and replaceable, has been brought to the sector and to the literature.

1. ÖNÜRETİMLİ BETONARME TAŞIYICI SİSTEMLERDE KİRİŞ-KOLON BAĞLANTILARI

1.1 Giriş

Yaklaşık iki yüzyıl önce İngiltere'de ortaya çıkan önüretimli yapı tekniği, yapıları saha dışında inşa etme ve onları kullanım noktalarına taşıma yöntemiyle geleneksel yöntemlerden farklı bir yapı üretim türü haline gelmiştir. 1840'lı yıllarda Amerika'nın Kaliforniya eyaletindeki Altına Hücum (Gold Rush) döneminde ise okyanusu aşan önüretimli yapılar, ikinci dünya savaşında tüm dünyada meydana gelen konut krizine hızlı cevap veren çözüm olmuştur,[1,2].

Önüretimli betonarme yapılar, malzeme ve üretim kalitesinin yanı sıra şantiyedeki hızlı ve kolay kurulum özellikleri ile kontrollü, güvenli bir inşaat ortamı sağlaması nedeniyle de tercih edilme sebebi olmuştur. Bu durum, özellikle bulonlu (mekanik) bağlantılar kullanıldığında daha da ön plana çıkmaktadır [3]. Çin'de 15 günde yapılan 30 katlı otel binası (Broad Group), [4] Amerika Brooklyn'de yapılmakta olan 32 katlı Atlantic Yards binası [5] ve İngiltere'de 224m yüksekliğinde %80'i önüretim olarak inşa edilmiş Leadenhall binası dikkat çeken projelerdir, [6]. Son olarak Çin menşeili bir firmanın Hindistan'daki 10 katlı yapıyı 28 saatte inşa etmesi, önüretimli yapı teknolojisine büyük saygı kazandırmıştır, [7].

Prefabrikasyonun yaklaşık 2 asırdır kullanılıyor olmasına karşın, dünya genelinde inşa edilmiş yapı stoğunun önemli bir oranı yerinde dökme betonarme sistemlerden oluşmaktadır. Önüretimli betonarme yapıların sismik kuvvetler etkisi altında yeterli performans gösterememesi de diğer üretim yöntemlerinin tercih edilmesine neden olmuştur. Bu durumun başlıca sebepleri ise bilgi yetersizliği, betonarme elemanların tasarımındaki yetersiz süreklilik ve ek dayanım ile bağlantıların kötü detaylandırılması şeklinde sıralanabilir, [3].

Ülkemizdeki önüretimli yapı üretiminin de dünyaya paralel olarak gerçekleştiği istatistiksel verilerle görülmektedir. Türkiye'de 2020 verilerine göre yaklaşık 95 milyon m3 beton üretilmiştir, [8]. Bu miktar, Türkiye'yi Avrupa'da birinci, dünyada

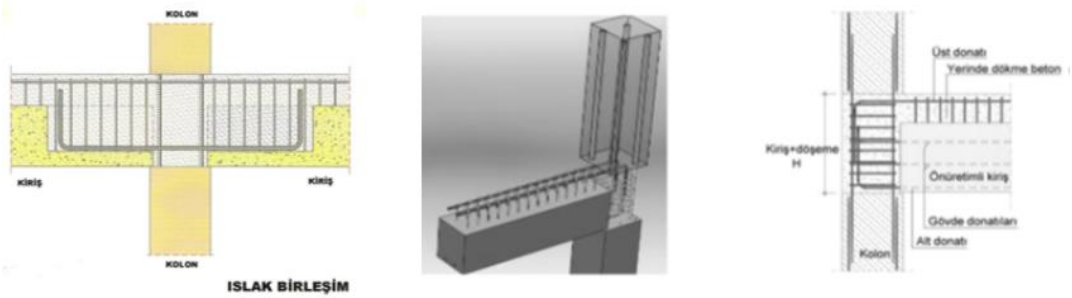
ise üçüncü en büyük beton üreticisi haline getirmektedir. Beton üretiminin ülkemizde bu denli fazla olmasına rağmen, bu miktarın yalnızca %1,7'si (1.703.980 m3) prefabrikasyon sektörü için üretilmiştir, [9].

Tüm bu gelişmelere karşın son on yılda çok sayıda araştırma gerçekleştirilmiş, tasarım yönetmeliklerinde gelişmeler meydana gelmiştir. Özellikle prekast yapıların sismik etkiler altında başarılı performanslar gösterebilmesi için moment aktaran bağlantılar tercih edilmiş, önüretimli betonarme çerçeveler monotonik yapılara benzetilerek kirişlerdeki eğilme momentinin yeniden dağıtılması sağlanmıştır. Bu sayede kolon momentlerini azaltmak ve yapısal taşıyıcı sistemin sürekliliğini sağlamak mümkün olmuş, prekast sistemlerin genel direncini iyileştirme anlamında dikkate değer ilerlemeler kaydedilmiştir, [3].

1.2 Geleneksel Yöntemler

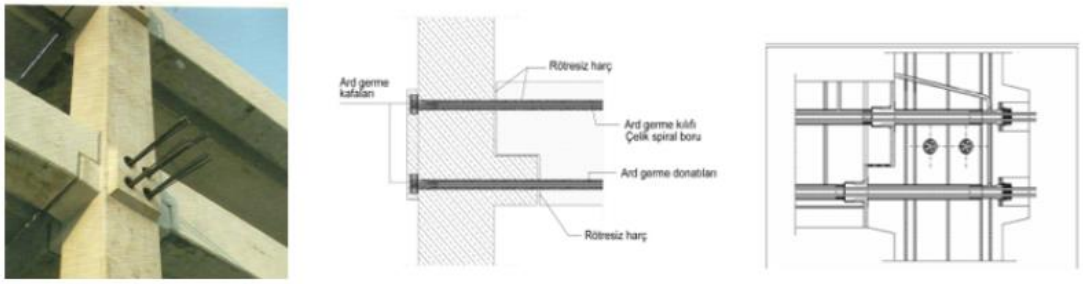
Önüretimli betonarme binalarda tersinir tekrarlı çevrimsel deprem yükleri altında moment aktaran bağlantıların oluşturulabilmesi ve sünek davranışın sağlanabilmesi için Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018 (TDY 2018)'de 4 farklı bağlantı detayı verilmiştir. Bunlar sırasıyla Islak kolon-kiriş bağlantısı (MAB1), tam ard-germeli kolon-kiriş bağlantısı (MAB2), üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantısı (MAB3) ve manşonlu-pimli kolon kiriş bağlantısı (MAB4) olarak yönetmelikte verilmektedir.

MAB1 bağlantısı kirişte oluşan pozitif ve negatif momentlerin aktarılması için düğüm noktasında ıslak birleşim ile oluşturulur. Yerinde dökme betonarme sisteme çok benzeyen bu yöntemde kiriş için guse veya geçici guse oluşturulabildiği gibi gusesiz olarak da montaj gerçekleştirilebilir (Şekil 1.1).



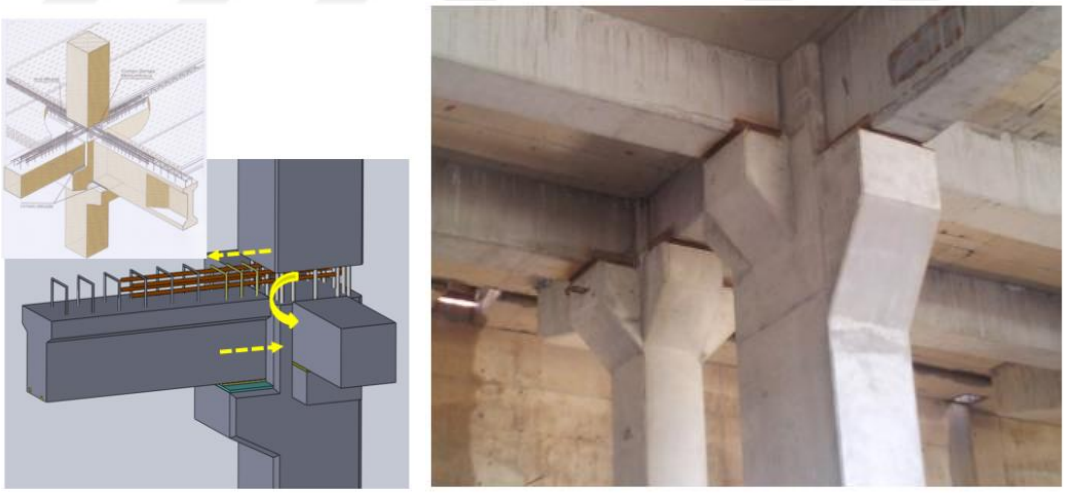
Şekil 1.1 : TDY 2018'de belirtilen MAB1 birleşimi.

MAB2 bağlantısın kiriş kolon bağlantılarının oluşturulması sırasında kirişin boyuna doğrultusu boyunca ve kolonların düğüm noktasında kesit boyunca kılıflar oluşturulup içlerinden ardgerme halatları geçirilir (Şekil 1.2). Bu halatlara germe kuvvetleri verilir ve kiriş boyunca bütün kesitlerde basınç gerilmesi oluşması sağlanır. Ardgerme halatlarının geçirildiği kılıflar da germe işleminden sonra harç ile doldurulur.



Şekil 1.2 : TDY 2018'de belirtilen MAB2 birleşimi.

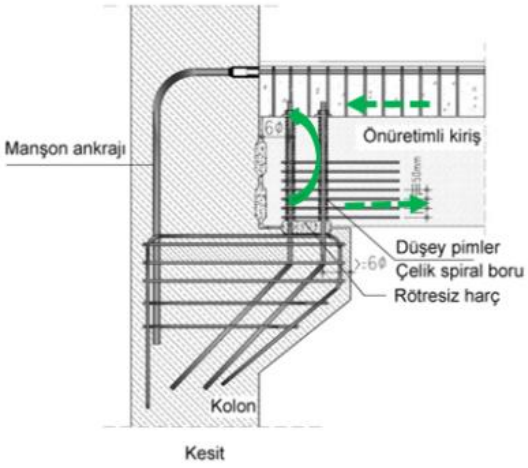
MAB3 bağlantısında kiriş elemanda oluşan negatif momentin yerinde dökme betonarme ile, pozitif momentin ise kolon gusesindeki levhanın kiriş alt yüzeyinde oluşturulan levhaya kaynaklanması ile aktarıldığı birleşim bölgesi oluşturma yöntemidir. Yerinde dökülecek olan beton sırasında kolonda bırakılan boşluğun sürekliliği için hassasiyetle doldurulması gerekmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3 : TDY 2018'de belirtilen MAB3 birleşimi.

MAB4 bağlantısında kolon elemanlarda oluşturulan guselerde 4 veya daha fazla pim oluşturulur. Bu pimler kirişte oluşturulan sac borular içerisine geçirilir ve harç dökülerek kesme kuvveti taşıyan bir birleşim oluşturulur. Bu birleşim kirişte oluşan pozitif momentin aktarılmasından sorumludur. Kirişte oluşacak negatif momentin aktarılması için ise kiriş boyuna donatıları kolon yüzeyinde oluşturulan özel

manşonlara bağlanır. Daha sonra kalıp kurulup yerinde beton dökülerek birleşim tamamlanır (Şekil 1.4).



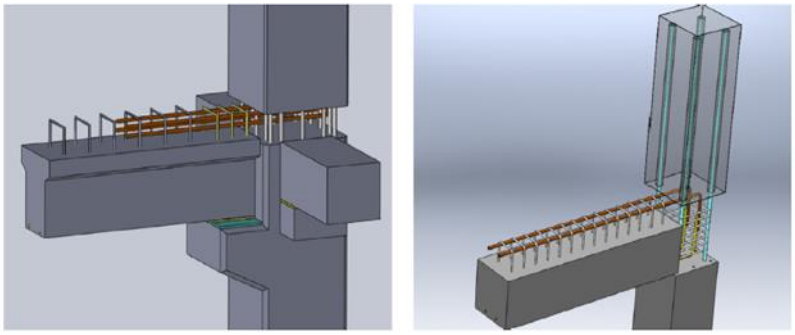
Şekil 1.4 : TDY 2018'de belirtilen MAB4 birleşimi.

1.3 Güncel Yaklaşımlar

Önüretimli yapı sistemlerinde moment aktaran birleşimlerin tasarımı için bazı kılavuzlar hazırlanmış olsa da, henüz yeterli sayıda araştırma olmadığı belirtilmiştir, [10]. Mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunda tersinir tekrarlı statik yükler kullanılmıştır. Sarsma masası deneyleri çok sınırlı kalmıştır. Güvenli, ekonomik ve kolay uygulanabilir bir birleşim detayının çalışılmaya devam etmesi ve elde edilecek bilgi ile tecrübenin sektöre önerilmesi, önüretimli betonarme yapı sistemlerinin gelişmesine büyük katkı sağlayacaktır.

Bu amaçla, özellikle kolon kiriş birleşimleri için pek çok araştırmacının son yıllarda gerçekleştirdiği ve yoğunlaşarak artan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Ayrıca dünya genelinde çeşitli firmaların kullandığı birleşim yöntemleri de bulunmaktadır. Bu çalışmalar ve ürünler ile bilgilere aşağıda kısaca göz gezdirelim.

Yüksel vd. FP-7 SAFECAST projesi kapsamında önüretimli yapıların kenar akslarında kullanılacak moment aktaran birleşimler ile ilgili deneysel ve sayısal çalışmalar yapmıştır. [11] Birleşim bölgesinde kısa konsolun olup olmamasına göre, birleşimler endüstri tipi ve konut tipi olarak iki ana gruba ayrılmıştır.



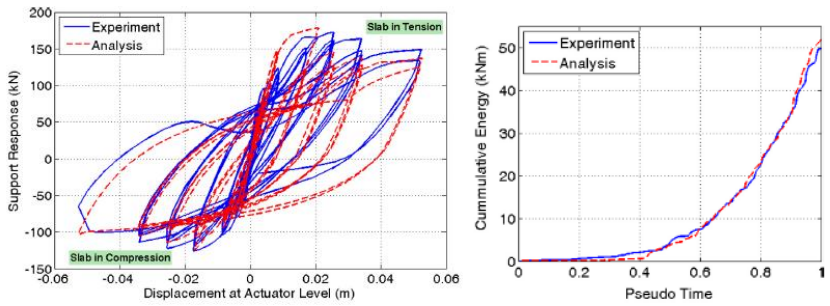
(a) Endüstri tipi Birleşim *(b) Konut tipi Birleşim*

Şekil 1.5 : SAFECAST Projesinde incelenen iki tip moment aktaran kolon-kiriş birleşimi, [11].

Endüstri tipi kolon kiriş birleşimlerinde, kiriş elemanların alt donatılarına kaynaklanmış olan levha, kolon elemanların kısa konsollarının üstünde bulunan çelik levha ile kaynaklanarak kuru birleşim yapılmış, kiriş üst kısmında bırakılan filizler ve boyuna donatılar kavrama betonu içinde bırakılarak ıslak birleşim tamamlanmıştır.

Konut tipi kolon kiriş birleşimlerinde, kolonun düğüm noktasını oluşturacak bölgesi boşluklu bırakılmış olup, bu boşluğa kirişten gelen donatılar 90^0 bükülmüş olarak yerleştirilmektedir. Önüretimli döşeme üzerine çelik hasır donatı yerleştirildikten sonra kavrama betonu doldurularak ıslak birleşim tamamlanmaktadır.

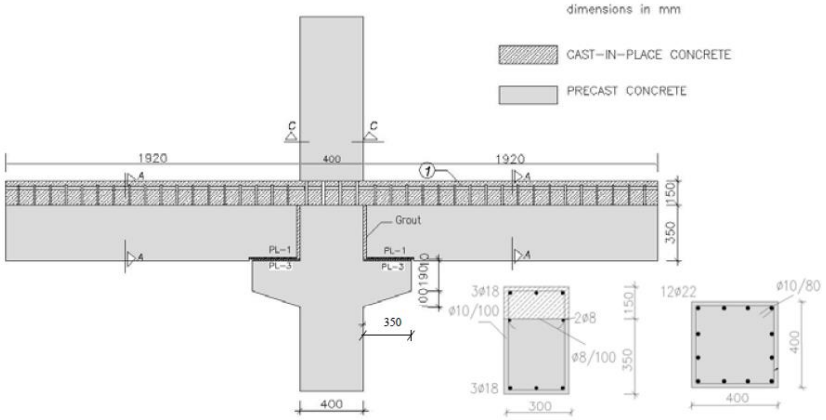
Numunelerin tersinir tekrarlı yükler etkisindeki davranışının sayısal olarak belirlenmesi için matematiksel modellerin nasıl oluşturulabileceği tartışılmıştır. Deneysel ve sayısal yolla belirlenen kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri ve yığışımlı çevrimsel enerji büyüklükleri karşılaştırılmıştır (Şekil 1.6). Deneysel ve sayısal olarak belirlenen sonuçlar arasındaki farkın, birleşim bölgesinde kiriş alt yüzündeki kaynaklı birleşim civarında gözlenen lokal hasarlar olduğu yorumu yapılmıştır.



Şekil 1.6 : SAFECAST Projesinde incelenen bir moment aktaran kolon-kiriş birleşimi için deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması, [11].

Girgin vd. önüretimli yapıların ara akslarında kullanılabilecek moment aktaran bir kolon kiriş birleşimine ait deneysel ve sayısal çalışmalar gerçekleştirmişlerdir, [12,13].

Kiriş elemanlar düğüm noktasına kuru ve ıslak birleşim teknikleri kullanılarak birleştirilmiştir (Şekil 1.7). Tersinir tekrarlı yüklemeler etkisinde hasarın kiriş alt başlıklarında, kaynaklı levhalar bölgesinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmada [11]'den farklı olarak kiriş alt başlık donatıların aderansları belirli uzunluklarda bozularak deformasyonların o bölgelerde yoğunlaşması amaçlanmıştır. Yapılan bu işlemin sonucu olarak daha sünek bir davranış elde edilmiştir.

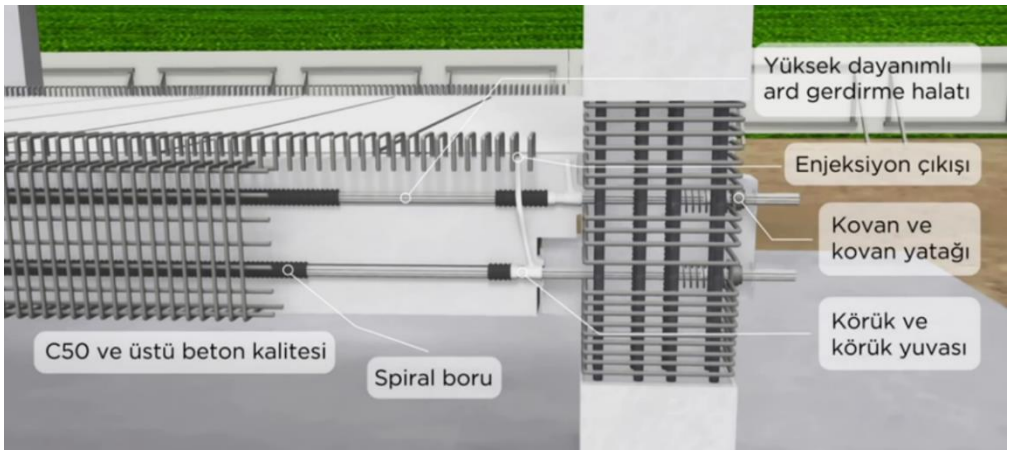


Şekil 1.7 : Girgin vd.'nin deney numunesi, [12,13].

[11], [12] ve [13] nolu yayınlarda incelenen birleşimlerde, kiriş alt başlığını kısa konsol üzerindeki levhaya birleştiren kaynak dikişlerinin şantiye koşullarında yapıldığı, birleşim kapasitesinin kaynağın kalitesi ve boyuna donatıların kaynaklanabilme özellikleriyle doğrudan ilişkili olduğu unutulmamalıdır.

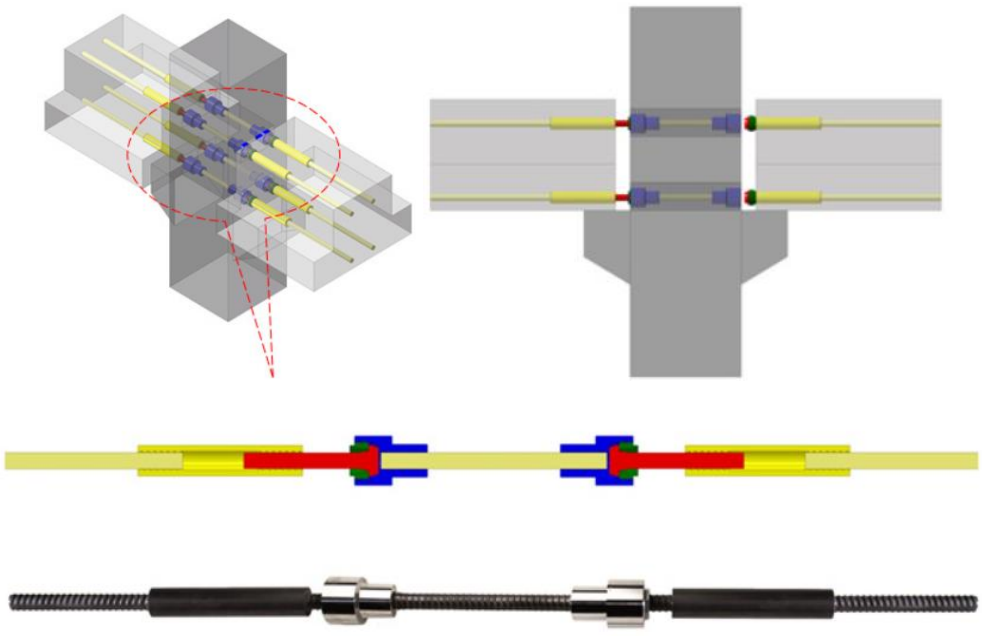
Parastesh vd. önüretimli kirişlerin uç bölgelerini U şeklinde boş oluşturarak birleşim noktalarında donatıların yerleşimine olanak sağlamıştır. Kirişin betonsuz ve donatıların açıkta bırakıldığı uç bölümü, yerinde dökme betonla doldurularak rijit düğüm noktası elde edilmeye çalışılmıştır, [14]. Elde edilen sonuçlar, konvansiyonel betonarme formunda üretilen numune sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Donatı sürekliliğinin sağlanamadığı durumlar için kancalı donatı ankrajı incelenmiştir.

2005 yılında Van'da yapılan 7 katlı konut binaları önüretimli betonarme olarak üretilmiş ve 2011'de Van'da meydana gelen 7,2 büyüklüğündeki depremi hasarsız olarak atlatmışlardır, [15]. Kiriş-kolon birleşimleri ard-germe kabloları ile oluşturularak moment aktarımı sağlanmaktadır, (Şekil 1.8).



Şekil 1.8 : Ala-Sawa yöntemi ile gerçekleştirilen kolon-kiriş birleşimi, [15].

B.S.Italia firması, önüretimli betonarme kiriş kolon birleşimleri için moment aktarımını sağlayan RS 25/40 adında bir ürünü portfolyosu içerisinde bulundurmaktadır. Bu ürün, önüretimli betonarme kirişlerde boyuna donatılara bağlanmaktadır. Şantiye alanında guseli kolonlara yerleştirilen kirişler mekanik olarak cıvata dişleri vasıtasıyla kolonlara bağlanmaktadır. Bağlantı sırasında üst sıra ve alt sıra olmak üzere düşeyde iki grup olarak yerleştirilen RS 25/40 ürünü, bu sayede momenti kuvvet çiftine indirgeyerek düğüm noktasına aktarmaktadır. Kolon ve kiriş arasında oluşan derzler ise genleşme kabiliyetine sahip özel bir harç ile doldurulmaktadır (Şekil 1.9).



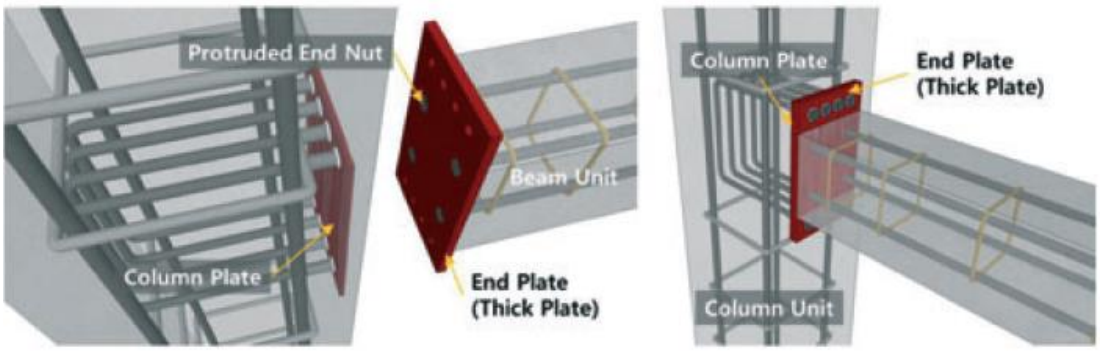
Şekil 1.9 : RS 25/40 ürünü ile oluşturulan kolon-kiriş birleşim detayı, [16].

Günümüzde diğer ülkelerdeki önüretim betonarme yapı inşaatlarında, boyuna donatı birleşimlerinde yeni birleşim elemanları yaygın olarak kullanılmaktadır, (Şekil 1.10). Resimlerden izlenebildiği gibi, önüretimli kiriş uç bölgesinde bırakılan boyuna donatı filizleri düğüm noktasından çıkan donatı filizleri ile özel birleştirici elemanlar vasıtasıyla bağlanmakta ve moment aktaran bir birleşim elde edilmektedir [17].



Şekil 1.10 : Moment aktaran kolon kiriş birleşimi uygulama örnekleri, [17].

Nzabonimpa vd, çelik profil çekirdekli betonarme prekast kiriş kolon birleşimleri için cıvatalı mekanik bir tasarımın deneylerini gerçekleştirmişler [18]. Bu tasarımı oluştururken AISC 358'de yer alan çelik kiriş kolonların birleşim bölgesi tasarımından esinlenen araştırmacılar, kiriş ucunda ve kolon yüzeyinde çelik levhalar oluşturmuşlar. İmalat sırasında kiriş uç çelik levhalarının kolon bağlantıları cıvatalar ile gerçekleştirilmiş. Cıvata bağlantılarının gerçekleştirilebilmesi için kolon içerisinde manşonlar bırakılmış, bu manşonlar daha sonra kolon iç kesimindeki donatılara bağlanmıştır. Kiriş donatıları da kiriş uç levhalarına somunlarla bağlanarak kirişte oluşan çekme ve basınç kuvvetlerinin tamamının levhalar aracılığıyla düğüm noktasına aktarımı hedeflenmiştir (Şekil 1.11).



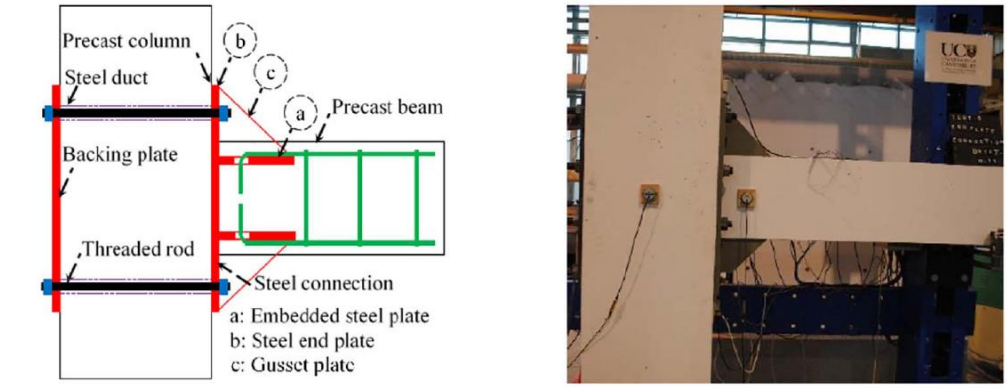
Şekil 1.11 : Nzabonimpa vd oluşturduğu hibrit tasarım, [18].

Tersinir tekrarlı çevrimsel yüklere maruz bırakarak tasarım fikrini test eden araştırmacılar 6 adet deney tamamlamışlar. Karşılaştırma ve referans oluşturması için 1 adet yerinde dökme betonarme numune, 1 adet de donatıların kiriş uç levhalarına kaynaklandığı numune üretilmiş, geri kalan numunelerde çeşitli levha kalınlıkları ve levhalar arası dolgu malzemeleri kullanılmıştır.

Yerinde dökme betonarme tasarım sonuçlarıyla karşılaştırılan deneyler sonrasında yazarlar, tasarımın ayrıca betonarme prekast elemanlar için de kullanılabileceğini belirtmiş fakat bu doğrultuda herhangi bir deney numunesi hazırlamamışlardır.

Aninthaneni vd. [19-21] yapısal prefabrik çerçeve sistemler için kirişlerin kolonlara bağlantısı için kuru ve ihtiyaç halinde sökülebilir mekanik bir birleşim fikri oluşturmuşlar. Oluşturdukları tasarım fikri, kiriş ucunda bir alın levhası, bu alın levhasını besleyen guseler ile guseleri levhalara bağlayan kaynaklardır. Ayrıca beton dökümü sırasında kiriş içerisinde gömülü kalan çekme ve basınç levhaları bulunmaktadır. Gömülü levhalarda oluşturulan deliklerden kiriş boyuna donatılar geçirilmiş ve beton dökümü ile kiriş nihai hale getirilmiş. Kolonlarda ise dişli rodların yerleştirilmesi için düğüm noktasının üst ve alt bölgelerinde ikişer delik bırakılmıştır. Kiriş alın levhalarındaki ve kolondaki deliklerin içinden rodlar geçirilip somunların anahtarla sıkılması vasıtasıyla montaj tamamlanmıştır (Şekil 1.12).

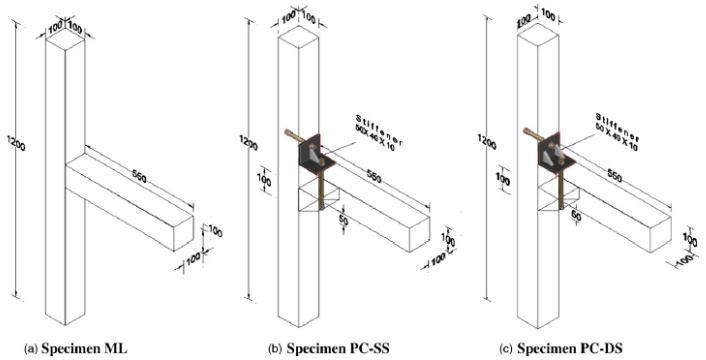
Aynı somunların istem doğrultusunda yine anahtarlarla sökülerek demonte edilebilen çerçeve modeli için oluşturulan 2 deney düzeneği tersinir tekrarlı yüklemelere maruz bırakılmış. Elde edilen deney sonuçlarını sayısal olarak modellemek için “pivot” ve “IMK peak oriented” kullanan araştırmacılar yeter mertebede yakınsaklık elde edebilmiş. Bu yakınsaklığın kolayca elde edilebilme sebebinin alın levhası ve guselerin elastik davranış göstermesi ile liflerde kalıcı şekildeğiştirmelerin meydana gelmemesi olduğu özellikle belirtilmiş.



(a) Schematic layout of the connection (b) A sub-assembly with the end plate connection

Şekil 1.12 : Aninthaneni vd tarafından oluşturalan sökülebilir mekanik kolon-kiriş bağlantı detayı, [21].

Vidjeapriya and Jaya [22], üçte bir ölçekli olarak üretilmiş prekast kiriş kolon bağlantılarını tersinir tekrarlı yüklere maruz bırakmış ve sonuçları monolitik numune ile kıyaslamışlardır. Kolon çıkmalarının üstüne yerleştirilen kirişler bir çelik mil ile bağlanmış, bu milin üst tarafı tek kamalı veya iki kamalı levhalarla kolon elemanın gövdesine ikinci bir mil ile kenetlenmiştir (Şekil 1.13). Hem prekast hem de monolitik numunelerin nihai yük taşıma kapasitesi, yük oranı, histeretik davranışları, enerji sönümleme dağılımları, eşdeğer viskoz sönüm oranı, süneklik faktörleri ve mukavemet azalımları ölçülmüş, performansları karşılaştırılarak sonuçları yayında sunulmuştur.

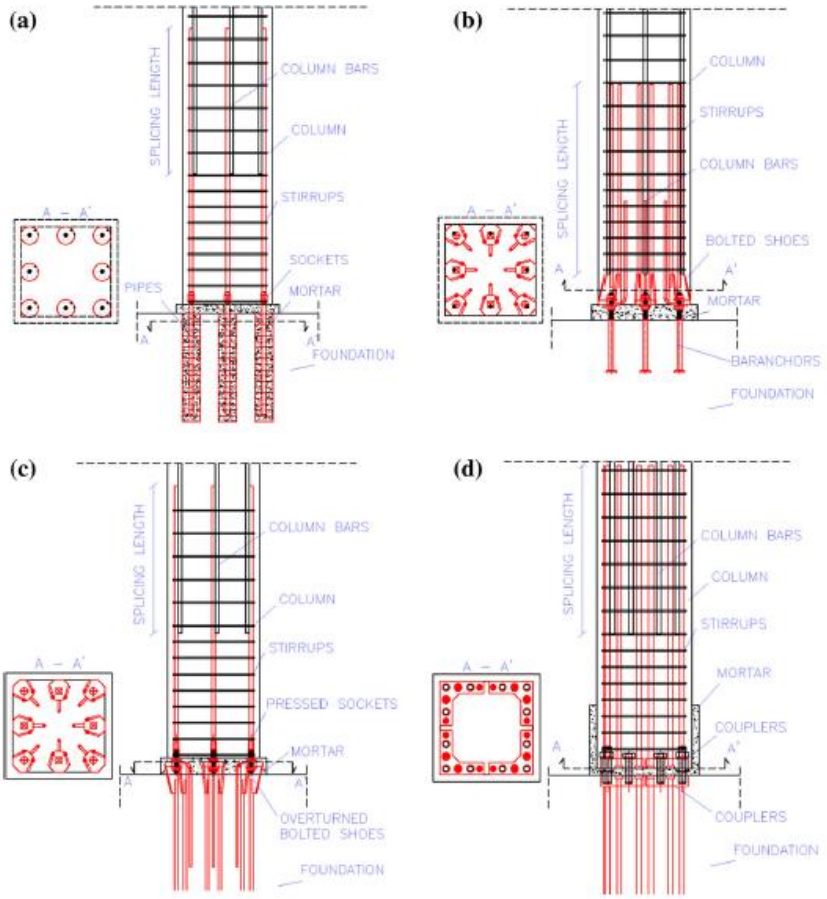


Şekil 1.13 : Monolitik ve prekast kiriş kolon bağlantı deneyi numuneleri, [22].

Dal Logo vd. kuru ve yarı-kuru birleşimlerin, kolon kiriş düğüm noktaları için piyasada kullanılabilir çözümlere sahip olduğunun altını çizerek kolon temel birleşimleri ile ilgili olarak ise sektörün hala eksiklik hissettiğini belirtmişlerdir.

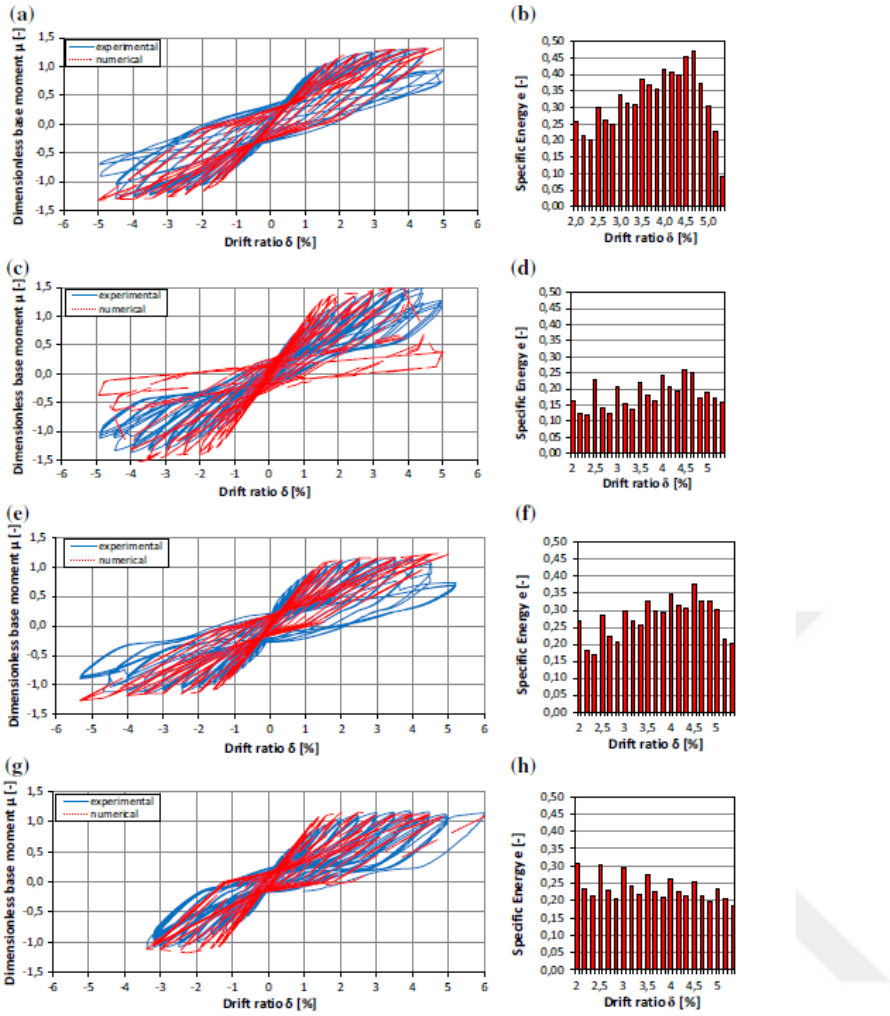
Yaptıkları çalışmada kolon-temel birleşimleri ile ilgili son araştırmaları bir araya getirerek irdelemişler, yapılan çalışmalara ait sayısal simülasyonlar gerçekleştirerek

histeretik şekil parametreleri için kalibrasyon değerleri belirlemişlerdir. Çalışmaları sırasında Şekil 1.14'de görülen 4 tip kolon – temel birleşim noktası deneylerini kullanmışlardır [23].



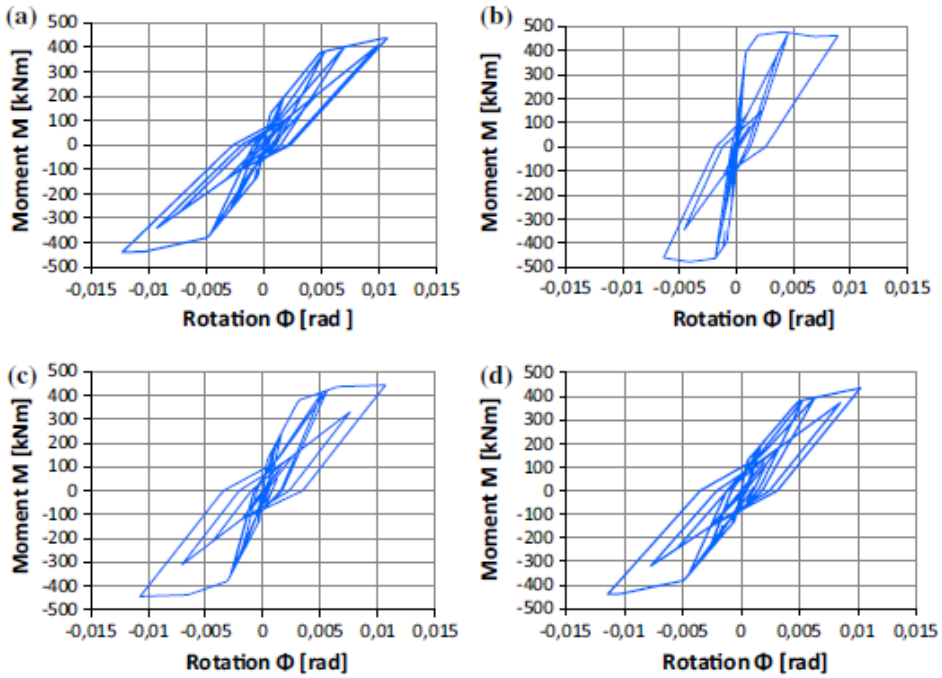
Şekil 1.14 : Kolon – temel birleşimleri a) vidalanmış çıkıntılı çubuklar b) cıvatalı soketler c) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler d) Kuplörler, [23].

Her bir birleşim detayı için SAP2000 programında sonlu eleman modelleri oluşturulmuş, birleşim bölgesini tanımlayabilmek için Pivot modelin tanımlandığı plastik mafsallar kullanılmıştır. Plastik mafsal boyları için de her bir birleşim metodu için formüller önerilmiş, önerilmiş kalibrasyon parametreleri ile elde edilen histeretik grafik dağılımları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır (Şekil 1.15).



Şekil 1.15 : Moment – tepe öteleme oranı grafikleri a,b) vidalanmış çıkıntılı çubuklar c,d) cıvatalı soketler e,f) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler g,h) Kuplörler, [23].

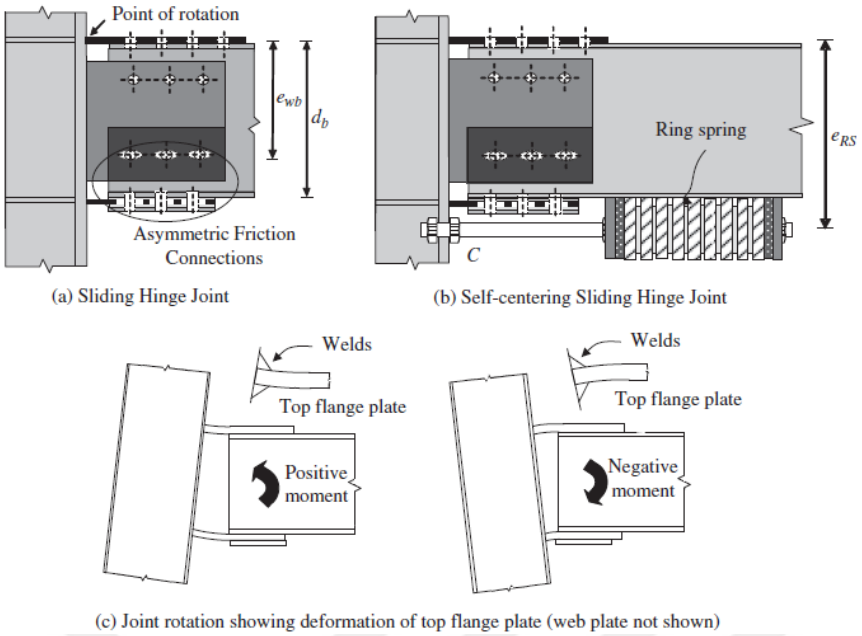
Çalışma içerisinde enerji sönümleme, süneklik ve rijitlik değerleri üzerinde karşılaştırmalar yapılmış, ayrıca ELSA'da gerçekleştirilen 3 katlı yapı modeli SAP2000 programında modellenerek Tolmezzo depremi ile bu birleşim elemanları model içerisinde analiz edilmiş, sonuçları çalışmada moment – dönme ilişkisi grafikleri olarak paylaşılmıştır (Şekil 1.16).



Şekil 1.16 : Her bir kolona ait Moment – dönme grafikleri a) vidalanmış çıkıntılı çubuklar b) cıvatalı soketler c) Ters çevrilmiş cıvatalı soketler d) Kuplörler, [23].

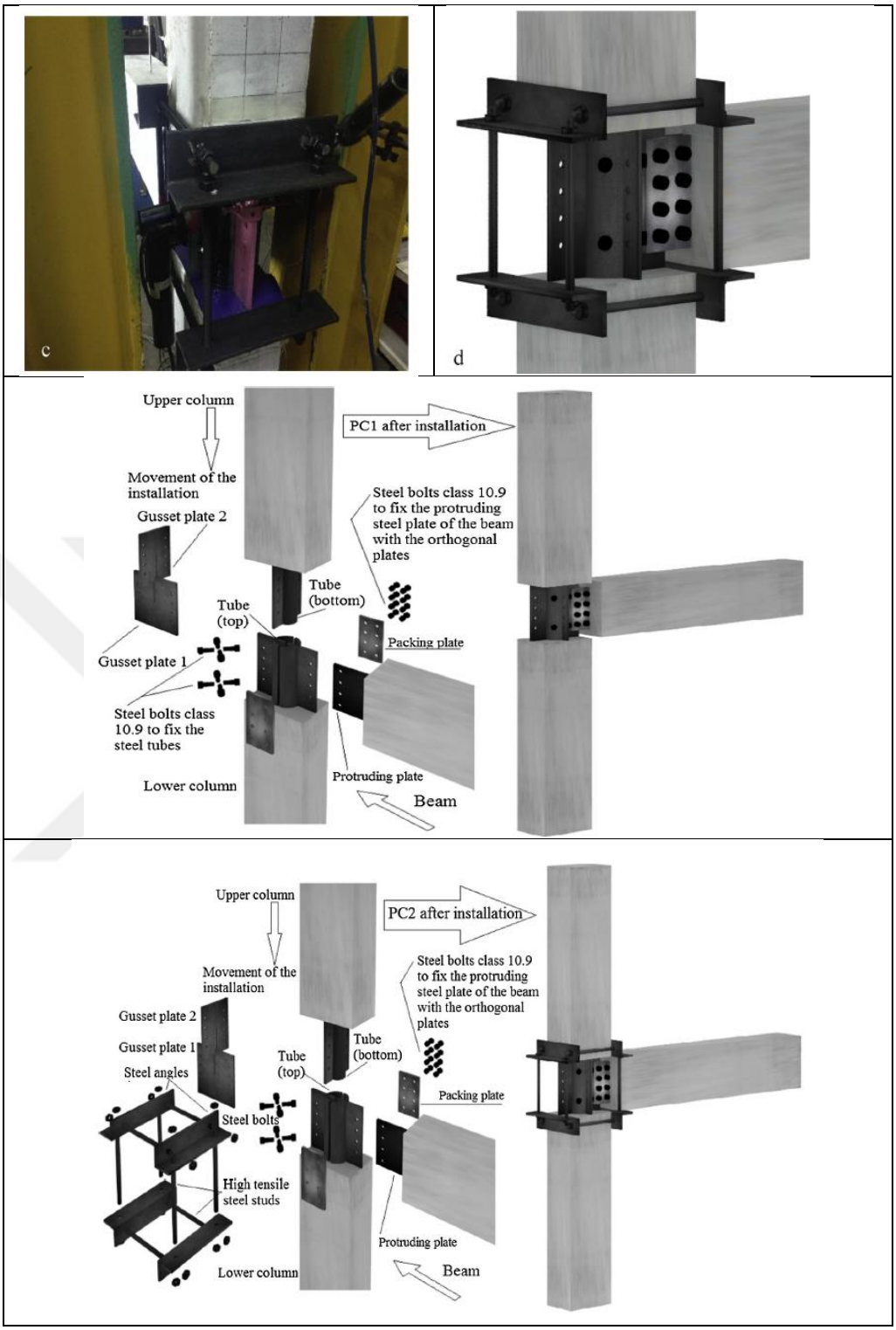
Hsen-Han Khoo vd., moment aktaran çelik çerçevelerde kiriş kolon birleşimlerinde ve kiriş uçlarında, sismik hareketler sırasında oluşan birincil ve ikincil hasarları azaltabilmek adına bir çalışma yürütmüşlerdir [24]. Bahsi geçen bu hasarlar kiriş plastik mafsalları, döşemelerde meydana gelen çatlaklar ve kaynak kopmalarıdır. Ayrıca, deprem sonrasında meydana gelen çerçeve kalıntı sürüklenmelerini azaltabilmek de araştırmacıların bu çalışma kapsamında irdeledikleri bir başka parametre olmuştur. Daha önceden başka araştırmalar tarafından önerilen iki yöntem olan Asymmetric Friction Connections ve Ring Spring Joint yöntemleri tek bir tasarım içerisinde harmanlanmış ve Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections tasarımı oluşturulmuş. Gerçek bir yapının iç düğüm noktasını temsil eden 1/1 ölçekli bir yapıda birleşim test edilmiştir (Şekil 1.17).

Gerçekleştirilen 10 deney sırasında numuneler quasi-static, dinamik, deprem ve near fault yükleme protokollerine maruz bırakılmış, sonuçlar merkezlenebilirlik, moment kapasitesi ve dönme kabiliyetleri olarak karşılaştırılmıştır. Asymmetric Friction Connections ve Ring Spring Joint'e göre önemli miktarda merkezlenebilirlik sağlayan ve döşeme elemanında sadece tamir edilebilen minimum çatlaklar oluşturan SCSHJ tasarımı, etkin bir davranış göstermiş.



Şekil 1.17 : Hsen-Han Khoo vd. oluşturduğu hibrit tasarım ve alt tasarımlara ait görseller, [24].

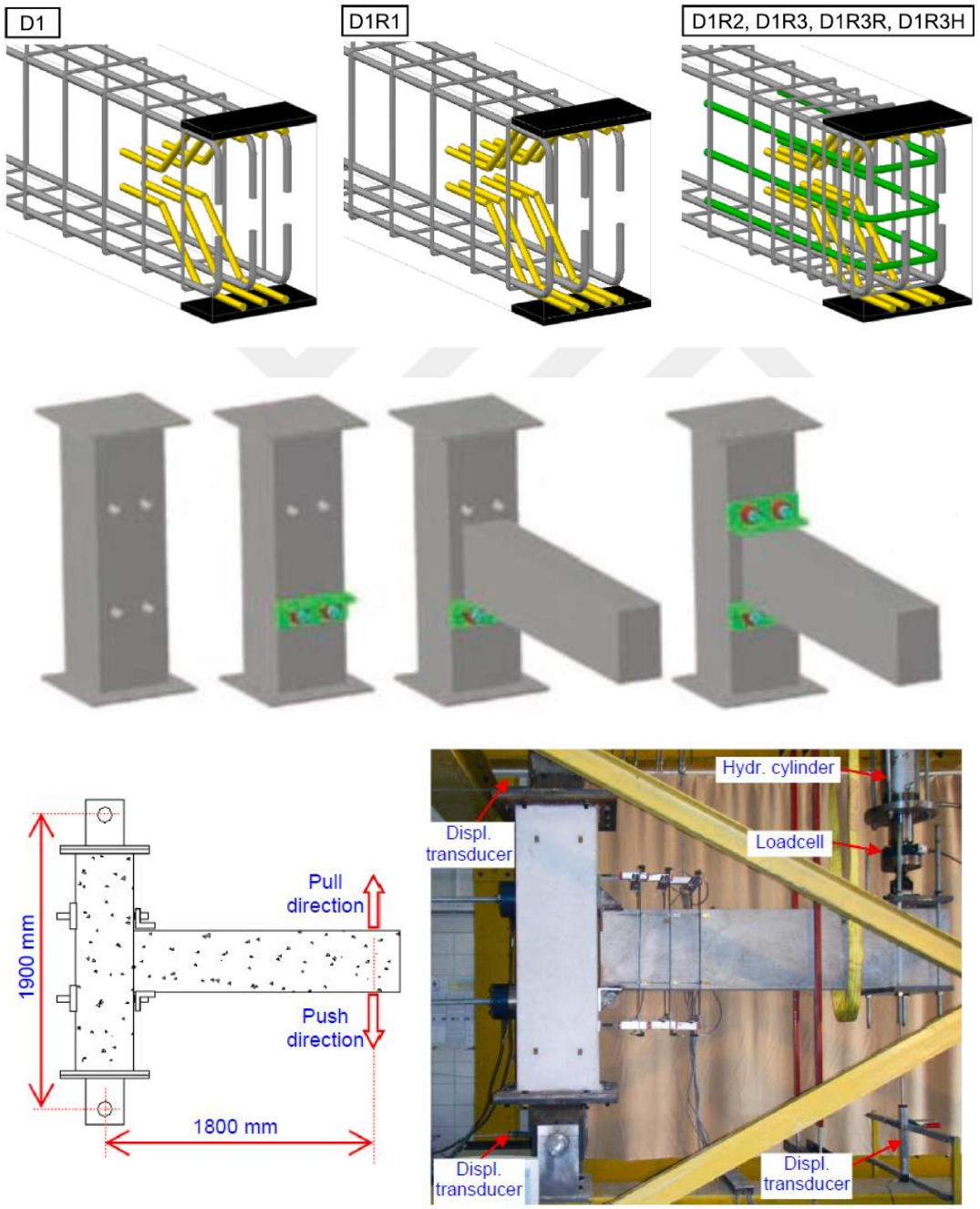
Ghayeb vd. prekast yapıların sismik yükler etkisi altındaki performanslarının, özellikle süneklik kabiliyetlerinin, hala geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu belirtmişlerdir [25]. Bu amaçla dış kiriş kolon birleşimleri üstünde deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Araştırmaları sırasında 2 monolitik ve 2 prekast betonarme düğüm noktasını tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemelere maruz bırakmışlardır (Şekil 1.18). Prekast numunelerin daha iyi performanslar gösterebilmeleri için kesitler içine çelik levhalar ve çelik bağlantılar tasarlayan araştırmacılar bu sayede %6,8 drift değerine kadar ulaşabilen prekast düğüm noktaları elde etmişler. Monolitik düğüm noktası ile yapılan kıyaslamalar sonucunda, prekast düğüm noktası tasarımlarının enerji sönümleme kapasitelerinin, elastik genlik ve drift oranı değerlerinin daha yüksek olduğu; fakat dayanım değerlerinin daha düşük olduğu gözlenmiştir.



Şekil 1.18 : Ghayeb vd. kiriş kolon birleşimleri ve detaylarına ait görseller, [25].

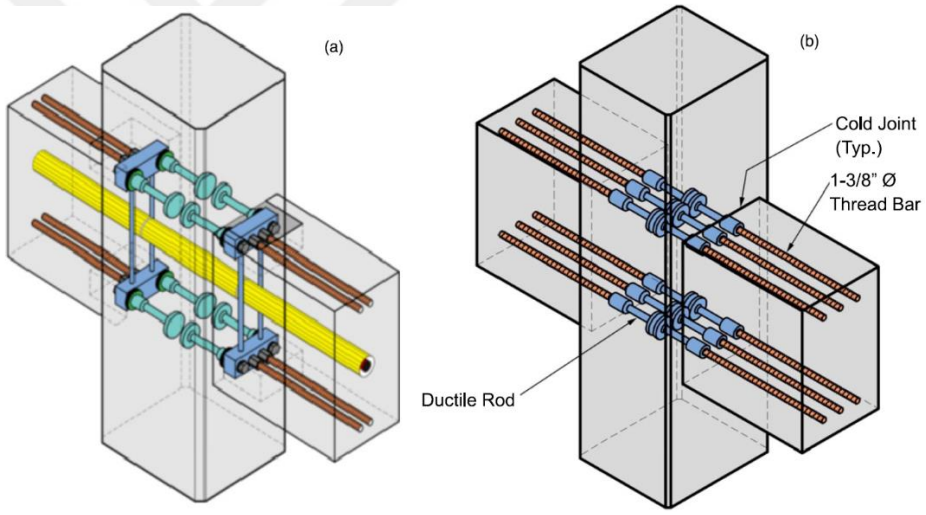
Baran vd. önüretimli betonarme kiriş kolon birleşimleri için hem kaynaklardan hem de kiriş ve kolon üretimleri sırasında taşıyıcı elemanlar içerisinde bıraktıkları levhalardan faydalanarak hibrit bir birleşim yöntemi tasarlamışlar ve %4 göreli öteleme değerine ulaşana kadar tersinir tekrarlı çevrimsel yüklere maruz bırakmışlar [26,27]. Tasarımın çalışma prensibi, kirişlerin üst ve alt yüzeylerine bırakılan levhalar

ile kolonların yüzeylerinde bırakılan L çelik profillerin birbirlerine kaynaklanarak yük aktaran bir birleşim oluşturmasından ibarettir. Kirişte bırakılan levhalara Şekil 1.19'da da görüldüğü gibi donatılar kaynaklanmış ve beton dökümü sırasında kirişin derinliklerine bu donatılar uzatılmıştır. Kolon L profilleri ise mekanik cıvatalar ile kolon elemanına bağlanırken, kiriş yerleşiminden sonra bu profiller kiriş levhalarına kaynaklanmıştır. Bu sayede kirişte meydana gelen moment iç kuvveti bu profiller aracılığıyla kuvvet çiftine dönüştürülerek düğüm noktasına aktarılması hedeflenmiştir.



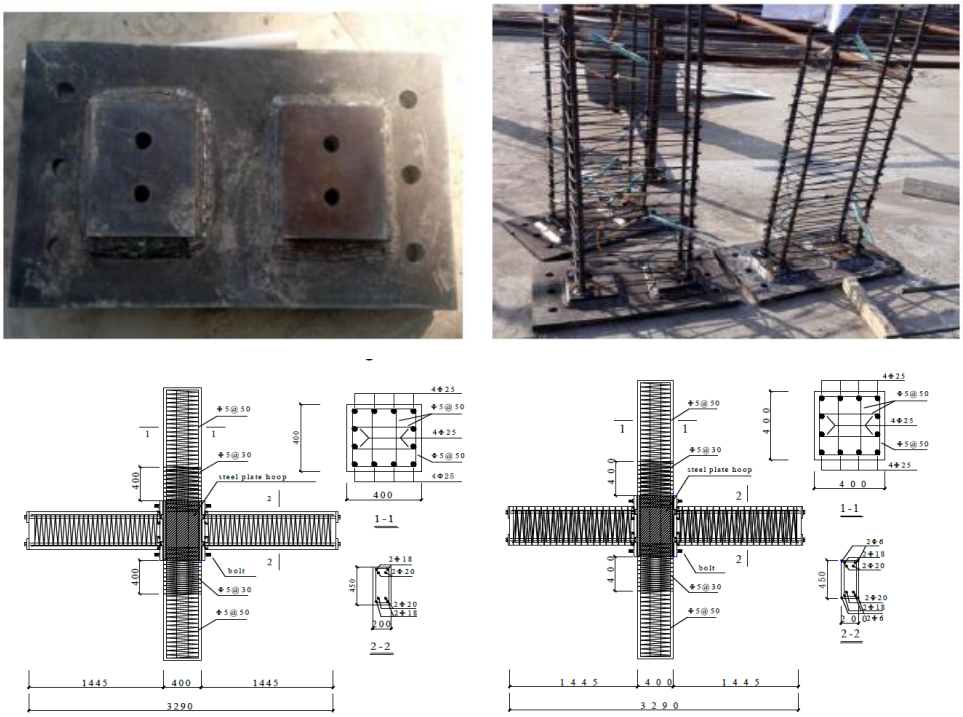
Şekil 1.19 : Baran vd. tasarladığı kiriş kolon birleşimleri ve detayları, [26,27].

Chang vd. önüretimli betonarme kiriş kolon birleşimlerinde kullanılmak üzere düğüm noktası içerisine yerleştirilen sünek rodlar ile iki ayrı birleşim detayı üstünde bir araştırma gerçekleştirmişlerdir [28]. İlk birleşim detayında kiriş üst ve alt donatıları, kolon içinde düğüm noktası bölgesinde beton dökümü sırasında yerleştirilmiş sünek rodlara bağlanmıştır. Ek olarak kiriş ortasından geçen ve düğüm noktasının merkezinden devam eden ardgerme çubuğu ile sisteme basınç gerilmeleri etkitilmiştir. İkinci birleşim detayında ise ilk birleşim detayında olduğu gibi donatıların düğüm noktası içerisinde bırakılan rodlara mekanik diş ile bağlantısı gerçekleştirilmekle beraber bu tasarımda ardgerme sistemi bulunmamaktadır (Şekil 1.20). Her iki birleşim detayı için gerçekleştirilen tersinir tekrarlı yükleme deneylerinde %7 göreli öteleme değerine ulaşıldığı tespit edilmiş; buna rağmen derzlerde ayrılmalar gözlenmemiş, kirişlerde meydana gelen çatlakların ise küçük hasarlar seviyesinde olduğu belirtilmiştir.



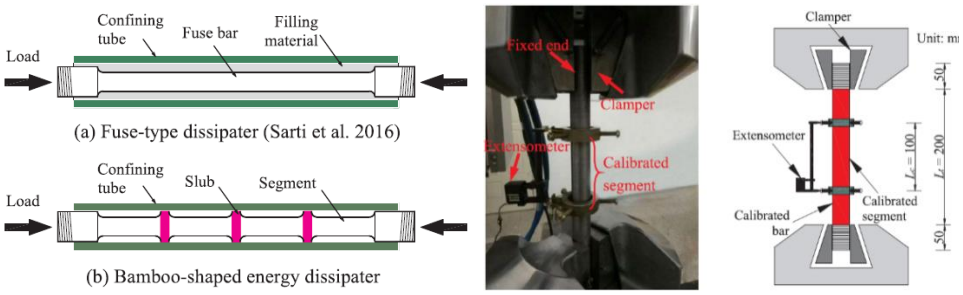
Şekil 1.20 : Dywidag Ductile connector kullanılan kiriş kolon birleşimleri, [28].

Li vd [29], prefabrik kiriş elemanların içerisinde yer alan donatıları, kiriş alnında yer alan çelik levhaların kaynaklandığı bir birleşim tasarlamışlardır. Kirişin beton dökümü ile birlikte imalatı tamamlandığında, alında bulunan levhalardaki cıvata delikleri vasıtasıyla kirişler kolon elemanlara mekanik olarak montajlanmıştır, (Şekil 1.21). Bu montaj sırasında düğüm noktası çekirdeğinde oluşturulan çelik bölgede bağlantı için 6 adet yüksek dayanımlı cıvata kullanılmış. 8 adet numune oluşturan araştırmacılar quasi-static yükleme yaparak düğüm noktalarına ait çevrimsel yükleme grafikleri elde etmiş. Yöntemin karşılaştırılabilmesi için yerinde dökme betonarme bir kiriş kolon numunesi hazırlanmış, aynı yükleme protokolü uygulanarak sonuçlar kıyaslanmıştır.



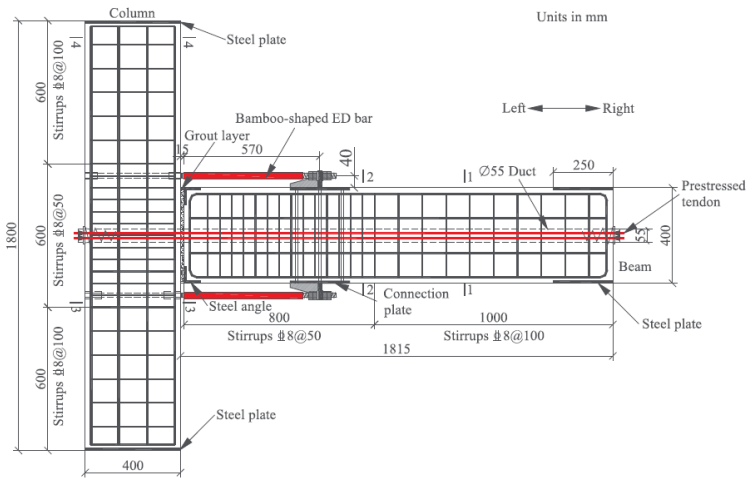
Şekil 1.21 : Li vd. tasarlandığı mekanik kiriş-kolon birleşimine ait detaylar, [29].

Chun Lin Wang vd, önüretimli betonarme yapı elemanlarında kullanabilmek amacıyla enerjiyi kendi üstünde sönümleyen ve deprem kuvvetlerini üzerine alarak yapının sismik performansının daha iyi hale gelmesini sağlayacak bir sigorta eleman fikri ortaya koymuşlardır [30]. "Bambu şekilli" olarak isimlendirdikleri tasarımlarında üzerinde boğumlar bulunan metal bir çubuğun etrafını başka bir metal tüp ile sararak eksenel basınç kuvvet kapasitesi yüksek bir enerji sönümleyici tasarlamışlardır (Şekil 1.22). Düşük çevrimli yorulma testlerine maruz bıraktıkları 12 numune sonrasında geometrik boyutlarda bir dizi düzeltmeler gerçekleştirilmiş ve sonunda tatmin edici bir tasarım elde etmişlerdir. Deney numunelerinin sayısal modellemelerini de oluşturan araştırmacılar deformasyon talepleri ve taşıma kapasitelerine bağlı tasarım metodu da önermişlerdir [31].



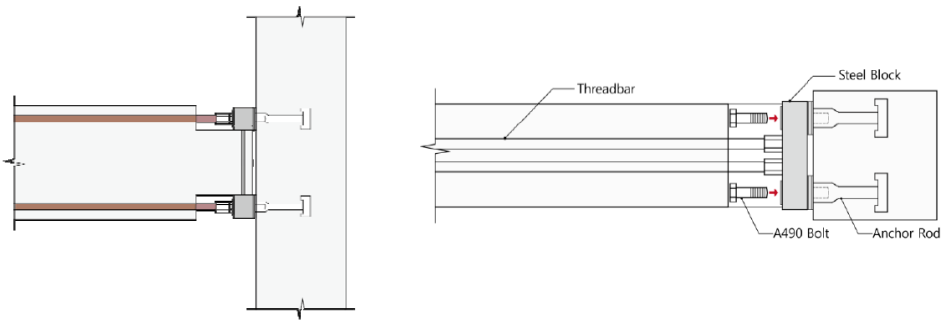
Şekil 1.22 : Chun-Lin Wang vd. tarafından tasarlanan bambu şekilli enerji sönümleyici ve yorulma test düzeneği, [30].

Eleman bazındaki deneylere ek olarak sismik bölgelere uygun önüretimli betonarme çerçeve geliştirmek için, çelik bambu şeklindeki enerji sönümleyicileri içeren yeni bir prekast betonarme kiriş kolon bağlantı testleri de gerçekleştirilmiş. Ardgermeli olarak tasarlanan prekast düğüm noktasındaki enerji sönümü, sisteme eklenen bambu şekilli sigorta elemanlar ve kendiliğinden merkezleme ile sağlanmıştır. Şekil 1.23'de deney düzeneği görülen numunelerden oluşan 5 deney gerçekleştirilmiştir, [32]. Deneyler sırasında öngerme kuvvetinin miktarı, geometrik özellikler ve bambu şekilli enerji sönümleyicilerin sayısı gibi çeşitli parametreler çalışılmış, tersinir tekrarlı yüklemelerin bağlantı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Araştırmacılar, test sonuçlarında stabil histeretik davranış elde ettiklerini ve kendiliğinden merkezleme yeteneğinin kusursuz çalıştığını belirtmişlerdir.



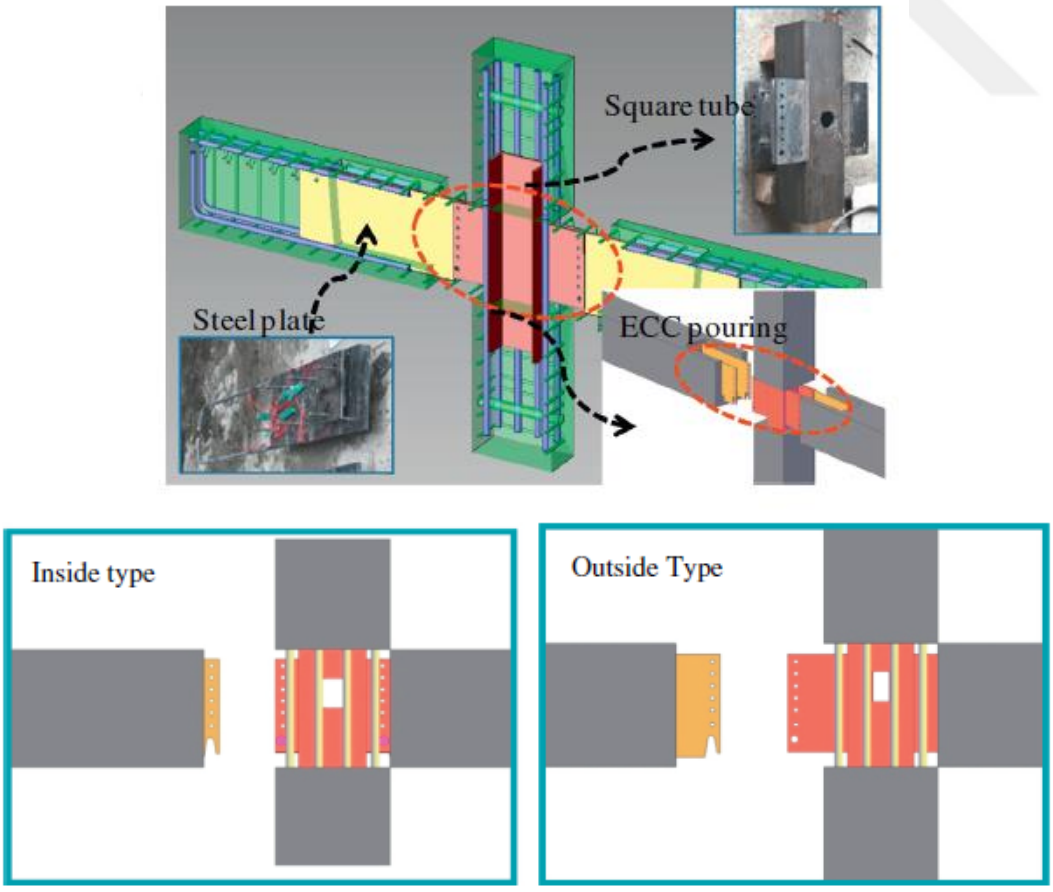
Şekil 1.23 : Bambu şekilli enerji sönümleyici içeren ardgermeli kiriş kolon bağlantısına ait detaylar, [30].

Kang ve Lee, önüretimli betonarme kirişlerin kolonlara bağlantıları için gusesi olmayan mekanik bir yöntem önermişlerdir. Bu öneride kiriş ucunda bırakılan delikli bir alın levhasına vidalar geçirilmekte ve kolona gömülü somunlara bağlantıları gerçekleştirilmektedir (Şekil 1.24). Moment dönme kapasitesini karşılaştırabilmek için bu yöntemle oluşturdukları deney numunelerini, yerinde dökme betonarme kolon kiriş birleşim detayıyla kıyaslamışlardır. Ayrıca, yöntemin etkinliğini arttırabilmek amacıyla ardgerme tendonlarıyla da oluşturdukları numuneleri test etmiş ve mevcut sonuçlarla kıyaslamışlardır.



Şekil 1.24 : Önüretimli kolon kiriş bağlantısı için Kang ve Lee'nin önerdiği kuru birleşim yöntemi, [33].

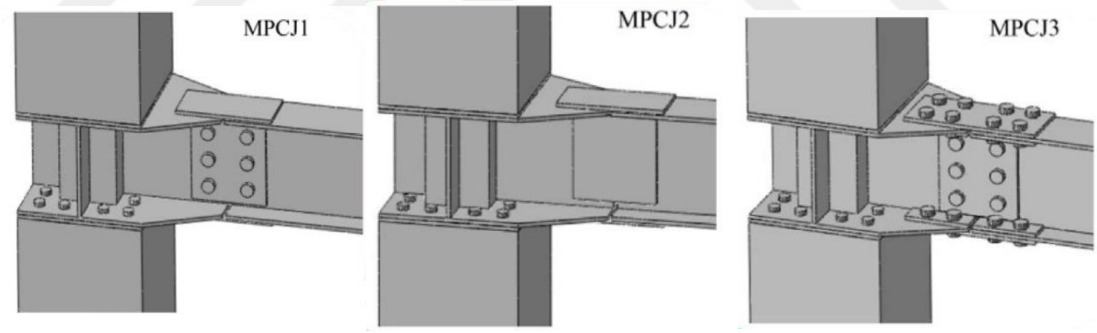
Choi vd. kolon kiriş birleşimleri için geliştirdikleri yöntemde betonarme elemanlar içerisine çelik levhalar yerleştirmiş. Birleşim bölgesinde eleman dışına taşırdıkları levhaların uç kısımlarında ise daha önceden hazırlanan vida delikleri tasarlamışlar. Kolon ve kiriş elemanların yüzeyinde bırakılan levhalar, cıvatalar aracılığıyla birbirlerine bağlanarak birleşime moment aktarabilme kabiliyeti kazandırılmıştır, (Şekil 1.25). Bağlantı işlemi için açıkta bırakılan cıvata uygulama bölgesine daha sonra kalıplar kurulmuş ve beton dökülerek kapatılmıştır, [34].



Şekil 1.25 : Choi vd tarafından geliştirilmiş kolon – kiriş birleşim yöntemi, [34].

Yaptıkları araştırmada kolon-kiriş birleşimleri için levhaların boylarına ve düğüm noktasından olan uzaklıklarına bağlı olarak çeşitli parametreleri çalışmış, buna uygun olacak şekilde ½ ölçeğinde numuneler üretmişlerdir. Bu numuneleri çevrimsel yüklemelere maruz bırakmışlardır. Elde ettikleri sonuçları da monolitik betonarme kolon kiriş birleşim testleri ile karşılaştırarak geliştirdikleri metodun etkinliğini ortaya koymuşlardır. Düğüm noktasının dayanımı ve rijitliği kiriş kapasitesinden daha yüksek tasarlanmış, böylece göçme anında kiriş uçlarında oluşan plastik mafsal neticesinde taşıma gücüne ulaşılmıştır.

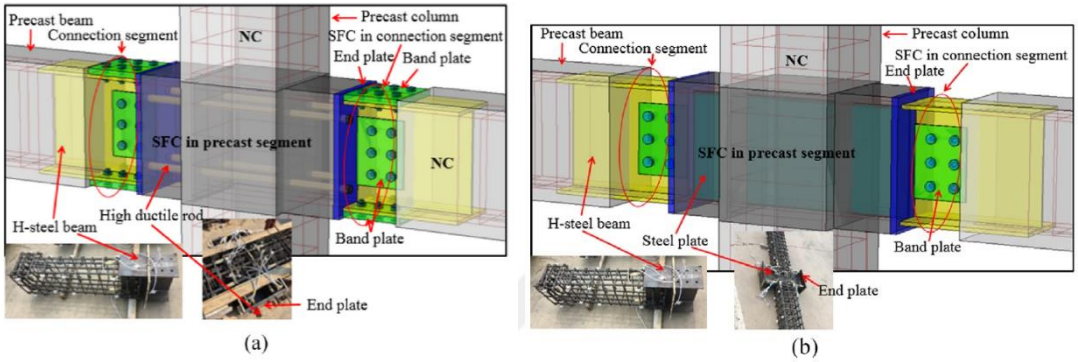
Wu vd, modüler prefabrik yapılar için çelik çekirdekli beton kolon-çelik kiriş kompozit birleşimi (MPCJ) önermiş ve sismik performansını irdelemişlerdir [35]. Önerilen MPCJ için farklı kiriş-kolon bağlantılarına (cıvatalı bağlantı, kaynaklı bağlantı ve cıvatalı kaynaklı hibrit bağlantı) sahip üç numuneyi düşük çevrimli tersinir yüklemeye maruz bırakarak elastik ve elastoplastik davranışları ile sismik davranışı incelemişlerdir (Şekil 1.26). Her numune deneyi, flanş bağlantı plakasının burkulması sonucu kiriş eğilme kapasitesine ulaşılması ile tamamlanmıştır. Önerilen MPCJ bağlantısının beton-çelik kompozit çerçeve yapılarının yapımında kullanılabilmesi için basitleştirilmiş eğilme ve kesme kapasitesi hesaplama formülleri çıkarılmıştır.



Şekil 1.26 : Wu vd'nin betonarme kolon – çelik kiriş birleşimleri, [35].

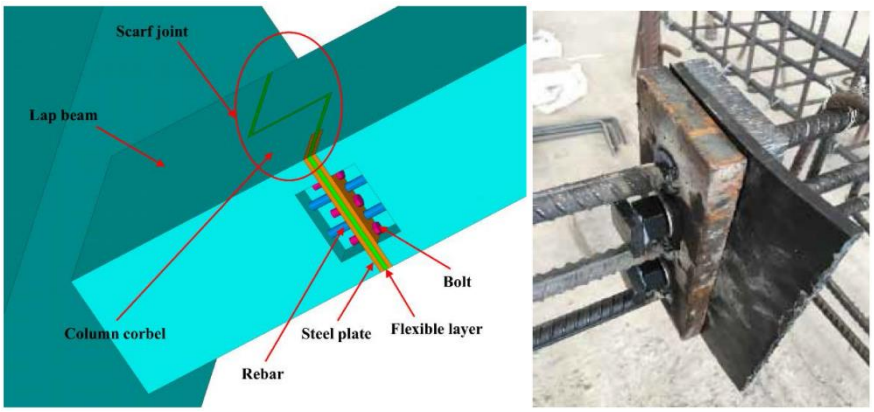
Zhang vd, çelik ve betonarmeden oluşan hibrit prekast kirişleri, betonarme kolonlara bağlamak için çelik profil ve levhalardan faydalandıkları bir birleştirme yöntemi önermişlerdir. Önerilen yöntemde kolon yüzeyinde iki uç çelik plaka oluşturulmuştur. Bu plakalar yüksek dayanımlı rodlar ve düğüm noktasına yerleştirilen çekirdek profiline kaynaklama olmak üzere iki farklı yöntemle kolona bağlantısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 1.27). Kirişlerin içerisine ise H formundaki çelik profiller yerleştirilmiş, kiriş uçlarında ise H profiller serbest bırakılmıştır. Çelik rodlar, alın levhaları ve bant plakaları kullanılarak kiriş H profili, kolon alın levhalarına mekanik

olarak montajlanmıştır. Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme protokolü ile test edilen 6 adet numunenin sonuçları, referans için oluşturulan betonarme kiriş kolon birleşim numunesi ile karşılaştırılarak yöntemin etkinliği araştırılmıştır. Dayanım ve rijitlik kaybı açısından tatmin edici sonuçlar elde edildiği belirtilen çalışmada ayrıca yöntemin hızlı imalata, kalıp işçiliğini ortadan kaldırmaya ve öngerme gereksinimine ihtiyaç duymadığına yer verilmiştir [31].



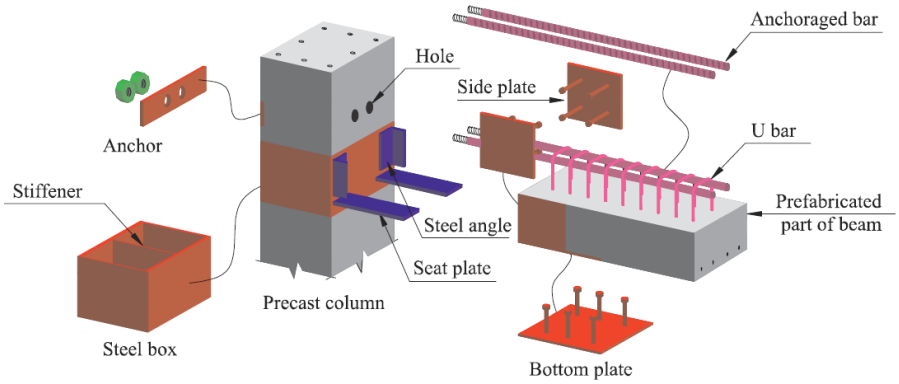
Şekil 1.27 : Zhang vd'nin önüretimli hibrit kiriş kolon birleşimleri:(a) Sünek rodlarla birleştirilmiş uç plakalar (b) çelik plaka ile birleştirilmiş uç plakalar, [36].

Zhong vd. önüretimli kiriş kolon birleşimlerini gerçekleştirebilmek amacıyla bulonlu bir bağlantı yöntemini makalelerinde açıklamışlardır [37]. Bu yöntemde kiriş boyuna donatılarının kaynakla birleştirildiği alın levhaları kiriş ucunda bırakılmış ve levhaların üstünde montaj için delikler, cıvataların yerleştirilmesi için de kirişin alt ve üst yüzeyinde montaj yuvaları bırakılmıştır. Kolonların basamak guseli olarak tasarlandığı yöntemde kirişlerdekine eşlenik alın levhaları kolon gusesinde de oluşturulmuştur. Kiriş ve kolon levhaları arasına kauçuk katmanlar yerleştirilip esnek rondelalar ve bulonlar ile bağlantı oluşturularak yük dağıtımının etkili bir şekilde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır (Şekil 1.28). Oluşturulan iki tam ölçekli numune ve bir referans betonarme numune tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeye maruz bırakılmıştır. Deney sonuçlarında kullanılan kauçuk katman ve rondelaların bağlantı bölgesinde rjitliği azalttığı ve yarı rijit bir davranışa neden olduğu tespit edilse de taşıma kapasitesi olarak betonarme numune ile benzer olduğu görülmüştür.



Şekil 1.28 : Zhong vd'nin guseli önüretimli kiriş kolon birleşim yöntemi, [37].

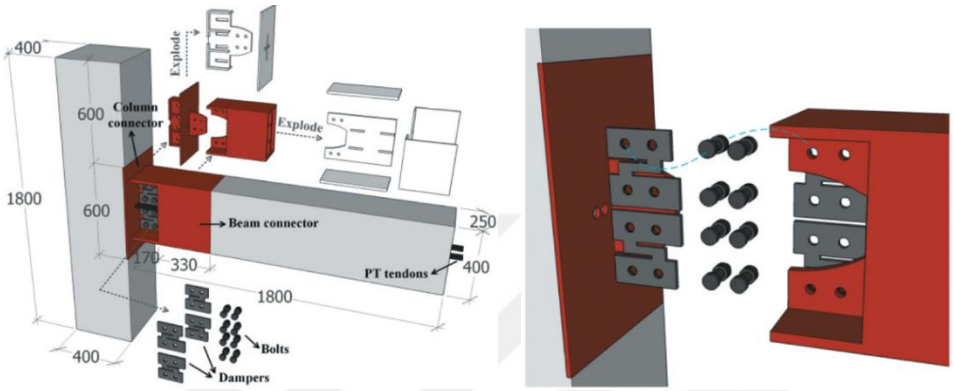
Esmaeili ve Ahooghalandary, önüretimli kolon kiriş bağlantılarının yarı kuru, yarı ıslak mekanik bir bağlantısını oluşturabilmek amacıyla çok sayıda alt parçadan ve hazırlık sürecinden oluşan bir birleştirme yöntemi önermişlerdir [38]. Kiriş kolon birleşim bölgesinin düğüm noktasını kutu bir çelik profilden oluşturan ve kaynaklar ile kolonlara tam penetrasyonun sağlandığı hazırlık sürecine kutu profile montajlanan oturma ve gövde levhalarının kaynaklanması ile devam edilir. Kirişlerin kalıpta üretimi sırasında da kiriş uçlarının yan ve alt bölgelerine levhalar yerleştirilir, kiriş üst bölgesinde ise ıslak birleşimi sağlayabilmek amacıyla U donatılar bırakılır. Montaj sırasında önce kiriş altında ve yanlarında bulunan levhalar, kolonun kutu profiline kaynaklanmış oturma ve gövde levhalarına kaynaklatılır. Kirişte bırakılan U donatılar içerisinden uçlarına diş açılmış boyuna donatılar sürülür ve kolonda bırakılan deliklere yerleştirildikten sonra kalıp kurularak beton ile doldurulur. Kuru ve ıslak birleşimin beraber kullanıldığı yönteme ait parça detayları Şekil 1.29'da görülebilir.



Şekil 1.29 : Esmaelli ve Ahooghalandary tarafından önerilen yarı kuru yarı ıslak kiriş kolon birleşim yöntemi, [38].

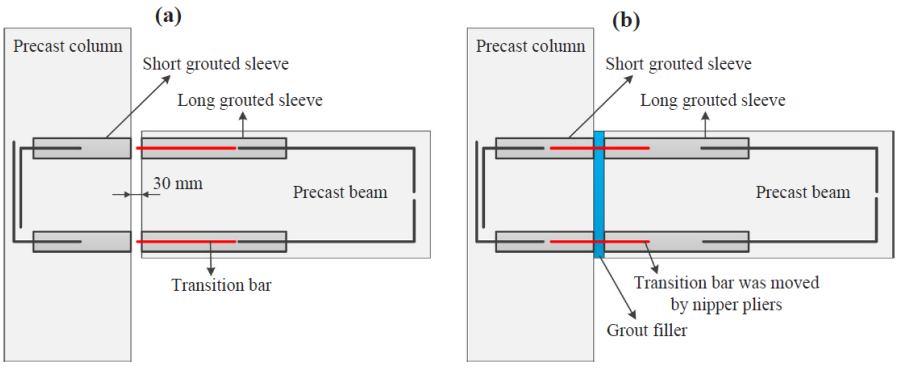
Li vd. önüretimli prekast yapılarda kiriş kolon birleşimini mekanik olarak gerçekleştiren ve deprem yükleri sonrası kendiliğinden merkezlenen bir bağlantı

yöntemine ait deney düzeneği oluşturmuş ve tersinir tekrarlı yüklere maruz bırakmışlar [39]. Eşlenik bir betonarme kiriş kolon birleşimini de test eden araştırmacıların deney protokolü hem hasarsız numuneler üstünde hem de test edilip hasar almış numunelerin üstünde sismik etkinin tekrarı amacıyla tatbik edilmiş (Şekil 1.30). Elde edilen veriler, kendiliğinden merkezlenen birleştirme yöntemi uygulanmış numuneler, yerinde dökme betonarme numuneler ile benzer dayanım ve taşıma kapasitesi göstermiş.



Şekil 1.30 : Li vd. kendiliğinden merkezlenen kolon kiriş birleşimi, [39].

Lu vd. harç dolgulu çelik kılıflara benzeyen kapsüller kullanarak kirişlerin kolonlara birleştirilmesi için bir yöntem geliştirmişlerdir. Yöntemde kiriş uçlarında donatıların devamı olarak bırakılan kapsüller ile kolon düğüm noktasında bırakılan kapsüllerin içerisinden yük aktarması ve kenetlenmenin sağlanması için bir geçiş donatısı yerleştirilmektedir (Şekil 1.31). Daha sonra kapsüllerin içi beton harcıyla doldurulur. Priz sürecinin tamamlanması ile kirişin kolona bağlantısı gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 1.31 : Lu vd. nin harç dolgulu kapsül birleşimi, [40].

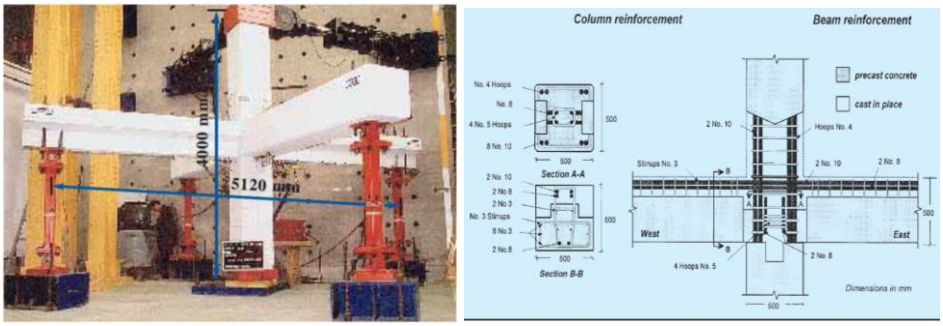
Araştırmacılar 6 prefabrik deney numunesi oluşturmuş, bu numunelerde ankraj uzunluğu, geçiş donatılarının kalınlığı ve kapsüllerin dişli olması gibi parametreleri çalışmışlardır. Statik ve tersinir çevrimsel yüklere maruz deney numunelerin sonuçları

yerinde dökme betonarme olan 7. numune ile kıyaslanmıştır. Yöntemin enerji sönümleme ve deformasyon kabiliyetleri olmasına karşın yerinde dökme betonarmeye kıyasla daha zayıf kaldığı da çalışmada belirtilmiştir.

Hu vd. prekast kiriş kolon elemanların birbirlerine moment aktaracak şekilde bağlantılarının yapılabilmesi için H şeklinde ortası boşluklu bir bağlantı profili önermişlerdir [41]. Kesme ve eğilme kuvvet kapasitesi, sertlik, enerji sönümleme değerleri, süneklik ve dönme kapasiteleri açısından test edilen H profil için beş numune değerlendirilmiştir. Sonlu eleman modelleri de geliştirilmiş ve deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonlu eleman modellerinde ise açıklık/yükseklik oranı, boşluk şekli, sınır koşullarının performans üzerine etkisi için parametrik çalışma yapılmıştır. Elde edilen verilerden sismik performansının ve deformasyon kapasitesinin iyi olduğu belirtilmesine karşın H profil bağlantısı için çalışma içerisinde kiriş kolon bağlantı deneyi gerçekleştirilmemiştir.

Yapılan çalışmalar genel itibariyle mekanik, kuru birleşimler veya yarı ıslak yarı kuru birleşimlerin odaklanıldığı çalışmalardan ibarettir. Buna karşın kiriş kolon bağlantıları için ıslak birleşim yöntemleriyle yapılmış çeşitli araştırmalar ve çalışmalar da mevcuttur. Bu bölümden itibaren ıslak birleşim yöntemleri ile ilgili yayınlanan makalelere yer verilmiştir.

Alcocer vd. 1/1 boyutlarda 2 adet kiriş kolon birleşim numunesinde tek yönlü ve iki yönlü çevrimsel yükleme testi gerçekleştirmişlerdir [42]. Kiriş kolon birleşimlerinde sürekliliğin sağlanması için kaynak ve bulonlardan faydalanmak yerine geleneksel boyuna donatılar ve öngermeli halatlardan faydalanmışlardır. Plastik mafsal oluşumunun kolon yüzeyinde meydana gelmesi amaçlanmış ve tasarım bu doğrultuda yapılmıştır (Şekil 1.32). Test sonunda deney numunelerinde %3,5 yanal öteleme kapasitesine ulaşılmış ama yine de betonarme sistemin gerisinde kalınmıştır.

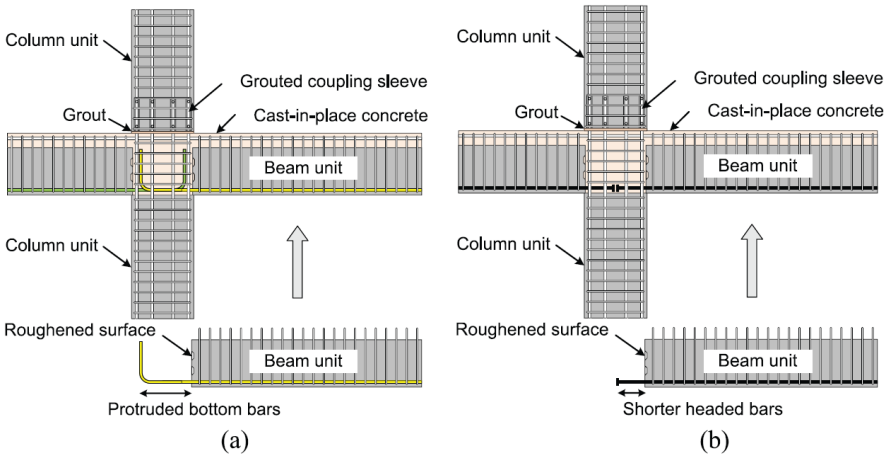


Şekil 1.32 : Alcocer vd. nin ıslak birleşimli kiriş kolon numuneleri, [42].

Kulkarni ve Li, orta veya üstü şiddette depremselliğe sahip bölgelerde yapılan prefabrik yapılarda düğüm noktalarının önemine değinmiş ve çerçeve sistemleri için çelik ve betonun beraber kullanıldığı hibrit bağlantıların davranışını ortaya koyan bir dizi deney gerçekleştirmişlerdir [43]. Döşemeli olarak tasarlanan kiriş kolon bağlantıları için ikisi prototip ikisi yerinde dökme dört deney düzeneği hazırlayan araştırmacılar, mukavemet, süneklik, enerji sönümleme kapasiteleri gibi çeşitli verileri ortaya koymak ve karşılaştırmak için tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme protokolleri ile numuneleri test etmişler. 2 boyutlu sonlu eleman modelleri de oluşturulan deney numunelerinin sonuçları sayısal sonuçlarla karşılaştırılmış, yeter mertebede oluşturulabildiği gösterilmiştir.

Xue ve Yang, geleneksel yöntemlerden farklı olarak kenar aksları ve iç aksları temsil edecek 4 farklı prekast kolon kiriş birleşim detayı oluşturmuş ve ıslak birleşim ile moment aktaran düğüm noktaları haline getirmişlerdir. Bu birleşimlerde kirişler ve döşemeler prefabrik elemanlardan oluşurken kolonların tamamı yerinde dökme betonarme kolonlardan imal edilmiştir [44].

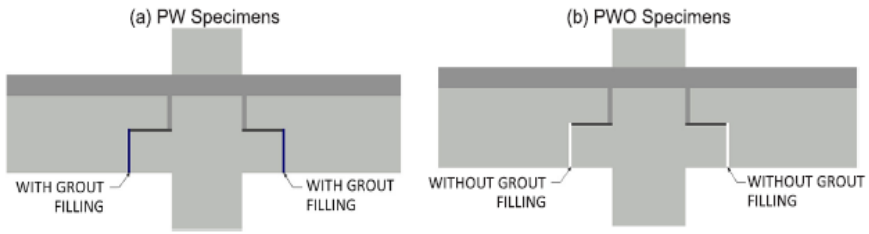
Lee vd. prefabrik yapılardaki kolon kiriş birleşimlerinin ıslak olarak oluşturulması durumunda düğüm noktasındaki donatı boylarını kısaltmak ve donatı kalabalıklığını azaltmak üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir [45]. Kiriş alt donatılarının birleşim bölgesinde 90 derece kıvrımlı bırakılması yerine başlıklı donatıların kullanılması önerilmiştir. Bu sayede bindirme boyunu sağlamak için uzun donatı kullanma dezavantajını minimize etmeye çalışmışlardır (Şekil 1.33).



Şekil 1.33 : Prekast kiriş kolon birleşim karşılaştırması a) konvansiyonel yöntem b) Alternatif başlıklı yöntem, [45].

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda başlıklı donatıların bindirmeli donatılar kadar iyi çalıştığı görülmüş; fakat karşılıklı başlıklı donatıların birbirlerine çok yakın olmaları halinde beton kırılmasına neden olduğu çalışma sonunda belirtilmiş.

Lacerda vd. prefabrik yapılarda guseli kolonlar ile kirişlerin kuvvet taşıma kapasitesini iyileştirebilmek amacıyla derzi grout ile doldurmayı tasarlamışlardır [46]. Kolon gusesi ile kirişi pim ile birbirlerine bağladıktan sonra kiriş ile guse yüzeyi arasında kalan derz bölgesine bir çelik kalıp kurulmuş ve grout harcı ile bu bölge doldurulmuştur. Kiriş üst donatıları ise kolon düğüm noktasına kadar sürülmüş ve ıslak betonun dökülmesi ile süreklilik sağlanmıştır (Şekil 1.34). Derzde gerçekleştirilen harç doldurma işlemi ile kirişte meydana gelen negatif moment taşıma kapasitelerini arttırmayı hedeflemişlerdir.

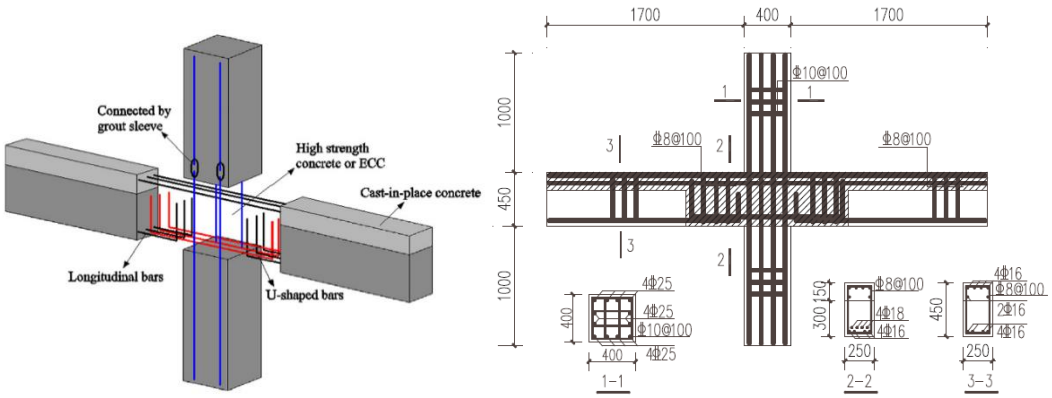


Şekil 1.34 : Lacerda vd'nin harç dolgulu guseli kolon kiriş birleşimleri, [46].

Derzin tam veya yarı doluluğunu da parametre olarak inceleyen araştırmacılar 2 numuneyi tamamına kadar, 2 numuneyi ise yarısına kadar grout betonu ile doldurmuşlardır. Elde ettikleri sonuçlar, negatif moment kapasitelerinin harç dolgusu olmayan numunelere kıyasla sırasıyla 5,05 kat ve 1.4 kat daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiş.

Lu vd. kirişlerin kolonlarla moment aktaracak şekilde çalışması için U şeklinde tertip edilmiş donatılar ve yüksek dayanımlı iyileştirilmiş çimento kullanılarak gerçekleştirilen bir ıslak birleşim yöntemi önermişlerdir [47]. Kalıp kurma, kaynak işi ve bulonlama yöntemleri ihtiyacının ortadan kaldırıldığını belirten çalışmada hem iç aks hem de kenar aks düğüm noktalarını temsil eden kiriş kolon birleşim deneyleri gerçekleştirilmiştir. Tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemelere maruz bırakılan test grubu 5 önüretimli kiriş kolon deney numunesinin yanı sıra 2 adet de monolitik numune içermektedir. Deney sonuçları, yüksek dayanımlı beton kullanılan numunelerde elde edilen rijitlik bozulması ve enerji sönümleme değerlerinin yerinde dökme betonarme

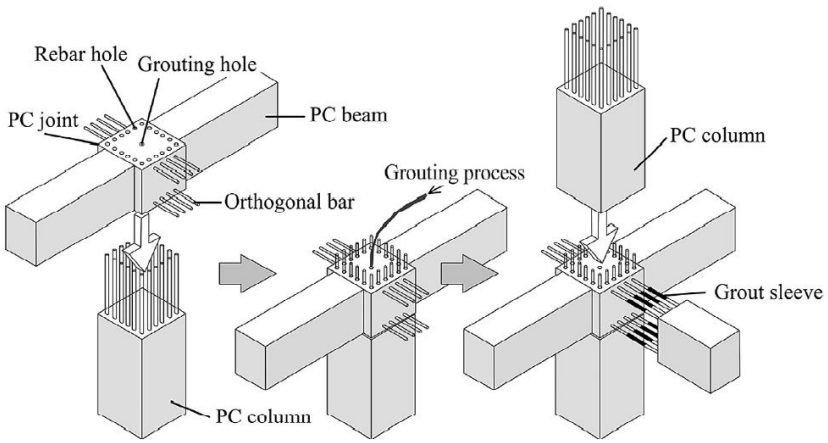
sistemlerden daha iyi olduğunu göstermiştir. Buna karşın yük taşıma kapasiteleri ve sünekliklerin ise biraz daha düşük olduğu belirtilmiştir (Şekil 1.35).



Şekil 1.35 : Lu vd. tarafından önerilen kolon kiriş ıslak birleşimi, [47].

Yan vd. prekast yapılarda moment aktaran kiriş kolon birleşimleri için iç akslarda kullanılabilecek bir ıslak birleşim metodunun sismik yükler etkisi altında davranışını araştırmışlardır [48]. Bu amaçla ürettikleri beş prekast ve bir yerinde dökme numuneyi tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme altında test etmişlerdir. Hasar modu, taşıma kapasitesi, süneklik, enerji sönümleme miktarları ve kat öteleme kapasiteleri açısından numuneler arasında karşılaştırmalar yapılmış ve test sonuçlarının prekast numunelerin yerinde dökme betonarme numuneye benzer değerler verdiği belirtilmiştir.

Prekast elemenların bağlantısı için önerilen ıslak birleşim metoduna ait görsel Şekil 1.36'da verilmektedir. Kiriş, kolon ve düğüm noktası önüretim olarak oluşturulan elemanlarda kirişlerden biri düğüm noktası ile beraber yerinde döküm şeklinde oluşturulmaktadır. Bu kiriş, kolona dübel delikleri ile yerleştirilip harç ile doldurulduktan sonra kiriş düzlemine dik doğrultuda yerleştirilen ikinci prekast kiriş, harç dolgulu çelik kılıflar kullanılarak bağlanmıştır. Kalıp kurulup beton dökülerek ikinci kirişin ıslak birleşim ile montajı tamamlanmıştır (Şekil 1.36).



Şekil 1.36 : Yan vd. tarafından önerilen kolon kiriş ıslak birleşimi, [48].

Gou vd. mühendislik özellikleri geliştirilmiş az büzülen çimento esaslı kompozit malzeme (LSECC) ve U kesitli prekast kabuklar kullanarak önüretimli kiriş kolon birleşimleri için bir düğüm noktası tasarlamışlar [49]. Prekast kabuk boyu, düğüm noktasında etriye varlığı, kiriş boyuna donatı çapı gibi parametrelerin çalışıldığı 4 adet prekast numune ve 1 adet monolitik numune tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme testlerine tabi tutulmuş. Prekast bağlantıların performansı; nihai kapasite, deformasyon, enerji kaybı, kesme distorsiyonu ve bağlantı çekirdeğinin mukavemeti açısından değerlendirilmiş, önerilen bağlantıların; gerekli sismik performansı korurken bağlantı donatı detaylarını etkili bir şekilde basitleştirebileceğini göstermiştir.

Tüm bu çalışmalara ek olarak bu tez çalışmasının hazırlandığı süreçte dahi çeşitli araştırmacılar önüretimli betonarme yapıların depreme dayanıklı ve sismik yükler etkisi altında çalışabilen düğüm noktalarını incelemektedirler. Dolayısıyla düğüm noktalarında moment aktarabilmeye imkân sağlayan kuru veya ıslak birleşimler ile çeşitli çalışmalar halen gerçekleştirilmekte veya çalışma sonuçları yayınlanmaktadır.

1.4 Hipotez

Geleneksel yöntemler ve güncel yaklaşımlar incelendiğinde genel olarak önüretimli betonarme yapıların moment aktaran kiriş kolon birleşim bölgelerinin ve düğüm noktalarının ıslak birleşimler ile oluşturulduğu görülmektedir. Islak birleşim montajları sırasında ise tasarıma uygun aplikasyon gerçekleştirilmesi için ya kolonlarda guseler bırakılır ya da kirişler için sehpalar kurulur. Estetik tasarımdan uzaklaşılmasına neden olan çıkma görünümleri ya da birleşim bölgesini hazırlama

aşaması nedeniyle montaj sürelerinin uzaması önüretimli betonarme sistemlerin avantajlarına ket vurmaktadır. Bu işlemlerin yarattığı ek maliyetler ise bir başka olumsuz konudur. Ayrıca, ıslak birleşimin gerçekleştirilmesi için yeterli kenetlenmeyi sağlayacak olan donatı yerleştirilmesi ihtiyacı, düğüm noktasına kalıp kurulması, beton dökümü ve priz süreci ile birlikte işçilik kalitesinin değişkenlik göstermesi veya soğuk derz oluşumu gibi başka parametreler mevcuttur. Tüm bu parametreler, bir kalite standardı yakalanmasını veya bütün düğüm noktalarına aynı kapasite davranışının kazandırılmasını engellemektedir. Islak birleşim yöntemleri uygulamada zaman, işgücü, artan malzeme harcanmasına neden olmaktadır.

Islak birleşimlere alternatif olan yöntemler ise kuru birleşimler ile harç dolgulu çelik kılıflarla oluşturulan birleşim bölgeleridir. Buna karşın ıslak birleşimlerle kıyaslandığında moment aktarma kapasiteleri sınırlı kalmaktadır. Bir başka zayıflıkları ise taşıyıcı sistem elemanlarının aplikasyonları sırasında ortaya çıkmaktadır. Önüretimli betonarme yapılarda birleştirme yöntemlerinin yapı elemanlarında meydana gelecek boyutsal ve açısal kusurları tolere edebilmesi beklenir. Bir kiriş eleman, tasarımından daha uzun veya daha kısa üretilmiş olabilir. Ya da bir kolonun üstünde bırakılan kuru birleşim yuvaları kiriş ile eşleşmeyebilir. Kuru birleşimler hızlı montaj yapma kabiliyetlerinin aksine üretim sürecindeki hataları giderebilmek konusunda ıslak birleşimlere kıyasla yetersiz kalabilmektedir.

İster ıslak birleşim olsun ister kuru birleşim, mevcut yöntemler ve araştırmalar incelendiğinde deprem etkisi altında birleşim bölgesinde meydana gelebilecek hasarın yönlendirilmesi veya belirli bir kesite empoze edilmesi ile ilgili yöntem neredeyse bulunmamaktadır. Bu amacı gerçekleştiren yöntemler ise ya basitlikten uzak karmaşık bir tekniğe sahip ya da teoride mümkün, uygulamada gerçekçi olmayan araştırmalardır. Hatta bir adım daha ilerisi düşünülerek bu yöntemler içerisinde hem hasarı belirli bir bölgede yoğunlaştıran hem de hasar aldıktan sonra demonte edilip değiştirilebilen bir yöntem bulunmamaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında, önüretimli betonarme yapı sistemlerinin kiriş-kolon bağlantılarında kullanmak üzere moment aktarabilen, mekanik, basit, deprem yükleri etkisinde hasarı istenen kesite yönlendiren, sökülebilir ve ihtiyaç halinde değiştirilebilir yeni bir birleşim fikri ve yöntemi öne sürülmüştür. Bu yöntem ve yöntemin gerçekleştirilmesini sağlayan ürün, farklı düzeylerde gerçekleştirilen

deneysel çalışmalara tabi tutularak öne sürdüğü özelliklere sahip olduğunu kanıtlamıştır.

Önerilen birleşim detayının bileşenleri hem monotonik hem tersinir tekrarlı yükler etkisinde deneysel olarak incelenmiş; farklı parça ve bileşen boyları, aderans boyları, çelik kılıf ve çeşitli değişkenler irdelenmiştir. Optimize edilmiş prototip birleşim detayları, önüretimli betonarme çerçevelerin kiriş-kolon birleşimlerinde test edilmiş, kiriş boyuna donatılarının sürekliliğini sağlayabilecek kapasitede olduğu pek çok manşon deneyi ile ispatlanmıştır. Ayrıca, 1/1 ölçekli kiriş-kolon birleşimi için deney numuneleri oluşturulmuş, bu yöntem ile gerçekleştirilen bağlantı tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeler ile eğilme sünekliği yüksek, moment taşıma kapasitesi sınırlandırılabildiği verilerle ortaya konmuştur. Enerji sönümleme kabiliyeti ile birlikte bu tez çalışmasında ortaya konan yöntem ve ürünün uluslararası yönetmelik kabul kıstaslarını sağlayabildiği, deneylerden elde edilen parametreler sayesinde görülmüştür.

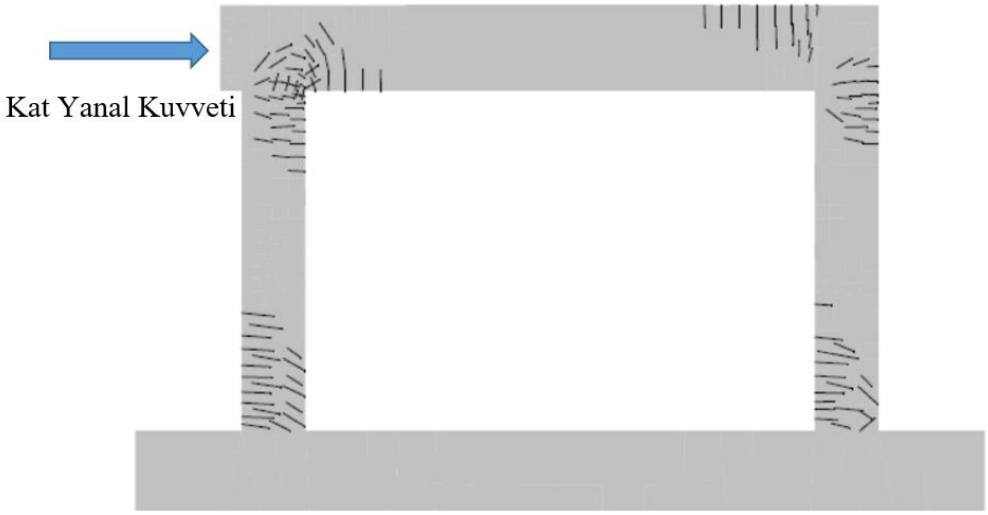
Gerçekleştirilen bu çalışma, Japonya, Amerika, Çin ve Yeni Zelanda gibi ülkelerdeki inşa edilen önüretimli betonarme yapılarda yaygın olarak kullanılan kiriş-kolon mekanik bağlantılarının, ülkemizde yaygınlaştırılması katkı sağlayacaktır. Tez kapsamında gerçekleştirilen bu araştırmadan elde edilen bilgi birikimi ve tecrübe ise, ülkemiz prefabrik sektörünün çok katlı yapı sistemlerinde faaliyet göstermesi açısında katma değer yaratacaktır.

2. DEĞİŞTİRİLEBİLİR MEKANİK PLASTİK MAFSAL

2.1 Kavram ve Tanımlar

Betonarme çerçeve sistemlerinde yer alan taşıyıcı sistem elemanlarında dış kuvvetlerin etkisi ile birlikte eleman kesitlerinde eğilme momenti ve açısal dönmeler meydana gelir. Eğilme momentinin düşük olduğu ve dönmelerin sınırlı olduğu kesitlerde elastik bir davranış sergilenirken dönmelerin daha fazla oluştuğu kesitlerde kalıcı şekildeğiştirmeler ve hasar oluşumu meydana gelir. Betonarme elemanların kesitleri yeterli sünekliğe sahip ise, güç tükenmesi meydana gelmeden önce kesitlerin çekme bölgesinde beton çatlakları ve donatılarda akma meydana geldiği gözlemlenir [50].

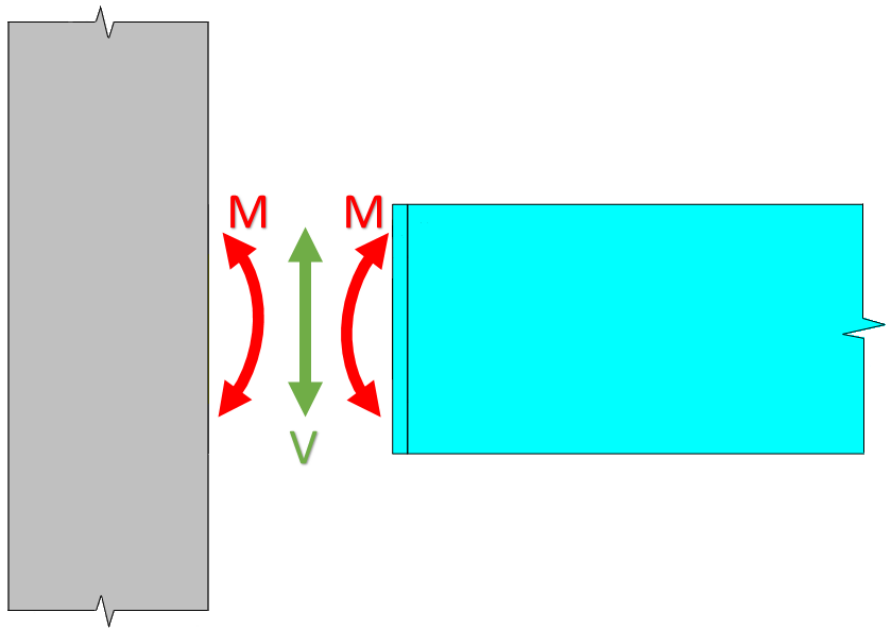
Deprem, rüzgâr gibi yanal yüklerin yapıya etkimesi sonucunda sünek taşıyıcı elemanlarda meydana gelen kesit dönmeleri ve eğilme momenti değerleri artar. Bu dönmeler sonucunda doğrusal olmayan şekildeğiştirmeler ve yapı elemanlarında çatlaklar, hasarlar oluşur. Bu hasarlar ise kolonların alt ve üst uçlarında, kirişlerin ise düğüm noktası civarındaki uç bölgelerinde daha fazla meydana gelmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1: Betonarme çerçevelerde yanal kuvvetlerin sonucu oluşan karakteristik çatlak oluşumu, [51].

Eğilme momentinin büyük olduğu düğüm noktalarına yakın bölgelerde meydana gelen çatlaklar ile kesitin eğilme rijitliği azalır. Buna bağlı olarak plastik dönmelerin bu kesitte büyük olacağı söylenebilir [52]. Plastik dönmelerin etkili olduğu görülen bu kesitlerin Şekil 2.1'de de görüleceği gibi belli bölgelerde yoğunlaştığı görülür. Plastik şekildeğiştirmelerin yoğunlaştığı bu bölgelere plastik mafsal, bu bölgeler dışında kalan bölgelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığı ve doğrusal elastik olmayan şekildeğiştirmelerin ise sadece uç bölgelerde meydana geldiği kabulüne ise plastik mafsal hipotezi denir [53].

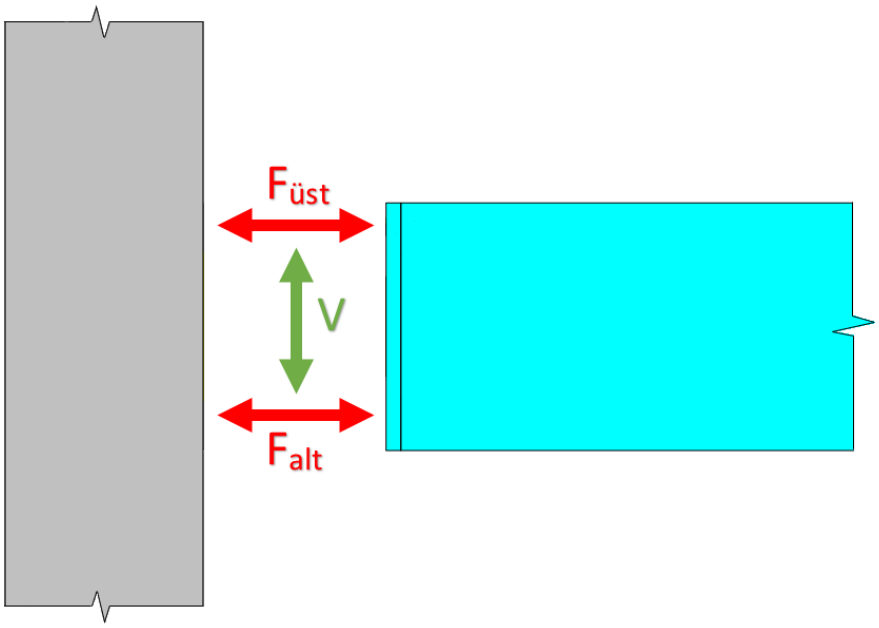
Mekanik plastik mafsal, yapının maruz kaldığı yatay yükler sebebiyle kirişlerde oluşan plastik mafsalların yerini alması için planlanan ve tasarım mühendisinin yapısal hasarın bu eleman üstünde toplanmasını öngördüğü yapay bir kiriş uç bölgesidir. Bu amaçla taşıyıcı çerçeve sisteminde kirişlerin kolonlara bağlantılarının gerçekleştirildiği uç bölgelerinin mekanik plastik mafsal için boş bırakılması öngörülmekte ve kiriş kolon bağlantısının kaynak veya ıslak beton kullanmadan kuru bir birleşim ile oluşturulması hedeflenmiştir.



Şekil 2.2: Tipik bir kiriş kolon birleşimi ve kiriş uç kuvvetleri.

Tasarlanan mekanik plastik mafsalın ise taşıma kapasitesine ulaşana kadar kirişte oluşan uç kuvvetleri düğüm noktasına başarıyla aktarması beklenir (Şekil 2.2). Bu kuvvetlerden biri olan eğilme momentini kuvvet çifti denklemi kullanarak yatay kuvvetlere indirgeyerek basitleştirmek mümkündür. Kuvvet çiftine indirgeme için ise kuvvetler arasındaki mesafeyi kirişin üst ve alt yüzeylerinde pas payı katmanının

altında yer alan sargılı beton yüksekliği içerisinde oluştuğunu kabul edelim. Bu durumda kiriş uç kuvvetleri Şekil 2.3'de görüldüğü şekilde dönüştürülmüş olacaktır.

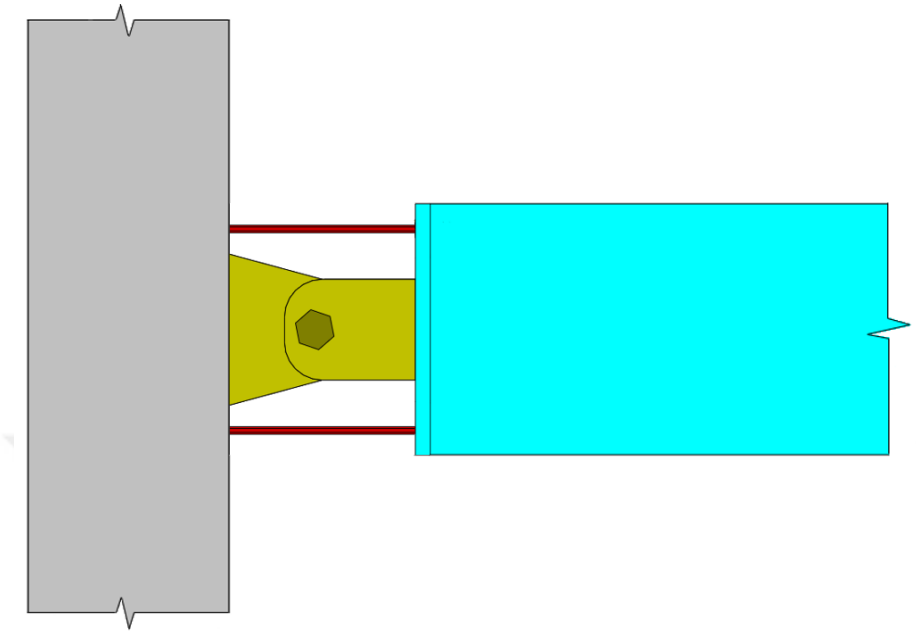


Şekil 2.3: Tipik bir kiriş kolon birleşiminde uç kuvvetlerinin tekil yüklere indirgenmesi.

Eğilme momenti etkisi altında bulunan bir betonarme kiriş kesitinde basınç gerilmeleri tarafsız eksenin basınç bölgesinde bulunan beton tarafından karşılanır. Varsa eğer basınç donatıları da basınç gerilmelerine direnmek konusunda beton katmanı ile beraber çalışır. Çekme gerilmelerinin aktarımı sırasında ise betonun çok az dayanım göstermesi sebebiyle hiç çalışmadığı kabulü yapılarak kirişte bulunan boyuna doğrultudaki donatıların yalnız çalıştığı kabulü yapılır [54]. Bu amaçla kuvvet çiftinin yerinin mekanik plastik mafsal tasarımında kiriş boyuna donatılarının ekseni olmasının daha uygun olacağı görülmektedir.

Mekanik plastik mafsalın oluşturulması için yukarıda verilen tasarım kıstasları dikkate alınarak iki alt bileşen oluşturulması uygun görülmüştür. Bu bileşenlerden birincisi kirişte meydana gelen kesme gerilmelerini başarıyla kolon düğüm noktasına aktarmayı sağlayacak *kesme bileşenidir*. İkinci bileşen ise eğilme momentinden ortaya çıkan donatı düzeyindeki kuvvet çiftlerinin taşınmasına izin veren ve donatı sürekliliğinin kolon çekirdeğine kadar korunmasını sağlayacak *manşon bileşenidir.* Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal oluşturulurken, iç kuvvetlerin birbirinden ayrılığı ve bağımsız alt bileşenlerin her birinin sadece tek bir iç kuvvet tarafından zorlanması gerektiği kabul edilmiş ve tasarım buna uygun olarak oluşturulmuştur. Böylece tez çalışmasının

ana unsurunu oluşturacak olan ve kirişlerin kolonlara bağlantılarını sağlayacak olan bu bağlantı aracının genel tasarıma ait ana fikri Şekil 2.4'de görüldüğü haliyle ortaya konulmuştur.



Şekil 2.4: Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın genel tasarımına ait ana fikir.

Kesme bileşeninin yük aktarma kapasitesi kiriş kapasitesinin üstünde olmak zorundadır. TBY 2018'e göre sismik yükler etkisi altında kirişlerde gevrek kırılma oluşmaması gerekmektedir. Bu durumda kesme bileşeninin de en az bağlandığı betonarme kiriş elemanı kadar kesme kuvveti kapasitesine sahip olması beklenir.

Manşon bileşeni ise mekanik plastik mafsalı oluşturan ana unsurdur. Tarafsız eksenin alt ve üstünde yer alan bileşenlerin beraber çalışması suretiyle kirişin eğilme momentini düğüm noktasına aktarmaktadırlar. Buna karşın elastik sınırlar içerisinde taşıyabilecekleri en büyük eğilme momenti değeri kiriş kesitinin sahip olduğu eğilme momenti kapasitesinin akma anındaki değerinden daha küçük olmak zorundadır. Çünkü ana tasarım unsuru, çerçeve sistemde meydana gelecek ilk plastikleşme eğiliminin mekanik plastik mafsal tarafından oluşması ve bir sigorta gibi taşıyıcı çerçevenin hasar alan elemanı görevi görmesidir. Bu nedenle manşon bileşeni *Sigorta Tipi Mekanik Manşon (STMM)* olarak isimlendirilmiştir.

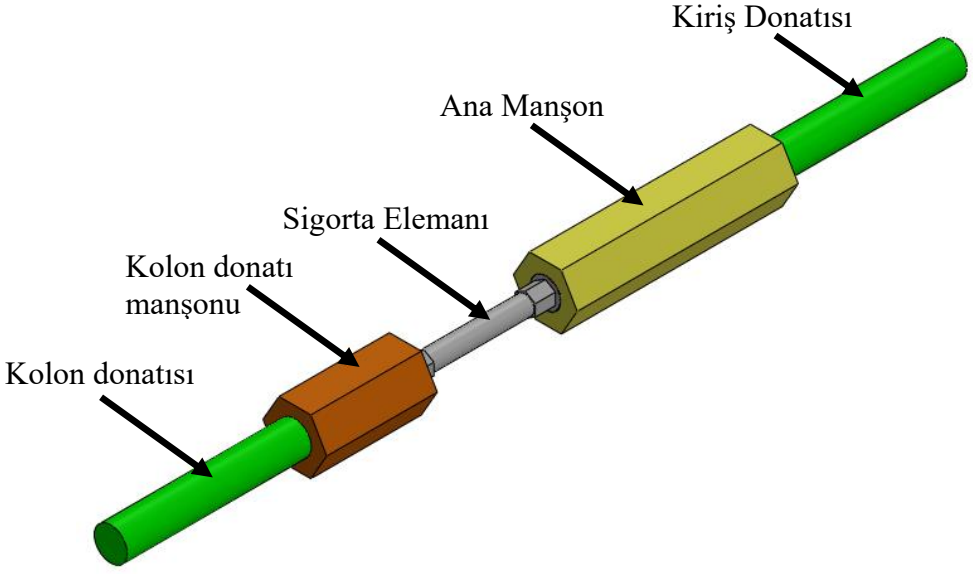
Ana tasarım ilkeleri belirlendikten sonraki aşama, sigorta tipi mekanik manşon ve bu manşonu içerisinde barındıracak olan değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın kesin

tasarımlarını oluşturmaktır. Bu tez çalışması kapsamında oluşturulan ve deneylerle test edilen tasarımlar ile ilgili detaylar aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

2.2 Sigorta Tipi Mekanik Manşon

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın moment bileşeni olarak da adlandıralabileceğimiz sigorta tipi mekanik manşon (STMM), tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen araştırma deneyleri, geometrik ölçütler ve öngörülemeyen kusurlar sebebiyle gelişerek son haline gelmiştir. Bu başlık altında tezin sonraki bölümlerinde yer alan sigorta tipi mekanik manşonların tanımlamaları yapılacaktır.

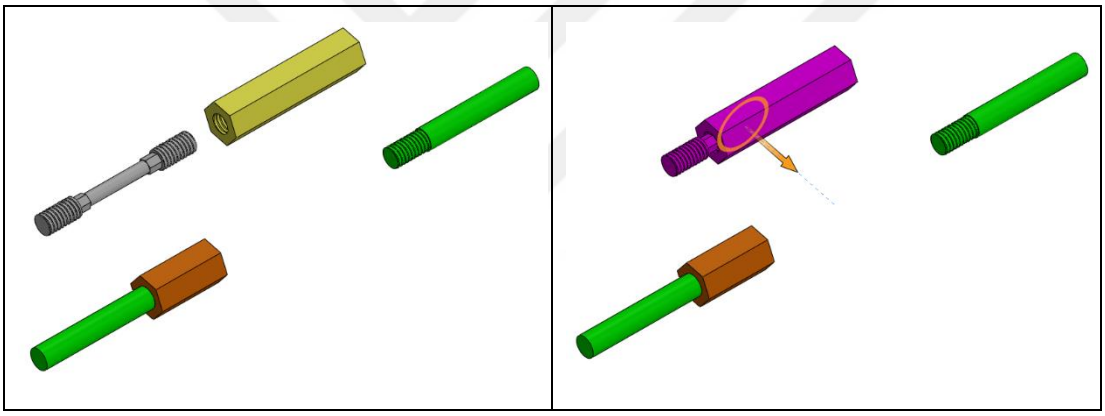
Sigorta tipi mekanik manşonun tasarım gereği görevi, kiriş boyuna donatısını kolonun düğüm noktasında bulunan donatıya mekanik olarak bağlamaktır. Bu bağlantıyı gerçekleştirmek amacıyla somun, manşon ve çelik malzemelere açılmış dişlerden faydalanılmıştır. Montaj sırasında kirişlerin ve düğüm noktalarının hareket edebilmeleri mümkün olmadığı için bu hareket kabiliyetini eksenel doğrultuda uzayabilme veya kısalabilme şeklinde STMM'ye kazandırılması gerekiyordu. Ayrıca, kiriş ekseni boyunca ve bu kirişi düğüm noktasına bağlayan mekanik plastik mafsallar içerisinde moment taşıma kapasitesi en zayıf elemanın da STMM kesitlerinde olması istenmektedir. Tüm bu parametreler bir araya koyulduğunda ortaya çıkan ilk ön tasarım Şekil 2.5'de görüldüğü gibi oluşmuştur.



Şekil 2.5: STMM prototip 1'e ait üç boyutlu görsel tasarım.

Şekilde görülen kolon donatısı ve kiriş donatısı montaj sırasında sabit kalan ve yerleri değiştirilemeyen elemanları ifade eder. Bu sebeple Sigorta tipi mekanik manşonu

oluşturan sigorta elemanı ve sigorta manşonunun yivli bağlantılar kullanılarak eksenel doğrultuda kısalabilme ve ihtiyaç halinde açılarak uzayabilme özelliğine sahip olmaları gerekmektedir. Kolon donatı manşonunun ise kolon yüzeyinde uç kısmı hariç betona gömülü olması planlanmıştır. Bu sebeple kolon donatı manşonunun da sabit kalacağı kabul edilmelidir. Bu durumda montaj sırasında hareketli parçaların sigorta elemanı ve ana manşondan ibaret olacağı aşikârdır. Sigorta elemanının ve ana manşonunun montaj öncesi hâli Şekil 2.6a'da gösterildiği gibi olacaktır. Kiriş ve kolon donatıları arasında kalan bölgeye STMM elemanlarının geometrik olarak yerleşimlerini sağlamak ve yivli dişi ve erkek parçaların birbirleriyle montajını gerçekleştirebilmek amacıyla sigorta elemanı ve ana manşon iç içe geçmiş olmalıdırlar (Şekil 2.6b). Bu haldeki STMM, kiriş ve kolon arasında bırakılan boşluğa yerleştirilebilir ve kirişte bırakılan donatı filizi ile kolonda bırakılan manşona mekanik olarak bağlanabilir.



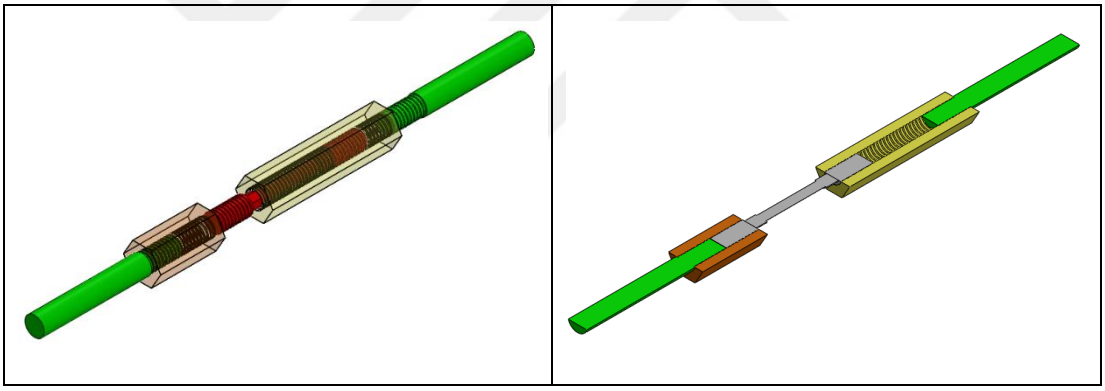
(a) (b)

Şekil 2.6: STMM prototip 1'e ait montaj öncesi üç boyutlu görsel tasarımı.

STMM elemanının mekanik olarak bağlanma süreci tamamlanmadan önce sigorta eleman ve ana manşonun geometrik ve mekanik özelliklerine değinmekte fayda var. Sigorta elemanın orta bölgesi dairesel kesit olmasına karşı kenarlarında altıgen geometriye sahip bölümler bulunmaktadır. Dairesel kestin alanı, sigorta elemanın taşıması istenen eksenel kuvvet kapasitesine göre belirlenir. Eksenel çekme kuvvet kapasitesi, kolon ve kiriş donatılarının akma anındaki çekme kuvveti kapasitelerinden daha düşük olacak şekilde belirlenir. Bu sayede bütün kesitler içerisinde ilk plastikleşen elemanın sigorta eleman olması sağlanır. Montaj sırasında anahtar kullanılarak bağlantı yapılabilmesi için kesitin altıgen olması düşünülmüştür. Sigorta elemanın iki ucunda bulunan yivli bölümler ise donatıların anma çapları kadar olmalıdır.

Ana manşonun geometrik özellikleri belirlenirken sigorta elemanında olduğu gibi montaj sırasında anahtar geçirilebilmesi amacıyla altıgen bir kesit seçilmiştir. Kesit alanı hesaplanırken elastik sınırlar içerisinde kalması için sigorta elemanın sahip olduğu kesit alanının en az iki katına sahip olacak şekilde bir boyutlandırma yapılmıştır. Ana manşon uzunluğu belirlenirken ise kiriş donatısının, sigorta elemanın ve montaj mesafesinin ölçüsü dikkate alınmış ve montajı sağlayacak bir geometri belirlenmiştir.

Donatılar ve STMM elemanlarında bulunan bütün dişler için standartta yer alan etkili yiv uzunluğunun 1,5 katı kullanılmıştır. Metrik diş ve yivler kullanılan parçalarda yiv uyumu için ana manşon ile kiriş donatısı ve sigorta eleman dişleri aynı metrik ile oluşturulmuştur. Tüm STMM elemanlar ve donatı uçlarına dişler açılması sonucunda Şekil 2.7a'da verilen hayaletli görselde görüldüğü gibi ana manşon anahtar ile kiriş donatısına, sigorta eleman ise kolon donatı manşonuna mekanik olarak bağlanmıştır. Montajın tamamlanmış haline ait görsel ise Şekil 2.7b'de incelenebilir.



(a) (b)

Şekil 2.7: STMM prototip 1'e ait montaj sonundaki üç boyutlu görsel tasarımı.

Yukarıda tasarım çizimleri oluşturulan STMM prototip 1 için çelik malzemeden gerçek bir üretim yapılmış ve eksenel çelik çekme testleri de gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Ayrıca kiriş kolon bağlantı kabiliyetlerinin irdelenmesi amacıyla bir test düzeneği de laboratuvar ortamında bir araya getirilmiştir. 3. ve 4. bölümlerde bu testlere detaylıca değinilecektir.

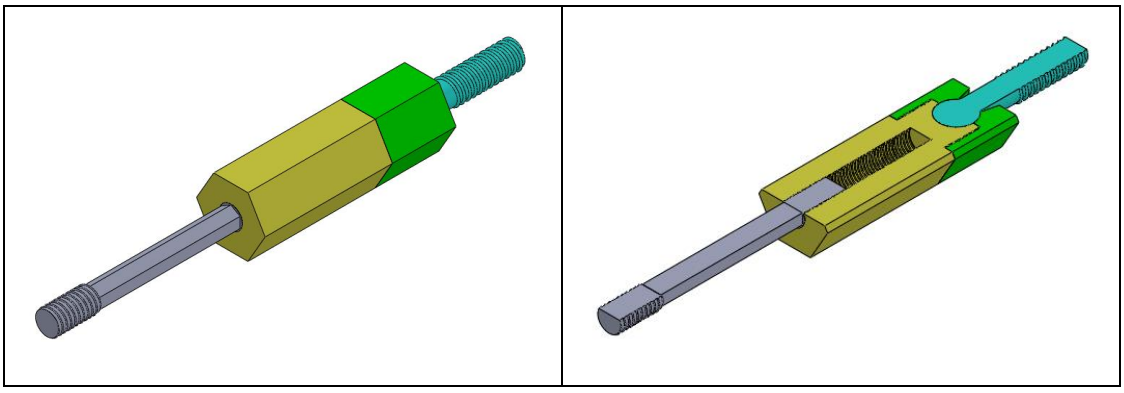


Şekil 2.8: Üretilmiş STMM prototip 1.

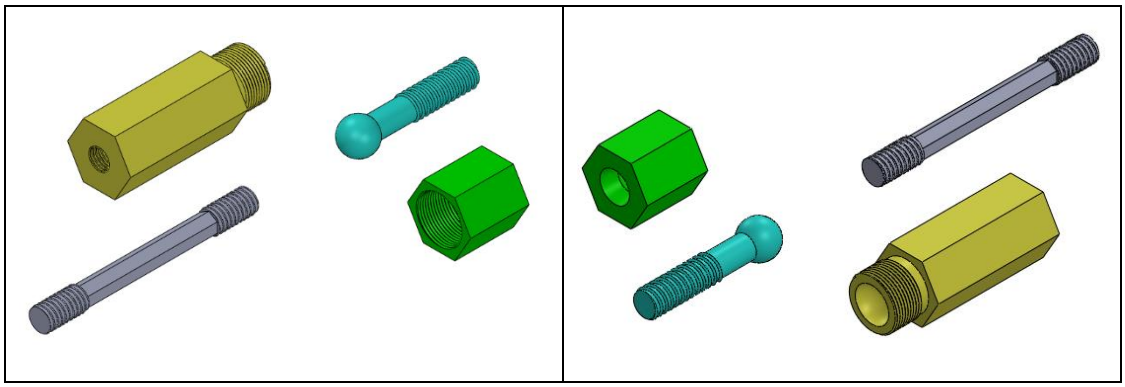
Oluşturulan ilk tasarım ve üretilen ilk prototip fikri ortaya konurken yapılan kabullerde taşıyıcı sistem elemanlarının ve yapı bloğunun kusursuz olduğu, işçilik hatalarının olmadığı, bütün ölçüm ve kesimlerin milimetre düzeyinde tam ve kesin olduğu kabul edilmiştir. Fakat gerçek bir uygulamada, bir şantiyede veya prefabrik yapı elemanları üreten tesislerde böyle bir durumdan söz etmek mümkün değildir. Yönetmelikler de bu durumu kabul ederek üretim sırasında geometrik boyutlarda ve yapısal ürünlerin montajında bazı tolerans mesafelerinin olması gerektiğini belirtmektedir.

Bu kusurlardan biri çerçeve sistemini oluşturan kiriş ve kolonların aplikasyonları yapıldığında, mimaride planlandığı gibi aks doğrultularına paralel olamamalarıdır. Bu durum, çok küçük değerlerde kalsa bile yatayda ve düşeyde taşıyıcı elemanlarda açısal dönmelerin oluşmasına neden olur. Bu durum doğal olarak hem birleşim bölgelerinde eksenel doğrultuda kusurların oluşmasına hem de bağlantı elemanlarının bu kusurları tolere etmek zorunda bırakılmalarına neden olmaktadır.

Tolerans varlığı STMM'yi oluşturan parçaların da açısal ve eksenel doğrultuda ayarlanabilir özelliklere sahip olması talebini ortaya koymaktadır. Bu durum tasarımın revize edilerek STMM'ye açısal dönme toleransı sağlayan bir yetenek kazandırılması ihtiyacını ortaya koymuştur. Bu özelliği kazandırabilmek için STMM elemana topuzlu ve dişli bir parça eklenmiş ve gürzlü vida adı verilmiştir. (Şekil 2.9). Gürzlü vidanın ana manşona bağlantısı için gürz yuvası olarak isimlendirilen rondelalı somuna benzer bir tasarım oluşturulmuştur.



Şekil 2.9: STMM prototip 2'ye ait üç boyutlu tasarım görselleri.



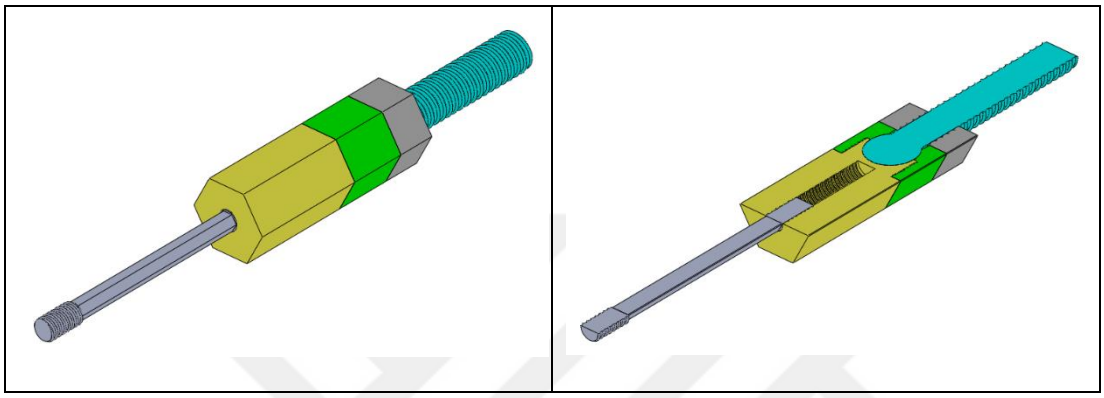
Şekil 2.9 (devam) : STMM prototip 2'ye ait üç boyutlu tasarım görselleri.

Gürzlü vidanın tasarım içerisinde STMM'nin boyuna eksenine dik doğrultudaki her iki eksen etrafında dönebilme kabiliyetine sahip olması gerekmektedir. Bu sebeple oluşturulan tasarımda gürzlü vidanın bir ucu tam küreye yakın bir geometriye sahiptir. Bu özelliğin desteklenmesi için gürz yuvasının iç tarafı gürz topuzuna uyacak şekilde dairesel olarak oyulmuş, manevra kabiliyetinin kısıtlanmaması için de gürz yuvasının ağız bölümüne pah açılmıştır.

Gürz yuvasının ana manşona bağlantısı için ise her iki parçaya ek tasarım yüzeyi eklenmiştir. Ana manşonun boyu 2,5 cm uzatılmıştır. Uzatılan kesitte dış yüzeye diş açılmış, iç yüzeyde ise gürzlü vidanın küre ucunun yerleşebilmesi için dairesel oyuk açılmıştır. Gürz yuvasına da ana manşonu tamamlayacak şekilde 2,5 cm uzunluğunda diş açılmış dış yüzeyine altıgen kesite sahip bir bölüm eklenmiştir. Uzatılan bu bölüm ile gürzlü vidanın gürz yuvası ve ana manşon arasında hapsedilerek iç kuvvetlerin tamamının STMM boyunca sürekli aktarılması sağlanmıştır. Gerçekleştirilen bütün değişikliklerle birlikte ortaya STMM Prototip 2 çıkmıştır. Önemli iyileştirmelere sahip bu tasarımın geometrik özelliklerinin belirlenmesi için ISO 15835 yönetmeliğine uygun olarak çeşitli testler gerçekleştirilmiştir. Bu deneyler Bölüm 3'deki Deneysel Çalışmalar başlığında detaylı olarak anlatılmıştır.

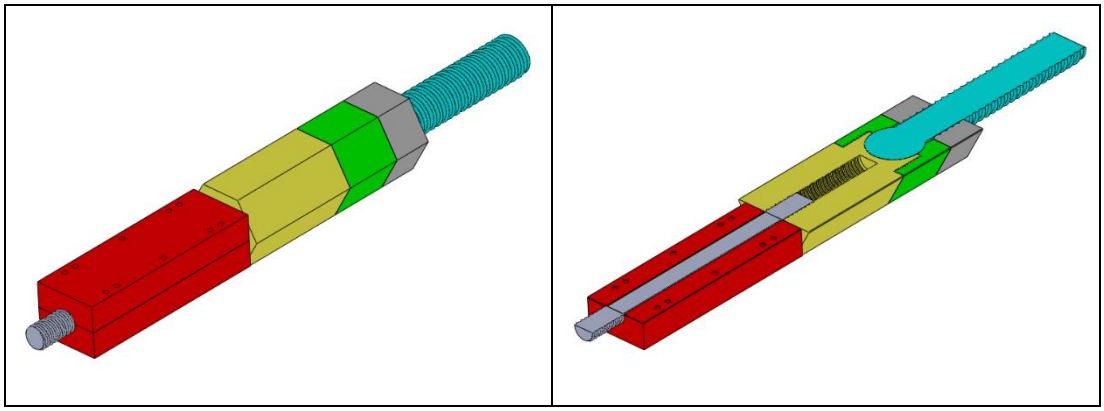
Deneylerden elde edilen sonuçlar ISO 15835 yönetmeliğindeki kriterlere uygun sonuçlar vermesine ve STMM'nin testlerden başarıyla geçmesine rağmen, prototip 2'nin eksenel basınç kuvveti altında göstermiş olduğu yanal burkulma direnimi arzu edilen düzeyde olmamıştır. Moment kuvvetlerinin kuvvet çifti olarak kolon düğüm noktasına aktarıldığı değiştirilebilir mekanik plastik mafsal tasarımında, STMM elemanlarının eksenel çekme kuvveti kapasitesine benzer eksenel basınç kuvveti taşıyabilmeleri gerekmektedir. Bu amaçla burkulma direnci yüksek yeni bir tasarım olan STMM prototip 3 detaylandırılmıştır.

Yeni STMM modeli, Prototip 2 üzerinde gerçekleştirilen değişiklikler ile oluşturulmuştur. Gürzlü vidanın geometrik çapı arttırılarak yanal burkulma rijitliği arttırılmıştır. Gürzlü vidanın boyutlarındaki değişime uyum gösterebilmesi için gürz yuvası ve ana manşonun çapları ile boyutları arttırılmıştır. Gürz yuvasının ana manşon ile montajı sırasında diş gevşemesini engellemek amacıyla bir bağlantı somunu tasarıma eklenmiştir. Gerçekleştirilen bu düzenlemelere ait görseller Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10: STMM prototip 2'de gerçekleştirilen ilk değişiklikler.

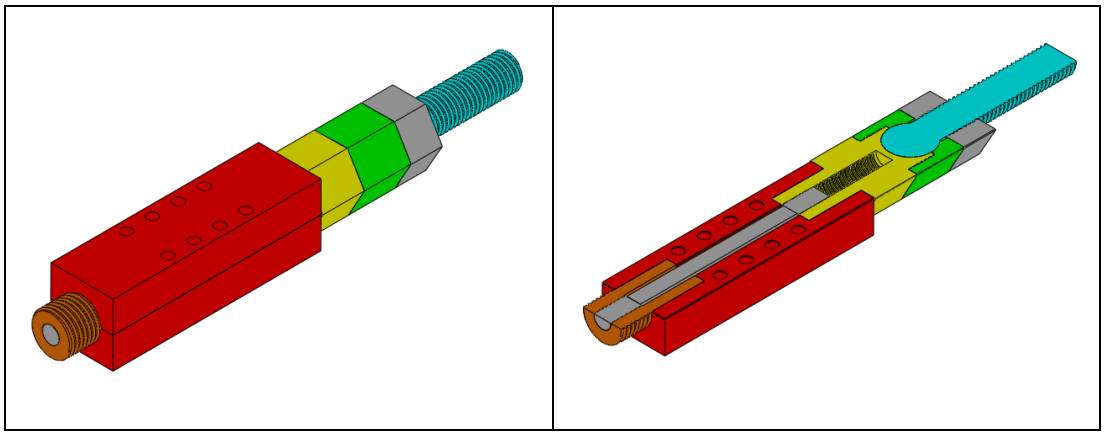
Tasarım yapılan düzenlemeler iyileştirmelere neden olsa dahi sigorta elemanın eksenel kuvvetler etkisi altındaki narinliğinin de ortadan kaldırılması gerekmektedir. Bu amaçla sigorta elemanın gövde bölgesi Şekil 2.11'de görüldüğü gibi 2 parçadan oluşan çelikten bir ceket ile desteklenmiştir. Ceket geometrisi oluşturulurken burkulma eğiliminin belirgin bir doğrultuda tetiklenmemesi istenmiştir. Bunu sağlamak için çelik ceket kesiti kare olacak şekilde boyutlandırılmıştır. Sigorta elemanın eksenel doğrultuda uzama ve kısalma yapması durumunda serbest bir şekilde şekildeğiştirebilmesi için de çelik ceket ile sigorta eleman arasında 1mm boşluk kalacak şekilde boyutlandırma yapılmıştır.



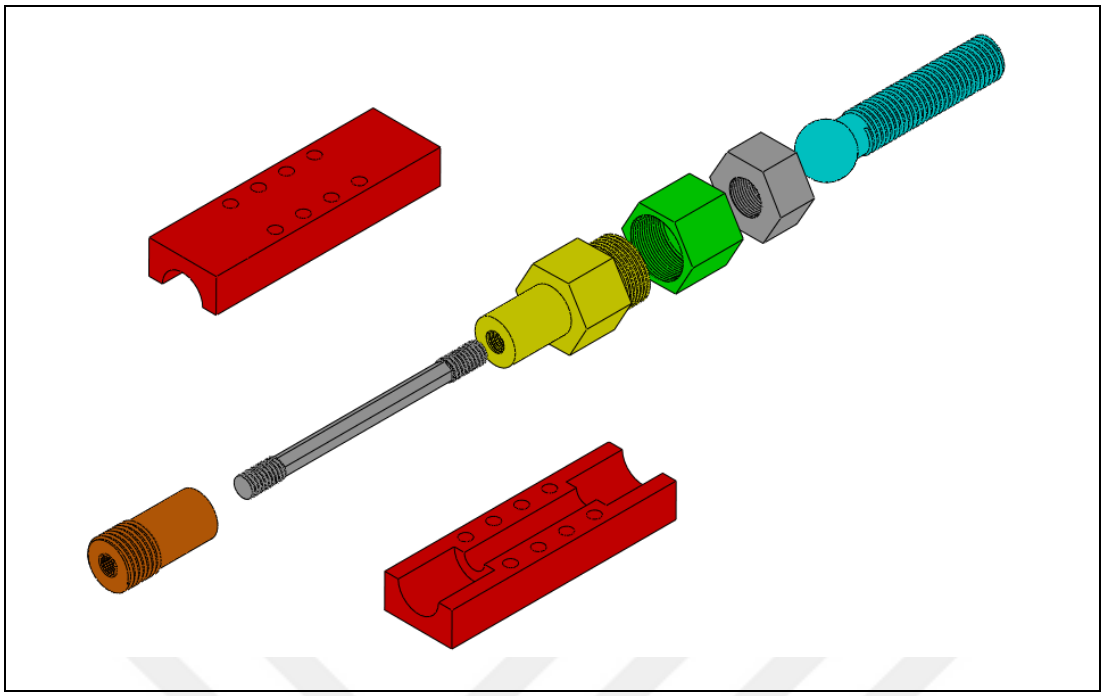
Şekil 2.11: STMM prototip 2'de gerçekleştirilen çelik ceket eklentisi.

Gelinen son tasarım ile gerçekleştirilen ve Deneysel Çalışmalar başlığı altında anlatılan deneylerde STMM'ye ait eksenel basınç kuvveti değerinde ve yanal burkulma rijitliğinde önemli ölçüde artış tespit edilmiştir. Buna karşın çelik ceket (Şekil 2.11 – kırmızı renkli parçalar) ile ana manşon (Şekil 2.11 – sarı renkli parça) arasında mekanik herhangi bir bağlantı olmaması sebebiyle bu iki parça arasında kalan düzlemde eğilmeye karşı zayıf bir kesit oluştuğu görülmüştür. İlave edilen parçalara karşın burkulma zayıflığı sebebiyle tasarımda bir kez daha değişikliğe gidilmesine karar verilmiştir.

Gerçekleştirilen ilk tasarım değişikliği ana manşonun bir kısmının daha küçük çapta bir kesit olarak imal edilmesidir. Böylece sigorta eleman ile gürzlü vidayı birbirine bağlamasının yanı sıra ayrıca bir kılavuz görevi görmesi sağlanmıştır. Kılavuzluk görevini ise çelik ceket için gerçekleştirmektedir. Bunun için de çelik ceket parçaları boyuna doğrultuda her iki uçtan uzatılmıştır. Böylece eksene dik doğrultuda burkulma gerçekleştirmek istediğinde ana manşonun kılavuzluğu ile bu davranış istemi engellenecektir. Ayrıca kolon tarafında alın levhasına montajlanan ve sigorta elemanın uç dişlerinin de montajlandığı bir kolon manşonu eklenmiş, çelik cekete kolon yüzeyin kılavuz olması sağlanmıştır. Ortaya çıkan ve nihai olan yeni tasarıma STMM prototip 3 adı verilmiştir (Şekil 2.12). Bu tez çalışması kapsamında ortaya konan değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın tamamlanmış tasarımında da STMM prototip 3'ler kullanılmıştır.



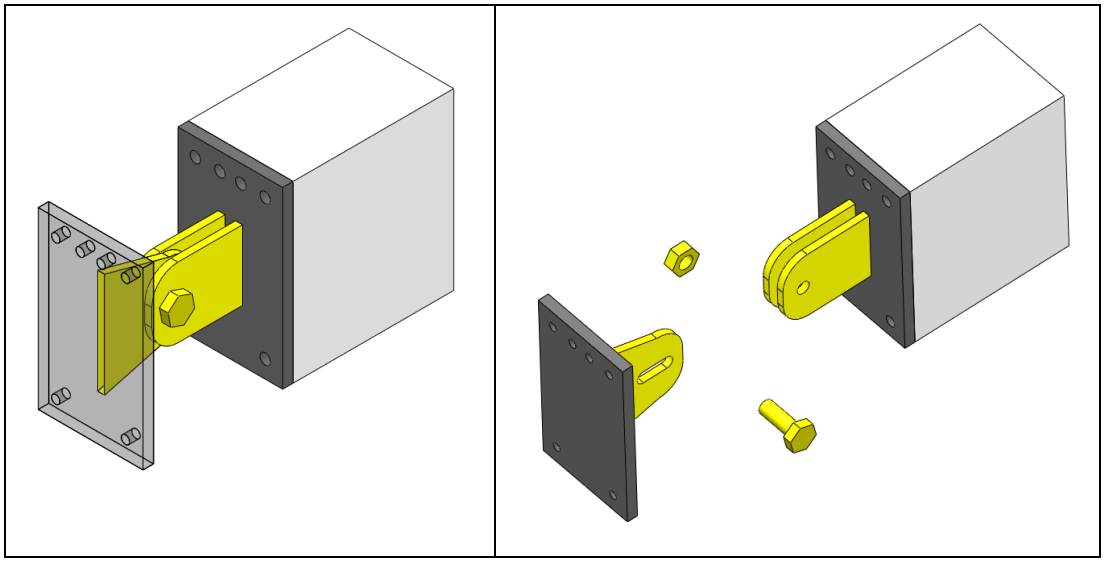
Şekil 2.12: STMM prototip 3'e ait üç boyutlu tasarım görselleri.



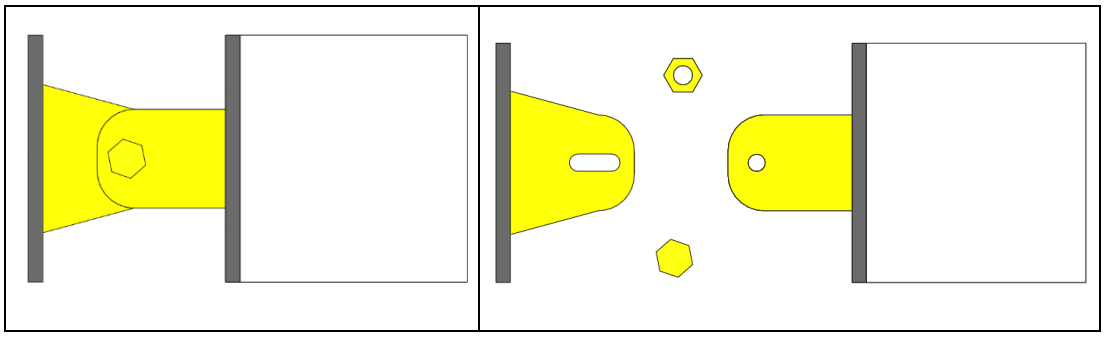
Şekil 2.12 (devam) : STMM prototip 3'e ait üç boyutlu tasarım görselleri.

2.3 Kesme Bileşeni

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın kayma bileşeni, önüretimli kiriş ve kolonun bağlantısının gerçekleştirilmesini sağlayan ve kiriş iç kuvvetlerinden kayma kuvvetlerinin düğüm noktasına başarıyla aktarılmasını sağlayan ana unsuru ifa etmektedir. Kesme bileşenini oluşturan elemanların tamamı çeliktir. Alın levhaları, kayma levhaları, pim ve somundan oluşan bileşen Şekil 2.13'de gösterilmektedir. Detayların daha rahat anlaşılabilmesi için kolon görseli verilmemiştir.



Şekil 2.13: Kayma bileşenine ait üç boyutlu tasarım görselleri.



Şekil 2.13 (devam) : Kayma bileşenine ait üç boyutlu tasarım görselleri.

Kesme bileşeninin ilk parçaları alın levhalarıdır. Kiriş uçlarında ve kolon yüzeylerinde bırakılan bu levhaların önüretimli elemanlar ile kenetlenmesinin sağlanması için L veya U şeklindeki donatılardan oluşturulmuş sakallar kullanılmıştır. Levhanın arka tarafına sakallar kaynaklanır ve donatı dizilimi sırasında bu alın levhaları yerleştirilir.

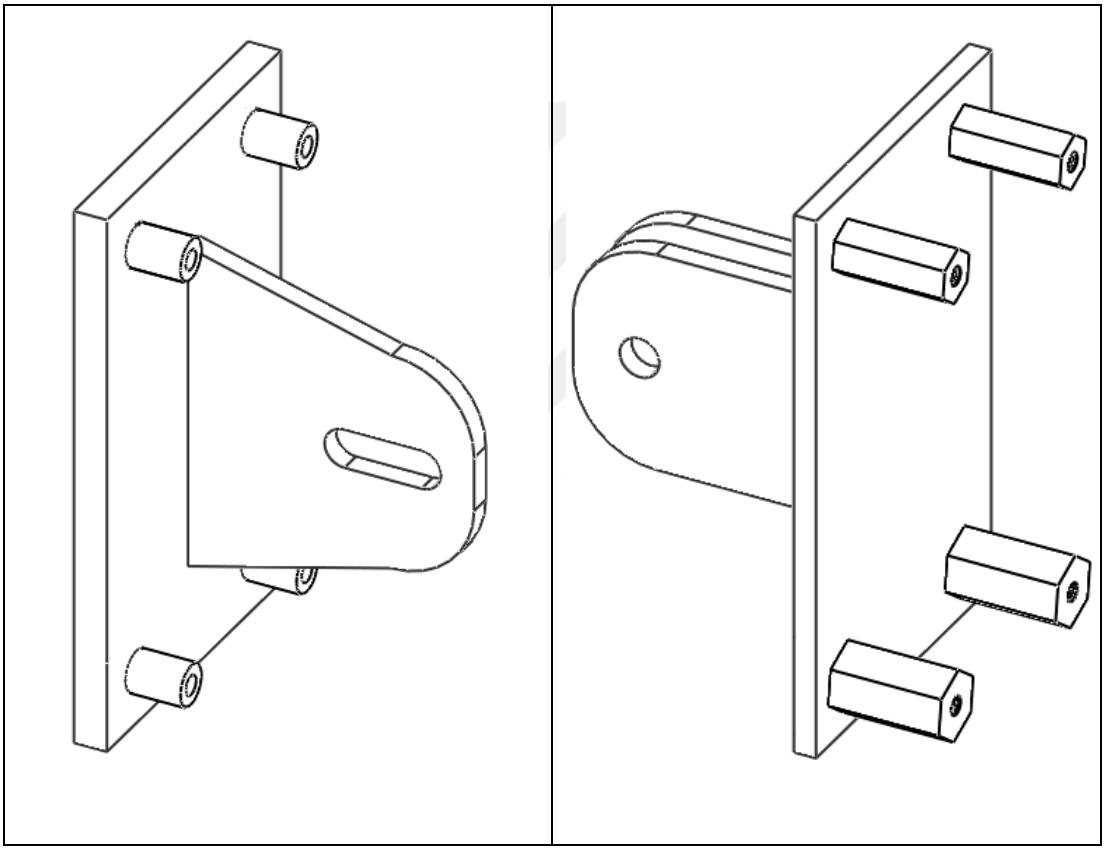
Alın levhalarının ön yüzlerinde ise kesme bileşeninin ikinci parçaları olan kayma levhaları bulunur. Yine kaynaklama yöntemiyle alın levhalarına bağlantısı gerçekleştirilen kayma levhalarında kiriş tarafındakiler birbirinin eşleniği 2 levhadan, kolon tarafındaki ise derinliği arttırılmış tek levhadan oluşmaktadır. Kiriş tarafında bırakılan kayma levhalarına daha sonradan kullanılacak pim ve somun çiftine uygun çapta delikler açılır. Kolon tarafında bırakılan tek levhada ise uzunluğu pim çapının 3 katı, genişliği ise pim çapından 1mm daha büyük bir yatak bırakılır. Bu yatak, önüretimli kiriş için eksenel doğrultuda boy toleranslarını sağlayabilmek için oluşturulmuştur.

Pim ve somun ile bağlantısı tamamlanan kesme bileşeni, Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal uygulamasındaki ilk aşamayı oluşturur ve bağlantının tamamlanması ile birlikte devreye girerek çalışmaya başlar.

2.4 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsalın Uygulanması

Yukarıdaki başlıklarda değiştirilebilir mekanik plastik mafsal kavramı, bileşenleri ve tasarımı oluşturan detaylara yer verilmiştir. Bu başlık altında ise değiştirilebilir mekanik plastik mafsal uygulamasının adımları sırasıyla verilmeye çalışılmıştır. Anlatımı desteklemesi için verilen çizimler üstte 2 altta 2 sıra yerleşime göre verilmiş olmasına karşın STMM düzeni ve sayısı tasarımcının istediği doğrultuda değiştirilebilir ve arttırılabilir.

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın uygulanabilmesi için kesme bileşeninin parçaları olan alın levhalarının ve kayma levhalarının önüretimle betonarme kiriş ve kolonların üretimi sırasında tesisteki sehpalarda beton dökümü öncesinde kalıp içerisine yerleştirilmesi ve donatı kafesi ile beraber çalışması sağlanmalıdır. Bu amaçla Şekil 2.14'de gördüldüğü gibi kayma levhaları alın levhalarına yüzeye dik doğrultuda kaynaklanır. STMM elemanlarının ve donatıların bağlantısının sağlanması ve donatı sürekliliğinin sağlanabilmesi için alın levhalarına donatı manşonları yerleştirilir. Donatıların alın levhalarındaki manşonlara ve dolayısıyla STMM elemanlarına bağlantısı gerçekleştirilebilmesi için uçlarına diş açılması gerekmektedir.

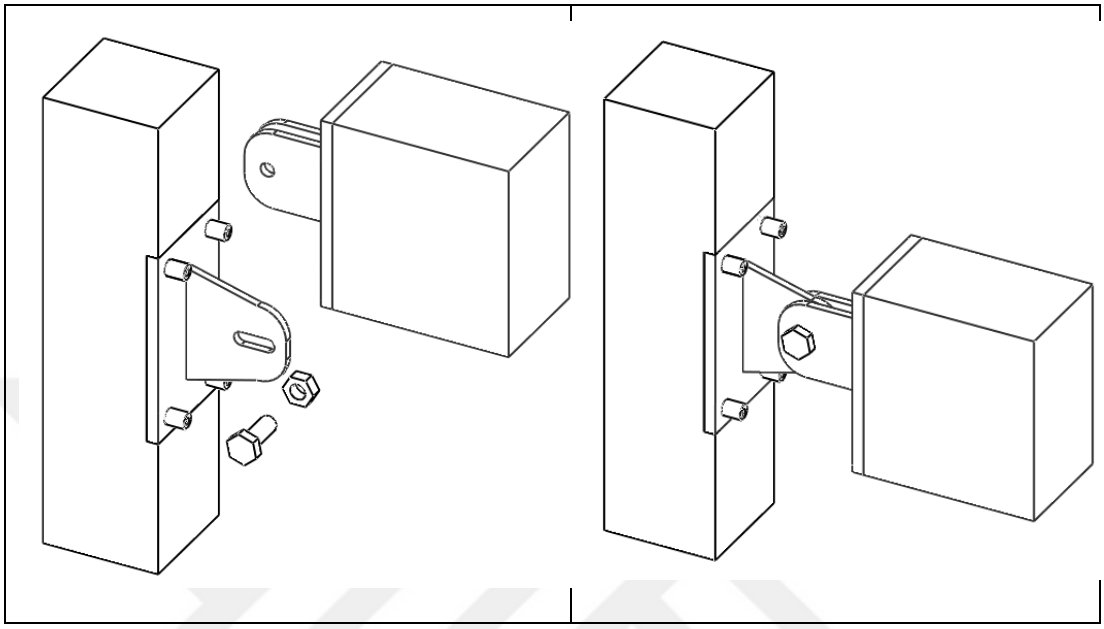


(a) (b)

Şekil 2.14: Alın levhalarının ve manşonların hazırlanması; a) kolon alın levhası ve manşonları b) kiriş alın levhası ve manşonları.

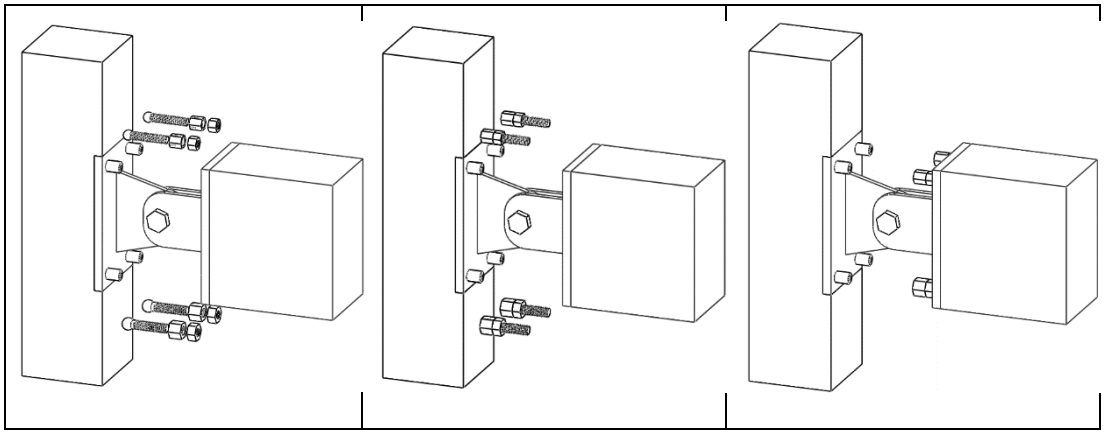
Üretim tesisinde beton dökümü ve priz süreci tamamlanan betonarme kolon ve kiriş elemanların şantiyeye transferi sırasında kayma bileşenlerinin zarar görmemesi için gerekli önlemler alınır. Yapı inşası sırasında kolonlar yerleştirildikten sonra kirişler vinç aracılığıyla kolonlardaki bağlantılara düşey doğrultuda hareket ederek yerleştirilirler. Yerleşim sırasında kolon kayma levhasının kiriş levhalarının arasında olması sağlanır. Düşey doğrultuda kirişler doğru kota indirildiğinde kayma

levhalarındaki delikler aynı düzeye gelirler. Bu aşamada pim ve somun kullanılarak levhaların bağlantısı gerçekleştirilir, vincin kiriş bağlantıları sökülerek vinç uzaklaştırılabilir (Şekil 2.15). Buradaki amaç her bir kiriş yerleşimi sırasında vinci asgari düzeyde meşgul etmek ve iş akışını hızlandırabilmektir.



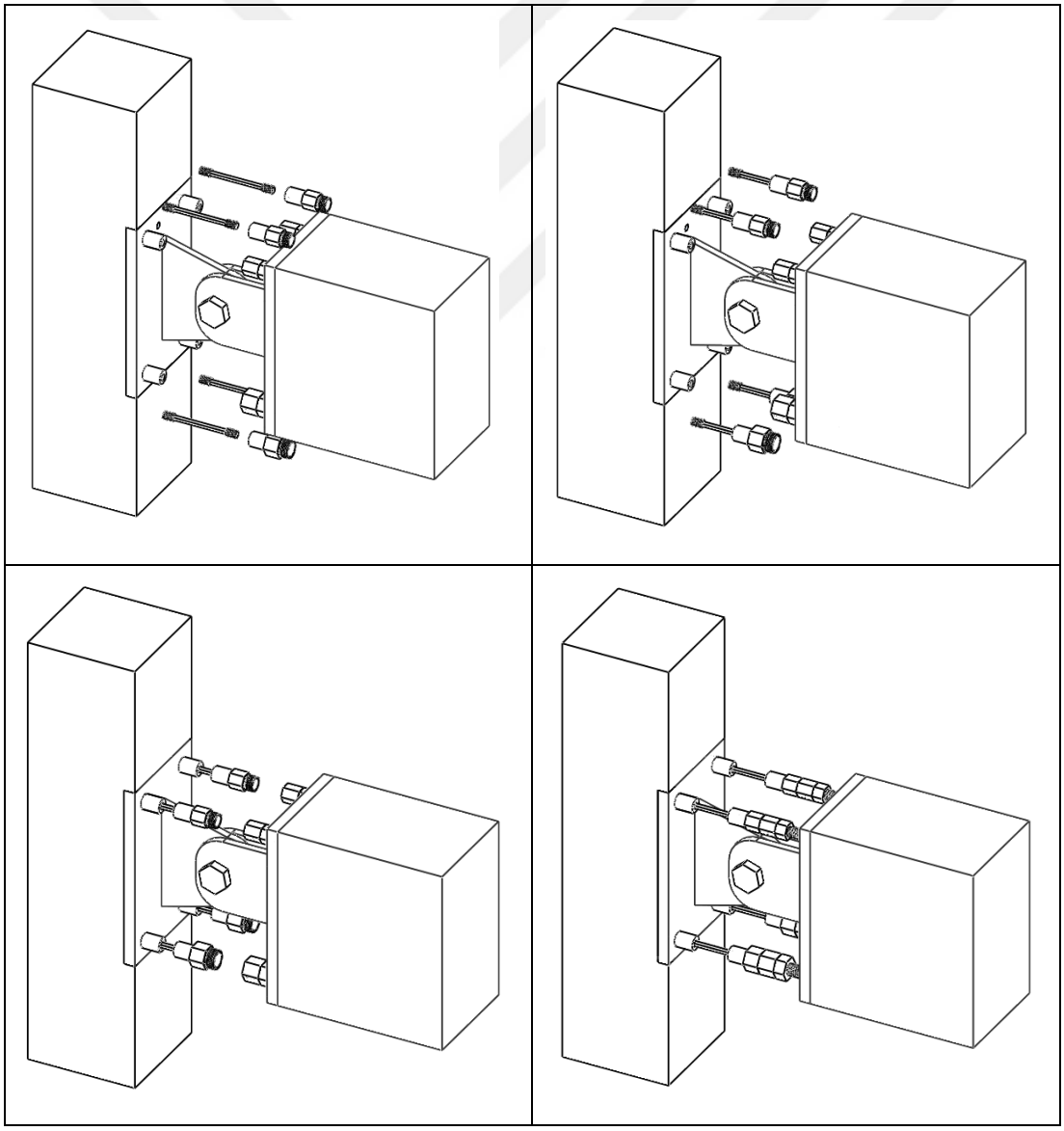
Şekil 2.15: Kayma bileşenlerinin tamamlanmış montajı.

Bu aşamadan itibaren moment bileşenini oluşturan sigorta tipi mekanik manşonların montajlama işlemlerine geçilir. İlk yapılan işlem, gürz yuvası, destek somunu ve gürzlü vidanın birbirleriyle bağlanmasıdır. Daha sonra gürzlü vidanın dişleri, kiriş alın levhasında bulunan manşonlara vida dişleri aracılığıyla montajlanır (Şekil 2.16). Sonraki aşamalardaki montajın gerçekleştirilmesi için gürzlü vida, kiriş manşonunda en derin noktaya kadar ilerletilir.



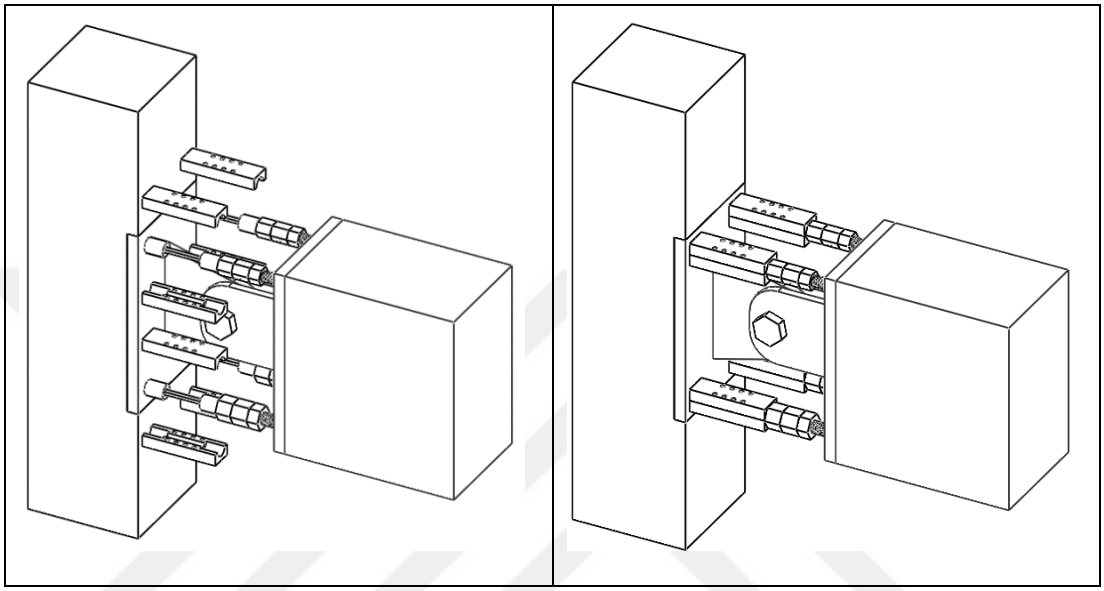
Şekil 2.16: Gürzlü vida montajlama aşamaları.

Bir sonraki aşamada ana manşon ile sigorta eleman, sahip oldukları dişler aracılığıyla iç içe geçirilirler. Şekil 2.16'da görülen, gürzlü vida ve kolon manşonu arasında kalan bölgeye birleştirilmiş ana manşon ve sigorta eleman çifti yerleştirilir. Sigorta elemanın açıkta kalan ucundaki dişler kolon manşonun içine montajlanır. Orta kesiti altıgen olan sigorta eleman anahtar yardımıyla tutularak sabitlenir, bu sırada ana manşon sigorta elemandan kendi ekseni etrafında döndürülmek suretiyle sökülerek gürzlü vidaya doğru hareket etmesi sağlanır. Son adımda ise ihtiyaçtan daha fazla miktarda vidaları sıkılan gürzlü vida, topuzu ana manşonun ucunda bulunan yuvaya yerleşene kadar kiriş manşonundan sökülür. Gürz yuvası ve destek somunu da ana manşon başlığına anahtar aracılığıyla sıkılıp montajlanır. Bu aşamadan itibaren kiriş uç kesiti moment aktarabilme kabiliyetini kazanmış olur (Şekil 2.17).



Şekil 2.17: Sigorta eleman ve ana manşonun montajlama aşamaları.

Son aşama olarak sigorta elemanların basınç kuvvetleri etkisi altında yanal burkulma yapmalarını engellemek ve değiştirilebilir mekanik plastik mafsala dayanım kazandırabilmek amacıyla birbirinin eşi olan iki çelik ceket sigorta elemanlara giydirilir. Üzerinde sekizer adet montaj deliği bulunan çelik ceketler her bir sigorta elemanına çiftli olarak tutturulur, alyan başlıklı vidalar ile sabitlenerek montaj tamamlanır (Şekil 2.18).



Şekil 2.18: Çelik ceketlerin montajlama aşamaları.

Yukarıda bileşenleri ve parçaları açıklanan, montaj aşamalarının detaylı anlatımı yapılan değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın uygulama yöntemi, detaylı teknik çizimleri ve literatürle farkı bu doktora tezi haricinde bir patent metnine de dönüştürülmüştür. İTÜ NOVA aracılığıyla yöntemin özgünlüğü ve fikri mülkiyet hakkı için patent başvurusunda bulunulmuştur [55].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu başlık altında ön ve ana tasarımları gerçekleştirilen ve üretimleri yapılan değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve alt bileşeni olan sigorta tipi mekanik manşona ait deneyler ile tez fikrini oluşturan plastik mafsalı içerisinde bulunduran bir düzlem çerçeve testine detaylıca yer verilmiştir.

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve düzlem çerçeveye ait deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan 25 ton kapasiteli hidrolik veren sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Sigorta tipi mekanik manşonun geliştirilmesine yönelik deneyler İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında, geometri ve versiyon değişiklikleri, iyileştirilmiş tasarımlar ve nihai sigorta tipi mekanik manşonlara ait deneyler ise MATİL A.Ş. – Malzeme Test ve İnovasyon Laboratuvarında yapılmıştır.

Sigorta tipi mekanik manşon deneyleri eksenel doğrultuda yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve çerçeve deneyleri ise farklı genlikte ve farklı frekans değerlerine sahip sinüs dalgalarından oluşan yerdeğiştirme protokolleri ile icra edilmiştir.

3.1 Sigorta Tipi Mekanik Manşonun Geliştirilmesine Yönelik Deneyler

Bu bölümde anlatılan deneyler iki başlık altında toplanmıştır. İlk başlıkta sigorta tipi mekanik manşonun nihai tasarımı ortaya konana kadar gerçekleştirilen araştırmalar verilmiştir. Bu araştırmaların içeriğini, kullanılacak malzemenin türü, geometrilerin uygunluğu, talep edilen toleransların tespiti, mekanik birleştirme yönteminin tespiti ve yeterliliği gibi konular oluşturmaktadır. Ayrıca oluşturulan prototip tasarımların yapı sektöründe uluslararası düzeyde kabule uygun olması için ispat etmesi gereken yükümlülükler mevcuttur. Bu yükümlülükler ise ISO 15835 yönetmeliği ile belirtilen ve kabul kriterleri verilen bir dizi test protokolünden oluşmaktadır.

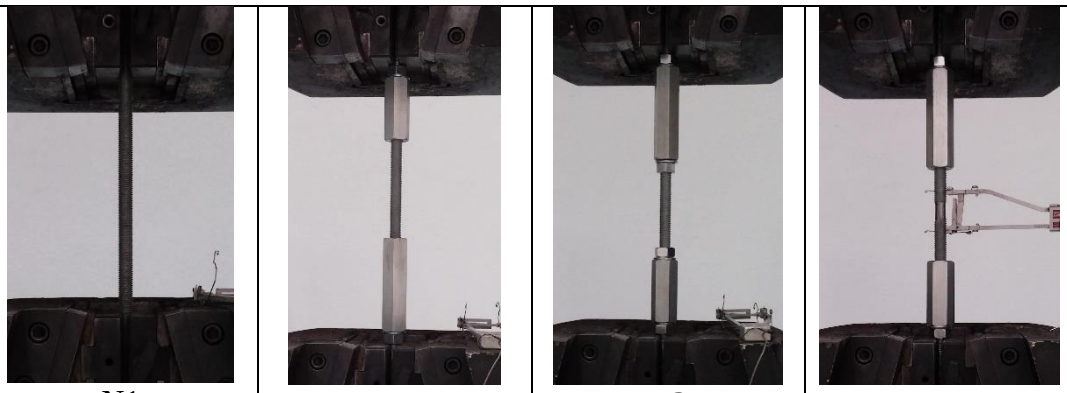
İkinci başlıkta ise sigorta tipi mekanik manşonun nihai tasarımına ait deneyler detaylı olarak verilmiştir. Bu deneylerde, sigorta tipi mekanik manşonun performansının

arttırılması, mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi ve yönetmelik kriterlerine uygunlukları irdelenmiştir.

3.1.1 Ön deneyler

Sigorta tipi mekanik manşonun tasarımı sırasında malzeme, mekanik birleşim yöntemi, geometrik ölçüler, tasarım detayları, birleşimi oluşturacak parça sayısı, öngörülemeyen kusurlar gibi pek çok belirsizlik mevcuttu. Oluşturulan tasarımın bir yapı projesinde kullanılabilmesi ve statik hesaplamalarının yapılabilmesi için mekanik özelliklerinin araştırılması; dayanım, süneklik, taşıma kapasitesi, eksenel basınç ve burkulma kuvveti değerleri gibi sayısal büyüklüklerin belirlenmesi gerekliydi. Ayrıca ortaya konan tasarımın sektöre uygun olduğunun ispatlanması için yönetmeliklerce belirlenen kabul kriterlerini yerine getirmesi de gerekiyordu.

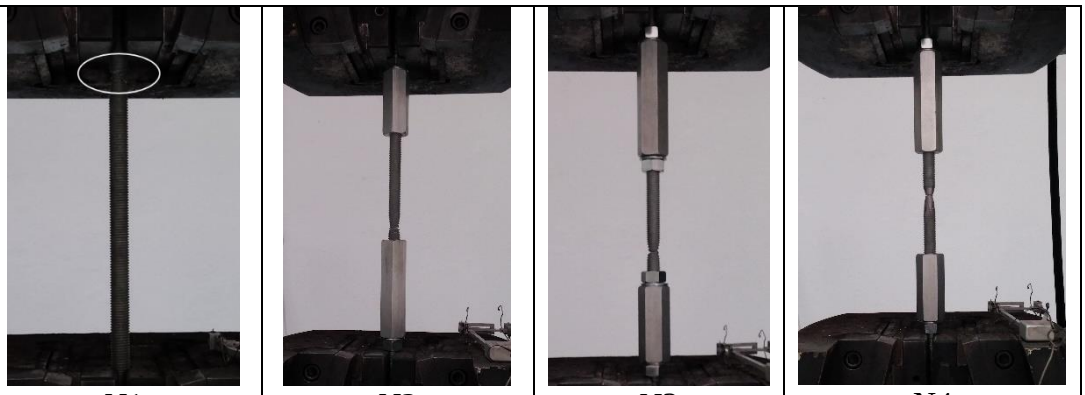
Tüm bu belirsizlikleri ortadan kaldırmak ve tasarıma nihai halini verebilmek amacıyla çok sayıda ve çeşitli deney gerçekleştirilmiştir. İlk yapılan deney seti, sigorta tipi mekanik manşonun ön tasarımı ile ilgili çeşitli varyasyonlarına çekme kuvveti denemelerini içermektedir. Malzeme belirsizliği parametresini geçici olarak ortadan kaldırabilmek amacıyla transmisyon mili çeliği kullanılmıştır. Ön tasarımda sigorta eleman ve donatıları temsil eden yüzeyi M16 normal diş adımlarına sahip 16mm çaplı çubuklar kullanılmıştır. Manşon detayları için 8cm ve 12cm uzunluğunda 27mm'lik altıgen kesitli numuneler oluşturulmuştur. İlk deney setinde dört adet deney gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.1). N1 etiketiyle oluşturulan ilk deney amortisman mili çeliği kullanılarak oluşturulan yekpare dişli bir çubuktan oluşmaktadır. Diş adımı açılması durumunda malzemenin gerilme-şekildeğiştirme eğilimini öğrenebilmek adına referans numune olarak oluşturulmuştur. N2 numunesi ön tasarıma göre oluşturulmuş manşonlardan ihtiva edilmiş deneyi temsil etmektedir. N3 deney numunesi, dişler ile oluşturulan mekanik birleştirme yöntemi sırasında dişlerde meydana gelen boşlukların performansa etkisini irdelemek amacıyla tasarlanmıştır. N4 numunesinde ise eşlenik kesitlere sahip dişli çubuklarda bir kesit zayıflığı oluşturarak hasarın yönlendirilmesi araştırılmıştır.



N1 N2 N3 N4

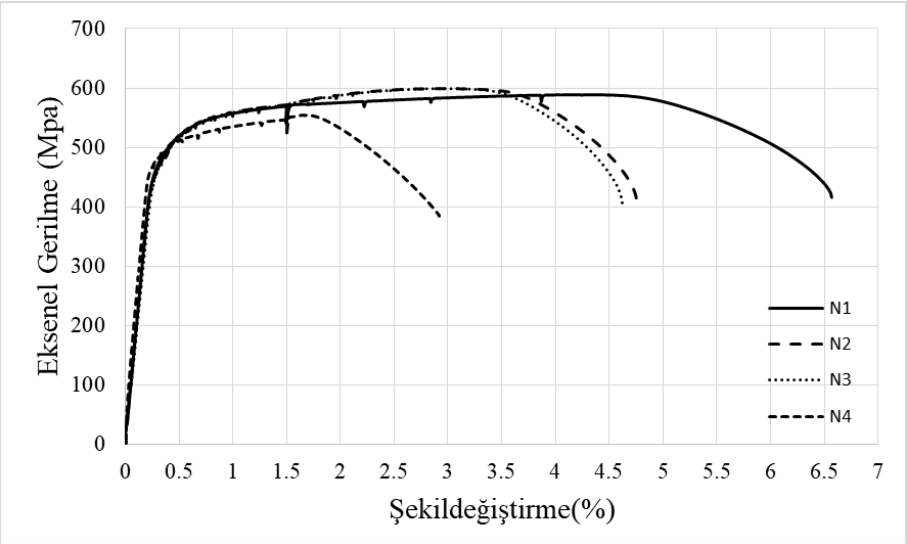
Şekil 3.1: Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneyleri.

N1 numunesi ile gerçekleştirilen çekme deneyi sırasında yivli çubuk gözle görülür bir sünme gerçekleştirdikten sonra taşıma kapasitesine ulaşarak kopmuştur. N2 numunesi ile oluşturulan deney düzeneğinde etkitilen çekme kuvveti sırasında mekanik birleşimi sağlayan dişlerde hasar oluşmamış, manşonlar arasında kalan ve sigorta elemanı temsil eden yivli çubuk sünerek kopmuştur. N3 numunesi ile gerçekleştirilen çekme testi sırasında N2 numunesinde elde edilen gerilme şekildeğiştirme eğrisine benzer bir eğri oluşmuştur. Bu durum diş adımları nedeniyle boşlukların dayanımda bir belirsizlik oluşturmadığını kanıtlamıştır. N4 numunesinde gerçekleştirilen test sırasında ise hasarın öngörüldüğü gibi zayıflatılmış kesitte oluştuğu görülmüştür; fakat zayıflatılmış kesitin boyunun sistem sünekliğine olumsuz etki gösterdiği de tespit edilmiştir. Testlerin sonunda oluşan hasarlı durumlar Şekil 3.2'de, gerilme-şekildeğiştirme değerlerine ait karşılaştırmalı grafik Şekil 3.3'de verilmiştir.



N1 N2 N3 N4

Şekil 3.2: Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneylerine ait hasar görünümleri.

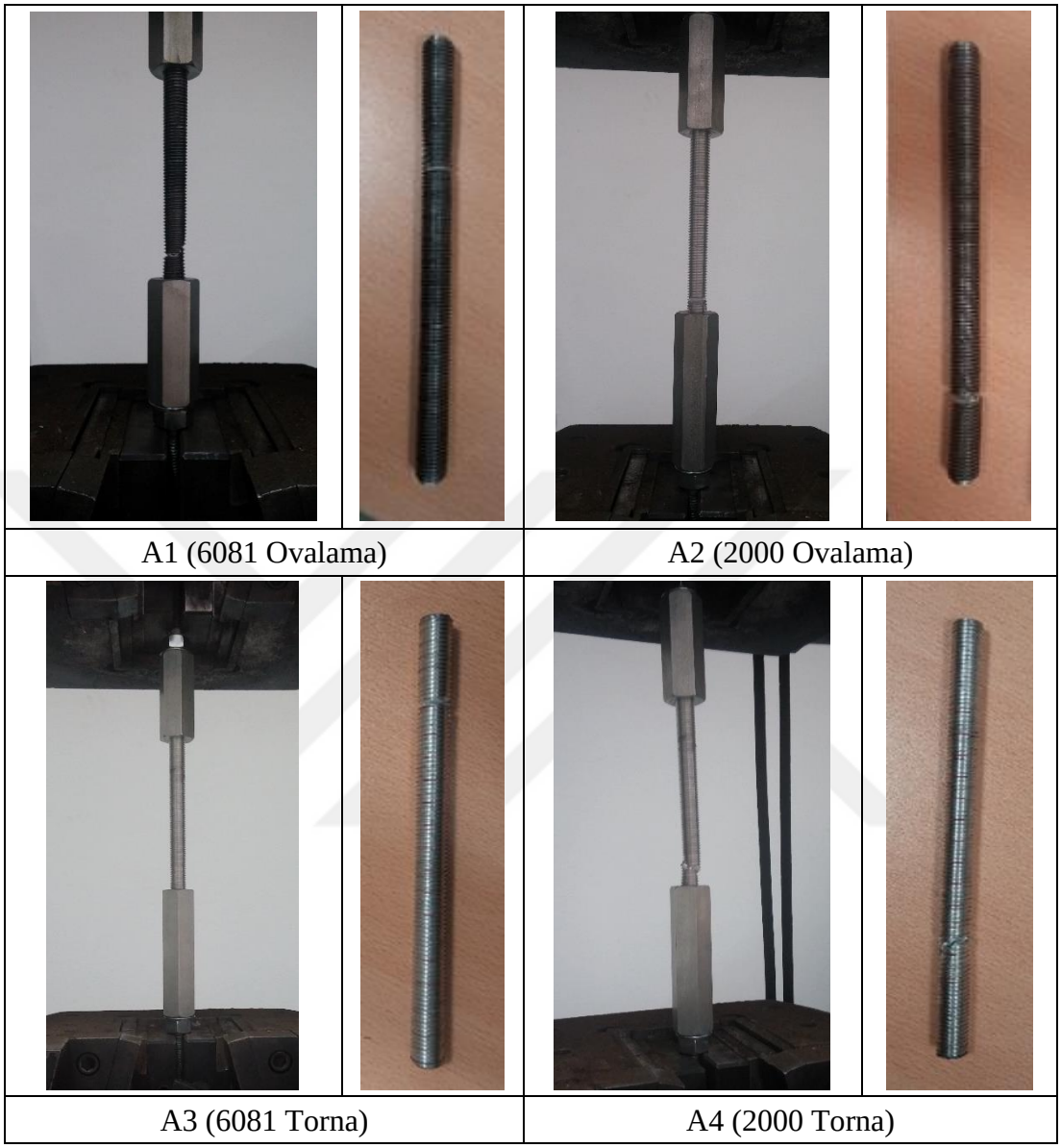


Şekil 3.3: Amortisman mili çeliği ile oluşturulan ön tasarım deneylerine ait gerilme-şekildeğiştirme karşılaştırma grafiği.

Yivli elemanlar ve zayıflatılmış kesit içeren ön tasarım numuneleri için gerçekleştirilen testlerde hasarın belli bir kesitte yoğunlaştırılması hedefine başarıyla ulaşılmıştır. Kopma anına kadar kuvvet aktarımı sırasında dayanım azalmasıyla karşılaşılmamıştır. Fakat amortisman mili çeliği ile gerçekleştirilen deneylerde malzeme sünekliği oldukça sınırlı kalmıştır. Bu amaçla ikinci deney setinde malzeme belirsizliğinin giderilmesi amacıyla farklı malzemelerden oluşturulan numuneler imal edilmiştir. Seçilen malzemeler yapı çeliği ile beraber çalışmaya uyumlu olması ve teorik uzama kabiliyetleri yüksek olan 6081 ve 2000 türü alüminyum ile A316 paslanmaz çeliktir. Paslanmaz çelik çubuklara diş açılması teknik olarak kolay olmasına karşın alüminyum yumuşak bir malzeme olması sebebiyle diş açılabilmesi biraz daha zordur. Yaygın olarak ovalama tekniği veya alternatif olarak torna yöntemi ile alüminyum çubuklara diş açımı gerçekleştirilmektedir. Hem malzeme hem de diş açımı yöntemleri gibi parametreleri dahil ederek alüminyum ve paslanmaz çelikten imal edilmiş ön tasarım sigorta tipi mekanik manşonlar ürettirilmiş ve eksenel çekme testleri gerçekleştirilmiştir.

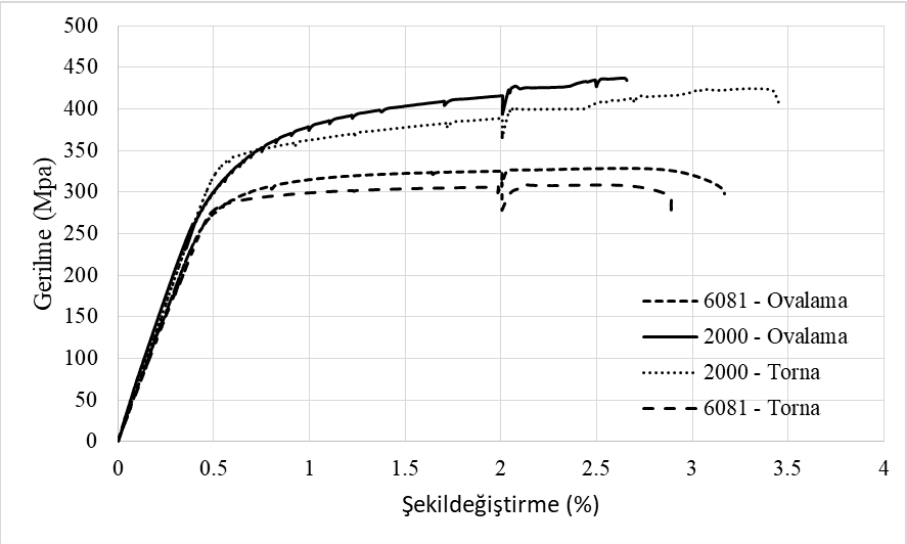
Önce iki tür alüminyum malzemeden üretilen deney numuneleri çekme testlerine maruz bırakılmıştır. Birer takım ovalama ile birer takım ise tornalama ile üretilen test numunelerinde çekme testleri sırasında sigorta eleman olarak üretilen numunelerin manşon civarında veya manşon içerisinde kalan bölümlerinde kopmalar gerçekleşmiştir. Mekanik özellikleri sünek olmasına karşın testler sırasında kalıcı

şekildeğiştirmeler alüminyum çubukların çok küçük bir bölgesinde sınırlı kalmıştır. Deney sonlarına ait görseller Şekil 3.4'de verilmiştir.



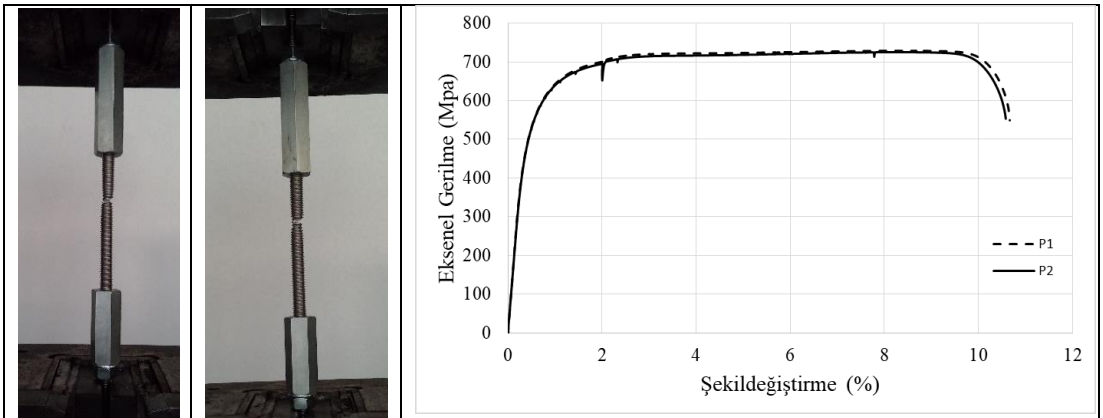
Şekil 3.4: Alüminyumdan üretilen ön tasarım numunelerinin hasar durumları.

Sünekliğin çok küçük bir bölümde sınırlı kalması alüminyum malzeme için tek olumsuz durum olmamıştır. Deneyler sırasında alınan ölçümlerle çizilen gerilme-şekildeğiştirme grafikleri incelendiğinde de süneklik son derece sınırlı kalmıştır (Şekil 3.5). Ayrıca malzemenin akma ve kopma gerilmelerine bakıldığında donatı çeliğine kıyasla küçük kaldığı, taşıyıcı elemanların iç kuvvetlerinin aktarımı sırasında geometrik olarak büyük kesitli alüminyum malzemelerin kullanılma ihtiyacını ortaya çıkaracağı tespit edilmiştir. Bu sebeple alüminyumun malzeme olarak seçimi uygun bulunmamıştır.



Şekil 3.5: Alüminyumdan üretilmiş ön tasarım deneylerinin gerilme-şekildeğiştirme karşılaştırma grafiği.

Alüminyum malzemeden üretilmiş numunelerle gerçekleştirilmiş çekme testleri sonrasında aynı testler A316 malzemeden üretilmiş numuneler üzerinde tekrarlanmıştır. Malzeme karakteristiğinin tekrarlanır olduğunun kontrolü için ise P1 ve P2 etiketiyle birbirinin eşleniği iki adet ön tasarım numunesi hazırlanmıştır. Eksenel çekme testleri sonucunda her bir numunede önemli derecede sünme karakteristiği ve sigorta elemanın orta bölgesi civarında kopma eğilimleri gerçekleşmiştir. Testler sırasında elde edilen gerilme ve şekildeğiştirme ölçümleri grafik haline getirilip numune sonuçları üst üste çizildiğinde malzeme karakteristiğinin tekrarlanır olduğu görülmüştür. Hem süneklik hem de davranış kararlılığı sebebiyle A316 paslanmaz çelik tez kapsamında geliştirilen sigorta tipi mekanik manşonun malzemesi olarak seçilmiştir. Deney sonu resimleri ve grafikler Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: A316 Paslanmaz çelikten üretilmiş numunelerin görselleri ve grafikleri.

Betonarme veya çelik inşaat projelerinde yapısal elemanlarda veya donatılarda diş açılması veya vidaların kullanılması hâlihazırda kullanılan bir yöntemdir. Fakat diş adımı içeren bütün birleşimlerde yöntemin uygulanabilmesi için diş ve yivler arasında montaj boşluğu bulunmaktadır. Montajlar tamamlandıktan sonra dahi boşluğun varlığı devam etmektedir. Betonarme yapılarda diş açılan donatılardaki boşluklar beton ile doldurulur. Çelik yapı montajlarında ise vidalı birleşimlere tork uygulanır, vidaların eksenel yük aktarmasına izin vermek yerine kesme ve eğilme kapasiteleri ile montajı sağlayacak tasarımlar uygulanır.

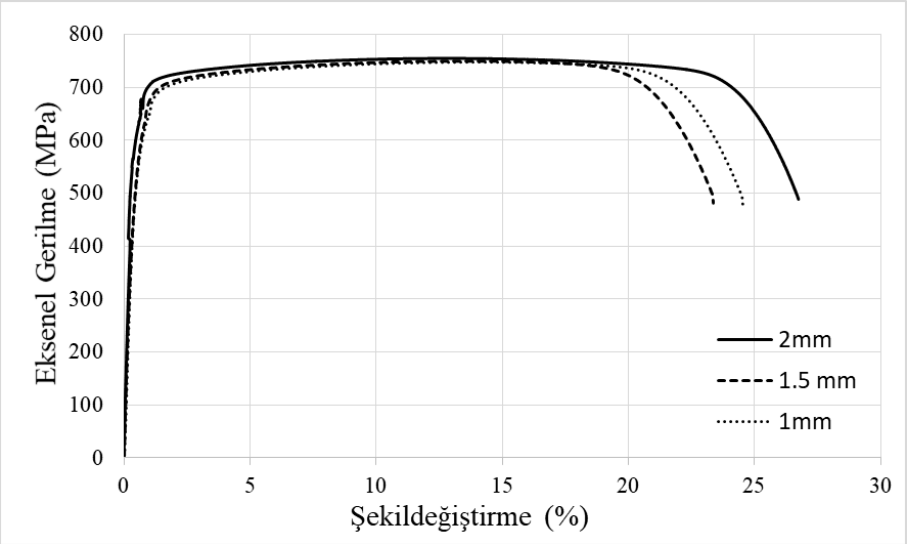
Sigorta tipi mekanik manşonun yiv ve diş tasarımı düşünüldüğünde eksenel doğrultudaki çekme ve basınç kuvvetlerini aktaracak doğrultuda bir tasarım karşımıza çıkmaktadır. Böyle bir tasarımda dişler arasındaki boşlukların yapı sağlığı açısından minimum düzeyde olması gerekmektedir. Ek olarak, tasarımın uluslararası sektörde uygulanabilmesi için yönetmelik uygunluklarını yerine getirmesi şarttır ve uygunluk testlerinden biri bu boşluk miktarları için dolaylı yoldan sınırlama getirmektedir.

Tüm bu tespitler bir araya getirildiğinde üçüncü ön deney setinde irdelenmesi gereken belirsizlik durumu, tasarım sırasında sigorta tipi mekanik manşonu oluşturan yivli ve vidalı parçaların diş adımlarının ölçüsü olmuştur. Diş adımlarının etkisinin araştırılması için TS 61-2, TS 61-6 ve TS 61-7 [56-58] standartlarında verilen metrik ölçüler dikkate alınmış, sırasıyla 2mm, 1,5mm ve 1mm diş adımlı parçalara sahip sigorta tipi mekanik manşon numuneleri ürettirilmiştir. Sigorta elemanların üretimi sırasında ise daha önceki test gruplarında denenmiş olan inceltilmiş gövde kullanılmış, hasarın sigorta eleman üzerinde yoğunlaşması hedefi de deneyler sırasında sınanmıştır. Eksenel doğrultuda gerçekleştirilen çekme testleri sonucunda farklı diş adımlarına sahip bütün numunelerde önemli miktarda eksenel uzama kabiliyeti görülmüştür. Bu durumu takiben dayanım kaybı olmadan kopmanın meydana geldiği gözlenmiştir. Şekil 3.7'de çekme testleri sırasında test başlangıç ve bitişlerinden alınan fotoğrafların birer kopyası ve testleri gerçekleştirilmiş numunelerin bir arada görüntülendiği fotoğraf karesi verilmiştir.



Şekil 3.7: Farklı diş adımlarına sahip numunelerin deney sonu görselleri.

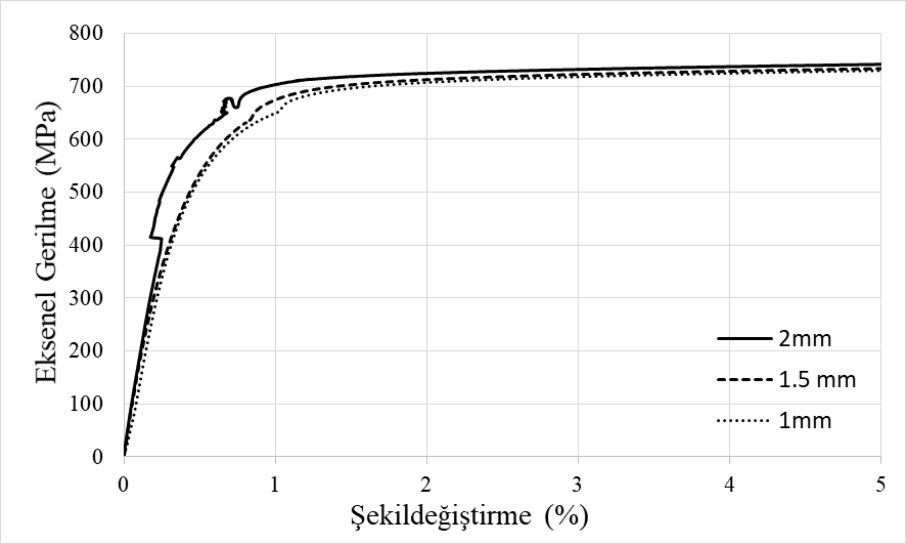
Gerçekleştirilen deneyler sırasında ölçüm düzeneğinden alınan kuvvet ve yerdeğiştirme değerleri kullanılarak her bir numuneye ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri oluşturulmuştur. Grafikler üst üste çizilmiş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 3.8). İlk incelemelere göre elde edilen veriler benzer davranış göstermekte, akma gerilmeleri, süneklik değerleri ve kopma noktalarının birbirlerine yakın seyrettiği görülmektedir.



Şekil 3.8: Farklı diş adımlarına sahip numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.

Detaylı incelemelere bakıldığında ve şekildeğiştirme dilimleri içerisinde %5'lik bölümlere yoğunlaşıldığında ise farklılıklar tespit edilmiştir. 1,5 mm diş adımı ile 1mm diş adımına sahip numunelerin gerilme-şekildeğiştirme grafiklerine bakıldığında elastik bölgede yaklaşık olarak benzer grafiklere sahip davranış göstermişlerdir. Akma noktası civarında ufak farklılıklar olsa da dayanım kaybının yaşandığı %20 şekildeğiştirme anına kadar grafikler üst üste kalacak şekilde davranış göstermişlerdir. 2mm diş adımı incelendiğinde ise elastik bölgede tutarsız bir davranış görülmüştür. Şekil 3.9'da gösterildiği üzere eksenel gerilme değeri artarken şekildeğiştirme değerlerinde azalma oluşmuş, akma noktasına ulaşıncaya kadar etkileşim diyagramında dalgalanmalar meydana gelmiştir. Kopma noktası incelendiğinde diğer iki numuneye göre çok daha fazla uzama meydana geldiği görülmüş, 1,5mm ve 1mm diş adımlı numunelerden daha uzakta kalan bir noktada ani dayanım düşüşü oluşmuş ve taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Tespit edilen farklılıklar göstermiştir ki diş adımının uzun bırakılması, davranış tutarsızlığına ve buna bağlı olarak kararsız

mekanik özelliklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Diş adımının kısa olması, boşluk azalımı ve yapısal kusurların engellenebilmesi için önem arz etmektedir.



Şekil 3.9: Farklı diş adımlarına sahip numunelerin %5 şekildeğiştirme değerine kadar sahip olduğu gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.

3.1.2 Sigorta tipi mekanik manşonun geliştirilmesine yönelik deneyler

Sigorta tipi mekanik manşon tasarımının belirsizlikleri ile ilgili yukarıda yapılmış olan deneyler sonucunda altıgen kesitli manşonlardan ve inceltilmiş bölgeye sahip sigorta elemandan oluşan sigorta tipi mekanik manşona karar verilmiştir. Mekanik özellikleri nedeniyle malzeme olarak paslanmaz çelik, diş adımı olarak 1mm kullanılan sigorta tipi mekanik manşonun yapı sektörü kullanımına uygunluğu için uluslararası yönetmelik şartları irdelenmiştir. Bu yönetmelik ise deneylerin yapıldığı 2017 yılında geçerli olan ISO 15835-2009 [59] yönetmeliğidir. ISO 15835'e göre deprem bölgelerinde yapılacak mühendislik projelerinde kullanılacak mekanik birleşimli bağlantıların üç şartı yerine getirmesi istenmektedir. Bu şartlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir;

- Çekme testleri sırasında kopma bölgesinin birleşim bölgesinden uzak olması
- Çekme testleri sırasında dişlerde sıyrılmanın oluşmaması
- Çevrimsel yükleme testlerinin başarıyla gerçekleştirilmesi ve çevrimlerin şişkinliklerinin belli değerler altında olması

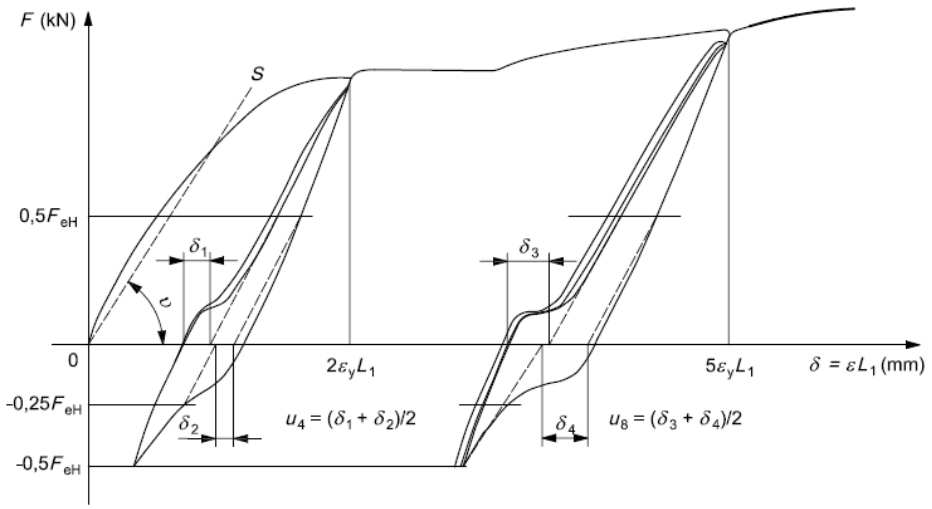
Çekme testleri sırasında meydana gelen kopma durumları incelendiğinde, deneyler sırasında meydana gelen kopma değerleri alüminyum malzemesi dışında numune

çubuklarının serbest bölgesinde meydana geldiği görülmüştür. Her bir deney sonunda gerçekleştirilen kontrollerde ise mekanik birleşim sağlayan dişlerin hiçbirinde sıyrılma olayının gerçekleşmediği tespit edilmiştir. Sigorta tipi mekanik manşonun yönetmeliğe uygunluğu için gerekli olan son madde için ise deney yapma ihtiyacı hasıl olmuştur.

ISO 15835 yönetmeliğinde belirtilen çevrimsel yükleme testinin adı düşük çevrimli yorulma deneyidir. Deney, hem kuvvet hem de yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilir. Yönetmeliğe göre mekanik birleşim veya manşonlu olarak oluşturulan numuneler deneyde çekme kuvvetlerine maruz bırakıldığı faz sırasında yerdeğiştirme kontrollü; basınç kuvvetlerine maruz bırakıldığı fazda ise kuvvet kontrollü bir protokole tabi tutulmaktadır. Protokolün uygulanması adım adım aşağıda anlatılmış, temsili eksenel kuvvet – yerdeğiştirme protokolü ise Şekil 3.10'da verilmiştir.

- Deney numunesi, çekme kuvveti etkisi altında akma deney numunesinin nominal akma geriniminin (ε_y) 2 katına veya buna denk yerdeğiştirme değerine kadar çekilir.
- Ardından 4 kez çevrimsel olarak yüklenir. Çevrimsel yükleme sırasında eksenel basınç kuvvetinin sınır değeri, numunenin karakteristik akma kuvveti, (F_{eh}) değerinin yarı değeri olarak belirlenir. Yani her bir çevrim sırasında numune $0{,}5F_{eh}$ değeri elde edilinceye kadar basınç, $2\varepsilon_y$ gerinim değerine ulaşana dek çekme gerçekleştirilir.
- 4 çevrimsel yükleme tamamlandıktan sonra numune $5\varepsilon_y$ değerine ulaşana kadar çekmeye maruz bırakılır.
- $5\varepsilon_y$ değerine ulaşılınca 0,5Feh değeri basınç kuvveti sınırı olmak koşuluyla 4 çevrimsel yükleme daha gerçekleştirilir.

Çevrimsel yükleme tamamlandıktan sonra numune kopana kadar çekmeye devam edilir ve kopma gerçekleşince deney sonlandırılır. Deneyin başarılı olabilmesi için tüm protokol tamamlanmalı ve çevrimsel yükleme sonucunda meydana gelen döngülerin şişkinliği yönetmelikte belirtilen değerlerin altında olmalıdır.



Şekil 3.10: ISO 15835 – 2009 düşük çevrimli yorulma testi yükleme protokolü, [59].

Yukarıda detayları anlatılan düşük çevrimli yorulma testinin gerçekleştirilmesi ve uygunluk araştırılmasının yapılabilmesi amacıyla A316 paslanmaz çelikten üretilmiş 1mm ve 1,5mm diş adımlarına sahip iki bağımsız sigorta tpi mekanik manşon numunesi hazırlanmış ve her numune aynı yükleme protokolüne maruz bırakılmıştır. Deneyler MATİL A.Ş'de yer alan 600 kN basınç ve çekme kuvveti kapasiteli Zwick/Roell z600 kontrollü test makinesinde gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerine ait deney öncesi ve deney sonrası görselleri Şekil 3.11'de gösterilmektedir.

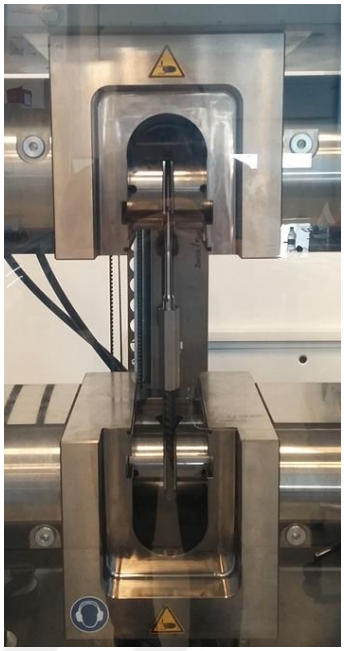


Yorulma Testi 1 (Deney Öncesi)



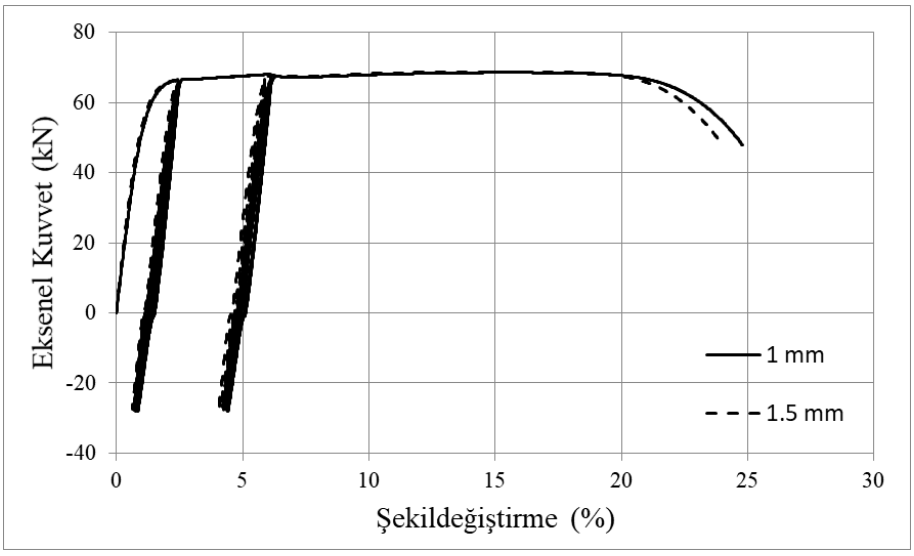
Yorulma Testi 2 (Deney Öncesi)

Şekil 3.11: ISO 15385 – 2009 düşük çevrimli yorulma testleri.

	
Yorulma Testi 1 (Deney Sonu)	Yorulma Testi 1 (Deney Sonu)

Şekil 3.11 (devam): ISO 15385 – 2009 düşük çevrimli yorulma testleri.

Deneyler sırasında her bir saniyede kayıt altına alınan çeneler arası mesafe ile Load Cell aletinden alınan kuvvet okumaları ile iki deneye ait eksenel kuvvet – şekildeğiştirme grafikleri çizilmiştir. Çevrimlerin gerçekleştirildiği bölümlerde döngülerin sahip oldukları şişkinliklerin tespiti için gerekli değerlerin okumaları gerçekleştirilmiştir. Birbirinden bağımsız olarak tekrarlanan iki deney numunesine ait sonuçlar ayrıca karşılaştırılmış ve elde edilen sonuçların birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: Düşük çevrimli yorulma testlerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri.

Çevrimsel döngüler incelendiğinde 1mm diş adımlı numunede ölçülen döngü şişlikleri sırasıyla 0,047mm ve 0,061mm, 1,5mm diş adımlı numunede ölçülen şişlikler ise 0,048mm ve 0,063mm olarak tespit edilmiştir. ISO 15835-2009 yönetmeliğinde ise ilk 4 çevrimsel döngü sırasında izin verilen üst sınır 0,4mm; ikinci çevrimsel döngü için izin verilen üst sınır 0,8mm olarak belirtilmiştir. Düşük çevrimli yorulma testlerinde elde edilen değerler ise bu sınırların altında olup testler başarıyla tamamlandığı için her iki deney de yönetmelik şartlarını yerine getirmiştir.

Yukarıda gerçekleştirilen deneyler ve elde edilen sonuçların yönetmelik uygunlukları tespit edildikten sonra sigorta tipi mekanik manşon prototip 1'i içeren pilot kiriş kolon bağlantı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylere ait detaylı bilgiler Bölüm 3.2.1.1'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlar değerli olmakla birlikte sonuçların sektör ile paylaşılması sonucunda alınan geri dönüşler sigorta tipi mekanik manşonun revize edilmesi ihtiyacını ortaya koymuştur. Prototip 2 olarak tasarlanan yeni sigorta tipi mekanik manşona ait detaylar Bölüm 2'de verilmiştir. Tasarım değişiklikliği, eksenel çekme testlerinin ve kuvvet taşıma kapasitesinin yeniden tespiti ihtiyacını ortaya çıkarmıştır.

Sigorta tipi mekanik manşon prototip 2'ye ait yeni bir numune ürettirilmiş ve eksenel çekme deneyi için hazırlanmıştır. MATİL A.Ş'de gerçekleştirilen çekme testinin numunesi, deney öncesi ve deney sonrası görselleri Şekil 3.13'de verilmiştir.



Deney Öncesi



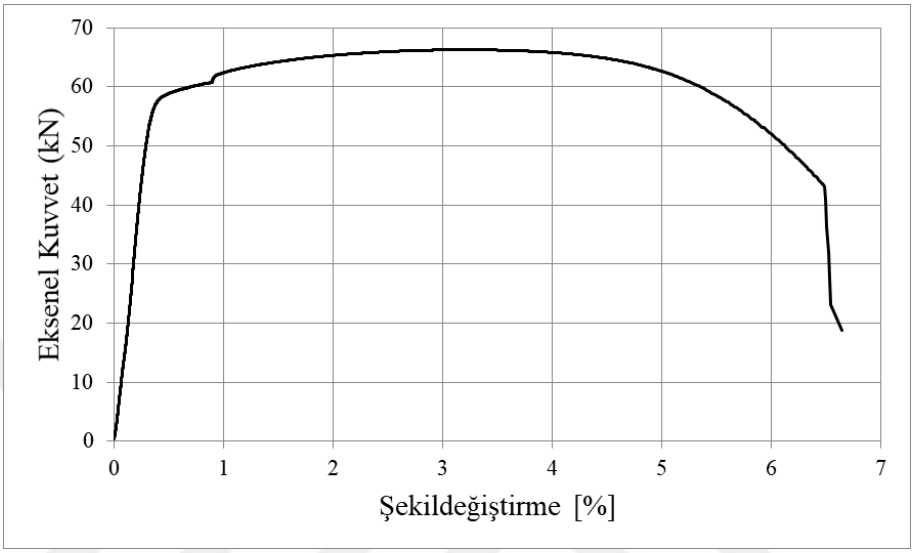
Deney sonu



Hasar durumu

Şekil 3.13: Sigorta tipi mekanik manşon prototip 2'e ait çekme deneyi.

Deney sırasında eksenel çekme kuvvetleri ve uzama değerleri toplanmış, elde edilen veri ile etkileşim diyagramı çizilmiştir (Şekil 3.14). Tasarımda gerçekleştirilen değişiklik ve eklenen parçalara rağmen sigorta tipi mekanik manşonun eksenel kuvvetleri başarıyla aktardığı görülmüştür. Tasarım daha karmaşık hale gelmesine karşın kalıcı şekildeğiştirmeler ve deney sonunda meydana gelen kopma, paslanmaz çelikten imal edilmiş sigorta elemanda meydana gelmiştir.



Şekil 3.14: Sigorta tipi mekanik manşon prototip 2 deney etkileşim diyagramı.

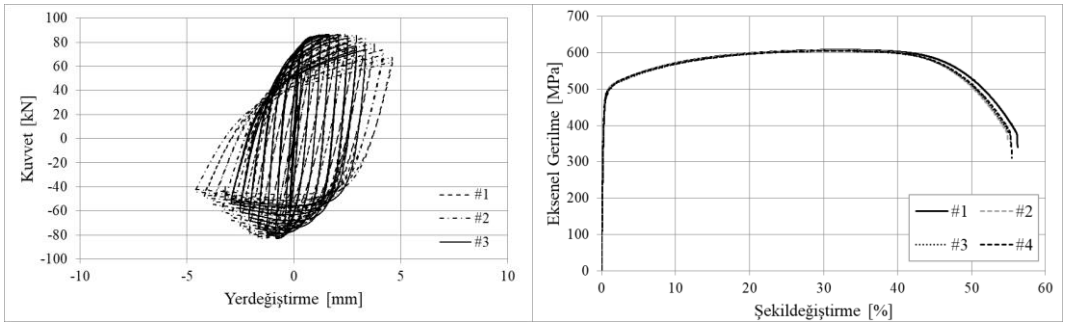
Etkileşim diyagramı, açısal tolerans sağlayan STMM prototip 2 numunesinin etkin olarak kuvvet taşıdığını göstermiştir. Kiriş kolon birleşimi içerisinde sistem davranışının anlaşılması için farklı STMM dizilimlerini ve çeşitli parametreleri içeren bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Kolon kiriş birleşim bölgesini temsil eden bu deneyler Bölüm 3.2.1.2 Çelik Ceket Öncesi Deneyler başlığında detaylı olarak verilmiştir. Deneylerin sonucunda STMM prototip 2 tasarımının burkulma açısından zayıf olduğu ortaya konmuştur. Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın potansiyelini ortaya çıkarabilmek için Sigorta Tipi Mekanik Manşon Prototip 2'nin sigorta elemanlarına çelik ceketler eklendi. Tasarımın nihai haline getirilebilmesi ve sisteme uygunluğun tespiti gerekli olduğundan, araştırma çelik ceketli STMM'lerin monotonik ve çevrimsel yüklemeler içeren basınç ve çekme testlerinin davranışını incelemeye odaklandı. Bu başlığın geri kalan kısmında çelik ceketli STMM'nin nihai tasarımı için gerçekleştirilen deney süreci anlatılmıştır.

Araştırmalar sırasında iki grupta deneysel çalışmalar yapılmış, ek olarak malzeme testleri de gerçekleştirilmiştir. Malzeme testlerinde paslanmaz çeliğin mekanik

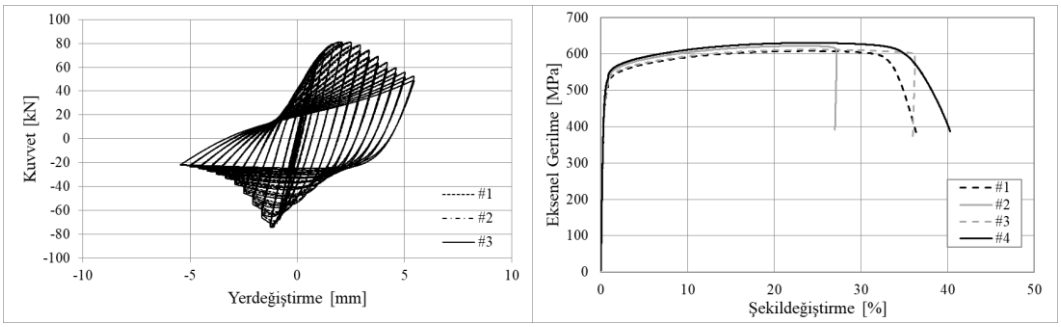
özelliklerini karakterize etmek için altıgen ve silindirik numuneler üzerinde sekiz monotonik çekme testi ve 6 çevrimsel test gerçekleştirilmiştir. Coupon testi olarak adlandırılan monotonik çekme testlerinde kullanılan Coupon numunelerinin boyutları TSE EN ISO 6892–1 'e göre belirlenmiştir [60]. Silindirik coupon numunelerinin azaltılmış yarıçapı, altıgen numunelerin 151 mm^2 kesit alanına uygun olacak şekilde 14 mm olarak seçilmiştir. Silindirik ve altıgen coupon elemanların toplam uzunlukları sırasıyla 415 mm ve 420 mm, mastar uzunlukları ise 100 mm ve 150 mm'dir. Deney öncesi ve sonrası ile ilgili fotoğraflar Şekil 3.15'de verilmiştir. Silindirik ve altıgen numunelerin kuvvet - yerdeğiştirme ve gerilme - şekildeğiştirme ilişkileri sırasıyla Şekil 3.16'da ve Şekil 3.17'de sunulmuştur.



Şekil 3.15: Malzeme testlerinde kullanılan coupon deney numuneleri.



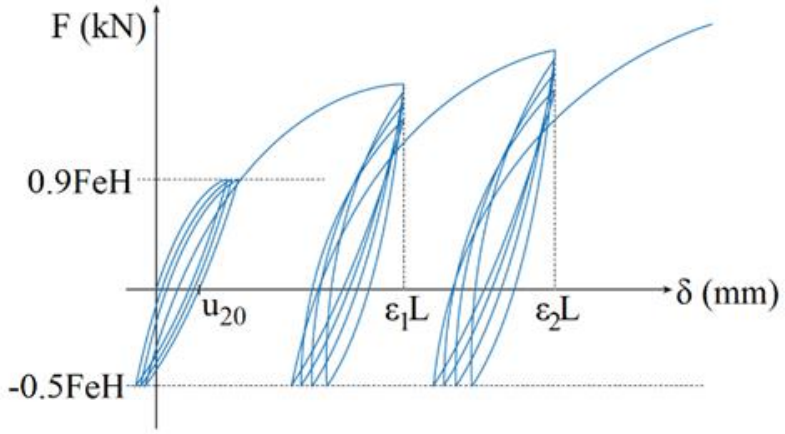
Şekil 3.16: Silindirik numunelerin çevrimsel ve monotonik test sonuçları.



Şekil 3.17: Altıgen numunelerin çevrimsel ve monotonik test sonuçları.

Altıgen numune deneyleri en büyük 80 kN çekme kuvveti ve 75 kN basınç kuvveti ile sonuçlanırken, yerdeğiştirme kapasitesi yaklaşık 5,0 mm'de kalmıştır. Altıgen ve silindirik numunelerin ortalama akma dayanımları sırasıyla 474 MPa ve 486 MPa, ortalama en büyük dayanımlar ise sırasıyla 617 MPa ve 639 MPa'dır. Silindirik numuneler, altıgen numunelere göre daha şişkin döngüsel davranış ve daha yavaş mukavemet bozulması sergilemiştir. Gerçekleştirilen malzeme testlerinde, numunenin şeklinden bağımsız olarak çelik için ortalama akma şekildeğiştirmesi 0,0045 olarak belirlenmiştir.

Çelik ceketli STMM ilk deney grubu, ISO 15835-2-2018 'de tanımlanan yükleme protokolü kullanılarak test edildi [61]. Test, üç aşamadan oluşmakta ve monoton çekme kısmı ile sona ermektedir (Şekil 3.18). Test başlangıcı, kuvvet kontrollü test, elastik aralıkta 20 döngü ile gerçekleştirilir. Kuvvet, çekme ve basınç olarak etkitilmesi sırasında sırasıyla $0{,}9\times F_{eH}$ ve $0{,}5\times F_{eH}$ ile sınırlıdır; burada F_{eH}, sigorta elemanının karakteristik akma kuvveti anlamına gelmektedir.



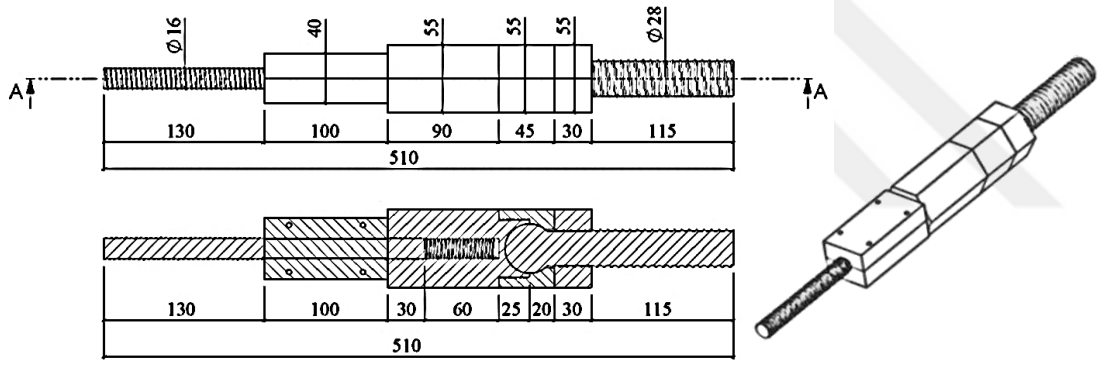
Şekil 3.18: Yerdeğiştirme protokolü (ISO 15835–2-2018), [61].

2. ve 3. fazlarda çekmede yer değiştirme kontrollü prosedür uygulanır ve kuvvet kontrollü parça 0,5 F_{eH} limiti ile basınçta takip edilir. Yerdeğiştirme sırasıyla 2. ve 3.

aşamalarda $\varepsilon_1 \times L$ ve $\varepsilon_2 \times L$ ile sınırlıdır. ε_1 sigorta elemanının akma geriniminin 2 katı olarak tanımlanır. Benzer şekilde, ε_2, sigorta elemanının 5 katı akma gerinimi olarak tanımlanır. Her iki aşama da 4 kez tekrarlanır.

Çelik ceketli STMM'lerin yönetmeliğe uygunluk deneyleri çalışıldığı sırada, yukarıda açıklanan üç fazı, sigorta elemanının çekme bölgesinde akma geriniminin 10 katına karşılık gelen $\varepsilon_3 \times L$ fazı takip etmiştir. Daha sonra bağlantı elemanlarının tasarımına göre basınç tarafında 180 kN kuvvet değeri hedeflenmiştir.

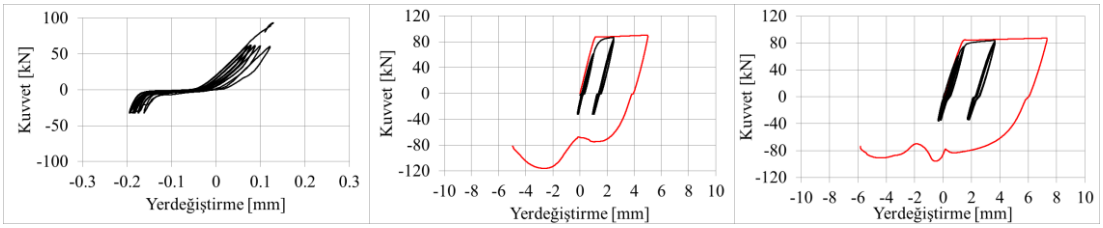
Çelik ceket içeren ilk deneylerde sigorta elemanının (50, 100 ve 150 mm) değişen uzunluklarına (Lj) sahip STMM'ler, sırasıyla 460 mm, 510 mm ve 560 mm toplam STMM uzunlukları ile çevrimsel yük altında test edilmiştir. 510 mm uzunluğundaki STMM numunesine ait kesit boyutları ve 3 boyutlu görünüm Şekil 3.19'da sunulmaktadır. Aşağıdaki açıklamalarda göreceğiniz J–STMM-LL, sigorta uzunluğu LL olan ceketli sigorta tipi mekanik manşon anlamına gelmektedir.



KESİT A-A

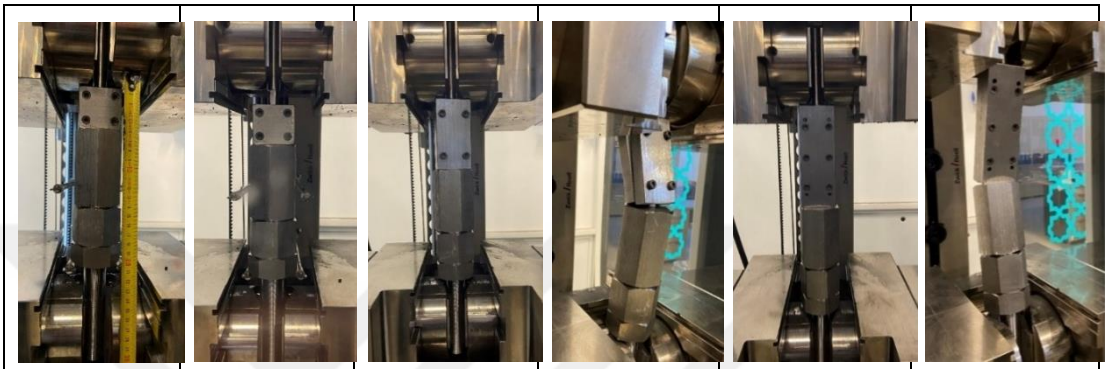
Şekil 3.19: 510mm uzunluğundaki çelik ceketli STMM kesit geometrileri.

J-FTMC-50-B, yükleme protokolünün 1. aşamasını başarıyla deneyimlemiştir. İkinci aşamada, test makinesinin yanlış kontrol edilmesi sonucu eksenel kuvvet 90 kN'u aştı. J–FTMC–100-B ve J FTMC–150-B, yükleme protokolünün üç aşamasını da başarıyla tamamlamıştır. Bu numuneler gerilimde $10 \times \varepsilon_y$'ye ulaşabilmiştir. Numune burkulması nedeniyle testler sonlandırılmıştır. Elde edilen basınç kuvvetleri J–FTMC–100-B için 120 kN ve J–FTMC–150-B için 110 kN'dur. Bu deneylere ait kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri ve deney öncesi ile deney sonrasını gösteren görseller Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de verilmektedir.



J-FTMC-50-B *J-FTMC-100-B* *J-FTMC-150-B*

Şekil 3.20: Çelik cekete sahip numunelerin kuvvet-yerdeğiştirme etkileşim diyagramları.



J-FTMC-50-B *J-FTMC-100-B* *J-FTMC-150-B*

Şekil 3.21: Çelik ceketli numunelerin hasar görselleri.

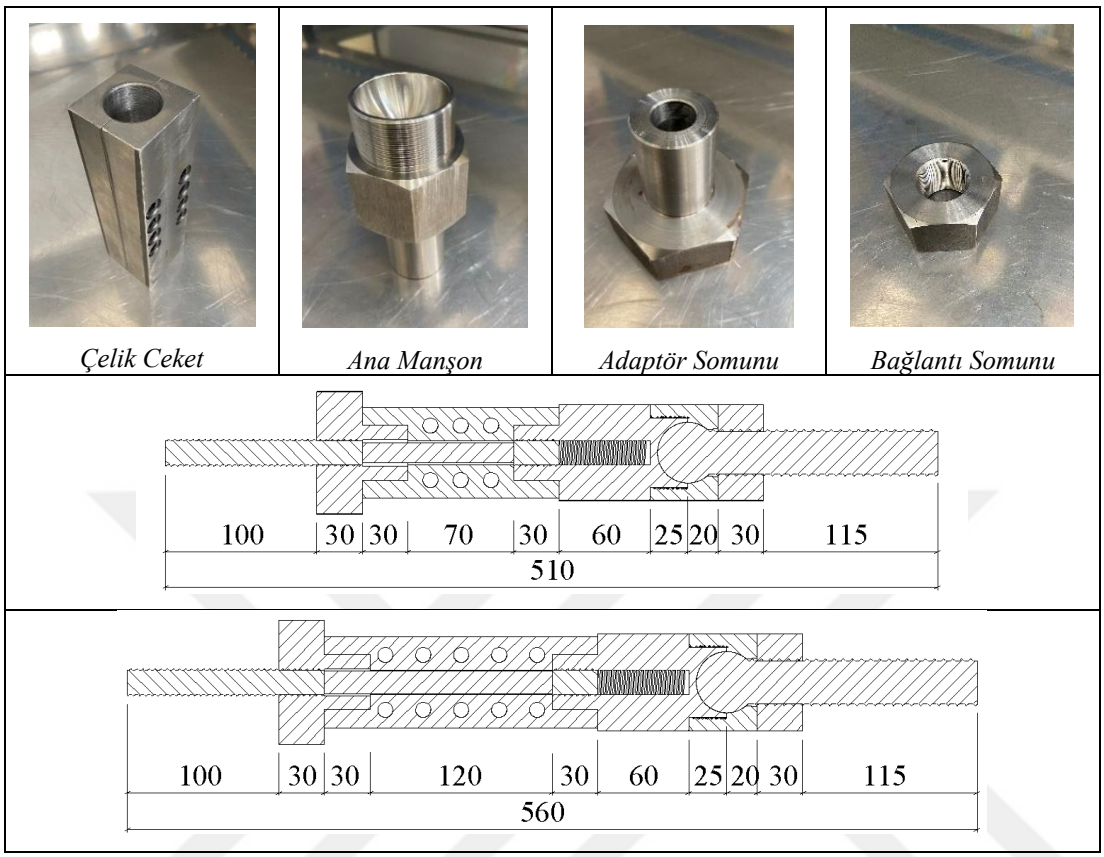
J–FTMC–50-B, J–FTMC–100 B ve J–FTMC–150-B için elde edilen hasar durumları sırasıyla gerilme, burkulma ve burkulmadır. Deneyler incelendiğinde test düzeneğinin sınır koşullarının ve çelik ceket geometrisinin erken burkulmayı tetiklediği değerlendirilmiştir (Şekil 3.22). Bu nedenle, ceketin serbest hareketini sağlayarak sıkıştırma kuvvetini aktarmak için özel bir adaptör tasarlanmıştır.



Şekil 3.22: J-STMM-50-B'nin hasar gözlemleri.

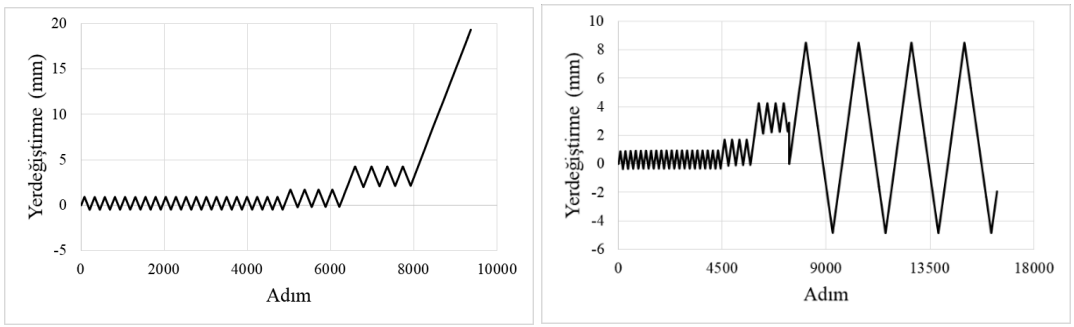
J-FTMC-B'nin çevrimsel davranışını ilerletmesi için bazı kritik iyileştirmeler gerçekleştirilmiştir. Çelik ceketin kesit boyutları 60 × 60 mm olarak değiştirilmiş ve cıvata sayısı J-FTMC-100-I ve J-FTMC-150-I için sırasıyla 6 ve 10 adet 8.8 kalite

M8’e çıkarılmıştır. Ayrıca numunenin üst kısmında 30 mm uzunluğunda bir adaptör cıvatası kullanılmış, ana manşon 30 mm uzatılmıştır, Şekil 3.23.



Şekil 3.23: Çelik ceketli STMM’lerin geliştirilmiş elemanları.

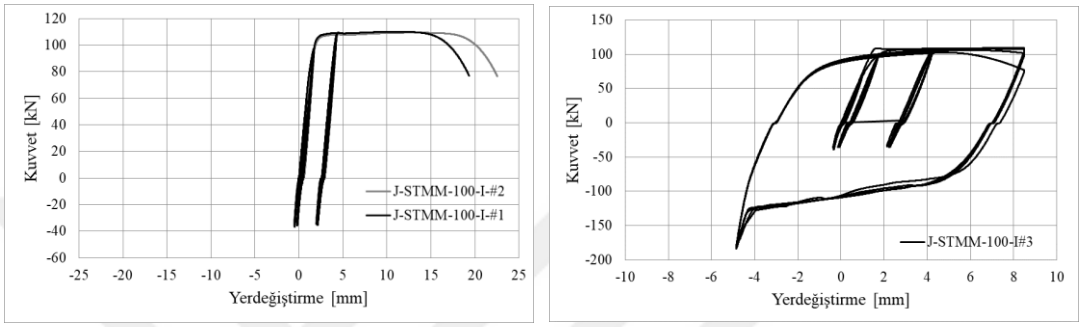
İyileştirilmiş çelik ceketli STMM grubu, sigorta uzunluğu 100 mm ve 150 mm olan 6 numuneden oluşmaktadır. Bunlardan ikisi ISO 15835-2-2018[61] protokolüne göre test edilmiştir. Diğerleri büyük bir yer değiştirme modeli (Large Displacement Pattern - LDP) kullanılarak test edilmiştir (Şekil 3.24). Protokoller arasındaki temel fark, LDP'nin monotonik eksenel çekme gerilimi uygulaması yerine ISO çevrimlerinin derlenmesinden sonra ek çevrimler içermesidir.



ISO 15835-2 Protokolü LDP Protokolü

Şekil 3.24: Uygulanan yükleme protokolleri.

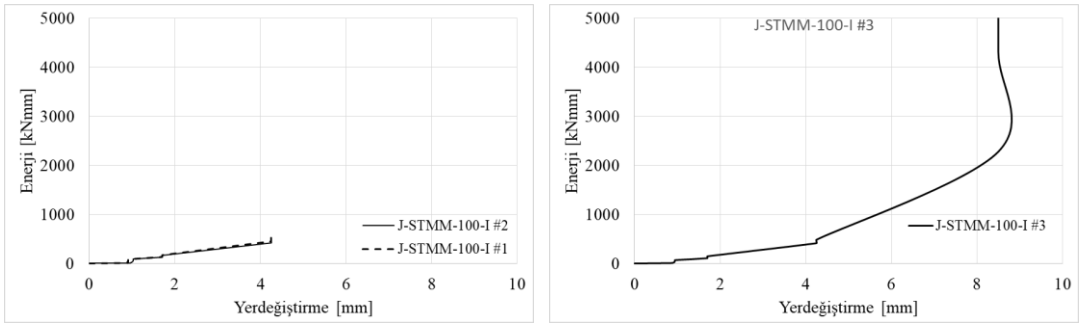
ISO 15835 yönetmeliğindeki yükleme protokolü uygulanan J-STMM-100-I-#1 ve #2'nin kuvvet ve yer değiştirme ilişkileri Şekil 3.25'de gösterilmektedir. ISO protokolü uygulanması durumunda maksimum ortalama çekme kuvveti 110 kN, basınç kuvveti ise 33 kN olmuştur. Numuneler 15 mm civarında dayanım kaybetmeye başlamış ve sırasıyla 19 mm ve 23 mm'de kopmuştur. LDP protokolü uygulanması durumunda, J-STMM- 100-I-#3'ün maksimum kuvvetleri, çekmede 110 kN ve basınçta 180 kN'dur. Çekmedeki maksimum yer değiştirme kapasitesi 13 mm'de kalmıştır.



ISO 15835-2 Protokolü LDP Protokolü

Şekil 3.25: J-STMM-100-I'nın kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri.

Kümülatif enerji sönümleme varyasyonları Şekil 3.26'da sunulmuştur. JFTMC- 100-I-#1 ve #2 benzer enerji sönümleme kapasiteleri göstermiştir. J-FTMC-100-I-#3 numunesi ise son yerdeğiştirme çevriminde önemli miktarda enerji sönümlemiştir.

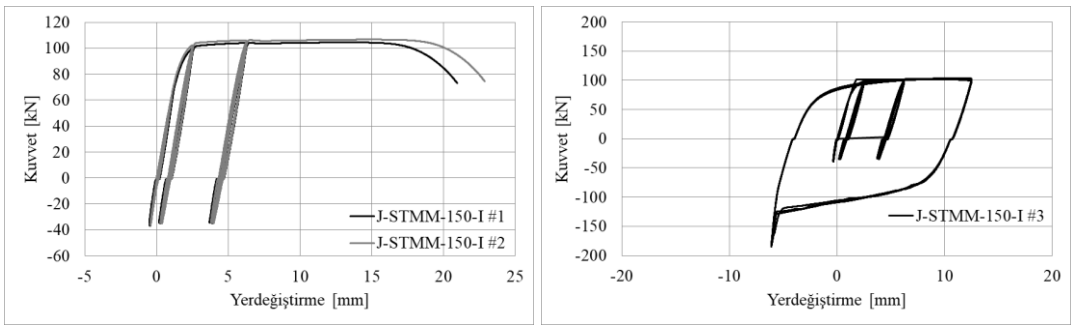


ISO 15835-2 Protokolü LDP Protokolü

Şekil 3.26: J-STMM-100-I'nın enerji değişimleri

J-FTMC-150-I-#1 ve #2'nin kuvvet ve yer değiştirme ilişkileri de Şekil 3.27'de verilmiştir. ISO protokolüne göre, en büyük ortalama çekme kuvveti 105 kN iken, basınç dayanımı 33 kN'dur. Numunelerde yaklaşık 15 mm'de başlayan dayanım azalımı ile 21 mm ve 23 mm'de sırasıyla çekme kopması gözlenmiştir. LDP

durumunda, J-FTMC-150-I #3'ün en büyük çekme kuvveti 105 kN ve basınçta ise 180 kN'dur. Çekme sırasında en büyük yerdeğiştirme kapasitesi ise 13 mm'dir.



ISO 15835-2 Protokolü LDP Protokolü

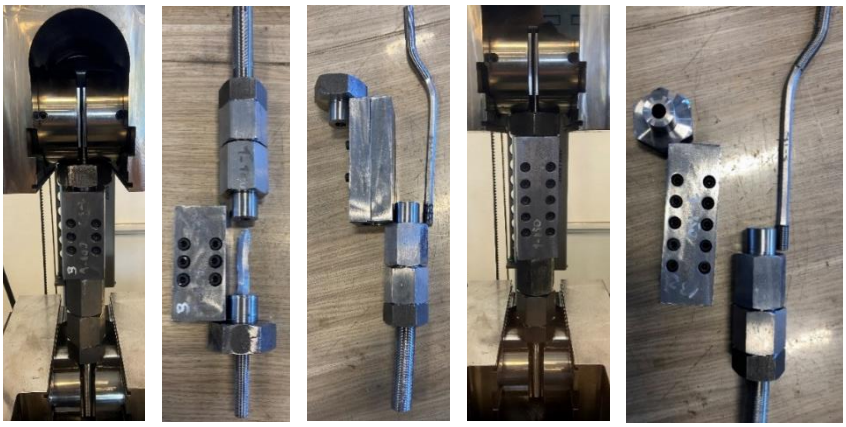
Şekil 3.27: J-STMM-150-I'nın kuvvet-yerdeğiştirme grafikleri.

J-FTMC-150-I-#1 ve #2, J-FTMC-100-I-#1 ve #2 numunelerinden daha fazla enerji sönümlemiştir. İyileştirilmiş çelik ceketli STMM testleri, eksenel davranış ve enerji kaybı açısından sınırlı bir başarı göstermiştir. Deneylerden elde edilen bazı bulgular ayrıca Çizelge 3.1'de listelenmiştir. En büyük kuvvet taşıma kapasitelerinin de karşılaştırılabildiği çizelgede daha kısa numunelerin daha yüksek başlangıç rijitliğine sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 3.1 : İyileştirilmiş çelik ceketli STMM numunelerinin değerlendirilmesi.

Numune Adı	Yükleme protokolü	Süneklik	En büyük Kuvvet (kN)	En büyük yerdeğiştirme (mm)	K_0 (kN/mm)	K_1 (kN/mm)
J-STMM-100-I-#1	ISO	12,14	110,06	19,34	77,14	0
J-STMM-100-I-#2	ISO	12,50	109,36	22,55	66,88	0
J-STMM-150-I-#1	ISO	11,42	104,48	20,97	58,29	0
J-STMM-150-I-#2	ISO	11,76	106,66	22,87	61,76	0
J-STMM-100-I-#3	LDP	5,66	109,13	8,50	71,33	0,14
J-STMM-150-I-#3	LDP	8,12	101,42	18,09	62,50	0

İyileştirilmiş çelik ceketli STMM numunelerin hasar gözlemleri ise Şekil 3.28'de sunulmuştur. Numunelerin üst bölümünde tespit edilen lokal burkulma, nüfuz eden adaptör somununun üretim hatasıyla bağlantılıdır.

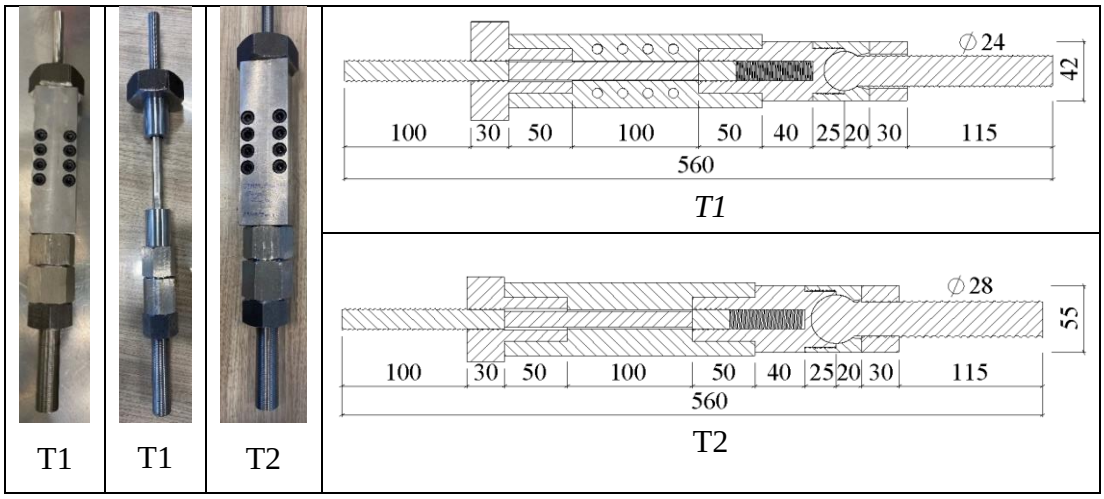


Şekil 3.28: İyileştirilmiş çelik ceketli numunelerin hasar gözlemleri.

Bölüm 3.2.2 Çelik Ceket Kullanılan Deneyler başlığında anlatılan kolon-kiriş birleşim deneylerinde 150 mm sigorta elemana sahip STMM'ler kullanılmasına karar verilmiştir. İyileştirilmiş çelik ceketli STMM'lerde gerçekleştirilen deneylerde ise bazı hatalar ve eksiklikler tespit edilmiştir. Bu sebeple çelik ceket kullanılan kiriş-kolon birleşim deneylerinde kullanılacak tasarımlarda birkaç değişiklikler gerçekleştirilmiştir. İki tip numune hazırlanmıştır. T1 olarak adlandırılan numunede çelik gürzün çapı 24 mm, T2 için ise 28 mm'dir. T1 numunesinin ceketsiz versiyonu da oluşturulmuştur. Çelik ceket montajında kullanılan cıvata sayısı 8 olarak revize edilmiştir. Gürz cıvatasının çapı, daha büyük çaplı yeni çelik gürze uyacak şekilde düzenlenmiştir. Ayrıca adaptör somununun penetrasyon uzunluğu 50 mm'ye kadar uzatılmıştır. Şekil 3.29'da numune detayları verilen nihai tasarıma STMM prototip 3 adı verilmiştir.

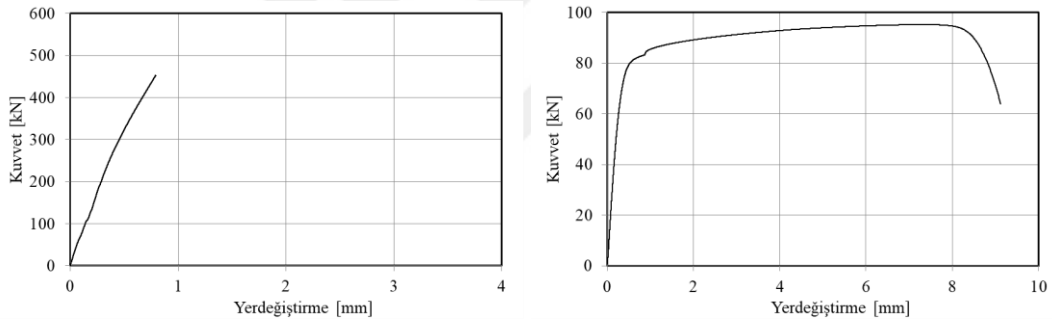


Şekil 3.29: STMM prototip 3'e ait bileşenler, boyutlar ve deney numuneleri (tüm boyutlar mm'dir).



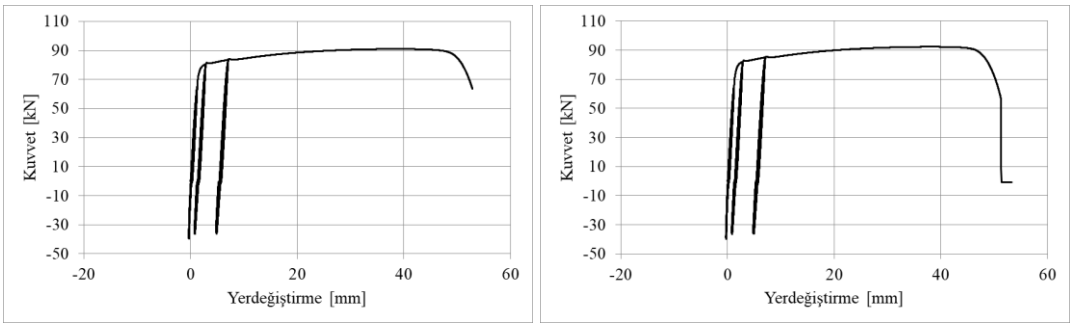
Şekil 3.29 (devam): STMM prototip 3'e ait bileşenler, boyutlar ve deney numuneleri (tüm boyutlar mm'dir.).

STMM prototip 3 numuneleri üzerinde monotonik basınç ve çekme testleri yapılmış, test sonuçları Şekil 3.30'da sunulmuştur. Prototip 3, 80 kN çekme kuvvetine kadar dayanabilirken, basınç tarafında en büyük tepki değeri 450 kN'dur.



Şekil 3.30: STMM prototip 3 monotonik testler.

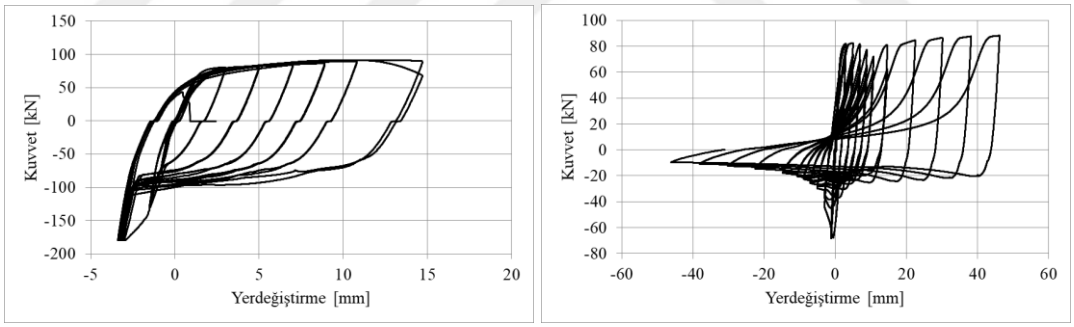
ISO 15835 (2018) protokolü kullanılarak elde edilen kuvvete karşı yer değiştirme ilişkileri Şekil 3.31'de verilmiştir. STMM -T1#1 ve -T2#1 numuleriyle gerçekleştirilen deneyler, 90 kN ortalama çekme dayanımı ve 40 kN basınç dayanımı ile sonuçlanmıştır. Her iki numune de dayanım kaybı olmadan maksimum 45 mm yerdeğiştirme kapasitesine erişmiş ve 55 mm'de kopmuştur.



STMM-T1#1 STMM-T2#1

Şekil 3.31: STMM prototip 3 düşük çevrimli yorulma testleri.

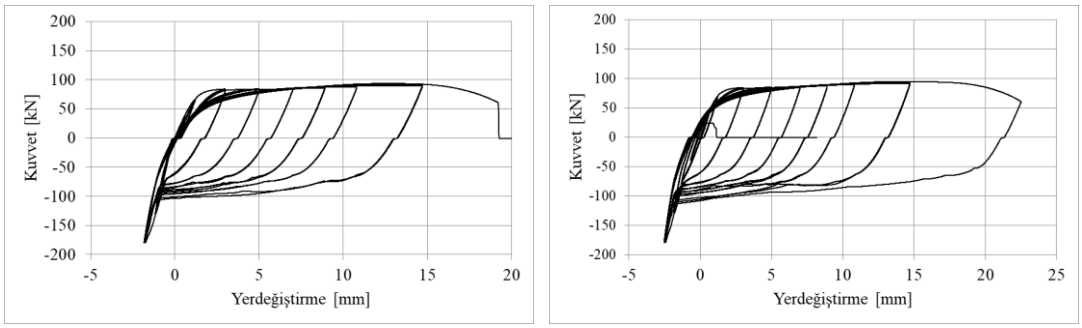
LDP protokolüne tabi tutulan STMM-T1#2 ve STMM-T1#3'ün kuvvet yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.32'de gösterilmektedir. STMM-T1#3 numunesi, T1 numunelerinin çelik ceketsiz varyasyonudur. STMM-T1#2 burkulmadan 180 kN basınç kuvvetine kadar sorunsuz dayanabilmektedir. Beklendiği gibi, üzerinde çelik ceket bulunmayan STMM-T1#3 numunesi ise çekmede sünek davranmasına rağmen, basınçta ciddi dayanım bozulması yaşamaktadır. 90 kN çekme ve 70 kN basınç dayanımına kadar dayanabilen ceketsiz T1 numunesinin 46 mm de yerdeğiştirme kapasitesine sahip olduğu görülmüştür.



STMM-T1#2 STMM-T1#3

Şekil 3.32: STMM prototip 3-T1 numuneleri LDP testleri.

LDP protokolüne tabi tutulan STMM-T2 numunelerine ait kuvvet yerdeğiştirme ilişkileri Şekil 3.33'de verilmiştir. STMM-T2#2 ve #3 numuneleri 95 kN çekme ve 180 kN basınç kuvvetleri arasında kararlı davranış göstermiştir. Numuneler 15 mm dirençli çekme yerdeğiştirme kapasitesine sahiptir.



STMM-T2#2 STMM-T2#3

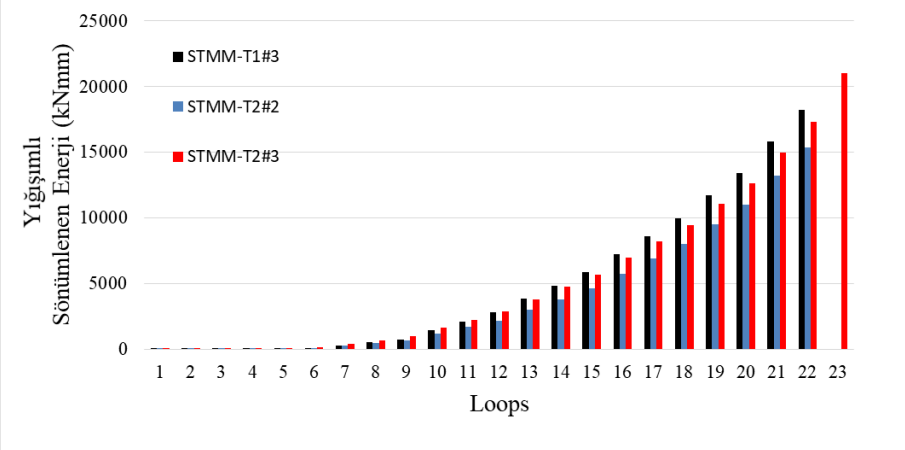
Şekil 3.33: STMM prototip 3-T2 numuneleri LDP testleri.

STMM-T1#2 ve STMM-T2#2 testlerinde, çekme yüklemesi ve boşaltma adımlarından sonra, ana manşonla gürz arasındaki boşluk kapandığında, çelik ceket sıkıştırma kuvveti alarak rijitlik ve dayanım sağlamaya başlar. Çelik ceketin kenar ile arasındaki boşluk değeri ise deneylerde sırasıyla 0,4 mm ve 0,7 mm olarak gözlemlenmiştir. Numunelerin bazı önemli test sonuçları Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

Çizelge 3.2 : STMM prototip 3 numunelerinin değerlendirilmesi.

Numune Adı	Süneklik	En büyük Kuvvet (kN)	En büyük yerdeğiştirme (mm)	K_0 (kN/mm)	K_1 (kN/mm)
STMM-T1#1	11,54	91,27	14,70	57,69	1,45
STMM-T1#2	34,88	88,23	46,20	62,01	0,18
STMM-T2#1	11,53	93,24	19,20	63,84	0,72
STMM-T2#2	12,32	94,18	22,50	61,51	1,02

Deneyler sırasında elde edilen verilerle oluşturulan yığışımlı enerji dağılım varyasyonları Şekil 3.34'de gösterilmektedir. STMM-T2 numuneleri, son çevrimler dışında karşılaştırılabilir enerji sönümleme kapasitesi sergilemişlerdir.



Şekil 3.34: Yığışımlı enerji sönümleme kapasiteleri.

Sigorta tipi mekanik manşon (STMM), prekast beton inşaatında moment aktaran kiriş-kolon bağlantılarında kullanım için sağlam bir mekanik bağlantı aracı olarak önerilmiştir. Sigorta elemanlarında plastik şekildeğiştirmeler toplanır ve demonte edilebilirler. Elde edilen deneysel çalışmalardan aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Yapılan tüm testlerde plastik şekildeğiştirmeler sadece STMM'nin sigorta elemanı üzerinde toplanmıştır.
- Testler yapıldıktan sonra STMM''nin tüm bileşenleri kolaylıkla demonte edilebilmiştir.
- Çelik ceket uygulamasının STMM'nin burkulma davranışını iyileştirmede çok etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.
- Test edilen STMM'nin gerilim ve basınçtaki nominal dayanımları sırasıyla 95 kN ve 180 kN bulunmuştur.
- STMM-T1 ve -T2'de 11,5 nominal yerdeğiştirme sünekliğine ulaşılmıştır.
- STMM, çekme kuvvetinin etkisi altında kararlı çevrimler nedeniyle büyük miktarda enerji sönümleyebilmektedir.

3.2 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsalın Kullanıldığı Kiriş-Kolon Bağlantısı Deneyleri

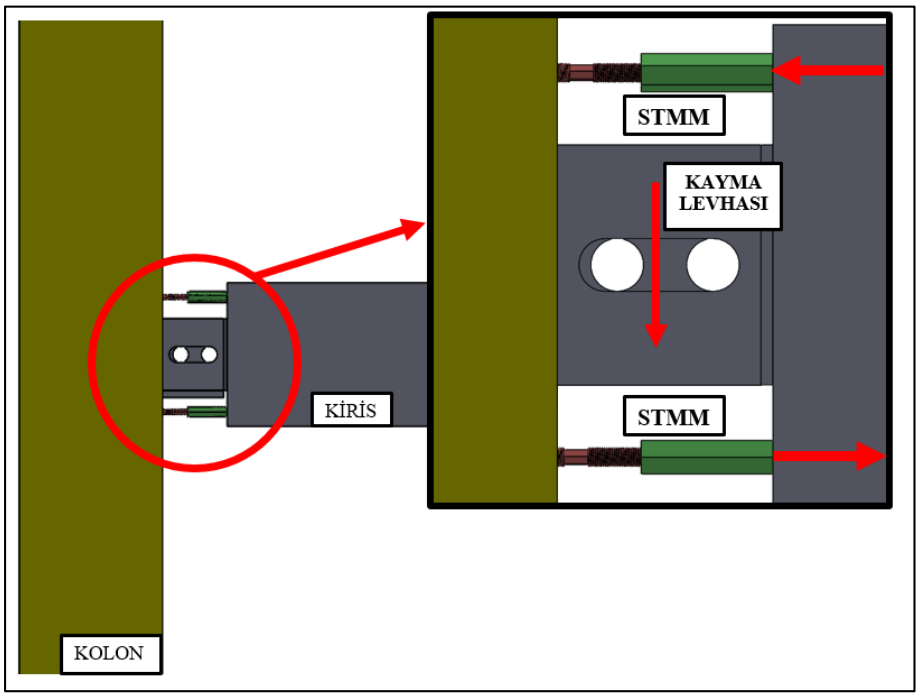
Önüretimli betonarme yapıların kiriş-kolon bağlantıları için geliştirilen değiştirilebilir mekanik plastik mafsal tasarım başlığında da anlatıldığı üzere iki alt bileşenden meydana gelmektedir. Sigorta tipi mekanik manşonlar (STMM) ve kesme kuvveti aktarımını sağlayan kesme bileşenden meydana gelen tasarım içerisinde eğilme momentinin aktarılmasını sağlayan STMM'ler en önemli alt bileşendir. Bu sebeple yukarıdaki başlıklarda iyileştirmeler ve çelik ceket içeren versiyonları ile birlikte STMM'ler için detaylı çok fazla deney gerçekleştirilmiştir. Buna karşın kolay montaj, tekrarlanabilirlik, hasar kontrolü ve deprem sonrası yapının bakımı gibi avantajları içeren hedefleri olan plastik mafsalın mukavemet, rijitlik, süneklik, enerji kaybı ve kırılma mekanizması açısından davranışını belirlemek için buna uygun deneyler ile kanıtlanması gerekmektedir. Bu hedefleri gerçekleştirmek amacıyla değiştirilebilir mekanik plastik mafsalı ve alt bileşen olan STMM'nin çeşitli varyasyonlarını içeren hazırlık deneyleri ve çelik ceket kullanılan deneyleri laboratuvarda ortamında

oluşturulmuştur. Davranışın ve kuvvet kapasitelerinin tespitleri için detaylı ölçüm düzenekleri kurulmuştur. Ayrıca STMM'lerin nihai tasarımına sahip, uygun ölçekte üretilmiş setler kullanılarak ölçekli şekilde bir düzlem çerçeve oluşturulmuş ve uygun yükleme protokolü ile performans deneyi gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki başlıklarda değiştirilebilir mekanik plastik mafsal içeren tüm bağlantı deneylerinin detayları sunulmaktadır.

3.2.1 Hazırlık deneyleri

3.2.1.1 Pilot kiriş kolon bağlantı deneyleri

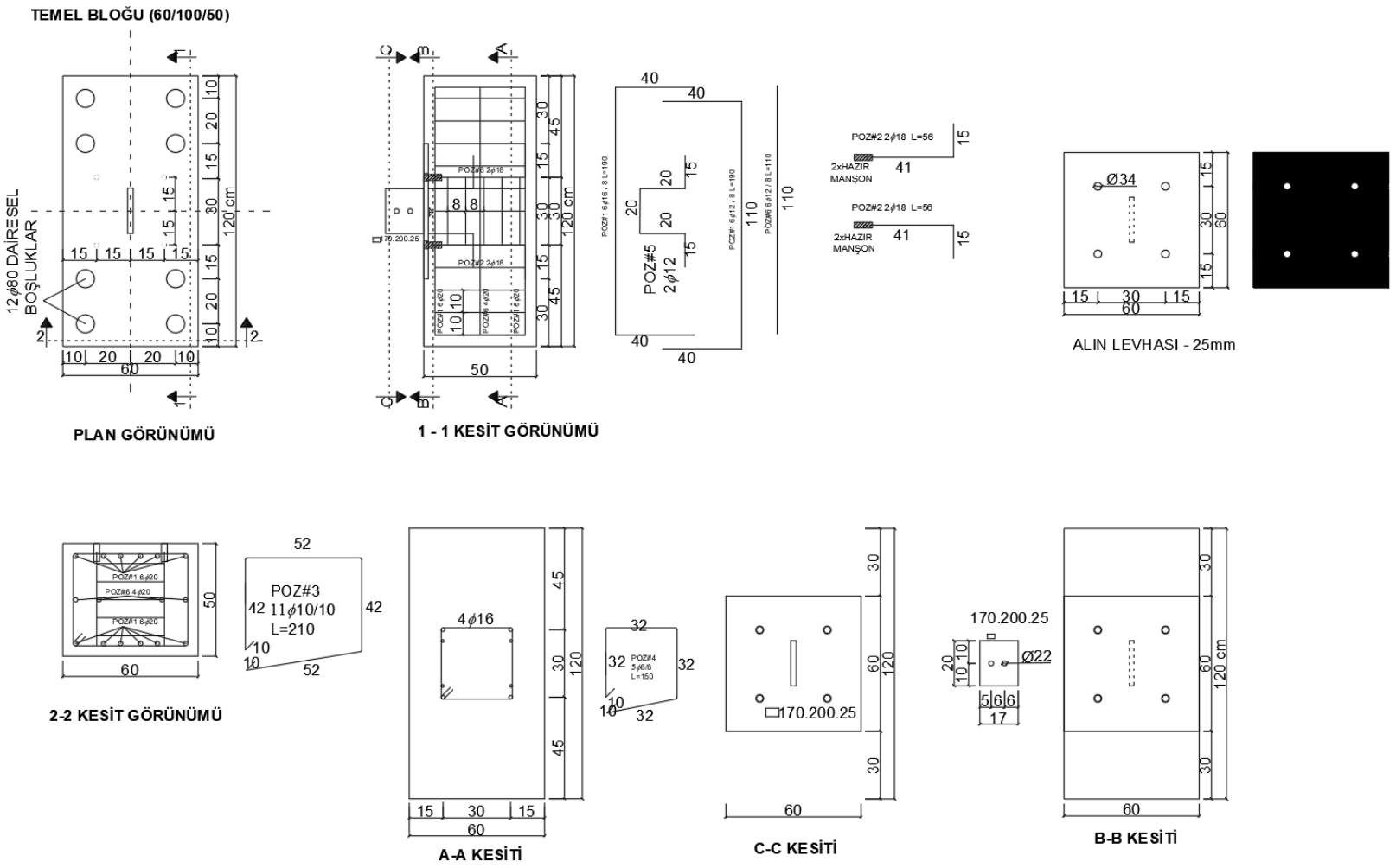
Sigorta tipi mekanik manşon (STMM) tasarımı için gerçekleştirilen malzeme belirleme testleri, diş derinliği araştırması, inceltilmiş gövdeli sigorta eleman testleri, eksenel çekme testleri ve çevrimsel yorulma testlerinin tamamlanmasının ardından Prototip #1 seti ortaya konmuştur. STMM'lerin betonla doldurulması seçeneği, kiriş kolon bağlantısı sırasındaki davranış mekaniği, öngörülemeyen kusurların irdelenmesi için Şekil 3.35'de ön tasarımı görülen pilot deneyler gerçekleştirilmiştir. Eğilme momenti, 2 x 2 düzeninde yerleştirilmiş STMM Prototip #1'ler tarafından aktarılacaktır. Kesme kuvvetleri ise kiriş tarafında tek levha, kolon tarafında iki levhadan oluşan ve 22 mm çapa sahip iki mil ile birleştirilen kayma levhaları aracılığıyla sisteme taşıtılmaktadır.



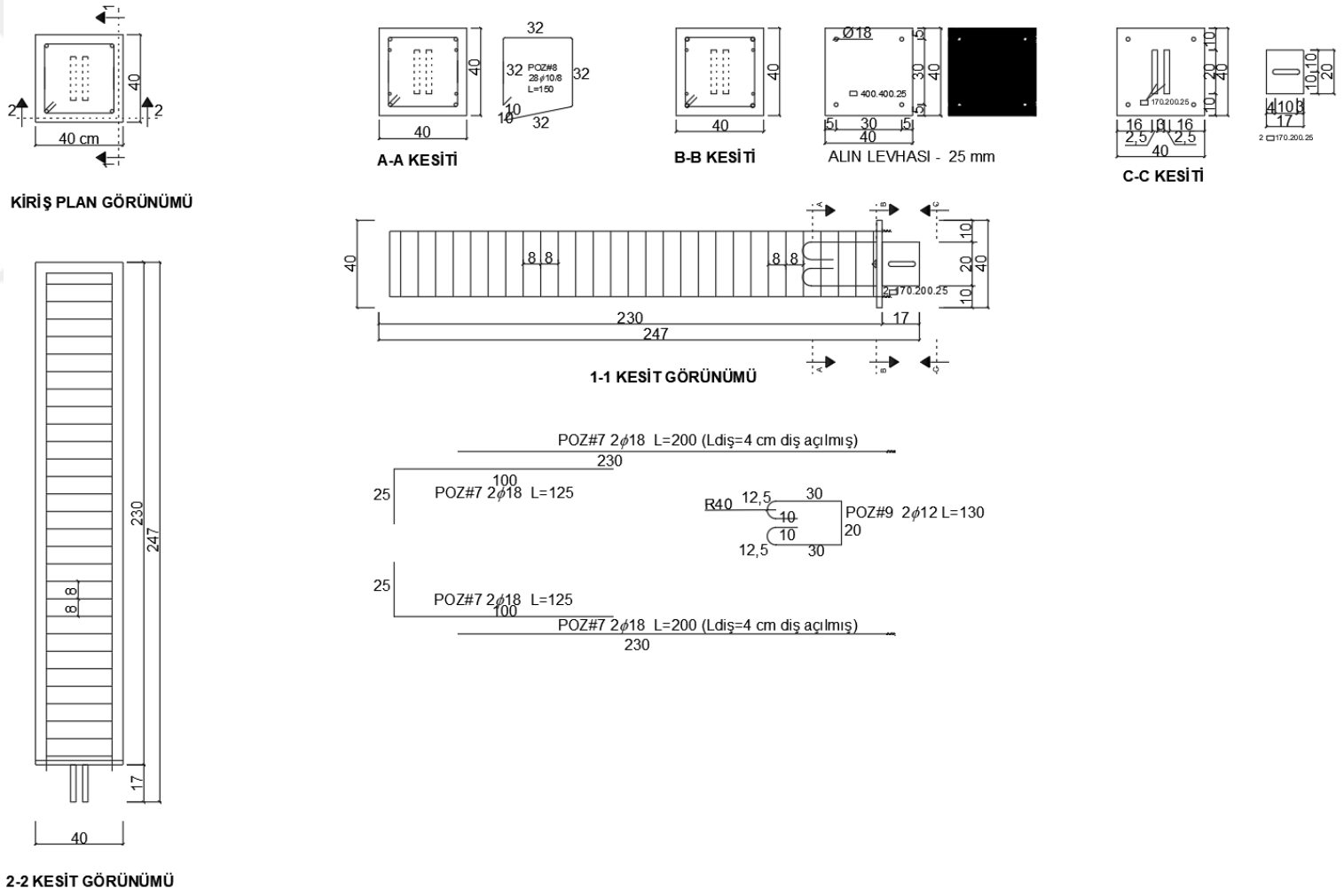
Şekil 3.35: Pilot kiriş kolon bağlantı deney taslağı.

3.2.1.1.1 Deney numunelerinin özellikleri

Pilot deneyler için 2 adet test düzeneği planlanmıştır. Testlerde kullanılacak önüretimli betonarme numuneler birbirinin eşleniğidir ve kiriş kolon bağlantı deneyleri sırasında elastik taşıma kapasiteleri içerisinde kalacakları öngörülmüştür. Bu sebeple iki adet kiriş ve kolonu temsil eden bir adet beton blok tasarlanıp teknik çizimleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.36 ve Şekil 3.37).



Şekil 3.36: Pilot kolona ait teknik çizimler.



Şekil 3.37: Pilot kirişe ait teknik çizimler.

Laboratuvar altyapısı ve fiziksel koşulların getirdiği kısıtlamalar dikkate alınarak numunelerin boyutlandırmaları yapılmıştır. Deney düzeneğinin kurulacağı ankraj deliklerinin mesafesine uygun olabilmesi için pilot kolon numunesi 60cm x 120cm x 60cm boyutlarında planlanmıştır. Kolon yüzeyini temsil etmesi için beton bloğun üst yüzeyine 60cm x 60cm x 3cm boyutlarında çelik alın levhası yerleştirilmiştir. Alın levhasının üstünde belirlenen 30cm x 30cm kare alanın dört köşesine 34 mm çapında delik açılmıştır. Alın levhasının ve deliklerin orta ekseninden geçen aks üstüne, 16 mm çapında 2 delik yuvasına sahip 17cm x 20cm x 2,5cm boyutlarında başka bir çelik levha dik olarak kaynaklanmıştır. Alın levhasının kalıptaki aplikasyonunun sağlanması için de çeşitli noktalardan 4 adet atıl sabitleme levhası kaynaklanmıştır (Şekil 3.38).



Şekil 3.38: Pilot kolonun üretim görselleri.

Prototip #1 STMM'lere ait kolon manşonları, uçlarına diş açılmış donatılara bağlanmış, pilot kolonun alın levhalarındaki deliklerden geçirilmiş, sabitleme için ise cıvatalardan meydana gelen bir bağlantı mekanizması oluşturulmuştur.

Pilot kolonun laboratuvar döşemesine sabitlenmesini sağlayacak deliklerin beton dökümü sırasında korunabilmesi amacıyla da kalıp içerisindeki donatıların ve etriyelerin arasına 8 adet plastik boru yerleştirilmiştir. Çelikten yapılmış bir kılavuzlama mekanizması vasıtasıyla ankraj deliklerini oluşturacak plastik borular dış kalıba sabitlenmiştir.

Pilot kiriş, 40cm x 40cm kesit boyutlarına sahip 2,3m uzunluğunda 1/1 ölçekli olarak tasarlanmıştır. Kiriş ucuna yerleştirilen kayma levhası ve Prototip #1 STMM'lerin bağlantısı için bırakılan donatı filizleri ile birlikte 2,47m uzunluğa sahiptir. Üstte 2 adet Φ18, altta 2 adet Φ18 boyuna donatıya sahiptir. Kiriş alnına 40cm x 40cm x 3cm boyutlarına sahip çelik levha yerleştirilmiş, levhanın 4 noktasından kiriş boyuna donatıların filiz verebilmesi için 18 mm çapında delikler oluşturulmuştur. Alın levhasının ortasından eşit mesafe uzaklıkta 17cm x 20cm x 2,5cm boyutlarında iki adet çelik levha dik olarak kaynaklanmıştır. Levhaların arasındaki mesafe 3cm olarak bırakılmış, her bir levhaya ise 10 cm uzunluğunda ve 2,2cm genişliğinde yuva deliği açılmıştır. Alın levhasına açılan deliklerden, uçlarına 16mm ince diş açılmış boyuna donatılar geçirilmiştir, Beton dökümü sırasında kılavuzun korunması için donatıların dişlerine geçici olarak STMM manşonları geçirilmiş, kiriş boyunca Φ10 etriyeler ise 8 cm aralıklarla bağlanmıştır. Pilot kirişe ait donatı düzeni, alın levhası detayları ve üretim görselleri Şekil 3.39'da verilmiştir.



Şekil 3.39: Pilot kirişin üretim görselleri.



Şekil 3.39 (devam): Pilot kiriş üretim görselleri.

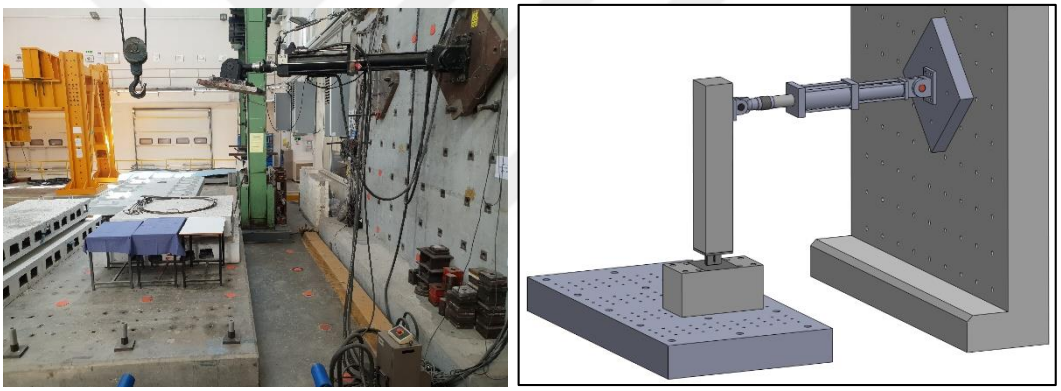
Beton dökümü gerçekleştirilen pilot kiriş ve kolon numuneler prizleri tamamlanınca kalıptan çıkarıldılar. Pilot kolonun montajı sırasında ankrajlara ait aplikasyonların korunması için yerleştirilen plastik boruların fazlalıkları numuneden uzaklaştırıldı. Benzer şekilde pilot kirişte gerçekleştirilen alın levhası kaynakları ile donatı kılavuzlamaya yardım eden manşonlar numuneden çıkarılmıştır. Numunelerin priz almış, kalıptan çıkarılmış ve artık mekanizmalardan temizlenmiş hallerine ait görseller Şekil 3.40'ta verilmiştir.



Şekil 3.40: Pilot kolon ve kirişlerin tamamlanmış üretim görselleri.

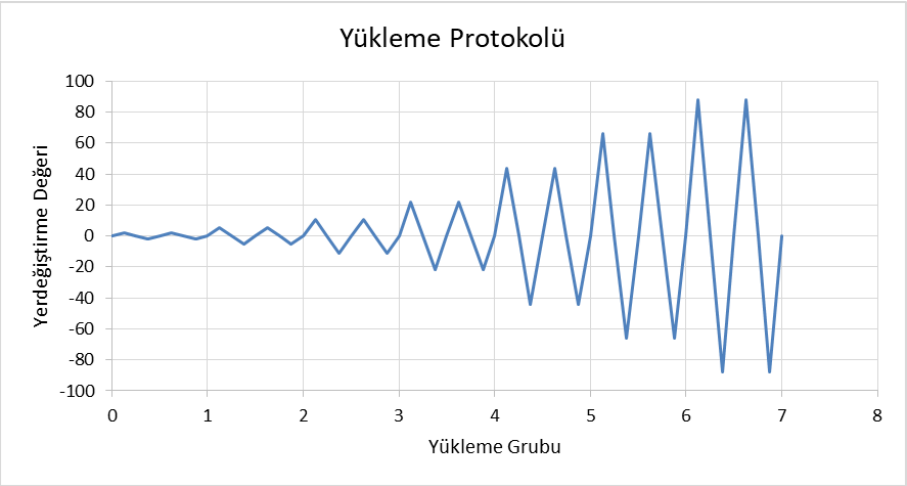
3.2.1.1.2 Deney düzeneği

Pilot kiriş kolon deneyleri için İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan yükleme duvarı ve adaptör temel kullanılmıştır. Yükleme duvarına montajlanan hidrolik yükverenin yatay doğrultudaki yerdeğiştirme kabiliyetine uygun olarak deney numuneleri 90 derece çevrilmiştir. Bu düzenek, pilot kolonun yatay doğrultuda, pilot kirişin ise deney boyunca düşey doğrultuda bulunmasına neden olmaktadır. Pilot kolon, dişli ankraj çubukları kullanılarak adaptör temele sekiz noktadan öngerme verilerek bağlanmıştır. Pilot kiriş ise gezer vinç aracılığıyla düşey olarak kaldırılarak pilot kolonun kayma levhasına 22mm çaplı vidalar ile bağlanmıştır. Vinçte asılı konumda tutulan kirişe ait dengeleme tamamlanmış ve Prototip #1 STMM'ler ile kirişin pilot kolona bağlantısı tamamlanmıştır. Kirişin üst ucu, hidrolik yükverenin uç bölgesine bağlanmış, çelik levhalardan oluşan bir kafes içerisine yerleştirilmiş ve öngerme verilerek montaj tamamlanmıştır (Şekil 3.41).



Şekil 3.41: Pilot kiriş kolon bağlantısı deney alanı ve tasarımı.

Deneyler sırasında artan genlikli tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Her genlik değeri STMM elemanlar ile oluşturulan mekanik plastik mafsalın farklı açısal dönme değerlerine karşı gelmektedir. Bunlar sırasıyla 0,001, 0,0025, 0,005, 0,01, 0,02, 0,03, 0,04 radyan değerleridir. Kiriş mesafesi ve mekanik plastik mafsalın geometrik özellikleri dikkate alınmış, hidrolik yükverenin merkezinden birleşim bölgesine moment kolunun 2,2 m. olduğu tespit edilmiştir. Moment kolunun değeri kullanılarak açısal dönme değerleri yerdeğiştirme genliklerine çevrilmiştir. Bu değerler mm cinsinden sırasıyla 2,20, 5,50, 11,00, 22,00, 44,00, 66,00, 88,00 dir. Elde edilen bu değerlerle ortaya çıkan yerdeğiştirme protokolü Şekil 3.42'de verilmiştir



Şekil 3.42: Pilot deneylerin yükleme protokolü.

Pilot kolon kiriş bağlantısı deneyleri için bu tasarımın kullanılma sebebi tersinir çevrimsel yüklemeler sırasında toplanan verilere kiriş ağırlığından kaynaklı etkilerin karışmasını engellemektir. Bu sayede, hem donatı düzeni hem de STMM yerleşimi simetrik olan pilot kirişte meydana gelecek herhangi bir düzensiz davranışın kiriş ağırlığı nedeniyle olmadığı kontrol altına alınmıştır. Henüz tespit edilemeyen veya öngörülemeyen kusurların, hataların veya problemlerin varlığı ve davranışa etkisi de daha kolay tespit edilebilmiştir.

3.2.1.1.3 Pilot kolon kiriş bağlantısı deneyi: yalın versiyon

Birleşim bölgesi yalın olarak teşkil edilmiş olan ilk pilot deneyde, kullanılan STMM Prototip #1'ler 27 mm kalınlığa sahip altıgen ana manşonlar ve 11mm gövde kalınlığına sahip dairesel kesitli sigorta elemanlardan meydana gelmiştir.Sigorta elemanlarda oluşacak kalıcı deformasyonları ölçebilmek amacıyla yüzeylerine şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Birleşim bölgesinde meydana gelen açısal dönme değerlerini ikincil bir ölçüm sistemiyle elde etmek ve kayma levhası mekanizmasında oluşacak eksenel doğrultudaki yerdeğiştirme hareketlerini kayıt altına almak amacıyla birleşim bölgesine çok sayıda yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Şekil 3.43'te yalın pilot deneyin görünümü ve birleşim bölgesinde gerçekleştirilen montajın detayları incelenebilir.



Şekil 3.43: Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon deneyi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 2 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 2 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. +22,0 mm itme yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen kontrollerde basınca maruz kalan sigorta elemanlarda burkulma oluştuğu görülmüştür. Çevrimsel yüklemenin devamı olan -22,0 mm olduğu yerdeğiştirme hedefinde de geri kalan sigorta elemanlar burkulmuştur (Şekil 3.44). Kuvvet – yerdeğiştirme ilişkileri incelendiğinde, bu yerdeğiştirme adımı ile 11,0 mm yerdeğiştirme adımı arasında akma gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.44: 22,0mm hedef yerdeğiştirmede yalın birleşim bölgesi görünümü.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 0,03 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 66,0 mm yerdeğiştirme adımı sırasında kiriş kayma levhası kolon bloğuna dayanmış ve kuvvet aktarmaya başlamıştır. Bu kuvveti dengelemeye çalışan çekme bölgesindeki sigorta elemanlar, kuvvet dengesini sağlayamadıkları için dişler sıyrılmış ve STMM kirişten ayrılma göstermiştir (Şekil 3.45).



Şekil 3.45: Kayma levhasının teması ve sebep olduğu diş sıyrılması.

Sistemdeki mevcut kuvvet değerlerinde de ani düşüş meydana gelmiştir. 66,0 mm yerdeğiştirme çevrimi tamamlanarak kuvvet değerleri kayıt altına alınarak deneye son verilmiştir. Deney sonunda bütün sigorta elemanlarda meydana gelen burkulmalar ve bu burkulmalar neticesinde kayma levhasının kolon bloğuna ait levhaya teması

fotoğraflanarak kayıt altına alınmıştır. Sistemi oluşturan elemanlarda oluşan hasar durumları ve birleşim bölgesine ait deney sonu görselleri Şekil 3.46'da verilmiştir.

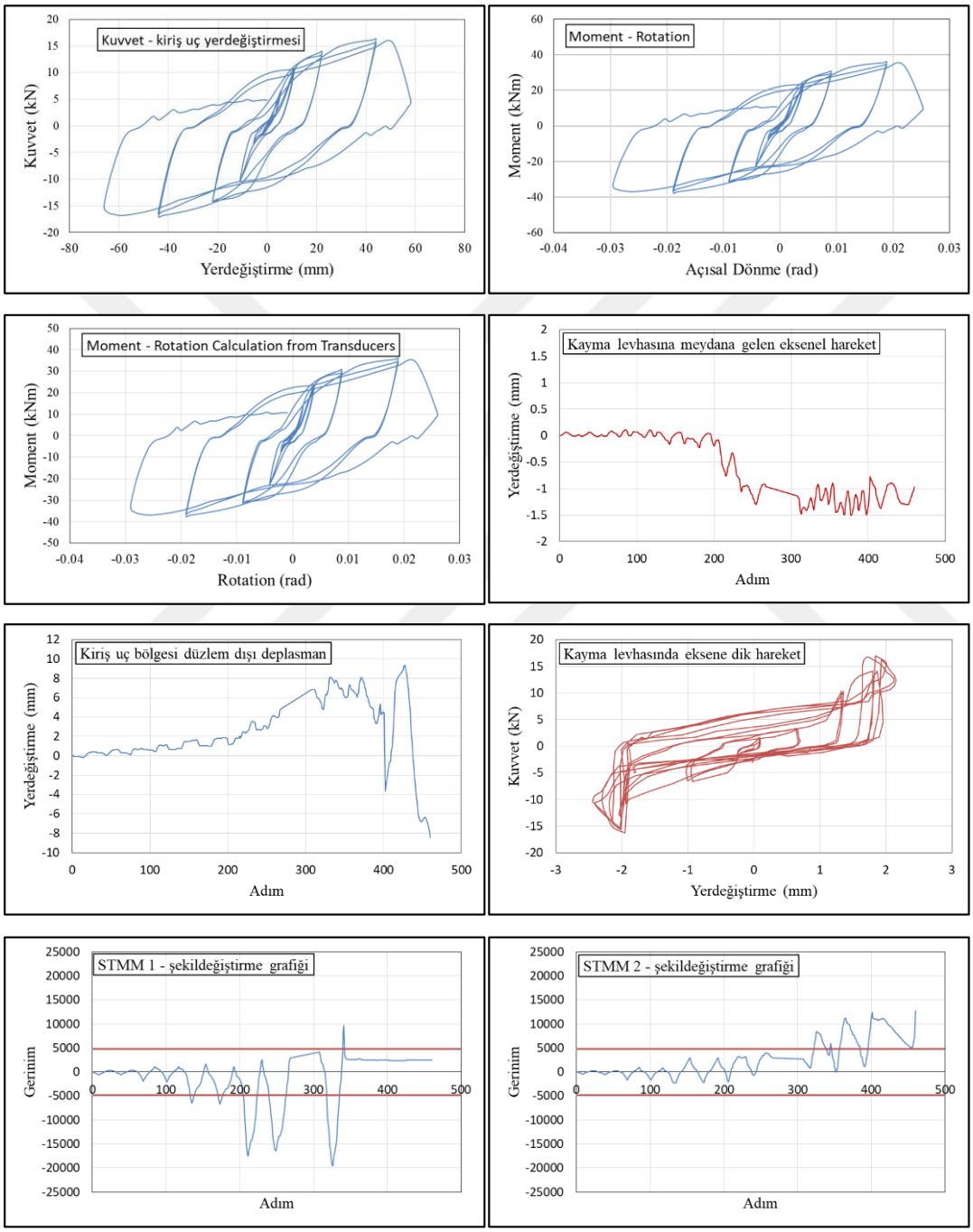


Şekil 3.46: Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon deney sonu.

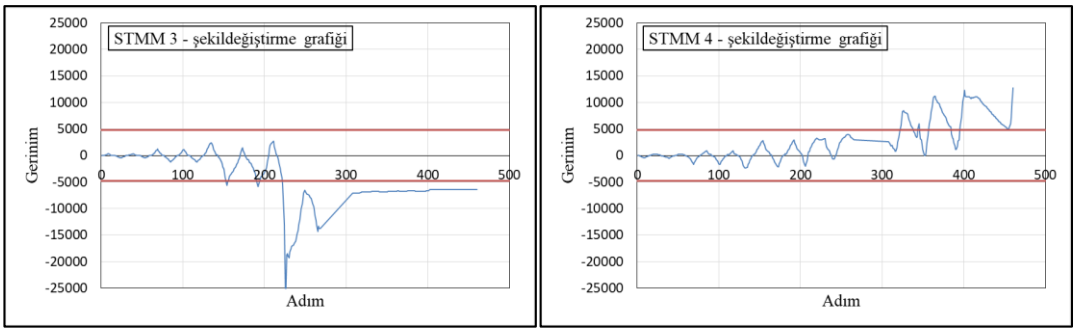
Kayma levhalarında kullanılan 2 adet milin kuvvet çifti oluşturarak sigorta elemanlar ile birlikte kuvvet taşıdığı görülmüştür. Sigorta elemanlarda çekme kuvvetleri ve bunun sonucu kalıcı uzama deformasyonları oluşmamıştır. Artan genliklerle birlikte sigorta elemanlarda artarak oluşan burkulma eğilimi ise 2 mil ile oluşturulan kayma levhalarının kuvvet aktarmasının sonucu olarak deneye yansımıştır.

Deney süresince toplanan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme kayıtları ile deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. Sigorta elemanlardaki kalıcı deformasyonların yükleme adımlarıyla birlikte değişimleri hazırlanmıştır. STMM'lerin bulunduğu

eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak da mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen açısal dönmeler dolaylı olarak hesaplanmıştır. Kayma mili ekseninde meydana gelen yerdeğiştirme değerleri ayrıca karşılaştırma grafiğine dönüştürülmüştür. Elde edilen ve hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan karşılıklı etki diyagramları Şekil 3.47'de verilmiştir.



Şekil 3.47: Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon karşılıklı etki diyagramları.



Şekil 3.47 (devam): Pilot kolon kiriş bağlantısı yalın versiyon karşılıklı etki diyagramları.

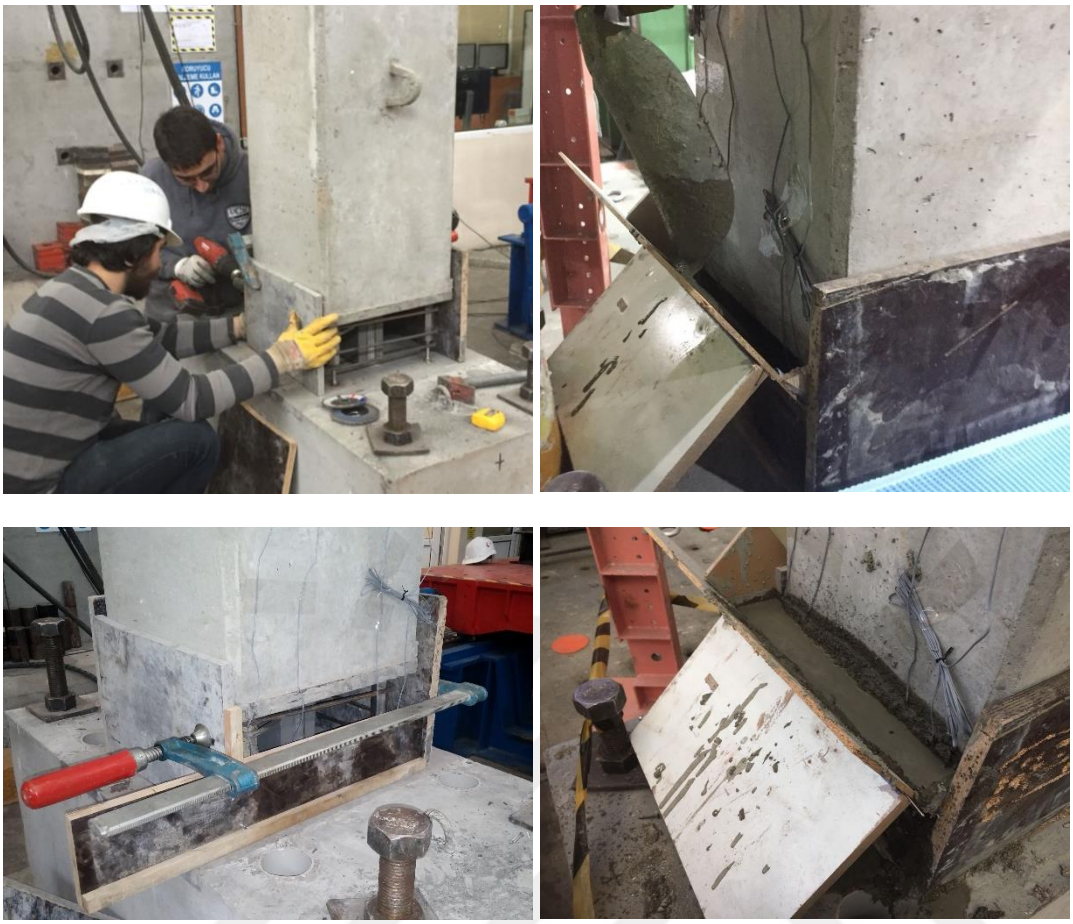
3.2.1.1.4 Pilot kolon kiriş bağlantısı deneyi: beton dolgulu versiyon

Pilot kolon kiriş deneylerinin bu versiyonunda yalın versiyondan farklı olarak kiriş kolon birleşim bölgesindeki STMM'ler etriye ile sarılmıştır. Daha sonra bu bölgeye ahşap kalıp kurulmuş ve beton dökülerek ıslak bir birleşim gerçekleştirilmiştir.

Birleşim bölgesinin beton dolgu ile ıslak olarak teşkil edildiği ikinci pilot deneyde, kullanılan STMM Prototip #1'ler 27 mm kalınlığa sahip altıgen ana manşonlar ve 11 mm gövde kalınlığına sahip dairesel kesitli sigorta elemanlardan meydana gelmiştir. STMM montajları tamamlandıktan sonra birleşim bölgesi 3 adet Φ8 nervürsüz etriye ile sarılmıştır. Sigorta elemanların yüzeylerine de şekildeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.48). Birleşim bölgesinin etrafına ahşap kalıp oluşturulmuş ve çimento esaslı grout harcı ile doldurulmuştur.

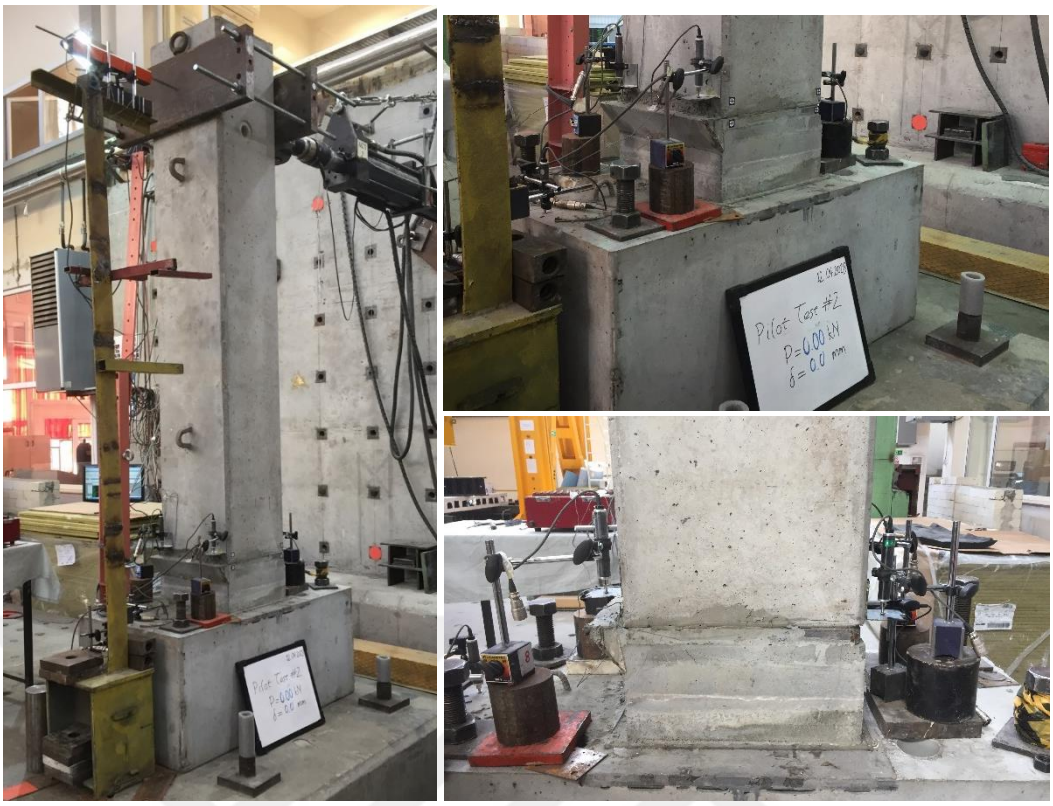


Şekil 3.48: Beton dolgulu pilot kolon kiriş bağlantısı ıslak birleşim yapımı.



Şekil 3.48 (devam): Beton dolgulu pilot kolon kiriş bağlantısı ıslak birleşim yapımı.

Birleşim bölgesinde meydana gelen açısal dönme değerlerini ikincil bir ölçüm sistemiyle elde etmek ve kayma levhası mekanizmasında oluşacak eksenel doğrultudaki yerdeğiştirme hareketlerini kayıt altına almak amacıyla çok sayıda yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir. Şekil 3.49'da beton dolgulu pilot deneyin görünümü ve birleşim bölgesinde gerçekleştirilen detaylar incelenebilir.



Şekil 3.49: Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon deneyi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 2 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 2 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, beton dolgu yüzeyi ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. +11,0 mm itme yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde. beton yüzeyde kontroller gerçekleştirilmiş ve çekme bölgesinde kalan yüzeylerde çatlaklar görülmüştür. Çevrimsel yüklemenin devamı olan -11,0 mm yerdeğiştirme hedefinde de karşı yüzde beton çatlakları tespit edilmiştir. Bu çevrime ait görseller Şekil 3.50'de verilmiştir.



Şekil 3.50: Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon – ilk çatlaklar.

22,0 mm çevrimsel yerdeğiştirme hedefleri gerçekleştiğinde yerdeğiştirme – kuvvet etkileşim grafiği incelenmiş, kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Beton yüzeyde kontroller gerçekleştirilmiş ve yüzeylerde oluşan çatlakların uzayarak birleştiği görülmüştür (Şekil 3.51).



Şekil 3.51: 22,0mm hedef yerdeğiştirmede beton dolgulu birleşim görünümü.

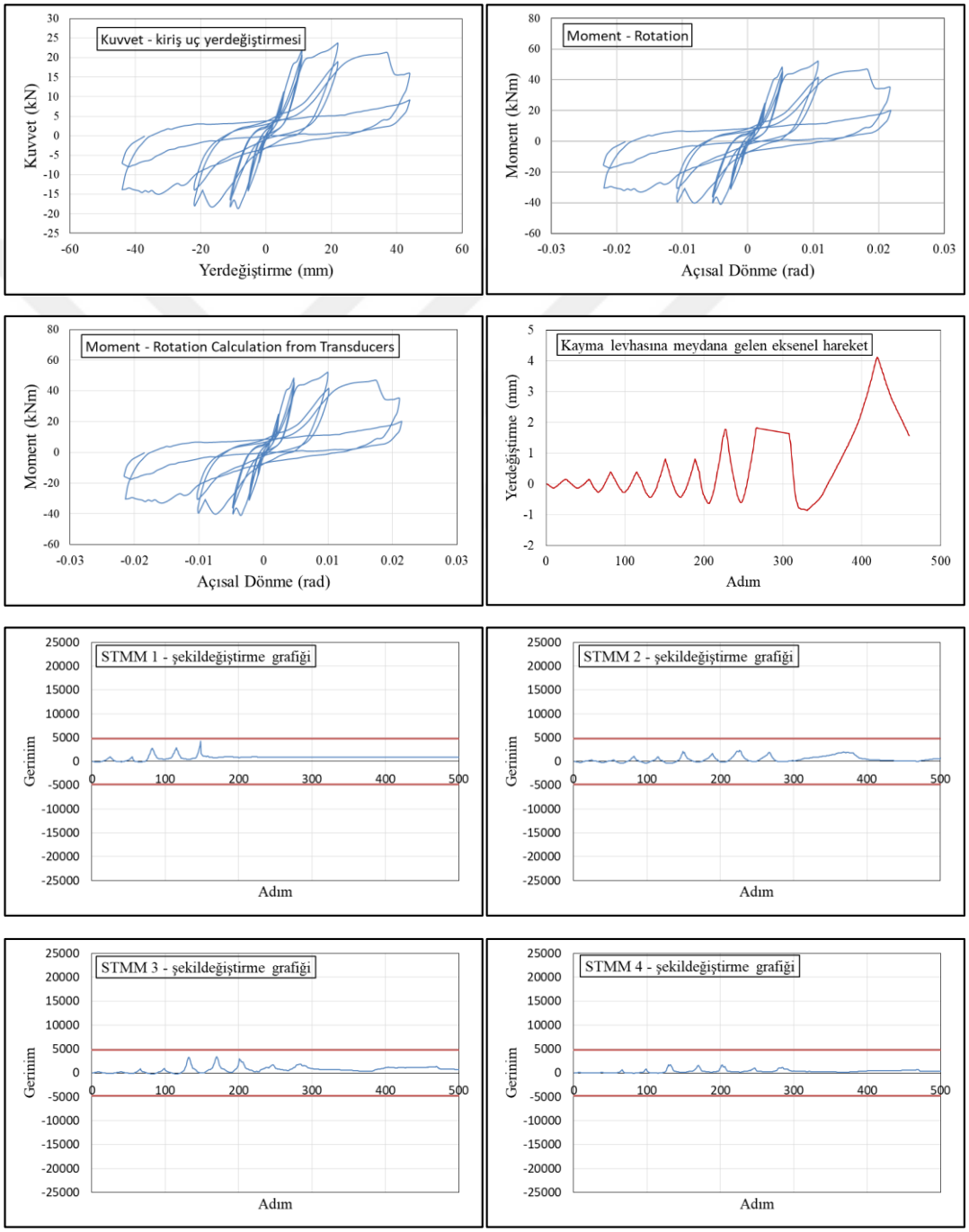
Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 0,02 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 44,0 mm yerdeğiştirme adımı sırasında kuvvet – yerdeğiştirme grafiklerinde ani dayanım kaybı meydana gelmiştir. Oluşan dayanım kaybı, en büyük kuvvet taşıma kapasitesinin %80'inden daha küçük olduğu için deney sonlandırılmıştır. Bu aşamada yapılan kontrollerde alın levhasının hem kirişten hem de beton dolgusundan ayrıldığı görülmüştür. Beton bloğunun üstünde mevcut çatlakların genişlikleri artmış, yeni çatlaklar meydana gelmiştir. Deney sonunda beton blok kırılarak sigorta elemanların ve manşonların durumuna bakılmış ve bütün elemanların bütünlüklerini koruduğu görülmüştür. Kirişte bırakılan diş açılmış donatı filizlerinin ise manşondan sıyrıldığı ve dayanım kaybının donatılarda oluşan diş sıyrılması nedeniyle oluştuğu tespit edilmiştir. Deney sonuna ait bütün ayrıntılar Şekil 3.52'de verilmiştir.



Şekil 3.52: Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon deney sonu.

Deney süresince toplanan yerdeğiştirme ve şekildeğiştirme kayıtları ile deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları grafiklere dökülmüştür. Sigorta elemanlardaki kalıcı deformasyonların yükleme adımlarıyla birlikte değişimleri hazırlanmış, elde edilen

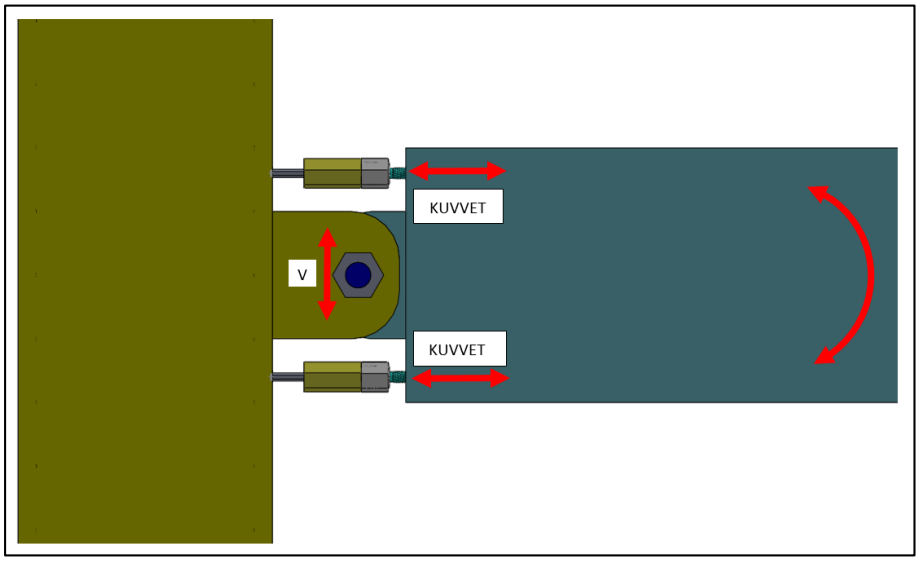
değerlerde ise beton içinde gömülü kalan sigorta elemanların elastik sınırlar içerisinde kaldığı tespit edilmiştir. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak da mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönmeler dolaylı olarak hesaplanmıştır. Kayma mili ekseninde meydana gelen yerdeğiştirme değerleri de grafiğe dönüştürülmüştür. Elde edilen sayısal veriler kullanılarak oluşturulan karşılıklı etki diyagramları Şekil 3.53'de verilmiştir.



Şekil 3.53: Pilot kolon kiriş bağlantısı beton dolgulu versiyon karşılıklı etki diyagramları.

3.2.1.2 Çelik ceket öncesi deneyler

Pilot deneyler sırasında sigorta tipi mekanik manşon (STMM) tasarımında tespit edilen eksiklikler, geometrik yetersizlikler ve tolerans yetersizlikleri sonucunda yeni tasarım STMM prototip #2'ler geliştirilmiştir. Ayrıca pilot deneylerde beton dolgulu ıslak birleşimdeki davranışın değişkenlik gösterdiği, moment taşıma kapasitesinin kiriş değerine oldukça yaklaşması ve hatta bazı durumlarda bertaraf etmesi bu birleşimin taşıyıcı elemanlara hasar yönlendirmesi riskini ortaya koymuştur. Ek olarak, kuru birleşime kıyasla çevrimlerde çok daha az enerji sönümlenmiştir. Tüm bu parametreler dikkate alınmış ve yalnızca kuru birleşim yöntemi içeren mekanik bir plastik mafsal deney düzeneği geliştirilmiştir. Oluşturulan hipotez deney tasarımına ait görsel Şekil 3.54'te verilmiştir. Tasarımda kullanılan kesme kuvveti levhalarında iki delikli tasarım terkedilmiştir ve çap olarak büyütülmüş 36 mm çapa sahip tek milden meydana gelen yeni bir montaj metodu oluşturulmuştur. Deneyler sırasında kirişlerin 1/1 ölçekte gerçek boyutlarda ve testler sırasında gerçekteki gibi yatay konumda oluşturulmasına karar verilmiş, STMM Prototip #2'ler de tasarımda hesaplanan gerçek boyutlarda ürettirilmiştir. Kolon elemanı ve düğüm noktasını temsil eden zemine ankrajlı betonarme numune yerine çelikten imal edilmiş öngerme ile zemine ankrajlanan payandalı düğüm noktası kullanılmıştır.



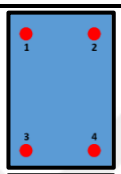
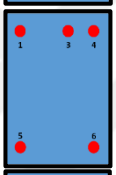
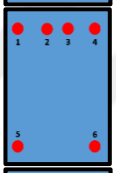
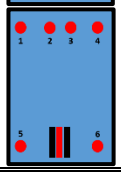
Şekil 3.54: Çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı deney taslağı.

3.2.1.2.1 Deney numunelerinin özellikleri

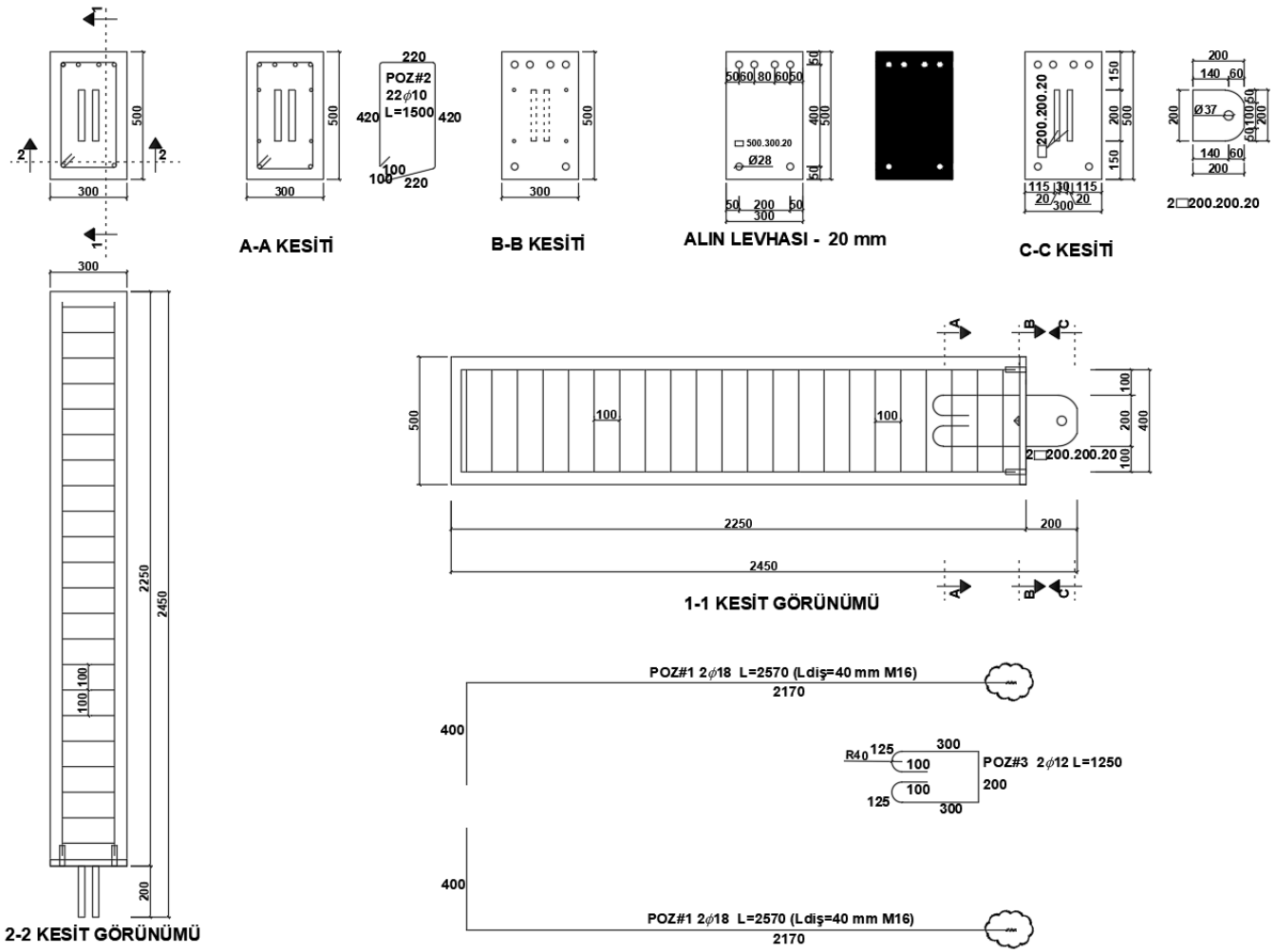
Çelik ceket öncesi deneyler için 4 adet deney planlanmıştır. Her bir deneyde STMM düzenleri ve sayıları birbirinden farklıdır ve bu sayılar kirişin taşıma kapasitesini

belirlemiştir. Gerçekleştirilen 1 nolu deneyde üst sırada 2 adet alt sırada 2 adet olmak üzere 4 adet STMM Prototip #2 bulunmaktadır. 2 nolu deneyde üst sıradaki STMM sayısı 3'e yükseltilmiştir. 3 nolu deneyde üst sıradaki STMM sayısı 4 olmuş, alt sıradaki sayılar değişmemiştir. 4 nolu deneyde ise üst sırada 4 adet alt sırada 2 adet STMM Prototip #2 olan yerleşime alt sıradaki STMM'lerin arasında bulunacak çelik levhalar eklenmiştir. Deneylere ait bir matris Çizelge 3.3'de verilmiş olup detaylı bilgiler her bir deneyin anlatıldığı alt başlıklarda açıklanmıştır.

Çizelge 3.3 : Çelik ceket öncesi deneylerin test matrisi.

Deney numarası	STMM düzeni	Üst Sıra STMM sayısı	Alt Sıra STMM sayısı	Sürtünme Levhaları
1 nolu deney		2	2	-
2 nolu deney		3	2	-
3 nolu deney		4	2	-
4 nolu deney		4	2	3

Deneyler sırasında diğer parametrelerin tamamı korunmaya çalışılmıştır. Bu sebeple testlerde kullanılacak önüretimli betonarme kiriş numunelerinin tamamı birbirinin eşleniği olarak tasarlanmıştır. 3 adet önüretimli deney kirişi üretilmiştir. Deneyler sırasında meydana gelen STMM problemlerinin tespiti ve davranışı ilk 3 numuneden oluşturmaktadır. 4. deney ise sonradan eklenmiş, 2x2 STMM düzenine sahip deneyin kirişi bu deneyde kullanılmış ve ek levhaların katkısı irdelenmiştir. Deney kirişlerinin teknik çizimleri Şekil 3.55'de verilmiştir.



Şekil 3.55: Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait kirişlerin teknik çizimi

Deneylerde kullanılacak kiriş, teknik çizim detaylarında da verildiği gibi, 30cm x 50cm kesit boyutlarına sahip 2,25m uzunluğunda 1/1 ölçekli olarak tasarlanmıştır. Kiriş ucuna yerleştirilen kayma levhası ve Prototip #2 STMM'lerin bağlantısı için bırakılan mesafe ile birlikte 2,45m uzunluğa ulaşmaktadır. Kirişin sahip olduğu boyuna donatılar üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 çapa sahip S420 çeliğinden oluşmaktadır. Kiriş alnına 50cm x 30cm x 2cm boyutlarına sahip çelik levha yerleştirilmiş, levhanın 6 noktasında 28 mm çapında delikler açılmıştır. Alın levhasının ortasından eşit mesafe uzaklıkta 20cm x 20cm x 2cm boyutlarında iki adet çelik levha dik olarak kaynaklanmıştır. Levhaların arasındaki mesafe 3cm olarak bırakılmış, her bir levhaya eksen çizgisi üstünde ve kiriş alın levhasından 14cm mesafe uzaklıkta 37 mm çapında delik açılmıştır.

Alın levhasına açılan deliklerden uçları yuvarlatılmış 80 mm uzunluğunda ve M16 ince diş açılmış manşonlar yerleştirilmiştir. Boyuna donatılara da diş açlmış ve manşonlara bağlanmıştır. Beton dökümü sırasında kılavuzun korunması için manşonlar, alın levhasının arka ucundan cıvatalar ile bağlanmış ve sabitlenmiştir. Kiriş boyunca da Φ10 etriyeler 10 cm aralıklarla boyuna donatılar etrafına bağlanmıştır. Kirişlere ait donatı düzeni, alın levhası detayları ve üretim görselleri Şekil 3.56'da verilmiştir.



Şekil 3.56: Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait kiriş görselleri.





Şekil 3.56 (devam): Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait kiriş görselleri.

Beton dökümü gerçekleştirilen kiriş numuneler prizleri tamamlanınca kalıptan çıkarıldılar. Kiriş iç manşon aplikasyonlarının korunması için beton dökümü ve priz sürecince alın levhasında bulunan bağlantı cıvataları bütün işlemler sırasında muhafaza edilmiştir. Numunelerin priz almış, kalıptan çıkarılmış ve artık mekanizmalardan temizlenmiş hallerine ait görseller ise Şekil 3.57'de verilmiştir.

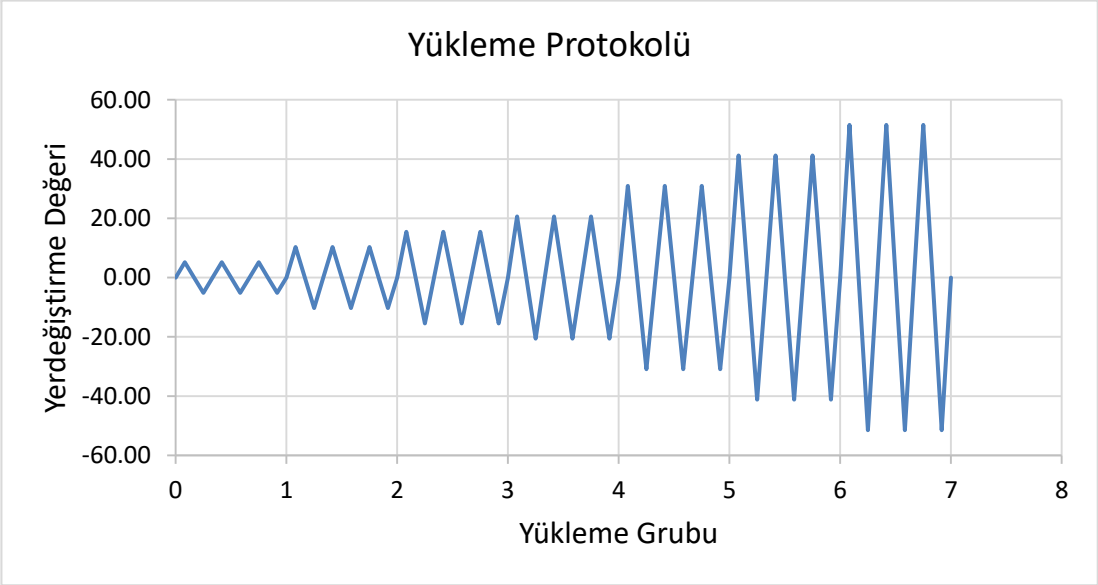




Şekil 3.57: Çelik ceket öncesi bağlantı deneylerine ait tamamlanmış kiriş görselleri.

3.2.1.2.2 Deney düzeneği

Çelik ceket öncesi deneylerde oluşturulan deney düzeneği için yükleme protokolü pilot deneylerden farklıdır. Hidrolik yük veren aracılığıyla etkitilen yerdeğiştirmeler yine artan genlikli tekrarlı ve tersinir olarak uygulanmıştır. Mekanik plastik mafsalın farklı açısal dönme değerlerine karşılık gelen bu genlikler sırasıyla 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00 radyan değerleridir. Fakat deneyler sırasında her bir genlikte 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Mekanik plastik mafsal ve hidrolik yük veren arasındaki kuvvet kolu ise 2,06 m'lik daha kısa bir mesafeyle oluşturulmuştur. Kullanılan yerdeğiştirme genlikleri mm cinsinden sırasıyla 5,15, 10,30, 15,45, 20,60, 30,90, 41,20, 51,50, 61,80 dir. Yeni oluşturulan yerdeğiştirme protokolüne ait grafik görünümü Şekil 3.58'de verilmiştir.



Şekil 3.58: Çelik ceket öncesi deneylerin yükleme protokolü.

Deneylerde test düzeneğinde ve deney numunesinin farklı noktalarından yerdeğiştirme değerleri okunmuştur. STMM'lerin sigorta elemanlarından, ana manşonlarından ve kayma levhalarından şekildeğiştirme okumaları toplanmıştır. Elde edilen veriler çeşitli hesaplamalar yapılarak yerdeğiştirme, açısal dönme, kuvvet, moment, şekildeğiştirme ve sönümlenmiş enerji büyüklüklerine dönüştürülmüştür. Değerler aracılığıyla numuneler arasında karşılaştırmalar yapılarak çelik ceket kullanılmamış deney numunelerindeki mekanik plastik mafsalların davranış özellikleri ile ilgili karşılaştırmalar yapılabilmiştir.

3.2.1.2.3 1 nolu çelik ceket öncesi deneyi

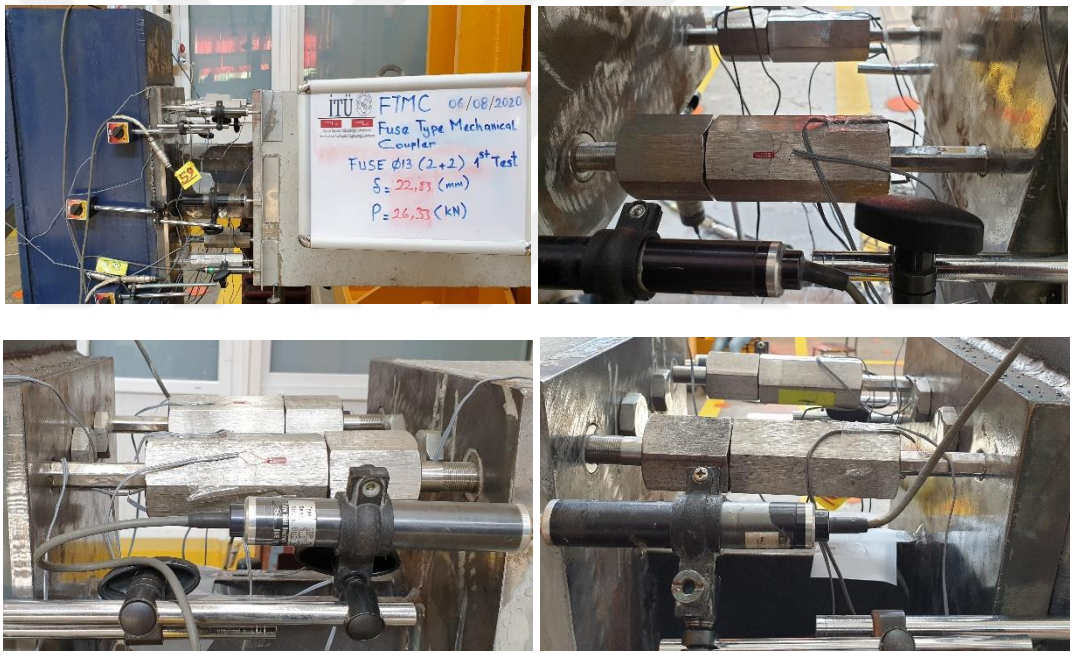
Çelik ceket öncesi yapılan ve Protototip #2 kullanılan ilk kiriş kolon bağlantı deneyidir. Deney düzeneğinde kullanılan kirişin donatı düzeni üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Üst donatılara 42 mm manşon çapına sahip prototip #2 STMM'lerden 2 adet bağlanmıştır. Alt sıradaki donatılara da 42 mm manşon çapına sahip prototip #2 STMM'lerden 2 adet bağlanmıştır. Hem STMM'lerin sigorta elemanlarına hem de manşonlara kalıcı şekildeğiştirmelerin takibi için gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Ayrıca kayma levhalarına da yerleştirilen gerinim ölçerler ile deneyler süresince kayma levhalarının elastik sınırlar içinde kaldığı takip altına alınmıştır. Şekil 3.59'da 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi ve birleşim bölgesi verilmiştir.



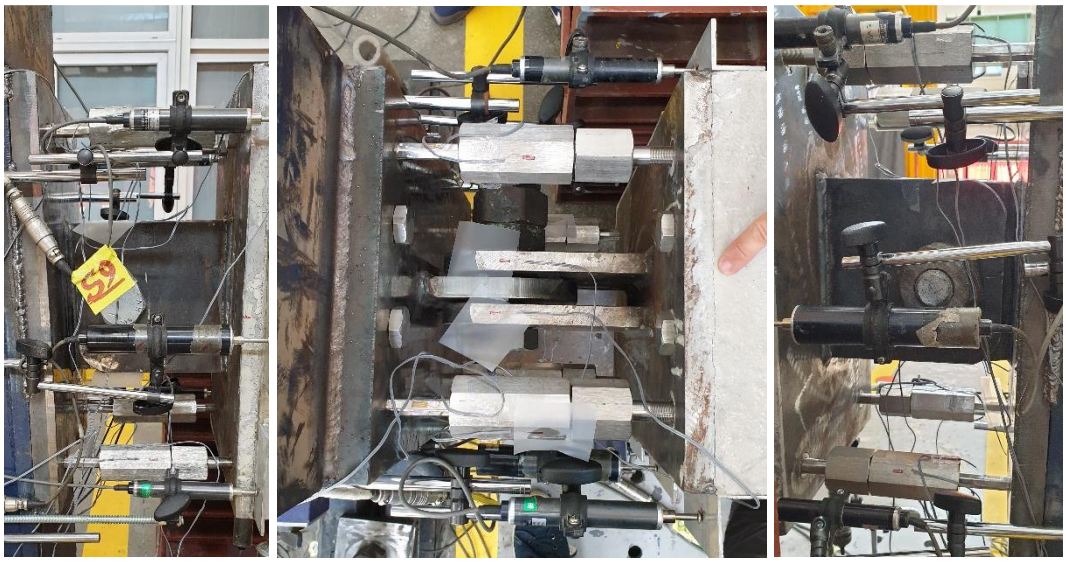
Şekil 3.59: 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve

sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 22,8 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma başlangıcı görülmüştür (Şekil 3.60). Beton üstünde çatlak oluşmadığı, STMM'lerin sigorta elemanlarında ve manşonlarda bulunan şekildeğiştirme ölçerlerde ise akma değerine ulaşılmadığı görülmüştür. Fakat alt sırada bulunan STMM'lerde bağlantı aparat sisteminin tamamına hakim burkulma başlangıcı görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda ve STMM'lerde burkulma başlangıcı gözlenmiştir.



Şekil 3.60: 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.



Şekil 3.60 (devam): 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 34,2mm olduğu aşamada STMM elemanlardaki burkulma düzeyleri artmış, STMM'lerdeki geometrik bozulmanın yansıması sonucunda kirişte düzleme dik doğrultuda açısal dönme meydana gelmiştir. Sigorta elemanlarda bulunan gerinim ölçerlerden okunan anlık veriler de bu elemanların kalıcı şekildeğiştirme yaptıklarını ispatlamaktadır. Kiriş yüzeyinde ise deney süresince çatlak oluşmamıştır. Alın levhası ile beton yüzeyi arasındaki açıklıkta da artış görülmemiştir (Şekil 3.61).



Şekil 3.61: 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün % 2,5 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 57,0 mm yerdeğiştirme adımı sırasında alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanları, oluşan burkulmaların da tetiklemesi sonucu kuvvet taşıma kapasitesine ulaşmış ve kopmuştur. Mekanik plastik mafsalda taşıma kapasitesi yaklaşık yarı yarıya düşmüş, deney sonlandırılmıştır. Deney sonunda yapılan incelemelerde hem üst sırada hem de alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında büyük burkulmalar olduğu tespit edilmiştir. Kiriş bloğunun yüzeylerinde ise çatlakların oluşmadığı, alın levhası ile kiriş arasındaki açıklığın oluştuğu andan sonra genişlemediği görülmüştür. Ayırca STMM'lerin manşonlarında kalıcı şekildeğiştirmelerin oluşmamıştır. Gerinim ölçer kayıtlarından elde edilen verilerde küçük değerler meydana gelmiştir. Sigorta elemanlarda meydana gelen yanal burkulmalar nedeniyle kiriş, yükleme düzlemine dik doğrultuda açısal dönme gerçekleştirmiştir. Deney sonuna ait görseller, elemanlarda oluşan hasarlar ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.62'de verilmiştir.

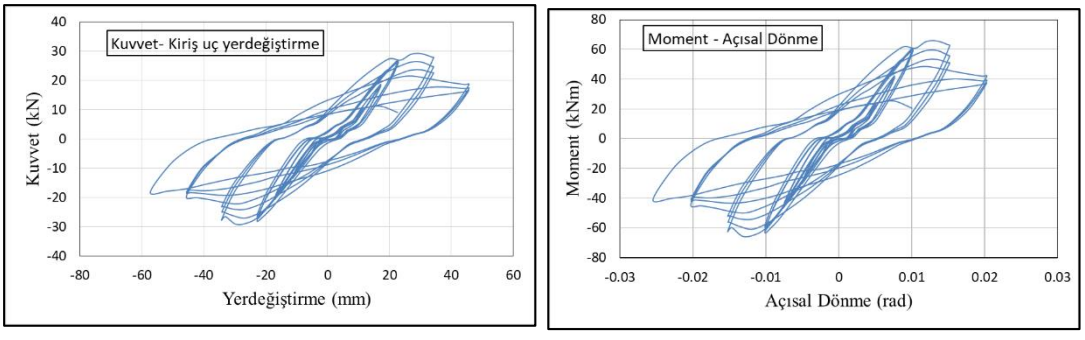


Şekil 3.62: 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.

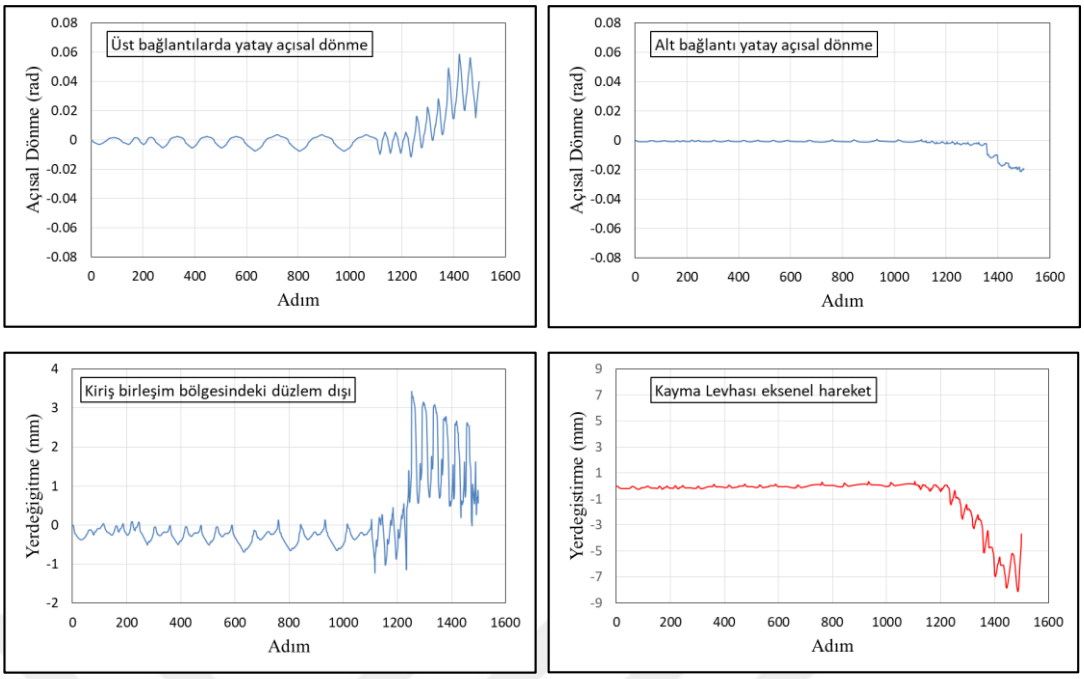


Şekil 3.62 (devam): 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.

Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma levhalarını birleştiren milin eksenel doğrultudaki hareketi de kayıt altına alınmış; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.63).

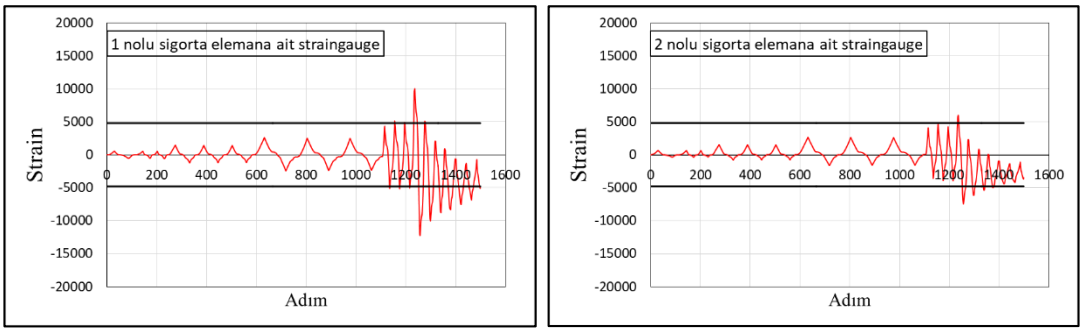


Şekil 3.63: 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi - karşılıklı etki diyagramları.

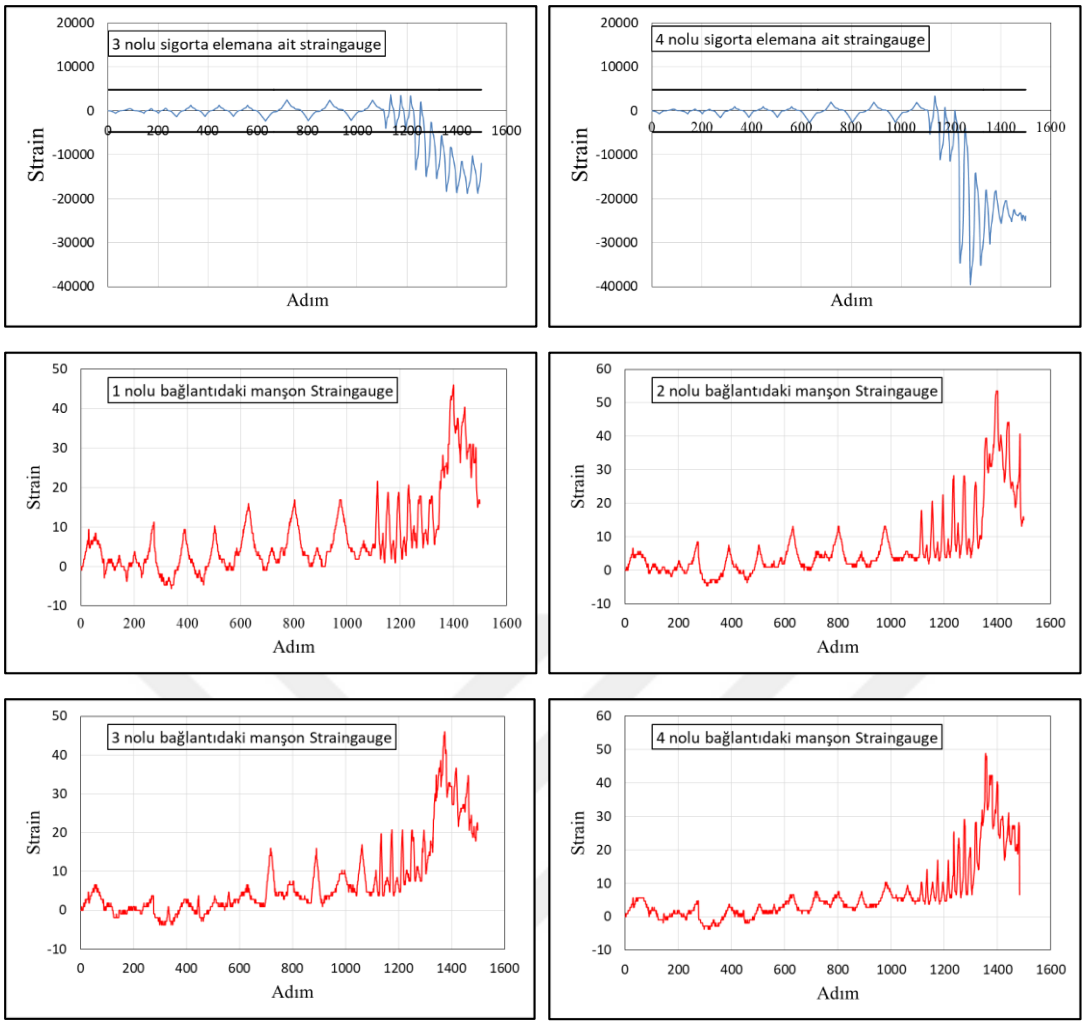


Şekil 3.63 (devam): 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi - karşılıklı etki diyagramları.

Deney öncesinde manşonlara ve sigorta elemanlara yerleştirilen gerinim ölçerlerden deney süresince kayıt alınmıştır. Meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.64'te verilmektedir. Grafik sonuçları manşonlardaki gerilmelerin elastik sınırlar içerisinde kaldığını, sigorta elemanlardaki gerilmelerin ise burkulmaların meydana geldiği çevrimlerde elastik sınırların ötesine geçtiğini göstermektedir.



Şekil 3.64: 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.64 (devam): 1 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.1.2.4 2 nolu çelik ceket öncesi deneyi

Çelik ceket öncesi yapılan 2 nolu kiriş kolon bağlantı deneyinde STMM sayısı 5 adet olarak düzenlenmiştir. Kirişin donatı düzeni üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 olmasına rağmen üst donatılardan 3 tanesi 42 mm manşon çapına sahip prototip #2 STMM'ler ile bağlanmıştır. Alt sıradaki 2 donatı da üst donatılar gibi 42 mm manşon çapına sahip protitip #2 STMM'ler ile bağlanmıştır. STMM'lerin sigorta elemanlarına şekildeğiştirmelerin takibi için gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. 1 nolu deney sırasında manşonlarda kalıcı şekildeğiştirmelerin olmadığı tespit edildiği için bu deneyde ve bundan sonraki deneylerde gerinim ölçer kullanılmamıştır.

Şekil 3.65'te 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi ve birleşim bölgesi verilmiştir.



Şekil 3.65: 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 22,8 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında burkulma oluştuğu ve STMM'lerin doğrusallıktan uzaklaştıkları tespit edilmiştir (Şekil 3.66). Gerinim ölçerlerden okunan değerler de burkulmayı destekleyen sayılar vermiştir. Beton üstünde yapılan kontrollerde ise kılcal çatlaklara rastlanmamıştır. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda ve STMM'lerde burkulma başlangıcı gözlenmemiştir.



Şekil 3.66: 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 34,2mm olduğu aşamada alt sırada bulunan 2 adet STMM'de burkulma düzeyleri artmış, geometrik bozulmanın yansıması sonucunda düzleme dik doğrultuda açısal dönme meydana gelmiştir (Şekil 3.67). 1 nolu deneye kıyasla meydana gelen açısal dönmenin daha kontrollü olduğu görülmüştür. Üst sırada bulunan 3 adet STMM'de ve sigorta elemanlarda ise burkulma veya kalıcı eksenel uzama tespit edilmemiştir.



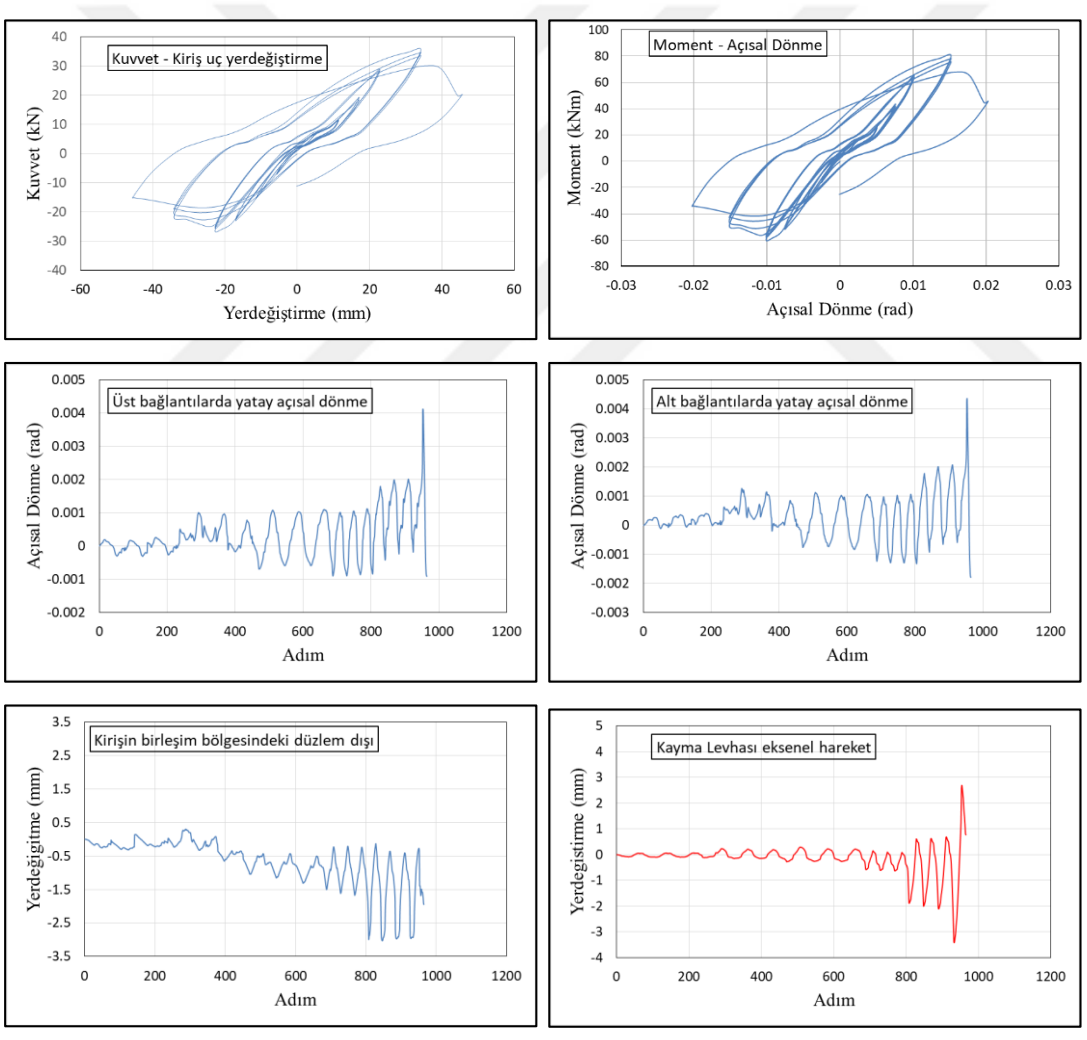
Şekil 3.67: 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün % 2,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 45,6 mm yerdeğiştirme adımı sırasında alt sırada bulunan STMM'lerden birine ait sigorta eleman kopmuştur. Erken aşamada meydana gelen bu kopma, oluşan burkulmalar sonucunda kirişin yatay açısal dönmesi ve üst sırada bulunan ve görece daha fazla kuvvet taşıma kapasitesi nedeniyle alt sırayı zorlayan STMM'ler nedeniyle oluşmuştur. Mekanik plastik mafsalda taşıma kapasitesi yaklaşık yarıya düşmüş, deney sonlandırılmıştır. Deney sonunda yapılan incelemelerde alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında büyük burkulmalar olduğu tespit edilmiştir. Üst sırada bulunan STMM'lerde ise burkulma gözlenmemiş; fakat uzamaya bağlı kesit incelmesi tespit edilmiştir. Kiriş bloğunun yüzeylerinde çatlakların oluşmadığı, alın levhası ile kiriş arasındaki açıklığın genişlemediği görülmüştür. Kiriş, yükleme düzlemine dik doğrultuda açısal dönme gerçekleştirmiştir. Buna rağmen kayma milinde eksenel doğrultuda kalıcı bir hareket gerçekleşmemiş, deney başlangıcındaki konumunun etrafında çevrimsel yerdeğiştirme şeklinde hareket etmiştir. Deney sonuna ait görseller, eleman hasarları ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.68'de verilmiştir.



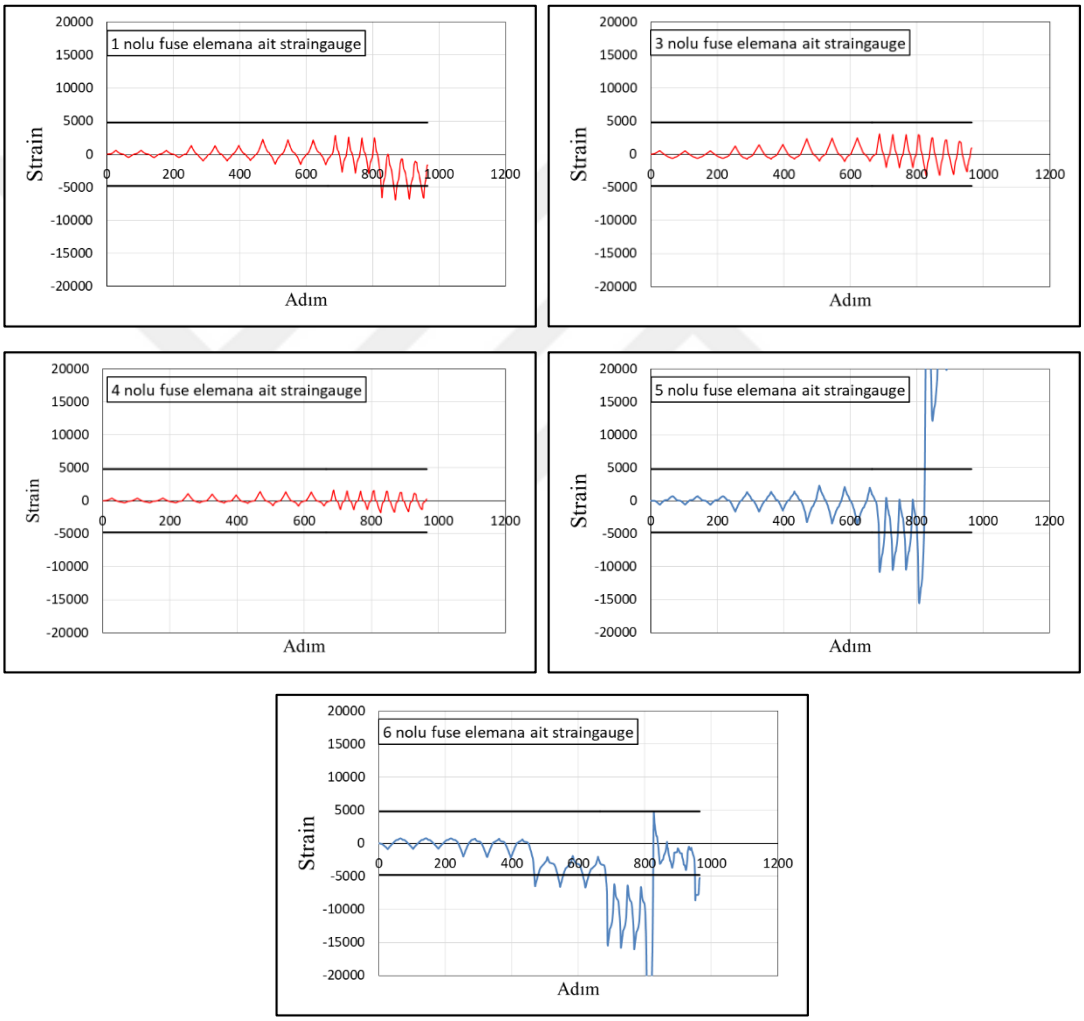
Şekil 3.68: 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.

Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsalda meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma levhalarını birleştiren milin eksenel doğrultudaki hareketi de kayıt altına alınmış; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.69).



Şekil 3.69: 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi - karşılıklı etki diyagramları.

Deney öncesinde sigorta elemanlara yerleştirilen gerinim ölçerlerden deney boyunca kayıt alınmıştır. Meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.70'te verilmiştir. Grafik sonuçları üst sıradaki sigorta elemanlarda gerilmelerin son çevrime kadar elastik sınırlar içerisinde kaldığını, alt sırada bulunan sigorta elemanlarda ise gerilmelerin, burkulmaların meydana geldiği çevrimler ile birlikte elastik sınırların ötesine geçtiğini göstermektedir.



Şekil 3.70: 2 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.1.2.5 3 nolu çelik ceket öncesi deneyi

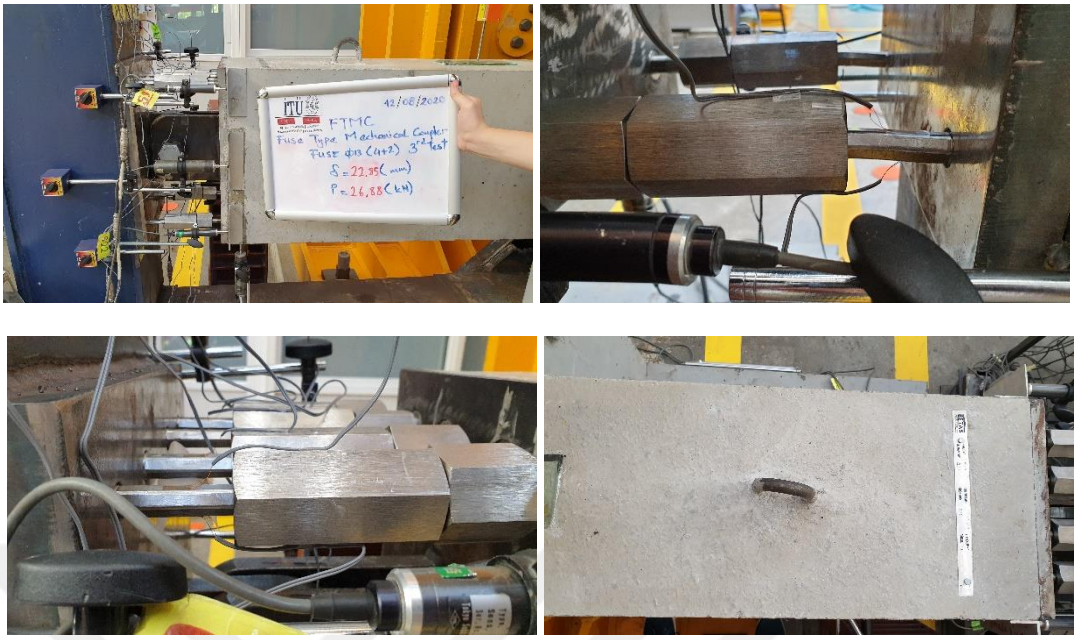
Çelik ceket öncesi yapılan 3 nolu kiriş kolon bağlantı deneyinde STMM sayısı 6 adet olarak düzenlenmiştir. Kirişin donatı düzeni olan üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 boyuna donatıların tamamı 42 mm manşon çapına sahip prototip #2 STMM'ler ile

bağlanmıştır. STMM'lerin sigorta elemanlarına şekildeğiştirmelerin takibi için gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Manşonlara ve kayma levhalarına ise herhangi bir ölçüm cihazı koyulmamıştır. 3 nolu deneye ait görseller Şekil 3.71'de mevcuttur.



Şekil 3.71: 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 22,8 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında burkulma oluştuğu ve STMM'lerin doğrusallıktan uzaklaştıkları tespit edilmiştir (Şekil 3.72). Gerinim ölçerlerden okunan değerler de burkulmayı destekleyen sayılar vermiştir. Beton üstünde yapılan kontrollerde ise kılcal çatlaklara rastlanmamıştır. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda ve STMM'lerde burkulma başlangıcı gözlenmemiştir.

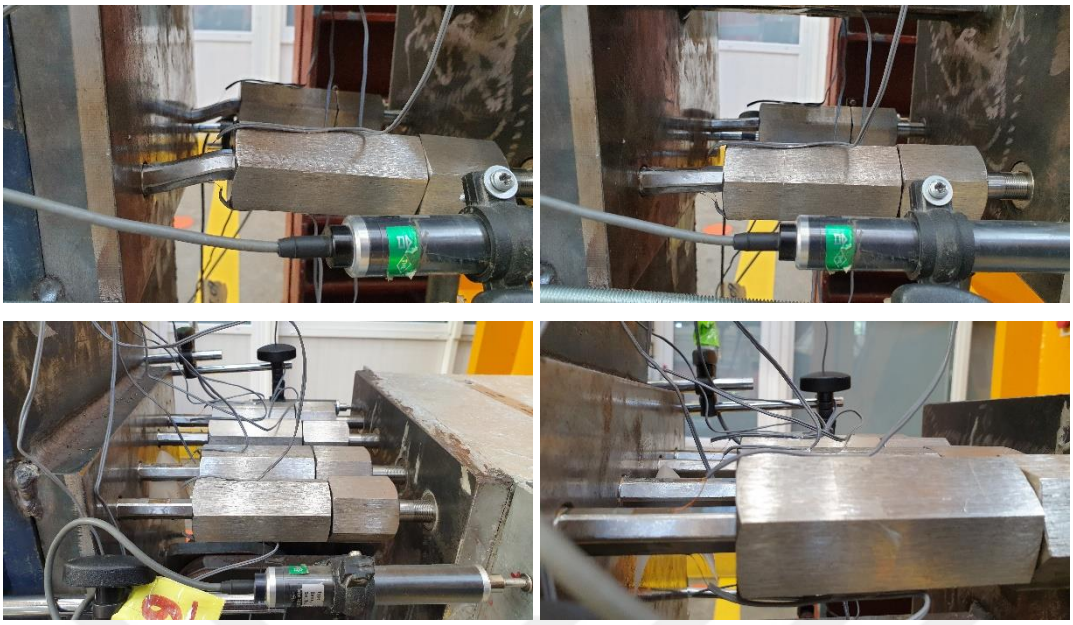


Şekil 3.72: 22,8mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 34,2mm olduğu aşamada alt sırada bulunan 2 adet STMM'de burkulma düzeyleri artmış, üst sırada bulunan sigorta elemanlarda ise eksenel doğrultuda kalıcı uzama veya burkulma davranışı görülmemiştir (Şekil 3.73). Üst sıradaki STMM'lerin elastik sınırlar içerisinde kalması, bir önceki deneylerde tecrübe edilen yatay açısal dönmenin oluşmamasına neden olmuştur. Momentin pozitif olduğu ve alt sıradaki sigorta elemanlarının çekme kuvveti etkisinde kaldığı durumda burkulmuş sigorta elemanların çekmeye bağlı düzeldiği tespit edilmiştir.



Şekil 3.73: 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.



Şekil 3.73 (devam): 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

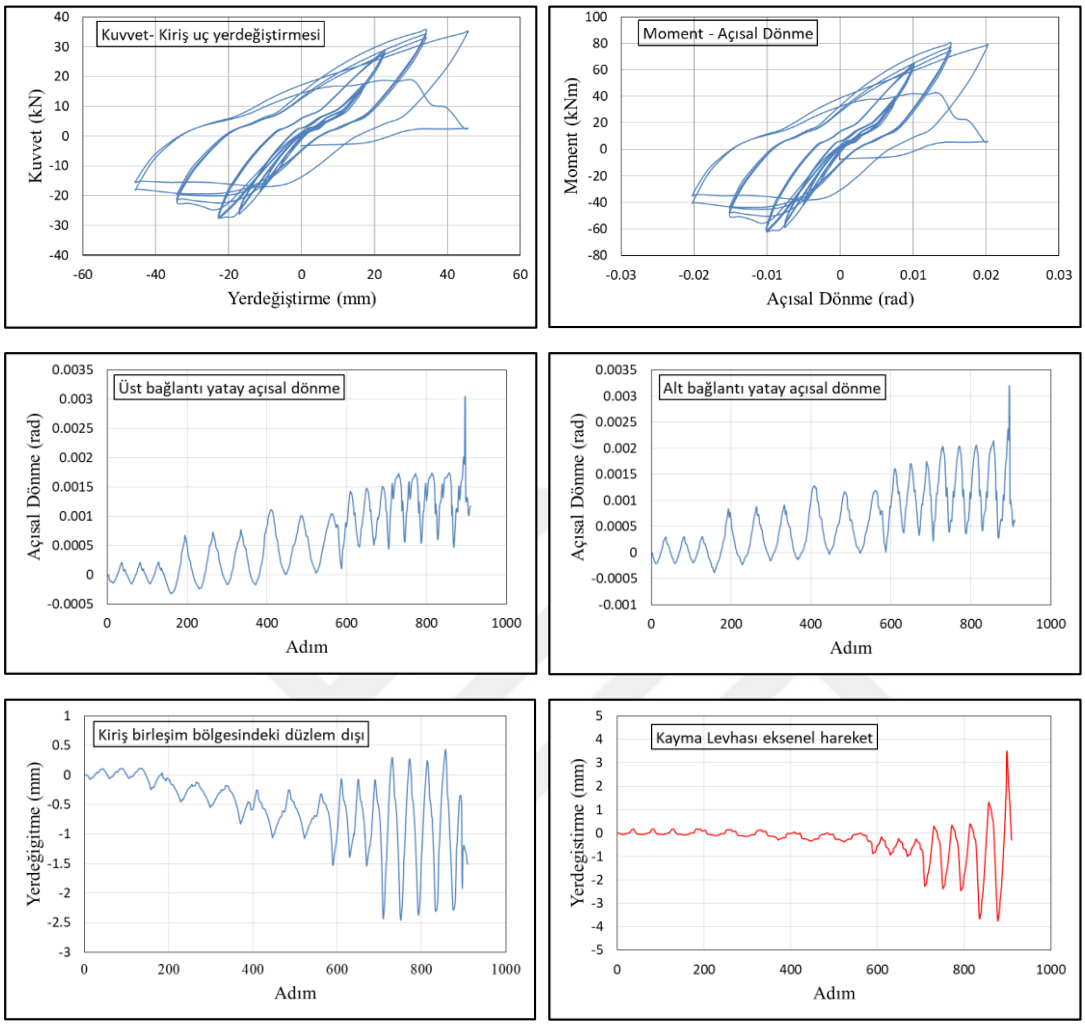
Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün % 2,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 45,6 mm yerdeğiştirme adımının 2. çevrimi sırasında alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanları kısa süre aralıklarla ard arda kopmuştur. Erken aşamada meydana gelen bu kopmanın sebebi, üst sırada bulunan 4 adet STMM'nin dayanım olarak alt sırada bulunan STMM'lerden çok daha fazla olmasıdır. Kuvvet denge denkleminde alt sıradaki sigorta eleman adedine paylaşılan eksenel kuvvet değerleri ileri mertebede burkulmalara ve sünmelere neden olmuş, sigorta elemanlar taşıma kapasitesine ulaşması sebebiyle hedeflenen yerdeğiştirme adımından önce kopmuşlardır. Mekanik plastik mafsalda taşıma kapasitesi önce yarıya düşmüş daha sonra ise kuvvet taşıma kapasitesini tamamen kaybetmiştir. Deney sonunda yapılan incelemelerde alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında meydana gelen kopmalar, burkulma sonucu kayma kuvvetlerinin yoğunlaştığı manşon başlangıcı ve kolon yüzeyi kesitlerinde meydana geldiği tespit edilmiştir. Üst sırada bulunan STMM'lerde ise burkulma ve kalıcı şekildeğiştirmeler görülmemiştir. Kiriş bloğunun yüzeylerinde çatlakların oluşmadığı, alın levhası ile kiriş arasındaki açıklığın genişlemediği görülmüştür. Kiriş, yükleme düzlemine dik doğrultuda açısal dönme neredeyse gerçekleştirmemiştir. Kayma milinde eksenel doğrultudaki hareket, alt sıradaki sigorta elemanların burkularak kısalması sonucu meydana gelmiştir. Deney sonuna ait görseller, elemanlarda oluşan hasarlar ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.74'te verilmiştir.



Şekil 3.74: 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.

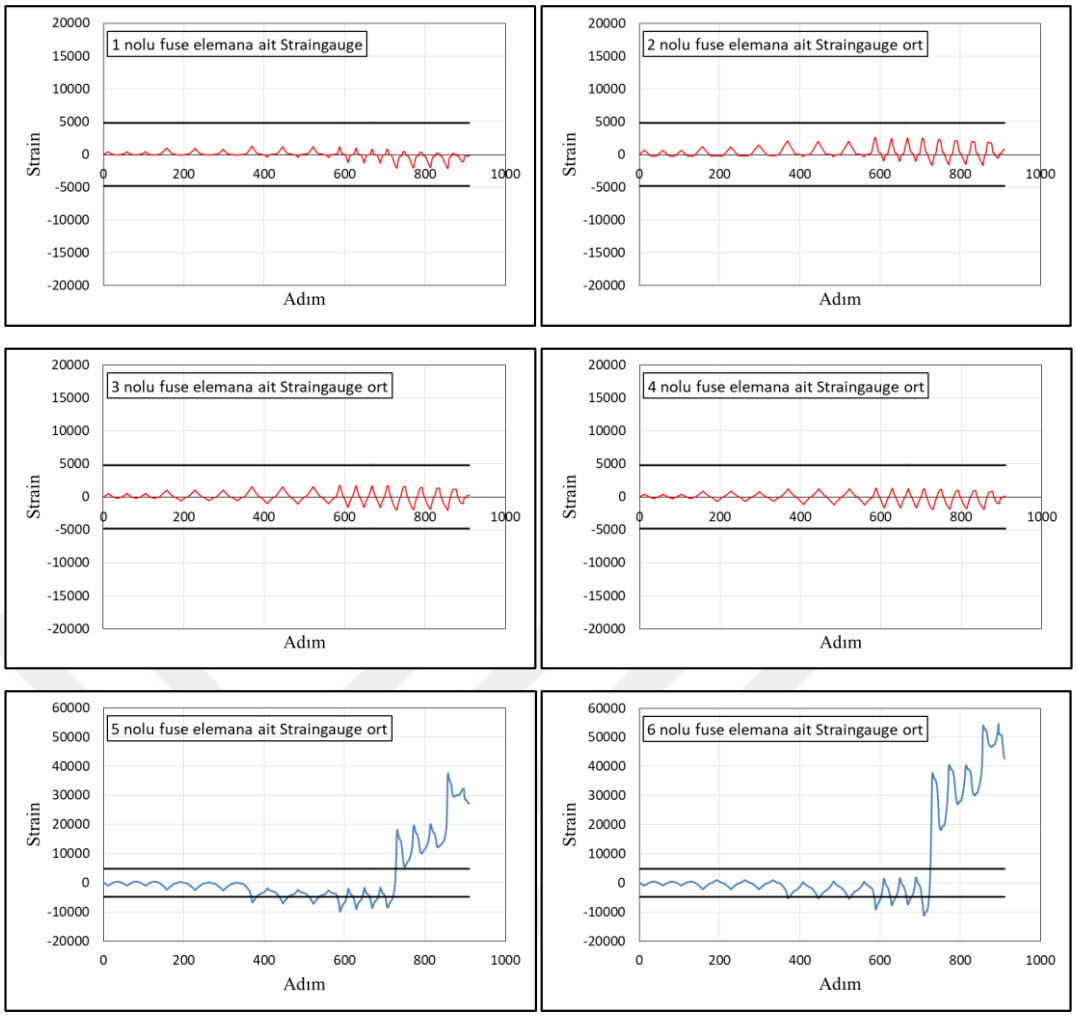
Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsalda meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma levhalarını birleştiren milin eksenel doğrultudaki hareketi de kayıt altına alınmış; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür.

Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.75).



Şekil 3.75: 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi - karşılıklı etki diyagramları.

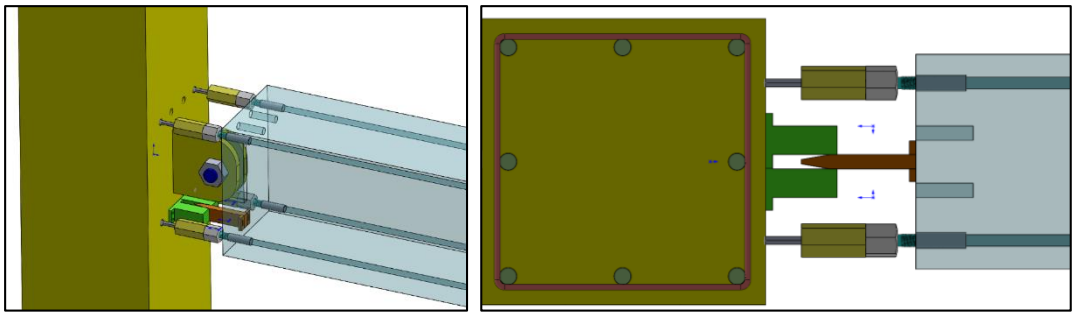
Deney öncesinde sigorta elemanlara yerleştirilen gerinim ölçerlerden deney devam ederken kayıtlar alınmıştır. Meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.76'da verilmiştir. Grafik sonuçları üst sıradaki sigorta elemanlarda gerilmelerin deney süresince elastik sınırlar içerisinde kaldığını, alt sırada bulunan sigorta elemanlarda ise gerilmelerin burkulmaların meydana geldiği çevrimler ile birlikte elastik sınırların çok ötesinde plastikleştiğini göstermektedir.



Şekil 3.76: 3 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

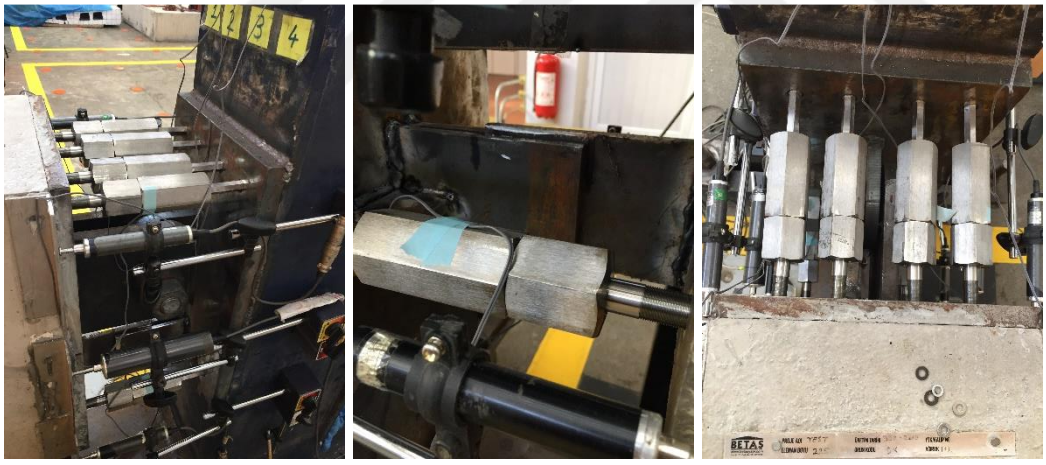
3.2.1.2.6 4 nolu çelik ceket öncesi deneyi

Çelik ceket öncesi yapılan 4 nolu kiriş kolon bağlantı deneyi, 3 nolu çelik ceket öncesi deneyinin revize edilmiş halidir. STMM sayısı yine 6 adet olarak düzenlenmiştir. Kirişin donatı düzeni ve bağlanan STMM sayısı 3 nolu deney ile aynıdır. Bu deneyde, 3 nolu deneye ek olarak, alt sırada bulunan STMM'lerin arasına üç adet 5mm kalınlığında sürtünme levhası yerleştirilmiştir. Çelik levhalar kaynak kullanılarak kiriş alın levhasına ve kolon yüzeyini temsil eden payanda alın levhasına montajlanmıştır. Kiriş alın levhasına bir adet, payanda alın levhasına ise iki adet yerleştirilen levhalar iç içe geçmişlerdir (Şekil 3.77).



Şekil 3.77: 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testine ait taslak görseli.

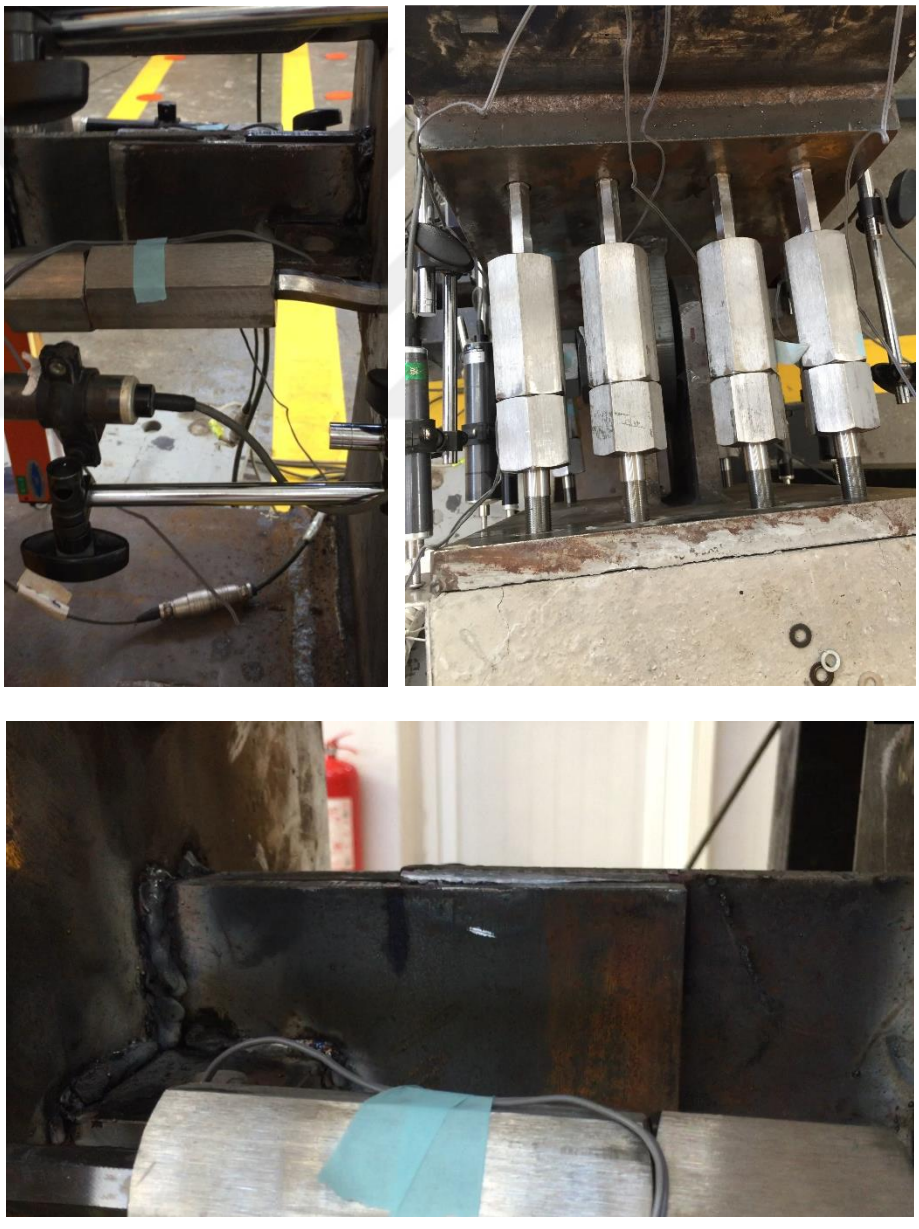
Yerleştirilen üç adet levha ile üst sırada 4 adet ve alt sırada 2 adet olarak yerleştirilen STMM düzeni sırasında alt sırada bulunan STMM'lere ait sigorta elemanlarda meydana gelmekte olan burkulmanın geciktirilmesi amaçlanmıştır. Deney düzeneğine eklenen sürtünme levhalarının alt sırada bulunan sigorta elemanlarına katkısını takip edebilmek için gerinim ölçerler yerleştirilmiştir. Üst sırada bulunan sigorta elemanlara, manşonlara ve kayma levhalarına ise herhangi bir ölçüm cihazı koyulmamıştır. Yapılan eklentiler ile birlikte 4 nolu deneye ait görseller Şekil 3.78'de verilmiştir.



Şekil 3.78: 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi.

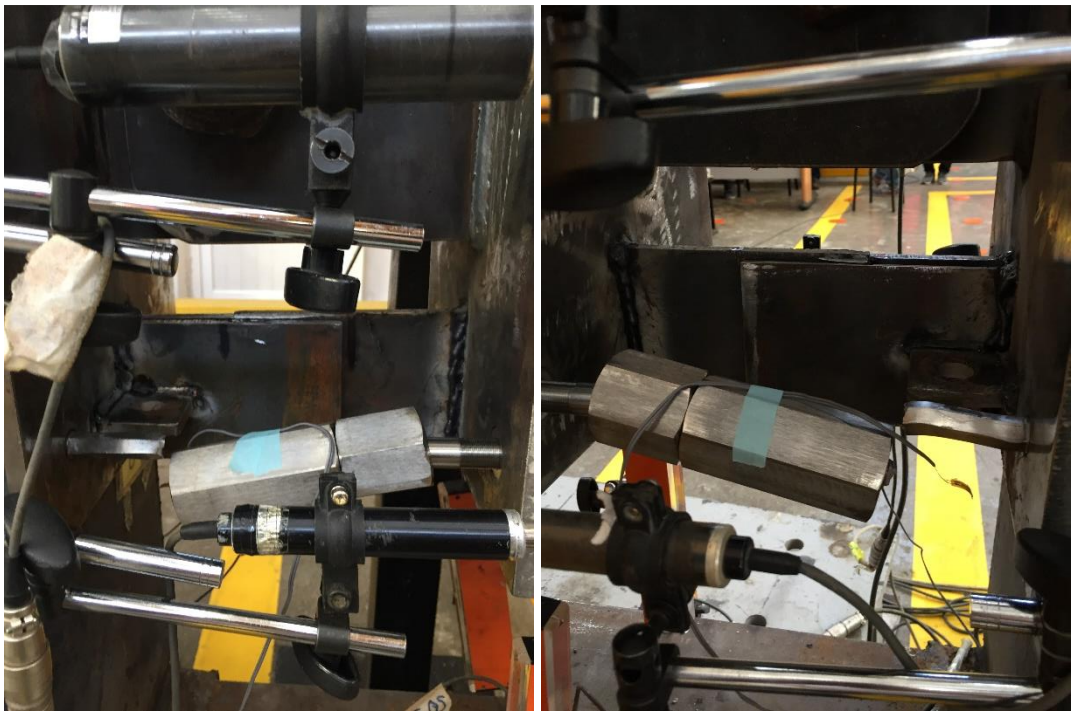
Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 22,8 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde önceki deneylerde meydana gelen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisindeki doğrusallıktan uzaklaşma bu test sırasında tespit edilmemiştir. Sisteme eklenen sürtünme levhalarının amaçlandığı gibi sigorta elemanlarında burkulmayı geciktirdiği görülmüştür. Buna karşın 34,2 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde sigorta elemanlarında

önlenmeye çalışılan burkulma alt sırada bulunan STMM'lerde gerçekleşmiştir (Şekil 3.79). Gerinim ölçerlerden okunan değerler de sigorta elemanlardan birine ait burkulmayı kayıt altına almaktadır. Beton üstünde yapılan kontrollerde kılcal çatlaklara rastlanmamıştır. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda ve STMM'lerde burkulma başlangıcı gözlenmemiş, gerinim ölçer kayıtlarında okunan değerlerde elastik sınırların içerisinde olduğu görülmüştür. Sisteme eklenen çelik levhalar kontrol edildiğinde ise eksenel doğrultuda bir hareket yerine düşey doğrultuda bir hareketten söz etmek daha mümkündür. STMM çalışma doğrultusu boyunca zorlanma hareketi dikte ettirilememiştir. Bu durum orta levhanın üstünde sürtünmeye bağlı ezilmeler oluşmasına neden olmuştur.



Şekil 3.79: 34,2mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün % 2,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 45,6 mm yerdeğiştirme adımının 2. çevrimi sırasında alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanları kısa süre aralıklarla ard arda kopmuştur. Burkulmaların gecikmesi için yerleştirilen çelik levhalara rağmen sigorta elemanların burkulmasının önüne geçilememiş ve kuvvet taşıma kapasitelerine ulaşarak hedeflenen yerdeğiştirme adımından çok daha önce kopmuşlardır. Erken aşamada meydana gelen bu kopmanın nedenlerinden biri de üst sırada bulunan 4 adet STMM'nin dayanım olarak alt sırada bulunan STMM'lerin çok üzerinde olmasındandır. Deney sonunda yapılan incelemelerde alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında meydana gelen kopmalar, burkulma sonucu kayma kuvvetlerinin yoğunlaştığı manşon başlangıcında meydana geldiği tespit edilmiştir. Üst sırada bulunan STMM'lerde ise burkulma ve kalıcı şekildeğiştirmeler görülmemiştir. Kiriş bloğunun yüzeylerinde çatlakların oluşmadığı, alın levhası ile kiriş arasındaki açıklığın genişlemediği görülmüştür. Kiriş, yükleme düzlemine dik doğrultuda açısal dönme neredeyse hiç gerçekleştirmemiştir. Kayma milinde eksenel doğrultudaki hareket, alt sıradaki sigorta elemanların burkulması sebebiyle az miktarda meydana gelmiştir. Deney sonuna ait görseller, elemanlarda oluşan hasarlar ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.80'de verilmiştir.

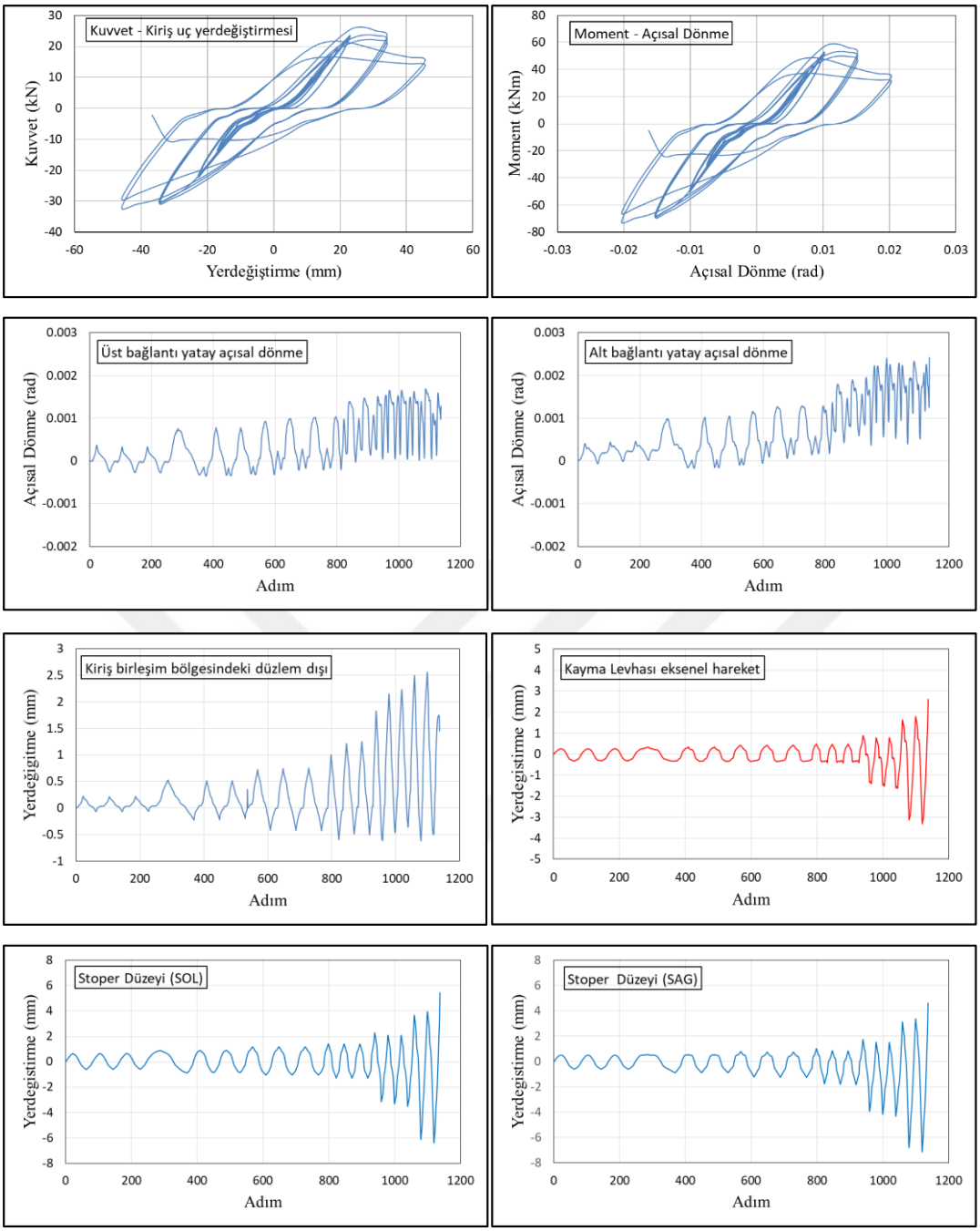


Şekil 3.80: 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.



Şekil 3.80 (devam): 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantısı test sonu görselleri.

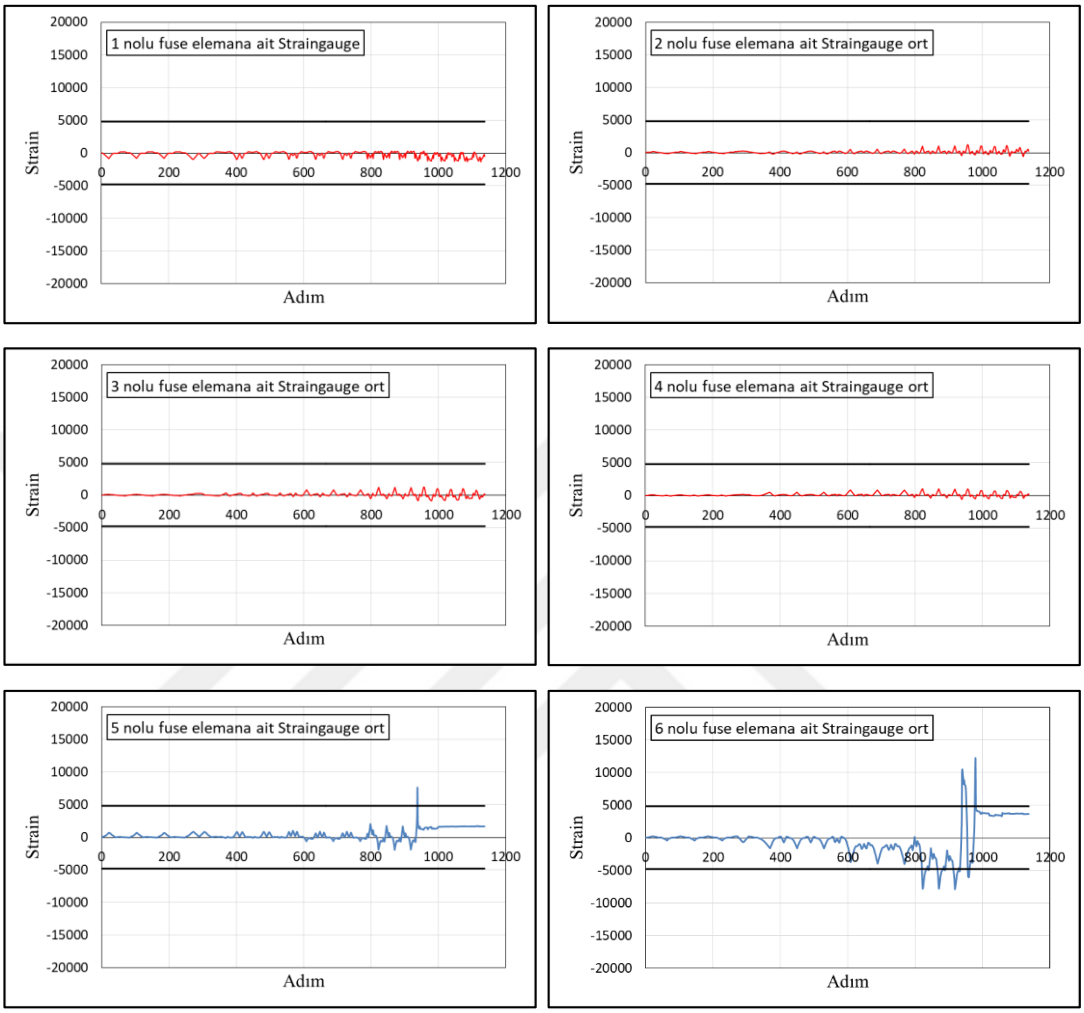
Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları yapılmıştır. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsalda meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler hesaplanmıştır. Ayrıca kayma levhalarını birleştiren mil ve burkulmayı engellemesi için eklenen çelik levhalar düzeyindeki eksenel doğrultudaki hareketler de kayıt altına alınmıştır. Kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketlere ait yerdeğiştirme değerleri de ölçülen diğer büyüklüklerdir. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.81).



Şekil 3.81: 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi - karşılıklı etki diyagramları.

Deney öncesinde sigorta elemanlara yerleştirilen gerinim ölçerlerden deney süresince kayıt alınmıştır. Meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.82'de verilmiştir. Grafik sonuçları üst sıradaki sigorta elemanlarda gerilmelerin deney süresince elastik sınırlar içerisinde kaldığını, alt sırada bulunan sigorta elemanlarda ise gerilmelerin burkulmaların meydana geldiği çevrimler ile birlikte elastik sınırların ötesine geçtiğini

göstermektedir. Deney sırasında alt sıradaki gerinim ölçerlerin paslanmaz çelik yüzeylerden ayrılması neticesinde deneyin ilerleyen aşamalarında alınan verilerin anlamlı olmadığı da tespit edilmiştir.

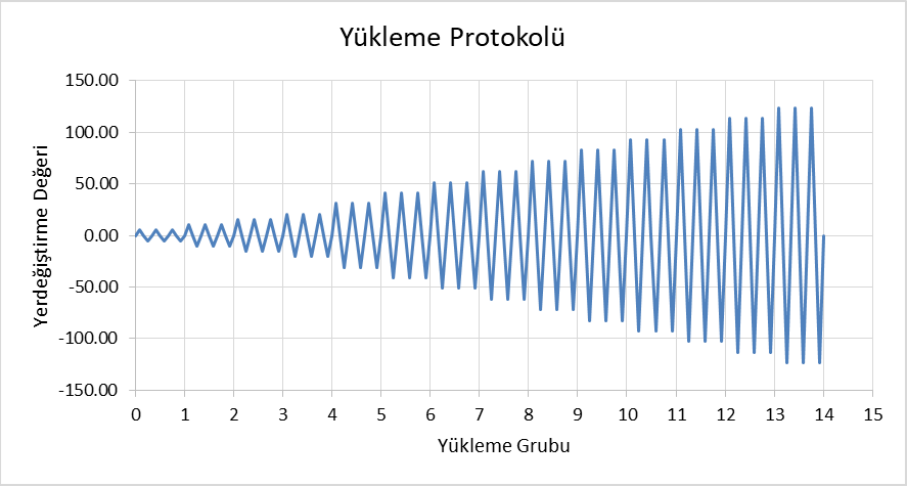


Şekil 3.82: 4 nolu çelik ceket öncesi kiriş kolon bağlantı testi STMM şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.2 Çelik ceket kullanılan deneyler

STMM alt bileşenlerinden sigorta elemanların burkulmasını engellenmek veya geciktirilmek için St37 kalitesindeki çelikten imal edilmiş 60mm × 60mm × 200mm boyutlara sahip çelik ceketlerin kullanımının efektif olduğu STMM deneylerinde elde edilen sonuçlarla kanıtlanmıştı. Çelik ceketli STMM'ler kullanarak 2 x 2 ve 4 x 2 donatı düzenine sahip kiriş elemanladan oluşan deneyler planlanmıştır. Farklı STMM ve çelik ceket düzenine sahip deney numuneleri üzerinde gerçekleştirilen testlerde elde edilen davranış farklılıkları irdelenmiştir.

Çelik ceket kullanılan tüm deneylerde aynı yükleme protokolü uygulanmıştır. Kiriş ucuna bağlanan hidrolik yük veren aracılığıyla artan genlikli tersinir tekrarlı yerdeğiştirmeler tatbik edilmiştir. Her genlik değeri mekanik plastik mafsalın farklı açısal dönme değerlerine karşı gelmektedir. Bunlar sırasıyla 0,25, 0,50, 0,75, 1,00, 1,50, 2,00, 2,50, 3,00, 3,50, 4,00, 4,50, 5,00 radyan değerleridir. Mekanik plastik mafsal ve hidrolik yük veren arasındaki kuvvet kolu 2,06 m dir. Kullanılan yerdeğiştirme genlikleri mm cinsinden sırasıyla 5,15, 10,30, 15,45, 20,60, 30,90, 41,20, 51,50, 61,80, 72,10, 82,40, 92,70, 103,00 dir. Deneyler sırasında her bir genlikte 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Yerdeğiştirme protokolü Şekil 3.83'de verilmiştir. Çevrim sayısının etkisinin irdelenmesi için bazı numunelerde her genlik birer kez tekrarlanmıştır.



Şekil 3.83: Çelik ceket kullanılan deneylerin yükleme protokolü.

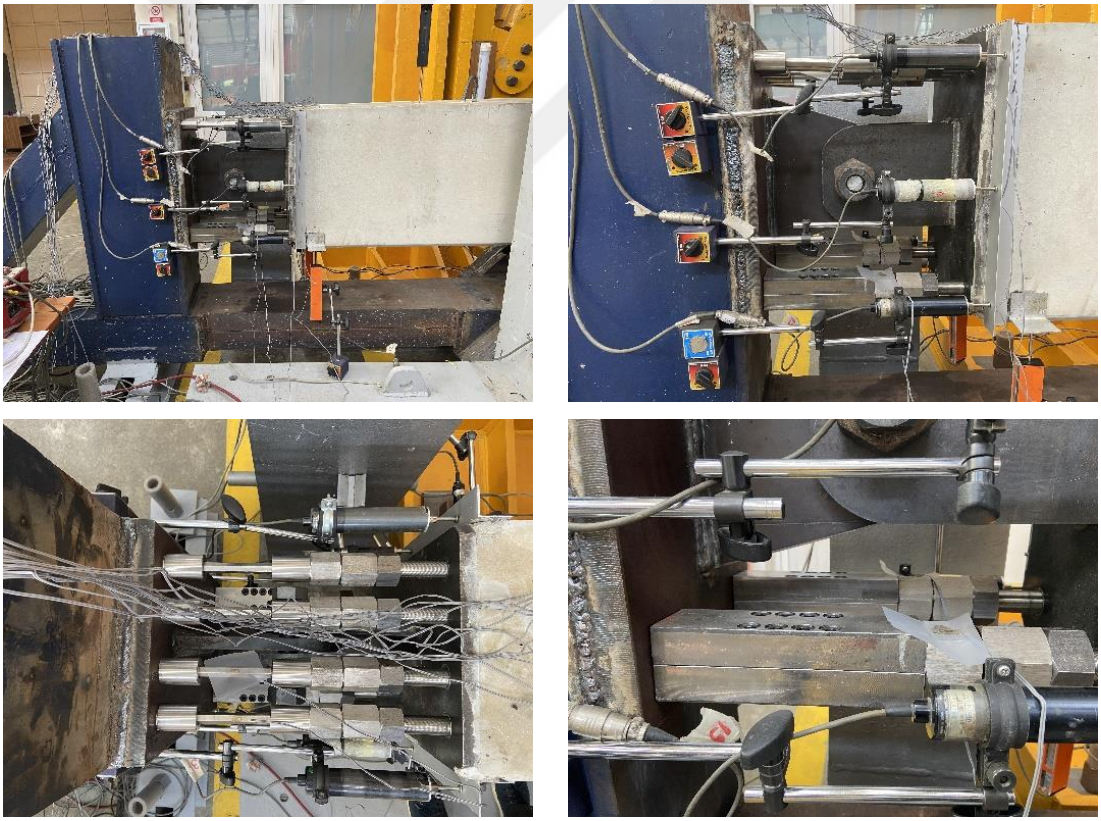
Deneylerde test düzeneğinden ve deney numunesinden yerdeğiştirme değerleri, kiriş donatılarından ve STMM'lerden de birim şekildeğiştirme değerleri okunmuştur. Elde edilen veriler çeşitli hesaplamalar yapılarak yerdeğiştirme, açısal dönme, kuvvet,

moment, şekildeğiştirme ve sönümlenmiş enerji büyüklüklerine dönüştürülmüştür. Değerler aracılığıyla numuneler arasında karşılaştırmalar yapılarak mekanik plastik mafsalların davranış karşılaştırması gerçekleştirilebilmiştir.

3.2.2.1. 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi

3.2.2.1.1 STMM düzeni ve oluşan hasar biçimi

Çelik ceket kullanılan 1 nolu numunede, kiriş boyuna donatı düzeni üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Üst donatılara 42 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve ceketsiz olarak montajları gerçekleştirilmiştir. Alt sıradaki donatılara ise 52 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve montaj tamamlanınca sigorta elemanlara çelik ceketler yerleştirilmiştir. STMM de sigorta eleman haricindeki elemanlarda kalıcı şekildeğiştirme oluşmadığının kanıtlanması için ek sekildeğiştirme ölçerler kullanılmıştır. Şekil 3.84'de 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi ve birleşim bölgesi verilmiştir.



Şekil 3.84: 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve

şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 20,6 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma oluştuğu, beton üstünde çatlak oluşmadığı, üst donatıları bağlayan STMM'lerin sigorta elemanlarında bulunan şekildeğiştirme ölçerlerde ise akma değerine ulaşılmadığı görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda burkulma başlangıcı, alt sırada bulunan STMM'lerde ise sigorta elemanların uzamasına bağlı çelik ceketin alın yüzeyinden ayrılması durumları gözlenmiştir (Şekil 3.85).



Şekil 3.85: 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 51,5mm olduğu aşamada kiriş üst yüzeyinde ve kiriş manşonlarının hizasında enine doğrultuda çatlak oluşmuş, ilerleyen adımlarda çatlak genişleyerek gömülü kiriş manşonlarının etrafında yoğunlaşmıştır.

Kiriş alt yüzeyinde ise deney süresince çatlak oluşmamış, sadece alın levhası ile beton yüzeyi arasındaki açıklık artmıştır (Şekil 3.86).



Şekil 3.86: Kiriş alt ve üst yüzeylerinden alınan görseller.

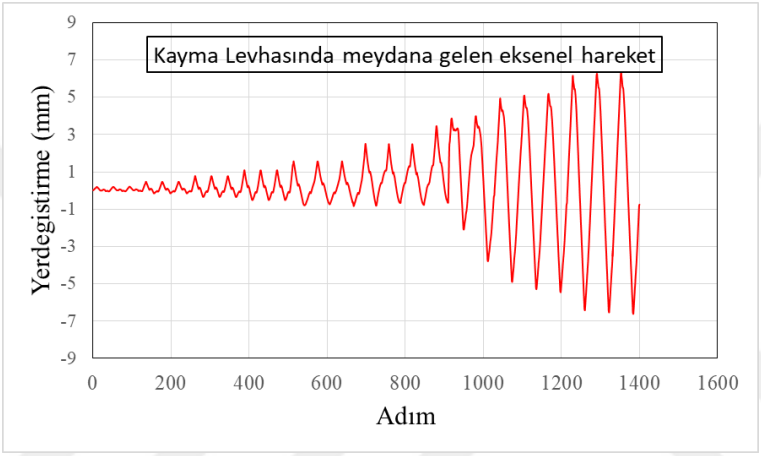
Çevrimsel yüklemeler sırasında kayma levhası ve kayma milinde de hem görsel hem de deney verisinde gözlemler yapılmıştır. Hidrolik yükverendeki yerdeğiştirme genlikleri arttıkça sigorta elemanlarda artan kalıcı şekildeğiştirmeler, uzamalar ve burkulmalar gözlenmiştir. Fakat kayma levhası ve kayma mili ekseninde yükleme yönüne ve genliğine paralel, simetrik bir yatay yerdeğiştirme kaydı elde edilmiştir. Üst sıradaki sigorta elemanlarda burkulmalar artarken alt sıradaki çelik yelekli STMM aparatlarında ise daha kontrollü kalıcı şekildeğiştirmelerin oluşması, kayma levhasının davranışına neden olan etken olmuştur (Şekil 3.87).



Negatif Moment hakim mod



Pozitif Moment hakim mod



Şekil 3.87: Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 4,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 82,4 mm yerdeğiştirme adımı sırasında alt sırada bulunan ceketli STMM'ler ilk çevrimsel yükleme sırasında taşıma kapasitesine ulaşmış ve kopmuşlardır. 2. ve 3. çevrimler tamamlanmış ve kuvvet taşıma kapasitesi kaybı kayıt altına alınmıştır. Deney sonunda üst sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında önemli ölçüde burkulma olduğu gözlenmiştir. Alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanları ise çelik yelekler içinde akordeon şeklinde buruşmuş, çelik yeleklerde sigorta elemanların yeleklerin iç yüzeyine dayanmasına bağlı olarak belli noktalarda hasarlar oluşmuştur. Deney sonunda yapılan incelemede, sigorta elemanların payanda sisteminde yer alan manşonlar içerisinde koptuğu tespit edilmiştir. Kiriş alın levhası ile beton arasındaki açıklığın arttığı görülmüştür. Deney sonuna ait görseller, elemanlarda oluşan hasarlar ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.88'de verilmiştir.

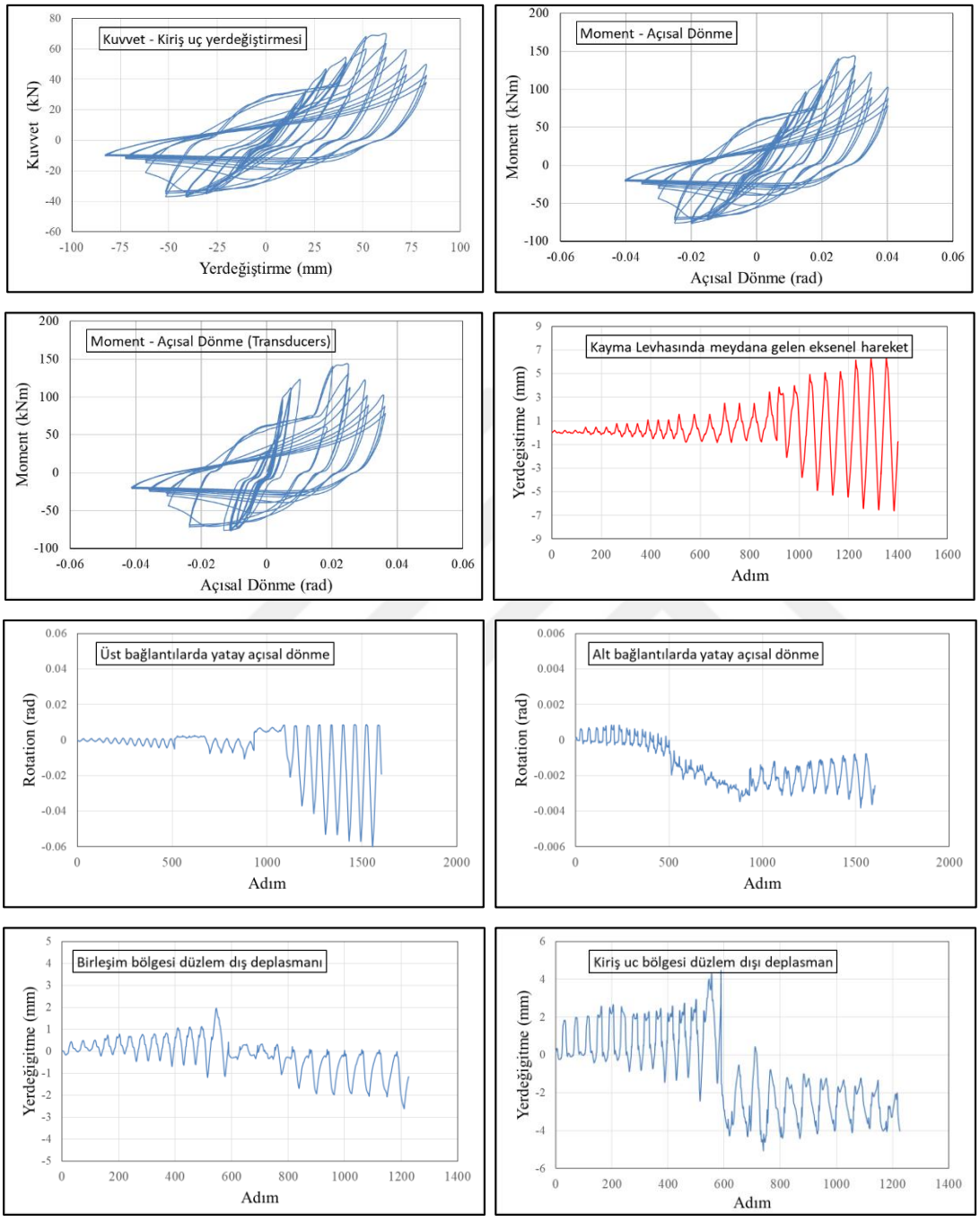


Şekil 3.88: 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

3.2.2.1.2 Aletsel büyüklükler

Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları elde edilmiştir. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca

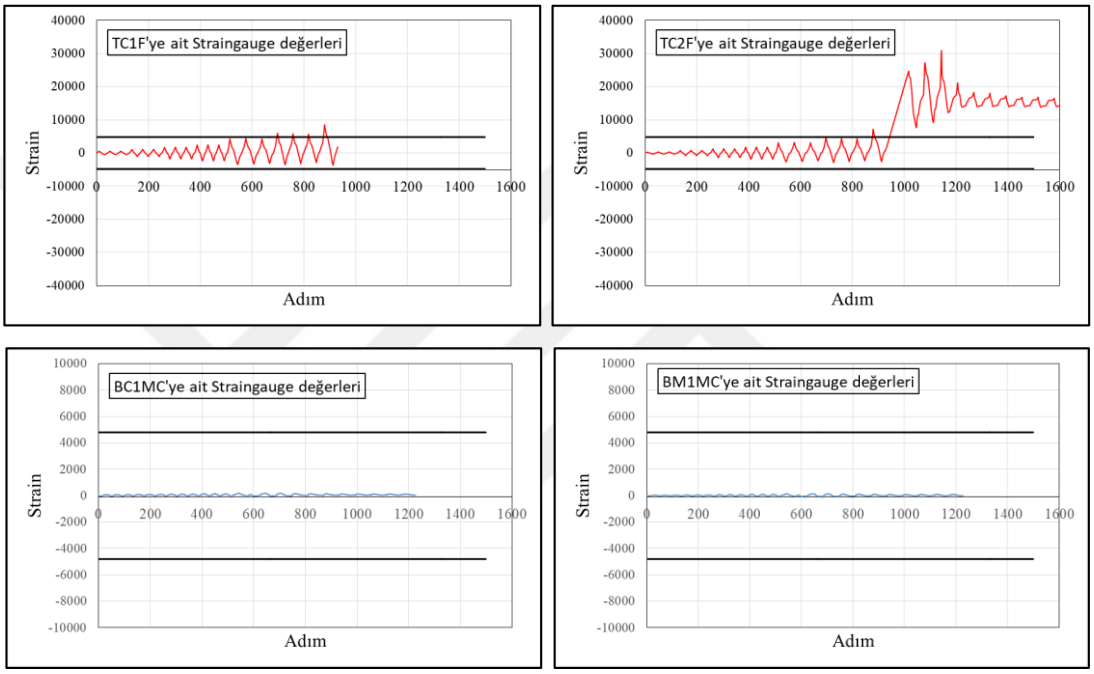
kayma mili ekseninden alınan ölçümlerle yatay yerdeğiştirme değerleri; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Elde edilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.89).



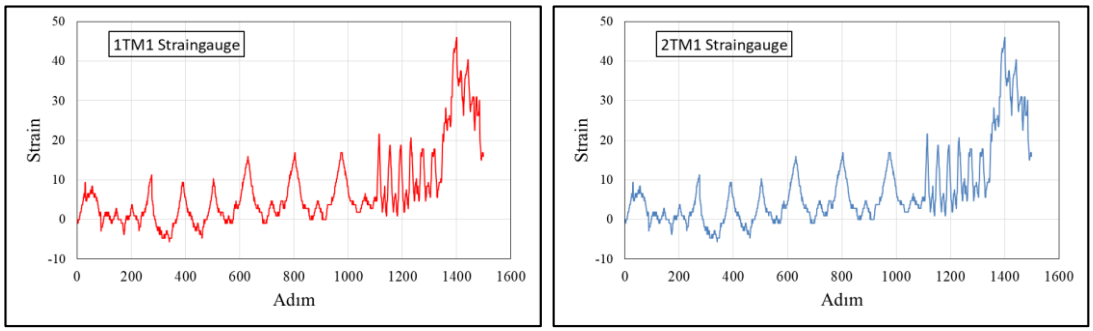
Şekil 3.89: 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

Kiriş numunesinin üretimi sırasında boyuna donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmış ve deney süresince donatıların şekildeğiştirme durumu kayıt altına alınmıştır. Deneyin hemen öncesinde STMM elemanlarına yapıştırılan şekildeğiştirme ölçerler ile sigorta elemanlar ve manşonlar takip edilmiştir. Donatılarda, manşonlarda

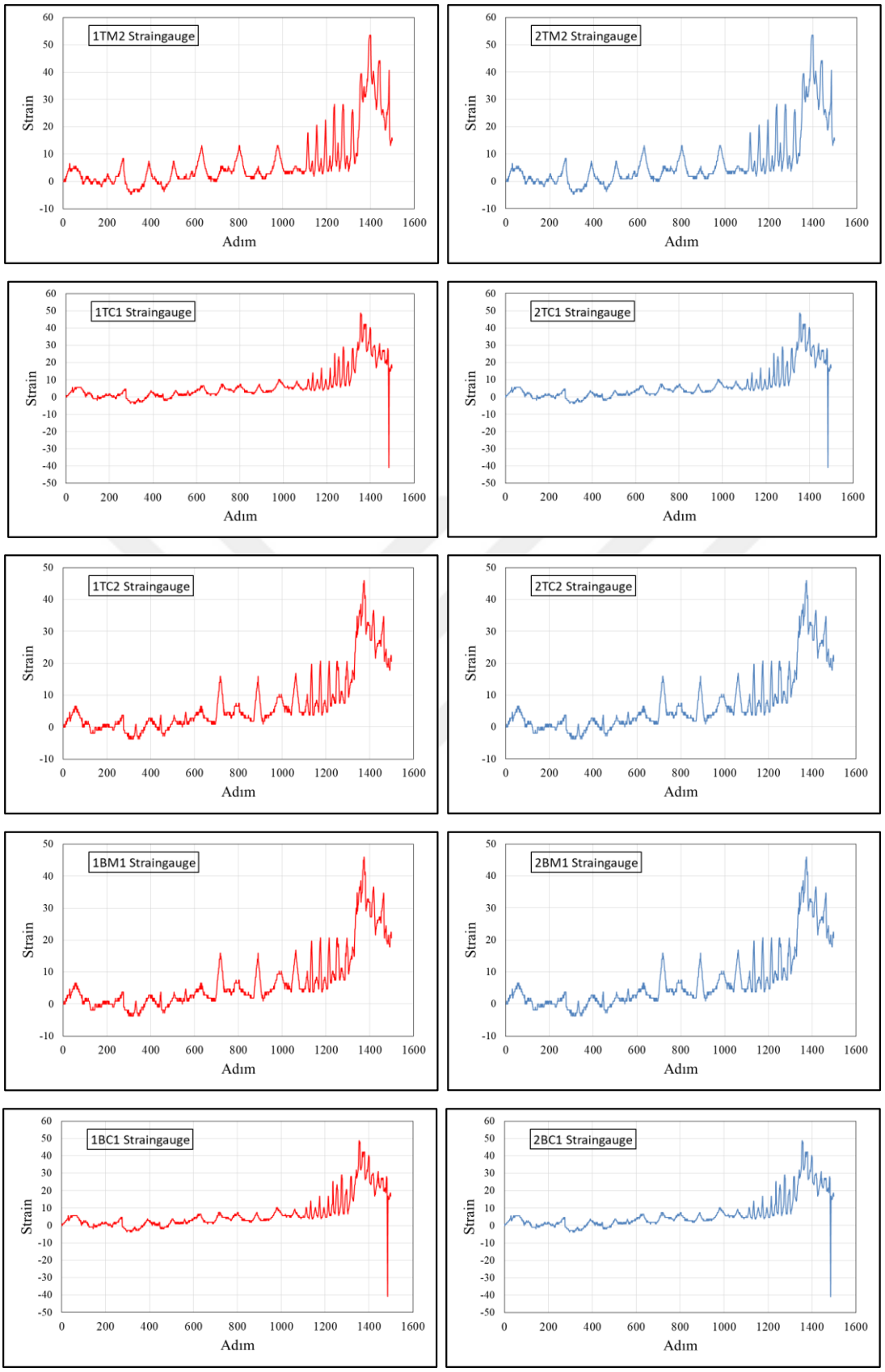
ve sigorta elemanlarda meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.90 ve Şekil 3.91'de verilmektedir. Grafik sonuçları göstermektedir ki kiriş boyuna donatılarındaki şekildeğiştirme değerleri elastik sınırlar içerisinde kalmıştır. STMM'lere ait manşonlarda da şekildeğiştirme değerleri çok küçük rakamlarda kalmıştır. Sigorta elemanlarında ise kalıcı şekildeğiştirme değerleri grafikler aracılığıyla teyit edilmiştir. TC1F şekildeğiştirme ölçeri hasar görsellerinden de görüldüğü gibi deney sırasında veri alınamaz hale gelmiştir.



Şekil 3.90: 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – STMM elemanlarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.91: 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

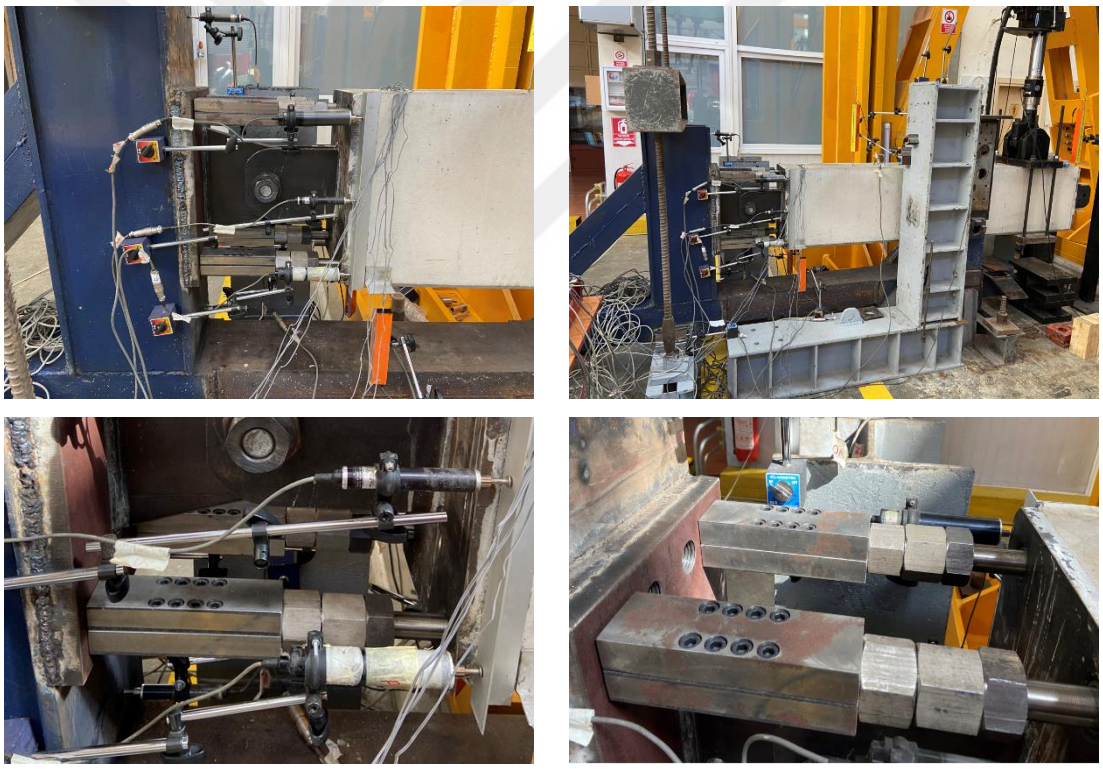


Şekil 3.91 (devam): 1 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.2.2. 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi

3.2.2.2.1 STMM düzeni ve oluşan hasar biçimi

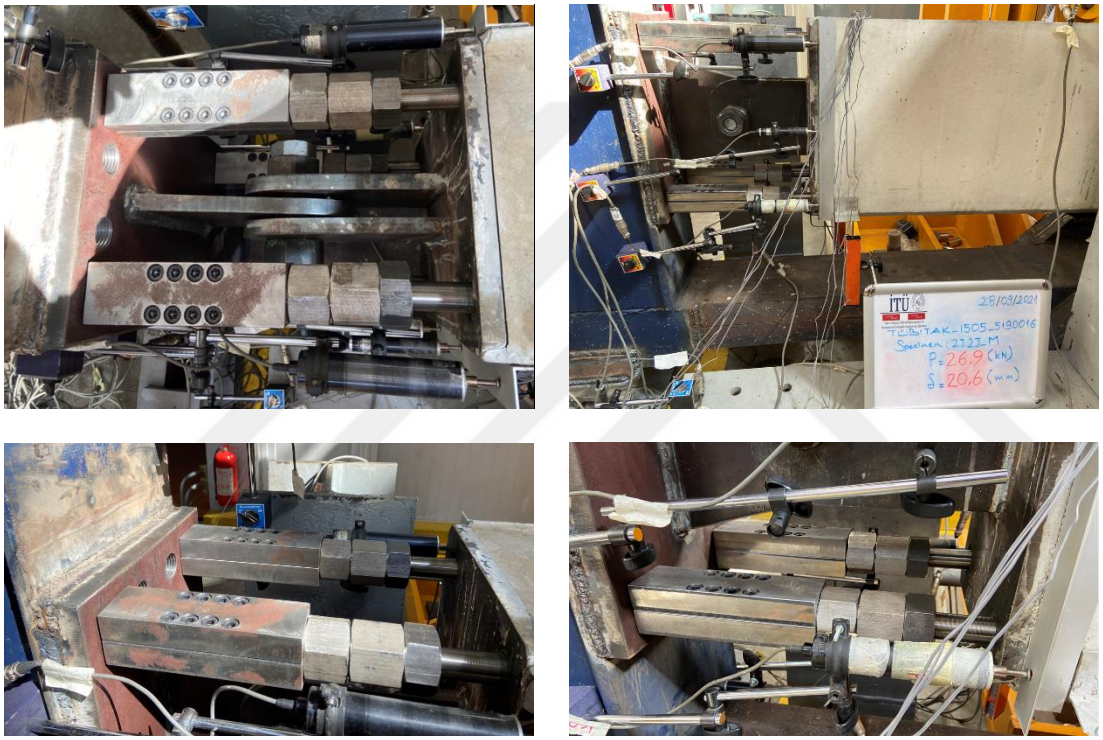
Çelik ceket kullanılan 2 nolu numunede, kiriş boyuna donatı düzeni üstte 2 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Hem üst donatılara hem de alt donatılara 52 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmıştır. Montaj tamamlanınca birleşim bölgesinde bulunan bütün sigorta elemanlara çelik ceketler yerleştirilmiştir. Çelik payanda sisteminde düşey hareket oluşmaması için ek önlem alınmıştır. Alın levhası taşıyan çelik profil üstüne ek bir kiriş yerleştirilmiş, döşemeye öngerme çubukları ile bağlanmıştır. STMM de sigorta eleman haricindeki elemanlarda kalıcı şekildeğiştirme oluşmadığı tespit edildiğinden ek sekildeğiştirme ölçerler kullanılmamıştır. 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi ve birleşim bölgesi Şekil 3.92'de görüldüğü gibi oluşmuştur.



Şekil 3.92: 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında her bir yerdeğiştirme genliğinde 3 çevrim gerçekleştirilmiştir. Her 3 çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 20,6 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın

doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma oluştuğu, beton üstünde çatlak oluşmadığı, üst sigorta elemanlarında kalıcı uzamanın sonucu çelik yelekler ile kolon levhası arasında açılma olduğu görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda kısalma ile birlikte levha ile beton arasındaki açıklığın kapandığı, alt sırada bulunan STMM'lerde ise sigorta elemanların uzamasına bağlı çelik ceketin alın yüzeyinden ve ana manşonlardan ayrılması durumları gözlenmiştir (Şekil 3.93).



Şekil 3.93: 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 30,9mm olduğu aşamada kiriş üst yüzeyinde ve kiriş manşonlarının etrafındaki bölgede enine ve boyuna doğrultuda çatlak oluşmuş, ilerleyen adımlarda çatlak genişleyerek büyümüştür. Kiriş alt yüzeyinde ise deney süresince çatlak oluşmamıştır. Alın levhası ile beton yüzeyi arasındaki açıklığın ise bu aşamada arttığı gözlenmiştir (Şekil 3.94).



Şekil 3.94: Kiriş alt ve üst yüzeylerinden alınan görseller.

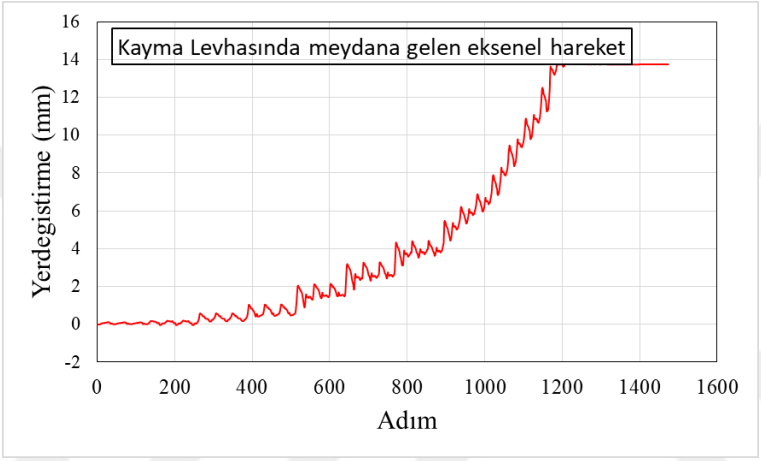
Çevrimsel yüklemeler sırasında kayma levhası ve kayma milinde de hem görsel hem de deney verisi üzerinden gözlemler yapılmıştır. Hidrolik yük verendeki yerdeğiştirme genlikleri arttıkça sigorta elemanlarda artan kalıcı şekildeğiştirmeler, uzamalar ve çelik yelekler ve manşonlar arasında ayrılmalar gözlemlenmiştir. Kayma levhası ve kayma mili ekseninde yapılan aletsel ölçümler ve görsel incelemeler mekanik plastik mafsalda yatay doğrultuda kalıcı hareket oluştuğunu göstermektedir. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki sigorta elemanların kontrollü kalıcı şekildeğiştirmeler gerçekleştirmesi, kayma levhasının davranışını tetikleyen neden olmaktadır (Şekil 3.95).



Negatif Moment hakim mod



Pozitif Moment hakim mod



Şekil 3.95: Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 5,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 103,0 mm yerdeğiştirme adımı sırasında üst sırada bulunan ceketli STMM'lerden bir tanesi, ilk çevrimsel yükleme sırasında taşıma kapasitesine ulaşmış ve kopmuştur. Mekanik plastik mafsalda taşıma kapasitesi yaklaşık yarıya düşmüş, 2. ve 3. çevrimlere devam edilmiştir. 3. çevrim sırasında üst sırada bulunan ikinci STMM de kapasitesine ulaşarak kopmuş ve kuvvet taşıma kapasitesi tamamen kaybedilmiştir. Deney sonunda üst sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında ceket yüzeyinin izin verdiği ölçüde büyük buruşmalar olduğu tespit edilmiştir. Alt sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında da benzer davranış görülmüş; fakat kopma durumu meydana gelmemiştir. Çelik yeleklerde sigorta elemanların yeleklerin iç yüzeyine dayanmasına bağlı olarak belli noktalarda hasarlar oluşmuştur. Deney sonunda yapılan incelemede, kiriş bloğunun üst yüzeyinde manşon çevresindeki çatlakların arttığı ve genişliklerin büyüdüğü, çeşitli kesitlerde de beton üst yüzeyinde çatlaklar meydana geldiği görüşmüştür. Kiriş alın levhası ile beton arasındaki açıklığın artarak bütün

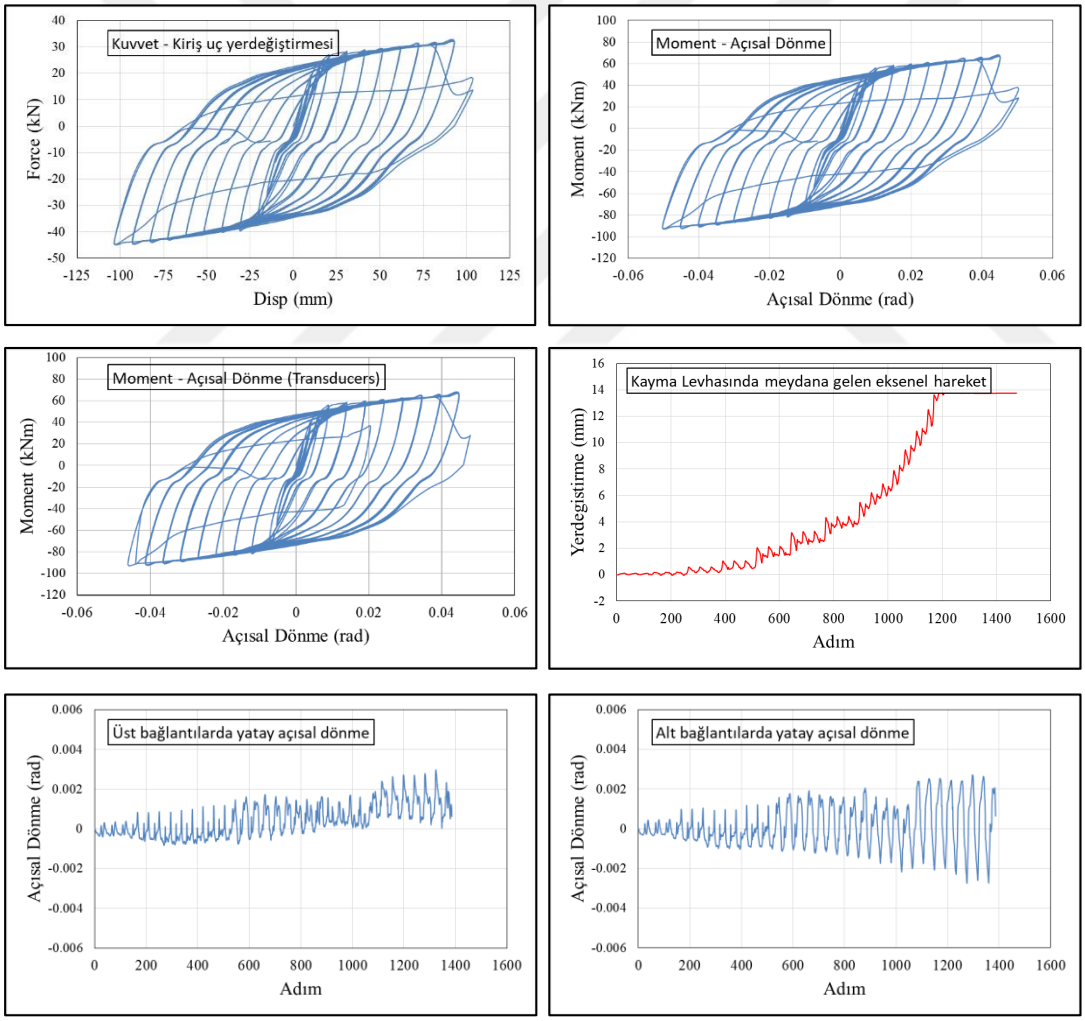
kesite yayıldığı fotoğraf ile kayıt altına alınmış, ayrıca STMM'lerde kalıcı şekildeğiştirmeler nedeniyle kiriş, kayma mili üzerinde yatay doğrultuda hareket etmiştir. Bu durumun sonucunda birleşim bölgesindeki açıklık önemli derecede artmıştır. Deney sonuna ait görseller, elemanlarda oluşan hasarlar ve deney düzeneğinin son hali Şekil 3.96'da verilmiştir.



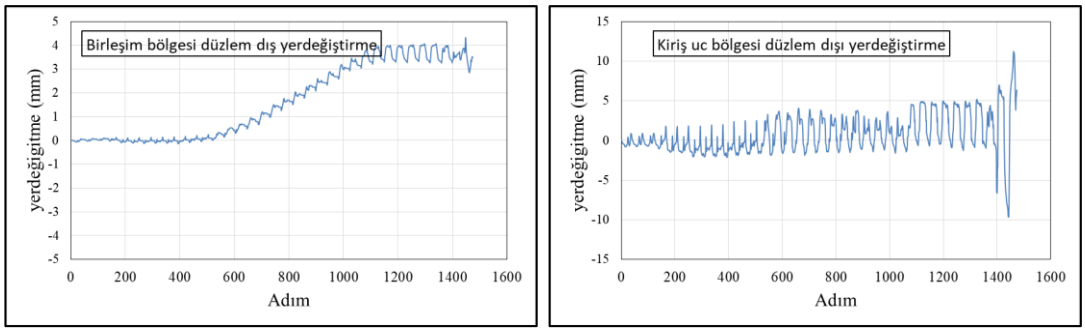
Şekil 3.96: 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

3.2.2.2.2 Aletsel büyüklükler

Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsalda meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma mili ekseninden alınan ölçümlerle yatay yerdeğiştirme değerleri; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.97).

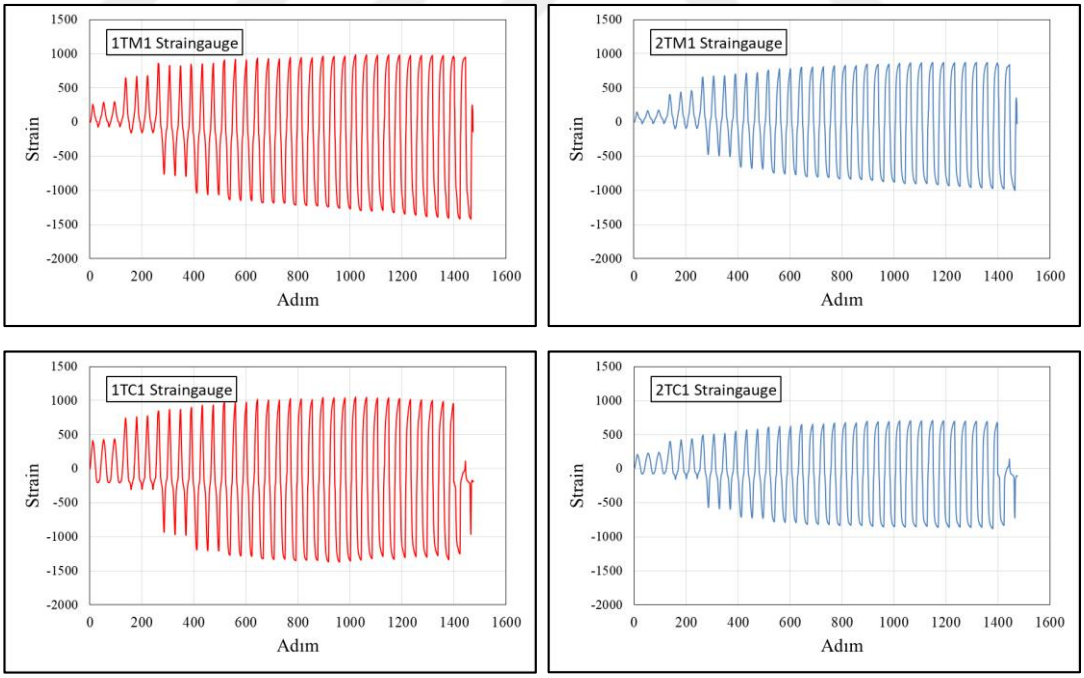


Şekil 3.97: 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

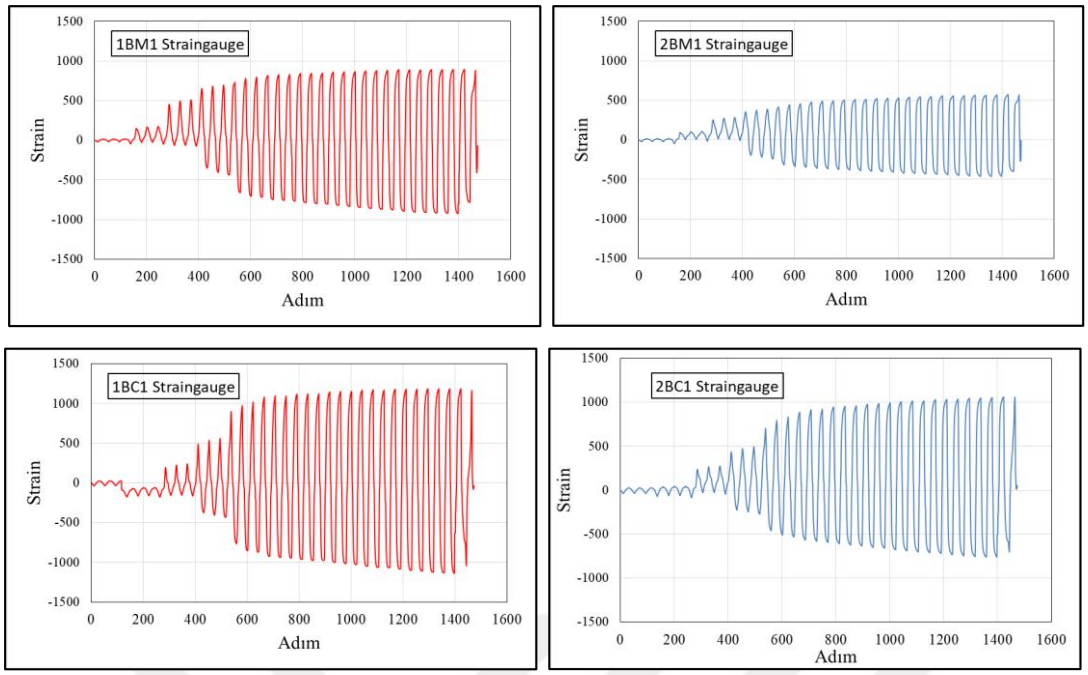


Şekil 3.97 (devam): 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

Kiriş numunesinin üretimi sırasında boyuna donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmış ve deney süresince donatıların şekildeğiştirme durumu kayıt altına alınmıştır. Donatılarda meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.98'de verilmektedir. Grafik sonuçları kiriş boyuna donatılarındaki şekildeğiştirme değerlerinin elastik sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. STMM manşonlarının deneyler sırasında elastik kaldığı ispatlandığı için bu elemanlara şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmemiştir.



Şekil 3.98: 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.98 (devam): 2 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.2.3. 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi

3.2.2.3.1 STMM düzeni ve oluşan hasar biçimi

Çelik ceket kullanılan 3 nolu numune, bir önceki başlıkta anlatılan 2 nolu numunenin eşleniğidir. Kiriş boyuna donatı düzeni üstte 2 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Hem üst donatılara hem de alt donatılara 52 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmıştır. Montaj tamamlanınca birleşim bölgesinde bulunan bütün sigorta elemanlara çelik ceketler yerleştirilmiştir. Çelik payanda sistemindeki düşey yerdeğiştirmeyi sabitleyen ek kiriş düzeneği bu deneyde de mevcuttur. Bu deneyi bir önceki deneyden ayıran özellik ise, yükleme protokolünde çevrim sayısının irdelenmesi için her bir genlikte bir çevrim gerçekleştirilmesidir. Detayları anlatılan 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testinin montaj görselleri Şekil 3.99'da verilmiştir.



Şekil 3.99: 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı her çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 20,6 mm yerdeğiştirme hedefi gerçekleştiğinde anlık incelenen yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artışın doğrusallıktan uzaklaştığı tespit edilmiştir. Bu aşama, kiriş kolon bağlantısını oluşturan mekanik plastik mafsalın akma düzeyi olarak kayıt altına alınmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma oluştuğu, beton üstünde çatlak oluşmadığı, üst sigorta elemanlarında kalıcı uzamanın sonucu çelik yelekler ile kolon levhası arasında açılma olduğu görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda kısalma ile birlikte levha ile beton arasındaki açıklığın kapandığı, alt sırada bulunan STMM'lerde ise sigorta elemanların uzamasına bağlı çelik ceketin alın yüzeyinden ve ana manşonlardan ayrılması durumları gözlenmiştir (Şekil 3.100).



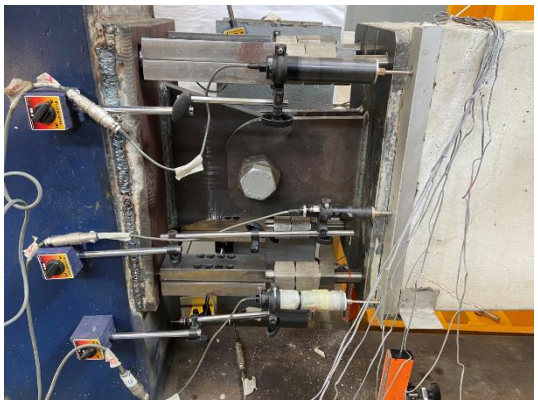
Şekil 3.100: 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 30,9mm olduğu aşamada kiriş üst yüzeyinde çatlaklar tespit edilmiştir. Çatlak yerleri, kiriş manşonlarının bulunduğu bölge ile alın levhasına olan uzaklığın yaklaşık 220mm ve 400mm olduğu kesitlerdir. Kiriş alt yüzeyinde ise bir önceki adımın devamı olan yerdeğiştirme değeri -30,9mm olduğu sırada manşon çevresinde ani çatlak oluşumu gözlenmiştir. Deney süresince çatlaklar genişleyerek büyümüş, çatlaklar, kiriş yan yüzeyinde birbirleriyle birleşecek düzeyde uzamışlardır. Çatlak tespitlerine ait görseller Şekil 3.101'de mevcuttur.

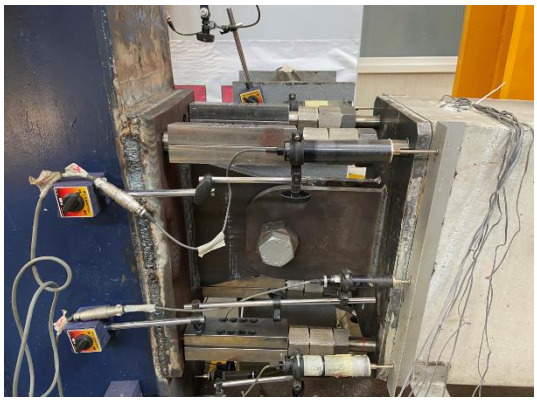


Şekil 3.101: Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller.

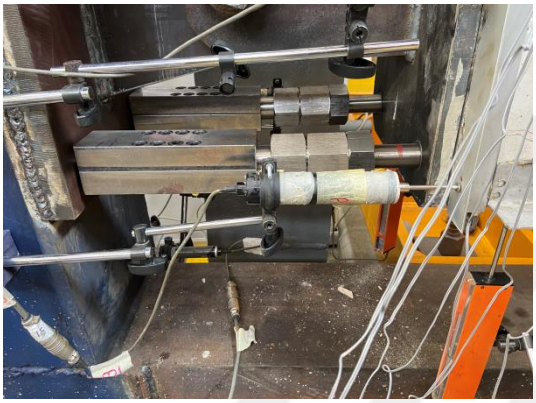
Çevrimsel yüklemeler sırasında kayma levhası ve kayma milinde gözlemler yapılmış, deney verisi üzerinden davranış takip edilmiştir. Hidrolik yük verendeki yerdeğiştirme genlikleri arttıkça sigorta elemanlarda artan kalıcı şekildeğiştirmeler ve uzamalar artmış, çelik yelekler ve manşonlar arasında ayrılmalar gözlenmiştir. Kayma levhası ve kayma mili ekseninde yapılan aletsel ölçümler ve görsel incelemeler mekanik plastik mafsalda yatay doğrultuda kalıcı hareket oluştuğunu göstermektedir. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki sigorta elemanların kontrollü kalıcı şekildeğiştirmeler göstermesi kayma levhasının davranışının nedeni olmaktadır (Şekil 3.102).



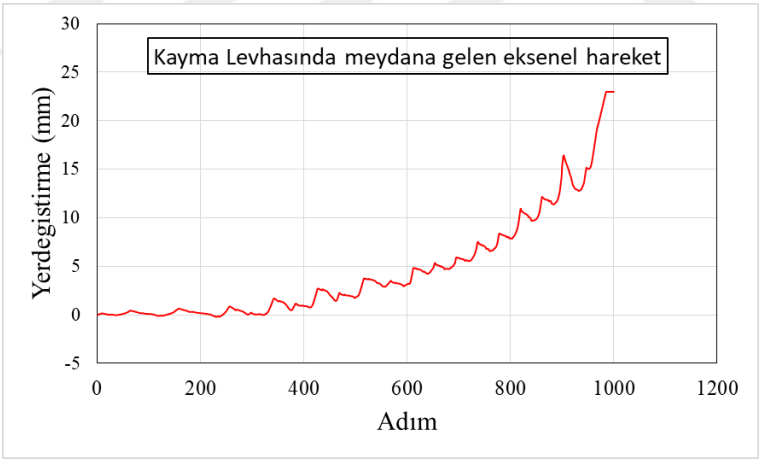
Negatif Moment hakim mod



Pozitif Moment hakim mod







Şekil 3.102: Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 4,5 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 92,7 mm yerdeğiştirme adımı sırasında alt sırada bulunan ceketli STMM'ler taşıma kapasitesine ulaşmış ve kopmuşlardır. 5,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 103,0 mm yerdeğiştirme adımına karşılık gelen bir sonraki çevrim de gerçekleştirilmiş ve kuvvet taşıma kapasitesinde meydana gelen kayıp kayıt altına alınmıştır. Deney sonunda üst sırada bulunan STMM'lerin sigorta elemanlarında önemli ölçüde uzama oluştuğu gözlenmiştir. Alt sırada bulunan STMM'lere ait sigorta

elemanların çelik yelekler içinde kopmadan önce büyük şekildeğiştirmeler oluşturarak buruştuğu görülmüştür. Çelik yeleklerin iç yüzeylerinde de sigorta elemanların buruşmasının sonucu olarak hasarlar oluşmuştur. Kiriş üstünde çatlakların arttığı, genişlediği ve uzadığı tespit edilmiştir. Kiriş alın levhası ile beton arasında oluşan boşluk da artmış, manşon etrafındaki çatlaklar ile birlikte birleşerek o bölgedeki betonun sistemden tamamen ayrılarak manşonu ortaya çıkardığı görülmüştür. Deney sonuna ait tespit edilen hasarların ve kalıcı şekildeğiştirmelerin görselleri Şekil 3.103'de detaylıca incelenebilir.



Şekil 3.103: 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

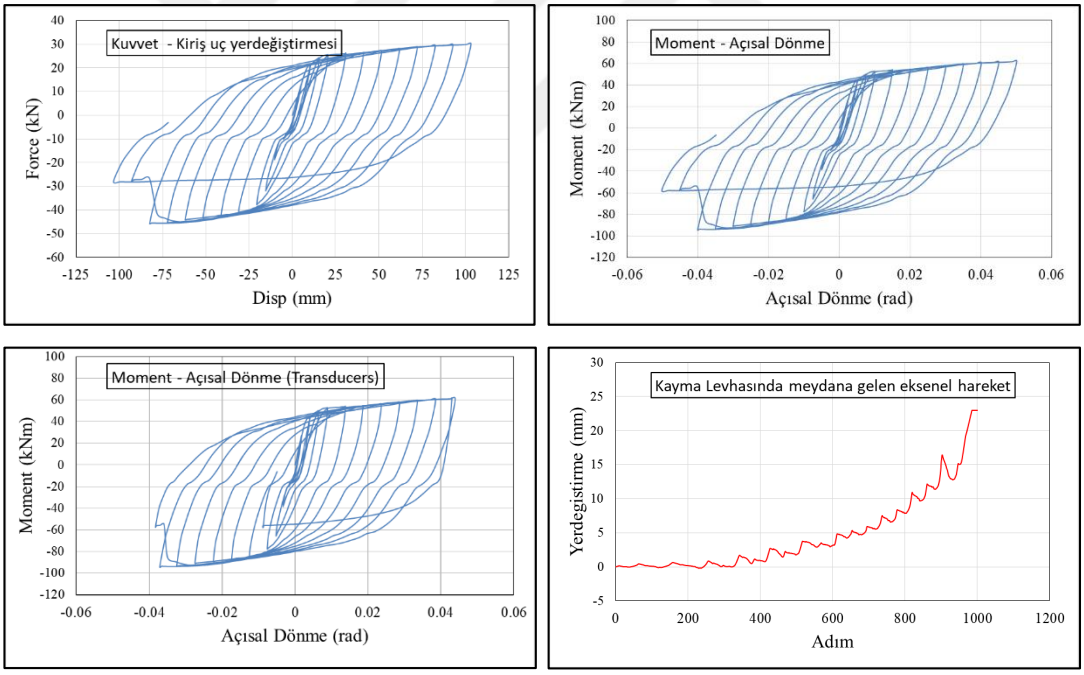


Şekil 3.103 (devam): 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

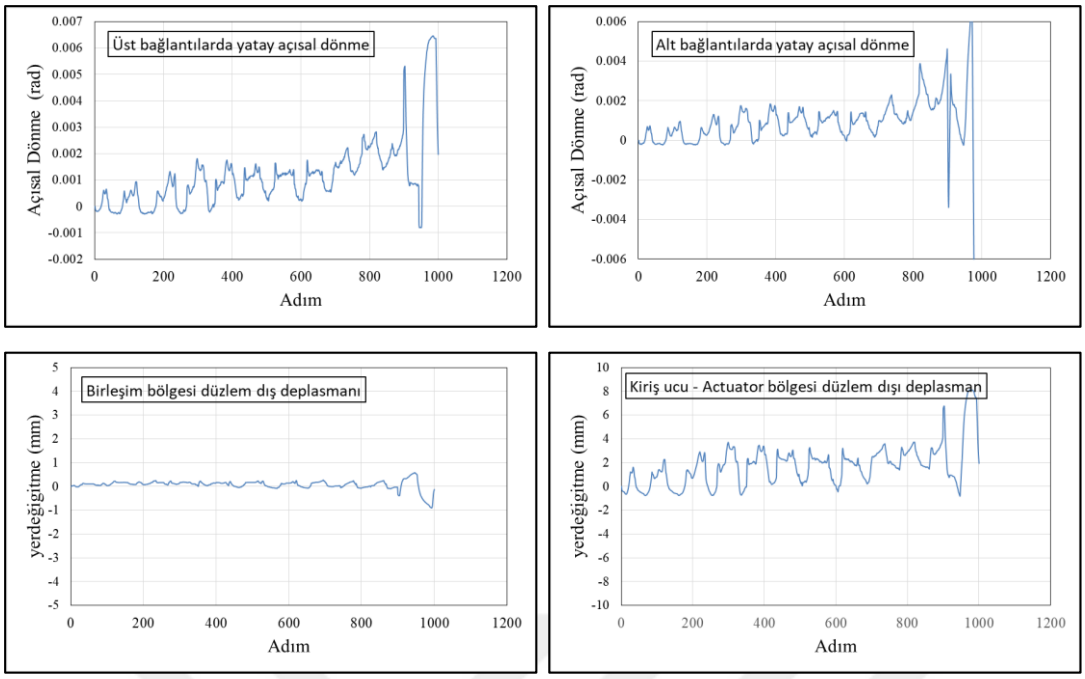
Deneyler sırasında kiriş alın levhası ile beton arasında artan çevrimsel genliklerle birlikte birbirlerinden ayrılma durumu söz konusu olmuştur. Kiriş içerisindeki manşonlar da, alın levhasına cıvatalı bağlı oldukları için bu ayrım sırasında levhaya uyum göstererek hareket etmiştir. Eğilme rijitliği yüksek olan manşonlar, etriyelerle sarılmaması ve kabuk betonunun da yetersiz kalınlığı nedeniyle üzerlerindeki kiriş betonunu zorlayarak çatlatmıştır. Manşonun pürüzsüz yapısı nedeniyle beton ve manşon arasında bir kenetlenme de oluşmadığı için üstteki şekillerde görüldüğü gibi beton blok parçaları manşon bölgesinde kirişten koparak ayrılmışlardır.

3.2.2.3.2 Aletsel büyüklükler

Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma mili ekseninden alınan ölçümlerle yatay yerdeğiştirme değerleri; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Son 2 çevrimde meydana gelen sigorta eleman kopmaları, düzlem dışı yerdeğiştirme değerlerine ait ölçümlere ve buna bağlı yatay açısal dönme değerlerine yansımaktadır. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak karşılıklı etki diyagramları çizilmiştir (Şekil 3.104).

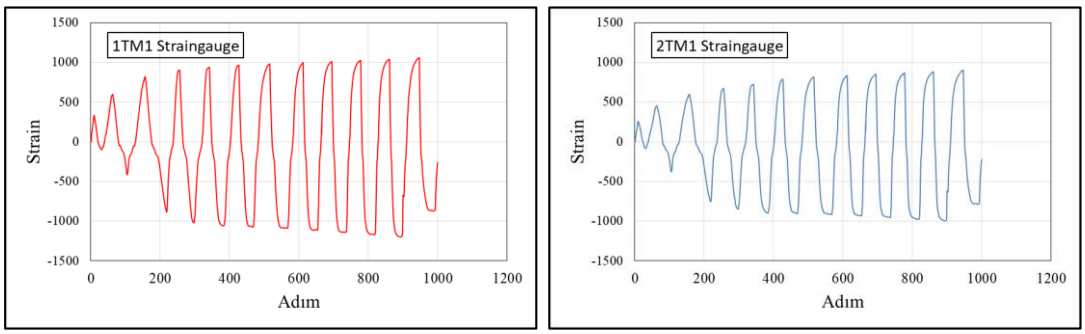


Şekil 3.104: 3 nolu nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

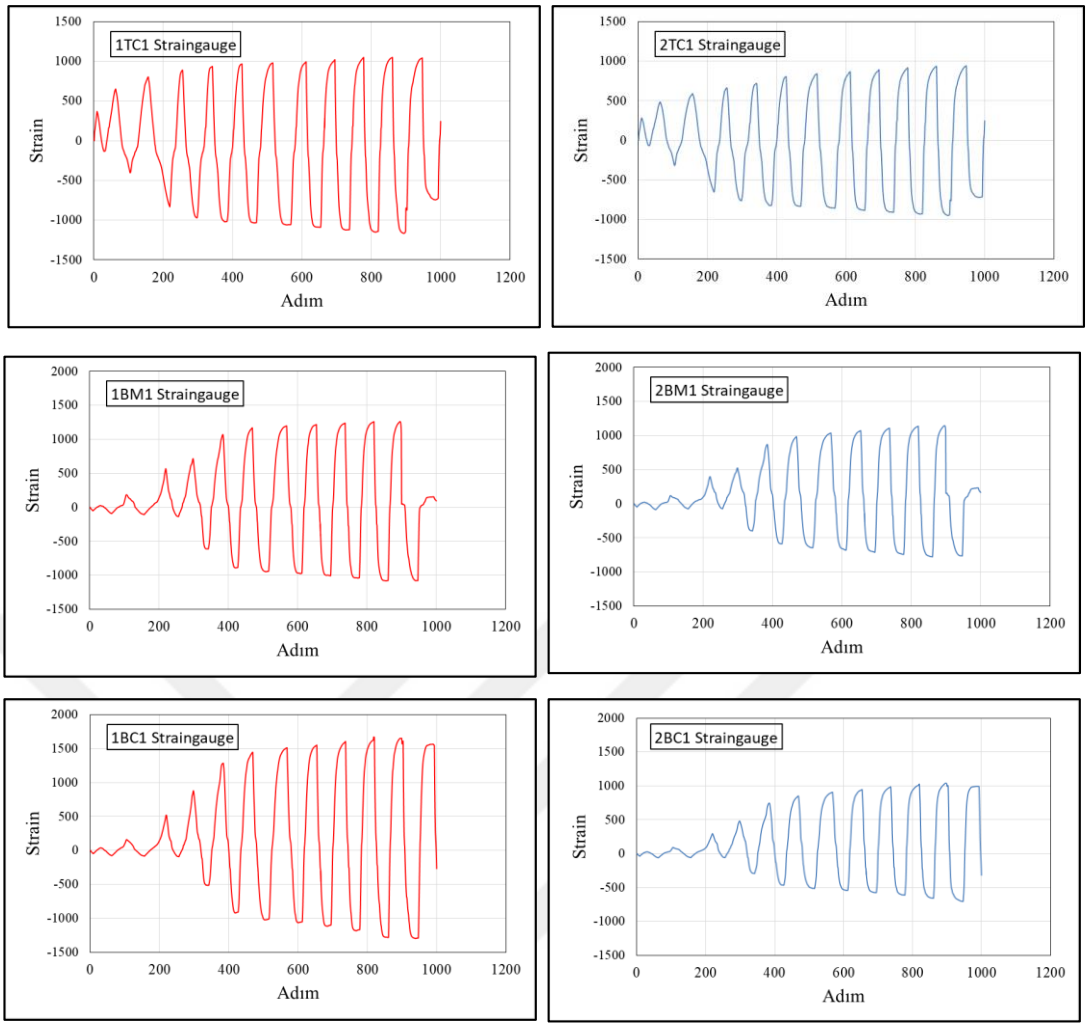


Şekil 3.104 (devam): 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

Kiriş numunesinin üretimi sırasında boyuna donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmış ve deney süresince donatıların şekildeğiştirme durumu kayıt altına alınmıştır. Donatılarda meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.105'de verilmektedir. Grafik sonuçları kiriş boyuna donatılarındaki şekildeğiştirme değerlerinin elastik sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. STMM manşonlarının deneyler sırasında elastik kaldığı ispatlandığı için bu elemanlara şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmemiştir.



Şekil 3.105: 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.105 (devam): 3 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.2.4. 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi

3.2.2.4.1 STMM düzeni ve oluşan hasar biçimi

Çelik ceket kullanılan 4 nolu numunede, kiriş boyuna donatı düzeni üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Üst donatılara 42 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve kenarlarda bulunan sigorta elemanlarda çelik ceket montajı gerçekleştirilmiştir. Alt sıradaki donatılara ise 52 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve montaj tamamlanınca sigorta elemanlara çelik ceketler yerleştirilmiştir. Ek kiriş düzeneği çelik payanda sisteminde öngermeli tijler ile bağlanmıştır. Yükleme protokolünde çevrim sayısı her bir genlik için 3 çevrim olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.106'da 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi ve birleşim bölgesi verilmiştir.



Şekil 3.106: 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı her çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 20,6 mm yerdeğiştirme hedefine erişildiğinde mekanik plastik mafsal tasarımı akma değerine ulaşmış ve yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki artış doğrusallıktan uzaklaşmıştır. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma oluştuğu, beton üstünde çatlak oluşmadığı, üst sigorta elemanlarında kalıcı uzamanın sonucu çelik yelekler ile kolon levhası arasında açılma olduğu görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda kısalma ile birlikte levha ve beton arasındaki açıklığın kapandığı, alt sırada bulunan STMM'lerde ise sigorta elemanların uzamasına bağlı çelik ceketin alın yüzeyinden ve ana manşonlardan ayrılması durumları gözlenmiştir (Şekil 3.107).



Şekil 3.107: 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Hidrolik yükveren üstündeki yerdeğiştirme değeri 30,9mm olduğu aşamada kiriş üst yüzeyinde çatlaklar tespit edilmiştir. Çatlak yerleri, kiriş manşonlarının bulunduğu bölge ile alın levhasına olan uzaklığın yaklaşık 200mm ve 440mm olduğu kesitlerdir. Çatlaklar kiriş yan yüzeylerinde de oluşmuş ve kiriş alt yüzeyine kadar ilerlemiştir. İlerleyen çevrim adımlarında hedefin -51,5mm yerdeğiştirme değeri olduğu sırada kiriş alt yüzeyinde ve manşon çevresinde ani çatlak oluşumu gözlenmiştir. Deney süresince çatlaklar genişleyerek büyümüş, alın levhası ile beton arasında oluşan boşluk derinleşmiştir. Çatlak tespitlerine ait görseller Şekil 3.108'de mevcuttur.



Şekil 3.108: Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller.

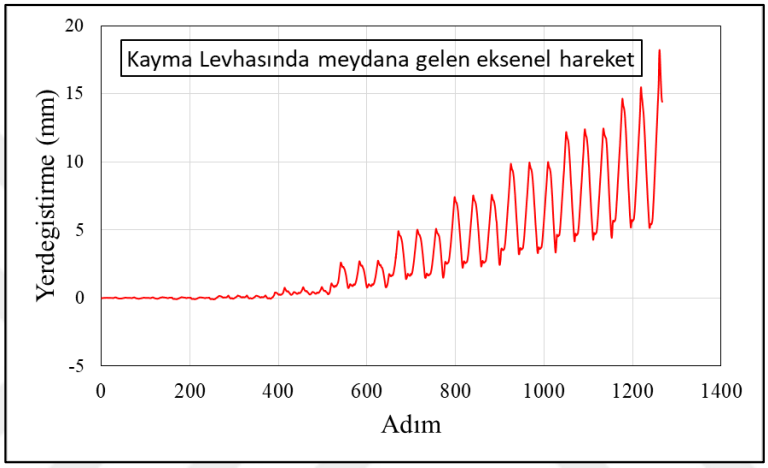
Çevrimsel yüklemeler sırasında kayma levhası ve kayma milinde gözlemler yapılmış, deney verisi üzerinden davranış takip edilmiştir. Yükleme protokolündeki genlik değerleri arttıkça sigorta elemanlarda kalıcı şekildeğiştirmeler ve uzamalar fazlalaşmış, çelik yelekler ve manşonlar arasında ayrılmalar oluşmuştur. Kayma levhası ve kayma mili ekseninde yapılan aletsel ölçümler ve görsel incelemeler yatay doğrultuda ilerleyen kalıcı bir hareket oluştuğunu göstermekedir. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki sigorta elemanların kontrollü kalıcı şekildeğiştirmeler gerçekleştirmesi kayma levhasının davranışının nedeni olmaktadır (Şekil 3.109).



Negatif Moment hakim mod



Pozitif Moment hakim mod



Şekil 3.109: Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 4,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 82,4 mm yerdeğiştirme adımının 2. çevrimi sırasında alt sırada bulunan ceketli STMM'lerden biri taşıma kapasitesine ulaşmış ve kopmuştur. 3. çevrimin tamamlanması sırasında da alt sırada bulunan diğer ceketli STMM koparak mekanik plastik mafsalın taşıma kapasitesini kaybetmesine neden olmuştur. Deney sonunda üst sırada bulunan ceketli STMM'lerin sigorta elemanlarında önemli ölçüde uzama oluştuğu, ceketsiz STMM'lerin sigorta elemanlarında ise gözle görülür burkulma şekilleri gözlenmiştir. Alt sırada bulunan STMM'lere ait sigorta elemanların, daha önceki deneylerde de tespit edildiği şekilde buruştuğu görülmüştür. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki çelik yeleklerin hepsinin iç yüzeylerinde de hasarlar oluştuğu tespit edilmiştir. Kiriş üstünde çatlakların arttığı, genişlediği ve uzadığı kayıt altına alınmıştır. Deney sonuna doğru kiriş alt yüzeyinde de her iki kiriş manşonu etrafında derin çatlaklar oluşmuştur. Alın levhası ile beton arasında oluşan açıklık genişlemiş, üst manşonların etrafındaki betonun sistemden ayrılma noktasına geldiği görülmüştür.

Deney sonuna ait tespit edilen hasarların ve kalıcı şekildeğiştirmelerin görselleri Şekil 3.110'da detaylıca incelenebilir.



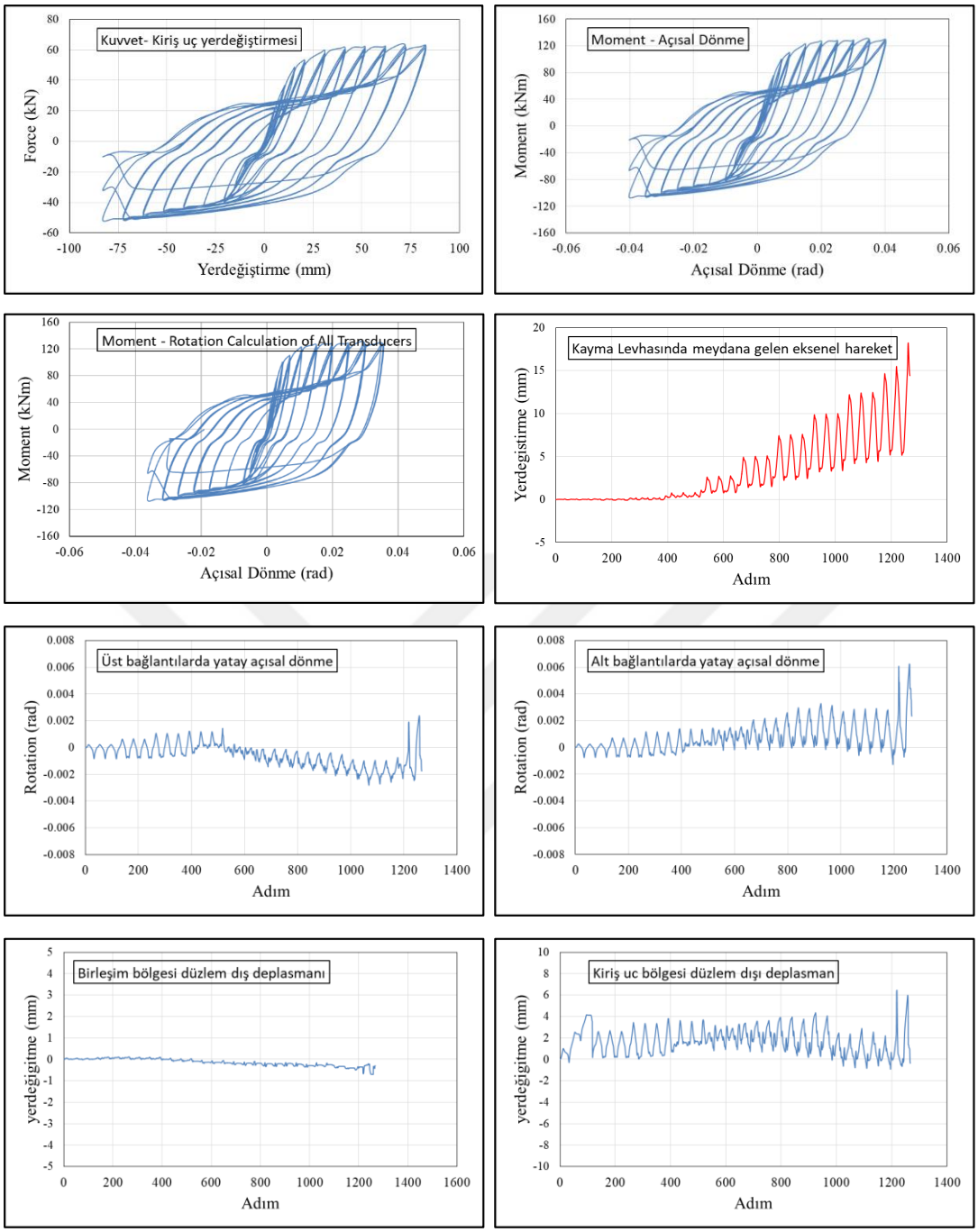
Şekil 3.110: 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.



Şekil 3.110 (devam): 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

3.2.2.4.2 Aletsel büyüklükler

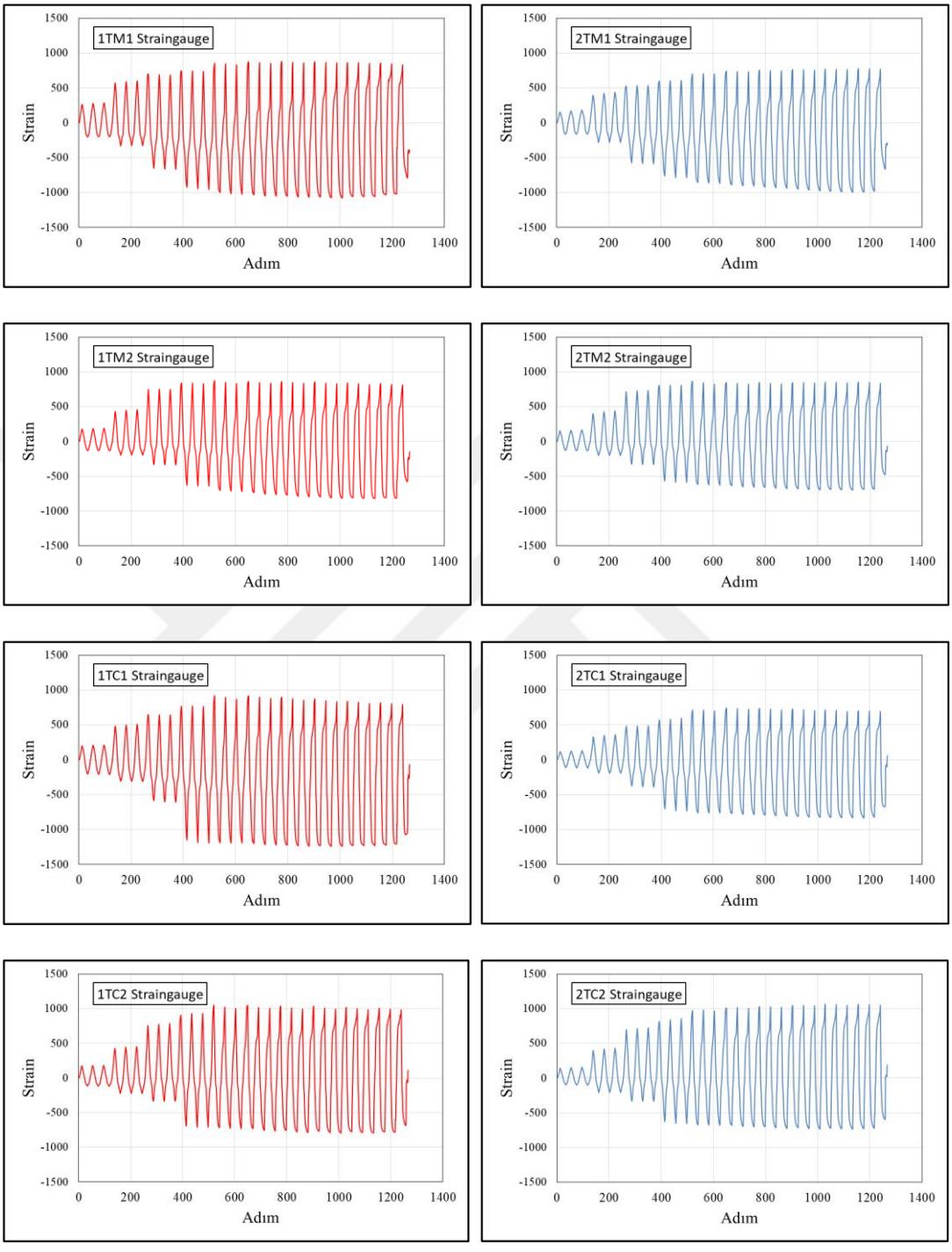
Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler de hesaplanmıştır. Ayrıca kayma mili ekseninden alınan ölçümlerle yatay yerdeğiştirme değerleri; kirişe dik doğrultudaki ölçüm sistemi ile düzlem dışı oluşan hareketler ölçülmüştür. Son 2 çevrimde elde edilen ölçümler ve bağıl olarak oluşturulan değerlerde meydana gelen düzensiz davranış, sigorta eleman kopmalarının yansıması olarak ortaya çıkmaktadır. Kaydedilen ve hesaplanan değerler kullanılarak oluşturulan karşılıklı etki diyagramları Şekil 3.111'de verilmiştir.



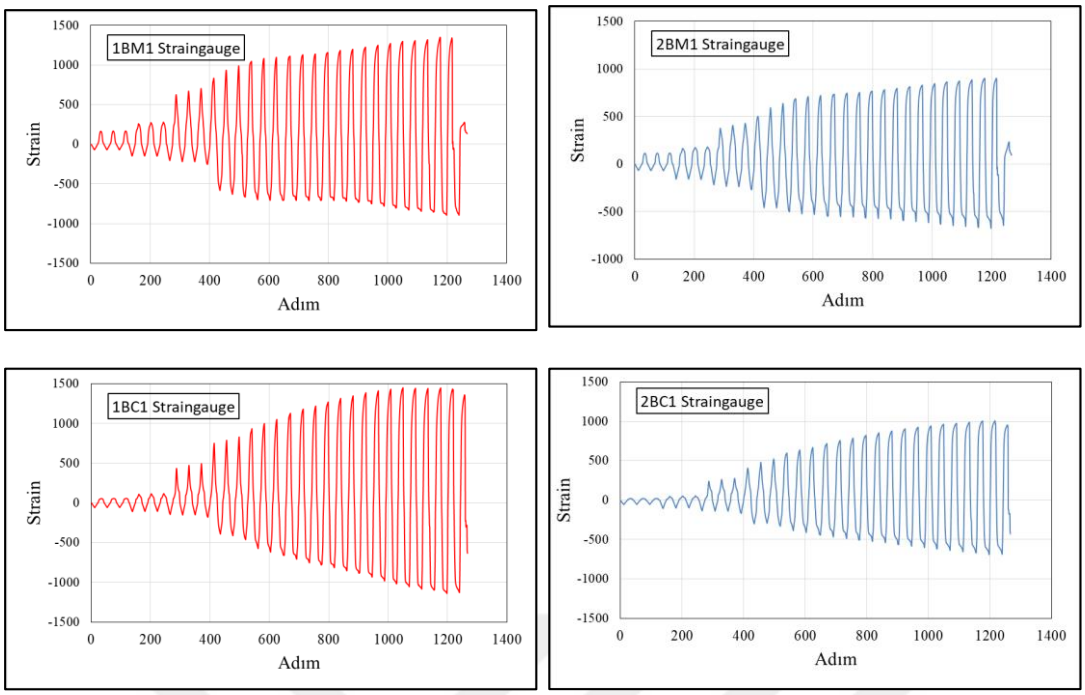
Şekil 3.111: 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

Kiriş numunesinin üretimi sırasında boyuna donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmış ve deney süresince donatıların şekildeğiştirme durumu kayıt altına alınmıştır. Donatılarda meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.112'de verilmektedir. Grafik sonuçları kiriş boyuna donatılarındaki şekildeğiştirme değerlerinin elastik sınırlar içerisinde kaldığını

göstermektedir. STMM manşonlarının deneyler sırasında elastik kaldığı ispatlandığı için bu elemanlara şekildeğiştirme ölçer yerleştirilmemiştir.



Şekil 3.112: 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.112 (devam): 4 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.2.5. 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantısı testi

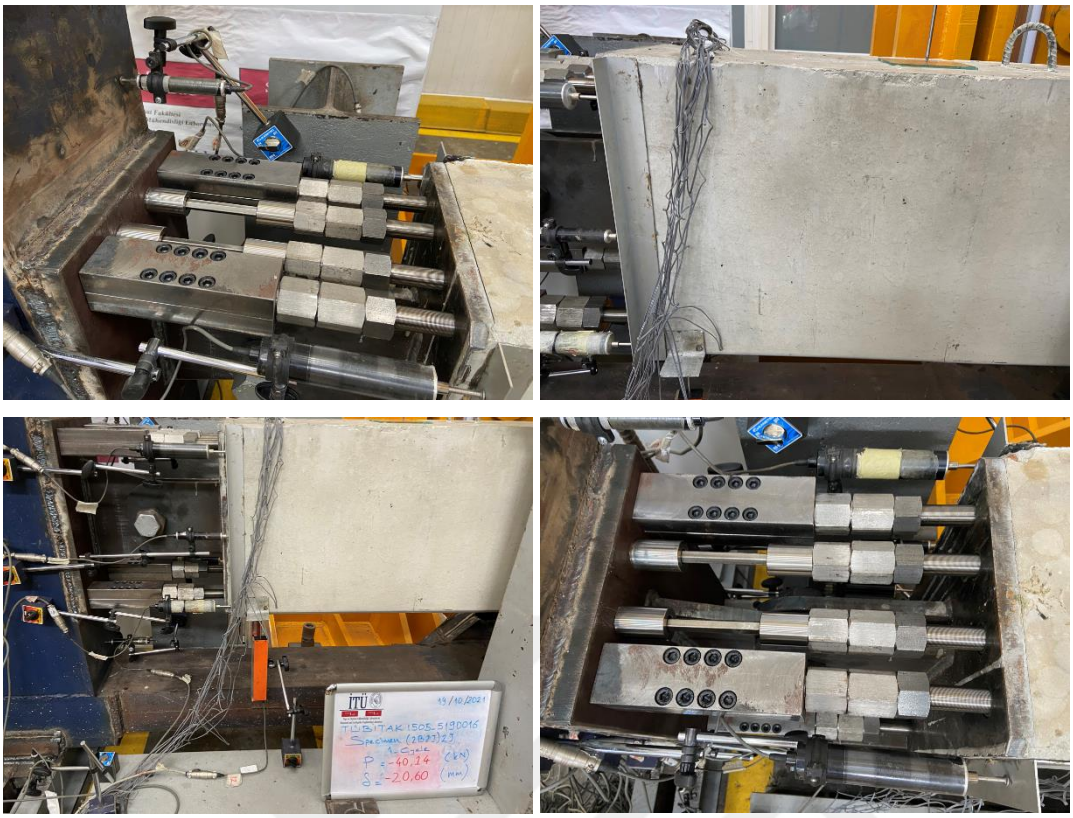
3.2.2.5.1 STMM düzeni ve oluşan hasar biçimi

Çelik ceket kullanılan 5 nolu numune, bir önceki başlıkta anlatılan 4 nolu numunenin eşleniğidir. Kiriş boyuna donatı düzeni üstte 4 adet Φ18 ve altta 2 adet Φ18 şeklindedir. Üst donatılara 42 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve kenarlarda bulunan sigorta elemanlarda çelik ceket montajı gerçekleştirilmiştir. Alt sıradaki donatılara ise 52 mm manşon çapına sahip STMM'ler bağlanmış ve montaj tamamlanınca sigorta elemanlara çelik ceketler yerleştirilmiştir. Payandadaki düşey yerdeğiştirmeyi kontrol altında tutan ek kiriş düzeneği de kurulmuştur. Bu deneyi bir önceki deneyden ayıran özellik, yükleme protokolünde çevrim sayısının irdelenmesi için her bir genlikteki çevrimin bire indirgenmesidir. Ayrıca 30,90 mm yerdeğiştirme hedefine sahip çevrimden sonra 61,80 mm yerdeğiştirme çevrimi ile deneye devam edilmiş, 41,20 ve 51,50 mm yerdeğiştirme çevrimleri numuneye uygulanmamıştır. Detayları anlatılan 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testinin montaj görselleri Şekil 3.113'de verilmiştir.



Şekil 3.113: 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon bağlantı testi.

Tersinir tekrarlı her çevrimlik yükleme sonucunda deney kirişi, STMM'ler ve sigorta elemanlar kontrol edilerek meydana gelen yerdeğiştirmeler ve şekildeğiştirmeler incelenmiştir. 20,6 mm yerdeğiştirme değerine ulaşıldığında mekanik plastik mafsal tasarımı akma değerine ulaşmış ve yerdeğiştirme – kuvvet ilişkisinde kuvvet değerlerindeki doğrusal artışta azalım meydana gelmiştir. Gerçekleştirilen kontrollerde negatif moment hakim durumda iken kiriş alın levhası ile beton arasında ayrılma oluştuğu, beton üstünde çatlak oluşmadığı, üst sigorta elemanlarında kalıcı uzamanın sonucu çelik yelekler ile kolon levhası arasında açılma olduğu görülmüştür. Pozitif momentin etkin olduğu durumda ise üst sırada bulunan sigorta elemanlarda kısalma ile birlikte levha ile beton arasındaki açıklığın kapandığı, alt sırada bulunan STMM'lerde ise sigorta elemanların uzamasına bağlı çelik ceketin alın yüzeyinden ve ana manşonlardan ayrılması durumları gözlenmiştir (Şekil 3.114).



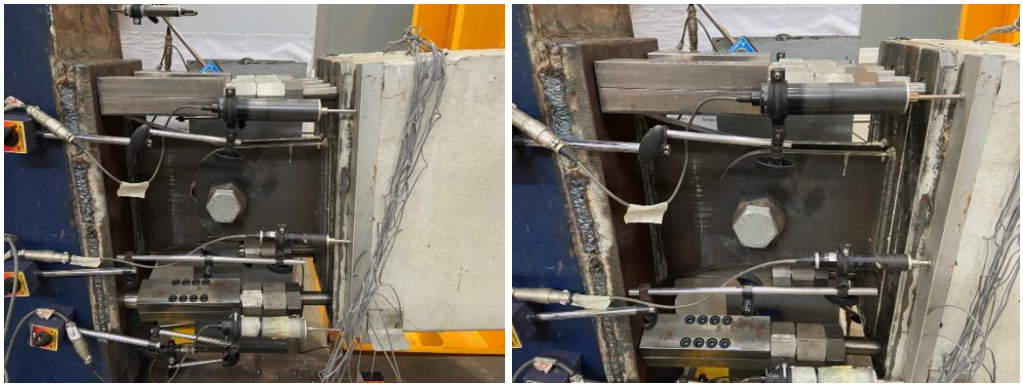
Şekil 3.114: 20,6mm hedef yerdeğiştirme sonrası mekanik plastik mafsalın görünümü.

Yükleme protokolünün 30,9mm yerdeğiştirme değeri numuneye etkitildiği aşamada kiriş üst yüzeyinde çatlaklar tespit edilmiştir. Çatlak yerleri, kiriş manşonlarının bulunduğu bölge ile alın levhasına olan uzaklığın yaklaşık 200mm, 400mm ve 500mm olduğu kesitlerdir. Çatlaklar kiriş yan yüzeylerinde de oluşmuş ve kesit boyunca ilerlemiştir. İlerleyen çevrim adımlarında -72,1mm yerdeğiştirme değeri olduğu sırada kiriş alt yüzeyinde ve manşon çevresinde ani çatlak oluşumu gözlenmiştir. Deney süresince çatlaklar genişleyerek büyümüş, alın levhası ile beton arasında oluşan boşluk derinleşmiştir. Çatlak tespitlerine ait görseller Şekil 3.115'de mevcuttur.



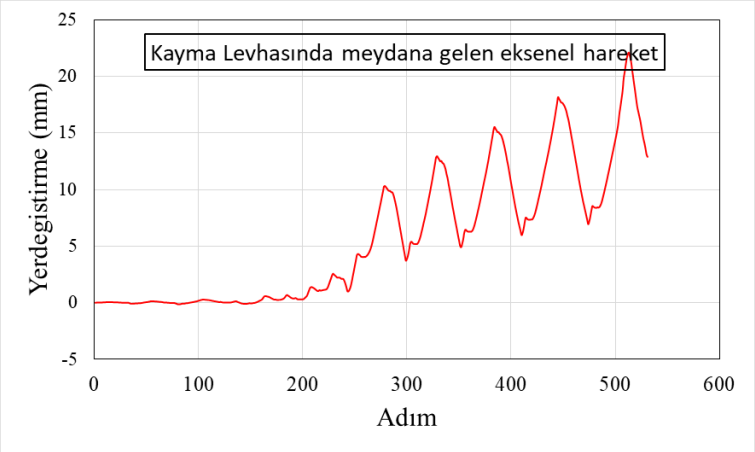
Şekil 3.115: Kiriş alt ve üst yüzeylerinde oluşan görseller.

Çevrimsel yüklemeler sırasında kayma levhası ve kayma milinde gözlemler yapılmış, deney verisi üzerinden davranış takip edilmiştir. Hidrolik yük verendeki yerdeğiştirme genlikleri arttıkça sigorta elemanlarda artan kalıcı şekildeğiştirmeler ve uzamalar artmış, çelik yelekler ve manşonlar arasında ayrılmalar görülmüştür. Kayma levhası ve kayma mili ekseninde yapılan aletsel ölçümler ve görsel incelemeler mekanik plastik mafsalda yatay doğrultuda kalıcı hareket oluştuğunu göstermektedir. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki sigorta elemanlarında oluşan kontrollü kalıcı şekildeğiştirmeler kayma levhasının davranışının nedeni olmaktadır (Şekil 3.116).



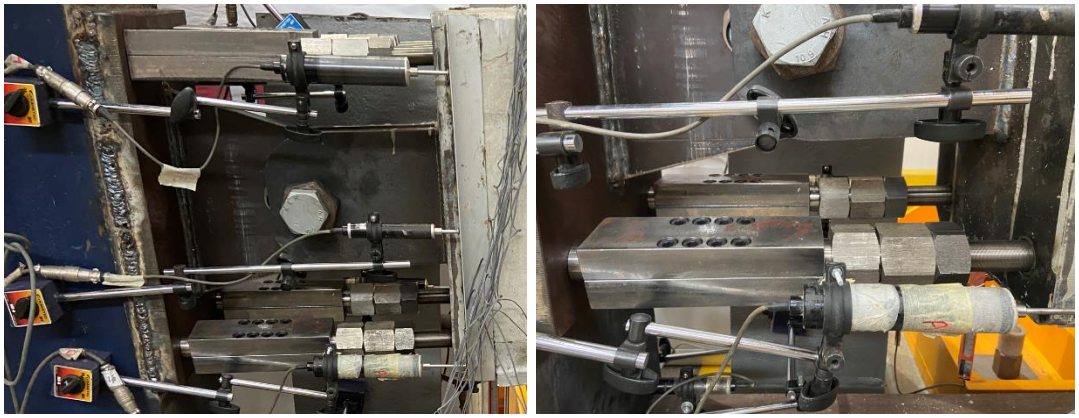
Negatif Moment hakim mod Pozitif Moment hakim mod

Şekil 3.116: Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.



Şekil 3.116 (devam): Kayma levhasının davranışı ve eksenel yerdeğiştirme eğilimi.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 5,0 radyan açısal dönme değerine karşılık gelen 103,0 mm yerdeğiştirme adımı sırasında alt sırada bulunan ceketli STMM'ler kısa aralıklarla taşıma kapasitesine ulaşmış ve ard arda kopmuşlardır. Deney sonunda üst sırada bulunan ceketli STMM'lerin sigorta elemanlarında önemli ölçüde uzama oluştuğu, ceketsiz STMM'lerin sigorta elemanlarında ise gözle görülür burkulmalar meydana geldiği gözlenmiştir. Alt sırada bulunan STMM'lere ait sigorta elemanların çelik yelekler içinde kopmadan önce büyük şekildeğiştirmeler oluşturarak buruştuğu görülmüştür. Hem üst sıradaki hem de alt sıradaki çelik yeleklerin hepsinin iç yüzeylerinde de hasarlar oluştuğu tespit edilmiştir. Kiriş üstünde çatlakların sayısı, genişlikleri ve uzunlukları artmış, üst manşonların civarındaki beton blok şeklinde ayrılma eğilimi göstermiştir. Deney sonuna doğru kiriş alt yüzeyinde de her iki kiriş manşonu etrafında çatlaklar oluşmuştur. Deney sonuna ait tespit edilen hasarların ve kalıcı şekildeğiştirmelerin görselleri Şekil 3.117'de detaylıca incelenebilir.



Şekil 3.117: 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

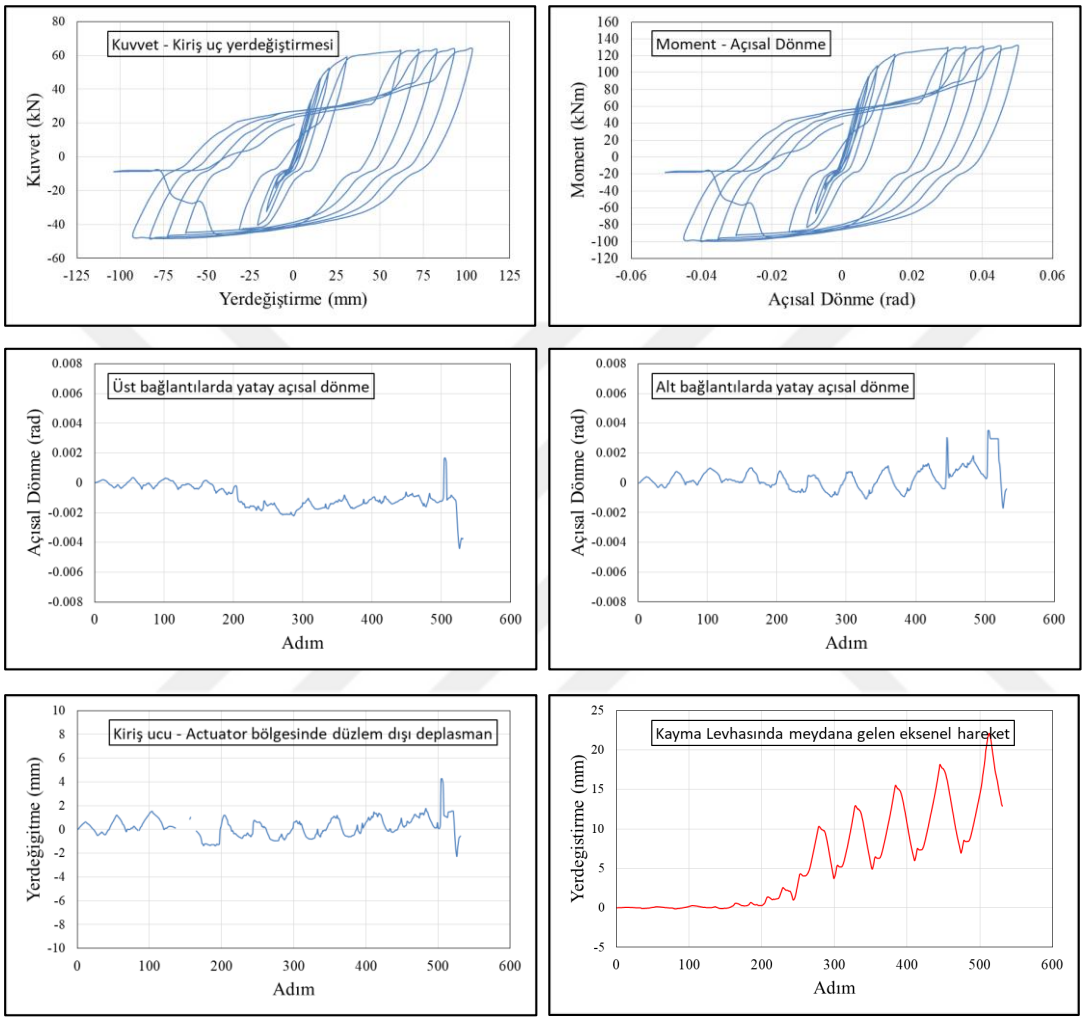


Şekil 3.117 (devam): 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – deney sonu ve hasar görselleri.

3.2.2.5.2 Aletsel büyüklükler

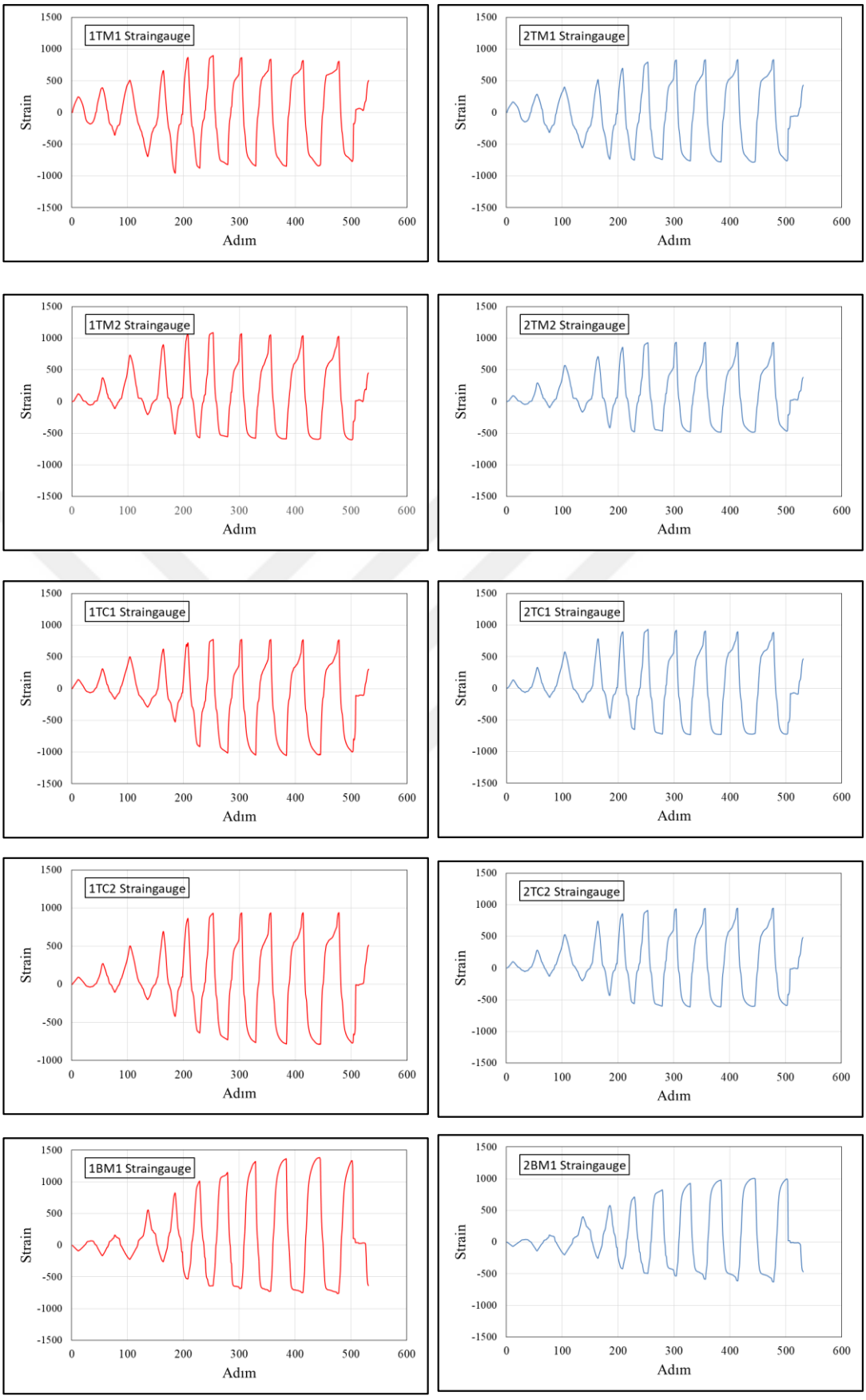
Deney süresince kiriş numunesi ve mekanik plastik mafsal bölgesinde yerdeğiştirme kayıtları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veriler ve deney düzeneğinin geometrik özellikleri kullanılarak deney düzeneğinde oluşan kiriş uç yerdeğiştirme değeri – kesme kuvveti karşılaştırmaları ve mekanik plastik mafsalda meydana gelen açısal dönme – eğilme momenti karşılaştırmaları oluşturulmuştur. STMM'lerin bulunduğu eksenlerden elde edilen yerdeğiştirme değerleri kullanılarak mekanik plastik mafsaldaki meydana gelen yatay ve düşey açısal dönmeler hesaplanmıştır. Ayrıca

kayma mili ekseninden alınan ölçümlerle yatay yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Kirişe dik doğrultudaki düzlem dışı oluşan hareketlerin ölçümü için yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir. Fakat ölçerlerden birinden deney sırasında meydana gelen sinyal hatası nedeniyle veri toplanamamıştır. Kaydedilen ve hesaplanan değerlerin karşılıklı etki diyagramları Şekil 3.118'de verilmiştir.

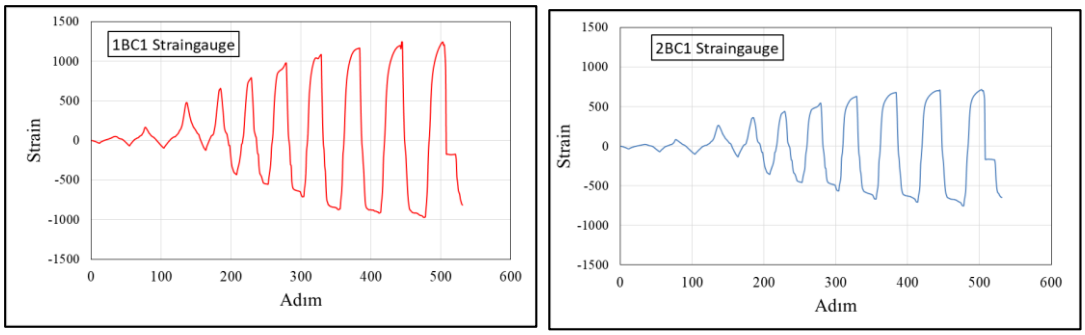


Şekil 3.118: 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – karşılıklı etki diyagramları.

Kiriş numunesinin üretimi sırasında boyuna donatılara şekildeğiştirme ölçerler yapıştırılmış ve deney süresince donatıların şekildeğiştirme durumu kayıt altına alınmıştır. Donatılarda meydana gelen şekildeğiştirme değerleri, malzemelerin akma şekildeğiştirme değerleri ile karşılaştırılmıştır. Şekildeğiştirme değerlerine ait takip ve karşılaştırma grafikleri Şekil 3.119'da verilmektedir. Grafik sonuçları kiriş boyuna donatılarındaki şekildeğiştirme değerlerinin elastik sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.119: 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.



Şekil 3.119 (devam): 5 nolu çelik ceketli kiriş kolon birleşimi – kiriş boyuna donatılarının şekildeğiştirme ölçüm diyagramları.

3.2.3 Deneysel sonuçların karşılaştırılması

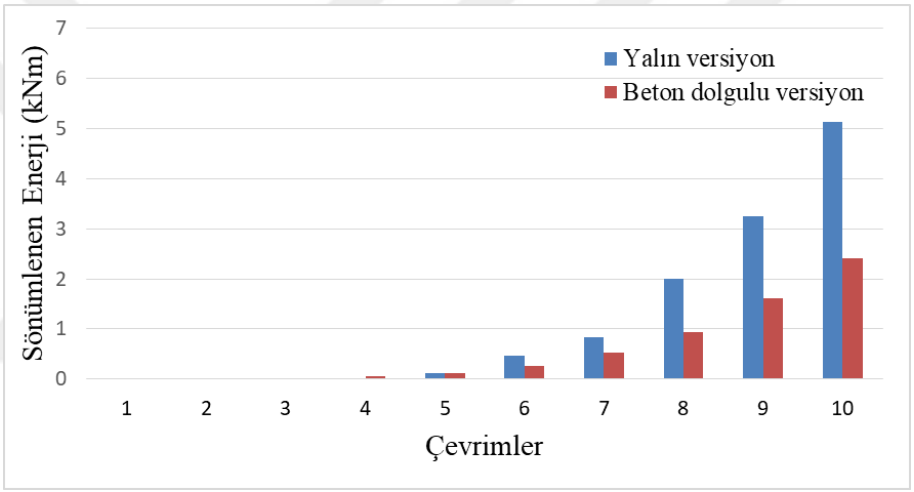
Doktora tez çalışması kapsamında önüretimli betonarme kiriş ve kolon elemanların mekanik plastik mafsal ile bağlantıları gerçekleştirilmiş, bağlantı detayında çeşitli değişkenlerin ve tasarım modellerinin irdelenmesi amacıyla 11 adet deney düzeneği kurulmuştur. Laboratuvar koşulları ve fiziksel imkanların izin verdiği ölçüde bağlantı detayı ile yükleme sistemi arasındaki mesafe ortalama 2m düzeyinde sınırlandırılmış ve kiriş uzunlukları bu ölçüye uygun üretilmiştir. Buna karşın gerçekleştirilen deneyler sırasında kiriş ve kolon elemanlarının kesit büyüklükleri ile bağlantı detaylarının geometrileri gerçek boyutlarda ihtiva edilmiştir. Tüm bu tasarım kriterlerini içerisine almak koşuluyla oluşturulan bütün deney düzenekleri tersinir tekrarlı yükleme çevrimleriyle test edilmiş, elde edilen tüm veriler, tespit edilen hasarlar ve gerçekleştirilen ölçümler yukarıdaki başlıklarda verilmiştir.

İlk gerçekleştirilen pilot deneyler sırasında mekanik plastik mafsalın beton dolgu ile sarılmasının birleşim detayına etkisi araştırılmıştır. Sargı etkisinin davranışa katkısını değerlendirebilmek için kiriş uç yerdeğiştirmesi (δ), birleşim bölgesinde aktarılabilen moment değerleri (M) ve birleşim detayı tarafından sönümlenen enerji miktarlarına ait büyüklükler (E_{diss}) ortaya konmuştur (Çizelge 3.4). Kiriş elemanın tepesi ile kolon alın levhası arasında kalan mesafe 2,03 m'dir.

Çizelge 3.4 : Pilot deneylere ait yerdeğiştirme, moment ve sönümlenen enerji değerleri.

Pilot deney adı	δ_{min} (mm)	δ_{mak} (mm)	M_{min} (kNm)	M_{mak} (kNm)	E_{diss}
Yalın versiyon	-66,108	58,125	-37,3505	35,8767	5,1334
Beton dolgulu versiyon	-44,05	44,06	-52,052	41,0351	2,4031

Pilot deneyler sırasında elde edilen veriler karşılaştırıldığında, mekanik plastik mafsalın yalın olarak bırakıldığı ve sargılanmadığı versiyonda elde edilen kiriş uç yerdeğiştirme değerleri, etriyeler ve beton ile sargılanmış olan versiyona kıyasla %30-ile %50 arasında daha fazla ölçülmüştür. Buna karşın moment değerleri karşılaştırıldığında beton dolgulu pilot deneyde %15 ile %40 arasında daha fazla moment taşıma kapasitesine ulaşılmıştır. Son olarak deneyler sırasında birleşim detayı tarafından sönümlenen enerji miktarlarının kümülatif değerleri karşılaştırılmış ve yalın versiyonun sönümleyebildiği enerji miktarının yaklaşık %100 daha fazla olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca her bir çevrim sırasında sönümlenmiş enerji değerleri çıkarılmış ve bir tablo olarak karşılaştırmalı olacak şekilde çizilmiştir. Bu tablo Şekil 3.120'de verilmektedir.

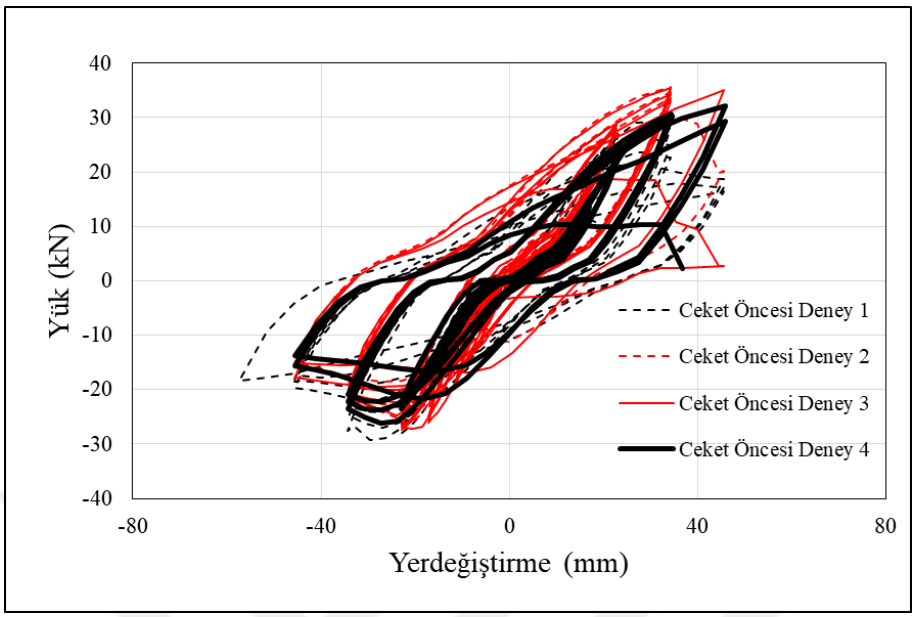


Şekil 3.120: Pilot deneyler gerçekleştirilen çevrimlerdeki sönümlenen enerji değerleri.

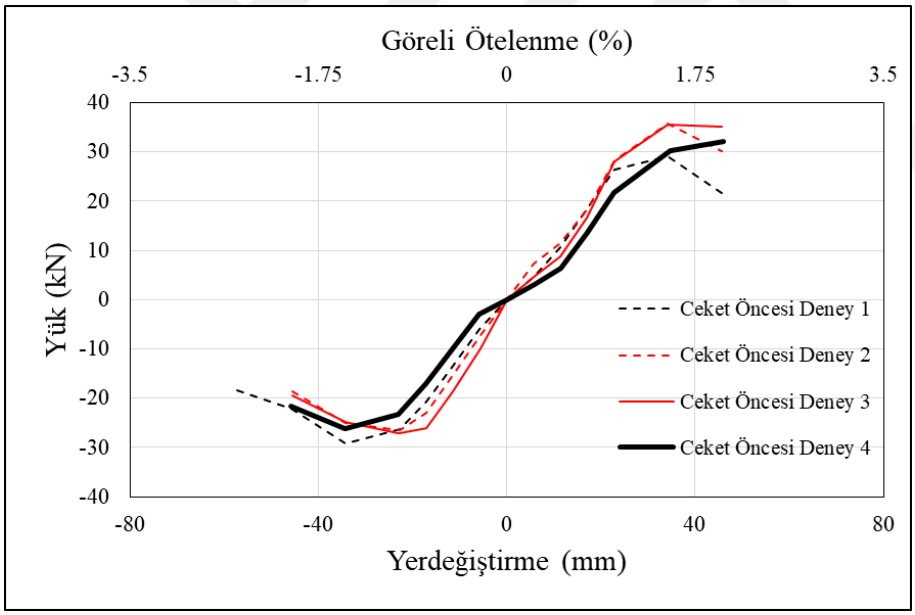
Deprem bölgelerinde yapılacak yapılardaki betonarme kesitler için kalıcı şekildeğiştirme ve süneklik kabiliyetleri önemlidir. Ayrıca sönümlenen enerji miktarlarının da yüksek olması tercih edilmektedir. Tüm bu hususlar dikkate alındığında gerek süneklik gerek enerji sönümleme kabiliyetleri nedeniyle yalın haldeki mekanik plastik mafsal tasarımı tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında geri kalan bütün kolon kiriş birleşim deneylerinde bu sebeple yalın versiyon birleşim detayı kullanılmıştır.

Çelik ceket öncesi durum için tasarlanan kiriş kolon bağlantı testlerinde çeşitli bağlantı düzenine sahip numuneler çalışılmıştır. Yükleme protokolüne bağlı olarak her bir deney numunesine ait yük-yerdeğiştirme çevrimleri elde edilmiş, bu çevrimler

kullanılarak ayrıca iskelet eğrileri çıkarılmıştır. Karşılaştırma yapmanın mümkün olması için bu iskelet eğrileri Şekil 3.121'de tek bir grafikte beraber çizilmiştir.



(a) Yük-yerdeğiştirme etkileşim diyagramları

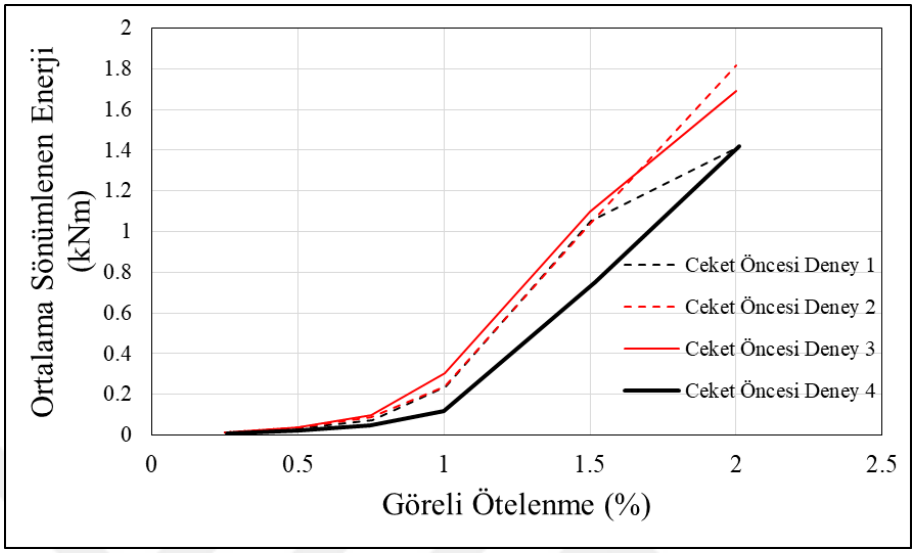


(b) İskelet eğrileri

Şekil 3.121: Çelik ceket öncesi deney numunelerine ait yük-yerdeğiştirme etkileşim diyagramları ve bu diyagramlara ait iskelet eğrileri.

Bütün deney numunelerinde çekme yönlerinde %1.5 göreli ötelenme seviyelerinde; itme yönlerinde ise % 1.5-2 göreli ötelenme seviyelerinde en büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. Dayanım azalması ise %2 göreli ötelenme seviyelerinde gerçekleşmiş ve hemen ardından taşıma kapasitesine ulaşan numuneler kopmuştur. Hedeflenen %4,5-%5 ötelenme seviyelerine gelmeden erken aşamalarda deneyler son bulmuştur.

Deneyler sırasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri içerisinde kalan kapalı alanlar hesaplanarak numunelerin taşıma kapasitelerine ulaşana kadar sönümledikleri enerji miktarları da ortaya konmuştur. Her döngüde elde edilen enerji sönümleme kapasiteleri Şekil 3.122'de bir arada çizilerek karşılaştırılmıştır.

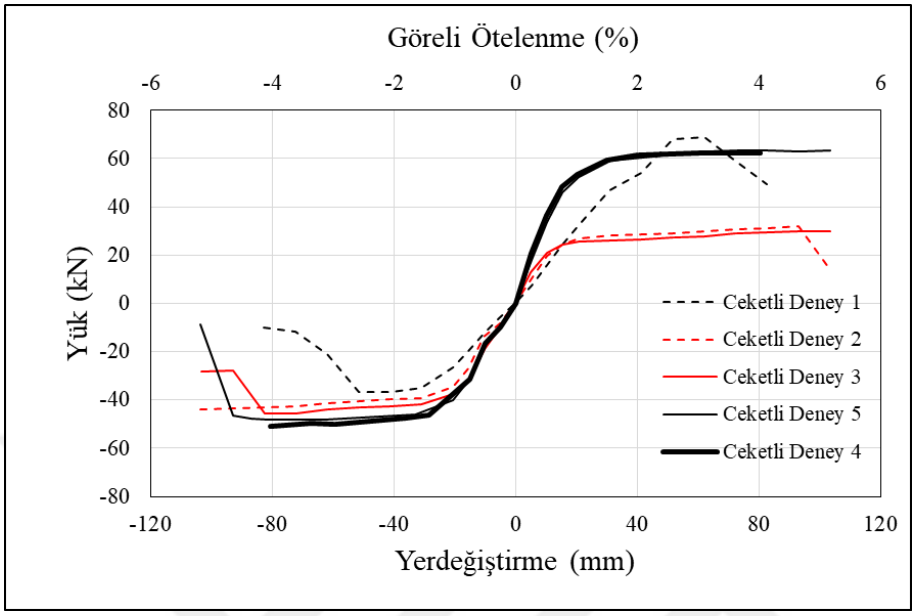


Şekil 3.122: Çelik ceket öncesi numunelerinde sönümlenen enerji değerleri-göreli ötelenme etkileşim diyagramları.

Enerji sönümleme grafikleri incelendiğinde üstte 2 altta 2 STMM düzenine sahip numunenin enerji sönümleme kabiliyeti, deneylerin başında üstte 3 altta 2 ile üstte 4 altta 2 STMM düzenine sahip numunelerde benzerlik göstermiştir. Fakat ilerleyen yükleme protokolü adımlarında yük taşıma kapasite kaybına bağlı olarak diğer numunelerden daha küçük çevrimler oluşturabilmiştir. Üstte 3 altta 2 STMM düzeni ile üstte 4 altta 2 STMM düzenine sahip numunelerin enerji sönümleme kapasiteleri ise birbirlerine yakın olmuştur. Sistemde iyileştirmeler sağlaması amacıyla tasarımında ilave levhalar bulunan 4 numaralı deney numunesi ise beklentinin aksine daha az enerji sönümleme değerlerine sahip olmuş; ek olarak yük taşıma ve süneklik kapasitesinde de gelişme elde edilememiştir.

Sigorta elemanlarda meydana gelen burkulma neticesinde süneklik, enerji sönümleme ve yük taşıma kapasiteleri sınırlı kalan STMM'lerin ceketsiz deneyleri kabul kriterlerini sağlayamamıştır. Çelik ceketli numune sonuçlarının karşılaştırılması ile deneylerin irdelemelerine devam edilmiştir.

Çelik ceket kullanılan kiriş kolon bağlantısı testlerinde elde edilen yük-yerdeğiştirme çevrimlerinin iskelet eğrileri çıkartılmış ve karşılaştırmalı olarak tek bir grafik üzerinde beraber gösterilmiştir (Şekil 3.123).

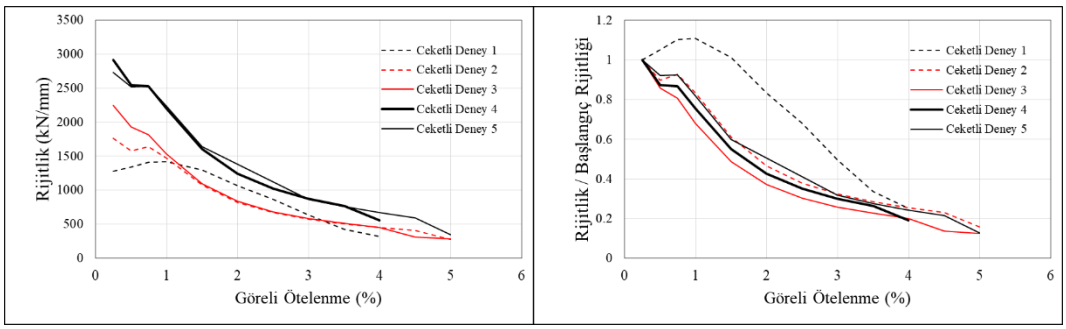


Şekil 3.123: Çelik ceketli deney numunelerine ait yük-yerdeğiştirme iskelet eğrileri.

Donatı düzeni üstte 4 adet altta ise 2 adet olan kiriş kolon birleşim deneylerinde iskelet eğrilerinin (siyah renkli eğriler) asimetrik davranış sergilediği görülebilir. Çekme ve itme taraflarında sırasıyla %2,5 ve %3 göreli ötelenme seviyelerinde en büyük kuvvet değerlerine ulaşılmıştır. Dayanım azalması, çekmede %3 düzeyinde sigorta elemanlarında oluşan burkulma nedeniyle gerçekleşmiştir. Üstte 2 adet altta da 2 adet donatı düzenine sahip deneylerde tek döngü ve üç döngü ile gerçekleştirilen yükleme protokolleri altında neredeyse benzer davranış elde edilmiştir. Kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin bir miktar asimetrisi vardır. Bu durum, betonarme kirişin kendi ağırlığından ve STMM'lerdeki boşluklardan kaynaklanmıştır. Deney sonlarında sigorta elemanları koparak taşıma gücünü kaybedene kadar %4,5 ve %5 ötelenme seviyelerine kadar ulaşılabildiği görülmüştür.

Deneyler sırasında değiştirilebilir mekanik plastik mafsaldaki rijitlik, her hedef göreli ötelenme seviyesinde itme ve çekme tarafındaki maksimum kuvvetleri birleştiren çizginin eğimi olarak hesaplanmıştır. Üç döngü ile yapılan testlerde rijitlik, her bir döngü için üç değerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Her bir hedef ötelenme değerinde rijitlik değerleri, deney numunesinin başlangıç rijitliği ile oranlanarak

birimsiz hale getirilmiş ve normalize edilmiştir. Rijitlik dağılımı ile normalize rijitlik oranlarına ait değişimler Şekil 3.124'de verilmiştir.

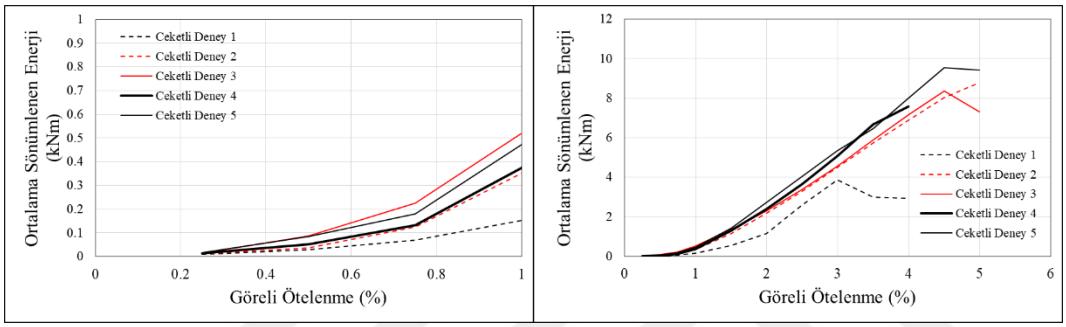


Şekil 3.124: Çelik ceket kullanılan deney numunelerine ait rijitlikler ile normalize edilmiş rijitlik-göreli ötelenme karşılaştırmaları.

STMM düzeni üstte 4 altta ise 2 çelik ceketli olarak oluşturulmuş olan 1 nolu deneyde değiştirilebilir mekanik plastik mafsal %1,5 ötelenme seviyelerinde 1300 kN/mm rijitlik değerine sahipken kademeli olarak 320 kN/mm değerine düşmüş, test sonunda rijitlik kaybı neredeyse %75 olmuştur. Hem üst hem de altta 2 sıra STMM içeren 2 ve 3 nolu çelik ceketli deneylerde de benzer bir rijitlik kapasite değişimi izlenmiştir. Yalnızca %0,25 ve %0,75 göreli ötelenme seviyelerinde grafikler arasında %10 ve %20 oranlarında bir fark dikkati çekmektedir. 2 nolu deneyde rijitlik değerleri deney başlangıcında 1763 kN/mm iken deney sonunda 278 kN/mm değerine düşmüştür. Benzer şekilde 3 nolu deneyde de sırasıyla 2250 kN/mm ve 280 kN/mm değerleri okunmaktadır. Üstte 4 ve altta 2 adet STMM'den oluşan ve çelik ceketlerin kullanıldığı 4 ve 5 nolu deneylerde ise numunelerin rijitlik değişimleri birbirlerine benzer grafikler meydana getirmiştir. Ayrıca beklendiği üzere rijitlikler diğer numunelerden çok daha yüksek değerlere ulaşmıştır. %0,25 göreli ötelenme değerlerinde verilerden elde edilen rijitlik 2820 kN/mm değeri iken %4 ötelenme seviyesinde 556 kN/mm ve deney sonu ötelenme seviyesi olan %5 seviyesinde de 348 kN/mm'dir. Rijitlik azalımları son iki deney için sırasıyla %80 ve %88 oranında gerçekleşmiştir.

Deneyler sırasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri içerisinde kalan kapalı alanlar hesaplanarak numunelerin taşıma kapasitelerine ulaşana kadar sönümledikleri enerji miktarları da çıkartılmıştır. Deneyler arasında karşılaştırma yapabilmek için hedef yerdeğiştirme değerinde üç çevrim yapılan deneylerde çevrimlerin ortalaması dikkate alınmıştır.

Her döngüde elde edilen enerji sönümleme kapasiteleri Şekil 3.125'de bir arada çizilerek karşılaştırılmıştır. Diğerlerine göre daha az çelik cekete sahip olan 1 nolu çelik ceketli deney numunesi, diğer numunelerin kapasite olarak altında kalmıştır. En fazla enerji sönümleme %3 göreli ötelenme sırasında 3,87 kNm değerinde oluşmuştur. Daha ileri seviyedeki yerdeğiştirmelerde enerji sönümleme kabiliyetini kaybetmiştir. Bunun en önemli nedeni üst sırada bulunan sigorta elemanların burkulmasıdır. Üstte ve altta 2 sıra donatı düzenine sahip numunelerde enerji sönümleme değerleri %5 göreli ötelenme hedefine kadar neredeyse aynı kalmıştır. Sigorta elemanlarda meydana gelen kopmalar ile enerji sönümleme özellikleri doğal olarak değişmiştir. Bir kapalı çevrimde sönümlenen en büyük enerji değeri sırasıyla 8,8 ve 8,4 kNm olmuştur.

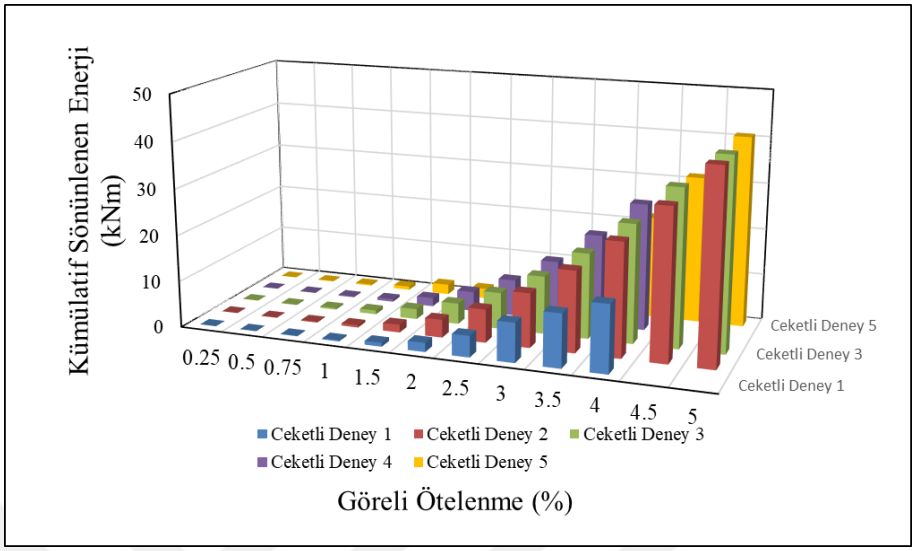


Şekil 3.125: Çelik ceketli numunelerde sönümlenen enerji değerleri-göreli ötelenme etkileşim diyagramları.

Üstte 4 altta 2 adet STMM düzenine sahip çelik ceketli numunelerin sönümlediği enerji, %2 ve üzerindeki bütün göreli ötelenme değerlerinde diğer numunelerin sönümlediği değerlerin üzerinde olmuştur. Üst sigorta elemanlarının hem sayısal fazlalığı hem de plastik şekildeğiştirmeleri ile sönümledikleri enerji miktarı bu duruma sebep olmaktadır. 4 nolu ceketli numune testi %4 göreli ötelenme seviyesinde 7,6 kNm değerinde enerji sönümleyebilmiştir. Aynı ötelenme düzeyinde 5 nolu numune testinde sönümlenen enerji değeri 8 kNm olmuştur. Üst STMM düzeninde çelik ceket bulunmayan 1 nolu deney numunesi ise 3 kNm enerji sönümlemiştir. Bu değerler, çelik ceket varlığının mekanik plastik mafsalda enerji sönümleyebilme kapasitesi ne denli katkı sağladığını ortaya koymaktadır.

Deneyler sonunda her bir numunenin sönümlediği toplam enerji miktarları, kümülatif dağılım düzeninde de oluşturularak grafiklendirilmiştir (Şekil 3.126). %4 göreli ötelenme değerinde kümülatif enerji, 1 nolu deney numunesi için 14,4 kNm olarak hesaplanmıştır. Buna karşılık 2,3,4 ve 5 nolu çelik ceketlerin kullanıldığı deney numunelerinde aynı ötelenme seviyesinde kümülatif sönümlenmiş enerji 22 · 27 kNm

aralığındaki değerler olmuştur. %4,5 ve %5 göreli ötelenme değerlerine ulaşabilen deney numunelerinde ise 32,6 kNm ve 41,1 kNm seviyelerinde enerji, kalıcı şekildeğiştirmeler ile sönümlenmiştir.



Şekil 3.126: Sönümlenen enerji değerleri-göreli ötelenme etkileşim diyagramları.

Elde edilen test sonuçları ACI 374.1-05 [62] yönetmeliğine göre bir değerlendirmeye tabi tutulmuştur. Değerlendirme sonuçlarının detayları aşağıda verilmiştir. Değerlendirme kriterleri olarak dayanım, rijitlik ve enerji sönümleme kapasiteleri irdelenmiştir. ACI 374.1-05'e göre; 0,035'lik bir göreli ötelenme oranından az olmamak kaydıyla kabulün irdelemesi için seçilen ötelenme hedefindeki çevrimler için, üçüncü tam çevrimin özellikleri aşağıdakileri istemleri karşılamalıdır;

- Hedef yerdeğiştirmedeki yatay yük değeri, yükleme protokolünde elde edilen en büyük yatay yük taşıma kapasitesinin %75'inden daha az olmamalıdır.
- -0,0035'lik ve +0,0035'lik öteleme oranları arasında kalan bölümün sekant rijitlikleri, başlangıç rijitliği ile oranlandığında 0,05'den az olmamalıdır.
- Bağıl enerji sönümleme oranı, kabulün istendiği göreli ötelenme seviyesindeki dikdörtgen çevrim alanının 1/8'inden az olmamalıdır.

Yönetmelikte belirtilen dayanım şartı için %3,5 göreli ötelenme oranı seviyesinde itme ve çekme yönündeki kuvvet değerleri ve en büyük yatay kuvvetler Çizelge 3.5'de bir araya getirilmiştir. Tabloda belirtilen F_{max} ve F_{min}, yükleme protokolünde elde edilmiş en büyük yük taşıma kapasitesini; $F_{+0,035}$ ve $F_{-0,035}$ ise %3,5 göreli ötelenme oranında okunan yatay yük değerini ifade etmektedir. 1 nolu çelik ceketli deneyde itme ve çekme taraflarında hedef yerdeğiştirmedeki yük değerlerinin ($F_{+0,035}$ ve $F_{-0,035}$)

yükleme protokolündeki en büyük yatay yük taşıma kapasitesileriyle (F_{max} ve F_{min}) oranları sırasıyla 0,85 ve 0,32 olarak hesaplanmıştır. Diğer deney numunelerinden elde edilen yük oranları da hesaplanmış ve 0,75 den daha büyük değerler elde edilmiştir. Bu sebeple 1 nolu deney hariç bütün deney numuneleri ACI 374 kuvvet taşıma kapasitesi kabul kriterini yerine getirmektedir.

Çizelge 3.5: %3,5 göreli ötelenme seviyesindeki yük ve en büyük kuvvet değerleri.

Deney Numunesi	F_{max} (kN) (a)	F_{min} (kN) (b)	$F_{+0.035}$ (kN) (c)	$F_{-0.035}$ (kN) (d)	(c) / (a)	(d) / (b)
Ceketli Deney 1	69,08	-36,90	58,95	-11,89	0,85	0,32
Ceketli Deney 2	31,87	-44,13	30,64	-42,08	0,96	0,95
Ceketli Deney 3	30,08	-45,79	28,83	-45,45	0,96	0,99
Ceketli Deney 4	62,48	-50,81	62,12	-49,61	0,99	0,98
Ceketli Deney 5	63,44	-48,32	63,23	-46,83	1,00	0,97

Tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeye maruz bırakılan her bir numunenin başlangıç rijitliği ile -0,0035 ve +0,0035'lik göreli ötelenme seviyeleri arasında kalan sekant rijitliği elde edilmiş ve Çizelge 3.6'da listelenmiştir. Rijitliklerin oranları 0,06 ve 0,19 aralığında kalmıştır. Sekant rijitliği 1 nolu ceketli deney hariç tüm numuneler için başlangıç rijitlik değerinin 0,05 katının üzerinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.6: Başlangıç rijitlikler ve sekant rijitlikleri.

Deney Numunesi	$K_{initial}$ (a)	$K'_{initial}$ (b)	$K_{(+0.0035-0.0035)}$ (c)	$K'_{(+0.0035-0.0035)}$ (d)	(c) / (a)	(d) / (b)
Ceketli Deney 1	3238	2166	627	-230	0,19	-0,11
Ceketli Deney 2	4961	2886	562	380	0,11	0,13
Ceketli Deney 3	4902	3451	629	442	0,13	0,13
Ceketli Deney 4	7766	4484	619	584	0,08	0,13
Ceketli Deney 5	7517	4860	443	499	0,06	0,10

ACI 374.1-05'e göre belirli bir çevrim için, bağıl enerji sönümleme oranı, yatay kuvvet-göreli ötelenme çevriminin içerisindeki alanın (A_h), etkili çevrimi saran parallelkenarların alanına bölümü (A) olarak belirtilmiştir. Bu oran değerinin ise 1/8'e eşit veya daha büyük olması gerekmektedir. Gerçekleştirilen deneylerde bağıl enerji sönümleme oranlarının hesaplanması için göreli ötelenme değeri 0,035 olarak belirlenmiş ve tüm numunelere ait sönümleme oranları Çizelge 3.7'de bir araya getirilmiştir.

Çizelge 3.7: Bağıl enerji sönümleme oranları.

Deney Numunesi	$A_{h(0.035)}$	$A_{0.035}$	β
Ceketli Deney 1	1.622	3.354	0.484
Ceketli Deney 2	2.729	3.574	0.764
Ceketli Deney 3	2.855	3.792	0.753
Ceketli Deney 4	3.227	5.704	0.566
Ceketli Deney 5	3.141	5.787	0.543

Üstte ve altta 2 adet STMM düzenine sahip olan 2 ve 3 nolu deney numuneleri, 0,75 olarak hesaplanan bağıl enerji sönümleme oranıyla en etkili enerji sönümleme özelliğine sahip olduklarını göstermiştir. Oran, üstte 4 altta 2 adet STMM bulunduran numuneler için en az 0,48 olmuştur. Tüm numunelerde bağıl enerji sönümleme oranları 1/8'in üzerindedir ve kabul kriterini karşılamaktadır.

3.2.4 Çerçeve deneyi

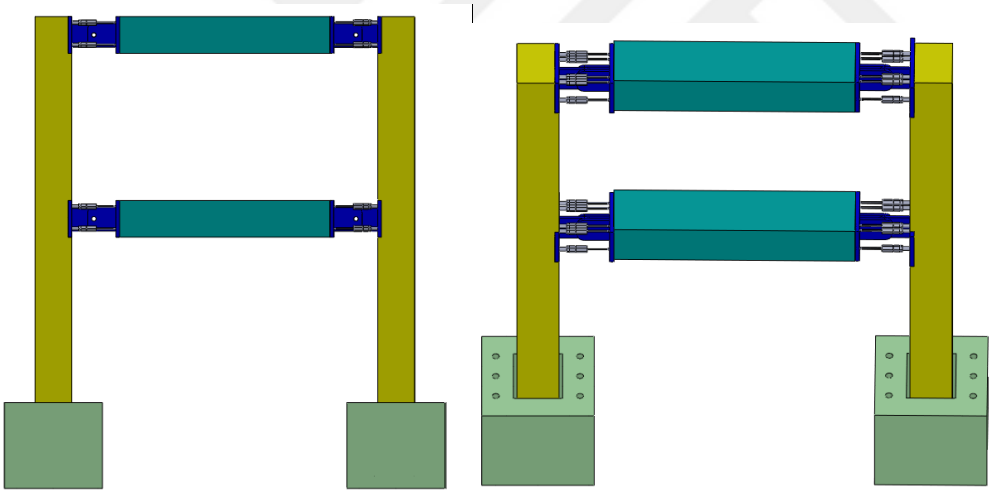
Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın kullanıldığı kiriş-kolon bağlantısı deneyleri tamamlanmış; sigorta tipi mekanik manşonun nihai haline karar verilmiştir. Buna rağmen deneylerden elde edilen sonuçlar ve oluşturulan yarı sistemde meydana gelen davranış mekanizması bazı kusurların olduğunu da göstermektedir. Bu kusurlardan ilki kiriş manşonlarının boyut olarak büyük olmasıdır. Bu sebeple deneylerin ilerleyen aşamalarında kiriş kabuk betonu manşon civarında çatlamakta, ilerleyen aşamalarda ise kirişten beton parçalar ayrılmaktadır. Bir diğer kusur ise mekanik plastik mafsalın kayma levhalarında oluşturulan mil yatağından ötürü meydana gelmektedir. Montaj toleransı sağlaması için oluşturulan yatak, tersinir tekrarlı yükleme sırasında kirişin kolon yüzeyinden aşamalı olarak uzaklaşmasına ve moment aktaran çerçeve sisteminde oluşması beklenmeyen yatay kiriş hareketine neden olmaktadır.

Bu kusurlardan ilki geometrik olarak revizyon yapılması ihtiyacı gösterirken ikinci kusur, mekanik plastik mafsalın çerçeve sistemindeki davranışının şimdiye kadar gerçekleştirilen yarı sistem deneyleri ile yeterince doğru yansıtılamadığını göstermektedir. Bu durum, bir çerçeve deney düzeneğinin oluşturulması ve sigorta tipi mekanik manşon ile değişitirilebilir mekanik plastik mafsal yönteminin bu çerçeve sisteminde test edilmesi ihtiyacını ortaya koymaktadır.

3.2.4.1 Çerçeve deney düzeneği

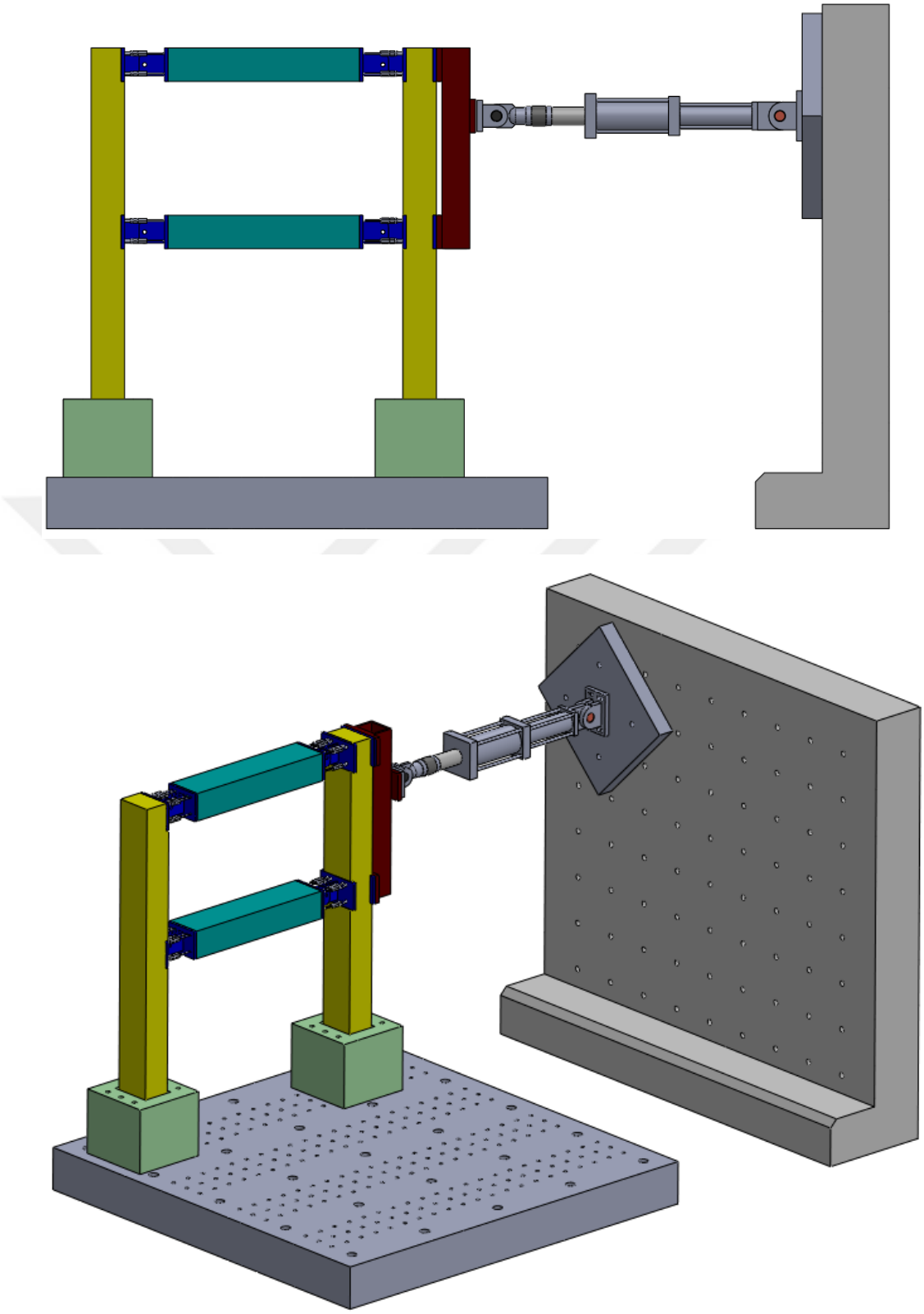
Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın taşıyıcı sistem içerisindeki davranışının test edilebilmesi için iki katlı ve tek açıklıklı önüretimli çerçeve sistemi tasarlanmıştır. Çerçeve deney düzeneğinde her bir kolon için birer soketli temel oluşturulmasına, her bir kirişin ise mekanik plastik mafsal bileşenleri ile kolon yüzeylerine bağlanmasına karar verilmiştir. Soket temellerde 6 adet montaj deliği bırakılmış, deneyler sırasında bu delikler aracılığıyla çerçeve sisteminin laboratuvar döşemesine bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Kirişlerin kolonlara bağlantıları sırasında ise kirişlerin her bir ucunda üstte 4 adet, altta ise 2 adet olmak üzere toplam 6 adet STMM bağlantısını sağlayan kiriş manşonu tasarlanmıştır.

Kiriş ve kolon elemanların kesitleri 30cm x 40cm olarak boyutlandırılmış; kesit genişlikleri, kesit derinliklerinden daha fazla seçilmiştir (Şekil 3.127). Buradaki amaç; düzlem çerçeve olarak gerçekleştirilen çerçeve deneyi sırasında deney sisteminde oluşabilecek düzlem dışı davranışların mümkün olduğunca en aza indirgenebilmesidir.



Şekil 3.127: Çerçeve deneyi için oluşturulan öntasarım.

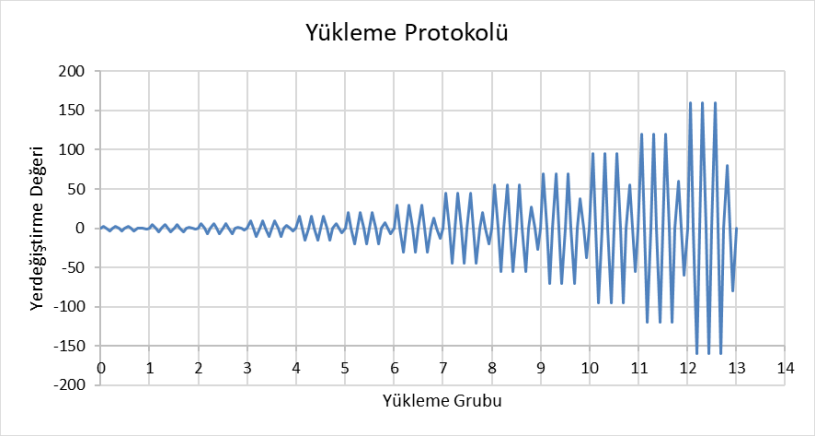
Oluşturulacak çerçeve deney düzeneği, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında bulunan yükleme duvarı önünde ve adaptör temel üzerinde gerçekleştirileceği için deney düzeneğine ait boyutlar için sınırlama getirilmesi zorunluluğu oluşmuştur. Yükleme duvarına yerleştirilecek hidrolik yükveren için konumlandırılabilecek en fazla yükseklik adaptör temel yüzeyinden itibaren 4m olabilmektedir. Adaptör temel üzerine yerleştirilebilecek deney numunesinin uzunluğu da 5m ile sınırlandırılmıştır (Şekil 3.128). Mevcut parametreler dikkate alınarak laboratuvarda kurulacak deneye ait ölçeğin 1/2 olmasına karar verilmiştir



Şekil 3.128: Yükleme duvarı önündeki çerçeve deneyinin görünümü.

Deney sırasında hem üst hem de alt kat düzeylerinde birbiriyle uyumlu deplasman protokolü oluşması tercih edilmiştir. Üst ve alt kirişe iki ayrı hidrolik yükveren bağlantısı oluşturmak, kontrollü yük artımının uyumluluğunun teknikere bağımlı hale gelmesi anlamına geliyordu. Bunun yerine üst kat kirişinden 50 cm aşağıda, alt kat kirişinden ise 100 cm yukarıda olacak şekilde tek bir hidrolik yükveren konumlandırılmıştır. Yeter mertebede rijitliğe sahip çelik profilden imal edilmiş bir yük dağıtıcısı da hidrolik yükverene bağlanmış ve kiriş hizalarından çerçeveye yük aktaracak şekilde deney düzeneğine montajı gerçekleştirilmiştir. Bu düzenleme ve yukarıda sıralanan kısıt parametreleri sonucunda deney çerçevesinde kolon yükseklikleri 300 cm, kiriş uzunlukları 172 cm, mekanik plastik mafsalların bağlantı bölgeleri 36 cm, soket temel yükseklikleri 80 cm olarak belirlenmiştir.

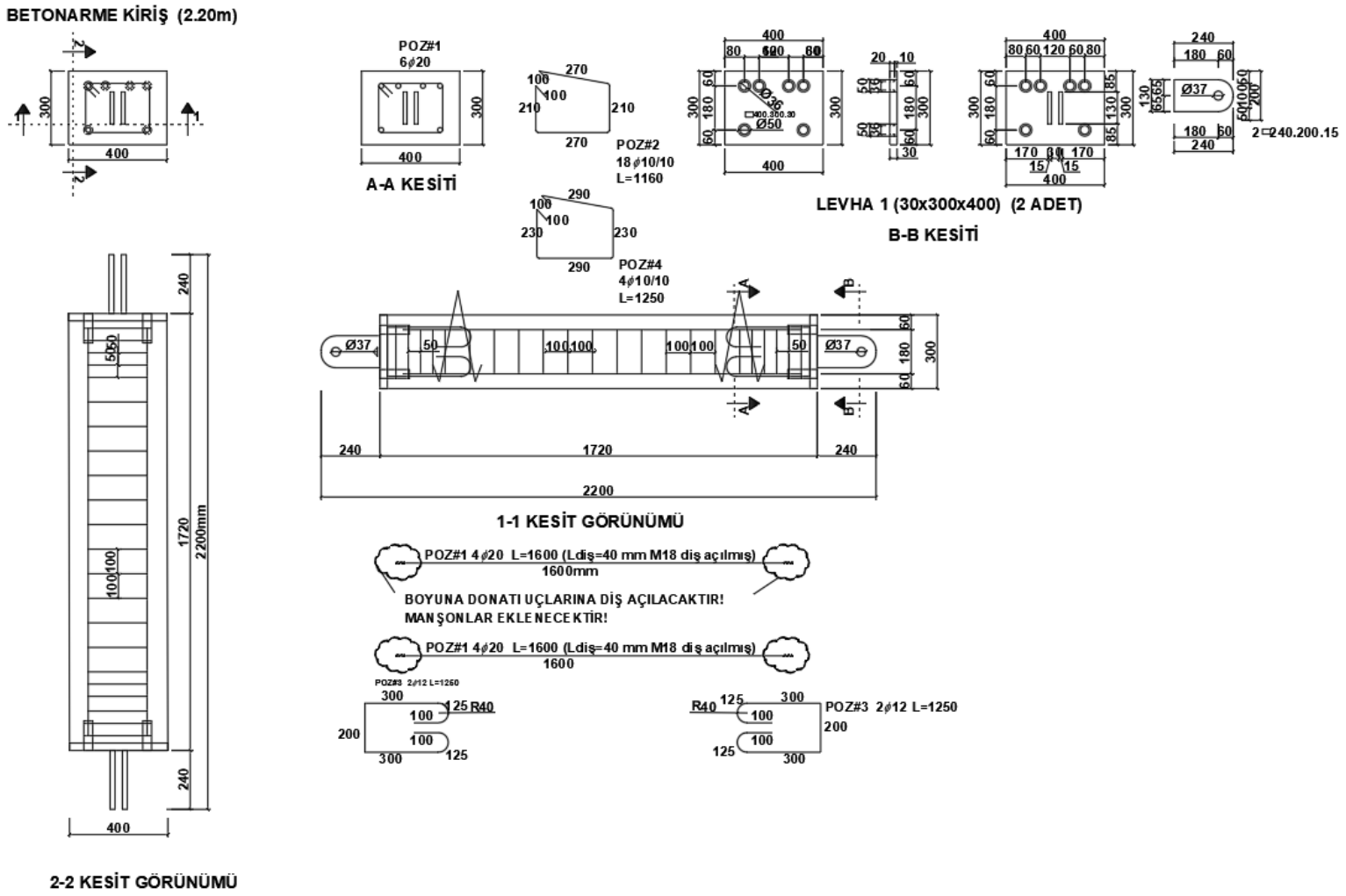
Çerçeve deneyi sırasında artan genlikli tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme protokolü uygulanmıştır. Her genlik değeri STMM elemanlar ile oluşturulan çerçeve sisteminin katlarında oluşacak rölatif kat öteleme değerlerine karşı gelmektedir. Bu değerler sırasıyla 0,0011, 0,0016, 0,0023, 0,0035, 0,0053, 0,0070, 0,0105, 0,0158, 0,0193, 0,0246, 0,0333, 0,0421 ve 0,0561 olarak belirlenmiştir. Kat yüksekliği, hidrolik yükverenin konumu ve geometrik yükseklikler dikkate alınmış, hidrolik yükverenin merkezinden tekil soketli temellerin üst yüzeyine olan moment kolu mesafesi 2,5 m. olarak tespit edilmiştir. Moment kolunun değeri kullanılarak kat öteleme değerleri hidrolik yükverendeki yerdeğiştirme genliklerine çevrilmiştir. Bu değerler mm cinsinden sırasıyla 3,00, 4,50, 6,50, 10,00, 15,00, 20,00, 30,00, 45,00, 55,00, 70,00, 95,00, 120,00 ve 150,00'dir. Her bir genlik için 3 çevrim gerçekleştirilmiş, ardından daha düşük genliğe sahip bir elastik çevrim sisteme etkitilmiştir. Uygulanan yerdeğiştirme protokolü Şekil 3.129'da verilmiştir.



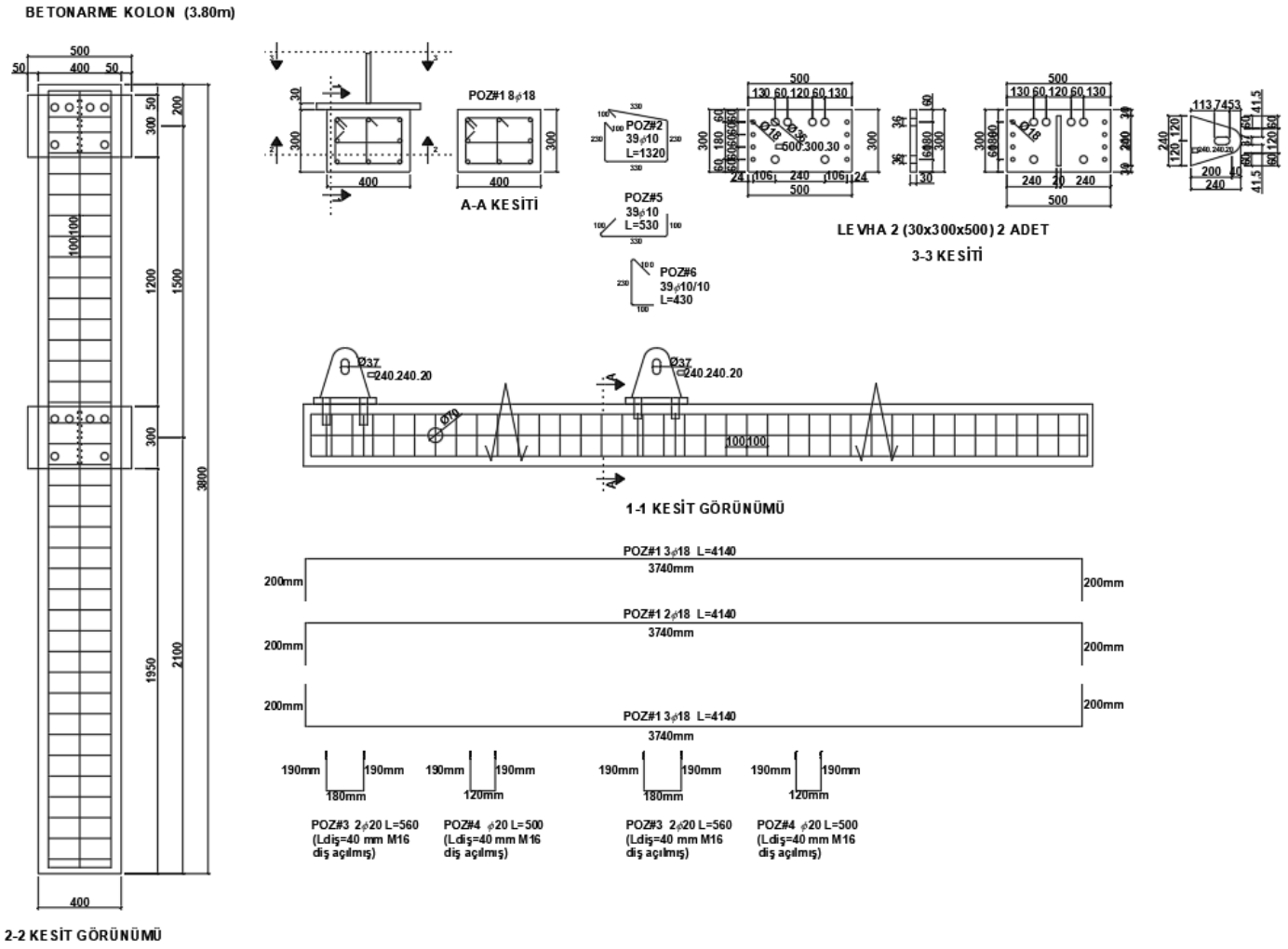
Şekil 3.129: Çerçeve deneyi için oluşturulan yükleme protokolü.

3.2.4.2 Çerçeve deneyine ait numunelerin ürettirilmesi

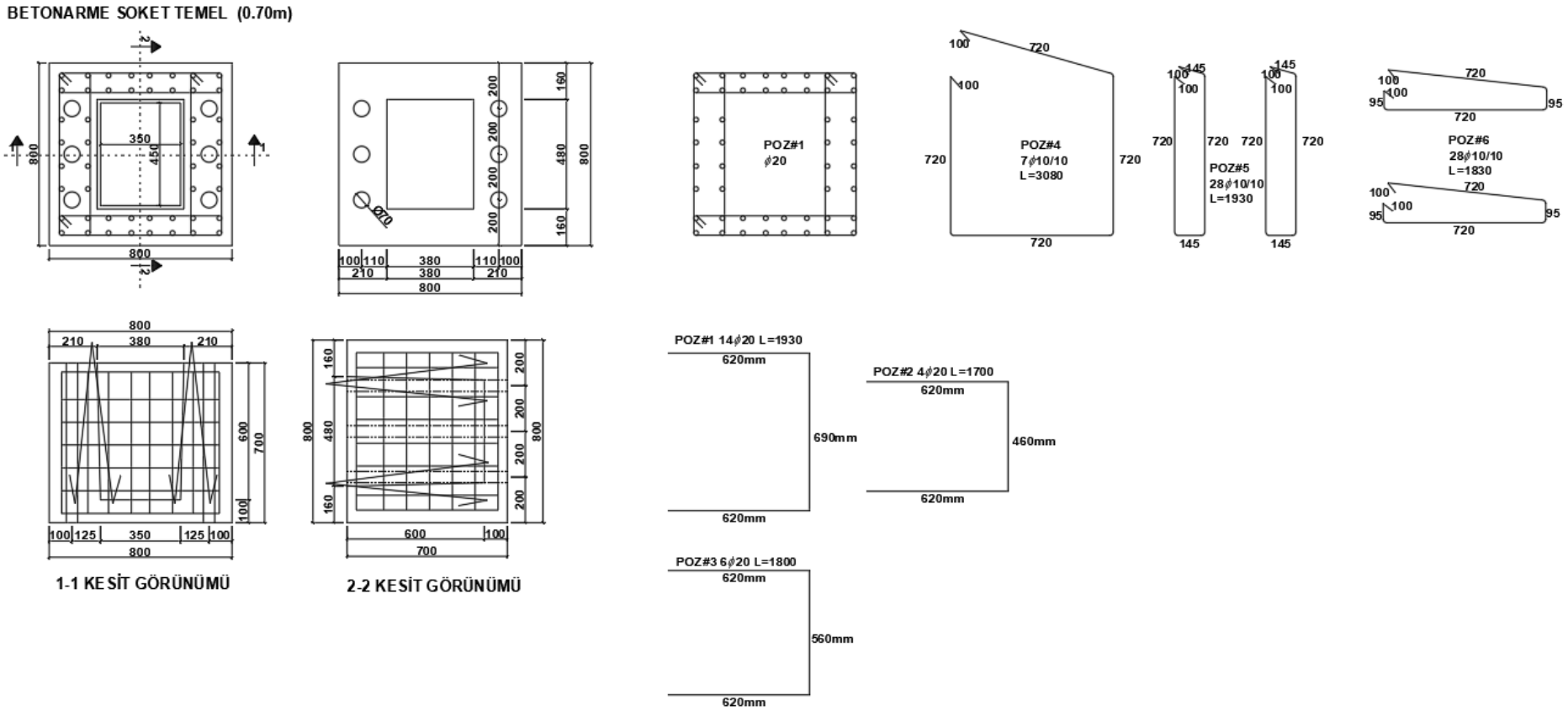
Gerçekleştirilen çerçeve deneyini oluşturan önüretimli betonarme numuneler 2 adet kiriş, 2 adet soket temel ve 2 adet kolondan meydana gelmektedir. Bütün elemanlar birbirlerinin eşleniği olarak ürettirilmiştir. Ayrıca kolon elemanlarda ve kiriş elemanlarda kullanılacak olan manşonlar da önceden imal edilmiş ve önüretimli betonarme elemanların içerisine üretim sırasında yerleştirilmiştir. Kolon, kiriş ve soket temel elemanlar için oluşturulan teknik çizimlerin bir kopyası Şekil 3.130, Şekil 3.131 ve Şekil 3.132'de verilmiştir.



Şekil 3.130: Çerçeve deneyine ait kirişlerin teknik çizimleri.



Şekil 3.131: Çerçeve deneyine ait kolonların teknik çizimleri.



Şekil 3.132: Çerçeve deneyine ait soket temellerin teknik çizimleri.

Deney düzeneğinin adaptör temelde kurulacağı yerde bulunan ankraj deliklerine montajı için 6 noktadan uygun şekilde ankraj çubuklarıyla bağlanması gereklidir. Bu 6 noktanın birbirlerine mesafesi ve soketin alanı dikkate alındığında soketli temel numulerinin boyutlarının 80cm x 80cm kare bir geometri olacağı ortaya çıkmıştır. Ankraj delikleri için 40 cm aralıkla iki sıra yuva bırakılmıştır. Her bir sıradaki delik yuvaları 20 cm aralıklıkta mesafeye ve 70mm çapa sahiptir.

Kolonların soket temeller içerisinde yerleşimi için kabul edilen etkili yükseklik 60 cm olarak belirlenmiş, soket temelin altında bulunacak betonarme yükseklik de düşünülerek temel yüksekliği 70 cm olarak kararlaştırılmıştır. Kolon boyutları 30cm x 40cm olarak tasarlandığı için tekil temellerin soket cepleri, yerleştirme toleransı ve harç dolgunun hacmi düşünülerek soket dibinde 35cm x 45cm, soket ağzında 38cm x 48cm olarak belirlenmiştir. Soket temele ait donatı düzeni, kalıp düzeni ve ankraj yuvalarına ait görseller Şekil 3.133'te verilmektedir.



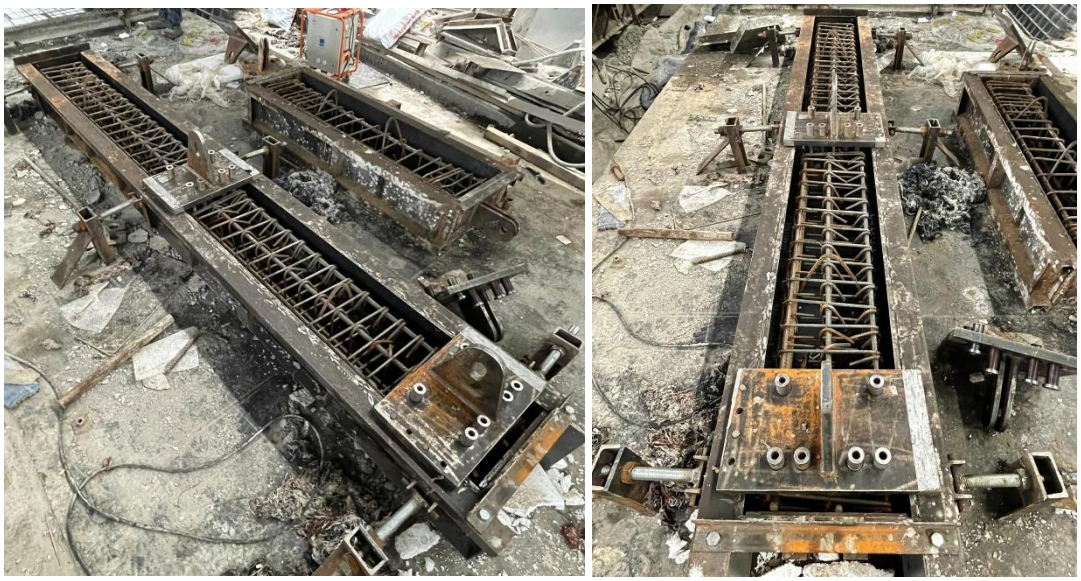
Şekil 3.133: Soket temel üretim görselleri.

Çerçeve deneyine ait kolon elemanların kesitleri 30cm x 40cm, çerçeve yüksekliğinin ise 300cm olacağı ön tasarım ile belirlenmişti. Soket temel içerisinde yerleştirilecek kolon ucu ile ikinci kat kirişi bağlantısı sırasında gerekli olan kolon uzunluğu

hesaplanmış, kolon elemanların net uzunluklarının 380cm olması gerektiği ortaya çıkmıştır. 8 adet Φ18 boyuna donatıya sahip kolon donatı kafesi 10 cm aralıkla yerleştirilmiş etriye ve çirozlar ile oluşturulmuştur.

Kalıplara yerleştirilen her bir kolonun bir yüzüne kiriş montajı sırasında mekanik plastik mafsal bağlantılarının gerçekleştirileceği iki adet alın levhası yerleştirilmiştir. Her bir alın levhasına 36mm çapında 6 adet yivli delik açılmış ve STMM'lere ait kolon manşonları bu yivli deliklere yerleştirilmiştir. Ayrıca deneyler sırasında hidrolik yük veren ve yük dağıtıcısının bağlantısının yapılabilmesi için 8 adet 18mm çapında delikler açılmıştır. Alın levhalarının kolon ile kenetlenebilmesi ve başarılı şekilde iç kuvvetlerin aktarılmasının sağlanabilmesi için her bir kolon manşonuna, kolon içerisine uzatılmış sakallar uygun diş açılarak bağlanmıştır.

Çerçeve deneyinin kiriş elemanları da kolonlar gibi 30cm x40cm kesit geometrilerine sahiptir. 172cm uzunluğa sahip olan kirişlerin donatı kafesi ise 6Φ20 boyuna donatı ve 10mm aralıkla yerleştirilmiş etriyelerden meydana gelmektedir. Kolonlardan farklı olarak kiriş boyuna donatıların uçlarına, kiriş manşonlarına bağlanabilmesi için dişler açılmıştır. Kiriş uçlarına alın levhaları yerleştirilmiş, her bir alın levhasına kiriş manşonlarının yerleştirilmesini sağlayan 36mm çapında 6 adet yivli delik açılmıştır. Kiriş boyuna donatıları bu deliklere yerleştirilen kiriş manşonlarına bağlanarak alın levhaları ile kiriş arasında süreklilik sağlanmıştır. Kiriş ve kolonlara ait donatı düzeni, kalıp düzeni ve alın levhalarına ait detaylar Şekil 3.134'te mevcuttur.



Şekil 3.134: Düzlem çerçeveye ait kolon ve kirişlerin üretim görselleri.



Şekil 3.134 (devam): Düzlem çerçeveye ait kolon ve kirişlerin üretim görselleri.

Bütün betonarme elemanlara C30 sınıfı beton dökümü gerçekleştirilmiş, priz süreleri tamamlanınca kalıptan çıkarılmışlardır. Beton dökümü sırasında korunması amacıyla kiriş ve kolonlara yerleştirilen manşonlar ile ankrajların deliklerinin üzerileri kapatılarak korunmuştur. Numunelerin priz almış, kalıptan çıkarılmış ve artık mekanizmalardan temizlenmiş hallerine ait görseller Şekil 3.135'te görülmektedir.



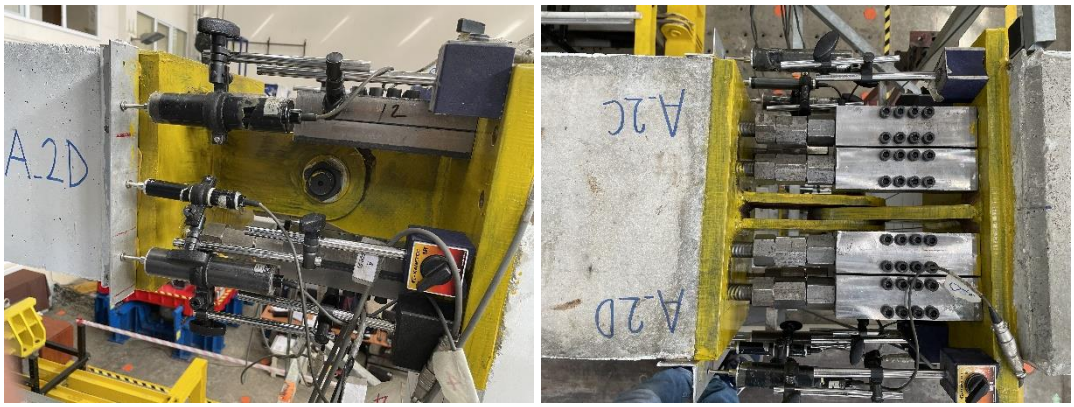
Şekil 3.135: Düzlem çerçeve taşıyıcı elemanların üretim görselleri.



Şekil 3.135 (devam): Düzlem çerçeve taşıyıcı elemanların üretim görselleri.

3.2.4.3 STMM düzeni, ölçüm düzeneği ve hasar oluşumları

Düzlem çerçeve deneyi sırasında deney düzeneğinde kullanılan kiriş elemanlarına ait detaylar önceki başlıkta verilmişti. Bu detaylara bakıldığında kiriş boyuna donatı düzeni olan üstte 4 ve altta 2 adet olan nervürlü Φ20 dizilim görülmektedir. Boyuna donatı çaplarına ve kiriş moment kapasitesine uygun mekanik plastik mafsal meydana getirebilmek için 42 mm manşon çapına sahip STMM'ler kullanılmıştır. Dizilim düzeninde ise kiriş boyuna donatı düzenine sadık kalınarak üst sırada 4 STMM, alt sırada ise 2 STMM kullanılmıştır. STMM'lere ait sigorta elemanların tamamı çelik ceketler ile kapatılmıştır (Şekil 3.136).



Şekil 3.136: Düzlem çerçeve deneyine ait STMM düzeni.

Çerçeve düzeneğinde bulunan kirişler eşlenik oldukları için bütün plastik mafsallardaki STMM düzeni de eşlenik olarak meydana getirilmiştir. Tersinir tekrarlı yüklemeler sırasında kirişlerde önemli çatlaklar olması beklenmemekle birlikte kolonlar için aynı durum söz konusu değildir. Bunun sebebi, laboratuvar altyapı koşullarının oluşturduğu kısıtlardan ötürü çerçeve düzeneğinde güçlü kolon zayıf kiriş prensibine uygun kolon boyutlandırması yapılamamış olmasıdır. Bu nedenle çatlak takibini kolay yapabilmek ve dağılımını gözlemleyebilmek amacıyla kolon elemanların her birine 10 cm aralıklarında karelaj uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Çevrimsel yükleme verebilmek amacıyla deney düzeneğine bir adet hidrolik yükveren bağlanmış, tasarım aşamasında planlandığı gibi konum olarak 4m kotunda yatay olarak konumlandırılmıştır. Bağlantı için bir yük dağıtıcı profil oluşturulmuş, bu profil birinci ve ikinci kat kirişleri hizalarında kolon elemanlara bağlanmıştır. Kolona yapılan montaj için kolon alın levhalarında bırakılan kulaklara delikler açılmış, bu deliklerden geçirilen çelik tijler ile yük dağıtım profiline bağlantı gerçekleştirilmiştir. Montajı tamamlanan deney düzeneğinin genel görüntüsü Şekil 3.137'de incelenebilir.

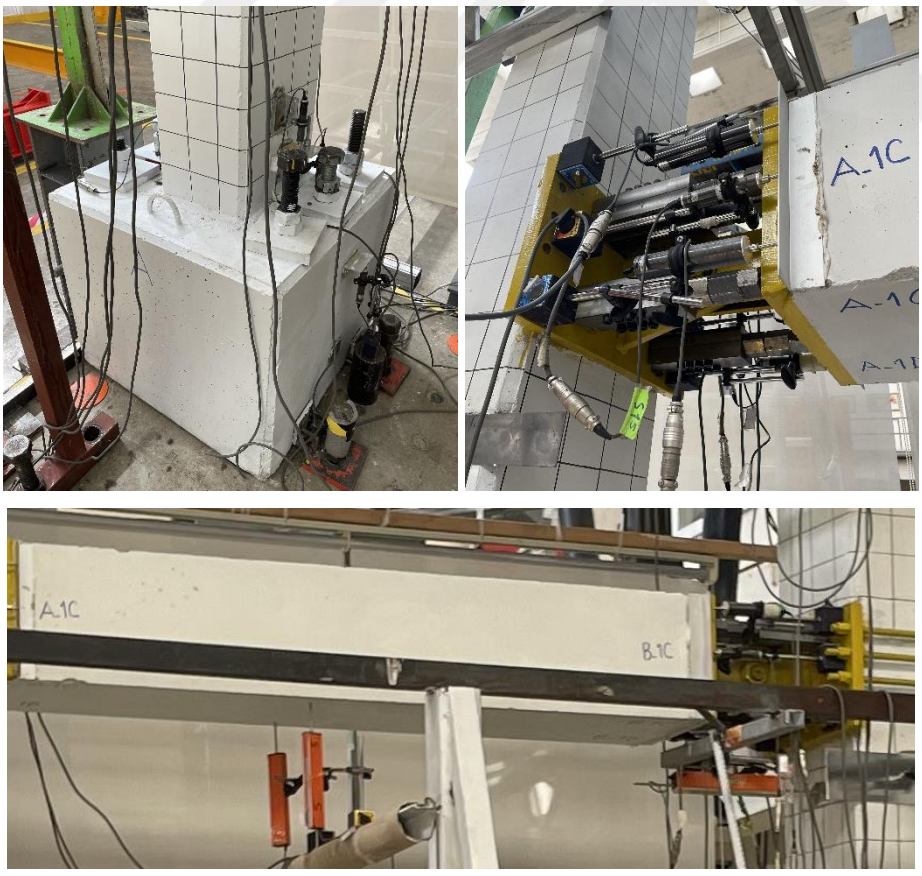


Şekil 3.137: Düzlem çerçeve deneyine ait genel görünüm.

Deney düzeneğinin büyüklüklüğü ve mekanik plastik mafsal davranışının bilinmezliği göz önüne alınarak ölçüm düzeneği çerçeve üzerinde 50'ye yakın noktadan veri

toplayacak şekilde oluşturulmuştur. Bütün veri toplama aletleri yerdeğiştirme ölçerlerden meydana gelmektedir. Çelik ceketlerin varlığı, plastik şekildeğiştirmelerin yoğunlaşmasının öngörüldüğü sigorta elemanlardan veri alınmasına engel olduğu için deney sırasında şekildeğiştirme ölçerler kullanılamamıştır.

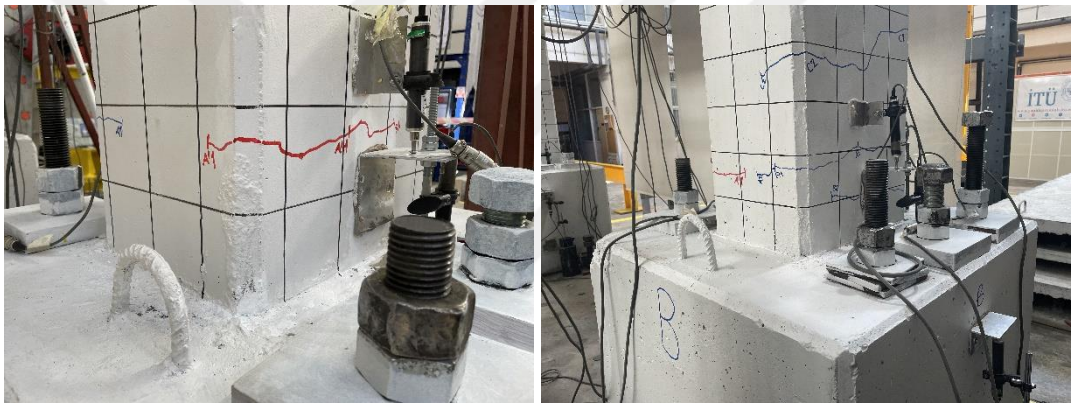
Veri toplama noktalarının bazıları kontrol amacıyla, bazıları ise yerdeğiştirmelere bağlı olarak çerçeve yatay kuvvetine bağlı yerdeğiştirme kapasiteleri, kesit dönme kabiliyetleri ve sönümlenen enerji değerlerini tespit etmek için belirlenmiştir. Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleri ise sırasıyla; soket temellerin yanında düşey ve yatay yerdeğiştirmeleri ölçmek; kolonların alt uçlarında iki farklı yükseklikte farklı yerdeğiştirme değerlerini kayıt altına almak ve buna bağlı kesit dönmelerini tespit etmek; kolonların kiriş hizalarında yatay yerdeğiştirmelerini görebilmek; değiştirilebilir mekanik plastik mafsallarda her bir STMM hizasında ve kayma mafsalı düzeyinde davranışını veri olarak toplamak ve kirişlerin ortası ile kolonların düzlem dışı yüzeylerinde meydana gelen yerdeğiştirmeleri izleyebilmek gibi amaçlarla yerleştirilmiştir. Ölçüm düzeneğine ait bazı görseller Şekil 3.138'de verilmektedir.



Şekil 3.138: Düzlem çerçeve ölçüm düzeneğine ait yerdeğiştirme ölçerler.

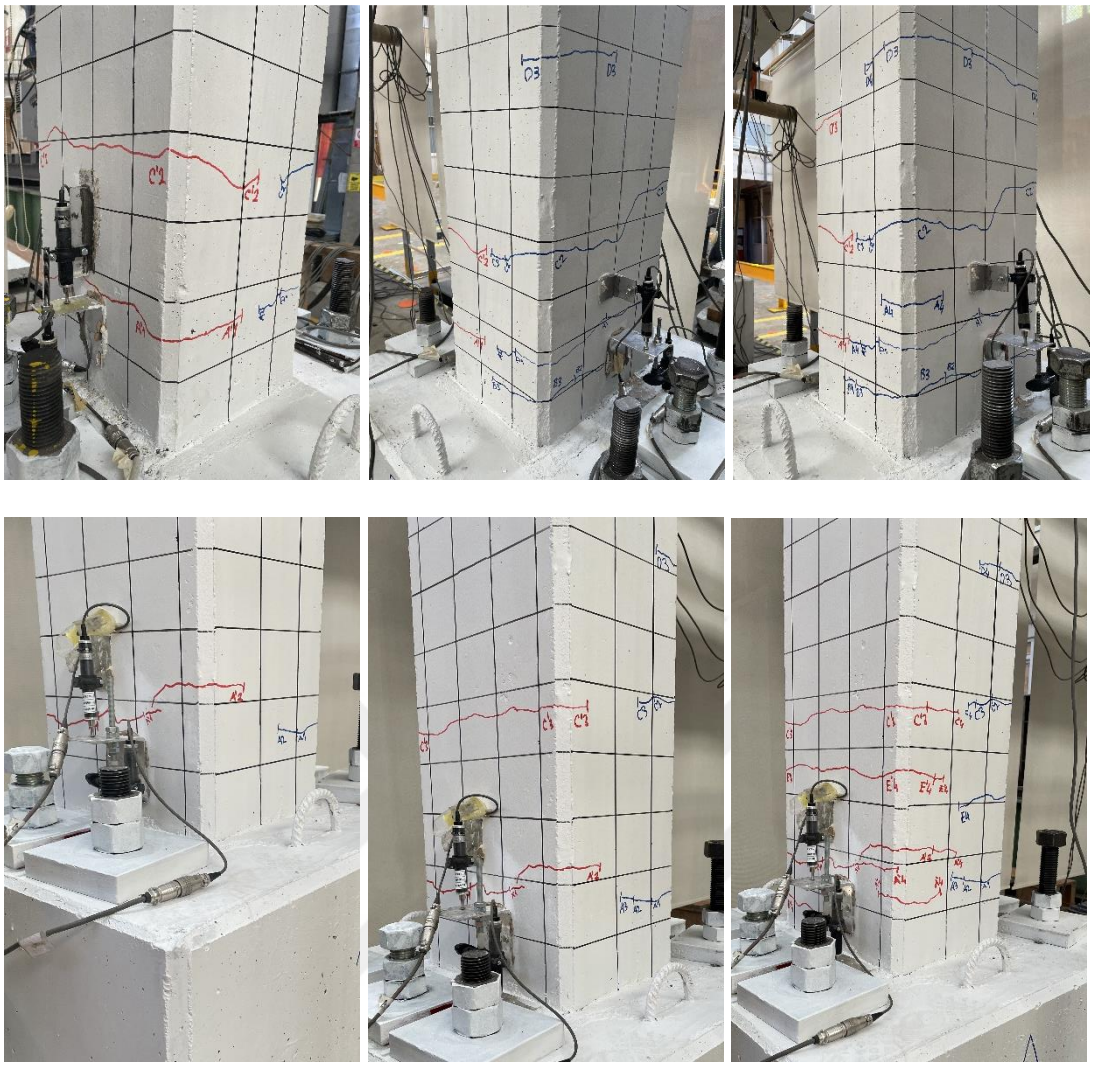
Düzlem çerçeve deneyi sırasında hidrolik yükveren aracılığıyla önceden belirlenmiş olan yükleme protokolüne uygun olacak şekilde her bir yerdeğiştirme hedefinde 3 çevrimsel yükleme gerçekleştirilmiştir. Yerdeğiştirme hedeflerinin 3. çevrimsel yükleme adımlarının pozitif ve negatif yönlü pik değerlerinde kirişler, kolonlar, STMM'ler ve kayma levhaları kontrol edlmiş, oluşan hasarların hangi aşamada ve hangi bölgelerde olduğu kayıt altına alınmıştır. Düzlem çerçeve deneyi sırasında meydana gelen hasar oluşumu, deney tarihçesi ve tespit edilmiş önemli durumlar aşağıda sırasıyla verilmektedir.

Yerdeğiştirme hedefinin 3mm olduğu, göreli kat öteleme değerinin ise %0,10'a denk gelen çevrimsel yükleme aşamasında sistem lineer elastik davranış sergilemiştir. Buna karşın çerçeve sistemine ait kolonların temel ile birleştiği bölgede kılcal çatlaklar tespit edilmiştir (Şekil 3.139).



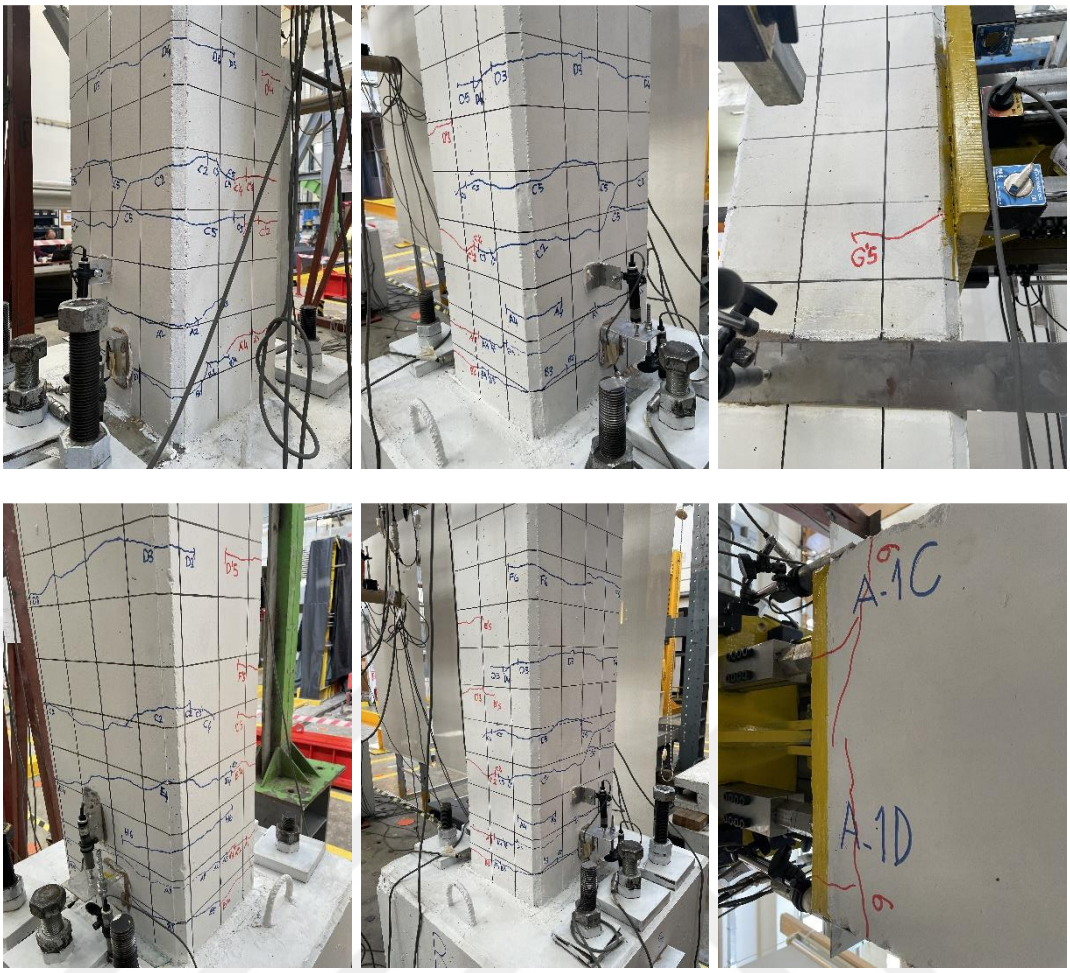
Şekil 3.139: 3mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

Yükleme protokolündeki diğer yerdeğiştirme hedefleri olan 4,5mm, 6,5mm ve 10mm değerlerine ait tersinir tekrarlı çevrimsel yüklemeler sırasında (kat öteleme değeri sırasıyla %0,16, %0,23 ve %0,35) her iki kolonun alt uçlarında oluşan çatlakların sayısı ve derinliğinin arttığı görülmüştür. Kirişler ve mekanik plastik mafsalı oluşturan bileşenlerde ise bu yükleme adımlarında meydana gelen herhangi bir durum oluşmamıştır. Hidrolik yükveren tarafından sisteme aktarılan yatay yük değeri ile ölçümlerden alınan tepe yerdeğiştirme değerlerine bakıldığında ise düzlem çerçevenin elastik sınırlar içerisinde olduğu ve etkileşim grafiğinin lineer olarak artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu adımlarda oluşan hasar görselleri Şekil 3.140'da verilmiştir.



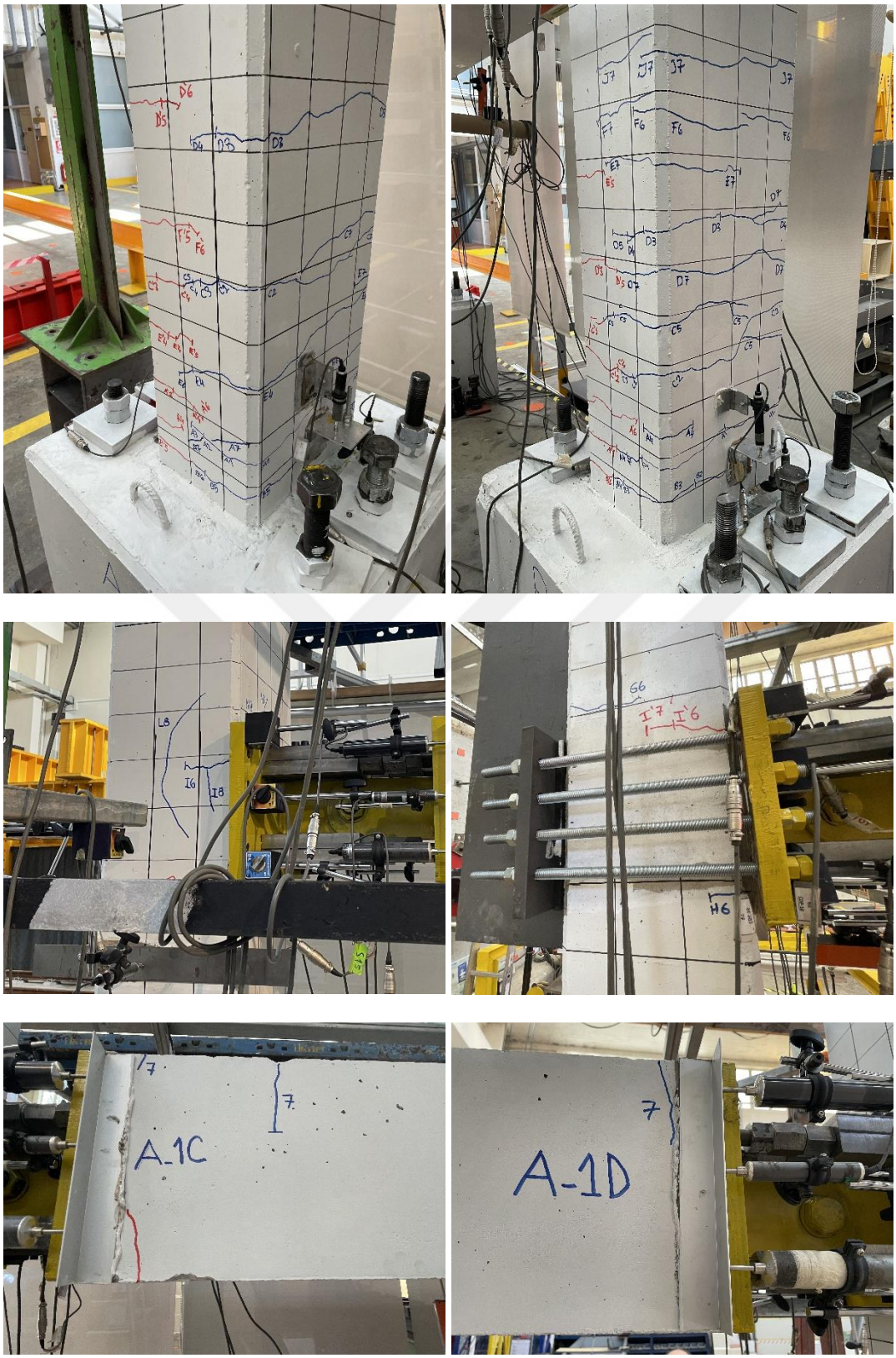
Şekil 3.140: 4,5mm, 6,5mm ve 10mm yerdeğiştirme hedeflerinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

15mm yerdeğiştirme hedefine (% 0,53 göreli kat öteleme oranı) karşılık gelen tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme sırasında kolonlarda genişleyen ve artan çatlaklara ek olarak yeni hasarlar gözlemlenmiştir. Bu hasarlar alt kat hizasında, hidrolik yükverene uzak olan kolonun alın levhası civarında meydana gelmiştir. 20mm yerdeğiştirme hedefinde ise (% 0,70 göreli kat öteleme oranı) yükleme adımları sonrasında mevcut hasarların gelişimine ek olarak kolon alın levhasındaki çatlakların hemen karşısındaki kiriş alın levhası alt ucu civarında yeni çatlaklar meydana gelmiştir. Çatlak genişlikleri ve uzunlukları çok fazla olmamakla birlikte yük – yerdeğiştirme değerleri kıyaslandığında hâlâ elastik davranış bölgesinde olunması bu hasarları değerli kılmaktadır. Oluşan hasarların görselleri Şekil 3.141'de sunulmuştur.



Şekil 3.141: 15mm ve 20mm yerdeğiştirme hedeflerinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

Tersinir tekrarlı yükleme protokolünün 30mm yerdeğiştirme adımı sırasında (%1,05 göreli kat öteleme oranı) hidrolik yükverenden alınan yük-yerdeğiştirme karşılaştırmalı verilerinde doğrusallıktan uzaklaşmaya başlayan değerler elde edilmiştir. Bu durum çerçeve düzlemindeki bazı kesitlerde kalıcı şekildeğiştirmelerin oluştuğunu göstermektedir. Yapısal elemanlardaki hasar durumlarına bakıldığında ise kolon alt uçlarında çatlak sayısı ve genişliklerindeki artış bu kesitlerde plastik mafsalın oluştuğunu ispatlamaktadır. Ayrıca 1. kat düzleminde, kolon elemanların her ikisinde de çatlaklar oluştuğu veya mevcut çatlakların yüzey boyunca ilerlediği görülmüştür. 1. kat kirişinde ise çatlak oluşmayan eşlenik uçta yeni kılcal çatlak oluşmakla birlikte kolonlardaki hasar oluşumuna kıyasla kontrollü kaldığı gözlenmiştir. Bu adıma ait hasar görünümleri Şekil 3.142'de incelenebilir.



Şekil 3.142: 30mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

Yükleme protokolünün bir sonraki adımları olan 45mm (%1,58 göreli kat öteleme oranı) tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme adımları sırasında tespit edilen hasar

bölgelerinin dışında yeni bir hasar oluşumu gözlenmemiştir. Kolonların alt uçları ile 1. kat hizasında bulunan kesitlerde tespit edilmiş çatlaklar ilerlemiş ve kolon altlarında oluşan plastik mafsalın mekanik karakteristik özelliklerine bağlı olarak düzlem çerçeve davranışına devam etmiştir.

55mm yerdeğiştirme hedefli ve %1,93 göreli kat öteleme oranına tekabül eden tersinir tekrarlı çevrimsel yükleme aşaması sırasında düzlem çerçeve sisteminde kalıcı şekildeğiştirmelerin olduğu ölçüm sisteminden elde edilen verilerle tespit edilmiştir. Kolon alt uçlarında plastikleşmeler artmış, çatlak miktarı ve çatlak derinlikleri oldukça fazlalaşmış ve kalıcı şekildeğiştirmeler ve yerdeğiştirmeler oluşmaya başlamıştır. 55mm çevrimsel yerdeğiştirme protokolü sonrası kolonlarda bulunan hasar durumları Şekil 3.143'de mevcuttur.



Şekil 3.143: 55mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

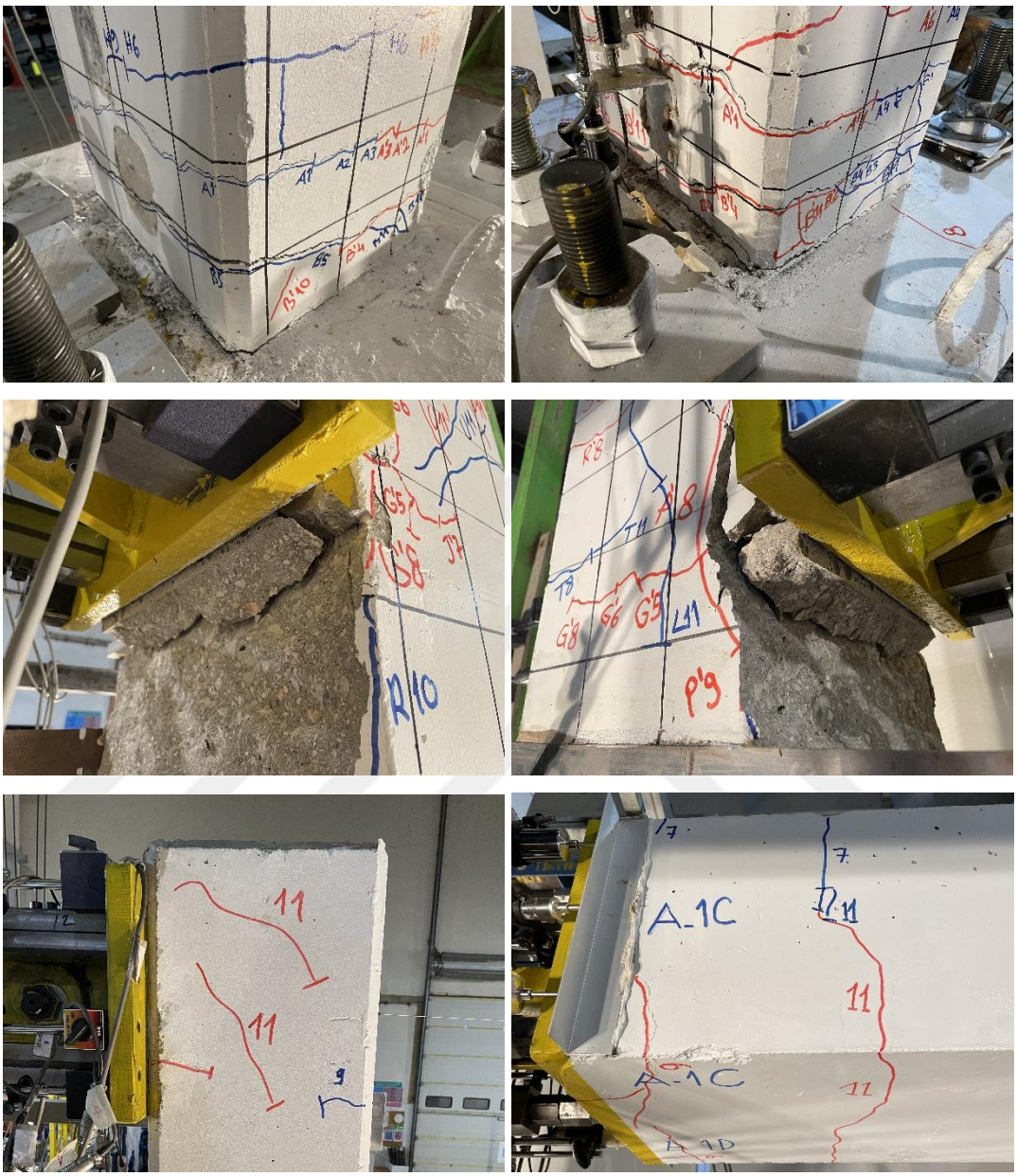
70mm yerdeğiştirmeyi içeren (%2,46 göreli kat öteleme oranı) yerdeğiştirme protokolünün gerçekleştirilmesi sırasında düzlem çerçeve sisteminde kolonların 1. kat kirişi hizasında bulunan beton bölgelerinde çatlak miktarları artmıştır. Kolon alt uçlarında oluşan kalıcı şekildeğiştirmelerin artması neticesinde yatay yük - yerdeğiştirme etkileşim grafiğinde de yatıklaşan çevrimsel eğriler elde edilmiştir. Şekil 3.144'de bu aşamaya ait hasar görselleri verilmiştir.



Şekil 3.144: 70mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

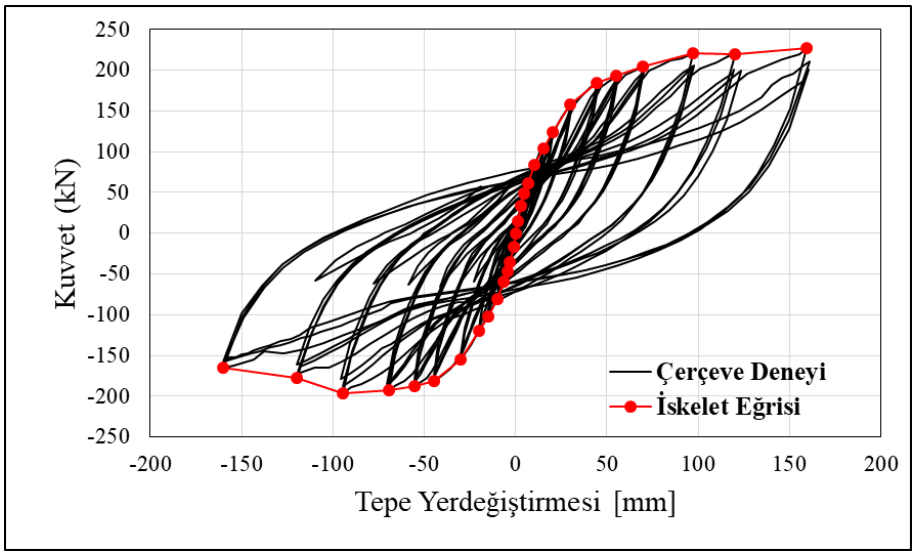
%3,33 göreli kat öteleme değerinin oluşmasını sağlayan 95mm tersinir tekrarlı yerdeğiştirme adımı sisteme etkitildiğinde kalıcı şekildeğiştirmelerin oluşumunu fiziksel olarak gözlemlemek daha mümkün olmaya başlamıştır. Kolonların alt uçlarında oluşan plastik mafsalın ileri düzeylere ulaşması, mevcut çatlak genişliklerinin ani artışına neden olmuştur. Kolonların 1. kat düzeyinde bulunan alın levhalarının arkasında kalan beton bölgesinde çatlaklar derinleşmiş, kabuk betonunda ise ezilmeler ve dağılmalar meydana gelmiştir. 2. kat düzeyinde bulunan kolon alın levhalarının etrafında bulunan beton bölgesinde ise çatlak oluşumu başlamış, güçlü kolon-zayıf kiriş oluşturulamamasının sonuçları beklendiği şekilde sisteme yansımıştır. Bu durum, mekanik plastik mafsalda bulunan sigorta eleman çeliğinin akmasını ötelemiş, STMM'lerin devreye girmesini geciktirmiştir. Buna karşın kiriş

elemanlarda mevcut olan çatlaklarda önemli değişiklikler oluşmamış, elastik davranış korunmuştur. Kalıcı şekildeğiştirmeler ve hasar görselleri Şekil 3.145'de verilmiştir.



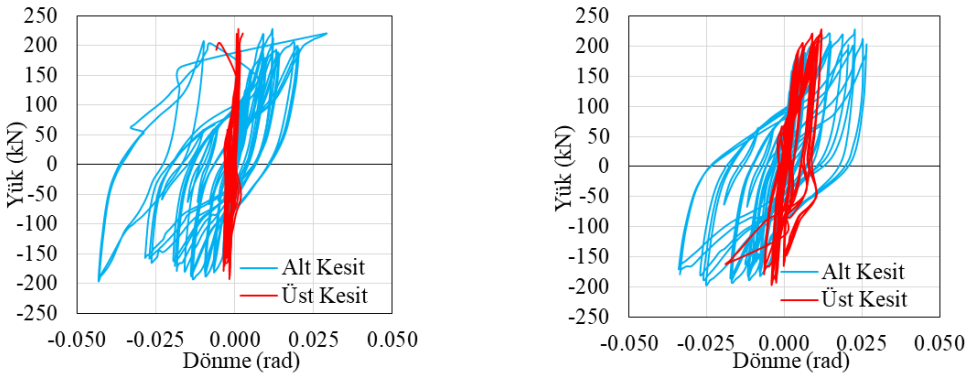
Şekil 3.145: 95mm yerdeğiştirme hedefinde düzlem çerçevede oluşan hasarlar.

Düzlem çerçeve deneyi sırasında sisteme uygulanan kuvvet değerleri ile düzlem çerçevenin tepe noktasında meydana gelen yatay yerdeğiştirmelerin etkileşimini gösteren grafik Şekil 3.146'da verilmiştir. Çekme yönünde %16'lık bir yük azalması ölçülürken itme tarafında herhangi bir mukavemet düşüşü gözlenmemiştir. Deney numunesi, %5,3 göreli kat öteleme seviyesine kadar çevrimsel yükleme döngülerini gerçekleştirebilmiştir. Etkileşim grafiği incelendiğinde maksimum kuvvetlerin sırasıyla iten tarafta 227 kN çekme tarafında ise -195 kN olduğu görülmüştür.



Şekil 3.146: Düzlem çerçeveye ait taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirmesi etkileşim grafiği.

Kolonların taban kesitindeki göreli dönme değerleri için yerdeğiştirme ölçerler ile elde edilen veriler, ölçüm cihazları arasındaki mesafeye bölünerek belirlenmiştir. Yerdeğiştirme ölçümü 2 farklı düzeyden alınmış, böylece kolon kaidelerinde üst ve alt olmak üzere eğilme deformasyonları gösterilebilmiştir (Şekil 3.147). Ölçülen en büyük kesit dönme değerleri A ve B kolonlarında sırasıyla 0,04 ve 0,03 rad olmuştur. Burada hidrolik yükverene en uzakta kalan kolon A kolonu, hidrolik yükverene rijit çelik profil ile bağlantısı gerçekleştirilen kolon ise B kolonu olarak adlandırılmıştır.

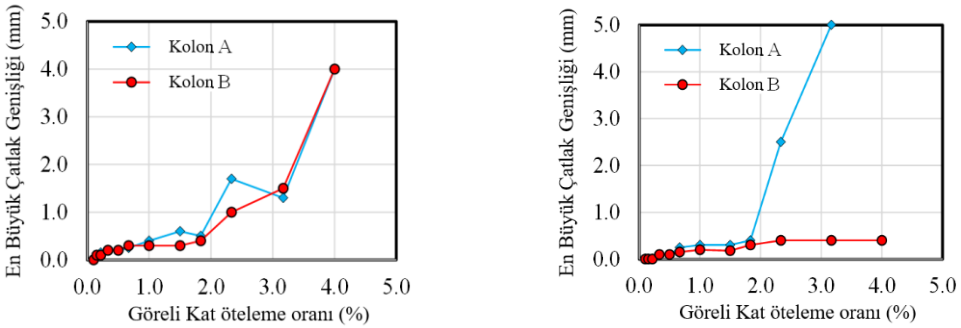


A kolonu *B kolonu*

Şekil 3.147: Düzlem çerçeveye ait kolon elemanlarının taban kesiti eğilme deformasyonları.

Deney sırasında her bir yerdeğiştirme hedefinde taşıyıcı elemanlarda oluşan çatlakların sayısı, yeri ve genişlikleri kayıt altına alınmıştır. Yukarıda çatlak görselleri verilen kolonlara ait en büyük çatlak genişliği ile düzlem çerçeve ötelenme ilişkileri Şekil 3.148'de gösterilmektedir. İlk kat seviyesinde ölçülen çatlak genişlikleri %2 ötelenme seviyesine kadar sınırlı kalmasına rağmen, %2 ötelenme değeriyle birlikte

ciddi artışlar gerçekleşmiş, çatlaklar genişlemiştir. Kolonların alt kesitlerinde ise çatlaklar yaygın olarak dağılmış ve ilk kat ile kıyaslandığında daha yavaş ilerlemiştir.

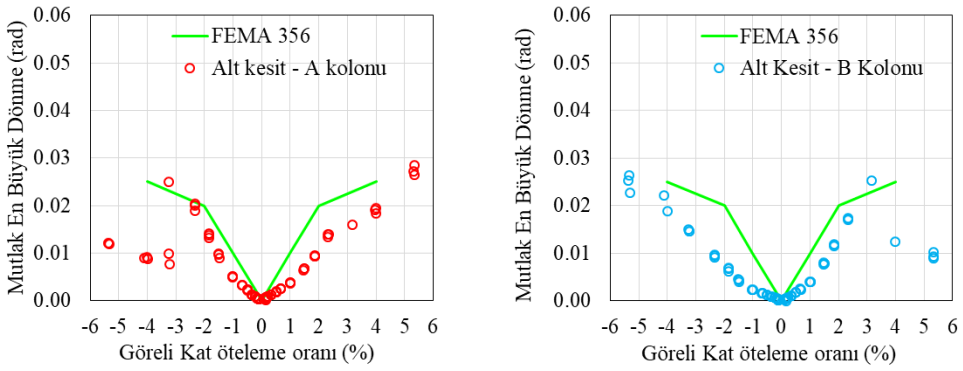


Temel seviyesi *1. kat seviyesi*

Şekil 3.148: En büyük çatlak genişliği dağılımları.

İlk kat hizasında bulunan kirişin hidrolik yükverenden uzakta bulunan düğüm noktasında oluşan çatlakların ve analiz sonuçlarına yansıyan hasarın sebepleri şunlardır: i. laboratuvar kısıtlamaları nedeniyle test düzleminde kolonlar nispeten daha zayıf tasarlanmıştır. ii. manşon ankraj detayları nedeniyle bölgeye daha az enine donatı konulabilmiştir, iii. hidrolik yükvereni düzlem çerçeveye bağlayan rijit çelik bağlantı çubuğu, bağlantının gerçekleştiği noktaları eğilmeye karşı bir miktar sınırlamıştır; buna karşı A kolonundaki serbest düğüm noktaları bu sınırlamadan etkilenmemiştir.

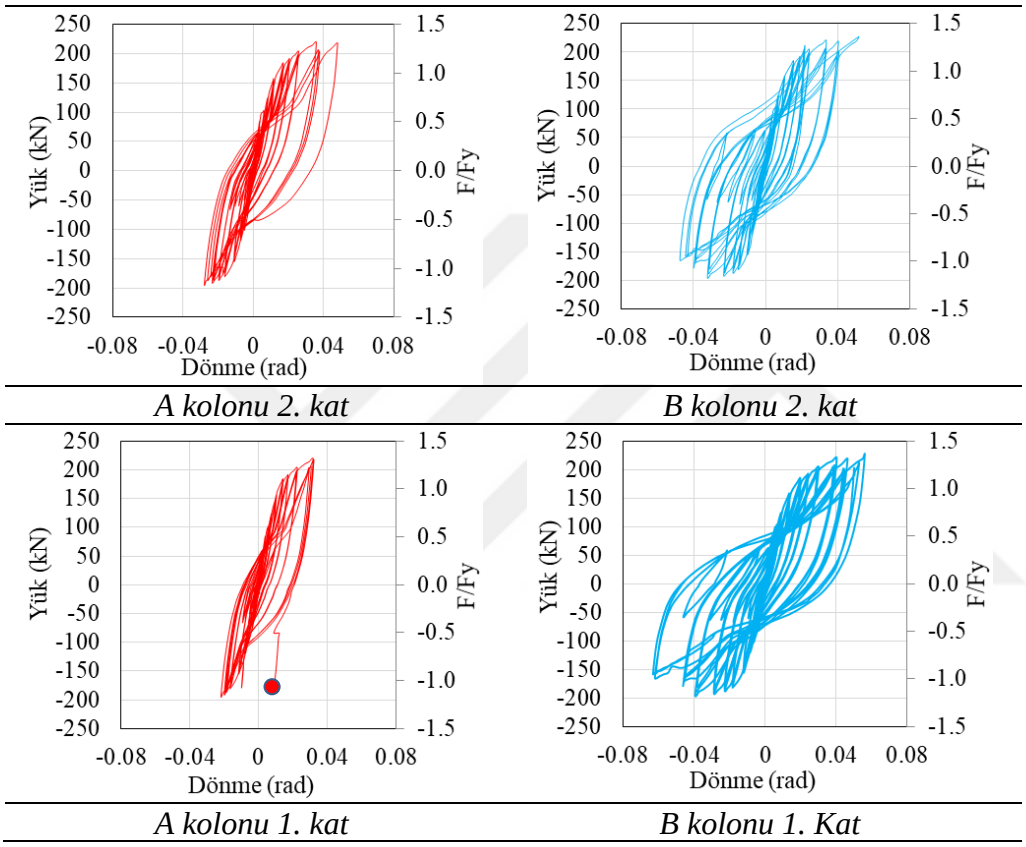
Kolon tabanlarında meydana gelen mutlak en büyük dönme değerleri ölçüm düzeneğinden elde edilen verilerden çıkartılmış ve Şekil 3.149'da gösterilmiştir. %1 ve %2 göreli kat ötelemede gözlenen maksimum dönmeler, 0,01 rad'dan daha düşük; %4 göreli kat ötelemede gözlemlenen maksimum dönme değeri ise yaklaşık 0,03 rad okunmuştur. Mutlak en büyük dönme değerleri FEMA 356 (2000) [63]'de tavsiye edilen limitlerin altında kalmıştır.



A kolonu *B kolonu*

Şekil 3.149: Kolon alt kesitlerine ait mutlak en büyük dönmeler.

Her bir kiriş-kolon bağlantısının alt ve üst bölgelerine yatay yönde yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiş, ölçüm cihazları arasındaki geometrik mesafeler kullanılarak düğüm noktalarında meydana gelen dönmeler ölçülmüştür. Bir kiriş-kolon bağlantısının üst hizasında kurulu STMM'nın basınç durumunda kaldığı göreli açısal dönme durumu pozitif kabul edilmiştir. Çerçeve sisteminde bulunan dört kiriş-kolon bağlantısında gözlemlenen taban kesme kuvveti - dönme etkileşimi grafikleri Şekil 3.150'de verilmiştir.



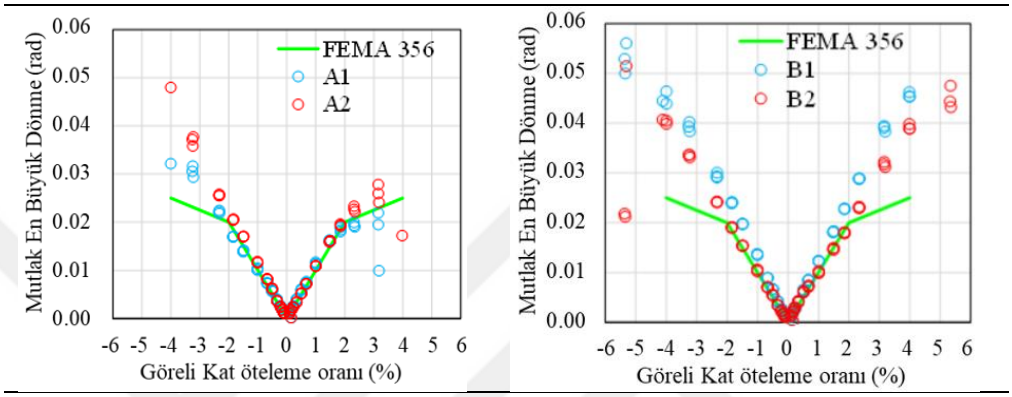
Şekil 3.150: Kiriş-kolon bağlantılarına ait dönmeler.

Her bağlantı için elde edilen kuvvet - dönüş ilişkileri incelendiğinde çevrimlerin şişman olduğu ve önemli miktarda enerjiyi sönümlemekte olduğu görünmektedir. Gözlemlenen dönmeler, STMM'lerin iyi deforme olduğunu, genel davranışa ve yapısal sistemin enerji dağılımına katkıda bulunduğunu kanıtlamaktadır. Test sonuçları, STMM'lerin birkaç kez değiştirilmesinden sonra bile bağlantıların yeterli enerji dağıtma kapasitesiyle hala iyi bir şekilde deforme olabildiğini de göstermiştir.

Grafikler kapasite olarak irdelendiğinde ise A kolonu 1. katında bulunan düğüm noktasında kolonda öngörülmeyen hasarın yoğunlaşmasına bağlı olarak dönme

kapasitesi sınırlı kalmıştır. Bununla beraber diğer düğüm noktalarında 0,04 rad değerinin aşılabildiği gözlenebilmektedir.

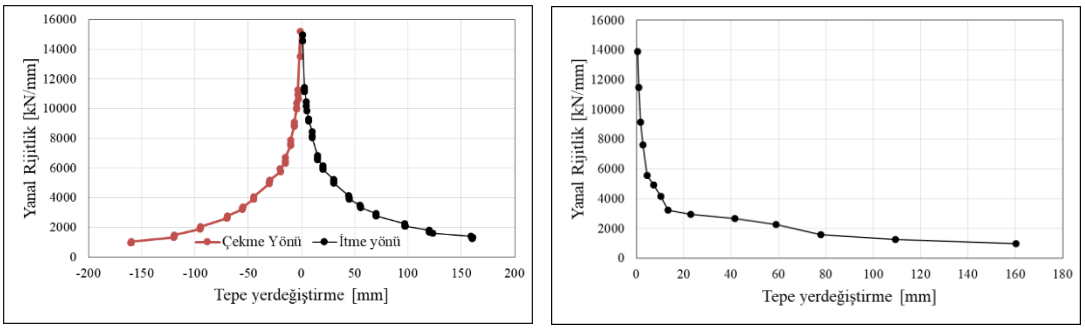
Test sırasında düğüm noktalarından elde edilen veriler ile mutlak en büyük dönme değerleri oluşturulmuş, Şekil 3.151'de gösterilmiştir. Testin en sonunda bile 0,05 rad ve 0,06 rad olarak en büyük dönme değerleri gözlenmiştir. FEMA356'da 0,025 rad açısal dönme değeri için ileri seviye çatlama düzeyi olduğu belirtilmiştir. Buna karşın kiriş elemanlarında pratik olarak hiçbir hasar gözlenmemiştir.



A kolonu kiriş-kolon bağlantıları *B kolonu kiriş-kolon bağlantıları*

Şekil 3.151: Kiriş-kolon bağlantılarına ait mutlak en büyük dönme değerlerinin FEMA356 ileri düzey hasar durumuyla karşılaştırılması.

Taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme etkileşim grafiğinden faydalanarak ayrıca yanal rijitlik azalımı değerleri de çıkartılmıştır. STMM bağlantılarının bozulmasının çerçeve genel davranışını nasıl etkilediğini değerlendirmek için azalım değerleri önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Hesaplamalarda sekant rijitlik yaklaşımı kullanılmıştır. Çekme ve itme yönleri için her bir hedef yerdeğiştirmedeki rijitlik, hedef yerdeğiştirmedeki yük değerinin, yerdeğiştirme hedefine oranı olarak belirlenir. Uygulanan yerdeğiştirme modelinde her üç döngüden sonra daha küçük genliklere sahip elastik döngüler de mevcuttur. Elastik döngülere karşılık gelen rijitlik hesabında ise itme ve çekme adımlarına ait tepe noktalarını birbiriyle birleştiren düz bir çizginin eğimi olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.152).

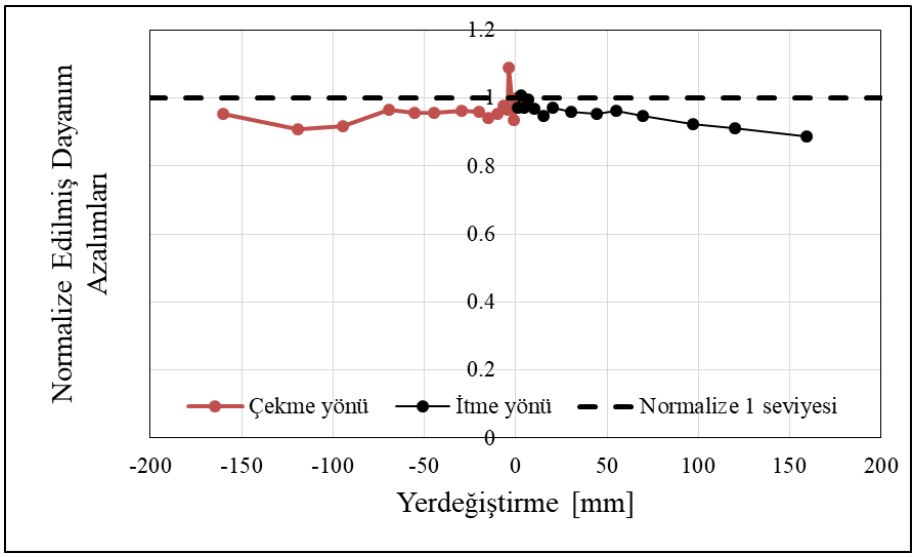


Ana çevrimler Elastik çevrimler

Şekil 3.152: Yanal rijitlik dağılımları.

Rijitlik azalımları incelendiğinde ilk yerdeğiştirme çevrimlerinden itibaren başladığı görülmektedir. İlerleyen kat öteleme seviyelerinde ise yavaşlayarak devam etmiştir. Grafiğin çekme yönündeki azalımın daha hızlı olduğu görülmektedir. Buna sebep olan durum ise A kolonunda 1. kat hizasında oluşmuş beklenmeyen hasardır.

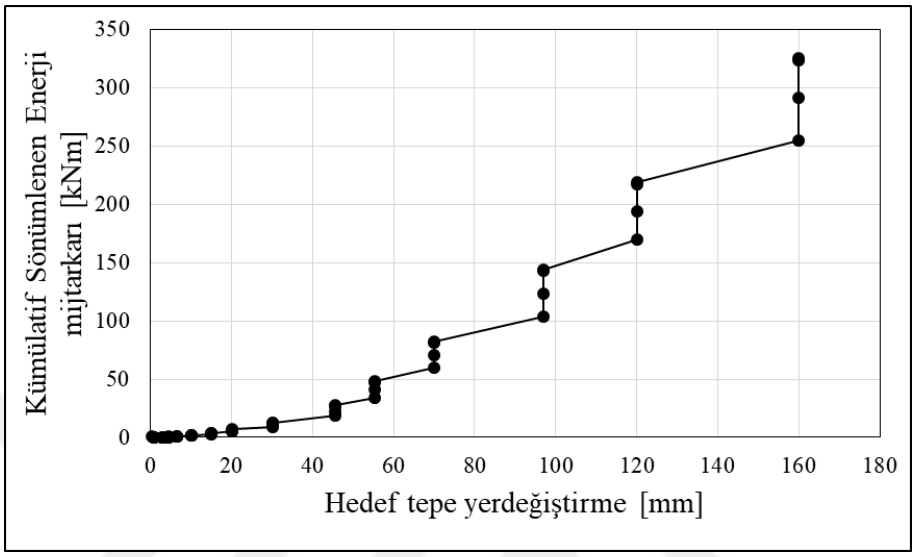
Rijitlik azalımı ile birlikte aynı zamanda STMM bağlantıları ile oluşturulan bu düzlem çerçeve sisteminin dayanım azalması da irdelenmiştir. Dayanım azalması, yerdeğiştirme hedefleri için yürütülen üç çevrimin her birinde en küçük yük değerinin en büyük yük değerine oranı şeklinde belirlenir (Şekil 3.153). Grafikten de görülebileceği gibi ileri düzey yerdeğiştirme değerlerinde bile en fazla dayanım azalımı %10 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 3.153: Dayanım azalımları.

Tersinir tekrarlı çevrimsel döngülerin her birinin alanı sönümlenen enerjiyi hesaplamak için kullanılan bir yöntemdir. Kümülatif sönümlenen enerji ise mevcut çevrimde elde edilen değerin önceki çevrimlerden elde edilmiş enerji miktarına

eklenmesiyle elde edilir. Tez çalışması kapsamında düzlem çerçeve deneyi sırasında kümülatif sönümlenen enerji miktarını hesaplayabilmek için taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme etkileşim diyagramındaki tekrarlı çevrimsel döngülerin alanları kullanılmıştır. Deney sonuçları kullanılarak elde edilen kümülatif sönümlenmiş enerji dağılım grafiği Şekil 3.154'de verilmiştir.



Şekil 3.154: Düzlem çerçeveye ait kümülatif enerji sönümleme grafiği.

30mm ve 45mm yerdeğiştirme hedeflerinde kümülatif enerji sönümleme değerleri sırasıyla 12,5 kNm ve 27 kNm iken 55mm ve 70mm yerdeğiştirme hedeflerinde sönümlenen kümülatif enerji 50 kNm ve 70 kNm değerlerine ulaşmıştır. Düzlem çerçevede yatay yerdeğiştirme arttıkça STMM'ler daha fazla katkı vermiş ve böylece enerji sönümleme oranları hızlıca artmıştır.

4. SAYISAL HESAP MODELLERİ OLUŞTURULMASI VE DENEYSEL SONUÇLAR İLE KARŞILAŞTIRMALAR

Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal ve sigorta tipi mekanik manşonun geliştirilmesi sırasında yalnızca deneysel çalışmalar gerçekleştirilmemiştir. Deneyler, ancak kısıtlı parametreler ve sayılı numune üstünde çalışılmasına imkan vermektedir. Fakat bilgisayar ortamında sayısal olarak oluşturulan örnekler üzerinde çok daha fazla analiz yapmak mümkün olabilmektedir. Özellikle sigorta tipi mekanik manşon için sadece tek tip altıgen kesite sahip sigorta eleman ve onun boyutlarına uygun olarak oluşturulmuş diğer parçalar test edilebilmiştir. Farklı çap ve kesit özelliklerine sahip numuneler üstünde çalışmak için ise çok fazla zaman ve deney sayısı ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bunun yerine deneyler ile mekanik özellikleri tespit edilen numunelerin bilgisayar ortamında oluşturulan modellerinde, geometrik özelliklerini çeşitlendirmek suretiyle sayısal olarak sonsuz sayıda deney yapılabilmektedir.

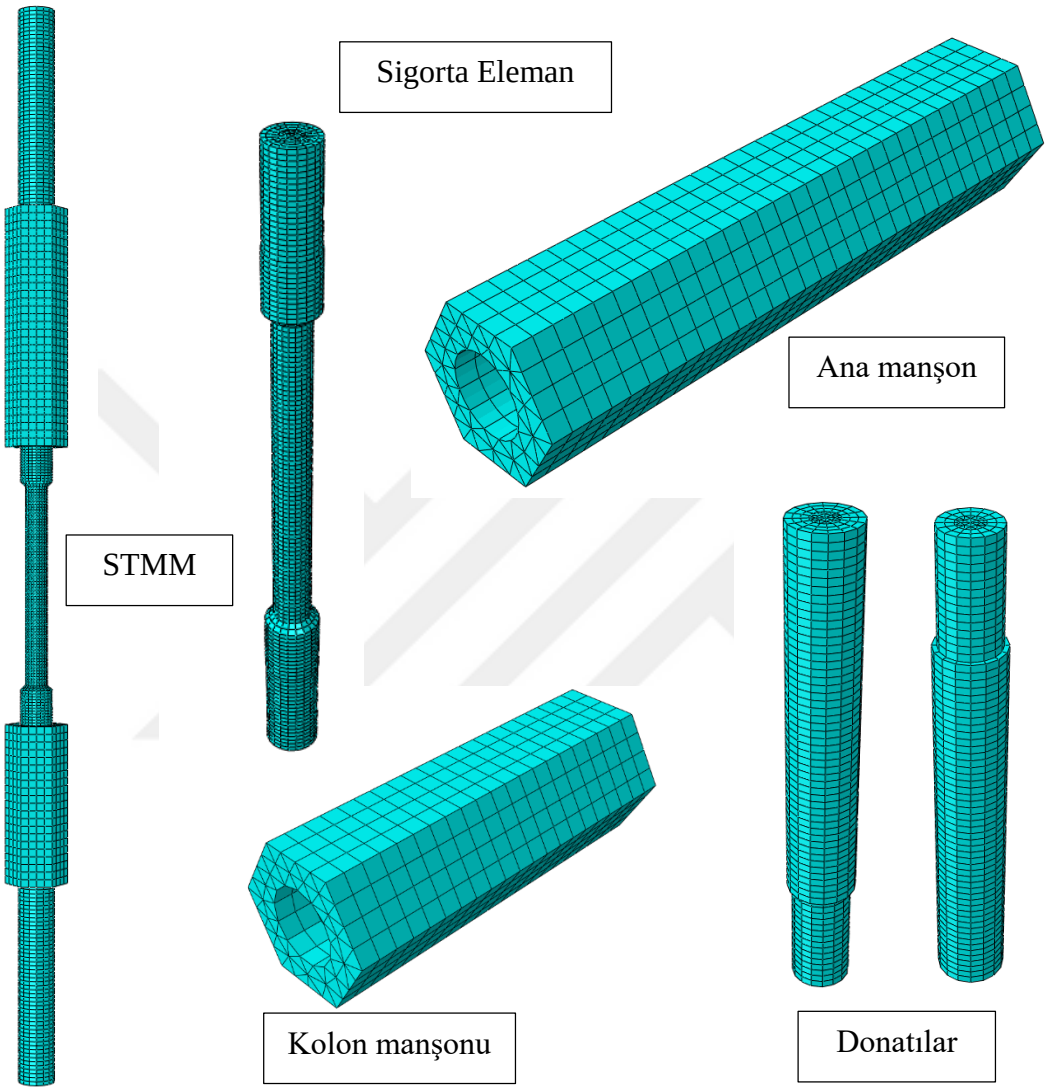
Bu sebeple sigorta tipi mekanik manşonların sayısal hesap modellemesi oluşturulması önem kazanmıştır. Bu amaçla ABAQUS 6.19 [62] programında sonlu eleman modellemeleri gerçekleştirilmiştir. SAP2000 v22.2.0 [63] paket programında ise çelik ceketli sigorta tipi mekanik manşonun son haline ait çubuk modeli ortaya konmuştur.

4.1 Sigorta Tipi Mekanik Manşon Sonlu Eleman Modeli

4.1.1 Model tanımlamaları

Sigorta tipi mekanik manşonun geliştirilmesi sırasında çelik ceketsiz prototip 1 numunelerinin mekanik özelliklerini ve bağlantı detaylarını sayısal olarak içeren başarılı bir sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. ABAQUS programında oluşturulan model, ana manşon, sigorta elemanı, kolon donatı manşonu ve donatıları temsil eden beş solid elemandan oluşmaktadır. Mesh sonlu eleman ağı için bütün parçalarda *"Wedge"* eleman şekli, sonlu eleman ağının oluşturulması tekniğinde ise *"Sweep"* seçeneği kullanılmıştır. Sonlu eleman ağlarının ortalama büyüklükleri 0,2 mm,

manşonlarda ise 0,4 mm boyutlarında seçilmiştir. Her bir parça dişli bağlantıları temsil etmesi amacıyla bindirme bölgelerinde *"tie constraint"* komutu ile bağlanmıştır. Şekil 4.1'de sigorta tipi mekanik manşonun ve alt parçalarının sonlu eleman modeline ait görselleri verilmektedir.

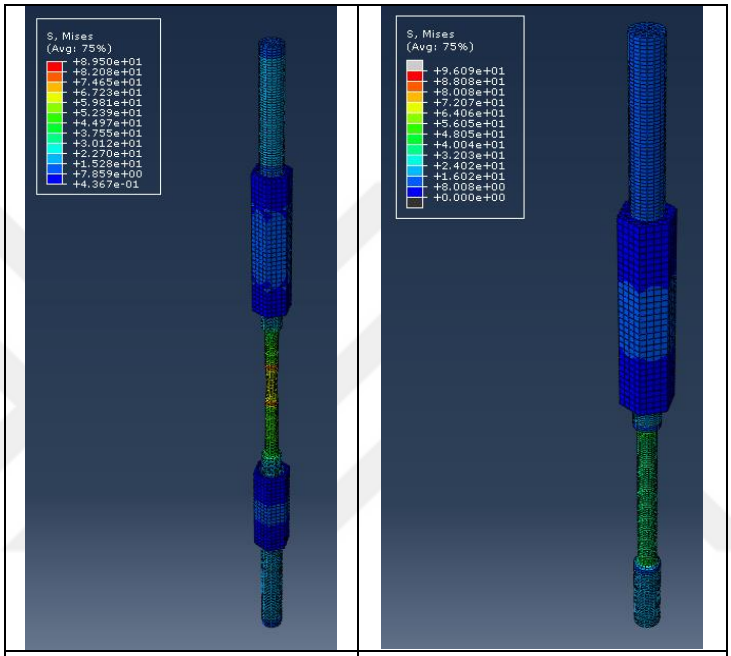


Şekil 4.1: STMM sonlu eleman ağıyla oluşturulmuş sayısal modellemesi.

Malzeme tanımlaması yapılırken doğrusal olmayan hesaplamaya uygun olması nedeniyle *"kinematic hardening"* malzeme modeli kullanılmıştır. Elastisite modülü 8×10^4 N/mm^2, poisson oranı ise 0,2 olarak belirtilmiştir. Sigorta tipi mekanik manşonun ana malzemesi olan A316 paslanmaz çeliğin akma gerilmesi değeri olarak 687 MPa, kopma gerilmesi değeri ise 907,5 MPa değeri tanımlanmıştır. Plastik süneklik değeri de %20 olarak etkitilmiştir.

4.1.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar

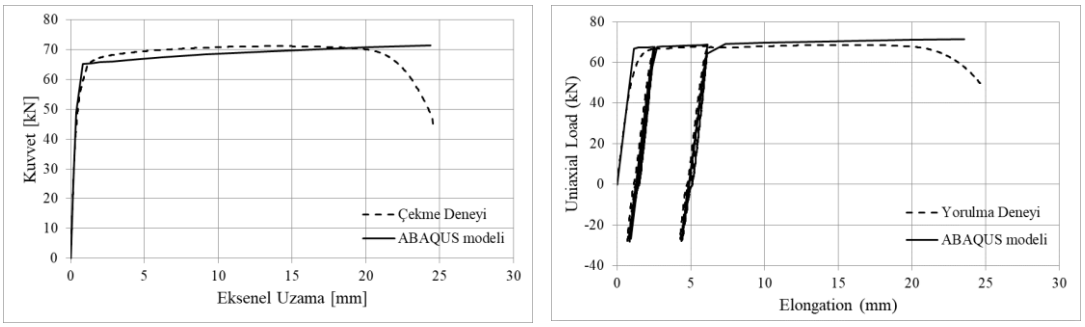
Sigorta tipi mekanik manşon prototip 1'e ait malzeme testleri, eksenel çekme testleri ve tersinir tekrarlı yorulma testleri tez metninin daha önceki başlıklarında detaylıca açıklanmıştı. Bu testlerin bilgisayar ortamındaki sonlu eleman modellemelerinde de deneylerde kullanılan yerdeğiştirme ve kuvvet kontrollü protokoller birebir uygulanmıştır. Analizler sonucunda sayısal modellerde kalıcı şekildeğiştirmeler ve yük aktarımı başarılı şekilde modellenmiştir, (Şekil 4.2).



Çekme testi (Kopma durumu)	*Düşük çevrimli yorulma testi (basınç durumunda)*

Şekil 4.2: ABAQUS ile gerçekleştirilmiş eksenel çekme ve yorulma testleri.

Modellerdeki mesnetlenme şartlarını yerine getiren düğüm noktalarından eksenel gerilme değerleri, serbest ucu temsil eden kesitlerden de zamana bağlı yerdeğiştirme verileri toplanmıştır. Birim alana düşen gerilme değerlerinin işlenmesiyle mesnette oluşan kuvvet değerleri elde edilmiştir. Zamana bağlı yerdeğiştirmeler gerilme değerleri ile birlikte işlenerek kuvvet-eksenel uzama etkileşim değerleri elde edilmiştir. Daha önce deneylerden elde edilen kuvvet-eksenel uzama değerleri, ABAQUS modellerinden elde edilen verilerle birlikte kullanılarak karşılaştırmalı etkileşim grafikleri oluşturulmuştur. Hem eksenel çekme hem de çevrimsel yükleme deneyleri için hazırlanan bu grafikler Şekil 4.3'de verilmektedir.



Çekme Testi *Düşük Çevrimli Yorulma Testi*

Şekil 4.3: ABAQUS modelleri ile deney sonuçlarını karşılaştırma grafikleri.

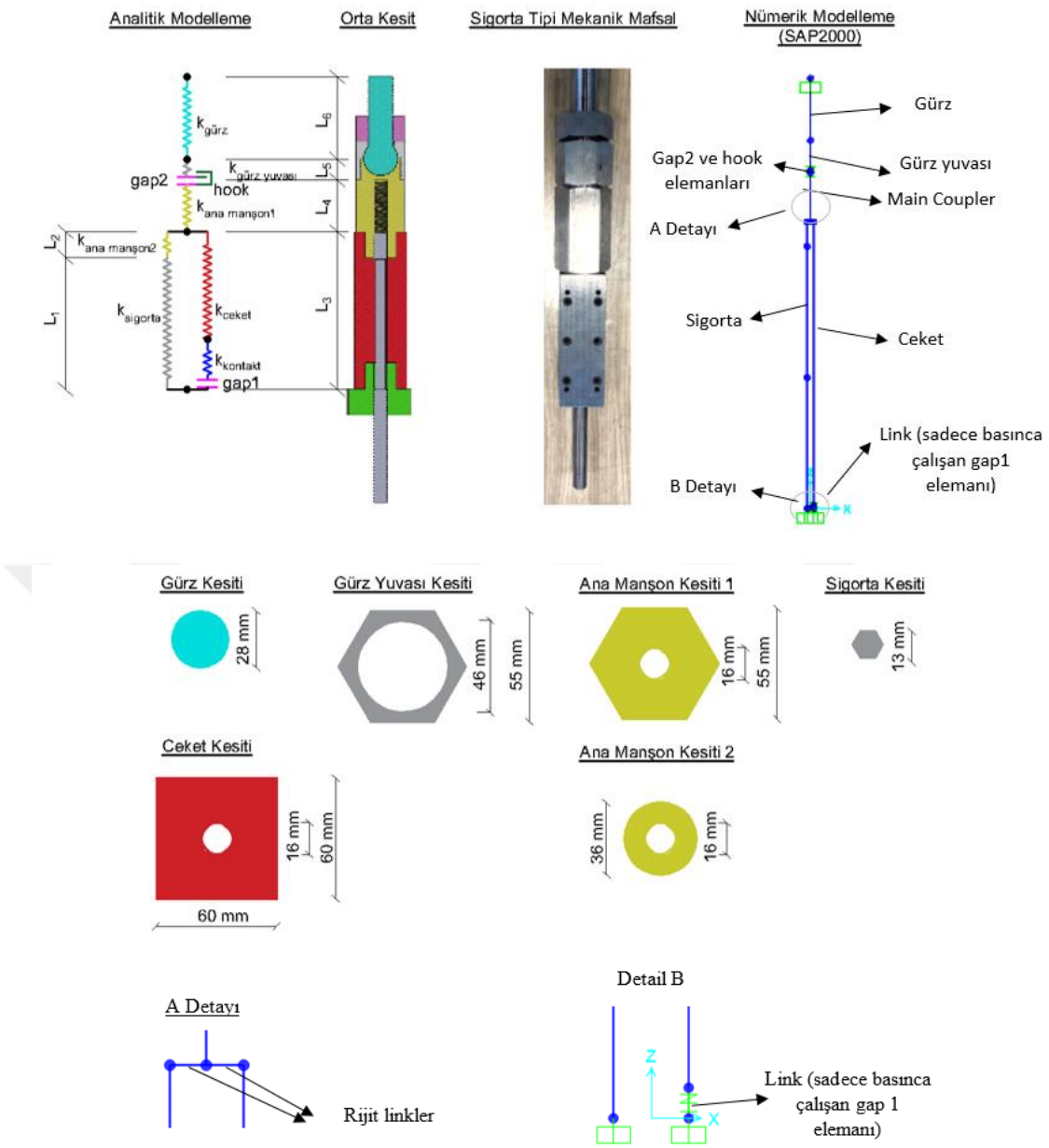
Grafikler incelendiğinde açıkça görülmektedir ki hem çekme testi sırasında hem de düşük çevrimli yorulma testleri sırasında malzeme testleri ile sayısal modellemelerin akma anında göstermiş olduğu kuvvet-uzama davranışlarında belirgin bir farklılık mevcuttur. Buna karşın grafiklerin geri kalan kısımları incelendiğinde deneylerin neredeyse başarılı bir şekilde modellenebildiği görülmektedir.

Sonlu eleman ağı modellemeleri başarılı bir şekilde oluşturulabilmesine rağmen STMM'nin diğer prototiplerinde ABAQUS modellemeleri gerçekleştirilmemiştir. Hem kolon-kiriş birleşimleri ile düzlem çerçeve deneylerinin daha kolay modellenebilmesi hem de proje mühendisleri tarafından yapı modellemelerinde rahatça kullanılabilmesi amacıyla eşdeğer çubuk modeli ile devam edilmesi kararı alınmıştır. Fakat STMM'lerin farklı çap ve boyutlarda üretilecek örneklerinin deney yapmadan kapasite analizlerinin yapılması için sonlu eleman modellemelerinin kullanılması daha isabetli değerler elde edilmesini sağlayacaktır.

4.2 Sigorta Tipi Mekanik Manşon için Eşdeğer Çubuk Modeli

4.2.1 Model tanımları

Sigorta tipi mekanik manşon prototip 3'ün çevrimsel davranışını sayısal olarak temsil etmek için bir makro modeli oluşturulmuştur. Model, çelik gürz, gürz cıvatası, ana manşon ve sigorta elemanını temsil eden dört yaydan oluşmaktadır. Ana manşon, ana gövde ve ceket tarafından sarılmış azaltılmış kesit dâhil olmak üzere iki seri yay ile temsil edilmiştir, (Şekil 4.4).



Şekil 4.4: STMM prototip 3 sayısal modellemesi.

4.2.1.1 Çekme rijitliği

Elastik sınırlar içerisindeki çekme rijitliği Denklem 4.1 ile hesaplanır.

$$k_{\mathrm{t}}^{e}=\left(\frac{1}{k_{\text{steel mace}}}+\frac{1}{k_{\text{mace bolt}}}+\frac{1}{k_{\text{main coupler1}}}+\frac{1}{k_{\text{main coupler2}}}+\frac{1}{k_{\text{fuse}}^{e}}\right)^{-1} \tag{4.1}$$

Basitleştirmek adına, basınç ve çekme durumları için ortak rijitlik terimlerinin eşdeğer karşılıkları tanımlanmıştır:

$$\frac{1}{k_{eq1}^{e}}=\left(\frac{1}{k_{\text{steel mace}}}+\frac{1}{k_{\text{mace bolt}}}+\frac{1}{k_{\text{main coupler1}}}\right)^{-1}\qquad \frac{1}{k_{eq2}^{e}}=\left(\frac{1}{k_{\text{main coupler2}}}+\frac{1}{k_{\text{fuse}}^{e}}\right)^{-1} \tag{4.2}$$

Burada STMM'yi oluşturan elemanların rijitlik terimleri şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$k_{\text{steel mace}}=\frac{E_{\text{s}}A_{\text{steel mace}}}{L_6}\qquad k_{\text{mace bolt}}=\frac{E_{\text{s}}A_{\text{mace bolt}}}{L_5}\qquad k_{\text{main coupler1}}=\frac{E_{\text{s}}A_{\text{main coupler1}}}{L_4}$$
$$k_{\text{fuse}}^{e}=\frac{E_{\text{s_fuse}}A_{\text{fuse}}}{L_1}\qquad k_{\text{main coupler2}}=\frac{E_{\text{s}}A_{\text{main coupler2}}}{L_2} \tag{4.3}$$

Denklem 4.3'de, A ve L sırasıyla ilgili elemanların kesit alanını ve uzunluğunu ifade eder. Sigorta elemanının malzeme testleri, başlangıç ve akma aşamaları için elastisite modülünün (Es_fuse) 200.000–100.000 MPa arasında değiştiğini göstermiştir. Sonuncusu, sayısal analizlerde Es_fuse için benimsenmiştir. Diğer bileşenler için ise elastisite modülü (Es) 200.000 MPa olarak alınmıştır.

Sigorta elemanının akmasından sonra, tanjant modülü (E_s^T) deneysel olarak 250 MPa olarak belirlenmiş ve ilgili eşdeğer rijitlik Denklem 4.4 ile hesaplanmıştır.

$$k_{\text{fuse}}^{T}=\frac{E_s^{T}A_{\text{fuse}}}{L_1}\qquad \frac{1}{k_{eq2}^{T}}=\left(\frac{1}{k_{\text{main coupler2}}}+\frac{1}{k_{\text{fuse}}^{T}}\right)^{-1} \tag{4.4}$$

4.2.1.2 Basınç rijitliği

Ceket, sigorta elemanının burkulmasını önler ve büyük bir basınç kuvveti kapasitesi sağlar. Deneysel çalışma, çelik ceketli STMM'lerde 0,3 mm'lik bir boşluk olduğunu göstermiştir. Boşluğun (Şekil 4.4'te "gap 2" olarak gösterilmiştir) gürz cıvatası ile ana manşon arasında ayarlandığı varsayılmaktadır. Davranışı simüle etmek için yalnızca sıkıştırma boşluk elemanı (link) eklenir. Boşluk elemanına paralel olarak sadece çekmede çalışan sıfır boşluklu bir kanca elemanı da (link) tanımlanmıştır. Her iki bağlantının rijitliğinin gürz cıvatası rijitliği ($k_{\text{mace bolt}}$) ile aynı olduğu varsayılır.

Sigorta elemanı akmadan ve ceket etkinleştirilmeden önce, eşdeğer basınç rijitliği (k_c^e) Denklem (4.1)'de hesaplananla aynıdır:

$$k_{\text{c}}^{e}=k_{\text{t}}^{e} \tag{4.5}$$

Basınç kuvveti arttığında, ceket ile kenar arasındaki boşluk kapanır ve çelik kılıf devreye girer (Şekil 4.4'te "gap 1"). Deneyler, boşluğun 0,4 mm ile 2,0 mm arasında değiştiğini ortaya çıkarmıştır. Sayısal modelde ceket, sigorta elemanı-ana manşon yay

serisi kombinasyonuna paralel olarak atanmıştır. Temas elemanı, temas rijitliğini ($k_{contact}$) temsil etmek için ceket yayına seri olarak eklenmiştir.

Çelik ceketli STMM'nin çevrimsel yükleme altındaki sıkıştırma davranışı iki farklı durumda açıklanabilir:

i. Yükleme basınç ile başlarsa, sigorta elemanı akmadan önce, ceket basınç kuvvetini alır ve sigorta elemanına etki eden kuvveti azaltır, böylece akmasını ve burkulmasını önler. Doğrusal elastik duruma karşılık gelen eşdeğer sıkıştırma rijitliği aşağıdakiler tarafından kontrol edilmektedir:

$$k_{c_j} = \left(\frac{1}{k_{eq1}} + \frac{1}{k_{eq2}^{e} + k_{eq3}} \right)^{-1} \tag{4.6}$$

Burada , $k_{eq3} = \left(\frac{1}{k_{jacket}} + \frac{1}{k_{contact}} \right)^{-1}$ $k_{jacket} = \frac{E_s A_{jacket}}{L_3}$ (4.7)

ii. Sıkıştırma kuvveti, çekmede ulaşılan önemli plastik deformasyondan sonra etki ederse, önce sigorta elemanı akmakta ve ceketin iç yüzeyine yaslanarak burkulmaktadır. Bu aşamada, sigorta elemanının akma sonrası rijitliği hesaplanırken Denklem 4.1 dikkate alınır ve basınç etkisinde akma durumunda ortaya çıkan rijitlik (k_c^T) Denklem 4.8 ile hesaplanır:

$$k_c^T = \left(\frac{1}{k_{eq1}} + \frac{1}{k_{eq2}^T} \right)^{-1} \tag{4.8}$$

Denklem 4.8 ayrıca çekmede çelik ceketli STMM'nin akma sonrası rijitliğini (k_t^T) ifade eder:

$$k_t^T = k_c^T \tag{4.9}$$

Başlangıç konumuna ulaştıktan sonra, “Gap 1” kapandığında ceket devreye girer ve rijitlik hesaplamasına dâhil olur:

$$k_{c_j}^T = \left(\frac{1}{k_{eq1}} + \frac{1}{k_{eq2}^T + k_{eq3}} \right)^{-1} \tag{4.10}$$

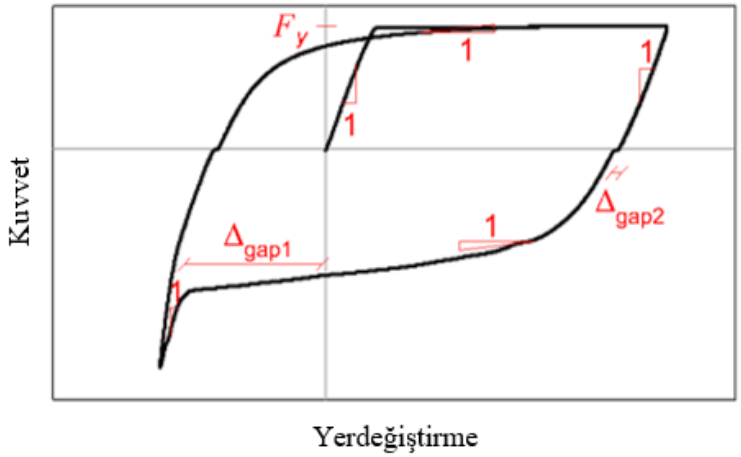
4.2.1.3 Dayanım

Çekme etkisinde çelik ceketli STMM'nin dayanımı Denklem 4.11 ile belirlenebilir. A_{fuse} en zayıf halka olan sigorta elemanının kesit alanını ve f_y'nin paslanmaz çeliğin akma dayanımını ifade eder:

$$F_y = A_{fuse}\ f_y \tag{4.11}$$

Çelik ceket, basınçta eksenel kapasiteyi domine eder. Ceketin aktivasyonundan sonra, ceketin kesit alanının büyük eksenel yük kapasitesine sahip olması nedeniyle davranış doğrusal hale gelir. Çelik ceketli STMM'nin basınçta hedeflenen yük kapasitesi, çekme yük kapasitesinin en az iki katıdır.

Tipik çevrimsel kuvvet-yer değiştirme ilişkisi, rijitlik, boşluk ve mukavemet tanımları ile birlikte Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5: Çelik ceketli STMM için rijitlik, boşluk ve mukavemet tanımlarına sahip tipik bir döngü.

4.2.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar

Sayısal analizler için SAP2000 [63] paket programı kullanılmıştır. Çelik gürz, gürz cıvatası, ana manşon ve ceketi temsil etmek için doğrusal çubuk elemanlar kullanılmıştır. Sigorta elemanı, lineer olmayan fiber mafsalların açıklık ortasına atandığı iki bölüme ayrılmıştır, (Şekil 4.4).

Toplam uzunluğu 345 mm olan dört adet çelik ceketli STMM sayısal olarak incelenmiştir. Numunelerden ikisi ISO protokolü ile yüklenirken diğerleri LDP protokolüne tabi tutulmuştur. Bileşenler için hesaplanan rijitlik değerleri Çizelge 4.1'de listelenmiştir.

Çizelge 4.1: STMM bileşenleri için hesaplanan sertlik değerleri.

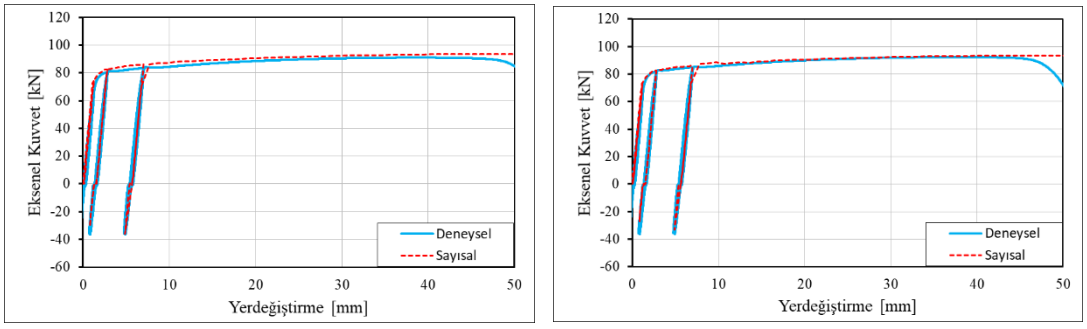
Bileşen	Uzunluk (mm)	Alan (mm^2)	Rijitlik (kN/m)	
			Doğrusal elastik	Tanjant/inelastik
Çelik Gürz	50	616	2463009	-
Gürz cıvatası	25	958	7662595	-
Ana manşon 1	40	2419	12093325	-
Ana manşon 2	20	817	8168141	-
Sigorta	210	146	69694	174
Ceket	210	3399	2955598	
Kontakt	N.A.	N.A.	91442	N.A.

Denklemlerden elde edilen rijitlik değerleri de Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2: STMM bileşenleri için hesaplanan sertlik değerleri.

k^e_{eq1}	k^e_{eq2}	k^T_{eq2}	k^e_{eq3}	$k^e_c = k^e_t$	$k^T_c = k^T_t$	k_{c_j}	$k^T_{c_j}$
807,491	68,525	86,114	174	63,165	174	129,784	77,957

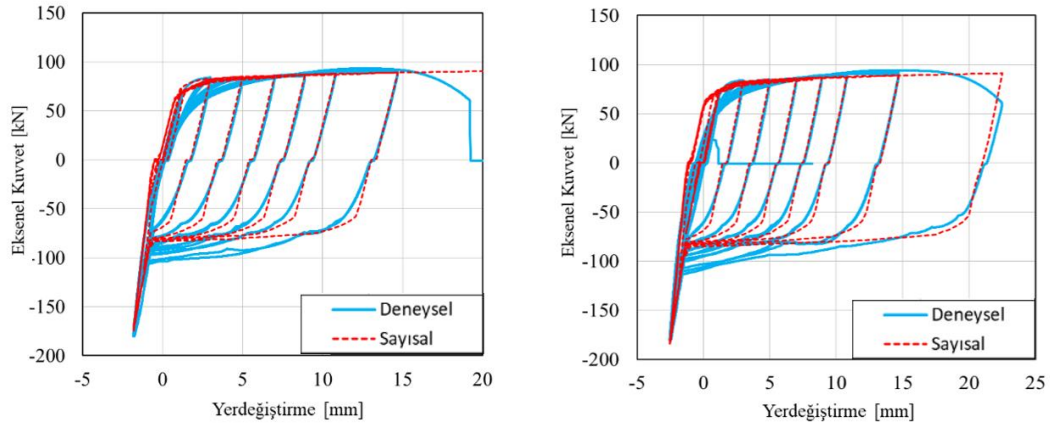
STMM-T1#1 ve STMM-T2#1'in sayısal (kesikli kırmızı çizgi) ve deneysel (mavi çizgi) kuvvet yer değiştirme tepkileri Şekil 4.6'da sunulmuştur. Dayanım ve rijitlik özellikleri, önerilen sayısal model ile iyi bir şekilde yakalanmıştır. Ancak nihai yer değiştirme değerleri tahmin edilememiştir.



STMM-T1#1 *STMM-T2#1*

Şekil 4.6: ISO protokolüne tabi tutulan numunelerin deneysel ve sayısal kuvvet-yerdeğiştirme etki diyagramlarının karşılaştırılması.

LDP protokolü uygulanan STMM-T1#2 ve STMM-T2#2'in sayısal (kesikli kırmızı çizgi) ve deneysel (mavi çizgi) kuvvet-yer değiştirme tepkilerinin karşılaştırılması Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Deneysel ve sayısal sonuçlar arasında iyi bir uyum olmasına rağmen, geçiş bölgelerinde bazı tutarsızlıklar gözlemlenmektedir.



STMM-T1#2 *STMM-T2#2*

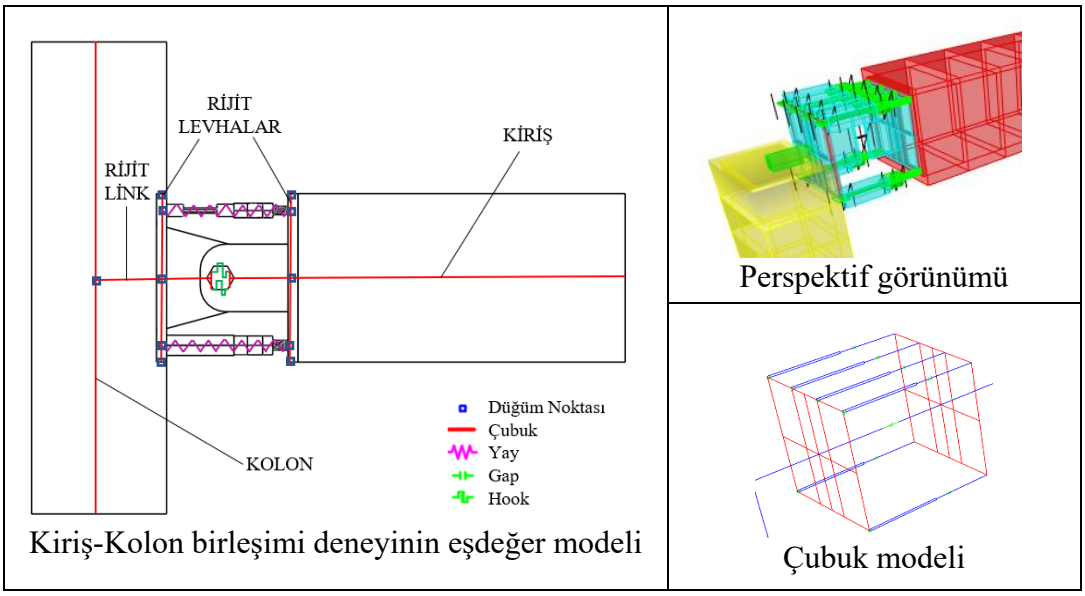
Şekil 4.7: LDP protokolüne tabi tutulan numunelerin deneysel ve sayısal kuvvet-yerdeğiştirme etki diyagramlarının karşılaştırılması.

STMM deneyleri için çalışılan sayısal modeller ile elde edilen sonuçlar makale olarak [64] yayınlanmış ve literatüre de kazandırılmıştır.

4.3 Değiştirilebilir Mekanik Plastik Mafsal için Eşdeğer Çubuk Modeli

4.3.1 Model tanımları

Değiştirilebilir mekanik mafsalı modellemek için Şekil 4.8'de gösterilen sayısal bir model oluşturulmuştur. Modelde bulunan STMM'ler tek bir yay ile gösterilmektedir ve bir önceki başlıkta detayları anlatılan matematiksel model (Şekil 4.4) kullanılmıştır.

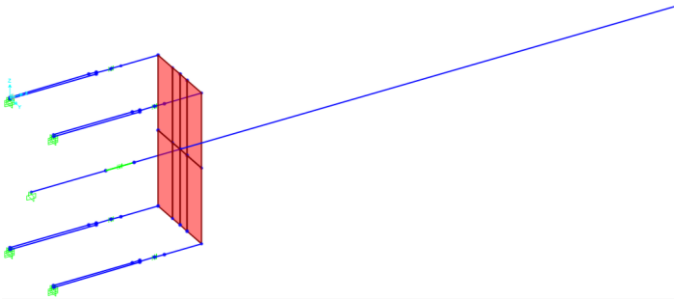
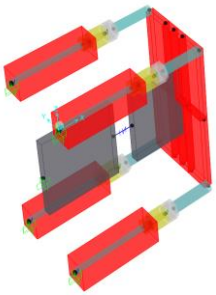
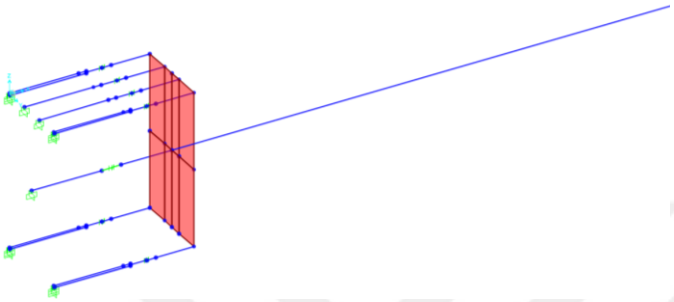
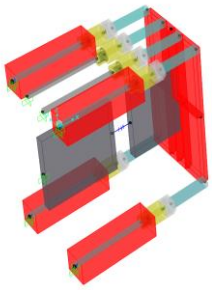


Şekil 4.8: Değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın sayısal modellemesi.

Şekil 4.8’de gösterildiği gibi bağlantıda kiriş uç plakasından kolon uç plakasına kesme kuvvetleri kesme linkleri ile aktarılır. Düzlem kesitlerinin deformasyondan sonra düzlem kaldığını belirten Bernoulli Navier Hipotezine dayanarak, sayısal modelde kolon ve kiriş uç plakaları rijit plakalar olarak tanımlanmıştır. Kolon uç plakasını kolon eksenine bağlamak için rijit bağlantı elemanı kullanılmıştır. Kesme plakaları arasındaki oval deliğin varlığı, makas bağlantıları arasında bir gap ve bir hook elemanı olarak modellenmiştir. Gap ve hook elemanları için delik mesafeleri belirlenirken oval delik uzunluğunun yarısı olarak tanımlanmıştır. Bağlantıda basınç durumunda gap eleman aktif hale gelirken, hook eleman çekme etkisi altında aktiftir. Ayrıca bağlantı gövde bölümünde eğilme momentini aktarmamak için ortada bir pim yer almaktadır.

4.3.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar

Kiriş – kolon birleşim deneyleri ile sayısal modellemelerin karşılaştırılması sırasında 2 deney üzerinden karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Karşılaştırma için kullanılan deneyler çelik ceketli STMM kullanılarak gerçekleştirilen ve 3.2.2 başlığında anlatılan değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın tersinir tekrarlı yükleme deneylerinden seçilmiştir. Seçilen deneyler ise üstte iki altta iki adet STMM kullanılan 2 numaralı test ve üstte dört altta iki adet STMM kullanılan 4 numaralı testtir. Numunelerin sayısal modelleri, Şekil 4.9'da gösterildiği gibi SAP2000 programı ile oluşturulmuştur. Bağlantının akma kapasitesinin kirişin nihai moment taşıma kapasitesine oranının düşük olması nedeniyle kiriş elastik çubuk olarak modellenmiştir (Çizelge 4.3). Doğrusal olmayan davranış yalnızca sigorta elemanları için tanımlanmıştır. Her sigorta elemanının merkezine fiber mafsallar atanmıştır. Sigorta elemanlarında kullanılan paslanmaz çelik malzeme, multi lineer doğrular olarak idealleştirilmiştir. Malzeme yapı modelinde görünür bir akma noktası gözlenemediğinden, 100.000 MPa'lık elastisite modülü, %90 akma gerilimi noktasının eğimi olarak kabul edilmiştir. Daha büyük şekildeğiştirmeler için malzeme modeli multi lineer doğrularla tanımlanmıştır. STMM’lerin sigorta eleman dışındaki diğer kısımları için ise doğrusal çubuk elemanlar kullanılmıştır.

Sayısal modelleme	Perspektif görünüm
	
	

Şekil 4.9: Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal deneylerinin sayısal modellemesi.

Çizelge 4.3: Değiştirilebilir mekanik mafsal ve deney kirişlerinin eğilme momentleri.

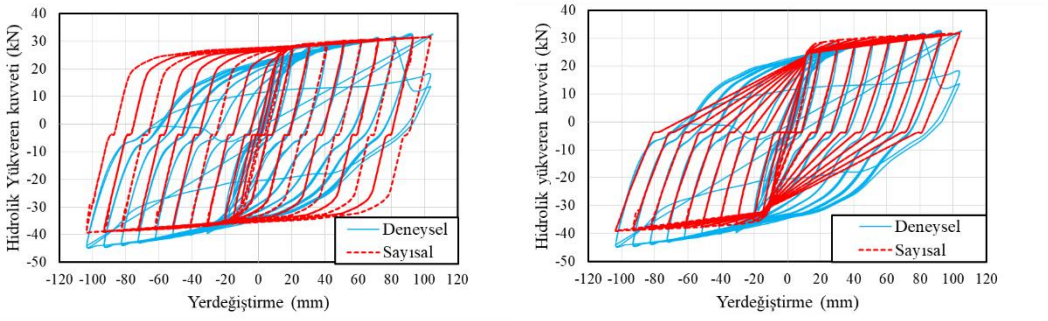
Deney Numunesi	2 numaralı deney numunesi STMM düzeni üstte 4 altta 2	4 numaralı deney numunesi STMM düzeni üstte 4 altta 2
$M^{+}_{u_con}$	74,52	74,52
$M^{-}_{u_con}$	74,52	149,04
$M^{+}_{y_beam}$	143,20	143,20
$M^{-}_{y_beam}$	143,20	271,30
α^{+}	0,52	0,52
α^{-}	0,52	0,55

Deneysel ve sayısal sonuçların karşılaştırılması kinematik ve pivot olmak üzere iki farklı histerezis modeli kullanılarak yapılmıştır. Pivot model için kullanılan parametreler sırasıyla α_1 =10, α_2 =10, β_1 =1, β_2 =1 ve η=0 olarak tanımlanmıştır. Detaylı karşılaştırmalar aşağıdaki başlıklarda verilmiştir.

4.3.2.1 2 numaralı deney numunesine ait karşılaştırmalar

Deney ve simülasyonun kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması, kinematik ve pivot modeller için Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Bağlantı simetrik olarak düzenlenmesine rağmen, deneyin kuvvet yerdeğiştirme zarfı, çekme ve itme yönlerinde asimetrik kuvvet kapasiteleri vermektedir. Bunun nedeni, kirişin ağırlığının

hem hidrolik yükveren hem de değiştirilebilir mekanik plastik mafsala ait kesme bileşeni tarafından taşınmasıdır. İdealleştirilmiş basit kiriş olarak, hidrolik yükverendeki reaksiyon, kurulumdan sonra kirişin ağırlığının yarısı olur (8,44/2=4,22 kN). İtme yönünde hedef yerdeğiştirme seviyesine çekme yönüne göre daha kolay ulaşılmaktadır. Bu sebeple, itme ve çekme durumları arasında kirişin ağırlığına göre göreli bir kuvvet kapasitesi farkı gözlemlenir. Bu durumu simüle etmek için, hidrolik yükverenin bağlı olduğu düğüme çevrimsel yer değiştirme modeli verilmeden önce kiriş ağırlığını içeren doğrusal olmayan statik düşey analiz yapılmalıdır.



Kinematik Model *Pivot Model*

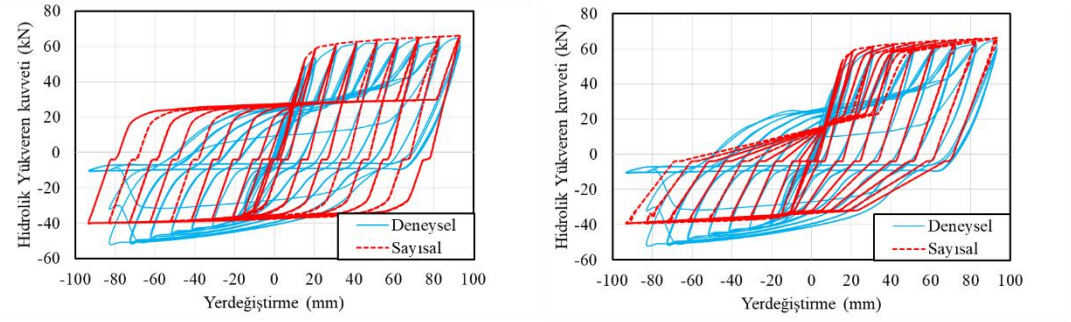
Şekil 4.10: 2 numaralı deney numunesine ait farklı histeretik modeller için sayısal ve deneysel sonuçların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Sayısal modellemeler deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığında, kinematik histeretik model ile kuvvet kapasiteleri iyi tahmin edilebilmektedir. STMM'lerde çekme kuvvetinin yüklenmesi ve boşaltılması aşamalarında rijitliklerin başarılı şekilde temsil edilebildiği açıktır; buna karşın basınç durumunda sigorta elemanlarının ceket iç cidarına burkulmasına bağlı meydana gelen rijitlik yakalanamamaktadır. Sonuç olarak, sigorta elemanları sıkıştırıldığında çevrim alanları abartılı bir kapasite ile tahmin edilebilmektedir. Pivot histeretik model durumunda, çevrimsel yüklemenin çekme bölgesinde kuvvet kapasiteleri ve rijitliklerinin de görece küçük farklar ile başarılı bir şekilde modellenebildiği görülmektedir. Ek olarak, basınç bölgesindeki rijitlik değişimleri kinematik histeretik modele göre deney sonuçlarına çok daha benzer şekilde elde edilebilmiştir. Karşılaştırma sonuçlarında Pivot histeretik modelin, kinematik modele kıyasla çevrim alanlarını yakalamada daha başarılı olduğu söylenebilir.

4.3.2.2 4 numaralı deney numunesine ait karşılaştırmalar

Üstte 4 altta 2 STMM kullanılan 4 numaralı deney numunesi için oluşturulan sayısal model ile rijitlik, dayanım ve çevrimlerin alanları açısından benzer bir başarı

gözlenmektedir (Şekil 4.11). 2 numaralı deney numunesindeki analiz sonuçlarıyla kıyaslandığında 4 numaralı deney numunesini sayısal olarak modellemenin daha elverişli olduğu söylenebilir.



Kinematik Model *Pivot Model*

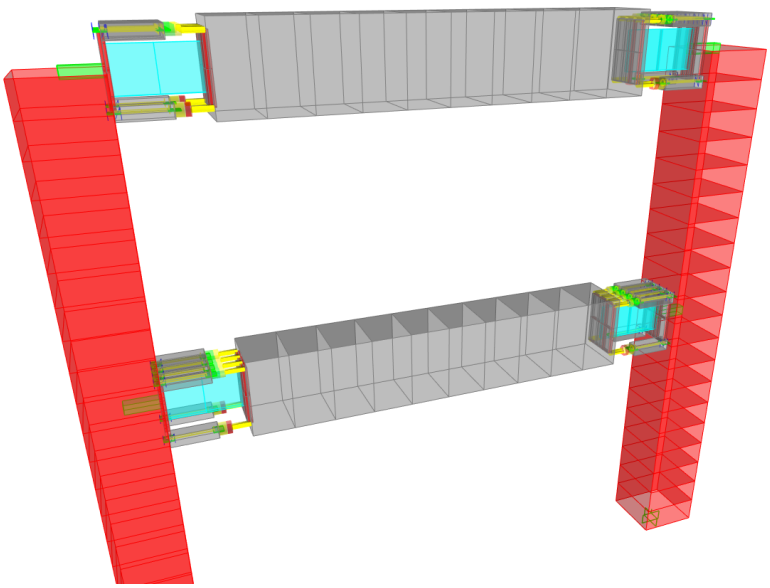
Şekil 4.11: 4 numaralı deney numunesine ait farklı histeretik modeller için sayısal ve deneysel sonuçların kuvvet-yerdeğiştirme ilişkilerinin karşılaştırılması.

Model karşılaştırmaları yapıldığında yatay kaymalar kinematik model için iyi yakalanırken, Pivot model kullanılan durumda kaymalar yalnızca belirli yer değiştirme seviyelerine kadar tahmin edilediği görülmektedir. Çevrim alanları kinematik model için daha büyük, Pivot histeretik model için ise daha küçüktür.

4.4 Düzlem Çerçeve Deneyi için Eşdeğer Çubuk Modeli

4.4.1 Model tanımları

İki katlı deney çerçevesinin boyutlandırılması ve deney sonuçları ile analitik sonuçların karşılaştırılması için eşdeğer çubuk model kurulumu SAP2000 [63] programında yapılmıştır, (Şekil 4.12). Deney çerçevesi, tek açıklık ve 2 kattan oluşmaktadır. Sistem ölçüleri, yatayda akstan aksa 3,20 metre iken, kat yükseklikleri eşit ve 1,50 metredir. Kiriş ve kolon elemanlar için dağıtılmış plastisite teorisi kullanılmıştır. Kirişler ve kolonlar sırasıyla 12 ve 10 segmente ayrılmıştır. Her bir segmentteki lifler için doğrusal olmayan beton ve donatı malzemesi tanımlanmış, tanımlamalar her segmentin ortasına atanmıştır.

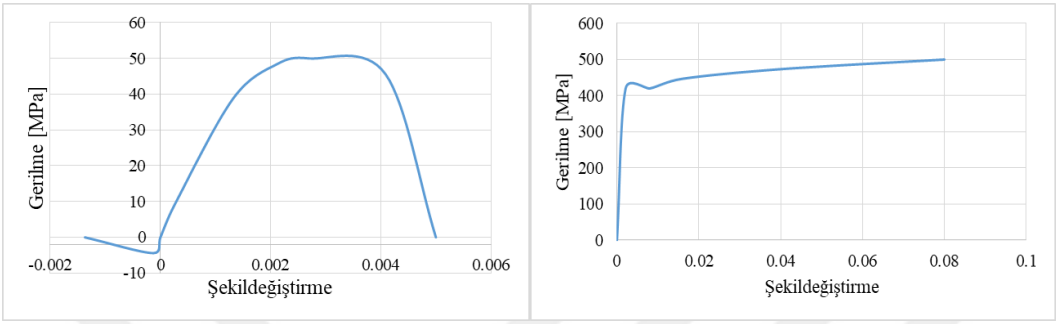


Şekil 4.12: Düzlem çerçevenin üç boyutlu analiz modeli.

Kolon içindeki rijit uç ofsetleri rijit bağlantılar ile modellenmiştir. Kolon yüzlerinde ve kiriş uçlarında bulunan çelik plakalar, deneysel koşulları sağlamak için rijit elemanlar olarak kabul edilmiştir. Kesme plakaları çubuk elemanları ile modellenmiş olup, oval delikten kaynaklanan eksenel serbestliği dikkate almak için Gap ve Hook elemanları ile birbirine bağlanmıştır. Ayrıca, kesme plakalarından herhangi bir moment etkisi aktarmamak için oval deliğe bağlanan kesme plakalarının uçlarına moment serbestlikleri tanımlanmıştır. STMM'lerin modellenmesinde ise bu başlığın ilk bölümlerinde anlatılan eşdeğer çubuk modeli tek bir farkla kullanılmıştır. Önceki araştırmalar sırasında STMM elemanları içerisinde bir boşluk (Gap 2) olduğu ve bu boşluğun gürz cıvatası ile ana manşon arasında yer aldığı gösterilmişti. Ancak düzlem çerçeve deneylerinde bu boşluk etkisi elde edilen sonuçlarda gözlenmedi. Bu nedenle, bireysel STMM modelindeki Gap2 ve Hook elemanları sayısal analizde dikkate alınmamıştır. Ceket, yalnızca sıkıştırma elemanı olarak tanımlanmakta ve Gap 1 kapatıldığında aktif hale gelmektedir. Çelik ceketin varlığı, STMM'nin dayanım ve rijitliğinin basınç kuvvetine maruz kaldığı durumda iken yalnızca doğrusal davranışa yol açmaktadır. Çekme sırasında oluşan inelastik davranış ise sigorta eleman üzerinde, ortasına tanımlaman bir fiber atama ile yoğunlaştırılmaktadır. STMM'nin diğer elemanlarının doğrusal elastik olduğu varsayılır.

Çalışma sırasında beton sınıfı C35 esas alınmıştır. C35 betonunun beklenilen basınç dayanımı 50 MPa alınmıştır. Hem sargısız hem sargılı beton modeli için 'Mander

Beton Modeli' tercih edilmiştir. Donatı çeliği olarak ise karakteristik akma dayanımı 420 MPa olan B420C çeliği dikkate alınmıştır. Malzemelere ait gerilme – şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 4.13'de gösterilmiştir. Paslanmaz çelik için Bölüm 3'de gerçekleştirilen çekme deneyleri sonucunda sigorta eleman için elde edilen gerilme – şekil değiştirme ilişkisi kullanılmıştır.

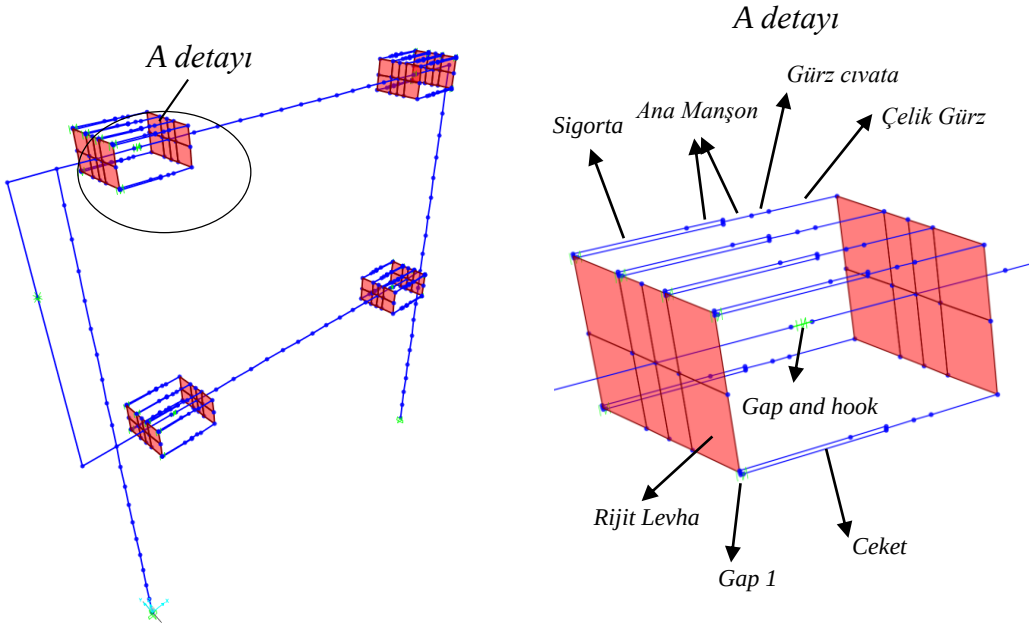


Beton Modeli *Donatı Modeli*

Şekil 4.13: Beton ve çelik için düzlem çerçevenin üç boyutlu analiz modeli.

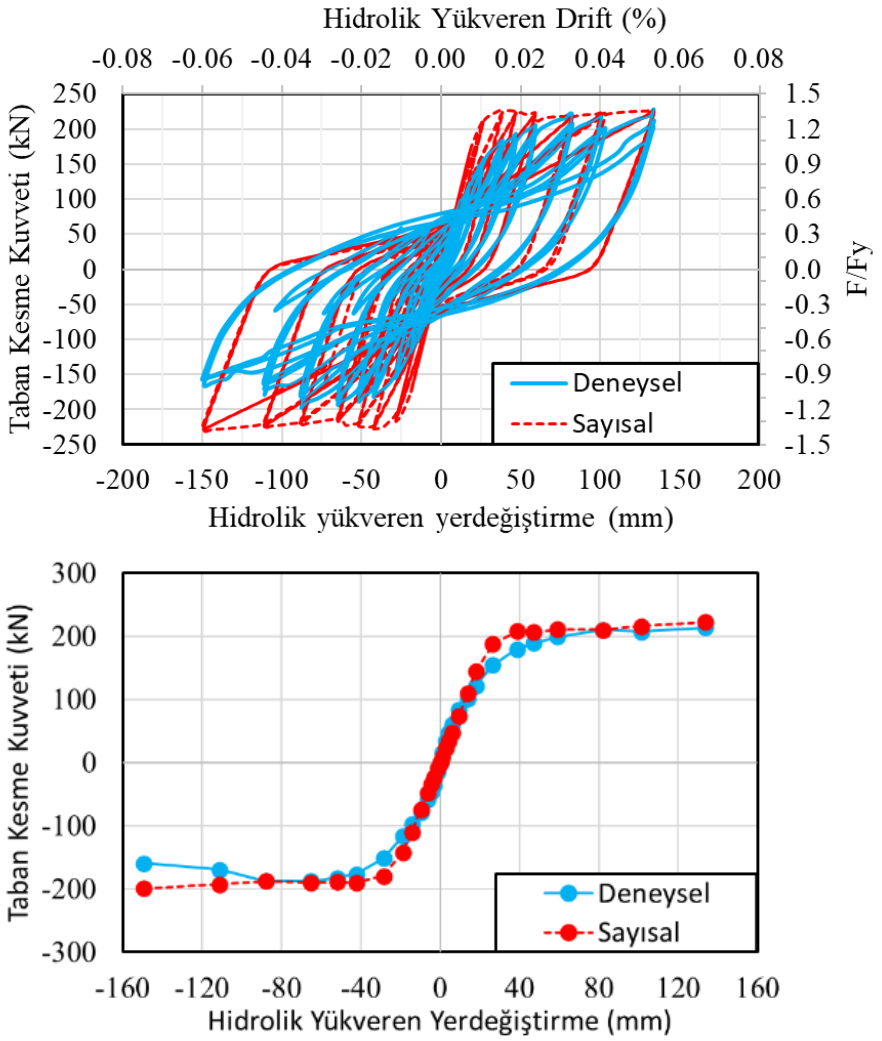
4.4.2 Deneysel sonuçlar ile karşılaştırmalar

Oluşturulan sayısal çubuk model Şekil 4.14'de gösterilmektedir. Beton elemanlar için Takeda histeretik model kullanılırken, donatı ve paslanmaz çelik için pivot histeretik model benimsenmiştir. Donatı modeli kalibrasyon parametreleri $\alpha 1$ =10, $\alpha 2$ =10, β_1 =0,01, β_2 =0,01 ve η=0; paslanmaz çelik için parametreler ise $\alpha 1$ =10, $\alpha 2$ =10, β_1 =1, β_2 =1 ve η=0 olarak tanımlanmıştır.



Şekil 4.14: İki katlı düzlem çerçevenin sayısal çubuk modeli.

Analiz için kullanılan yükleme protokolü düzlem çerçeve deneyleri sırasında gerçekleştirilen quasi-static test protokolü ile tutarlıdır. Elde edilen hidrolik yükverenin yer değiştirmesi ve taban kesme kuvveti değeri ile deneylerden elde edilen veriler Şekil 4.15'de beraber gösterilmektedir. Model genel olarak deneysel çevrimler ile tutarlıdır. Deneysel ve sayısal çözümlerin kuvvet-yerdeğiştirme zarfları da birbirleriyle tutarlılık göstermektedir. Analizden elde edilen kuvvetler, 60 mm'ye kadar daha büyük değerler vermektedir. Ancak, deney sırasında A1 düğüm noktasında oluşan erken hasar nedeniyle beklenmeyen dayanım düşüşü sayısal model ile yakalanamamıştır.



Şekil 4.15: Deneysel ve sayısal çalışmaların kuvvet-yerdeğiştirme etkileşim diyagramları ve zarf eğrileri.

5. SONUÇLAR

Önüretimli yapılarda kullanılan geleneksel kiriş kolon birleşimlerine bir alternatif olarak bu tez kapsamında yeni bir kuru birleşim yöntemi ve ürünü çalışılmıştır. Değiştirilebilir mekanik plastik mafsal olarak adlandırılan ve kirişleri kolonlara moment aktaracak şekilde bağlayan yöntem için deneysel ve sayısal araştırmalar gerçekleştirilmiştir.

Yöntemin ve araştırma sonucunda ortaya çıkan ürünün gelişim aşamalarını da içeren çok sayıda deney yukarıdaki başlıklarda anlatılmıştır. Yöntemin geliştirilmesi sırasında, tasarımın bazı özelliklere sahip olmasına önem verilmiştir. Bu özellikler sırasıyla; basit tasarım, kolay uygulanabilme, mekanik montaj, değiştirilebilirlik ve montajlanan taşıyıcı elemanlar yerine hasarın mafsal üzerine yönlendirilmesidir. Talep edilen özelliklerin tamamını yerine getirebilmesi için pek çok deneme deneyi de gerçekleştirilmiş, nihai tasarıma ulaşabilmek için geometrik ölçüler ve özellikler değiştirilmiştir.

Düğüm noktası ve düzlem çerçeve olmak üzere farklı deney düzenekleri oluşturulmuş, çeşitli sistem deneyleri gerçekleştirilerek yukarıda sıralanan hedeflere yönelik irdelemeler ve gözlemler yapılmıştır. Ayrıca değiştirilebilir mekanik plastik mafsalın en önemli alt bileşeni olan sigorta tipi mekanik manşonun (STMM) davranışı, kusurları, iyileştirilme süreçleri ve performans yükseltmeye yarayan eklentilerin denenmesini içeren önemli miktarda ve çok çeşitli deneyler de icra edilmiş ve detaylı bir şekilde ilgili başlıklarda sunulmuşlardır. Uluslararası yönetmeliklerde belirtilen manşon tipi tasarımların kabulü için belirtilmiş yorulma, sıyrılma ve eksenel çekme gibi kontrol deneyleri de yapılmıştır.

Gerçekleştirilen deneyler sonlu eleman ağları ve eşdeğer çubuk modeller kullanılarak bilgisayar ortamında da yeniden modellenmiştir. Hem STMM düzeyinde hem de düğüm noktası ve düzlem çerçeve sistemleri düzeyinde hazırlanan sayısal versiyonlar, deneylerde kullanılan yükleme protokolleri ile analiz edilerek kuvvet – yerdeğiştirme etkileşimleri elde edilmiş ve deney sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Tamamlanan tüm deneysel ve sayısal çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

• Yapılan testlerin tamamında plastik deformasyonlar STMM'de ve sadece sigorta elemanında birikmiştir. Kırılma, sigorta elemanlarının burkulması ve ardından ilerleyen sünmeleri takip eden kırılma olarak ortaya çıkmıştır.

• Yapılan testler sonucunda STMM'nin tüm bileşenleri kolaylıkla demonte edilebilmiştir.

• Çelik ceket uygulamasının STMM'nin burkulma davranışını iyileştirmek için çok etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmıştır.

• Test edilen STMM'nin çekme ve basınç anma dayanımları sırasıyla 95 kN ve 450 kN olarak bulunmuştur.

• STMM, çekme kuvvetinin etkisinde kararlı döngüler sergileyerek büyük miktarda enerji sönümlemiştir.

• Ticari yazılımlarda kullanılmak üzere döngüsel yükleme için güçlü bir sayısal model önerilmiştir. Önerilen modelin geçerliliği, deneysel çalışma sonuçları ile irdelenmiştir.

• Düğüm noktası deneylerinde betonarme kirişlerde, uç plakanın kısmen ayrılması ve bağlantı bölgesinde yoğunlaşan çatlaklar nedeniyle küçük hasarlar oluşmuştur. Hasarlar, zayıf manşon ve uç plakanın betona yapışmamasıyla ilgilidir. Aderans, dairesel kesitli ve yivli yüzeye sahip manşonlar kullanılarak geliştirilmiştir.

• Bütün deneylerde gerinimölçer kullanılmış, betonarme kirişlerin boyuna donatılarının elastik aralıkta kaldığı ispatlanmıştır.

• Çelik ceket kullanılan kiriş kolon bağlantı deneylerinde üstte 4 adet ceketsiz STMM altta ise ceketli 2 STMM bulunan konfigürasyonda, üst sigorta elemanlarında %3 göreli ötelenme oranında burkulma yaşanmıştır. Çelik ceket kullanılan diğer konfigürasyonlarda ise burkulma olmadan %4 göreli ötelenme oranı sağlanmıştır. Ceketlerin bağlantının üst kısmında kullanılması sigorta elemanlarının burkulmasını engellemiş ve %4'ün çok ötesinde gerçekleşen bir göreli ötelenme oranında kırılmalarını sağlamıştır.

• 2x2 ve 4x2 STMM düzenine sahip çelik ceketli konfigürasyonlarda, çekme tarafında kuvvete karşı yerdeğiştirme açısından benzer davranış sergilenmiştir. Güçteki önemsiz fark, 4x2 düzeninde üstte bulunan iki fazla STMM'nin varlığından kaynaklanmaktadır.

• 4x2 konfigürasyonuna sahip düğüm noktası deneyinde, itme yönündeki güç 2x2 düzenindeki numune deneyindekinin neredeyse iki katı olarak elde edilmiştir. Bunun nedeni, çekme tarafında kalan STMM'lerin sayıca fazlalığıdır. Aynı nedenle, üstteki STMM'lerde çelik ceket kullanılmayan 4x2 numunesinin dayanımı çelik ceketli 2x2 konfigürasyonuna yakındır.

• Üst STMM'lerinde çelik ceket kullanılmayan 4x2 konfigürasyon numunesinin enerji sönümleme kapasitesi, tüm drift seviyeleri için diğerlerinden daha küçüktür. Çelik ceket kullanılan diğer numuneler için sönümlenen enerji miktarları hemen hemen aynıdır. %2 göreli ötelenme oranından sonra ise fark, ilerleyen çevrim adımlarıyla birlikte daha da artmıştır.

• İlk numune dışında çelik ceket kullanılan kiriş kolon bağlantı numunelerinin deneyler sırasında elde edilen kuvvet-yerdeğiştirme ilişkileri, sertlik ve enerji sönümleme özellikleri incelendiğinde benimsenen döngü sayısına kıyasla önemli ölçüde etkilenmediği görülmüştür.

• Çelik ceket kullanılan kiriş kolon bağlantı deneyi numuneleri, ACI 374.1-05'in dayanım, rijitlik ve enerji sönümleme gereksinimlerini karşılamıştır. Üst STMM'lerin çelik ceket bulundurmayan 4x2 konfigürasyonu ise enerji sönümleme kriterlerini karşılamasına rağmen, dayanım ve rijitlik gerekliliklerini yerine getirememiştir.

• Tez çalışması kapsamında önerilen mekanik mafsalın çevrimsel davranışını sayısal olarak temsil etmek üzere sigortalarda doğrusal olmayan şekildeğiştirmelerin toplandığı bir makro model önerilmiştir. Kinematik ve pivot histeretik modeller değerlendirilmiştir.

• Çelik ceketli kiriş kolon bağlantı numunelerinin deneysel kuvvet-yerdeğiştirme çevrimleri, her iki histeretik model için de itme yönünde iyi tahmin edilmiştir. Pivot model, her iki numune için kümülatif histeretik enerjiyi başarıyla tahmin etmektedir. Ancak kinematik model, kesme kuvveti bileşenindeki kayma hareketini değerlendirmede daha etkili olmuştur.

• Düzlem çerçeve deneyinin sonuçlarına göre betonarme çerçeve davranışı, ilerleyen yerdeğiştirme adımlarında kolon tabanında oluşan ve kolon yüksekliği boyunca yayılan eğilme çatlakları şeklinde elde edilebilmiştir.

• İlk çatlama, birinci katın kolon-kiriş birleşim yerlerinde %0,5 göreli ötelenme oranında meydana gelmiştir. Ancak %2,5 ötelemede 2,0 mm genişliğe sahip derin beton çatlakları meydana gelmiş ve bu da itme ve çekme yönünde %5'lik bir yük farkına neden olmuştur.

• Kiriş-kolon birleşim yerlerindeki hasarı azaltmak için şu önlemlerin alınmasının önemli olduğu tespit edilmiştir; kolon kesit boyutunun yükleme düzleminde arttırılması, farklı diş adımlarına sahip manşonların kullanılması, serbest beton bölgesinin kalınlığının azaltılması ve çelik levha ankraj detaylarının iyileştirilmesi.

• Değiştirilebilir sigorta tipi mekanik manşonlar (STMM'ler), önüretimli betonarme çerçevenin genel enerji tüketme kapasitesine ve eşdeğer sönüm özelliklerine katkıda bulunmada başarılı olmuştur. Sünek çerçeve davranışı elde edilmesi için gerekli dönme kapasitelerine de sahiptirler.

• Kiriş-kolon birleşim yerlerinde beklenen plastik şekildeğiştirmeler STMM elemanlarında yoğunlaşmıştır. Böylece kiriş elemanlarında ciddi bir hasar gözlenmemiş ve STMM'lerin kolaylıkla sökülebildiği görülmüştür.

• STMM elemanlarının "değiştirilebilir mekanik plastik mafsal" davranışını çevrimsel yükler altında yeterince temsil edebilen sayısal modeller geliştirilmiştir. Sayısal hesaplama modellerinin kalibrasyonunda "referans veri" olarak önüretimli betonarme çerçeve testi kullanılmıştır.

KAYNAKLAR

[1] **Kurnalı, M.,**(2016). Prefabrikasyonun tarih içerisindeki gelişimi and mekan biçimlenişine etkisi, *Hacettepe Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Sanat Yazıları,* 35, 209-232.

[2] **URL-1** <*https://www.prefabmuseum.uk/content/history/short-history-prefabrication*> erişim tarihi 01.12.2022.

[3] **Özer, C.,** (2022). Prekast Betonarme Yapıların Depreme Dayanıklı Bulonlu Bağlantıları ve Bir Uygulama Örneği, *Beton Prefabrikasyon Dergisi,* 141, 5-16.

[4] **URL-2 <***http://en.broad.com/newsdetail-86.aspx*> erişim tarihi 01.12.2022.

[5] **URL-3 <***https://www.nydailynews.com/life-style/real-estate/15-building-atlantic-yards-project-pre-fabricated-construction-technology-article-1.1209831*> erişim tarihi 01.12.2022.

[6] **URL-4 <** *https://www.rsh-p.com/projects/the-leadenhall-building*> erişim tarihi 01.12.2022.

[7] **URL-5 <** *https://www.hindustantimes.com/real-estate/chinese-developer-builds-10-storey-building-in-changsha-in-just-over-28-hours-101624084275913.html* > erişim tarihi 01.12.2022.

[8] **URL-6** < *https://www.thbb.org/media/531827/thbb-İstatistikler-2020.pdf* > erişim tarihi 01.12.2022.

[9] **URL-7** <*https://www.prefab.org.tr/userfiles/file/pdf/sr2020.pdf* > erişim tarihi 01.12.2022.

[10] **Shiohara, H. ve And Watanabe, F.** (2000). The Japan PRESSS Precast Concrete Connection Design, *12th World Conference on Earthquake Engineering,* Auckland, New Zealand, January 30 - February 4.

[11] **Yuksel, E., Karadogan, H.F., Bal, I.E., Ilki, A., Bal, A. ve Inci, P.** (2015). Seismic behavior of two exterior beam column connections made of normal strength concrete developed for precast construction, *Engineering Structures,* 99, pp. 157–172. doi:10.1016/j.engstruct.2015.04.044

[12] **Girgin, S.C., Kahraman, S., Mısır, İ.S., Özçelik, O. ve Özden, Ş.** (2014). Moment Aktaran Kompozit İç Kolon-Kiriş Bağlantı Testleri ve Sayısal Model Çalışmaları, *Beton Prefabrikasyon,* 111, pp. 5–16.

[13] **Girgin, S.C., Kahraman, S. ve Mısır, İ.S.** (2014). Numerical Simulation of Precast Moment-Resisting Interior Beam-Column Connections under Cyclic Loading, *ACE2014*. Istanbul, Turkiye, October 21-25.

[14] **Parastesh, H., Hajirasouliha, I. ve Ramezani, R.** (2014). A New Ductile Moment-Resisting Connection for Precast Concrete Frames in Seismic Regions: An Experimental İnvestigation, *Engineering Structures*, 70, pp. 144–157. doi: 10.1016/j.engstruct.2014.04.001

[15] **URL-8** < http://alacali.com.tr/tr/portfolio-view/aktek-palmiye-konutlari/ > erişim tarihi 10.12.2022.

[16] **URL-9** < http://www.bs-italia.it/prodotti/bsitalia_rs2540_schede5en.php> erişim tarihi 10.12.2022.

[17] **URL-10** < http://www.splicesleeve.com/ssj/project_gallery_japan.html > erişim tarihi 10.12.2022.

[18] **Nzabonimpa, J.D., Hong, W.K., ve Park, S.C.,** (2017). Experimental investigation of dry mechanical beam–column joints for precast concrete based frames, *The Structural Design of Tall and Special Buildings, 26,* 1-19. doi: 10.1002/tal.1302.

[19] **Aninthanenia, P.K. ve Dhakal, R.P.,** (2014). Conceptual Development: Low Loss Precast Concrete Frame Buildings with Steel Connections, *NZSEE Annual Conference,* Auckland, New Zealand: March 21-23.

[20] **Aninthanenia, P.K. ve Dhakal, R.P.,** Demountable Precast Concrete Frame–Building System for Seismic Regions: Conceptual Development, *Journal of Architectural Engineering, 23* (4), 1-10. doi: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000275.

[21] **Aninthanenia, P.K., Dhakal, R.P., Marshall, J. ve Botharac J.,** (2018). Nonlinear Cyclic Behaviour of Precast Concrete Frame Sub-Assemblies With "Dry" End Plate Connection, *Structures, 14,* 124–136. doi: 10.1016/j.istruc.2018.03.003.

[22] **Vidjeapriya, R., ve Jaya, K. P.,** (2013). Experimental Study on Two Simple Mechanical Precast Beam-Column Connections under Reverse Cyclic Loading, *Journal of Performance of Constructed Facilities, 27*(4), 402-414. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000324.

[23] **Dal Lago, B., Toniolo, G. ve Tornaghi, M. L.** (2016). Influence of different mechanical column-foundation connection devices on the seismic behaviour of precast structures. *Bulletin of Earthquake Engineering, 14*(12), 3485-3508. doi:10.1007/s10518-016-0010-9.

[24] **Khoo, H. H., Clifton, C., Butterworth, B. ve MacRae, G.,** (2013). Experimental Study of Full-Scale Self-Centering Sliding Hinge Joint Connections with Friction Ring Springs, *Journal of Earthquake Engineering, 17:*7, 972-997. doi:10.1080/13632469.2013.787378.

[25] **Ghayeb, H.H., Razak, H. A. ve Sulong, N. H. R.,** (2017). Development and testing of hybrid precast concrete beam-to-column connections under cyclic loading, *Construction and Building Materials, 151,* 258-278. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.06.073.

[26] **Baran, E., Mahamidi M., Baran, M. ve Kurtoglu, M., Torra-Bilal, I.,** (2021). Performance of a moment resisting beam-column connection for precast concrete construction, *Engineering Structures, 246,* 113005. doi: 10.1016/j.engstruct.2021.113005.

[27] **Baran, E., Baran, M. ve Kurtoglu, M.,** (2013). Prekast Betonarme Yapıların Depreme Dayanıklı Bulonlu Bağlantıları ve Bir Uygulama Örneği, *Beton Prefabrikasyon Dergisi, 107,* 16-27.

[28] **Chang, B., Hutchinson, T. C., Wang X. ve Robert Englekirk, R.,** (2013). Experimental Seismic Performance of Beam-Column Subassemblies Using Ductile Embeds, *Journal Of Structural Engıneering, 139,* 1555-1566. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000628.

[29] **Li, S., Li, Q., Jiang, H., Zhang, H., ve Zhang, L.,** (2017). Experimental Research on Seismic Performance of a New-Type of R/C Beam-Column Joints with End Plates, *Shock and Vibration, 2017* (11),1-11. doi: 10.1155/2017/3823469.

[30] **Wang, C., Liu, Y. ve Zhou, L.** (2018). Experimental and numerical studies on hysteretic behavior of all-steel bamboo-shaped energy dissipaters, *Engineering Structures, 165*, 38–49. doi:10.1016/j.engstruct.2018.02.078.

[31] **Zhou, Y., Liu, Y. ve Wang, C.,** (2020). Parametric Studies and Design Method for a New All-steel Bamboo-shaped Energy Dissipater, *Journal of Earthquake Engineering,* 1-18. doi: 10.1080/13632469.2020.1784314.

[32] **Wang, C., Liu Y., Zhenga, X. ve Wub, W.,** (2019). Experimental investigation of a precast concrete connection with all-steel bamboo-shaped energy dissipaters, *Engineering Structures, 178*, 298–308. doi:10.1016/j.engstruct.2018.10.046.

[33] **Richards, P. W. ve Oh, S. S.** (2019). Cyclic Behavior of Replaceable Shear Fuse Connections for Steel Moment Frames, *Journal of Structural Engineering, 145*(12), 1–9. doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002412.

[34] **Choi, H.-K., Choi, Y.-C., ve Choi, C.-S.** (2013). Development and testing of precast concrete beam-to-column connections, *Engineering Structures, 56,* 1820-1835. doi:10.1016/j.engstruct.2013.07.021.

[35] **Wu, C., Yu, S., Liu, J., Chen, G.** (2020). Development and testing of hybrid precast steel-reinforced concrete columnto-H shape steel beam connections under cyclic loading, *Engineering Structures, 211*,1-17. doi: 10.1016/j.engstruct.2020.110460.

[36] **Zhang, J., Ding, C., Ronga, X., Yang, H., Wang, K., Zhang B.** (2020). Experimental seismic study of precast hybrid SFC/RC beam-column connections with different connection details, *Engineering Structures, 208,* 1-18. doi:10.1016/j.engstruct.2020.110295.

[37] **Zhong, Y., Xiong, F., Chen, J., Deng, A., Chen, W., Zhu, X.** (2019). Experimental Study on a Novel Dry Connection for a Precast Concrete Beam-To-Column Joint, *Sustainability, 11,* 1-22. doi:10.3390/su11174543.

[38] **Esmaeili, J., Ahooghalandary, N.** (2020). Introducing an easy-install precast concrete beam-to-column connection strengthened by steel box and peripheral plates, *Engineering Structures, 205,* 1-20. doi:10.1016/j.engstruct.2019.110006.

[39] **Li, Y., Geng, F., Ding, Y. ve Wang, L.** (2021). Experimental Study on Earthquake Resilience of Low-Damage Self-Centering Precast Concrete Frame Connections, *Journal of Earthquake Engineering*, 1-22. doi:10.1080/13632469.2021.1927896.

[40] **Lu, Z., Huang, J., Dai, S., Liu, J. ve Zhang, M.** (2019). Experimental study on a precast beam-column joint with double grouted splice sleeves, *Engineering Structures, 199*, 1-17. doi: 10.1016/j.engstruct.2019.109589.

[41] **Hu, G., Huang, W. ve Xie, H.** (2020). Mechanical behavior of a replaceable energy dissipation device for precast concrete beam-column connections, *Journal of Constructional Steel Research, 164,* 1-19. doi:10.1016/j.jcsr.2019.105816.

[42] **Sergio M. Alcocer, S. M., Carranza, R., Perez-Navarrete, D. ve Martinez, R.** (2002). Seismic Tests of Beam-to-Column Connections in a Precast Concrete Frame, *PCI Journal, 47*(3), 70-89.

[43] **Kulkarni, S., A. ve Li, B.** (2009). Investigations of seismic behavior of hybrid connections, *PCI Journal, 54*(1), 67-87.

[44] **Xue, W. ve Yang, X.** (2010). Seismic tests of precast concrete, moment resisting frames and connections, *PCI Journal, 55*(3), 102-121.

[45] **Lee, H., Chen, H. Ve Syu, J.** (2017). Seismic performance of emulative precast concrete beam–column connections with alternative reinforcing details, *Advances in Structural Engineering, 20*(12), 1793–1806. doi:10.1177/1369433217693633.

[46] **Lacerda, M. M. S., da Silva, T. J., Alva, G.M.S. ve de Lima, M. C. V.** (2018). Influence of the vertical grouting in the interface between corbel and beam in beam-to-column connections of precast concrete structures – An experimental analysis, *Engineering Structures, 172,* 201–213. doi:10.1016/j.engstruct.2018.05.041.

[47] **Lu, C., Dong, B., Pan, J., Shan, Q., Hanif, A. ve Yin, W**. (2018). An investigation on the behavior of a new connection for precast structures under reverse cyclic loading, *Engineering Structures,169*, 131-140.

[48] **Yan, Q., Chen, T. ve Xie, Z.** (2018). Seismic experimental study on a precast concrete beam-column connection with grout sleeves, *Engineering Structures, 155*, 330-344. doi:10.1016/j.engstruct.2017.09.027.

[49] **Gou, S., Ding, R., Fan, J., Nie, X. ve Zhang, J.** (2019). Experimental study on seismic performance of precast LSECC/RC composite joints with U-shaped LSECC beam shells, *Engineering Structures, 189*, 618-634. doi:10.1016/j.engstruct.2019.03.097.

[50] **Arslan M.H., Köroğlu M.A. ve Köken A.,** (2008). Binaların Yapısal Performansının Statik İtme Analizi İle Belirlenmesi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 2,* 71-84.

[51] **Kristiawan, S.A., Hapsari, I.R., Purwanto, E. ve Marwahyudi, M.** (2021). Evaluation of Damage Limit State for RC Frame Based on FE Modeling, *Buildings*, *12*(1), 1-22. doi:10.3390/buildings12010021.

[52] **Celep, Z.,** (2007). Betonarme Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış: Plastik Mafsal Kabulü ve Çözümleme, *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 16-20 Ekim.

[53] **Celep, Z.,** (2007). *Betonarme Taşıyıcı Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranış ve Çözümleme*, Beta Dağıtım, İstanbul.

[54] **Ersoy, U. ve Özcebe, G.,** (2001). *Betonarme*, Evrim Yayınları, İstanbul.

[55] **Şenol, E., Yüksel, B., Yüksel, E. ve İstanbul Teknik Üniversitesi** (başvuru sürecinde) Ankara, Türkiye, Türk Patent ve Marka Kurumu.

[56] **TS 61-2** (2016). Vida Dişleri - ISO Genel Amaçlı, Metrik - Bölüm 2:Normal Adımlı - Anma Çapı 1 mm - 68 mm olan Vida Dişleri için Anma Ölçüleri, Türk Standardları Enstitüsü.

[57] **TS 61-6** (2016). Vida Dişleri – ISO Genel Amaçlı, Metrik – Bölüm 6: 1 mm ve 1,25 mm İnce Adımlı - Anma Çapı 7,5 mm ila 200 mm olan Vida Dişleri için Anma Ölçüleri, Türk Standardları Enstitüsü.

[58] **TS 61-7** (2016). Vida Dişleri – ISO Genel Amaçlı, Metrik – Bölüm 7: 1,5 mm İnce Adımlı – Anma Çapı 12 mm İla 300 mm olan Vida Dişleri için Anma Ölçüleri, Türk Standardları Enstitüsü.

[59] **ISO 15835** (2009). Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars, International Organization for Standardization.

[60] **TS EN ISO 6892-1** (2020). Metalik malzemeler - Çekme deneyi - Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney yöntemi, Türk Standardları Enstitüsü.

[61] **ISO 15835-2** (2018). Steels for the reinforcement of concrete — Reinforcement couplers for mechanical splices of bars- Part 2:Test methods, International Organization for Standardization.

[62] **ACI 374.1-05** (2005). *Acceptance criteria for moment frames based on structural testing and commentary*, ACI Committee 374, 2005, American Concrete Institute, Farmington Hills, Detroit, Michigan.

[63] **FEMA 356** (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Washington, USA.

[63] **ABAQUS, v.6.19** [Computer Software]. Simulia, Dassault Systemes, Providence, RI, USA.

[64] **CSI SAP2000 v22.2.0** [Computer Software]. Integrated Software for Structural Analysis and Design, Computers and Structures Inc., Berkeley: California.

[65] **Şenol, E., Yüksel, E., Özkaynak, H., Soydan, C., Sürmeli, M., Karakus, K. Ve Saruhan, H.** (2022). Development of a novel fuse type mechanical connector. *Structures, 44,* 618-632. doi:10.1016/j.istruc.2022.08.032.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad **:** Erkan ŞENOL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** **:** 2010, Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü
- **Yükseklisans** **:** 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010-2018 yılları arasında Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.
- 2020-2022 yılları arasında Beykent Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Soydan, C., Özkaynak, H., Sürmeli, M., Şenol, E., Saruhan, H., Yüksel, E.** 2022. A Mechanical Plastic Hinge for Beam-to-Column Connections of Precast Reinforced Concrete Systems, *Engineering Structures,* (Hakem Kontrolünde).
- **Şenol, E., Yüksel, E., Özkaynak, H., Soydan, C., Sürmeli, M., Karakuş, K., Saruhan, H.** 2022. Development Of a Novel Fuse Type Mechanical Connector, *Structures, 44*, 618-632.
- **Özkaynak, H., Soydan, C., Sürmeli, M., Şenol, E.** 2020. Önüretimli Betonarme Yapıların Moment Taşıyan Kiriş-Kolon Birleşimlerinde Yenilikçi Yaklaşımla Üzerine Literatür Çalışması, *Beton Prefabrikasyon,* 136, 5-22.

- **Soydan C., Özkaynak H., Sürmeli M., Şenol E., Karakuş K., Saruhan H, Yüksel E.** Numerical and Experimental Performance Evaluation of Fuse Type Mechanical Couplers under Cyclic Loading. *14th International Congress on Advances in Civil Engineering,* September 6-8, 2021 İstanbul, Turkey.
- **Özkaynak H., Soydan C., Sürmeli M., Şenol E., Saruhan H., Yüksel E.** Preliminary Experimental Research on Fuse Type Mechanical Coupler Used in a Novel Beam Column Joint of Precast RC Structures. *6th International Conference on Earthquake Engineering and Seismology,* October 13-15, 2021 Kocaeli, Turkey.
- **Şenol E., Yüksel E.** Experimental Studies on An Original Fuse-Type Mechanical Coupler. *16th European Conference on Earthquake Engineering,* June 18-21, 2018 Thessaloniki, Greece.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Durgun, Y., Güllü, A., Çalım, F., Özden, B., Özcan, A., Ölçer, B., Şenol, E., Şahin, F., Saruhan, H., Yüksel, E.** 2023. Investigation of the Effect of Reinforcement Type on the Flexural Performance of Slab Tracks, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems,* 149(6), 04023039.
- **Güllü, A., Özden, B., Ölçer, B., Özcan, A.İ, Binbir, E., Durgun, Y., Saruhan, H., Şahin, Y., Şenol, E., Khajehdehi, A., Noobakhtjoo, A., Yüksel, E.** 2021. Rapid and Easily Applicable Procedure for Full-Scale Laboratory Tests of Ballastless Slab Tracks, *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems,* 147(9), 04021050.
- **Yüksel, E., Güllü, A., Durgun, Y., Binbir, E., Şenol, E., Khajehdehi, A., Saruhan, H.** 2020. Z-type shear connector for interface of hollow-core slab and cast-in-place topping concrete, *Engineering Structures*, 214, 110563.
- **Karadoğan, H.F., Yüksel, E., Khadehdehi, A., Özkaynak, H., Güllü, A., Şenol, E.** 2019. Cyclic behavior of reinforced concrete cladding panels connected with energy dissipative steel cushions, *Engineering Structur*es, 189, 423-439.
- **Doran, B., Şenol, E. Köse, İ.** 2018. Betonarme Yapılarda Burkulması Önlenmiş Çelik Çapraz elemanların Doğrusa Olmayan Davranışa Etkisi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi,* 20(59), 299-314.
- **Şenol E., Köse İ., Doran B., Mezrea P.E., Akbaş B.** Ductility Enhancement in Reinforced Concrete Structure With Buckling Restrained Braced Frames. *The 2nd International Symposium on Advances in Civil and infrastructure Engineering,* June 12-13, 2015 Vietri Sul Mare, İtalya.
- **Şenol E., Dindar A.A, Yüksel E., Karadoğan H.F.** Energy Dissipation Characteristics of Slab Type Buildings with Special Connectors. *5th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering,* June 25-27, 2015 Crete Island, Greece.
- **Şenol E., Doran B., Selçuk M.E., Berilgen M.M., Yüksel Y.** İskele Kazıklarının Sayısal Analizleri, *8. Kıyı Mühnedisliği Sempozyumu,* Kasım 7-9, 2014 İstanbul, Türkiye.
- **Şenol E., Yüksel E., Karadoğan H.F.** Irregular Slab Type Structures Consisting of Precast Elements Connecred by Energy Dissipaters, *Second Europian*

Conference on Earthquake Engineering and Seismology, August 25-29, 2014 İstanbul, Turkey.

- **Karadoğan H.F., Yüksel E., Şenol E.** Diaphragm Action of Slab Type Structure Consisting of Precast Elements Connected by Energy Dissipaters, *Second Europian Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, August 25-29, 2014 İstanbul, Turkey.
- **Doran B., Akbaş B., Şenol E., Şeker O.** Non linear static analysis of strengthened existing RC frame building using steel braces, *Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, August 28-30, 2013, Vienna, Austria.