

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**



**DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
YAPI BİLİM DALI**

**DEĞİŞTİRİLEBİLİR ÇEKİRDEK PLAKALI
BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN
GELİŞTİRİLMESİ**

Barış SERİN

**Danışman
Doç. Dr. Mehmet Bakır BOZKURT**

MANİSA-2025

BARİŞ SERİN

DEĞİŞTİRİLEBİLİR ÇEKİRDEK PLAKALI BURKULMASI ÖNLENMİŞ
ÇAPRAZLARIN GELİŞTİRİLMESİ

2025

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Manisa Celal Bayar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalında akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, tezin yazımında akademik ve etik kurallara aykırı herhangi bir yapay zeka ve program kullanmadığımı beyan ederim.

Barış SERİN



ÖZET

Doktora Tezi

Barış SERİN
Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Bakır Bozkurt

Sismik olarak aktif bölgelerde yer alan yapıların deprem enerjisini etkin bir şekilde sönmülmesi kritik bir rol oynamaktadır. Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), bu konuda üstün performans gösteren pasif enerji sönmüleyicilerindendir. Ancak, yaygın kullanılan geleneksel beton veya harç dolgulu BÖÇ tasarımları, ek ağırlık, nakliye zorlukları ve deprem sonrası hasar tespiti ile onarım süreçlerinde ciddi dezavantajlara sahiptir. Hasarın yoğunlaştığı çekirdek plakasının incelenmesi veya değiştirilmesinin mümkün olmaması, burkulmayı önleyen mekanizmanın (BÖM) yeniden kullanılabilirliğini engellemektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, tamamı çelik malzemeden oluşan, hasar alan çekirdek plakasının kolayca değiştirilebildiği ve BÖM'ün yeniden kullanılabilirdiği yenilikçi bir yenilenebilir BÖÇ konseptinin geliştirilmesi, deneysel ve nümerik olarak araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda 15 adet tam ölçekli BÖÇ numunesi üzerinde iki aşamalı deneysel program yürütülmüştür. Yarı çerçeve deney düzeneğinde, AISC 341-22 esaslı çevrimsel yükler altında 5 farklı BÖM konfigürasyonu ve 5 farklı bulon aralığının performansı test edilmiştir. Bu deneysel çalışmalara ek olarak, Sonlu elemanlar yöntemi kullanan bilgisayar yazılımı ile BÖM tasarımını optimize etmek amacıyla nümerik analizler yapılmıştır.

Elde edilen test sonuçlarına göre, geliştirilen BÖÇ konsepti AISC 341-22 yeterlilik kriterlerini fazlasıyla karşılamış ve yönetmelik limitinin iki katı olan %4 eksenel birim şekil değiştirme seviyesine kadar kararlı ve simetrik histeretik davranış sergilemiştir. Tez çalışmasının sonucu olarak, BÖM ve bağlantı plakalarının yeniden kullanılabilirliği ile çekirdek plakasının değiştirilebilirliği fikri doğrulanmış ve optimum BÖM tasarımı için öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: burkulması önlenmiş çapraz, değiştirilebilir çekirdek plakası, yeniden kullanılabilir burkulmayı önleme mekanizması, kesit optimizasyonu, deneysel çalışma, sonlu elemanlar analizi

2025, 148 sayfa

ABSTRACT

PhD Thesis

Barış SERİN

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Education
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet Bakır Bozkurt

Effective energy dissipation in structures located in seismically active regions plays a critical role. Buckling-restrained braces (BRBs) are among the passive energy dissipators that demonstrate superior performance in this regard. However, widely-used conventional concrete-filled or grout-filled BRB designs possess significant disadvantages concerning additional weight, transportation difficulties, and post-earthquake damage inspection and repair processes. The impossibility of inspecting or replacing the core plate, where damage is concentrated, prevents the reusability of the buckling-restraining mechanism (BRM).

Within the scope of this dissertation, the development of an innovative, renewable, all-steel BRB concept, which allows for the easy replacement of the damaged core plate and the reuse of the BRM, was targeted and investigated experimentally and numerically. For this purpose, a two-phase experimental program was conducted on 15 full-scale BRB specimens at the Manisa Celal Bayar University Structural and Earthquake Engineering Laboratory. In the subassembly test setup, the performance of 5 different BRM configurations and 5 different bolt spacings was tested under AISC 341-22 based cyclic loads. In addition to these experimental studies, numerical analyses were performed using Finite Element Method (FEM) software to optimize the BRM design.

According to the obtained test results, the developed BRB concept substantially exceeded the AISC 341-22 qualification criteria and exhibited stable and symmetric hysteretic behavior up to a 4% axial strain level, which is double the code limit. As a result of this dissertation, the feasibility of the reusability of the BRM and connection plates, along with the replaceability of the core plate, was validated, and recommendations for an optimum BRM design were presented.

Keywords: buckling-restrained brace, replaceable core plate, reusable buckling-restraining mechanism, cross-section optimization, experimental study, finite element analysis

2025, 148 pages

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ'ler) deprem esnasında maruz kaldıkları tersinir eksenel yüklemeler altında yüksek plastik deformasyon kapasiteleri sayesinde kararlı, öngörülebilir ve yüksek performanslı histeretik davranış sergilerler. Tekrarlanma periyodu 2475 yıl olan en büyük deprem yer hareketine veya 475 yıl olan standart tasarım yer hareketine maruz kalacak BÖÇ'lerin yenileri ile değiştirilmeleri gerekebilir. Bu tez çalışmasının amacı minimum maliyet ile yapının deprem öncesindeki performansına geri dönebilmesi için değiştirilebilir çekirdek plakalı BÖÇ'lerin geliştirilmesidir. Bu amaç kapsamında toplam 15 adet tam ölçekli değiştirilebilir çekirdek plakalı BÖÇ numunesinin deneyleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar nümerik çalışmalar ile desteklenmiştir.

Çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleriyle yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Mehmet Bakır BOZKURT'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Tez İzleme Komitesi toplantılarında değerli fikirleriyle çalışmalarımıza yön veren ve katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Ali DEMİR ve Sayın Prof. Dr. Emre ERCAN hocalarıma teşekkür ederim. Ayrıca, tez savunma jürisinde bulunan Sayın Doç. Dr. Özer ZEYBEK ve Sayın Doç. Dr. Sadık Can GİRĞİN hocalarıma katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Deney düzeneğinin oluşturulması ve numune montajında her türlü desteği sağlayan başta babam olmak üzere inşaat mühendisleri Oğuzhan GÖKÖZ, Fevzi GÜÇLÜER ve Emrah ÇETİN'e desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 221M156 kodlu 1001 projesi ile desteklenmiştir. Ayrıca Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafında BAP 2020-115 ve BAP 2021-104 numaralı projeler ile altyapı oluşturulmasında desteklenmiştir. Çalışmamızı destekleyen kurumlara teşekkür ederim.

Maddi kaygılardan arınarak eğitim hayatıma odaklanmam için destek/burs sağlayan Yüksek Öğretim Kurumu'nun YÖK100/2000 Doktora Bursları programına ve Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu(TÜBİTAK)'nın 2211/A Yurt İçi Doktora Burs Programları ve 2250 Lisansüstü Bursları Performans Programına sağladıkları destek ve burslar için teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan anneme, babama, abime, rahmetli büyükbabama ve kız arkadaşşıma yürekten teşekkür ederim.

Barış SERİN
Manisa, 2025

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

A_g	Burkulmayı önleyen mekanizmanın enkesit alanı
A_{sc}	Burkulması önlenmiş çaprazın akma bölgesinin enkesit alanı
β	Basınç dayanımı düzeltme katsayısı
Δ_{bm}	Tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu
Δ_{by}	Burkulması önlenmiş çapraz elemanının akma deformasyonu
E	Elastisite modülü
E_h	Sönümlenen enerji
F_y	Karakteristik akma gerilmesi
i_{min}	En küçük atalet yarıçapı
ω	Pekleşme etkisi düzeltme katsayısı
P_{cr}	Elastik burkulma dayanımı
P_{ysc}	Olası akma dayanımı
R_y	Olası akma gerilmesinin karakteristik akma gerilmesine oranı
ζ_{eq}	Eşdeğer sönüm oranı

KISALTMALAR

ABS	Bulon çevresi berkitme bulunma durumu
AISC	American Institute of Steel Construction
BÖÇ	Burkulması Önlenmiş Çapraz
BÖM	Burkulmayı Önleme Mekanizması
ED	Eksenel deformasyon
FS	Tamamen berkitme bulunması durumu
KPBD	Kümülatif plastik birim deformasyonu

MCBÜ-BAP	Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi
MCBÜ-YDML	Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı
TBDY	Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği
TÜBİTAK	Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu
WoS	Berkitme bulunmama durumu
YÖK	Yüksek Öğretim Kurumu
YP	Yükleme Protokolü



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1 Geleneksel çapraz ve BÖÇ'lerin deprem gibi çevrimsel yükler altındaki davranışı (Xie (2005)'den derlenmiştir)	4
Şekil 2.2 Tipik bir BÖÇ elemanı (Wada vd. (1998) ve Fahnestock (2007)'den derlenmiştir).....	5
Şekil 2.3 Tipik bir BÖÇ elemanı (Wada vd. (1998) ve Fahnestock (2007)'den derlenmiştir)	5
Şekil 2.4 Tamamı çelik BÖÇ ve harç dolgulu geleneksel BÖÇ tasarımları	7
Şekil 2.5 BÖÇ'lerin çekirdek plakası detayları.....	8
Şekil 2.6 Deney düzeneği.....	8
Şekil 2.7 C1-1 (a), C2-1 (b), S1-1 (c), S1-2 (d), S2-1 (e), S2-2 (1.) (f), S2-2 (2.) (g) ve HSS 127 × 76 × 4.8 (h).	9
Şekil 2.8 Numunelerin enkesit detayı ve özellikleri	11
Şekil 2.9 Çekirdek plakası detayı.....	11
Şekil 2.10 Bağlantı detayı ve deney düzeneği	11
Şekil 2.11 Deney sonucu elde edilen histeretik eğriler	12
Şekil 2.12 F10W0-d1-6 ve F12W0-d1-2 numunelerinde gözlemlenen genel burkulma davranışı	12
Şekil 2.13 BÖÇ-1 ve BÖÇ-2 numune detayları.....	13
Şekil 2.14 BÖÇ-3 numune detayı	13
Şekil 2.15 Eksenel deney düzeneği fotoğrafları.....	14
Şekil 2.16 Yarı çerçeve deney düzeneği	14
Şekil 2.17 Sırasıyla BÖÇ-1, BÖÇ-2 ve BÖÇ-3 numunelerinin histeretik eğrileri	14
Şekil 2.18 Alt guse plakasında meydana gelen hasar fotoğrafları	15
Şekil 2.19 Deneylerde kullanılan BÖM enkesitleri	16
Şekil 2.20 Deney düzeneğine ait şematik gösterim	17
Şekil 2.21 Numunelerin histeretik davranışları.....	17
Şekil 2.22 BÖÇ'ü oluşturan bileşenler.....	19
Şekil 2.23 Çekirdek plakası tasarımları	19
Şekil 2.24 BÖÇ numunelerinin detayları	20
Şekil 2.25 Sırasıyla deney düzeneği, mafsallı bağlantı detayı ve rijit bağlantı detayı.....	21
Şekil 2.26 Numunelerin histeretik davranışları.....	21
Şekil 2.27 BÖÇ numunesinin detayları.....	22
Şekil 2.28 Deney düzeneği ve ölçüm cihazları	23
Şekil 2.29 sırasıyla BÖÇ-1 ve BÖÇ-2 numunelerinin histeretik davranışları	24
Şekil 2.30 BÖÇ numune detayı.....	25
Şekil 2.31 BÖÇ numunesinin detayları.....	25
Şekil 2.32 Deney düzeneği.....	26
Şekil 2.33 Deneylerden elde edilen histeretik davranış ile sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması	26
Şekil 2.34 Seri-1 ve seri-2 numunelerinin çekirdek plakası imalat resimleri	28
Şekil 2.35 Tipik BÖÇ görseli, BÖM imalat resmi ve deney düzeneği	28
Şekil 2.36 BÖÇ'lerin histeretik eğrileri	29
Şekil 2.37 Tam ölçekli BÖÇ numuneleri	31
Şekil 2.38 Küçük ölçekli BÖÇ numuneleri.....	31
Şekil 2.39 Tam ölçekli ve küçük ölçekli deney düzenekleri.....	31
Şekil 2.40 Tam ölçekli numunelerin histeretik eğrileri.....	32
Şekil 2.41 Tipik BÖÇ numunesi ve BÖM enkesit detayları.....	33

Şekil 2.42 Çekirdek plakası teknik çizimleri	33
Şekil 2.43 BÖÇ yaka elemanı	34
Şekil 2.44 Deney düzeneği.....	35
Şekil 2.45 Birinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri	35
Şekil 2.46 İkinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri	36
Şekil 2.47 Çekirdek plakasının ve BÖÇ numunesi detayları	37
Şekil 2.48 Deney düzeneği ve numune deney düzeneği bağlantı detayları	37
Şekil 2.49 Numunelerin histeretik eğrileri	38
Şekil 2.50 Önerilen BÖÇ konseptinin tasarım detayları	39
Şekil 2.51 Deney düzeneği.....	39
Şekil 2.52 Numunelerin histeretik eğrileri	40
Şekil 2.53 Hasarlı çekirdek/sigorta elemanlarının değiştirilme aşamaları	41
Şekil 2.54 Önerilen AB-BRB konseptinin bileşenleri	41
Şekil 2.55 Deney düzeneği.....	42
Şekil 2.56 Çekirdek plakada meydana gelen plastik deformasyonlar.....	42
Şekil 2.57 BÖM'ün beton dolgusunda oluşan hasarlar.....	43
Şekil 2.58 Histeretik eğriler	43
Şekil 2.59 AB-BRB çekirdek plakasının yenisi ile değiştirilme aşamaları	44
Şekil 2.60 Çift çekirdek plakalı burkulması önlenmiş çelik çapraz.....	44
Şekil 2.61 Deney düzeneği.....	44
Şekil 2.62 Tipik göçme mekanizmaları sırasıyla global burkulma ve lokal burkulma göçme tipleri.....	45
Şekil 2.63 Histeretik eğriler	46
Şekil 2.64 Önerilen BÖÇ tasarımı ve çekirdek plakası imalat resimleri.....	47
Şekil 2.65 Deney düzeneği.....	47
Şekil 2.66 Histeretik eğriler	48
Şekil 2.67 Önerilen BÖÇ konsepti.....	49
Şekil 2.68 Deney düzeneği.....	50
Şekil 2.69 Histeretik eğriler	50
Şekil 2.70 Önerilen BÖÇ tasarımı	51
Şekil 2.71 Sırasıyla önerilen BÖÇ'ün ve geleneksel BÖÇ'lerin bağlantı detayı.....	52
Şekil 2.72 Deney düzeneği.....	52
Şekil 2.73 Histeretik eğriler	53
Şekil 2.74 Önerilen BÖÇ konsepti.....	54
Şekil 2.75 Çekirdek plakasının detayları	54
Şekil 2.76 Deney düzeneği.....	55
Şekil 2.77 Histeretik eğriler	55
Şekil 2.78 BÖÇ Konsepti.....	56
Şekil 2.79 Tipik ABRB numunesinin imalat görselleri	56
Şekil 2.80 Deney düzeneği.....	57
Şekil 2.81 Histeretik eğriler	57
Şekil 3.1 MCBÜ-BAP 2020-115 numaralı projede yapımı gerçekleştirilen güçlü döşeme/reaksiyon duvarı sistemi	60
Şekil 3.2 Sırasıyla hidrolik piston, hidrolik ünite, kontrol yazılımı ve kontrol paneline ait görseller.....	61
Şekil 3.3 Deney düzeneğine ait izometrik görünüş.....	62
Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait kesit görünümü.....	62
Şekil 3.5 Kupon numunelerinin deney düzeneğindeki görünüşü.....	64
Şekil 3.6 Kupon numunelerinin kopma öncesi ve sonrası halleri.....	64
Şekil 3.7 18mm plakaya ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri.....	64

Şekil 3.8 Deney numunelerinde kullanılan azaltılmış enkesit tasarımına sahip çekirdek plakasının imalat resmi	65
Şekil 3.9 BÖM ve bulon değişkenlerinin izometrik görünüşleri	67
Şekil 3.10 Sırasıyla BÖM-1, BÖM-2, BÖM-3, BÖM-4 ve BÖM-5 enkesitlerinin imalat resimleri.....	68
Şekil 3.11 BÖM-1 imalat resimleri.....	69
Şekil 3.12 BÖM-2 ~ BÖM-5 imalat resimleri	69
Şekil 3.13 Teflon plakanın deney öncesi ve sonrası durumunu gösteren görseller ...	70
Şekil 3.14 Deneylerde kullanılan birleşim detayı	71
Şekil 3.15 Sırasıyla eksenel deformasyonu ve kayma miktarını ölçmek için kullanılan LVDT'ler.....	72
Şekil 3.16 YP-1 yükleme protokolünün grafiksel gösterimi.....	74
Şekil 3.17 Numunelerin deney düzeneği içerisindeki tipik görünüşü-1	74
Şekil 3.18 Numunelerin deney düzeneği içerisindeki tipik görünüşü-2	75
Şekil 3.19 Farklı bulon aralıklarının detayları	75
Şekil 3.20 a-BÖM dış berkitme plakası, b- BÖM iç berkitme plakası, c- IPE80 profil, d- BÖM taban plakası, e- ayırıcı kılavuz plakası, f- değişken geometrilili çekirdek plakası, g- çekirdek berkitme plakası, h- M20 8.8 Bulon	77
Şekil 3.21 “Assembly” modülünde montajı tamamlanmış tipik BÖÇ numunesi ve sırasıyla 80mm, 160mm, 240mm, 320mm, 400mm ve 640mm aralıklarla bulon yerleşim detayları	78
Şekil 3.22 Tipik sonlu eleman ağ yapısı	80
Şekil 3.23 Sonlu eleman ağ yapısı boyutunun/sayısının analiz süresi ve deneysel-nümerik hata üzerine etkisi	81
Şekil 3.24 400 mm bulon aralığı için değişkenler sırasıyla: Tamamen Berkitme Bulunması-10mm Taban Plakası, Bulon Çevresi Berkitme Bulunması-10mm Taban Plakası, Berkitmesiz-10mm Taban Plakası, Berkitmesiz-15mm Taban Plakası ...	82
Şekil 4.1 BÖÇ-01 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	83
Şekil 4.2 BÖÇ-01 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	85
Şekil 4.3 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	85
Şekil 4.4 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	85
Şekil 4.5 BÖÇ-02 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	86
Şekil 4.6 BÖÇ-02 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri	88
Şekil 4.7 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	88
Şekil 4.8 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	88
Şekil 4.9 BÖÇ-03 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	89
Şekil 4.10 BÖÇ-03 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	91
Şekil 4.11 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	91
Şekil 4.12 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	91
Şekil 4.13 BÖÇ-04 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	92
Şekil 4.14 BÖÇ-04 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	94
Şekil 4.15 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	94

Şekil 4.16 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	94
Şekil 4.17 BÖÇ-05 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	95
Şekil 4.18 BÖÇ-05 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	97
Şekil 4.19 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	97
Şekil 4.20 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	97
Şekil 4.21 BÖÇ-06 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	98
Şekil 4.22 BÖÇ-06 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	100
Şekil 4.23 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	100
Şekil 4.24 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	100
Şekil 4.25 BÖÇ-07 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	101
Şekil 4.26 BÖÇ-07 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	103
Şekil 4.27 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	103
Şekil 4.28 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	103
Şekil 4.29 BÖÇ-08 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	104
Şekil 4.30 BÖÇ-08 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	106
Şekil 4.31 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	106
Şekil 4.32 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	106
Şekil 4.33 BÖÇ-09 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	107
Şekil 4.34 BÖÇ-09 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	109
Şekil 4.35 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	109
Şekil 4.36 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	109
Şekil 4.37 BÖÇ-10 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	110
Şekil 4.38 BÖÇ-10 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	112
Şekil 4.39 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	112
Şekil 4.40 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	112
Şekil 4.41 BÖÇ-11 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	113
Şekil 4.42 BÖÇ-11 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	115
Şekil 4.43 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	115
Şekil 4.44 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	115
Şekil 4.45 BÖÇ-12 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	116
Şekil 4.46 BÖÇ-12 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	118
Şekil 4.47 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	118
Şekil 4.48 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	118

Şekil 4.49 BÖÇ-13 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	119
Şekil 4.50 BÖÇ-13 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	121
Şekil 4.51 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	121
Şekil 4.52 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	121
Şekil 4.53 BÖÇ-14 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	122
Şekil 4.54 BÖÇ-14 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	124
Şekil 4.55 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı	124
Şekil 4.56 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	124
Şekil 4.57 BÖÇ-15 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı	125
Şekil 4.58 BÖÇ-15 numunesinde gözlemlenen BÖM açılması.....	126
Şekil 4.59 BÖÇ-15 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri.....	127
Şekil 4.60 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen hasarlar.....	128
Şekil 4.61 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)	128
Şekil 4.62 BÖÇ-08 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	129
Şekil 4.63 BÖÇ-11 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	129
Şekil 4.64 BÖÇ-12 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	130
Şekil 4.65 BÖÇ-13 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	130
Şekil 4.66 BÖÇ-14 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	131
Şekil 4.67 BÖÇ-15 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı .	131
Şekil 4.68 BÖÇ-01~BÖÇ-14 numunelerine ait tipik çekirdek plakası von-Mises gerilme dağılımı plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler	132
Şekil 4.69 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasına ait von-Mises gerilme dağılımı plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler	132
Şekil 4.70 Deney sırasındaki deformasyonları ile analizden elde edilen deformasyon şeklinin karşılaştırmalı görseli	133
Şekil 4.71 Deney sonrasındaki deformasyonları ile analizden elde edilen deformasyon şeklinin karşılaştırmalı görseli	133
Şekil 4.72 Berkitme etkisinin histeretik davranış üzerindeki etkileri – 400mm	135
Şekil 4.73 Berkitme etkisinin histeretik davranış üzerindeki etkileri – 640mm	135
Şekil 4.74 Bulon aralığının histeretik davranış üzerindeki etkileri - ABS.....	136
Şekil 4.75 Bulon aralığının histeretik davranış üzerindeki etkileri -WoS	136
Şekil 4.76 Taban plakası kalınlığının histeretik davranış üzerindeki etkileri – 10mm	137
Şekil 4.77 Taban plakası kalınlığının histeretik davranış üzerindeki etkileri – 15mm	137

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 3.1 BÖÇ numunelerinin değişkenleri	63
Tablo 3.2 Kuponların çekme deneyi sonuçları	63
Tablo 3.3 Çekirdek plakasının karakteristik ve gerçek akma dayanımları	66
Tablo 3.4 Numune bazında BÖM ve bulon değişken özellikleri	66
Tablo 3.5 BÖÇ deney numunelerinde kullanılan BÖM'lerin dayanım hesapları	70
Tablo 3.6 AISC 341-22 standardında tanımlanan yükleme protokolü	73
Tablo 3.7 Deneysel davranışı simüle etmek için modellenen BÖÇ numuneleri	76
Tablo 3.8 Doğrusal olmayan kinematik-izotropik pekleşme modeli (Chaboche)	78
Tablo 3.9 Doğrusal olmayan bi-lineer izotropik pekleşme modeli	78
Tablo 3.10 Bileşenler arasında tanımlanan etkileşim tipleri	80
Tablo 3.11 Sonlu eleman ağ yapısı boyutları, teknikleri ve sayıları	81
Tablo 3.12 Analizlerdeki toplam sonlu eleman ağ yapısı sayıları	81
Tablo 4.1 BÖÇ-01 numaralı deney numunesinin sonuçları	84
Tablo 4.2 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	86
Tablo 4.3 BÖÇ-02 numaralı deney numunesinin sonuçları	87
Tablo 4.4 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	89
Tablo 4.5 BÖÇ-03 numaralı deney numunesinin sonuçları	90
Tablo 4.6 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	92
Tablo 4.7 BÖÇ-04 numaralı deney numunesinin sonuçları	93
Tablo 4.8 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	95
Tablo 4.9 BÖÇ-05 numaralı deney numunesinin sonuçları	96
Tablo 4.10 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	98
Tablo 4.11 BÖÇ-06 numaralı deney numunesinin sonuçları	99
Tablo 4.12 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	101
Tablo 4.13 BÖÇ-07 numaralı deney numunesinin sonuçları	102
Tablo 4.14 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	104
Tablo 4.15 BÖÇ-08 numaralı deney numunesinin sonuçları	105
Tablo 4.16 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	107
Tablo 4.17 BÖÇ-09 numaralı deney numunesinin sonuçları	108
Tablo 4.18 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	110
Tablo 4.19 BÖÇ-10 numaralı deney numunesinin sonuçları	111
Tablo 4.20 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	113
Tablo 4.21 BÖÇ-11 numaralı deney numunesinin sonuçları	114
Tablo 4.22 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	116
Tablo 4.23 BÖÇ-12 numaralı deney numunesinin sonuçları	117

Tablo 4.24 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	119
Tablo 4.25 BÖÇ-13 numaralı deney numunesinin sonuçları.....	120
Tablo 4.26 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	122
Tablo 4.27 BÖÇ-14 numaralı deney numunesinin sonuçları.....	123
Tablo 4.28 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	125
Tablo 4.29 BÖÇ-15 numaralı deney numunesinin sonuçları.....	126
Tablo 4.30 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri	128
Tablo 4.31 Analiz değişken parametrelerine bağlı göçme tipleri ve performans seviyeleri/kapasiteleri.....	134



İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	III
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IV
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
TABLolar DİZİNİ	XI
İÇİNDEKİLER	XIII

BİRİNCİ BÖLÜM

1. GİRİŞ	1
----------	---

İKİNCİ BÖLÜM

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
2.1. BÖÇ Hakkında Yapılan Başlıca Deneysel Çalışmalar	7
2.1.1. Tremblay vd. (2006)	7
2.1.2. Usami vd. (2008)	10
2.1.3. Ma vd. (2009)	13
2.1.4. Eryaşar ve Topkaya (2010)	15
2.1.5. Zhao vd. (2010)	18
2.1.6. Ma ve Ou (2012)	22
2.1.7. Wu vd. (2014)	24
2.1.8. Chen vd. (2016)	27
2.1.9. Metelli vd. (2016)	30
2.1.10. Bozkurt ve Topkaya (2016)	32
2.1.11. Dehghani ve Tremblay (2017)	36
2.1.12. Qu vd. (2018)	38
2.1.13. Cao vd. (2020)	41
2.1.14. Huang vd. (2021)	44
2.1.15. Bai vd. (2022)	46
2.1.16. Cahis vd. (2023)	48
2.1.17. Chao vd. (2024)	51
2.1.18. Yuan vd. (2024)	53
2.1.19. Wu vd. (2025)	56

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. MATERYAL VE YÖNTEM	59
3.1. Deneysel Araştırmalar	59

3.1.1. Deney Düzeneği	59
3.1.2. Deney Numuneleri	62
3.1.2.1. Malzeme Mekanik Özellikleri	63
3.1.2.2. Çekirdek Plakası	65
3.1.2.3. Burkulmayı Önleyen Mekanizma	66
3.1.2.4. Ayırıcı Malzeme	70
3.1.2.5. Döğüm Noktası Birleşim Detayı	71
3.1.2.6. Ölçüm Sistemleri ve Yöntemleri	72
3.1.2.7. Yükleme Protokolü	73
3.1.3. Deney Kurulumu	74
3.2. Nümerik Araştırmalar	76
3.2.1. Deneyssel Davranışı Simüle Etme	76
3.2.2. Burkulmayı Önleyen Mekanizma Nümerik Optimizasyonu	81
DÖRDÜNCÜ BÖLÜM	
4. BULGULAR	83
4.1. Deneyssel Bulgular	83
4.1.1. BÖÇ-01	83
4.1.2. BÖÇ-02	86
4.1.3 BÖÇ-03	89
4.1.4. BÖÇ-04	92
4.1.5. BÖÇ-05	95
4.1.6. BÖÇ-06	98
4.1.7. BÖÇ-07	101
4.1.8. BÖÇ-08	104
4.1.9. BÖÇ-09	107
4.1.10. BÖÇ-10	110
4.1.11. BÖÇ-11	113
4.1.12. BÖÇ-12	116
4.1.13. BÖÇ-13	119
4.1.14. BÖÇ-14	122
4.1.15. BÖÇ-15	125
4.2. Nümerik Bulgular	128
4.2.1. Deneyssel Davranış Simülasyonu Bulguları	129
4.2.2. Burkulmayı Önleyen Mekanizma Optimizasyonu Bulguları	133

BEŞİNCİ BÖLÜM

5. SONUÇ VE ÖNERİLER	138
KAYNAKLAR	140
EKLER	144
EK-1: Genel, İmalat ve Parça Resimleri	144
EK-2: Kupon çekme testi sonuçları	148



1. GİRİŞ

Türkiye gibi sismik olarak aktif olan bölgelerde yer alan yapıların deprem etkisi altında can güvenliğini sağlaması yapı mühendisliğinin öncelikli hedeflerindendir. Bu hedefe ulaşmak için yapıya etkiyen sismik enerjinin etkin bir şekilde sönümlenmesi kritik bir rol oynamaktadır. Pasif enerji sönümleyiciler, bu bağlamda hem yeni yapıların tasarımında hem de mevcut yapıların sismik performansının iyileştirilmesinde yaygın olarak kullanılan ve kabul görmüş mühendislik çözümleridir.

Bu enerji sönümleyiciler arasında, özellikle çelik çerçeveli yapılarda kullanılan geleneksel çelik çaprazlar, çekme yükleri altında sünek davranış sergilemelerine rağmen, basınç yükleri altında burkulma riski taşımaktadır. Burkulma, çapraz elemanın ani dayanım ve rijitlik kaybına uğramasına neden olarak yapının genel sismik performansını olumsuz etkilemektedir. Bu soruna çözüm olarak geliştirilen burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ'ler), çekirdek plakanın basınç yükleri altında burkulmasını dış bir mekanizma ile engelleyerek hem çekme hem de basınç altında kararlı, dolgun ve simetrik histeretik çevrimler sergileme yeteneğine sahiptir. Bu sayede BÖÇ'ler, çevrimsel yüklemeler altında önemli miktarda sismik enerjiyi güvenli bir şekilde sönümleyerek yapısal performansı artırmaktadır.

Ancak, yaygın olarak kullanılan geleneksel BÖÇ tasarımları yani beton veya harç dolgulu çelik tüplerden oluşanlar, bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu sistemlerin imalatı, ek ağırlıkları nedeniyle nakliye ve montaj zorluklarına yol açabilmektedir. Daha da önemlisi, büyük bir deprem sonrasında hasarın yoğunlaştığı çekirdek plakanın dolgu malzemesi nedeniyle incelenmesi veya değiştirilmesi genellikle mümkün olmamaktadır. Bu durum, deprem sonrası hasar tespitini zorlaştırmakta, onarım sürecini uzatmakta, maliyetleri artırmakta ve burkulmayı önleyen mekanizmanın (BÖM'ün) yeniden kullanılabilirliğini engellemektedir.

Bu zorlukların üstesinden gelmek ve deprem sonrası onarım süreçlerini hızlandırıp maliyetleri düşürmek amacıyla, tamamı çelik malzemeden oluşan ve çekirdek plakası değiştirilebilir konseptler geliştirilmektedir. Tamamı çelik BÖÇ'ler, beton dolgulu sistemlere göre daha hafif olmaları, imalat ve montaj kolaylığı sağlamaları gibi avantajlar sunar. Özellikle bulonlu birleşimlerle tasarlanan BÖM'ler,

deprem sonrasında hasar gören çekirdek plakanın kolayca muayene edilmesine ve yenisiyle değiştirilmesine olanak tanır. Bu "yenilenebilirlik" özelliği, BÖM'ün ve bağlantı elemanlarının yeniden kullanılabilmesini sağlayarak hem ekonomik hem de çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli faydalar sunar.

Bu doktora tezi çalışması, tamamı çelik malzemeden oluşan, deprem sonrası hasar alan çekirdek plakasının kolayca değiştirilebildiği ve BÖM'ün yeniden kullanılabilirdiği yenilikçi bir yenilenebilir BÖÇ konseptinin geliştirilmesi, deneysel ve nümerik olarak araştırılması üzerine odaklanmaktadır. Bu kapsamda çalışmanın temel hedefleri şunlardır:

- Hafif, yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip ve BÖM'ün yeniden kullanılabilirliğini sağlayan, değiştirilebilir çekirdek plakalı, tamamı çelik bir BÖÇ sistemi geliştirmek.
- Farklı BÖM konfigürasyonlarının (5 farklı tip) sismik performansını, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda kurulan yarı-çerçeve deney düzeneğinde quasi-statik çevrimsel yükler altında deneysel olarak incelemek ve optimum BÖM tasarımını belirlemek.
- Optimum BÖM tasarımında kullanılan bulonların sayısı ve aralığının (5 farklı aralık) BÖÇ elemanının genel performansına etkisini deneysel olarak araştırmak.
- Gerçekleştirilen deneyleri, sonlu elemanlar tabanlı ABAQUS yazılımı kullanarak nümerik olarak modellemek ve elde edilen sonuçları deneysel verilerle karşılaştırarak nümerik modelin doğruluğunu teyit etmek.
- Doğrulan nümerik modeller ile BÖM tasarımını (berkitme tipi, bulon aralığı, taban plakası kalınlığı) optimize etmek amacıyla parametrik analizler yürütmek.
- Geliştirilen yenilenebilir BÖÇ sisteminin performansını, AISC 341-22 gibi güncel sismik yönetmelik kriterleri açısından değerlendirmek.

Tez, beş bölümden oluşmaktadır. Bu giriş bölümünün ardından, Bölüm 2'de BÖÇ'ler üzerine yapılmış önceki çalışmalar ve özellikle tamamı çelik BÖÇ'ler ile değiştirilebilir/yenilenebilir konseptler üzerine odaklanan bir kaynak araştırması sunulmaktadır. Bölüm 3'te, deneysel çalışmalarda kullanılan materyaller, deney düzeneği, numune tasarımları, ölçüm sistemleri ve uygulanan yükleme protokolü ile nümerik analizlerde kullanılan modelleme teknikleri, malzeme modelleri ve analiz

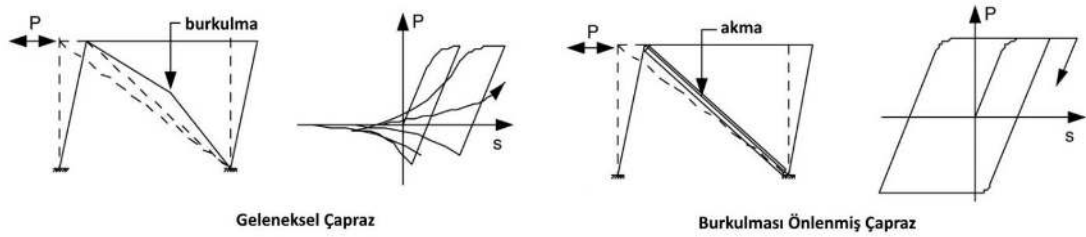
yöntemleri detaylı olarak açıklanmaktadır. Bölüm 4'te, hem deneysel hem de nümerik çalışmalar sonucunda elde edilen bulgular sunulmakta, karşılaştırılmakta ve tartışılmaktadır. Bölüm 5'te ise, çalışmadan elde edilen temel sonuçlar özetlenmekte ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunmaktadır. Ayrıca EK-1'de bütün üretilen numunelerin imalat resimleri EK-2'de çekme kupon testlerinin sonuçları verilmiştir.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Sismik bölgelerde bulunan yapıların olası bir deprem altında yapısal bütünlüklerini koruyarak can güvenliği performansını sağlamaları, yapı mühendisliğinin temel hedeflerindendir. Bu bağlamda, sismik enerjiyi etkin bir şekilde sönümleyebilen pasif enerji sönümleyiciler, hem yeni yapı tasarımlarında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak kabul görmüştür. Bu pasif sönümleyiciler arasında, basınç yükleri altında burkulması önlenerek hem çekme hem de basınç yükleri altında kararlı ve dolgun histeretik çevrimler sergileyen burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), çevrimsel yükleme altında göstermiş oldukları performansları nedeniyle öne çıkmaktadır.

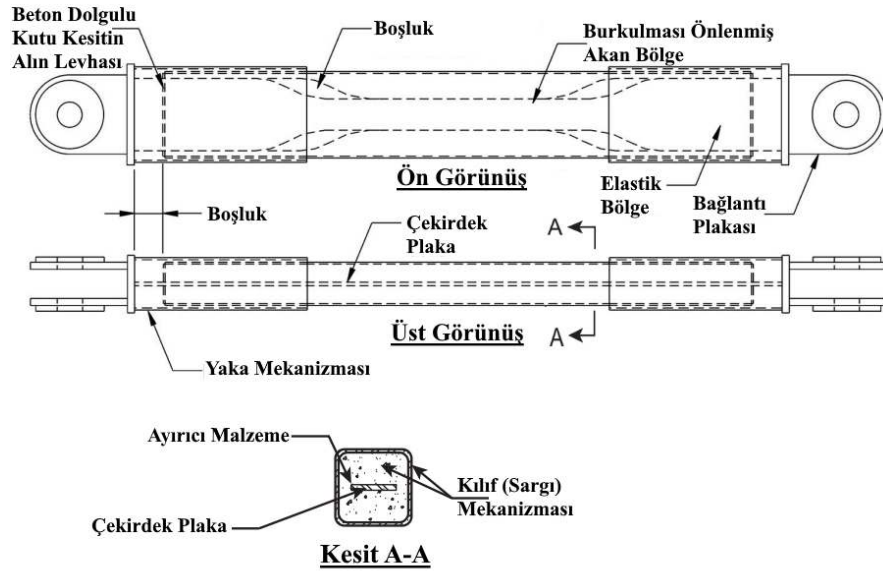
BÖÇ konseptinin temel amacı, geleneksel çelik çaprazlarda basınç yükü altında görülen ve ani dayanım/rijitlik kaybına yol açan burkulma sorununu ortadan kaldırmaktır. Bu sayede BÖÇ'ler, Şekil 2.1'de görüldüğü gibi simetrik histeretik eğriler üreterek önemli miktarda sismik enerjiyi güvenle sönümleyebilir.



Şekil 2.1 Geleneksel çapraz ve BÖÇ'lerin deprem gibi çevrimsel yükler altındaki davranışları (Xie (2005)'den derlenmiştir)

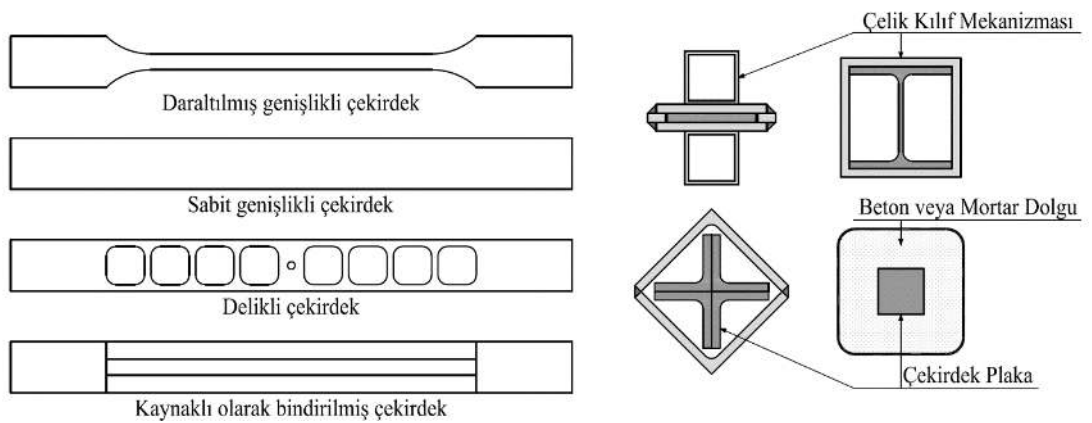
BÖÇ konseptinin temelleri 1970'li yıllarda Japonya'da atılmıştır. Yoshino vd. (1971) tarafından önerilen ilk formların ardından, Wakabayashi (1973) çelik plakanın prekast betonarme panellerle kısıtlanması fikrini ortaya atmıştır. Kimura vd. (1976) ise bu konsepti, dış tüp içine harç dolgusu yapılan çaprazlara uygulayarak pratik bir çözüm geliştirmiştir. BÖÇ'ün ilk temsili uygulaması Fujimoto vd. (1988) tarafından gerçekleştirilmiş olsa da, sistemin teorik altyapısı ve gelişimi Watanabe vd. (1988) ve Wada vd. (1998) gibi araştırmacılar tarafından detaylandırılmıştır.

Tipik bir BÖÇ elemanı (Şekil 2.2), üç ana bileşenden oluşur (Uang ve Nakashima, 2004) Bunlar sırasıyla çekirdek plaka, burkulmayı önleyici mekanizma (BÖM) ve ayırıcı malzemedir.



Şekil 2.2 Tipik bir BÖÇ elemanı (Wada vd. (1998) ve Fahnestock (2007)’den derlenmiştir)

Çekirdek plaka aksenal yükün tamamını taşıyan ve plastik şekil değiştirme yoluyla sismik enerjiyi tüketen elemanlardır. Genellikle çelik (Tremblay vd., 2006) veya alüminyum malzemeden (Usami vd., 2012) imal edilir. Akmanın belirli bir bölgede (akma bölgesi) yoğunlaşması için, Şekil 2.3’te görüldüğü gibi daraltılmış (Tremblay vd., 2006), sabit genişlikli (Eryaşar ve Topkaya, 2010), delikli (Piedrafita vd., 2013) veya bindirmeli (Bozkurt ve Topkaya, 2016) gibi farklı geometrilerde üretilir.



Şekil 2.3 Tipik bir BÖÇ elemanı (Wada vd. (1998) ve Fahnestock (2007)’den derlenmiştir)

Burkulmayı önleyici mekanizma (BÖM) çekirdek plakanın basınç altında lokal ve global burkulmasını engelleyen dış kasadır. Bu kasa geleneksel olarak beton/harç

dolgulu elik tüplerden veya tamamı elik profillerden (Tremblay vd., 2006; Eryaşar ve Topkaya, 2010; Bozkurt ve Topkaya, 2016) oluşabilir.

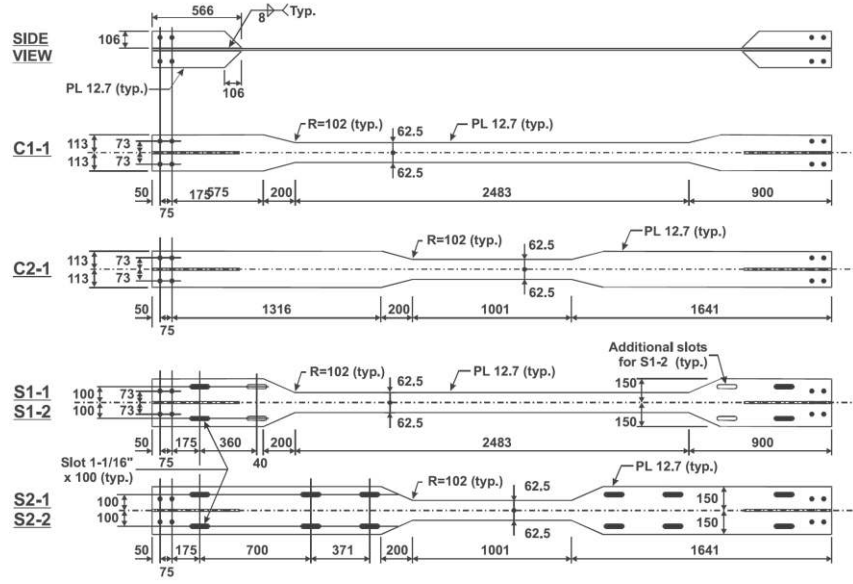
Ayırıcı malzeme çekirdek ile B M arasında yer alarak eksenel yükün B M'e aktarılmasını önleyen ve sürtünmeyi minimize eden katmandır. Bu amaçla epoksi, silikon kauçuk (Tsai vd., 2004), greslenmiş film (Eryaşar ve Topkaya, 2010), teflon (Bozkurt ve Topkaya, 2016) veya çeşitli kauçuk ( zelik vd., 2015a-c) malzemeler kullanılmıştır.

Yaygın olarak kullanılan geleneksel B 'ler, genellikle beton veya harç dolgulu elik tüplerden oluşur. Ancak bu konfigürasyonlar, getirdikleri ek ağırlık nedeniyle nakliye ve montaj zorluklarına yol açar. Daha da önemlisi, deprem sonrası hasar tespiti ve sürdürülebilirlik açısından ciddi bir dezavantaja sahiptirler: Hasar, enerjiyi sönümleyen çekirdek plakada yoğunlaşır, ancak dolgu malzemesi (beton/harç) nedeniyle bu çekirdeğin incelenmesi veya değiştirilmesi mümkün değildir. Bu durum, B M' n yeniden kullanımını engeller ve deprem sonrası onarım maliyetlerini artırır.

Bu zorlukların üstesinden gelmek amacıyla, bu tezin de odak noktasını oluşturan tamamı elik elemanlardan oluşan burkulması önlenmiş çaprazlar geliştirilmiştir. Bu B 'ler bulonlu veya kaynaklı elik profillerden oluşan bir B M kullanarak bazı avantajlar sunar. Bu avantajlardan en önemlileri hafiflik ve kolay imalattır. Beton k rlenmesi gibi süreçler ortadan kalktığı için imalat süresi kısılır ve montaj kolaylaşır. Ayrıca muayene ve değiştirilebilirlik özellikle bulonlu sistemler sayesinde, deprem sonrası hasarlı çekirdek plaka kolayca muayene edilebilir ve değiştirilebilir. Bu, B M' n yeniden kullanılabilirliğini sağlayarak sürdürülebilir tasarım hedeflerine ulaşılmasını ve onarım maliyetlerinin düşürülmesini sağlar.

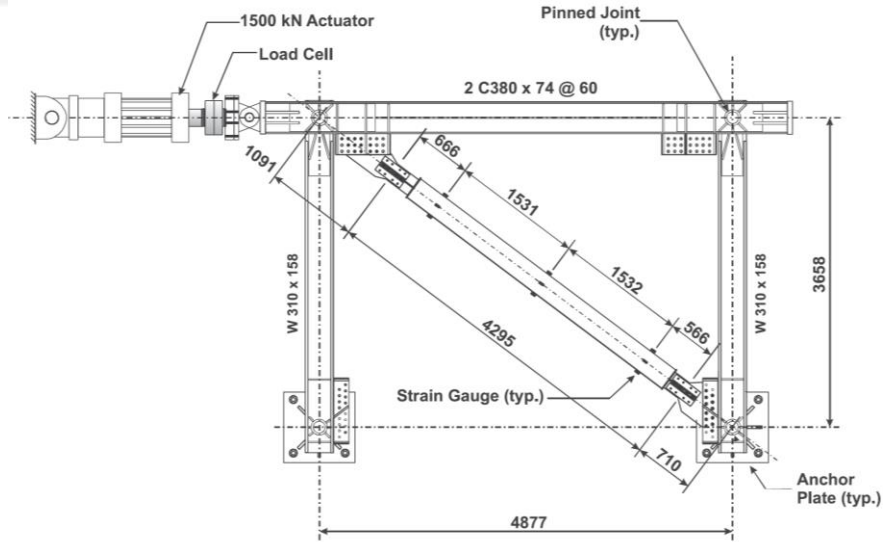
B  sistemlerinin artan önemi, tasarım yönetmeliklerine de yansımıştır. İlk tasarım kuralları AISC 341-05 (2005) ile getirilmiş, devam eden yıllarda (2010, 2016, 2022) yapılan bilimsel çalışmalara paralel olarak bu kurallar güncellenmiştir. Avrupa'da EN-15129 (2018), Türkiye'de ise TBDY 2018 (2018) B  tasarım esaslarını tanımlamıştır. TBDY 2018'in, ülkemizdeki sismik güçlendirme (Sutcu vd., 2014) ve yeni yapı projelerinde bu sistemlerin kullanımını artırması beklenmektedir.

Ülkemizde B 'ler üzerine yapılan  nc  deneysel alışmalar ODTÜ, İT  ve Akdeniz  niversitesi'nde y r t lm ştir. ODTÜ'de tamamı elik sargılı sistemler (Eryaşar ve Topkaya, 2010), İTÜ'de beton dolgulu ve alüminyum çekirdekli sistemler



Şekil 2.5 BÖÇ'lerin çekirdek plakası detayları

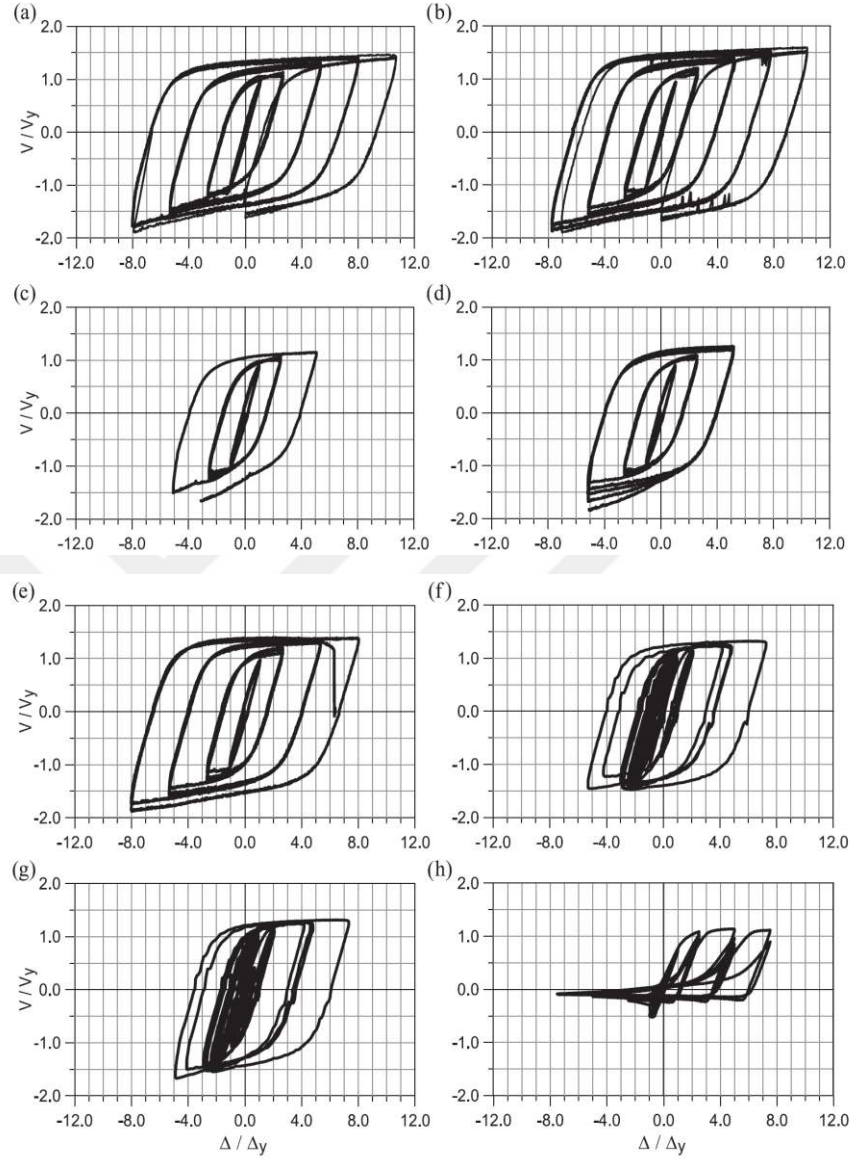
Araştırmanın birincil hedefi, BÖÇ elemanlarının gerçekçi sınır koşulları altında maruz kaldığı düzlem içi eğilme taleplerini saptamaktır. Bununla birlikte, çekirdek uzunluğunun performansa etkisi, tamamı çelik burkulmayı önleyici mekanizma konseptinin davranışı ve sistemin dinamik yük tepkilerinin geleneksel çaprazlarla karşılaştırılması da amaçlanmıştır.



Şekil 2.6 Deney düzeneği

Deneyler, Şekil 2.6'da gösterilen ve yatay olarak monte edilmiş gerçek ölçekli bir çerçeve düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Yükleme, 1500 kN kapasiteli yüksek performanslı bir dinamik aktüatör ile diyagonal konfigürasyondaki numunelere uygulanmış; kat ötelemesi ve kesme kuvveti verileri sürekli olarak kaydedilmiştir.

Programda, biri Amerikan şartnamesine dayanan yarı statik H1 protokolü, diğeri ise doğrusal olmayan zaman tanım analize dayalı dinamik H2 protokolü olmak üzere iki farklı yükleme prosedürü izlenmiştir.



Şekil 2.7 C1-1 (a), C2-1 (b), S1-1 (c), S1-2 (d), S2-1 (e), S2-2 (1.) (f), S2-2 (2.) (g) ve HSS 127 × 76 × 4.8 (h).

Şekil 2.7'de histeretik eğrileri sunulan deneylerin sonuçları, harç dolgulu C1-1 ve C2-1 numunelerinin beklendiği gibi kararlı ve tekrarlanabilir davranışlar sergilediğini göstermiştir. Buna karşın, yarı statik H1 protokolü uygulanan tamamı çelik S1-1 numunesinin testi, $5\Delta y$ çevriminde uç bölgelerdeki aşırı yerel burkulma sebebiyle durdurulmuştur. Bu hasar, çekirdek ile sargı arasındaki 1.6 mm'lik geniş boşluk ve yetersiz bulon aralığı ile ilişkilendirilmiştir.

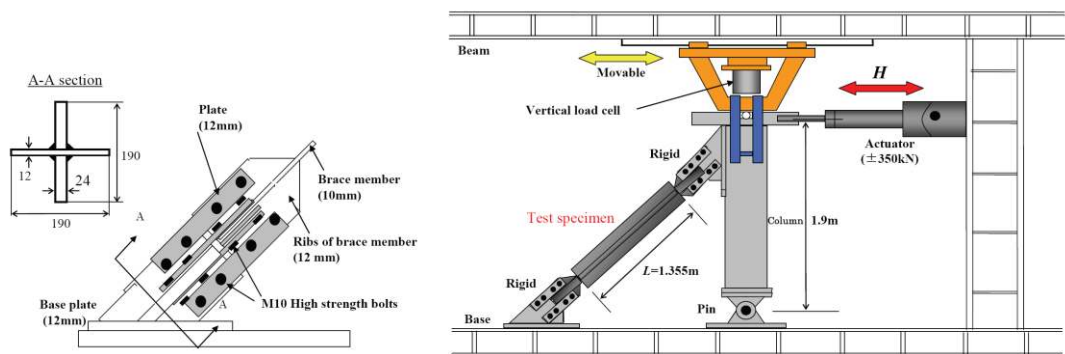
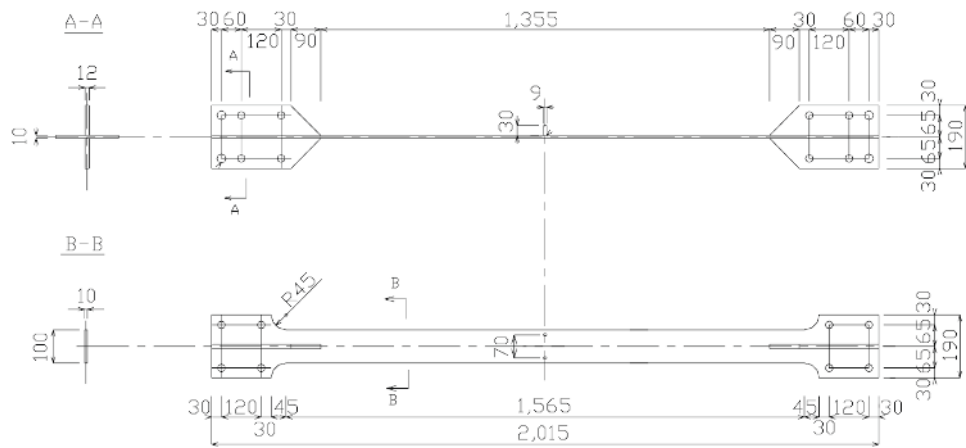
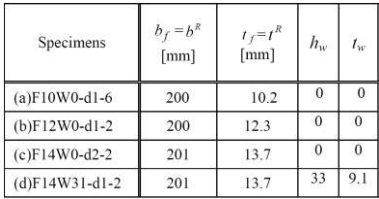
S1-2 numunesinde bu sorunları aşmak için bulon aralığı azaltılmış ve uca ek plaka konulmuştur; ancak bu modifikasyonun sürtünmeyi artırarak yükü sargıya aktardığı tespit edilmiş ve test 7.5Δy'de sonlandırılmıştır. Bu ilk deneylerden öğrenilenlerle, S2-1 ve S2-2 numunelerinde daha ince dolgu plakaları kullanılarak yerel burkulmanın azaltılması hedeflenmiştir. Yarı statik H1 protokolü altındaki S2-1, 6.3Δy çevriminde çekirdek kopması yaşarken; dinamik H2 protokolü ile yüklenen S2-2'de farklı bir davranış gözlenmiştir. Dinamik H2 yüklemesi, yüksek deformasyon hızı nedeniyle çekirdek akma direncini etkilemiş ve maksimum eksenel yüklere daha düşük deplasman seviyelerinde ulaşılmasına neden olmuştur.

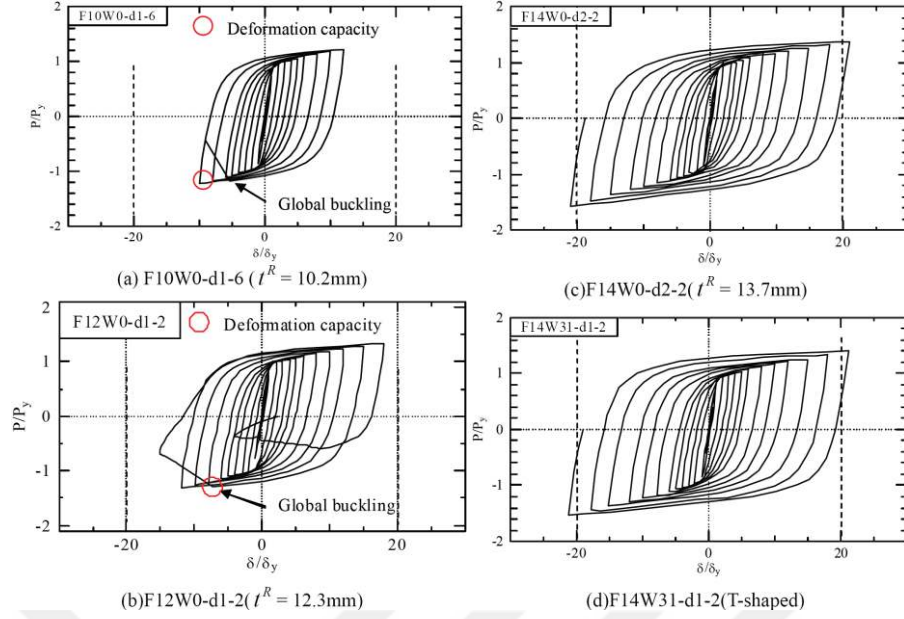
Sonuç olarak, bu çalışma tamamı çelik BÖÇ tasarımının, sürtünme etkisi azaltılırsa ve çekirdeğin yerel eğilmesi kontrol edilirse başarılı olabileceğini göstermiştir. Bu doğrultuda, daha sık bulonlama, daha rijit bir burkulmayı önleyen mekanizma ve çekirdek-BÖM arası boşluğun minimumda tutulması önerilmiştir. Son olarak, dinamik H2 yüklemesinin, yarı statik H1 protokolüne kıyasla düşük çevrimli yorulma açısından daha az zorlayıcı olduğu ve çapraz akma direncinde %5'lik bir artışa yol açtığı saptanmıştır.

2.1.2. Usami vd. (2008)

Bu çalışma, BÖÇ'lerin burkulma önleme mekanizmasının deneysel olarak incelenmesini ele almaktadır. Binalara kıyasla köprülerde uygulanan BÖÇ'lerin daha ağır ve imalatının zor olması, genel burkulma durumunu göz önünde bulunduran daha hafif sistemlerin geliştirilmesini teşvik etmiştir. Bu bağlamda, harç dolgusu olmaksızın, tamamı çelik bileşenlerden oluşan düşük ağırlıklı BÖÇ'ler önerilmiş ve test edilmiştir.

Araştırmanın hedefi, BÖÇ'lerin genel burkulma davranışını anlamak ve kullanılan burkulmayı önleyici mekanizmanın mukavemetini incelemektir. Bu doğrultuda, aynı çelik çekirdeklere sahip dört adet numune test edilmiştir. Numunelerde üç farklı BÖM kalınlığı parametre olarak seçilmiştir. Çekirdek ile BÖM arasındaki sürtünmeyi azaltmak için 1 mm kalınlığında 'Santac' malzemesi kullanılmıştır. Kesit detayları Şekil 2.8'de, numune boyutları ise Şekil 2.9'da verilmektedir.





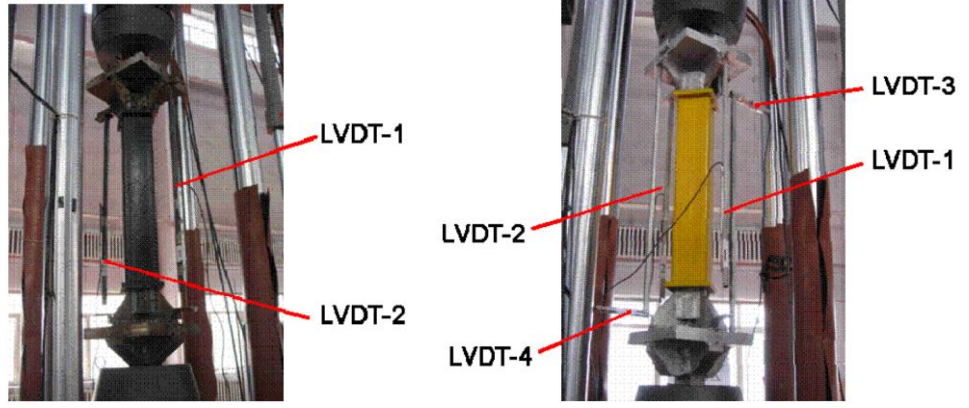
Şekil 2.11 Deney sonucu elde edilen histeretik eğriler

Elde edilen histeretik eğriler Şekil 2.11’de sunulmuştur. F10W0-d1-6 numaralı numunenin mukavemeti $10\Delta_y$, F12W0-d1-2 numaralı numuneninki ise $12\Delta_y$ çevriminden sonra hızla azalmış ve testler durdurulmuştur. Şekil 2.12’de görüldüğü gibi, bu hasarın nedeni yetersiz BÖM kapasitesine bağlı genel burkulmadır. F14W0-d2-2 ve F14W31-d1-2 numaralı numuneler ise genel burkulma yaşamamış ve yüksek enerji sönümlemiştir.



Şekil 2.12 F10W0-d1-6 ve F12W0-d1-2 numunelerinde gözlemlenen genel burkulma davranışı

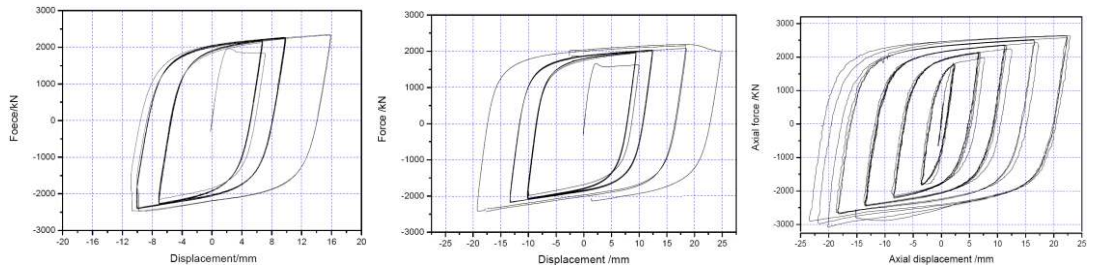
Sonuç olarak, F10W0-d1-6 ve F12W0-d1-2 numaralı numuneler, düşük BÖM mukavemeti ve rijitliği sebebiyle plastik deformasyona ulaşmadan burkulmuştur. Diğer F14W0-d2-2 ve F14W31-d1-2 numuneler ise hedeflenen süneklik kapasitesini karşılamıştır. Başarısız olan ilk iki numunede gözlemlenen ani mukavemet ve enerji



Şekil 2.15 Eksenel deney düzeneği fotoğrafları



Şekil 2.16 Yarı çerçeve deney düzeneği



Şekil 2.17 Sırasıyla BÖÇ-1, BÖÇ-2 ve BÖÇ-3 numunelerinin histeretik eğrileri

BÖÇ-1'in deneyi, 18.6 mm itme deplasmanında üst uçta dönme meydana gelmesiyle sonlanmıştır. Şekil 2.17'de verilen histeretik eğrilerde, BÖÇ-1 ilk çekme çevriminde 1850 kN seviyesinde bir plastik plato göstermiştir. Bu değer, 1338 kN olan teorik malzeme kapasitesinden yaklaşık %40 daha yüksektir. Bu beklenmedik aşırı

dayanımın, çekirdeğin BÖM'e nokta kaynakla tutturulması sonucu BÖM'ün de istenmeyen şekilde yük taşımasından kaynaklandığı anlaşılmıştır.

BÖÇ-1'deki bu bulgu üzerine, BÖÇ-2'nin çekirdek kesit alanı azaltılarak, hedeflenen 1500 kN akma kuvvetini verecek şekilde yeniden ayarlanmış. BÖÇ-2, 2500 kN'luk aktüatör kapasite sınırına kadar başarılı bir performans göstermiş, ancak test sonlandırıldıktan sonra BÖM söküldüğünde çekirdekteki kaynak noktalarında çatlaklar gözlemlenmiştir. Bu durum, akma bölgesine yapılan yerel kaynağın düşük çevrimli yorulma performansını ciddi şekilde zayıflattığını ortaya koymuştur.

Yarı çerçeve düzeneğinde test edilen BÖÇ-3 ise standart protokolü kopma olmadan tamamlamış ve ek çevrimlere maruz bırakılmıştır. Bu ek çevrimlerde, BÖÇ elemanından bağımsız olarak, alt guse plakasında bir imalat hatası nedeniyle düzlem dışı burkulma (Şekil 2.18) yaşanmıştır. Guse plakasındaki bu hasara rağmen, BÖÇ-3 elemanının kendisi kararlı bir histeretik davranış sergilemiştir.



Şekil 2.18 Alt guse plakasında meydana gelen hasar fotoğrafları

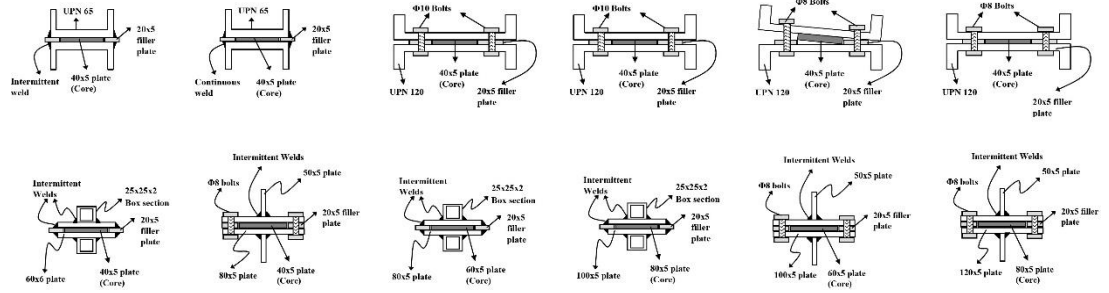
Sonuç olarak bu araştırma, incelenen BÖÇ tasarımlarının yüksek enerji sönmüleme kapasitesine ve simetrik davranışa sahip olduğunu doğrulamıştır. Ancak çalışma, çekirdeğin akma bölgesinin burkulmayı önleyen mekanizmaya kaynaklanmasının, akma bölgesinde kaynak gibi ısı girdilerinin yorulma davranışı üzerinde olumsuz etkiler yarattığını ve üretim kalitesinin bu sistemlerde kritik önem taşıdığını göstermiştir.

2.1.4. Eryaşar ve Topkaya (2010)

Çalışmada, 12 adet çelik burkulmayı önleyen mekanizmaya (BÖM) sahip burkulma önleyici çaprazın deprem davranışları araştırılmıştır. Araştırmada, haddelenmiş ve yapma profillerden oluşan BÖM'lerin kaynaklı ve bulonlu bağlantı alternatifleri incelenmiştir. Bulon öngermesi, çekirdek-BÖM bağlantısı, çekirdek en-boy oranları ve imalat hataları gibi faktörlerin çaprazlar üzerindeki etkileri de değerlendirilmiştir.

İki aşamalı deneysel programın ilk aşamasında çekirdek ile burkulmayı önleyen mekanizma arasındaki etkileşim, burkulma, bulonlu bağlantılar ve öngerme konuları ele alınmıştır. İkinci aşamada ise BÖM'ler optimize edilerek farklı en-boy oranlarına sahip çekirdek segmentleri test edilmiştir. Toplam 12 küçük ölçekli numune test edilmiştir: 1-8 arası 40x5 mm, 9 ve 11 60x5 mm, 10 ve 12 ise 80x5 mm çekirdek kesitine sahiptir.

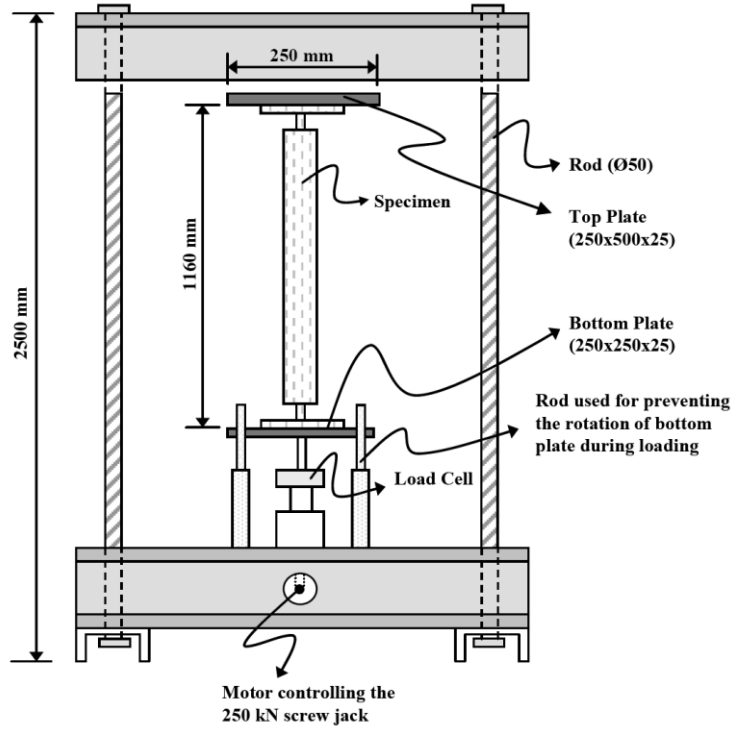
Tüm çekirdeklerin uçlarına 120 mm uzunluğunda 40x5 mm kesitli güçlendirici plakalar haç şeklinde yerleştirilmiştir. İlk aşamada, zayıf eksen burkulmasını önlemek için çekirdek, haddelenmiş çelik kesitler arasına konumlandırılmıştır. İlk iki numunede UPN 65'ler kaynakla birleştirilirken, 3-6 arası numunelerde UPN 120'ler bulonla birleştirilmiştir. Numune detayları Şekil 2.19'da gösterilmektedir.



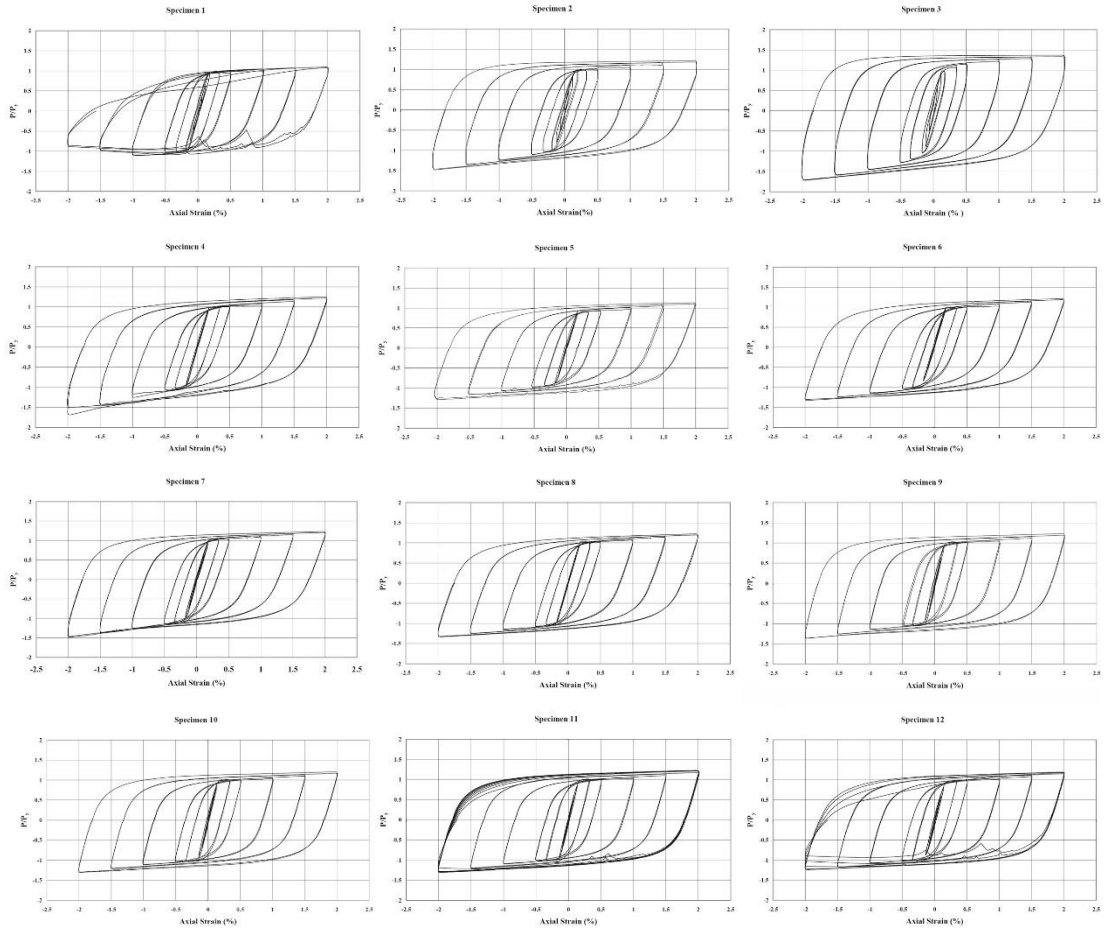
Şekil 2.19 Deneysel programda kullanılan BÖM enkesitleri

Tüm numunelerde çekirdek plakası dört kat 0.05 mm kalınlığında polietilen filmle kaplanmıştır; 5-12 arası numunelerde bu film üzerine ek olarak motor yağı sürülmüştür. Deneyler, 250 kN kapasiteli bir piston ve özel bir çerçeve ile yarı-statik olarak AISC yükleme protokolüne uygun yapılmıştır. Deney düzeneğine ait şematik gösterim Şekil 2.20'de verilmiştir. Protokol, tüm numunelere akma uzunluğunun %0.33'ten %2'ye kadar olan deformasyon seviyelerinde ikişer çevrim olarak uygulanmıştır.

Kümülatif elastik olmayan deformasyonları incelemek amacıyla 11 ve 12 numaralı numunelerde, standart protokol sonrasında %2 deformasyonda ek çevrimler uygulanmıştır. Sonuçlar Şekil 2.21'de verilmiştir. Deneylerde tüm numunelerde, çekirdek plakası ile BÖM arasındaki boşluktan kaynaklı güçlü eksen eğilme gözlenmiştir. Geniş kaynak aralıkları nedeniyle ilk iki numune olumsuz performans sergilemiştir.



Şekil 2.20 Deney düzeneğine ait şematik gösterim



Şekil 2.21 Numunelerin histeretik davranışları

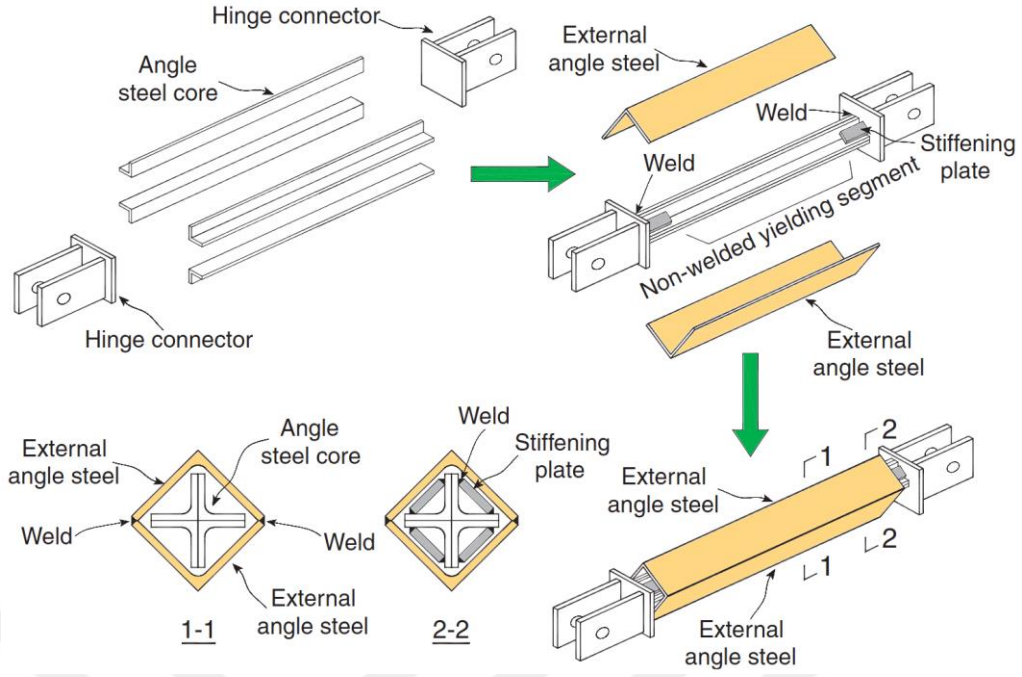
Bulonlu birleşimlerde lokal plastik deformasyonlar görülmüştür. 3 ve 4 numaralı numunelerdeki öngermeli bulonlar aşırı sürtünmeye, 4 numaralı numunede ise burkulmayı önleyen mekanizmanın kayması performans düşüşüne yol açmıştır. Kaymayı önlemek için 5 ve 6 numaralı numunelerde çekirdek ile BÖM arasına punto kaynağı atılmıştır. İmalat hataları, zayıf eksende lokal plastik deformasyonlara ve eğilmelere neden olmuştur. İlk aşama, çekirdek ile BÖM arasında yeterli boşluk bırakmanın burkulmayı engellediğini doğrulamıştır.

7 ve 8 numaralı numuneler, yakın aralıklı bağlantıları sayesinde yeterli histeretik davranış göstermiştir. En-boy oranı 16'ya kadar olan çekirdekli BÖÇ'lerin performansı da yeterli bulunmuştur. Deneysel sonuçlar, çekirdek ile BÖM arasında doğrudan temasın kararlı bir davranış sağladığını, ancak sürekli kaynak ve sıkı bulonlu bağlantıların olumsuz performans sergilediğini göstermiştir. Çekirdeğin BÖM içinden kaymasını önlemek için tam orta noktadan atılacak tek bir punta kaynağının tercih edilebileceği ve bulon tork değerlerinin sismik performansı kritik düzeyde etkilediği gözlemlenmiştir.

2.1.5. Zhao vd. (2010)

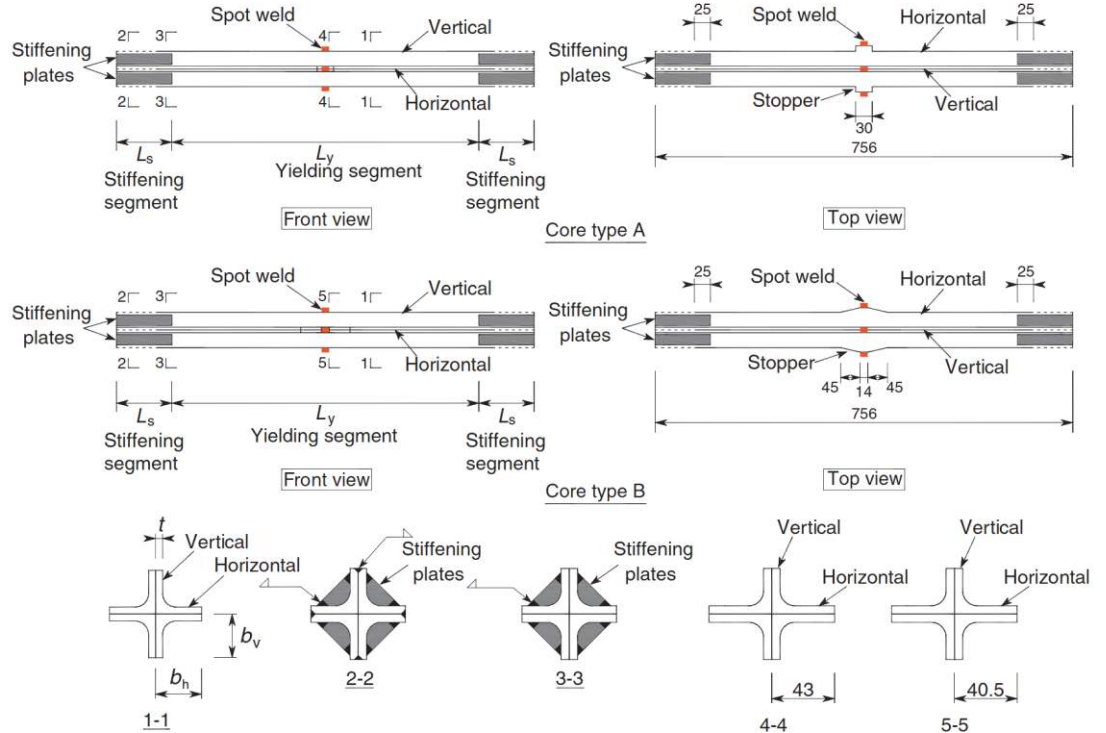
Bu çalışmada, esnek ve montajı kolay çelik köşebentlerden oluşan yeni bir burkulmayı önleyici mekanizma (BÖM) geliştirilmiştir. Sistem, dört köşebent profilden kaynaksız bir haç enkesit formu oluşturacak şekilde tasarlanan bir çelik çekirdeğe sahiptir. Bu kaynaksız yaklaşımın amacı, çekirdekteki kusurları kolayca kontrol ederek kararlı bir davranış sağlamaktır. Çapraz elemanların uçlarında elastik kalması gereken bölgelerin kesitini artırmak için dört adet plaka kaynaklanmış, burkulmayı önleyen mekanizma ise iki köşebentin boyuna doğrultuda kaynakla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Bu sistemin performansı, yedi adet numune üzerinde tek eksenli yarı statik çevrimsel yükleme ile test edilmiştir. BÖÇ ana bileşenleri ve detayları Şekil 2.22'de sunulmuştur.

Çelik çekirdek köşebentleri, yüksek sıcaklık kaynaklı geometrik kusurları minimize etmek için soğuk işleme yöntemiyle imal edilmiştir. Toplam 756 mm uzunluğundaki çekirdeklerin köşebent kalınlığı 5 mm'dir. 1, 2, 3, 4 ve 7 numaralı numunelerde akma bölgesi 556 mm ve uç güçlendirme bölgesi 100 mm olarak tasarlanmıştır. 5 ve 6 numaralı numunelerde ise akma bölgesi 456 mm'ye düşürülmüş, güçlendirilmiş bölge ise 150 mm'ye çıkarılmıştır.



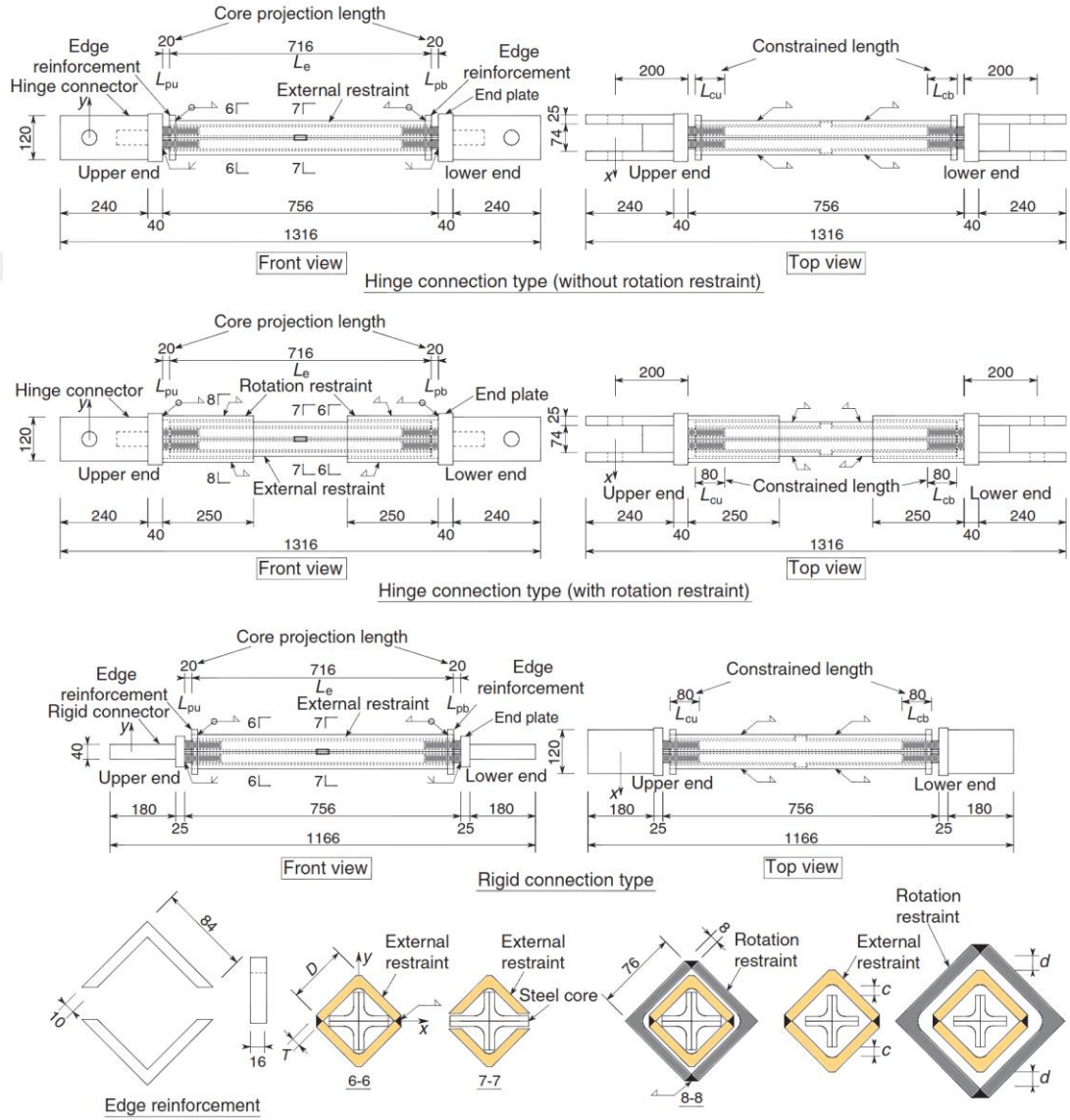
Şekil 2.22 BÖÇ'ü oluşturan bileşenler

Çekirdek tipi detaylarının etkisini incelemek amacıyla, durdurucu geometrileri farklı iki çelik çekirdek tasarımı geliştirilmiş ve detayları Şekil 2.23'de gösterilmiştir. Dört köşebent profilin birlikte çalışması için sadece ortadan punto kaynakla birleştirilmiştir. Ayrıca, birleşim bölgesindeki dönme etkisini analiz etmek için mafsallı ve rijit bağlantı tasarımları yapılmıştır.



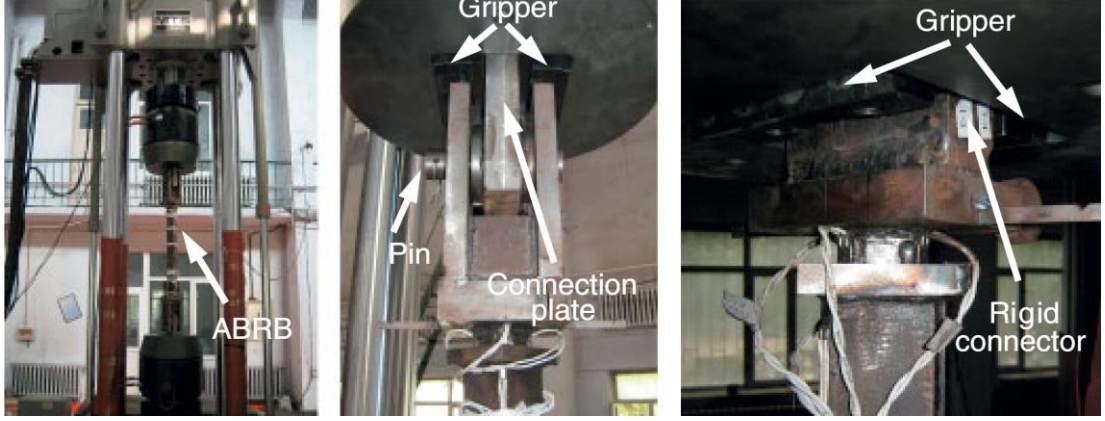
Şekil 2.23 Çekirdek plakası tasarımları

Poisson etkisi nedeniyle, 1'den 5'e ve 7 numaralı numunelerde her iki tarafta 1 mm'lik bir tasarım boşluğu bırakılırken açılı çekirdeğin kullanıldığı 6 numaralı numunede ise bu boşluk 2 mm olarak uygulanmıştır. Sürtünmeyi azaltmak için çekirdeğin dış yüzeyine ve burkulmayı önleyen mekanizmanın iç yüzeyine makine yağı sürülmüştür. BÖM'ün her iki ucu, dönmeyi engellemek amacıyla Şekil 2.24'te görülen takviye plakalarıyla güçlendirilmiştir.



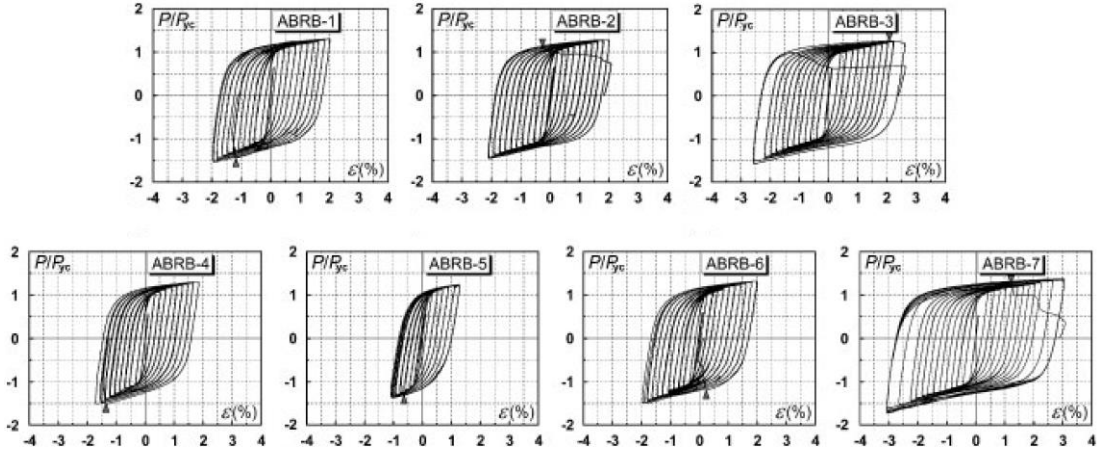
Şekil 2.24 BÖÇ numunelerinin detayları

Tüm köşebent profiller 235 MPa akma dayanımına sahip Q235-B sınıfı çelikten, takviye plakaları ise Q235-B ve Q345-B çelik sınıflarından seçilmiştir. Testler, Şekil 2.25'teki 2500 kN kapasiteli deney düzeneği kullanılarak tek eksenli yarı statik çevrimsel yükleme altında yapılmıştır.



Şekil 2.25 Sırasıyla deney düzeneği, mafsallı bağlantı detayı ve rijit bağlantı detayı

Numunelere elastik ve elasto-plastik olmak üzere iki aşamalı çevrimsel yükleme uygulanmıştır. Elastik aşamada akma dayanımının %60'ına karşılık gelen yük ile dört çevrim uygulanmış, ardından elasto-plastik aşamada deplasman kontrollü yüklemeye geçilmiştir. Yükleme, çekirdek deformasyonunun akma bölgesi uzunluğuna oranının 0.4 katından 3 katına kadar çevrimsel olarak sürdürülmüştür. Histeretik davranışlar Şekil 2.26'te sunulmuştur. 5 numaralı numune %1.2 çekirdek deformasyonuna kadar kararlı bir performans sergilerken, en iyi çevrimsel davranış %3 çekirdek deformasyonuna ulaşan 7 numaralı numunede gözlemlenmiştir.



Şekil 2.26 Numunelerin histeretik davranışları

7 numaralı numune, %3 eksenel akma oranı ve 1.26 maksimum beta değeri ile en kararlı davranışı göstermiştir. Tüm numunelerin kümülatif plastik süneklik kapasitesi 200 olan AISC sınırını aşmış; 7 numaralı numune 1068 ile en yüksek değere ulaşmıştır.

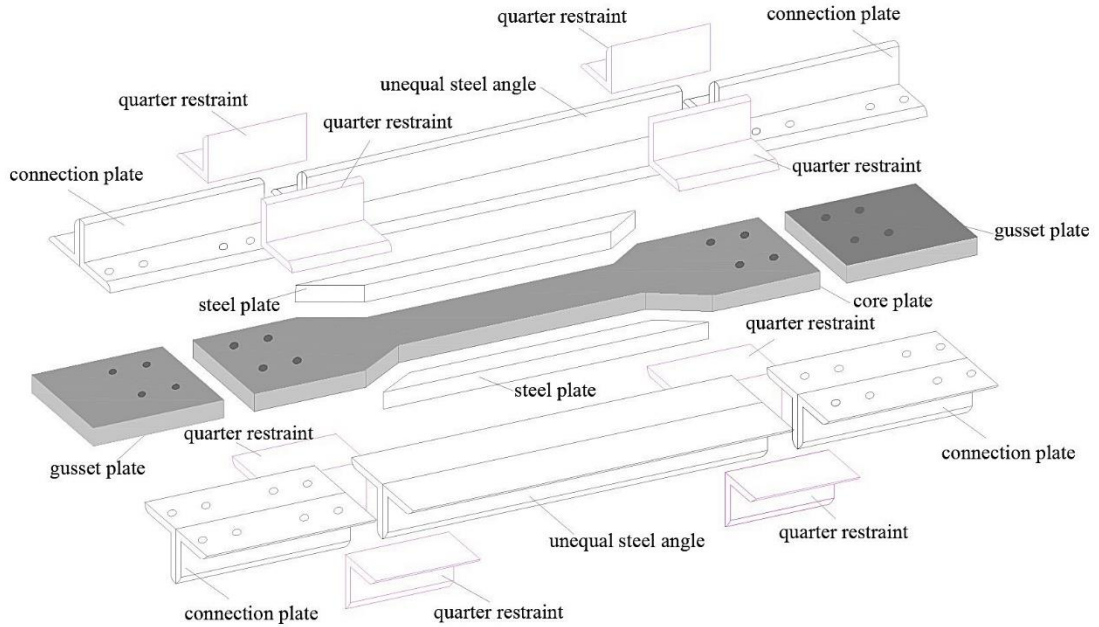
Çalışmanın sonucunda, çelik çekirdeğe kaynak uygulanmamasının imalat hatalarını azalttığı ve düşük çevrimli yorulma özelliklerini iyileştirdiği raporlanmıştır.

Mafsallı birleşimlerde çekirdek çıkıntısının tasarımının dönme açısından kritik olduğu bulunmuştur. Çekirdek tipi detayları incelendiğinde ise, daha köşeli durdurucu tasarımlarında gerilme yoğunlaşması nedeniyle erken göçme gözlemlenmiş, 13 derecelik yatay eğime sahip kademeli durdurucu tasarımının daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır.

2.1.6. Ma ve Ou (2012)

Çalışmada, Q100 sınıfı düşük akma dayanımlı çelik kullanılarak üretilen burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) davranışı incelenmiştir. Normal yapısal çelikli BÖÇ'lerin düşük sünekliğe sahip betonarme yapıların hasarını kontrol etmekte fazla rijit kaldığı tespiti üzerine, akma dayanımı 100 MPa'dan düşük olan bu malzemeden iki prototip üretilip test edilmiştir.

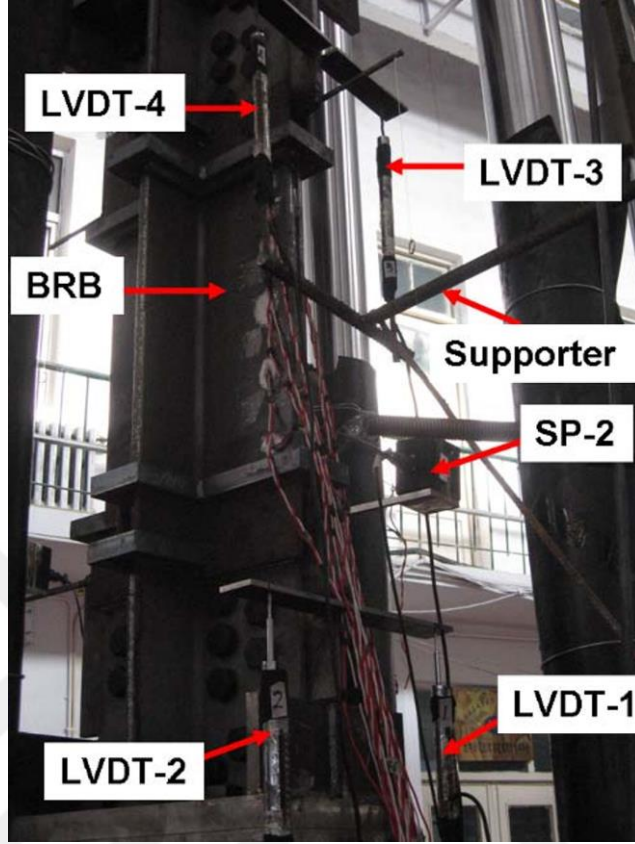
Test numunelerinde çekirdek malzemesi olarak Q100, burkulmayı önleyen mekanizma malzemesi olarak ise Q235 sınıfı çelik kullanılmıştır. Burkulmayı önleyen mekanizma, dört eşit olmayan korniyer ile iki çelik levhanın birbirine kaynaklanmasıyla teşkil edilmiştir. BÖÇ numunesinin detayları Şekil 2.27'de sunulmuştur.



Şekil 2.27 BÖÇ numunesinin detayları

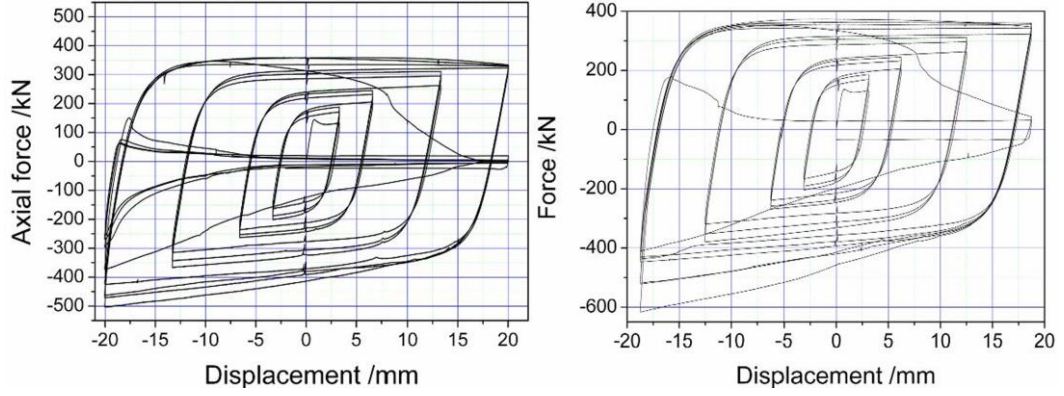
Deneyler, 2500 kN kapasiteli tek eksenli çevrimsel yükleme yoluyla uygulanmıştır. Çekirdek plakasının aksenal deformasyonunu ölçmek için iki

potansiyometre ve dört LVDT kullanılmıştır. Deney düzeneğinin görünümü Şekil 2.28’de verilmiştir.



Şekil 2.28 Deney düzeneği ve ölçüm cihazları

Yükleme protokolü, %0.5, 1, 2 ve 3'lük aksenal deformasyon genliklerinde her seviyede üçer çevrim olacak şekilde uygulanmıştır. BÖÇ-1, ilk üç yüklem seviyesinde iyi performans göstermiş, ancak dördüncü seviyede maksimum çekme gerilmesinde hafif bir düşüş yaşamıştır. Beşinci çevrimde taşıma kapasitesi hızla azalmıştır. Buna rağmen numune, kararlı bir histeretik davranış ve yeterli enerji sönümleme kapasitesi sergilemiştir. Test sonrası yapılan inceleme, çekirdek plakasının ucuna yakın bir bölgede, muhtemelen malzeme kusurlarından kaynaklanan bir kırılma olduğunu göstermiştir. BÖÇ-2 numunesi, ilk üç kademe ve dördüncü kademedeki altı çevrim boyunca başarılı bir performans sergilemiştir. Taşıma kapasitesinde ani bir düşüş yedinci yüklem kademesinde gözlenmiştir. BÖÇ-2'nin burkulmayı önleyen mekanizması açılarak incelendiğinde, BÖÇ-1'de olduğu gibi çekme kuvveti altında bir kopma meydana geldiği görülmüştür. Burkulmayı önleyen mekanizmanın kısıtlayıcı etkisinin, çekirdek plakasındaki burkulma dalga genliğini düşük tuttuğu ve malzemenin pekleşme davranışının histeretik çevrimlere yansıdığı belirtilmiştir.



Şekil 2.29 sırasıyla BÖÇ-1 ve BÖÇ-2 numunelerinin histeretik davranışları

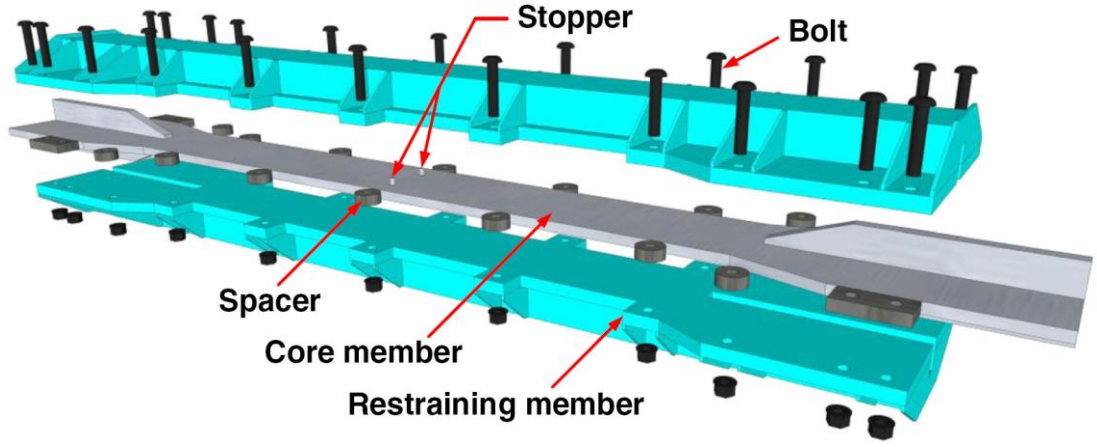
Her iki düşük akma dayanımlı BÖÇ numunesi de deneyler sonucunda kararlı histeretik çevrimler ve belirgin çevrimsel pekleşme göstermiştir. Kümülatif plastik deformasyon kapasiteleri BÖÇ-1 için 841 ve BÖÇ-2 için 1238 olarak hesaplanmıştır; bu değerler SEAOC-AISC standardındaki 200 limitini fazlasıyla aşmaktadır. Çalışmanın sonuçları, düşük akma dayanımlı BÖÇ'lerin, standart yapısal çelikli BÖÇ'lere göre daha yüksek süneklik ve enerji sönmleme kapasitesi sunduğunu; bu nedenle düşük sünekliğe sahip betonarme yapıların veya rüzgar yükü altındaki yapıların hasarını sınırlamak için etkili bir çözüm olabileceğini göstermiştir.

2.1.7. Wu vd. (2014)

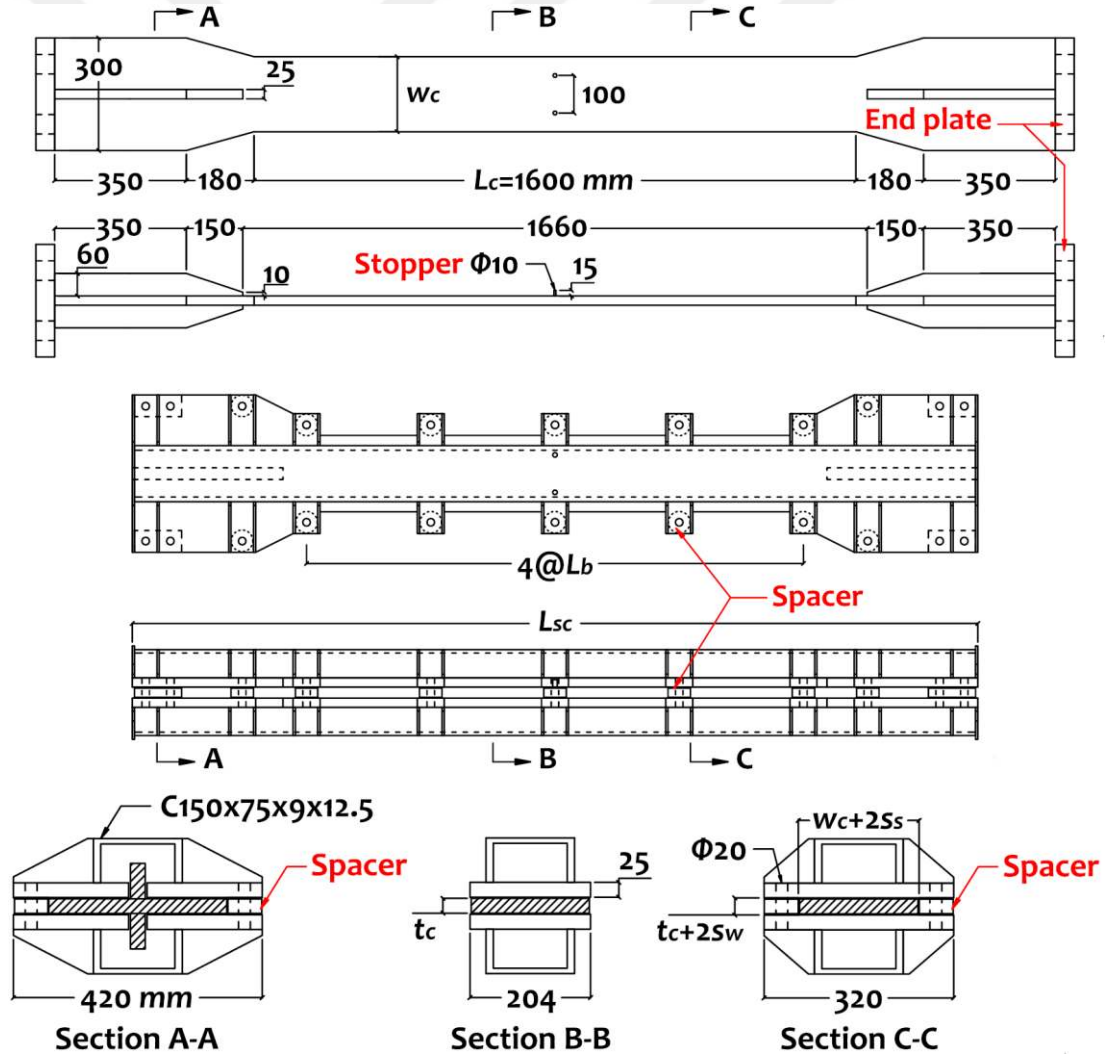
Bu araştırmada, çekirdek plakasının yüksek mod burkulma davranışını analiz etmek amacıyla altı adet tamamı çelik BÖÇ çevrimsel yükleme testleri ve sonlu eleman analizleri yapılmıştır. Tasarlanan BÖÇ sistemi çekirdek elemanı, burkulmayı önleyen mekanizma elemanları ve BÖM mekanizmaları arasındaki boşluğu sağlamak için dolgu parçalarından oluşmaktadır. Bu tasarımın en önemli avantajı, çekirdek plakasının büyük bir depremden hemen sonra incelenebilmesine olanak tanınmasıdır. Bulonla bağlanan burkulmayı önleyen mekanizma gerektiğinde sökülebilir ve hasarlı çekirdek plakası değiştirilebilir. Tasarlanan BÖÇ'lere ait detaylar ve imalat resimleri Şekil 2.30 ve Şekil 2.31'de verilmiştir.

Çekirdek ve dolgu plakalarının imalatında, nominal akma gerilmesi 325 MPa olan CNS SN490B çeliği kullanılmıştır. Çekirdek plakasının BÖM içerisinde kaymasını önlemek için, plakanın ortasına 10 mm çapında ve 15 mm yüksekliğinde iki adet durdurucu kaynaklanmıştır. Çekirdek yüzeyine sürtünmeyi azaltan özel bir malzeme uygulanmamış, ancak montaj öncesinde çekirdek ve BÖM iç yüzeylerine

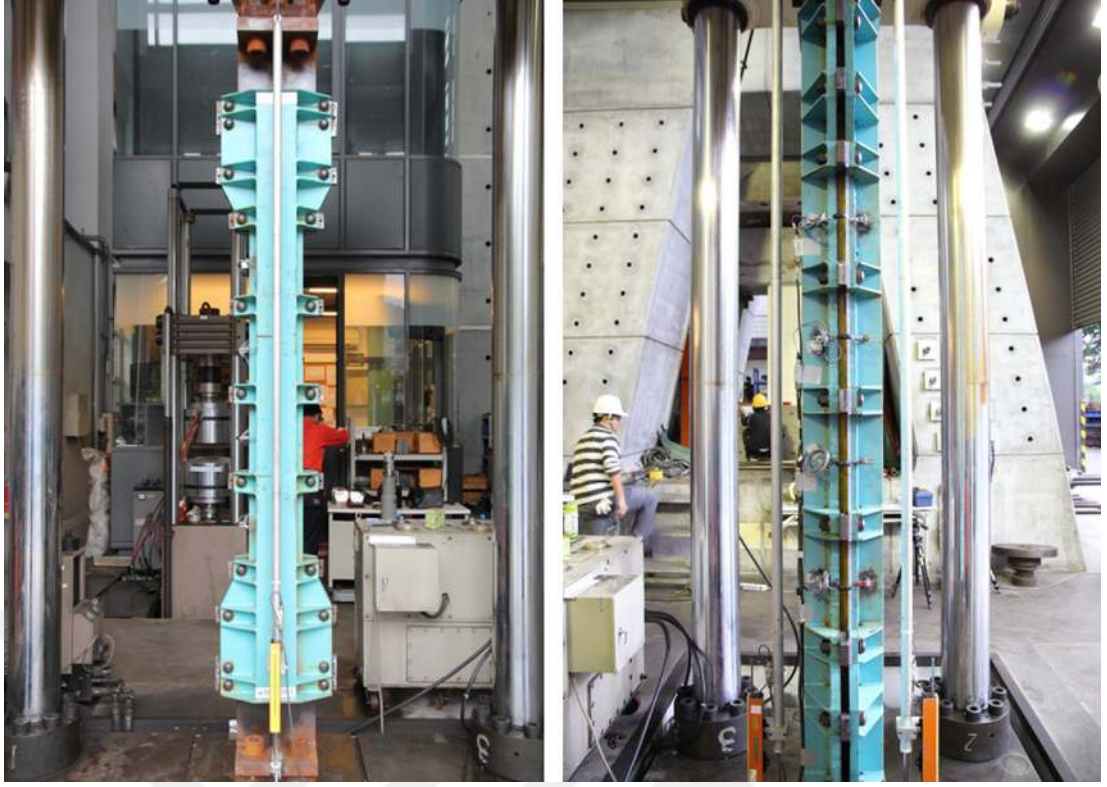
WD-40 yağlayıcı sürülmüştür. Tek eksenli deneyler, Şekil 2.32’de gösterilen 4900 kN kapasiteli test cihazında yapılmıştır.



Şekil 2.30 BÖÇ numune detayı

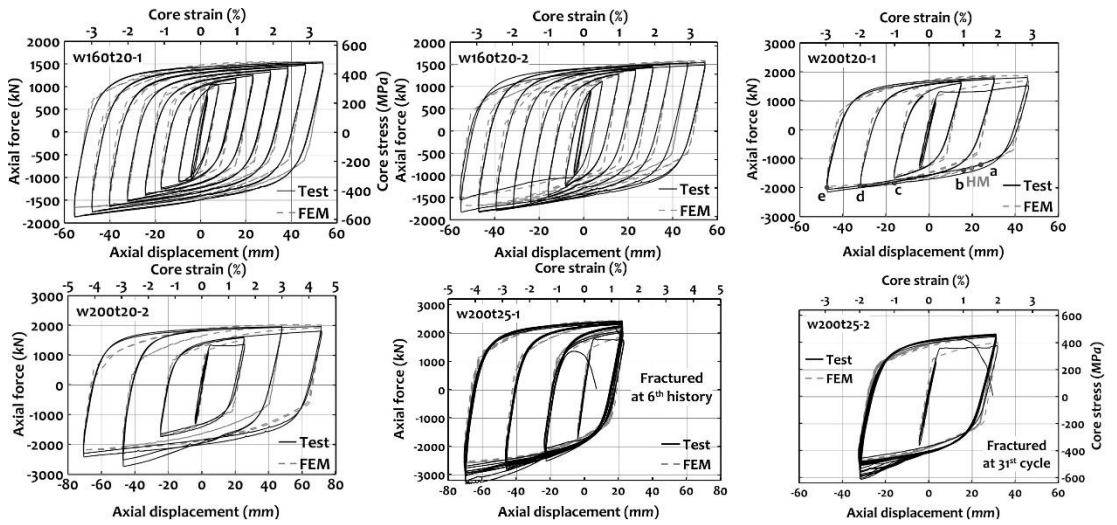


Şekil 2.31 BÖÇ numunesinin detayları



Şekil 2.32 Deney düzeneği

Deneysel çalışmada altı farklı yükleme protokolü uygulanmıştır. Tüm numuneler, basınç ve çekme altında akmaya zorlandıktan sonra, artan, azalan veya sabit genlikli çevrimsel aksenal gerilmelere maruz bırakılmıştır. Şekil 2.33'te deneylerden elde edilen histeretik davranış grafikleri ile sonlu eleman analizi sonuçları bir arada sunulmuştur.



Şekil 2.33 Deneylerden elde edilen histeretik davranış ile sonlu eleman analizi sonuçlarının karşılaştırılması

Birinci numunede ilk yükleme çevriminde zayıf ekseninde 940 mm gibi belirgin bir burkulma dalga boyu ölçülmüştür. Eksenel deformasyon arttıkça dalga sayısının arttığı ve dalga boylarının kısalarak ortalama 240 mm'ye düştüğü gözlemlenmiştir. İkinci numunede, %3.5'lik deformasyondan sonra 241 mm dalga boyları oluşmuş ve numune 9. çevrimde yorulma nedeniyle kırılmıştır. Üçüncü numunede %3 deformasyonda 225 mm dalga boyu elde edilmiştir. Dördüncü numunede yükleme protokolü değişimleriyle dalga boyu 324 mm'den 159 mm'ye düşmüştür. Beşinci numunede basınç yüklemesi %1.5'ten %4.5'e yükseldiğinde dalga boyu 390 mm'den 255 mm'ye düşmüş ve bu durumda çekirdek plakası kopmuştur. Altıncı numunede ise ortalama 290 mm burkulma dalga boyu ölçülmüştür.

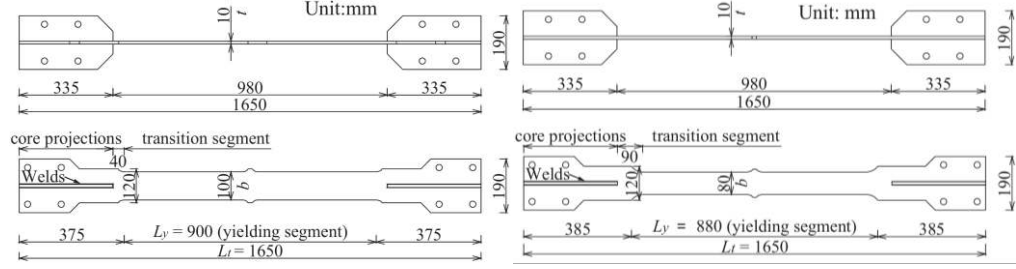
Burkulma dalga boyu ile çekirdek plaka kalınlığı ilişkisi incelendiğinde; daha kalın çekirdekli altıncı numunenin (290 mm) ince çekirdekli üçüncü numuneden (225 mm) daha büyük dalga boyuna sahip olduğu görülmüştür. Çekirdek genişliğinin zayıf eksenli burkulma dalga boyu üzerinde bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır. Deney sonuçları, basınç gerilmesinin büyüklüğüyle burkulma dalga boyunun ters orantılı olduğunu göstermiştir. Testler, %1 ile %3 arasındaki eksenel deformasyonlarda minimum burkulma dalga boyunun çekirdek plakası kalınlığının 12 katı olduğunu; %3 ile %4.5 arasındaki deformasyonlarda ise bu oranın 8 ile 10 katına kadar düşebileceğini göstermiştir.

Önerilen numuneler, burkulmayı önleyen mekanizma sisteminin yeniden kullanılabilir olduğunu kanıtlamış ve tam histeretik davranışlar sergilemiştir. Numunelerin 456 ile 1429 arasında değişen kümülatif plastik deformasyon değerleri, yüksek enerji sönmüleme kapasitelerini göstermiştir. Tüm numunelerde maksimum basınç dayanımı düzeltme katsayısının 1.24'ten düşük olması, çekirdek plakası ile BÖM arasındaki sürtünmenin düşük seviyede kaldığını teyit etmiştir.

2.1.8. Chen vd. (2016)

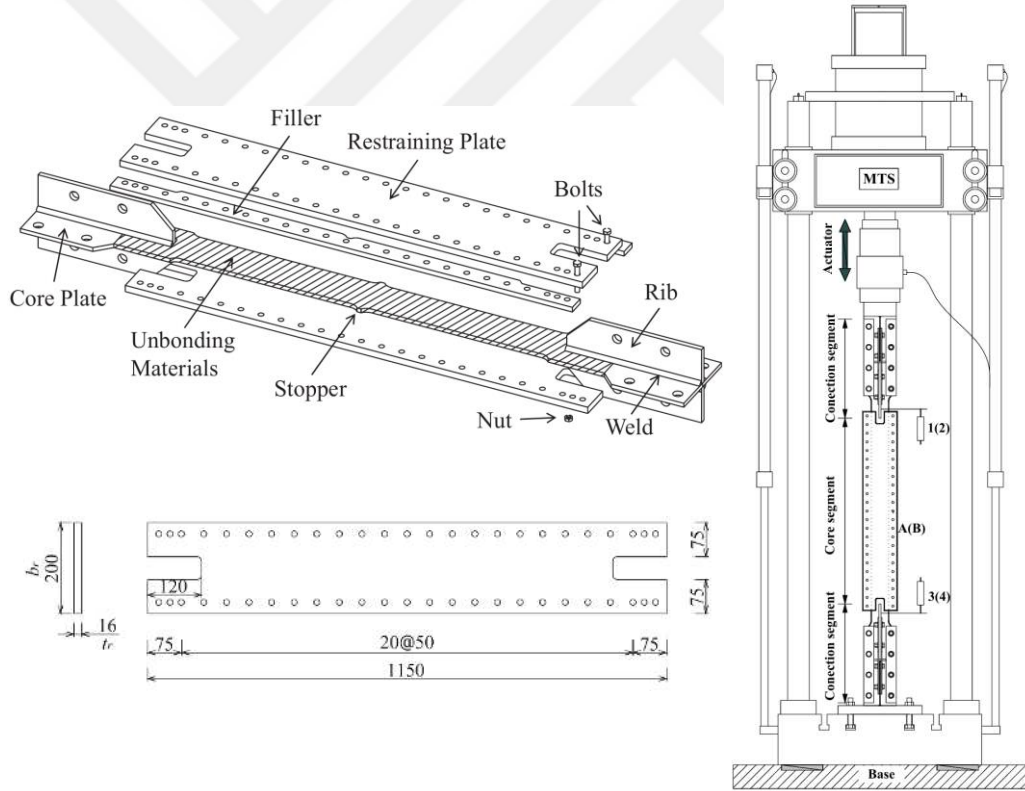
Bu çalışmada, yedi adet 'tamamı çelik' burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) numunesi, çevrimsel yükleme altında test edilmiştir. Araştırmanın temel amacı, sürtünme önleyici malzemelerin BÖÇ performansı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu kapsamda, çekirdek ile burkulmayı önleyen mekanizma arasında 1 mm kalınlığında bütül kauçuk kullanan numuneler ile sadece hava boşluğu bırakılan numuneler karşılaştırılmıştır. Deneyler için Şekil 2.34'te gösterildiği gibi farklı

boyutlarda çekirdek plakasına sahip iki seri numune tasarlanmıştır. İlk seride kaynak noktalarında çatlaklar gözlemlendiği için, ikinci seride bu sorunu aşmak amacıyla daha küçük akma bölgesi ve daha uzun geçiş bölgesiyle tasarlanmıştır.



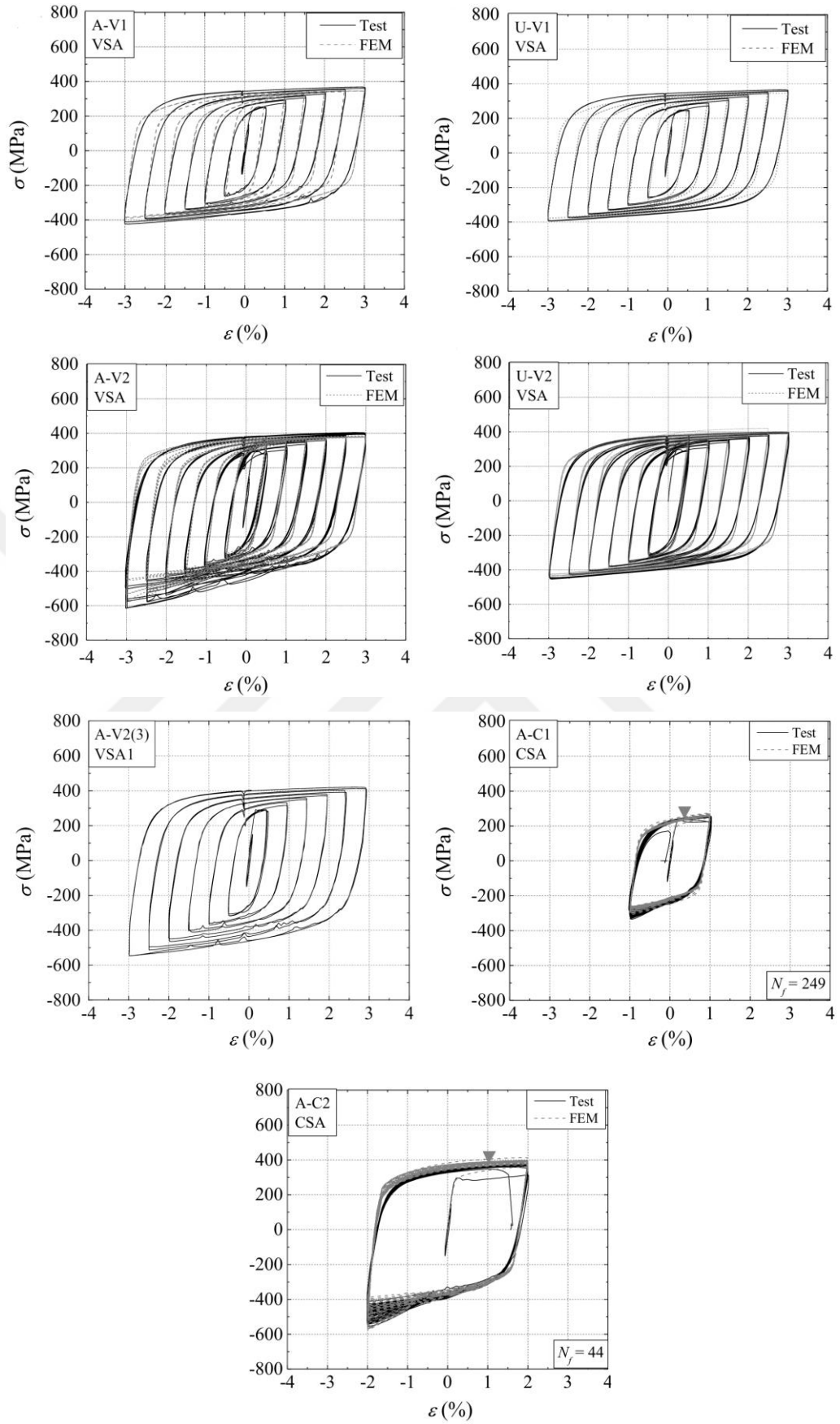
Şekil 2.34 Seri-1 ve seri-2 numunelerinin çekirdek plakası imalat resimleri

Tipik BÖÇ görseli, BÖM imalat resimleri ve deney düzeneği Şekil 2.35’te verilmiştir. Çevrimsel yükleme, ± 1000 kN yükleme kapasitesine sahip bir hidrolik aktüatör ile uygulanmıştır. Araştırmada dört farklı yükleme protokolü kullanılmıştır.



Şekil 2.35 Tipik BÖÇ görseli, BÖM imalat resmi ve deney düzeneği

Deneyleri gerçekleştirilen BÖÇ’lerin histeretik eğrileri Şekil 2.36’da sunulmuştur. Tüm numuneler, AISC standardında belirtilen 200 olan minimum limitin çok üzerinde, 1058 ila 5734 arasında değişen kümülatif plastik deformasyon kapasitelerine ulaşmıştır.



Şekil 2.36 BÖÇ'lerin histeretik eğrileri

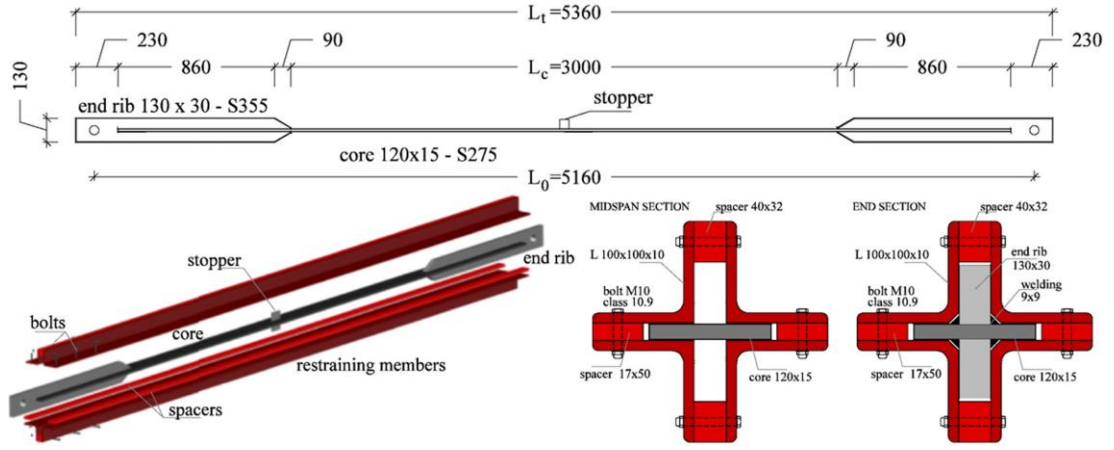
Sonuçlar, yedi BÖÇ numunesinin de çok iyi enerji sönümleme performansı sergilediğini göstermiştir. Sürtünme azaltıcı malzeme kullanılan (U serisi) numuneler düşük deformasyon çevrimlerinde daha iyi davranış sergilemiş, hava boşluğu bırakılan (A serisi) numunelerde daha yüksek basınç dayanımı düzeltme katsayıları elde edilmiştir. Ancak tüm numunelerde bu katsayı, yönetmelik sınırı olan 1.3'ün altında kalmıştır. Uzun akma bölgesi ve ince çekirdek plakalara sahip yüksek performanslı BÖÇ'ler için sadece hava boşluğu bırakmanın yeterli olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, daha yüksek kümülatif plastik deformasyon taleplerine sahip olan yüksek dayanımlı çaprazlar için sürtünme önleyici malzeme kullanımının hala önerildiği belirtilmiştir.

2.1.9. Metelli vd. (2016)

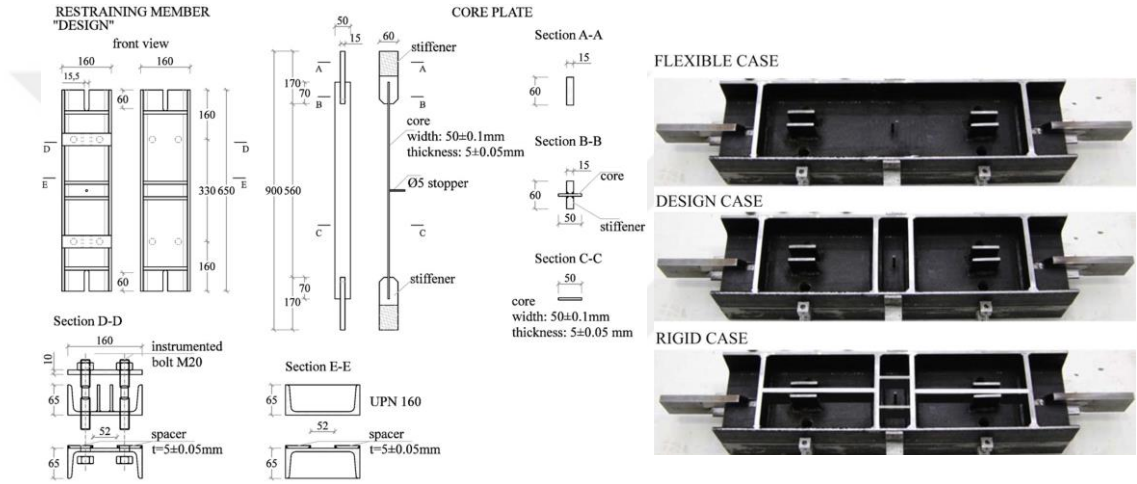
Bu çalışma, BÖÇ çekirdek elemanının burkulma sonrası burkulmayı önleyen mekanizma (BÖM) ile temasından kaynaklanan yanal etkinin çevrimsel davranış üzerindeki etkilerini incelemektedir. Bu amaçla, yerel temas basınçlarının yanı sıra temas noktalarının şeklini ve boyutlarını belirlemek için özel bir test düzeneği tasarlanmıştır. Çekirdek-BÖM arası boşluk miktarı, BÖM'ün eğilme rijitliği, ortalama aksenal deformasyon gibi değişkenler ve yükleme protokolü gibi parametreler araştırılmıştır.

Deneysel program, üç adet gerçek ölçekli ve 12 adet küçük ölçekli 'tamamı çelik' BÖÇ numunesi üzerinde yürütülmüştür. Şekil 2.37'de detayları verilen tam ölçekli BÖÇ'ler, 120x15 mm çekirdek plakası ve 3 m akma bölgesi uzunluğuna sahiptir. Burkulmayı önleyen mekanizma, 10 mm kalınlıklı dört adet L-köşebent profilden meydana gelmektedir. 17x50 mm'lik çelik ara parçaları, çekirdek ve BÖM elemanları arasında boşluk bırakılmasını sağlamıştır. BÖM'nin montajında 10 mm çapında yüksek mukavemetli bulonlar kullanılmış; bu bulonlar ilk numunede 200 mm, diğer iki numunede ise 100 mm aralıklarla yerleştirilmiştir.

Şekil 2.38'de gösterilen küçük ölçekli 12 adet BÖÇ numunesi, 50x5 mm ölçülerinde dikdörtgen çekirdeklere ve 560 mm akma bölgesi uzunluğuna sahiptir. Bu numunelerde BÖM elemanı olarak 2 adet UPN 160 profili kullanılmıştır. Çekirdek ile BÖM arasındaki sürtünmeyi azaltmak için politetrafloroetilen (teflon) içeren sentetik bir macun uygulanmıştır. BÖM sistemindeki UPN profillerinin deformasyonunu azaltmak amacıyla plakalarla takviye yapılmış üç grup halinde sınıflandırılmıştır.

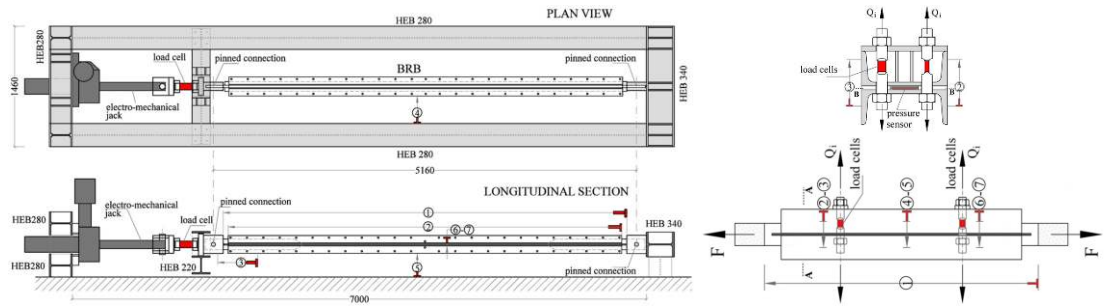


Şekil 2.37 Tam ölçekli BÖÇ numuneleri



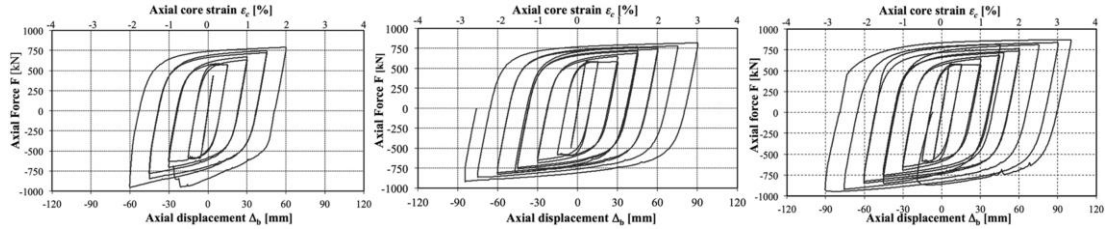
Şekil 2.38 Küçük ölçekli BÖÇ numuneleri

Tam ölçekli deneyler, 1000 kN kapasiteli deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Küçük ölçekli numuneler ise 250 kN kapasiteli materyal test sisteminde gerçekleştirilmiştir. Dokuz numuneye standart AISC yükleme protokolü uygulanırken, kalan üç numune yanal itme üzerindeki etkileri değerlendirmek amacıyla standart dışı bir yükleme protokolü ile test edilmiştir. Şekil 2.39'da tam ölçekli ve küçük ölçekli deney düzenekleri verilmiştir.



Şekil 2.39 Tam ölçekli ve küçük ölçekli deney düzenekleri

Tam ölçekli 1 numaralı deney numunesinde, BÖM bulonlarında kopmalar meydana gelmiş ve numune, tasarım kat ötelemesinin iki katı seviyesindeyken ikinci çevrimin başında yetersiz kalmıştır. Bu numunede kümülatif plastik deformasyon 186 olarak ölçülmüştür. 2 ve 3 numaralı numuneler ise 300'den büyük kümülatif plastik deformasyon sergileyerek kararlı bir davranış göstermiştir. Şekil 2.40'ta tam ölçekli numunelerin histeretik eğrileri verilmiştir.



Şekil 2.40 Tam ölçekli numunelerin histeretik eğrileri

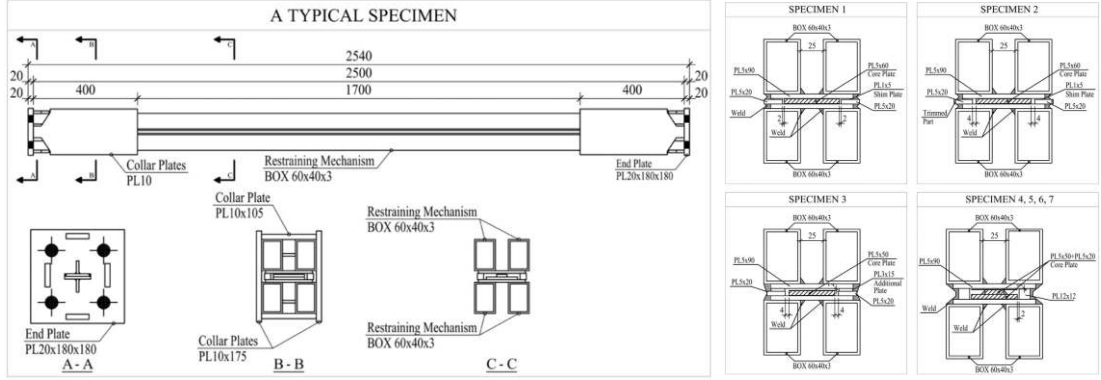
Küçük ölçekli deneylerde, çekirdekten kaynaklanan yanal itme kuvvetinin dalga sayısı ve şeklinin ölçülmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda, tam ölçekli numuneler üzerinde yapılan deneyler, BÖM tasarımının, burkulan çekirdeğin oluşturduğu yanal itme kuvveti hesaba katılmadan yapılabileceğini göstermiştir. Buna karşın, 12 adet küçük ölçekli BÖÇ testinin sonuçları, boşluk boyutunun burkulan çekirdeğin oluşturduğu yanal itme kuvveti üzerinde belirgin bir etkisi olduğunu; standart AISC yükleme protokolü altında boşluk boyutu arttıkça ölçülen yanal itme kuvvetinin de arttığını ortaya koymuştur.

2.1.10. Bozkurt ve Topkaya (2016)

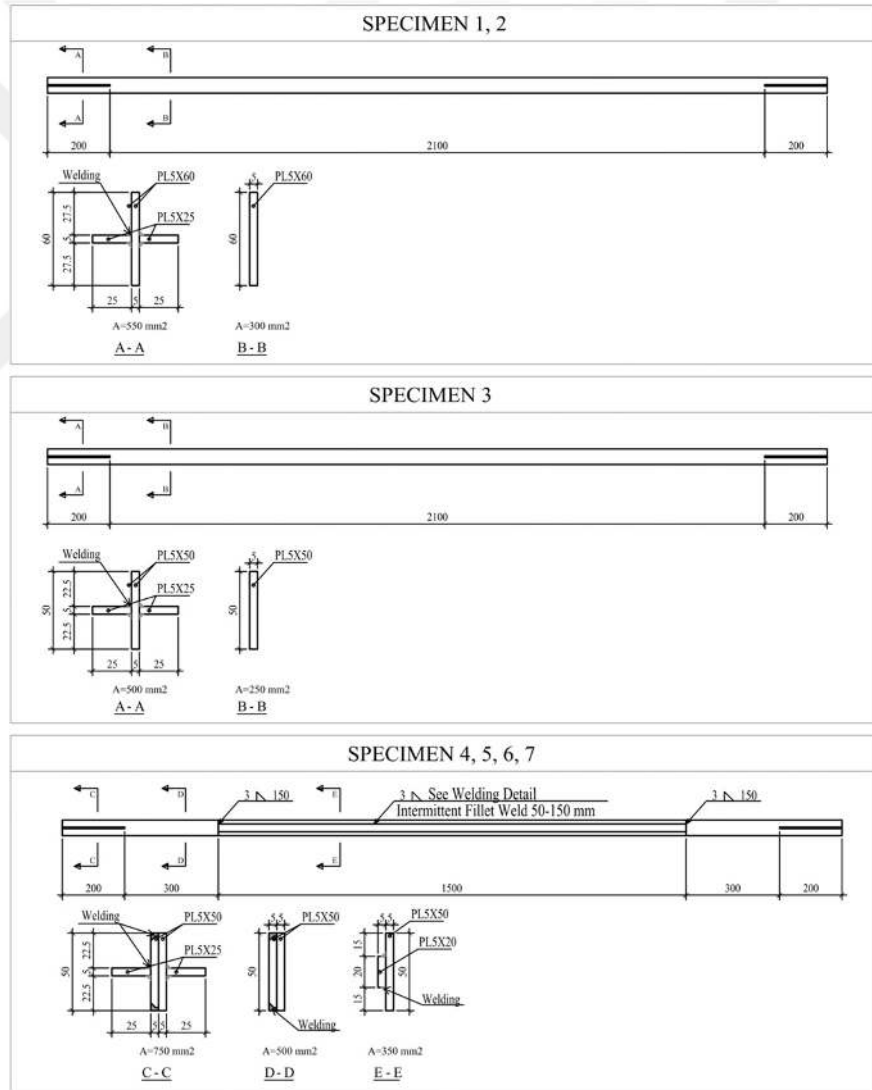
Çalışmada, üst üste bindirilmiş kaynaklı çekirdek plakası kullanan yenilikçi bir burkulması önlenmiş çapraz konsepti geliştirilmiştir. Araştırma, yarı çerçeve test düzeneğinde yürütülen iki aşamalı deneysel bir programı kapsamaktadır. İlk aşamada, sabit genişlikteki çekirdek plakalarının BÖÇ performansı araştırılmıştır. İkinci aşamada ise, ilk aşamada gözlemlenen çevrimsel davranışı iyileştirmek amacıyla üst üste bindirilerek kaynaklanmış yeni bir çelik çekirdek tipi geliştirilmiştir.

Tipik BÖÇ tasarımında çekirdek plakası, çelik kutu profiller arasına yerleştirilmiştir. Deneylerde, ilk aşamada sabit genişlikli, ikinci aşamada ise bindirmeli kaynaklı olmak üzere iki farklı çekirdek plakası tipi kullanılmıştır. Tüm numunelerin uzunluğu 2500 mm olarak belirlenmiştir. Çekirdek ile burkulmayı önleyen mekanizma (BÖM) arasındaki sürtünmeyi azaltmak için 0.5 mm kalınlığında teflon malzeme uygulanmış ve BÖM'ün kaymasını önlemek için çekirdek plakası ile

arasına bir kaynak yapılmıştır. Numunelerin tipik görünüşleri ve BÖM enkesitleri Şekil 2.41’de, çekirdek plakası teknik çizimleri ise Şekil 2.42’de verilmiştir.



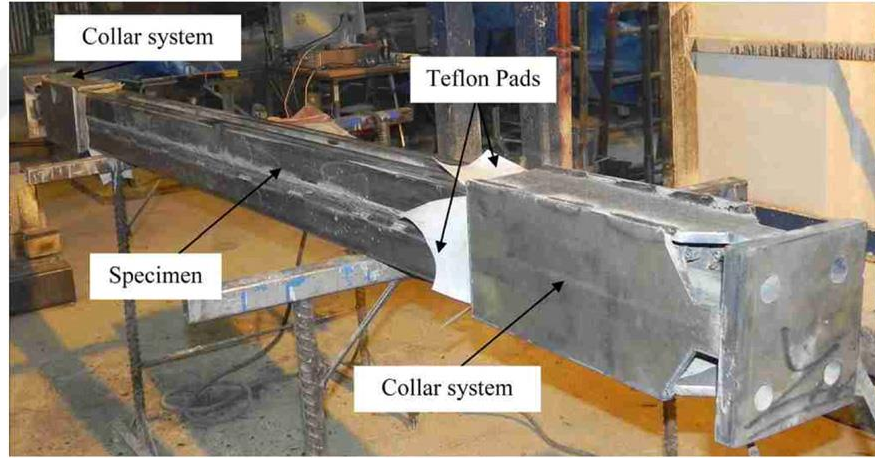
Şekil 2.41 Tipik BÖÇ numunesi ve BÖM enkesit detayları



Şekil 2.42 Çekirdek plakası teknik çizimleri

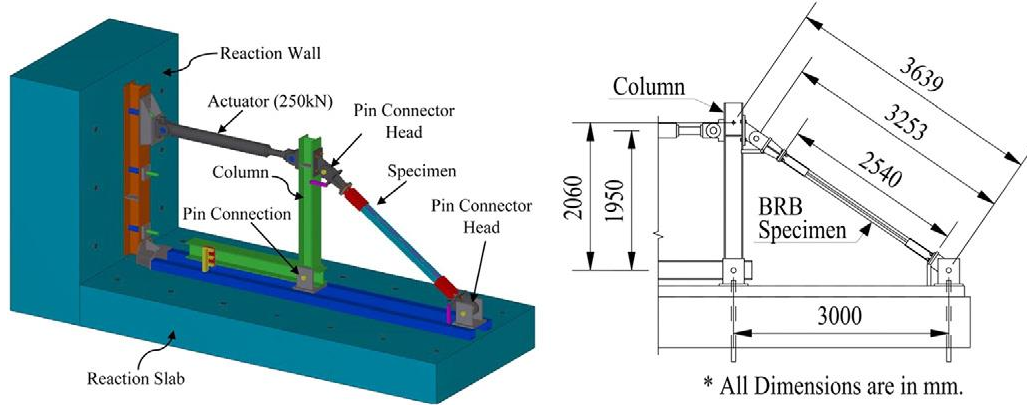
İlk aşama numunelerinde 5 mm kalınlığında ve 2100 mm akma bölgesi uzunluğuna sahip çekirdek plakaları kullanılmıştır. 1 ve 2 numaralı numunelerde çekirdek genişliği 60 mm, 3 numaralı numunede ise 50 mm olarak tercih edilmiştir. Bu numuneler arasındaki temel fark, BÖM ile çekirdek arasında bırakılan boşluk miktarıdır. İkinci aşamada, boydan boya kaynaklanmış bindirmeli çelik çekirdek plakalar incelenmiştir. Bu tasarımın amacı, akma bölgesini bağlantı bölgesi dışında tutmaktır. Bu plakaların genişliği 50 mm, kalınlığı 5 mm ve akma bölgesi uzunluğu 1500 mm olarak belirlenmiştir. Çekirdek plakasında ısı girdisinin olumsuz etkilerini minimize etmek için sürekli kaynak yerine aralıklı olarak kaynak yapılmıştır.

Burkulmayı önleyen mekanizma, uzunluğu 2300 mm olan 2 adet 60x40x3 mm dikdörtgen profilin 90 mm genişliğinde bir plakaya kaynaklanmasıyla oluşturulmuş ve çekirdeğin her iki tarafına yerleştirilmiştir. Çerçeve deney düzeneğindeki büyük dönme taleplerini karşılamak amacıyla BÖÇ uçlarına yaka detayı uygulanmıştır. Bu detaylar, her iki uçta 10 mm plakalardan oluşturulmuş ve Şekil 2.43'te görüldüğü gibi BÖM ile yaka plakaları arasına teflon kağıtlar yerleştirilmiştir.



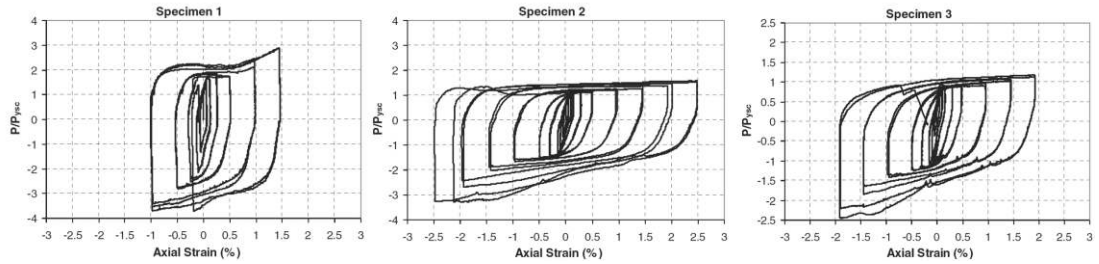
Şekil 2.43 BÖÇ yaka elemanı

Deney düzeneği, Şekil 2.44'teki gibi reaksiyon duvarına ve güçlü bir döşemeye monte edilmiştir. Yatayla 34.5 derece açı yapan BÖÇ numunesi, pimli bağlantılarla deney düzeneğine sabitlenmiştir. Pimli bağlantıların dönmesini engellemek için dikdörtgen kesitli profiller kullanılarak uçlarda rijit bir davranış elde edilmiştir. Deneylerde, AISC yönetmeliklerine dayanan ancak modifiye edilmiş bir yükleme protokolü uygulanmıştır. Numuneler, $1/3\Delta_{by}$ 'den başlayıp $2.50\Delta_{bm}$ (%2.5) seviyesine kadar artan genliklerde ikişer deformasyon çevrimine maruz kalmıştır. Yükleme için 250 kN kapasiteli servo kontrollü hidrolik aktüatör kullanılmıştır.



Şekil 2.44 Deney düzeneği

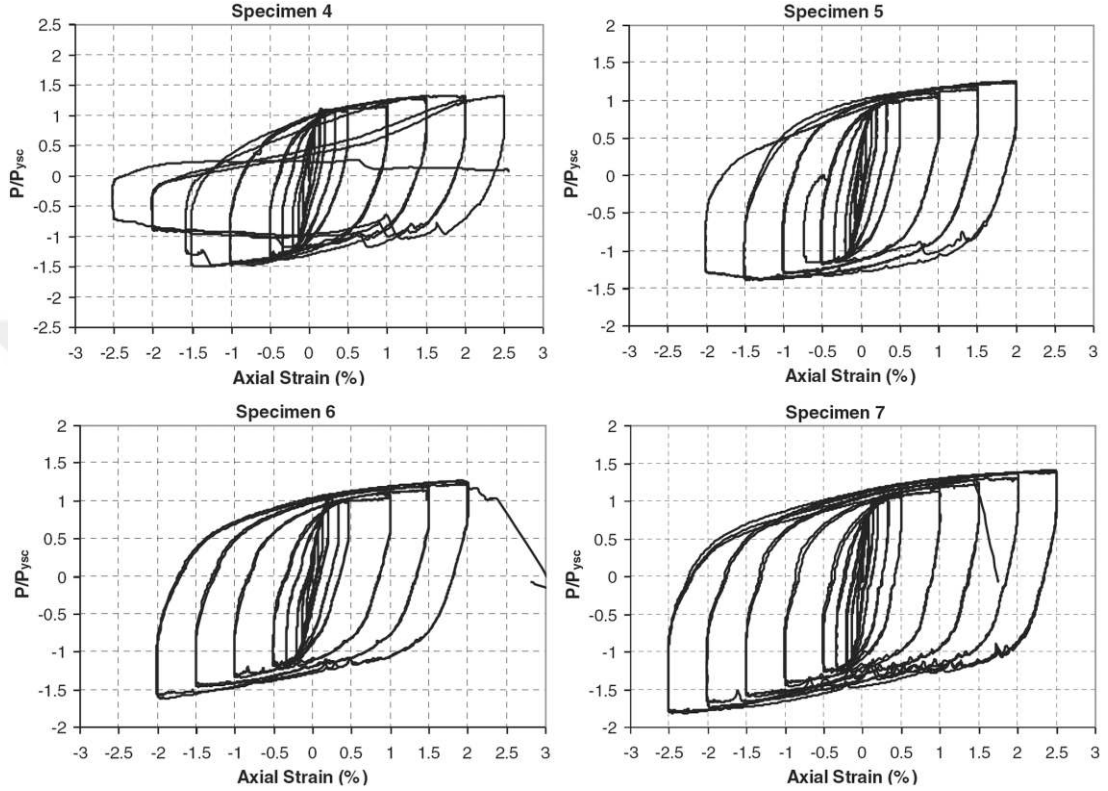
İkinci aşamanın 1 numaralı numunesinde ilk çevrimlerde çekirdek ile BÖM arasında sürtünme sergilemiş ve %1 eksenel deformasyona kadar kararlı kalmıştır. %1.5'lik çekme deformasyonunda bağlantı bölgelerine yakın alanlarda büyük yerel deformasyonlar gözlemlenmiştir. 2 numaralı numune BÖM'nin yük taşımasını engellemek için daha büyük boşluk bırakılmış, ancak sürtünme tam engellenemediği için çekme ve basınç arasındaki fark %30'un üzerinde çıkmıştır. Bu geniş boşluk, daha uzun bir bölgede yerel burkulmalara neden olmuştur. 3 numaralı numune, kalınlık yönünde ek 2mm'lik boşluk bırakılması 2 numaralı numuneye kıyasla daha zayıf bir performansa yol açmış ve numune %2.5 eksenel deformasyonda çekirdek kopmasıyla göçmüştür. Birinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri Şekil 2.45'te verilmiştir.



Şekil 2.45 Birinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri

İkinci aşamanın ilk örneği olan 4 numaralı numune, %1.5'lik eksenel deformasyona kadar kararlı kalmış, ancak yetersiz BÖM kaynakları nedeniyle BÖM'nin deformasyonuna ve kaynak kırılmasına yol açan aşırı eğilmeler yaşamıştır. 5 numaralı numune BÖM kaynakları iyileştirilse de benzer sonuçlar alınmıştır. 6 numaralı numune sürekli kaynaklar kullanılmış ve numune %2 eksenel deformasyona kadar stabil kalarak AISC gerekliliklerini sağlamıştır. Kümülatif plastik deformasyonu 217 olan bu numune, %2.5 çekme yüklemesinde çekirdek plakalarını

birleştiren kaynakların kırılmasıyla kopmuştur. Son olarak, 7 numaralı numunede çekirdek plakası kaynak kalitesi iyileştirilerek kümülatif plastik deformasyonu 419 seviyesine çıkmıştır. Ancak bu numunede de aralıklı kaynaklar nedeniyle kopmalar yaşanmıştır. İkinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri şekil 2.46’da verilmiştir.



Şekil 2.46 İkinci aşama deney numunelerinin histeretik eğrileri

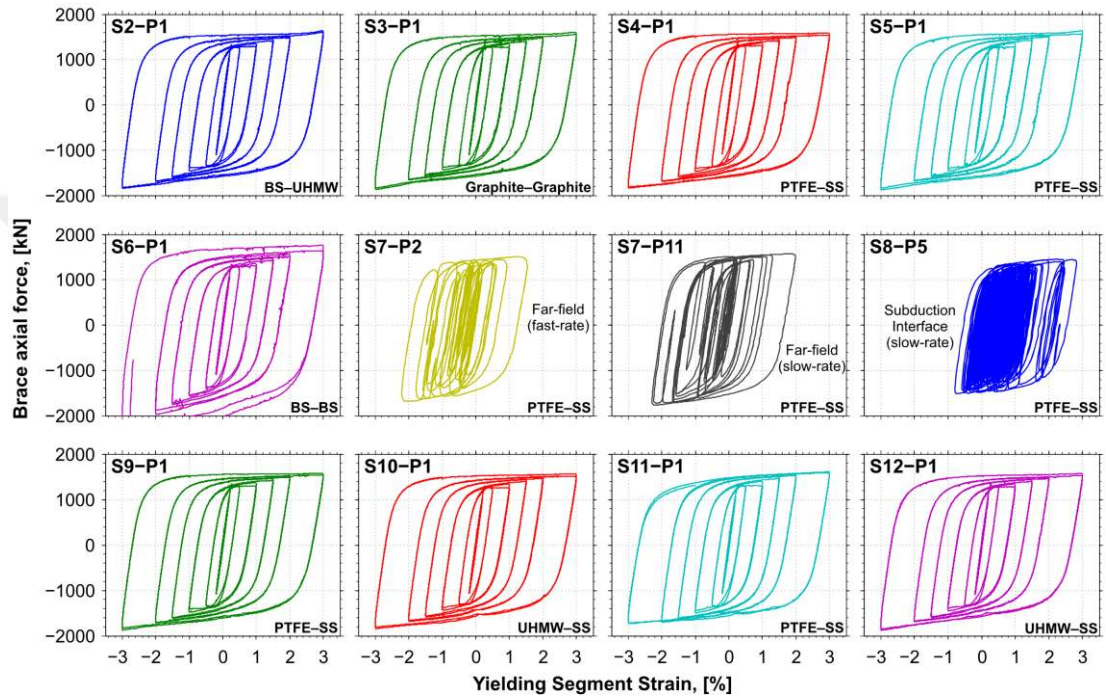
Yapılan tüm deneysel çalışmalar, tek eksenli testler ile çerçeve testleri arasında davranış farklılıkları olduğunu, çerçeve testlerinin çekirdek plakasında üniform olmayan gerilmeler ve uç bölgelerde büyük dönmeler oluşturduğunu tespit etmiştir.

2.1.11. Dehghani ve Tremblay (2017)

Bu çalışmada, 12 adet tam ölçekli tamamı çelik burkulması önlenmiş çapraz numunesinin deneysel sonuçları sunulmuştur. Araştırma; çekirdek ile burkulmayı önleyen mekanizma arasındaki arayüz durumu, boşluk boyutu, yükleme protokolü, bulonlar arası uzaklık ve BÖM kapasitesinin etkilerini incelemeye odaklanmıştır. BÖM, düz plaka ve içi boş kutu profilden oluşan, bulonlu birleşimli ve tamamı çelik bir tasarımdır. Deneysel programda iki farklı BÖM tasarımı kullanılmış ve çekirdek ile BÖM arasına herhangi bir durdurucu/tutucu yerleştirilmemiştir. Şekil 2.47’ de çekirdek plakasının ve BÖÇ numunesi detayları verilmiştir.

ağırlıklı polietilen-paslanmaz çelik, grafit-grafit, çıplak çelik-çok yüksek moleküler ağırlıklı polietilen ve yalın çelik-yalın çelik olmak üzere beş farklı arayüz koşulu incelenmiştir.

Şekil 2.49’da verilen histeretik grafiklerinden de görüldüğü gibi, test edilen BÖÇ’ler genel olarak kararlı davranışlar sergilemiş ve yüksek kümülatif plastik deformasyon kapasitesi göstermiştir. Numunelerde ise %2 kat ötelemesine karşılık gelen basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.14’ün altında kalmıştır.



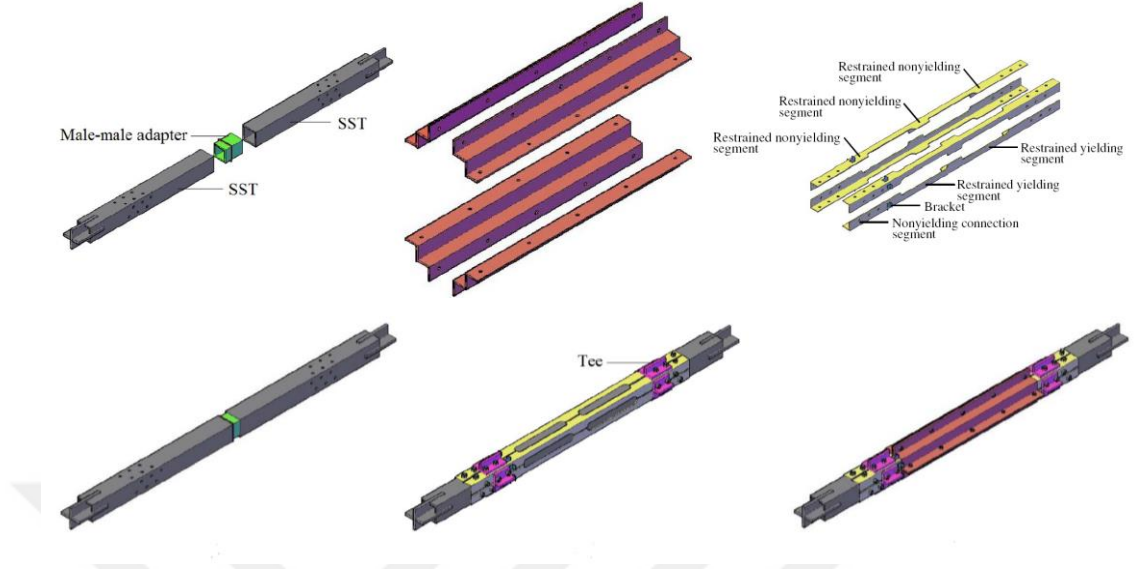
Şekil 2.49 Numunelerin histeretik eğrileri

Sonuçlar, polietilen-paslanmaz çelik arayüz koşulunun sürtünme kuvvetlerini azaltmada en etkili yöntem olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, sistemin göçmesinin sürtünmeden ziyade çekirdek plakasındaki metal yorgunluğundan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bu durum, eksenel çekirdek burkulmasının etkin olduğu durumlarda daha güçlü kısıtlayıcı mekanizmaların (BÖM) araştırılması gerektiği sonucunu doğurmuştur.

2.1.12. Qu vd. (2018)

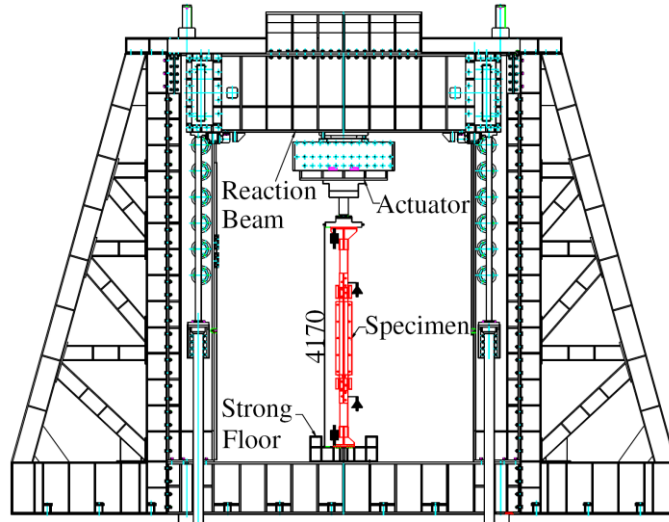
Çalışmada, enerjiyi sönümleyen çekirdek bölgesinin BÖÇ’ün ortasında yer almadığı yeni bir BÖÇ konsepti sunulmuştur. Bu sistemde sigorta elemanı, bir kutu profilin dış köşesine temas eden bir çelik köşebentten teşkil edilmiştir. İçerideki kutu profil düzlem içi burkulmayı engellerken, düzlem dışı burkulma ayrı bir burkulmayı

önleyen mekanizma (BÖM) ile kısıtlanmıştır. Önerilen BÖÇ konseptinin tasarım detayları Şekil 2.50’de gösterilmektedir.



Şekil 2.50 Önerilen BÖÇ konseptinin tasarım detayları

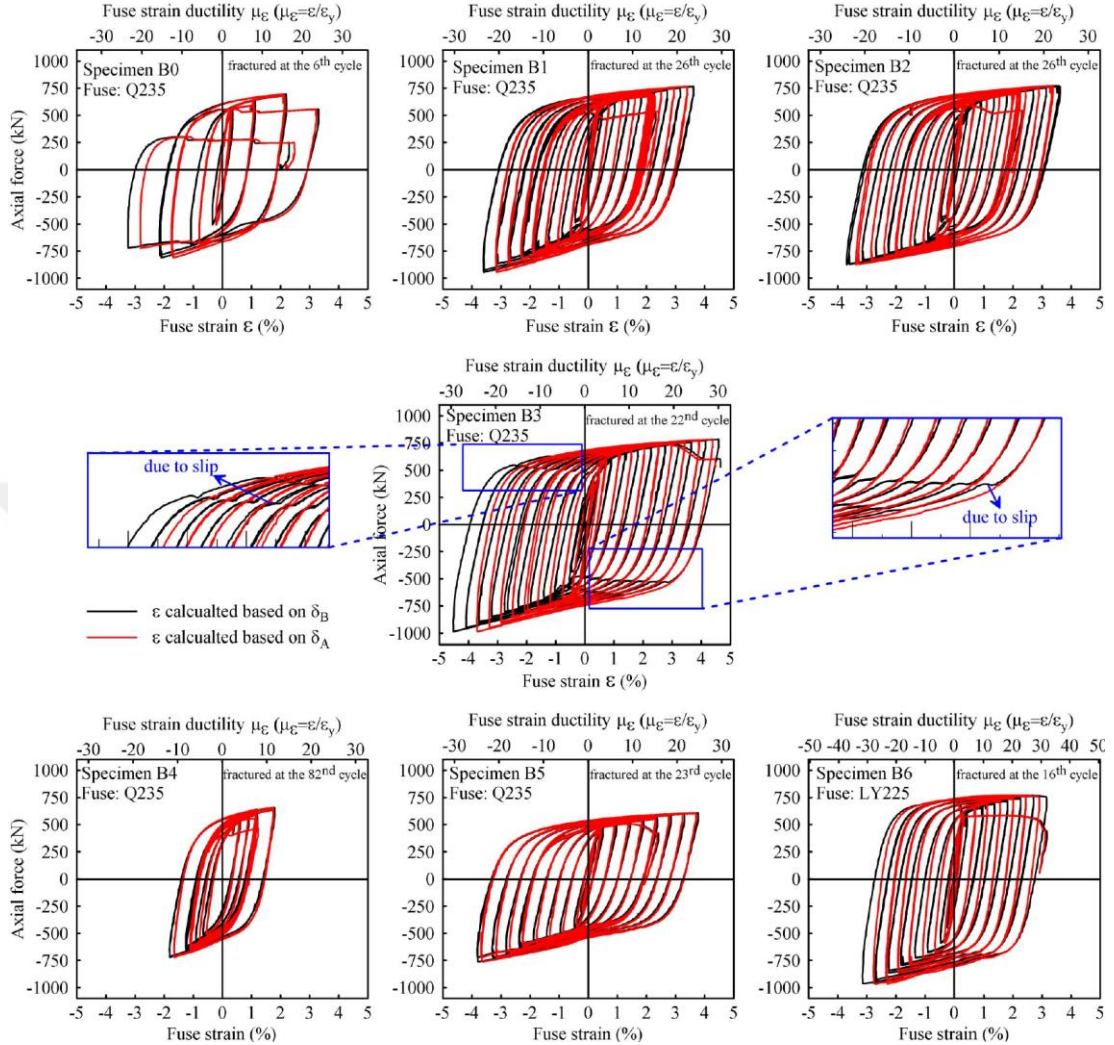
Önerilen bu tasarımın birincil hedefi, deprem sonrası BÖM'nin sökülerek hasar tespitinin hızlıca yapılmasına ve sigorta elemanının kolayca değiştirilebilmesine imkan tanımasıdır. Bu amacı doğrulamak için 7 adet BÖÇ deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde köşebent tasarımı, malzeme çeşidi, ayırıcı malzeme tipi ve yükleme protokolü gibi parametreler incelenmiştir. Deney düzeneğinin görünüşü Şekil 2.51’de verilmiştir.



Şekil 2.51 Deney düzeneği

Test sonuçları, adaptör ve T-profilleri gibi kritik bileşenleri eksik olan B0 numunesi dışındaki tüm numunelerin AISC koşullarını sağladığı raporlanmıştır. B0

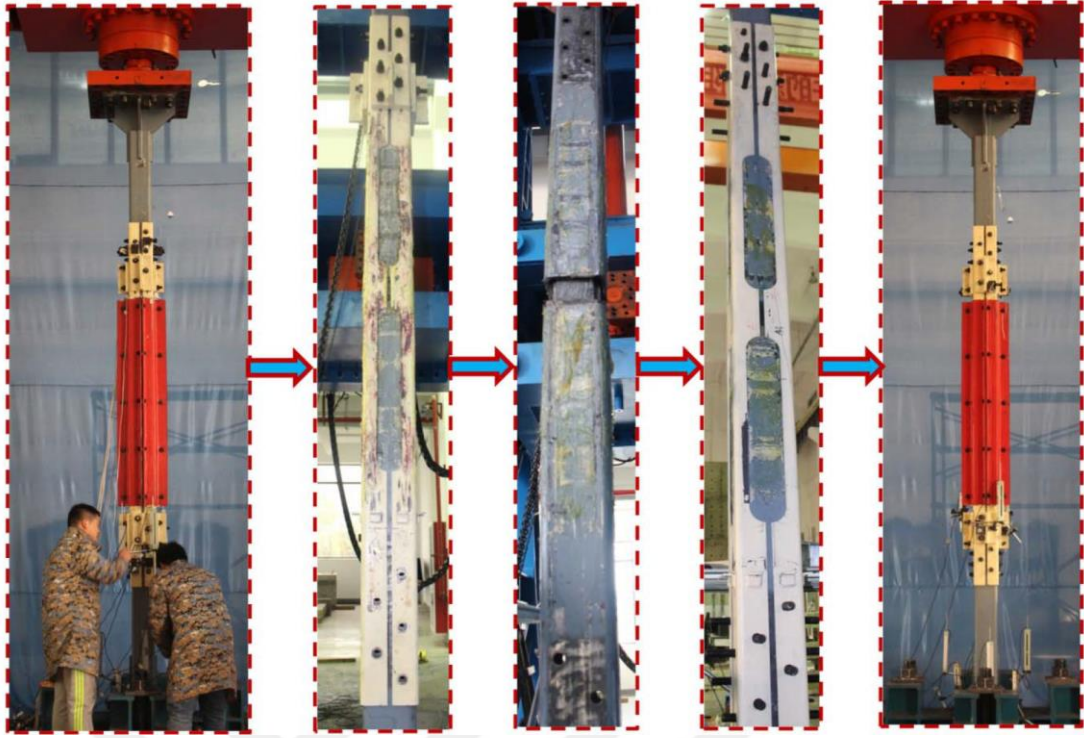
numunesi %2'lik çevrime kadar kabul edilebilir bir davranış sergilemiştir. Numunelerin histeretik eğrileri Şekil 2.52'de verilmiştir.



Şekil 2.52 Numunelerin histeretik eğrileri

Spesifik bulgular incelendiğinde, ayırıcı malzeme olarak kullanılan silikon gres ve polietilen arasında performans farkı gözlenmemiştir. Kupon testlerinde daha sünek çıkan LY225 çeliğine kıyasla, Q235 çeliğinin BÖÇ sistem testlerinde daha yüksek kapasite ve enerji sönümleme sağladığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca, bulonlardaki kaymaların enerji sönümlemeyi %15 oranında artırdığı saptanmıştır.

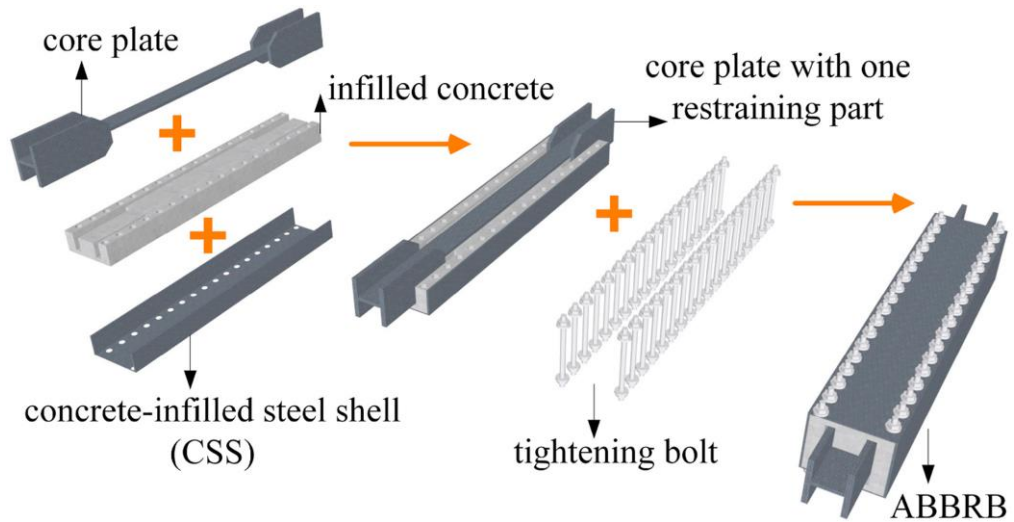
Çalışmanın en önemli sonucu, iç ve dış burkulmayı önleyen parçaların yeniden kullanılabilirliğinin ve hasarlı çekirdek elemanlarının değişim aşamalarının kolay ve hızlı bir şekilde yapılabildiğinin kanıtlanmasıdır. Değişim aşamaları Şekil 2.53'de verilmiştir.



Şekil 2.53 Hasarlı çekirdek/sigorta elemanlarının değiştirilme aşamaları

2.1.13. Cao vd. (2020)

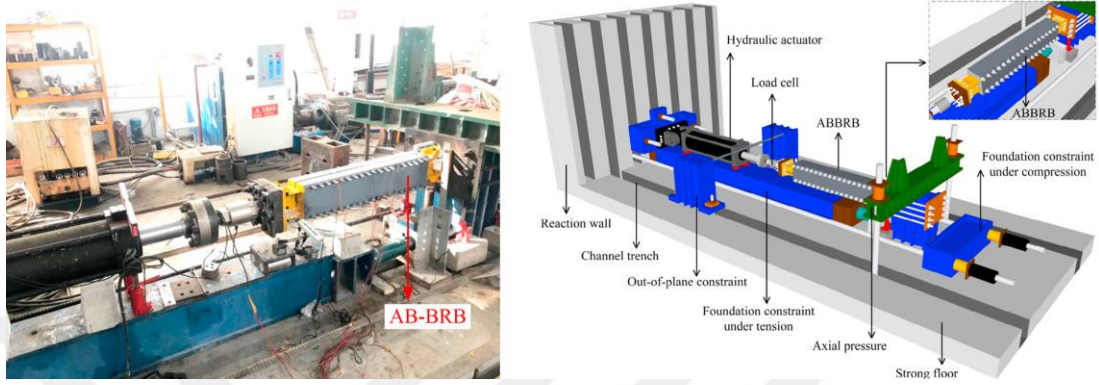
Bu çalışmada, AB-BRB olarak adlandırılan ve beton dolgulu çelik bir burkulmayı önleyen mekanizmaya (BÖM) sahip BÖÇ'lerin tekrar kullanılabilirliği ve yenilenmesi üzerine bir araştırma yürütülmüştür. Önerilen AB-BRB konsepti Şekil 2.54'te verilmiştir.



Şekil 2.54 Önerilen AB-BRB konseptinin bileşenleri

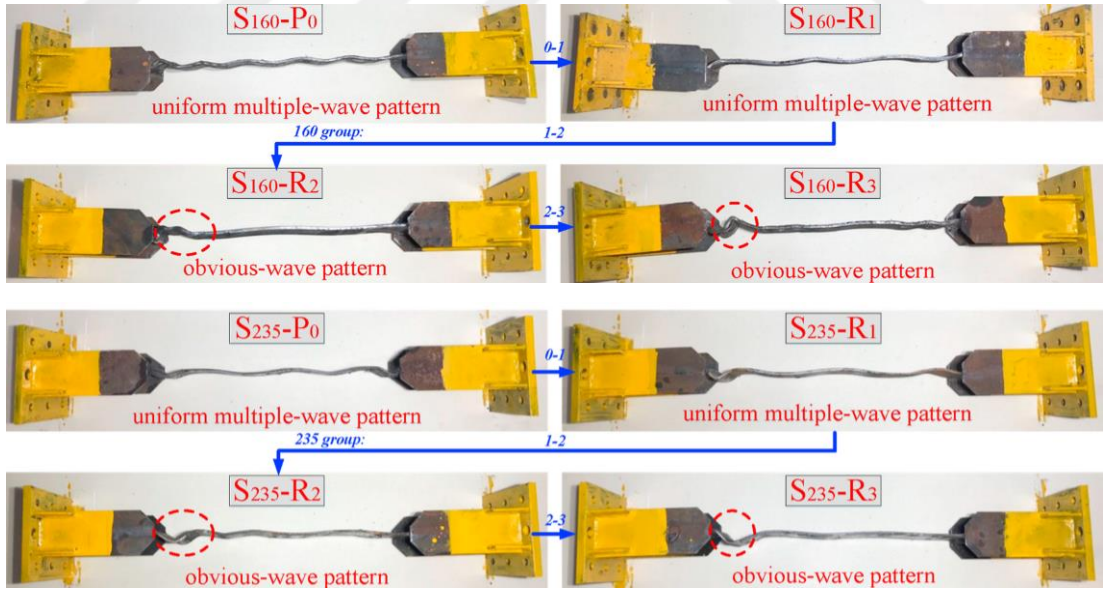
Çalışmada, S160 ve S235 olmak üzere iki farklı malzemeden üretilen dörder adet, toplam sekiz adet 1.3 metre boyutunda BÖÇ numunesi, BÖM sabit tutularak

tekrar tekrar yarı-statik yüklemeye maruz bırakılmıştır. Bu sekiz deney boyunca toplamda sadece iki adet BÖM seti kullanılmıştır. Diğer malzeme özellikleri 8.8 sınıfı bulonlar ve C30 sınıfı beton olarak belirlenmiştir. Deneyler, Şekil 2.55’te gösterilen deney düzeneğinde, 500 kN kapasiteli ve 500 mm hareket kabiliyetli bir piston kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2.55 Deney düzeneği

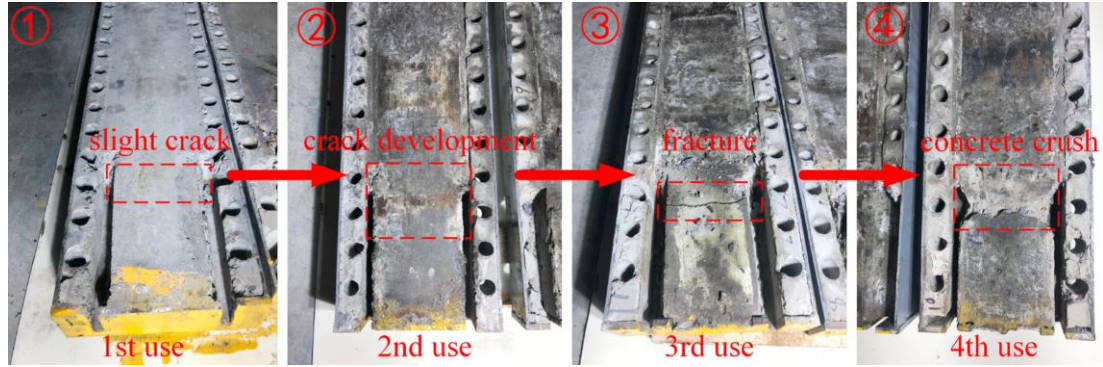
Gerçekleştirilen deneylerden sonra çelik çekirdek plakada meydana gelen plastik deformasyonlar Şekil 2.56’da, beton dolguda oluşan hasarlar Şekil 2.57’de ve elde edilen histeretik eğriler Şekil 2.58’de sunulmuştur.



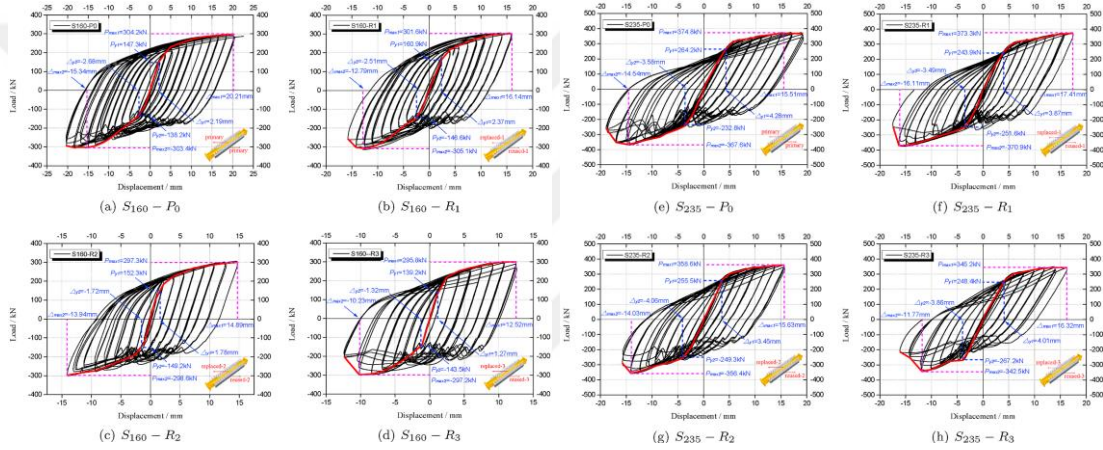
Şekil 2.56 Çekirdek plakada meydana gelen plastik deformasyonlar

Çalışmanın sonuçları, BÖM'nin tekrarlı kullanımına bağlı olarak bulon kayması sorununun ortaya çıktığını göstermiştir. Bu sorunun çözümü için tasarım aşamasında bulon kapasitesinin, hesaplanandan 1.5 kat daha fazla seçilmesi önerilmiştir. Deneylerde, çekirdek plakası haricindeki tüm bileşenlerin (BÖM,

bulonlar vb.) tekrar tekrar kullanılabilmesi ve önerilen tasarımın yeniden kullanılabilirlik senaryosunu kanıtladığı doğrulanmıştır.



Şekil 2.57 BÖM'ün beton dolgusunda oluşan hasarlar



Şekil 2.58 Histeretik eğriler

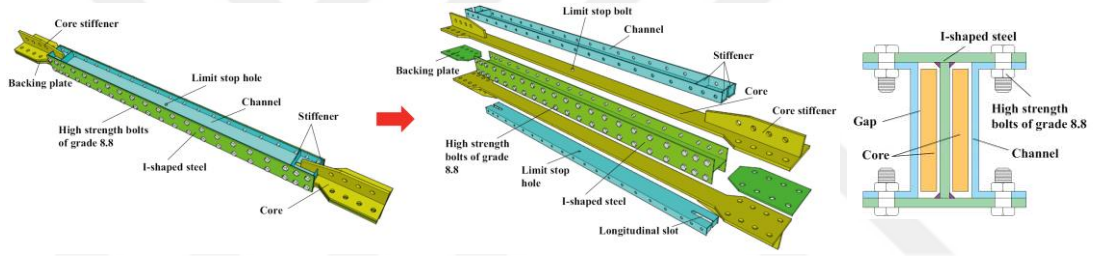
Performans açısından, P0 olarak adlandırılan ilk fazda daha yüksek bir performans gözlemlenmiştir. Ancak ileriki safhalarda (R1-R2-R3), betonun çatlaması ve ezilmesine bağlı olarak numunelerin performansında düşüşler yaşanmıştır. Bu nedenle, ilk döküm aşamasında yüksek dayanımlı beton kullanılması veya tekrarlı kullanımlar için sistemin hızlı onarım harcı ile onarılması tavsiye edilmiştir. Malzeme karşılaştırmasında, S160 grubunun S235 grubuna göre enerji sönümleme ve süneklik kapasitesi bakımından daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır. AB-BRB çekirdek plakasının yenisi ile nasıl değiştirileceğinin aşamaları ise Şekil 2.59'da gösterilmiştir.



Şekil 2.59 AB-BRB çekirdek plakasının yenisi ile değiştirilme aşamaları

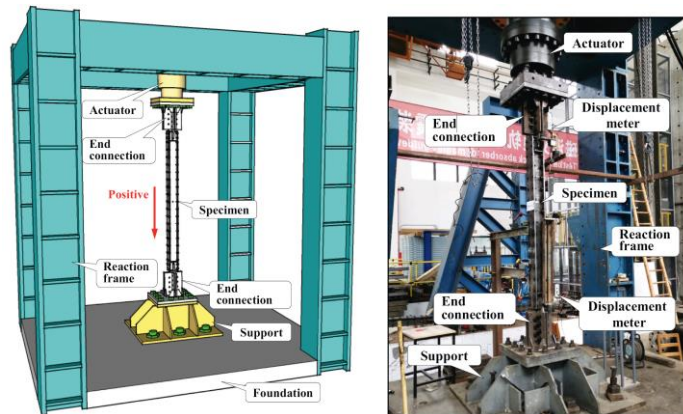
2.1.14. Huang vd. (2021)

Bu araştırmada, düşük akma gerilmeli Q195 çeliğinden teşkil edilen çift çekirdek plakalı burkulması önlenmiş çelik çaprazların sismik performansı altı adet numune ile incelenmiştir. Deneylerde çekirdek malzemesi Q195 ve Q235B, uzunluk, kesit, boşluk miktarı, bulon konfigürasyonu ve 3.66 ile 6.22 arasında değişen P_e/P_y oranı gibi parametreler araştırılmıştır. Şekil 2.60'ta önerilen tasarım verilmiştir.



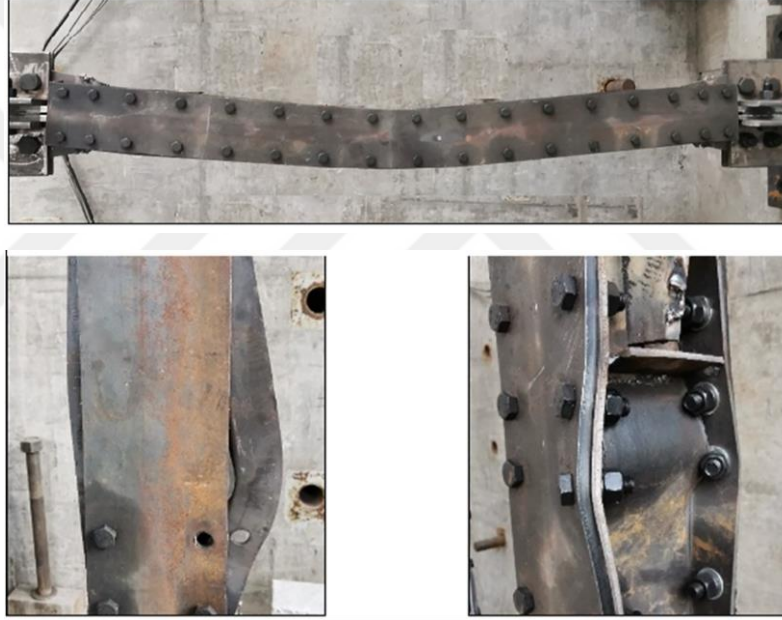
Şekil 2.60 Çift çekirdek plakalı burkulması önlenmiş çelik çapraz

Eleman bazında yapılan testler, 10.000 kN kapasiteli bir deney düzeneğinde ve GB 50011-2010 Çin deprem yönetmeliğinde belirtilen protokole göre yürütülmüştür. İlk üç numunenin %2.0 deformasyon seviyesinde beklenenden erken göçmesi nedeniyle, sonraki üç numunede %1.5 ile %2.0 arasına %1.75'lik bir ara deformasyon adımı eklenerek protokol modifiye edilmiştir.



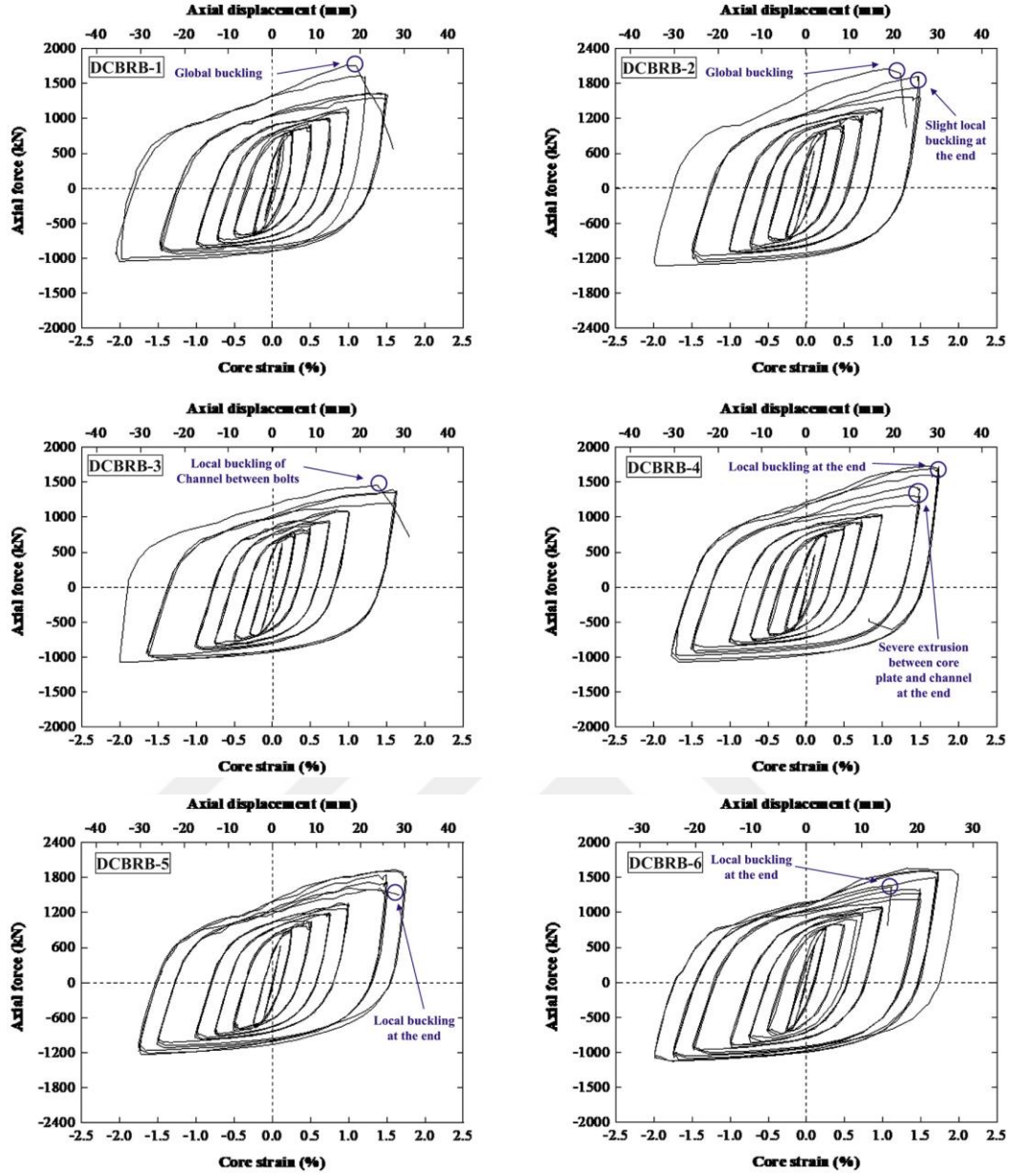
Şekil 2.61 Deney düzeneği

Deneylerde gözlemlenen tipik göçme mekanizmaları Şekil 2.62'de özetlenmiştir. DCBRB-1, %2.0 gerinimde basınç altında genel burkulma yaşamıştır. DCBRB-2, %1.5 gerinimde lokal burkulma belirtileri gösterip %2.0 gerinimde genel burkulmaya uğramıştır. DCBRB-3, %1.5 gerinimde bulon yetersizliğinden kaynaklı düzlem dışı açılma sergilemiş ve %2.0 gerinimde kapasitesini kaybetmiştir. DCBRB-4 ve DCBRB-5 numuneleri, %1.5 gerinimin sonraki çevrimlerinde üst uçta lokal burkulma yaşamış ve %1.75 gerinimin 3. çevriminde göçmüştür. Q235 çeliğinden yapılmasına rağmen DCBRB-5'in DCBRB-4 ile aynı davranışı göstermesi dikkat çekicidir. Daha kısa olan DCBRB-6 ise benzer bir lokal burkulma göçme moduna sahip olmuş, ancak %2.0 gerinimin 2. çevrimine kadar dayanarak daha iyi bir performans sergilemiştir.



Şekil 2.62 Tipik göçme mekanizmaları sırasıyla global burkulma ve lokal burkulma göçme tipleri

Yapılan bu çalışmada üç farklı göçme tipi tanımlanmıştır. Çekirdek plakasının genişlik/kalınlık oranının azaltılmasının yani kesitin toklaşmasının ve P_e/P_y oranının artırılmasının performansa olumlu etki ettiği saptanmıştır. Şekil 2.63'teki histeretik eğrilerin de doğruladığı gibi, numuneler %1 gerinime kadar mükemmel simetrik bir davranış göstermiş, ancak %1.5 gerinimden sonra bu davranış bozulmuştur. Q195 çeliğinin, Q235'e kıyasla daha iyi plastik deformasyon kapasitesi sunduğu da gösterilmiştir.



Şekil 2.63 Histeretik eğriler

2.1.15. Bai vd. (2022)

Bu çalışmada, FTA-BRB olarak adlandırılan yenilikçi bir burkulması önlenmiş çapraz tasarımı sunulmuştur. Bu sistemin burkulmayı önleyen mekanizması, içleri C30 sınıfı beton harcı ile doldurulmuş dört adet kutu profilden oluşmaktadır. Bu profiller, U şeklindeki çubuklar ve plakalardan oluşan atkı elemanları ve uç plakaları ile birleştirilmiştir. Bu tasarımın temel amacı, BÖM'ün kolayca monte edilebilir, sökülebilir ve değiştirilebilir olmasını sağlamaktır. Ayrıca, çekirdek plakasındaki hasarın dışarıdan gözlemlenebilmesi, bu tasarımın bir diğer önemli avantajını oluşturmaktadır. Bu konsepti doğrulamak amacıyla, 3 metre uzunluğunda ve Q235-B

Figure 1: Fabrication and cross-sections of the composite beam.

The figure illustrates the fabrication and cross-sections of the composite beam. The top part shows the assembly process for the Bar-hoop type and Plate-hoop type. The Bar-hoop type involves a steel square tube filled with concrete, an end plate, and U-shaped steel bars. The Plate-hoop type involves a U-shaped steel plate and U-shaped steel bars. The bottom part shows the cross-sections of the composite beam, including the Connection segment, Transition segment, and Yielding segment, with dimensions and material properties.

Section 1-1: Concrete, Core plate, End plate, Weld.

Section 2-2: U-shaped steel bar, Core plate.

Section 3-3: U-shaped steel plate, Bolt steel plate, Bolt, steel bar.

Bar-hoop type: Steel square tube filled with concrete, End plate, Weld, U-shaped steel bar, Bolted connection, Restraining hoops, Assembling.

Plate-hoop type: U-shaped steel plate, Plate hoop, Steel bar, Bolt, Assembling.

Dimensions and Material Properties:

- Connection segment: L_j, A_j
- Transition segment: L_t, A_t
- Yielding segment: L_c, A_c
- Transition segment: L_t, A_t
- Connection segment: L_j, A_j

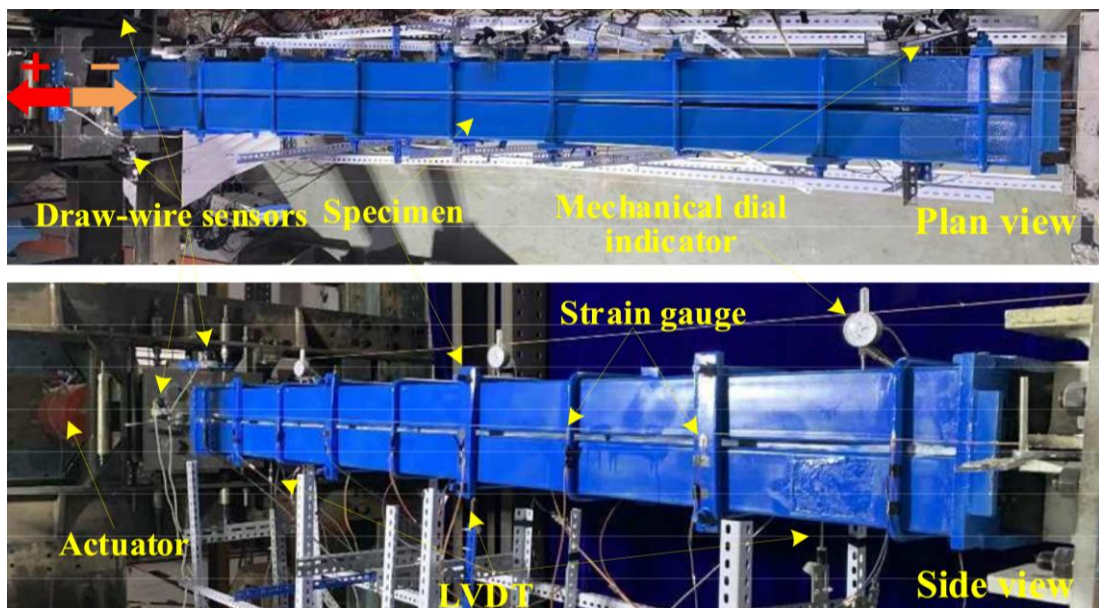
Dimensions:

- 265, 300, 1870, 3000, 300, 265
- 205, 10, 10, 205
- 10, 100

Labels:

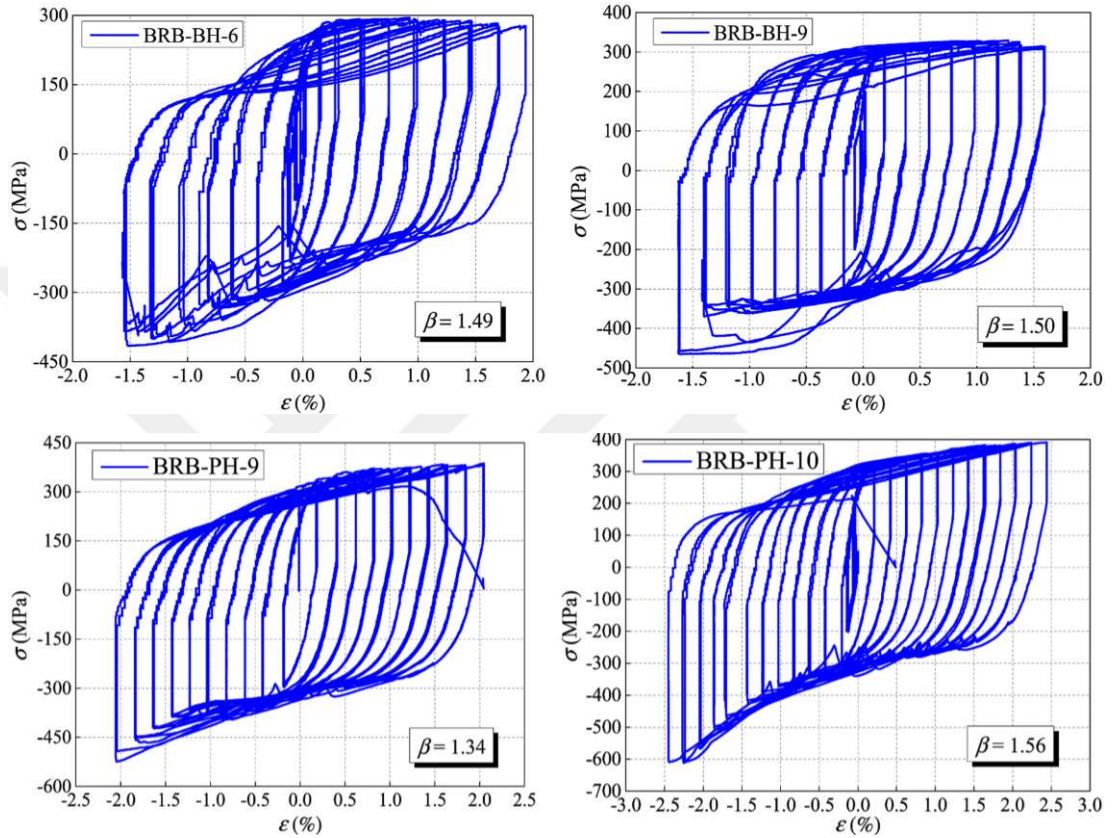
- Stiffener
- 1-1
- 2-2

Deneyler, eksenel olarak 2000 kN çekme ve basınç kapasitesine sahip bir deney düzeneğinde gerçekleştirilmiş ve iki farklı yükleme protokolü uygulanmıştır. Şekil 2.65’te deney düzeneği verilmiştir.



47

Deneyler sonucunda iki temel göçme mekanizması gözlemlenmiştir. BRB-BH-6 ve BRB-BH-9 numunelerinde hasar doğrudan burkulmayı önleyen mekanizmada meydana gelirken, BRB-PH-9 ve BRB-PH-10 numunelerinde çekirdek plakasının yorulmaya bağlı deformasyonu sonucu kopma gerçekleşmiştir. Şekil 2.66'da sunulan histeretik eğriler, önerilen BÖÇ'lerin yüksek enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğunu doğrulamıştır.



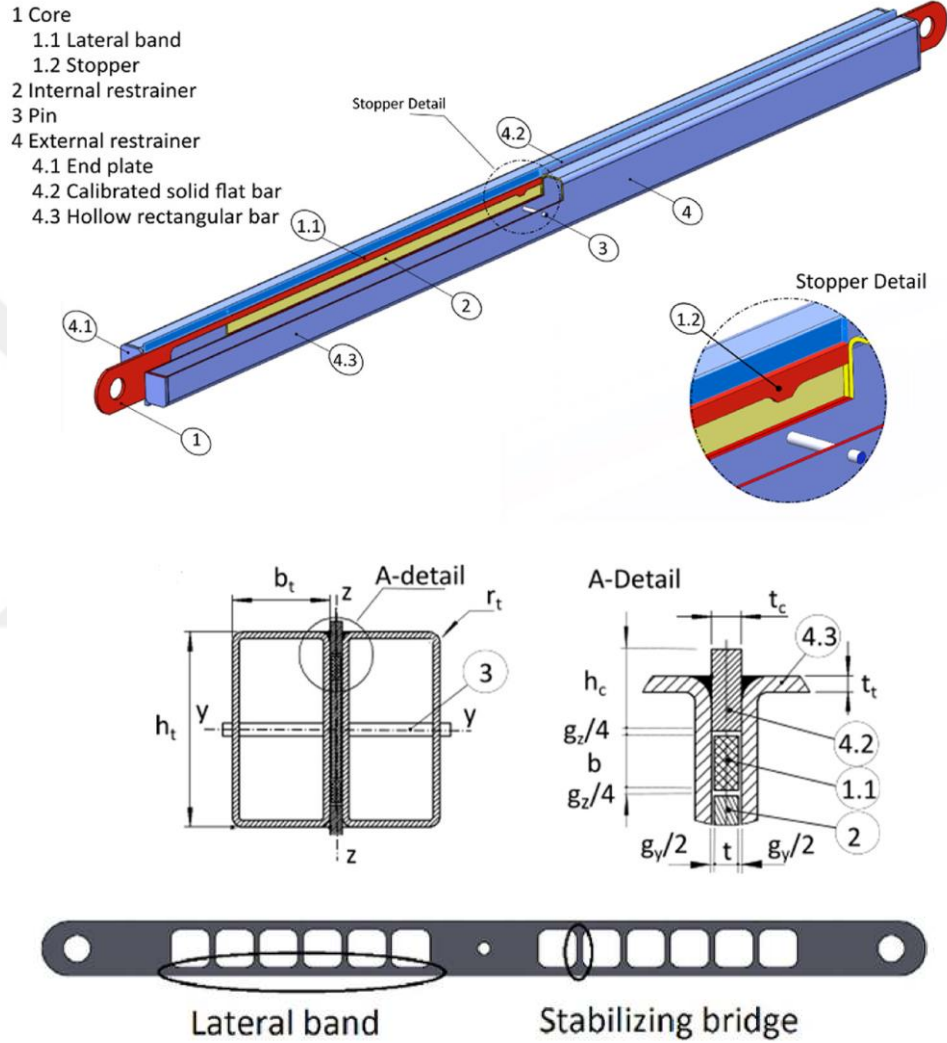
Şekil 2.66 Histeretik eğriler

Bulgular, plaka tipi atkı elemanlarına sahip BÖM'lerin daha yüksek performans gösterdiği ve bu numunelerde göçmenin beklendiği gibi çekirdek plakasında gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Buna karşın, çubuk tipi atkı elemanı kullanılan numunelerde göçme, burkulmayı önleyen mekanizmanın kendisinde ve hareketli uca en yakın elastik-akma geçiş bölgesinde yoğunlaşmıştır. Yapılan deneysel ve nümerik analizler, BÖM atkı elemanlarının sayısı ile çekirdek plakasındaki hasar/deformasyon arasında ters bir ilişki olduğunu da ortaya koymuştur.

2.1.16. Cahis vd. (2023)

Bu araştırmada, CDC-BRB olarak adlandırılan, eş düzlemli çift çekirdekli diye tabir ettikleri delikli çekirdek plaka tasarımına sahip yeni bir burkulması önlenmiş

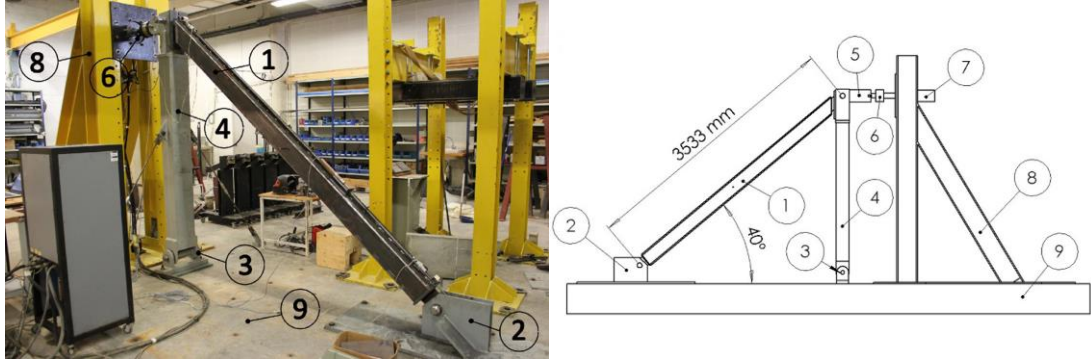
çapraz sistemi sunulmuştur. Tasarımın temel amacı, geleneksel BÖÇ'lere kıyasla çekirdeğin kolayca çıkarılıp incelenmesine olanak tanımadır. Ayrıca malzeme zayıflığını ve maliyeti azaltan, yüksek enerji sönümleme kapasiteli ve kararlı bir davranış hedeflenmiştir. Çalışma, önerilen BÖÇ tasarımı boşluk boyutlarının çevrimsel performans ve enerji sönümleme kapasitesi üzerindeki etkisini dört adet numune ile araştırmıştır.



Şekil 2.67 Önerilen BÖÇ konsepti

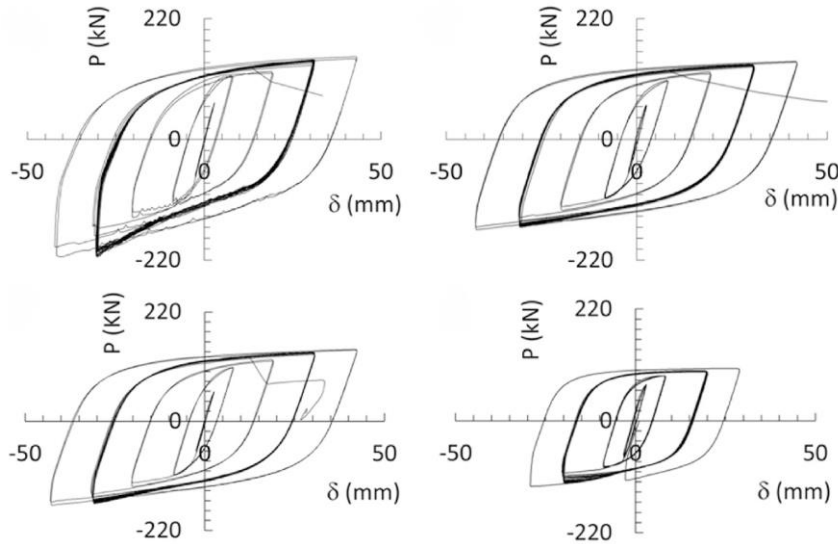
Şekil 2.67’de detayları verilen sistem; bir çekirdek, bir pim ve çekirdeğin burkulmasını engelleyen iç ve dış burkulmayı önleyici mekanizmalardan (BÖM) oluşmaktadır. Dört adet test numunesi, özellikle Şekil 2.67’de görülen g_y ve g_z boşluk boyutlarındaki farklılıkları incelemek üzere tasarlanmıştır. Numune 1’de boşluklar gereğinden fazla, Numune 4’te ise g_z boşluğu gereğinden küçük bırakılmıştır. Numune 2 ve 3’te ise önerilen ideal boşluk değerleri kullanılmıştır. Bu iki numune arasındaki kritik fark, Numune 3’ün testinde, Numune 2’de kullanılan dış burkulmayı önleyici

mekanizmanın tekrar kullanılmış olmasıdır. Çekirdek malzemesi Numune 1'de S275, diğer üç numunede S235 çeliğidir. Deneyler Şekil 2.68'de gösterilen test düzeneğinde yapılmıştır. Yükleme protokolü olarak ilk üç numunede AISC-341, dördüncü numunede ise EN-15129 standardı uygulanmıştır.



Şekil 2.68 Deney düzeneği

Şekil 2.69'da sunulan histeretik eğriler, boşluk boyutunun performansı doğrudan etkilediğini göstermiştir. Önerilen boşluk değerinin yaklaşık iki katına sahip Numune 1'de, basınç kuvveti altında dalgalanmalar meydana gelmiştir. Gereğinden küçük boşluğa sahip Numune 4'te ise artan basınç kuvveti nedeniyle çekirdeğin alt bölümünde yerel burkulma yaşanmıştır. Buna karşın, önerilen boşluk değerlerine sahip olan 2. ve 3. numuneler benzer ve kararlı histeretik davranışlar sergilemiştir.



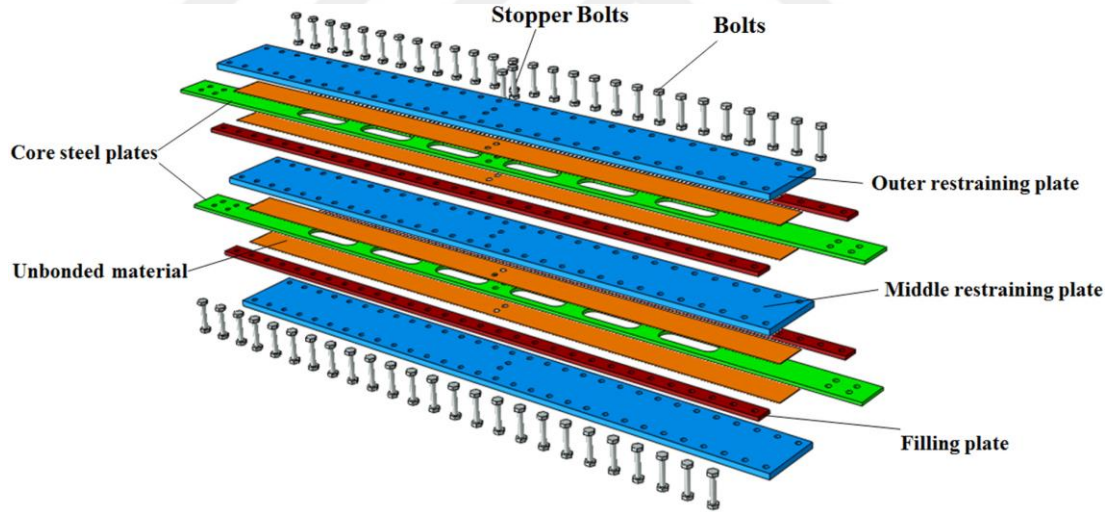
Şekil 2.69 Histeretik eğriler

Bu testler sonucunda en önemli bulgulardan biri, 3. numunede dış burkulmayı önleyen mekanizmanın yeniden kullanılmasının, davranışı olumsuz etkilememesidir. Çalışma, önerilen BÖÇ sisteminin kararlı ve yüksek enerji dağıtma kapasitesine sahip

olduğunu ortaya koymuştur. Boşluk boyutlarının akma kuvveti, akma deplasmanı veya elastik rijitlik üzerinde bir etkisi gözlemlenmezken, önerilen değerlere uyulduğunda nihai enerji sönümleme kapasitesinin başarılı bir şekilde tahmin edilebildiği görülmüştür.

2.1.17. Chao vd. (2024)

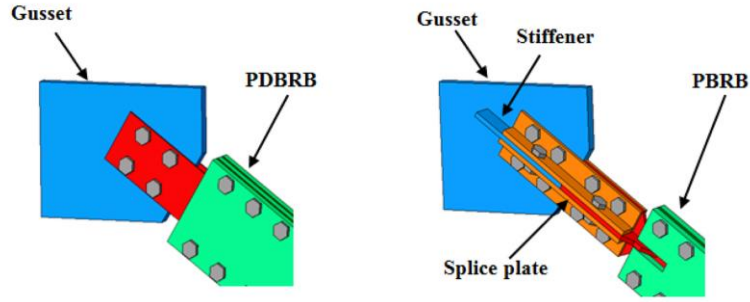
Bu çalışmada, PDBRB olarak adlandırılan, yenilikçi bir delikli çift çekirdekli çelik plaka ile monte edilmiş bir BÖÇ tasarımı sunulmuştur. Bu sistemin amacı, ikinci bir çelik çekirdek plaka ekleyerek yük taşıma kapasitesini artırırken, süneklik veya kümülatif plastik deformasyon kapasitesinden ödün vermemektir. Bu hedef doğrultusunda, üç farklı BÖÇ konfigürasyonu ve bir adet geleneksel BÖÇ numunesi üzerinde yarı statik testler ve sayısal simülasyonlar yapılmıştır. Araştırma, yenilikçi BÖÇ tasarımı konseptinin mekanik özelliklerini, enerji yutma performansını, gerilme dağılımını ve yüksek mod burkulma deformasyonlarını incelemeyi; optimal konfigürasyonu belirlemeyi ve geleneksel BÖÇ ile karşılaştırmalı bir analiz yapmayı hedeflemiştir.



Şekil 2.70 Önerilen BÖÇ tasarımı

Önerilen BÖÇ tasarımı, Şekil 2.70’te gösterildiği gibi, iki adet çelik çekirdek plaka, iki adet çelik dış destek plakası (BÖM bileşeni), bir çelik orta destek plakası, çelik dolgu plakaları, ayırıcı malzeme ve yüksek mukavemetli bulonlardan oluşmaktadır. Tasarımın önemli avantajı, Şekil 2.71’de görüldüğü gibi, çekirdek plakalarının bulonlarla doğrudan birleşim plakasına bağlanabilmesidir. Geleneksel BÖÇ’lerde ise ek plakaların kaynaklanması gerekir. Bu kaynaksız bağlantı detayı,

PDBRB'yi daha uygulanabilir kılmakta ve kaynak kaynaklı gerilme yığılmalarının olumsuz etkilerini ortadan kaldırmaktadır.



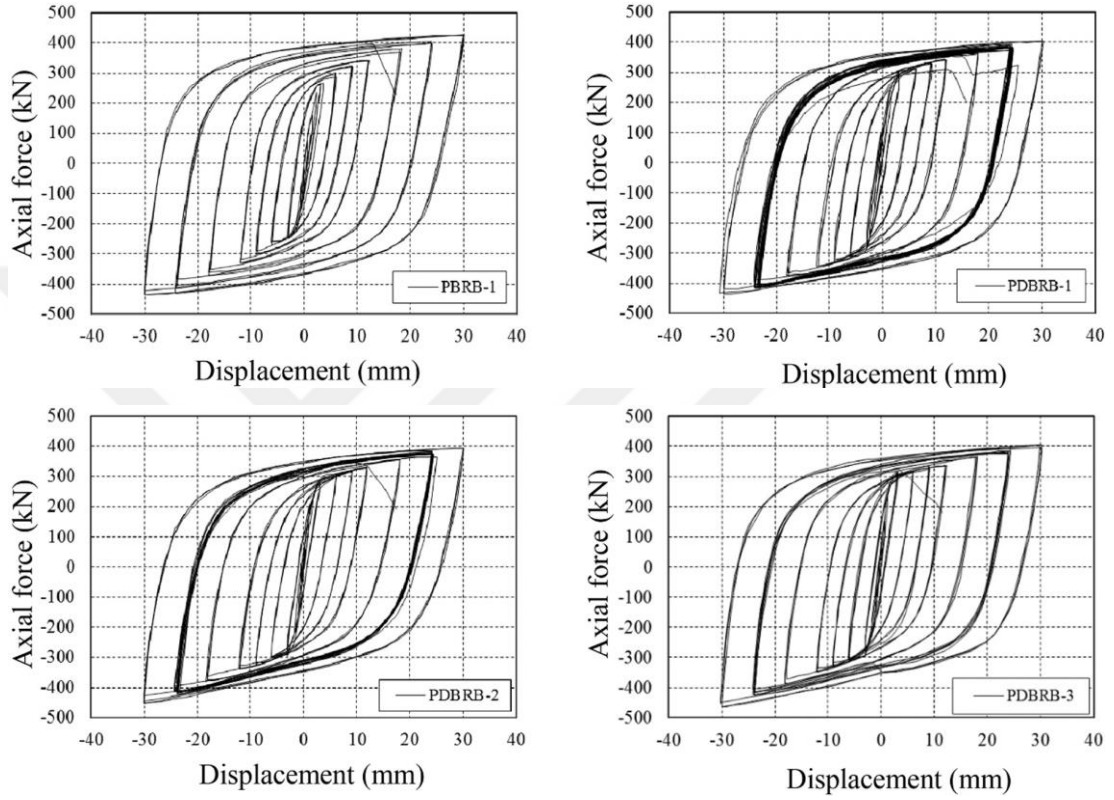
Şekil 2.71 Sırasıyla önerilen BÖÇ'ün ve geleneksel BÖÇ'lerin bağlantı detayı

Deneyler için dört farklı tip BÖÇ numunesi üretilmiştir. Geleneksel PBRB-1'in çekirdeği 20 mm kalınlığında tek bir levhadan oluşurken; PDBRB-1, PDBRB-2 ve PDBRB-3'ün çekirdekleri 10 mm kalınlığında ikişer levhadan hazırlanmıştır. Tüm bileşenler Q235B sınıfı çelikten üretilmiştir. Deneyler, Şekil 2.72'de gösterilen düzeneğe monte edilen 1000 kN kapasiteli MTS aktüatörü ile yapılmıştır. Yükleme, Çin Teknik Şartnamesi T/CECS 817-2021'e uygun olarak kuvvet kontrolü, artımlı yer değiştirme yükleme ve yorulma yükleme olmak üzere üç aşamalı bir protokol ile uygulanmıştır.



Şekil 2.72 Deney düzeneği

Dört numunenin hiçbirinde stabilite sorunu gözlenmemiştir. Ancak yükleme protokolünün farklı aşamalarında göçme yaşanmıştır. PDBRB-1'in bazı delikli akma segmentlerinde çatlaklar gözlemlenirken, bu tür çatlaklara diğer numunelerde rastlanmamıştır. Şekil 2.73'deki histeretik eğrilerin de doğruladığı gibi, tüm numunelerin deney sonuçları simetrik ve kararlı çıkmıştır bu da tasarımların kararlı mekanik özelliklere sahip olduğunu göstermiştir.



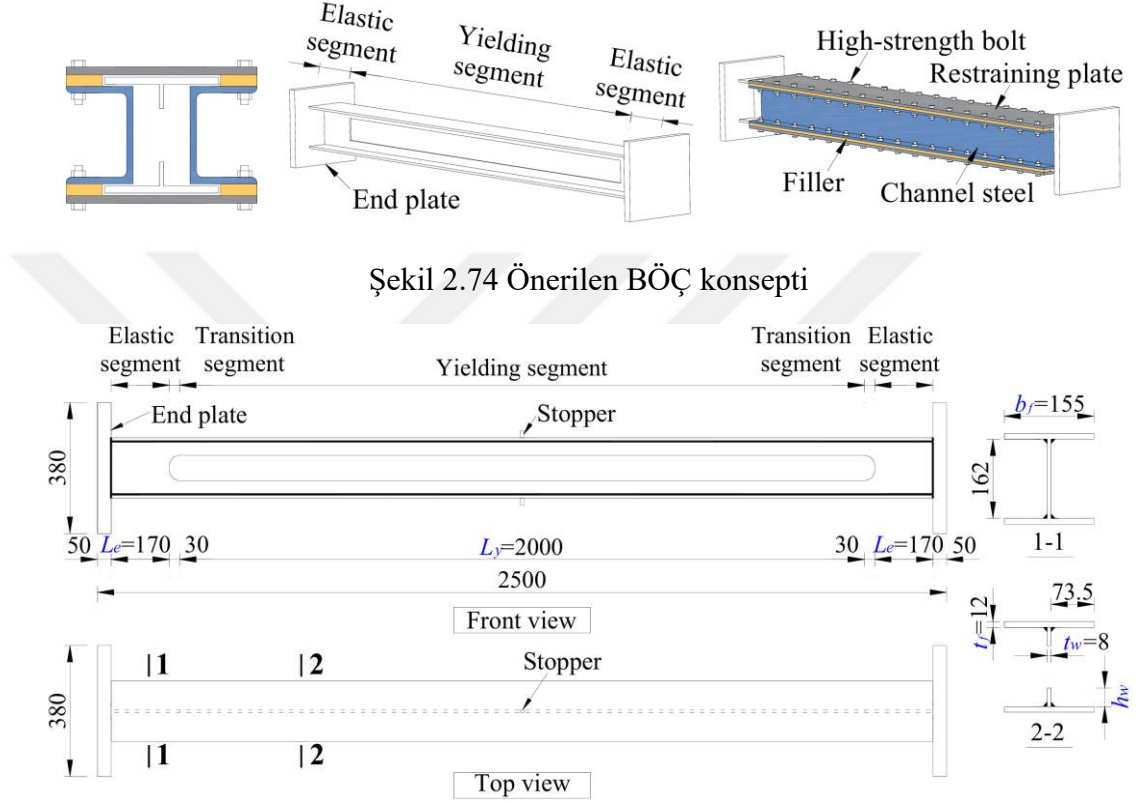
Şekil 2.73 Histeretik eğriler

Sonuç olarak, önerilen yeni BÖÇ tasarımının, geleneksel BÖÇ ile benzer mekanik özellikler sergilediği, avantaj olarak daha yüksek kümülatif plastik deformasyon ve enerji yutma kapasitesi sunduğu kanıtlanmıştır.

2.1.18. Yuan vd. (2024)

Bu çalışmada, DTBRB olarak adlandırılan ve çekirdek kısmı çift-T kesitli olan yeni bir burkulması önlenmiş çapraz konsepti önerilmektedir. Tasarımın amacı, çekirdeğin düzlem dışı burkulmasını azaltmak, yorulma dayanımını iyileştirmek ve elemanın taşıma kapasitesini artırmaktır. Uzun BÖÇ'lerde genel burkulmayı önlemek için yüksek eğilme rijitliğine ihtiyaç duyulmaktadır.

Önerilen BÖÇ konseptinin burkulmayı önleyen mekanizması, monte edilmiş sınırlama plakaları, dolgu malzemeleri ve U profilleri içerir. Şekil 2.74'te detayları verilen çekirdek ise, birbirinden ayrılmış ve simetrik olarak yerleştirilmiş iki T-kesitinden oluşmaktadır. Çekirdeğin dış kısmı plakalarla tamamen kısıtlanırken, iç kenar kısmı yalnızca U profilleri ile kısıtlanmakta, gövde ise sınırlama altına alınmamaktadır. Şekil 2.75'te çekirdek elemanının detayları verilmiştir.

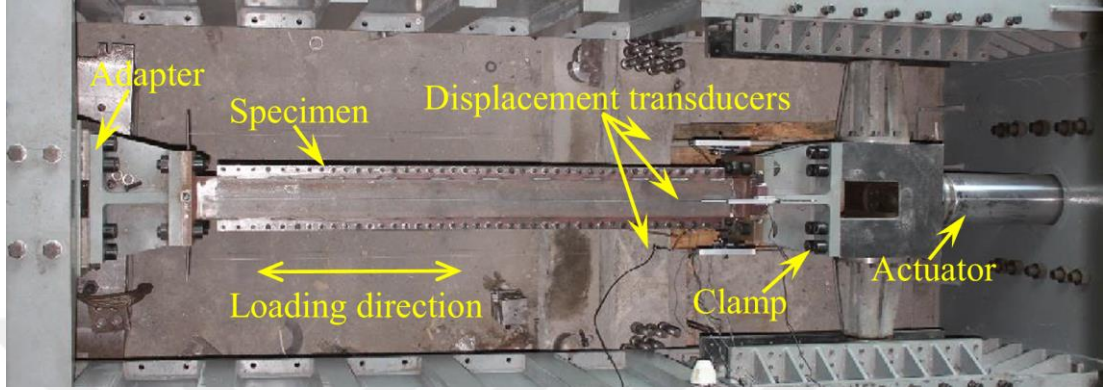


Şekil 2.75 Çekirdek plakasının detayları

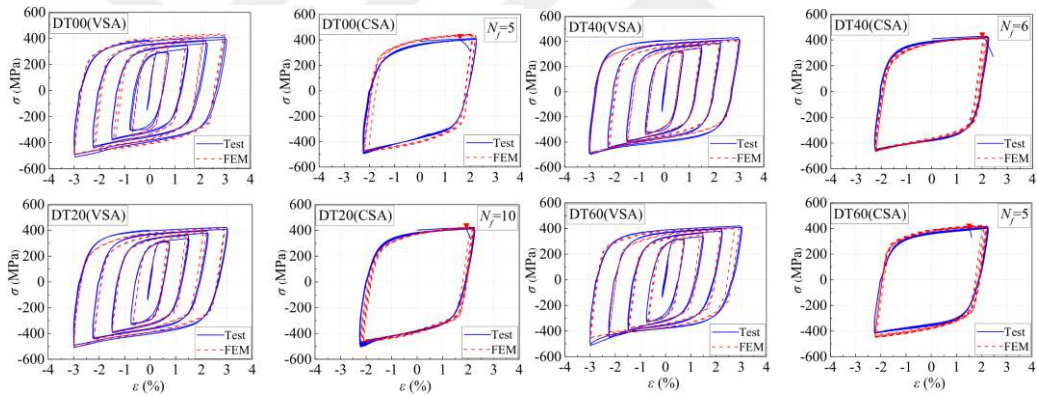
Çekirdek gövde yüksekliğinin performansa etkisini incelemek amacıyla, gövde yükseklikleri sırasıyla 60 mm, 40 mm, 20 mm ve 0 mm olan dört farklı DTBRB numunesi tasarlanmıştır. Gövde kalınlığı tüm numunelerde 8 mm olarak sabit tutulmuştur. Malzeme tasarrufu için, DT00 ile DT20 ve DT40 ile DT60 numuneleri ortak BÖM setlerini paylaşmıştır. Tüm çelik elemanlar 235 MPa akma gerilmesine sahip Q235 sınıfı çelikten imal edilmiştir.

Deneyler, Şekil 2.76'da gösterilen yatay bir eksenel deney düzeneği yerleştirilen numuneler üzerinde, AISC 341-16 Standardına uygun bir yükleme protokolü ile gerçekleştirilmiştir. Numunelerin deformasyon modları incelendiğinde; DT00 numunesinin akma segmentinde bir çatlak ve kenarları kısıtlı olduğu için belirgin bir içe doğru burkulma meydana gelmiştir. DT20 numunesinde de akma

segmentinde çatlama olmuştur. DT40 numunesi çekirdeğin ortasından kırılmış ve başlıkta hafif dalgalı bir burkulma deformasyonu oluşmuştur. DT60 numunesinde ise akma segmentinde bir çatlak görülmüştür. DT20 ve DT60 numunelerinde oluşan kalıcı deformasyonlar karşılaştırılmış ve sonlu elemanlar modelinin plastik deformasyon dalga formlarını ve sayılarını doğru tahmin ettiği doğrulanmıştır.



Şekil 2.76 Deney düzeneği

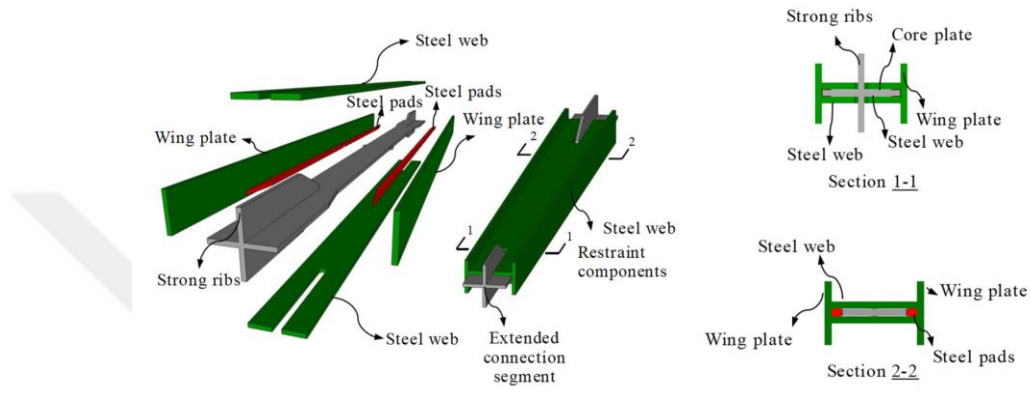


Şekil 2.77 Histeretik eğriler

Şekil 2.77’de tüm numuneler için sunulan histeretik eğriler, elemanların rijitlik ve taşıma kapasitesi kaybına uğramadan çok iyi bir performans sergilediğini göstermektedir. Sonuç olarak, T kesitli çekirdek plakası olmayan DT00 numunesinde düzlem dışı burkulma görülürken, T-kesitli numunelerinde belirgin bir dalgalı burkulma gözlenmemiştir. T-kesit oluşturmanın, plakanın düzlem dışı deformasyonunu azaltmak ve çekirdeğin stabilitesini artırmak için etkili olduğu gözlemlenmiştir. Düşük yükseklik-kalınlık oranına sahip yani daha tok gövde, başlığın düzlem dışı deformasyonunu etkin bir şekilde sınırlamıştır. Yüksek orana sahip gövde ise plastik burkulma yaşamış ve başlıkta burulmaya neden olmuştur.

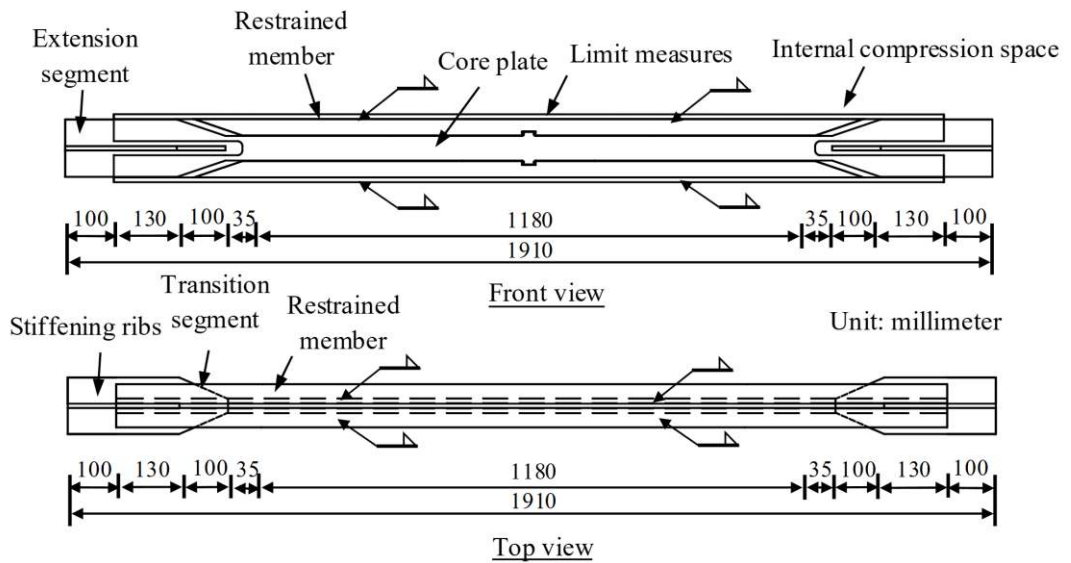
2.1.19. Wu vd. (2025)

Bu çalışmada, ayırıcı malzemesi bulunmayan üç adet tamamı çelik burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) numunesi tasarlanmıştır. Bu numuneler üzerinde düşük çevrimli tekrarlı yük testleri yapılarak, ayırıcı bir katmanın yokluğunun göçme modları, enerji sönümleme kapasitesi ve yorulma ömrü üzerindeki etkileri incelenmiştir. Deneylerde kullanılan BÖÇ yapısının görselleri Şekil 2.78’de sunulmuştur.



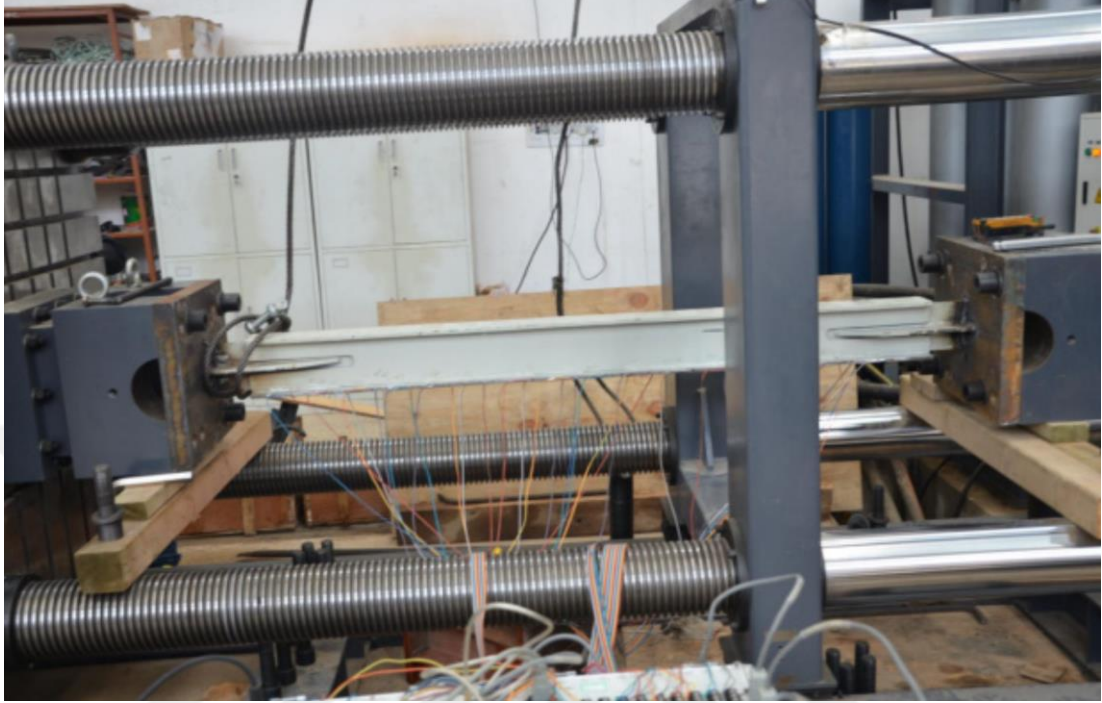
Şekil 2.78 BÖÇ Konsepti

Test edilen ABRB 3, ABRB 5 ve ABRB 7 numunelerinin hiçbirinde ayırıcı malzeme kullanılmamıştır. Değişken parametreler; çekirdek plakası genişliği (51, 90, 96 mm), çekirdek plakası kalınlığı (10, 10, 12 mm) ve buna bağlı olarak değiştirilen burkulmayı önleyen mekanizma kesitleridir. Şekil 2.79’da tipik ABRB numunesinin imalat görselleri verilmiştir. Tüm bileşenlerde Q235 sınıfı çelik kullanılmıştır.



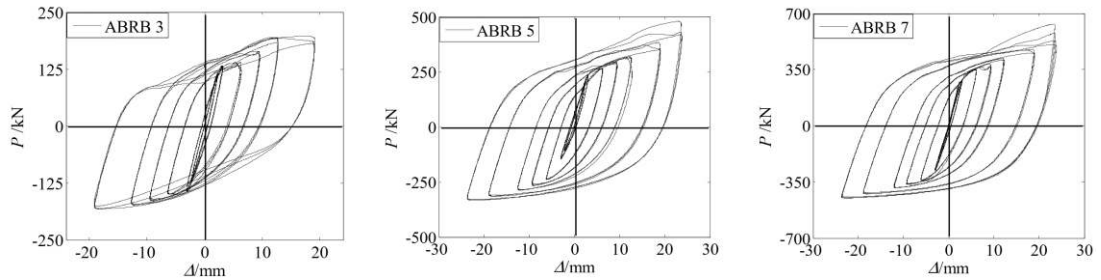
Şekil 2.79 Tipik ABRB numunesinin imalat görselleri

Numuneler, Şekil 2.80’de verilen deney düzeneğine yerleştirilmiş ve Çin Halk Cumhuriyeti’nin Binaların Sismik Tasarımı Yönetmeliği GB 50011-2010’e göre deplasman bazlı yüklemeye maruz bırakılmıştır.



Şekil 2.80 Deney düzeneği

Deney sonuçları, Özellikle, ayırıcı malzeme kullanılmaması nedeniyle oluşan aşırı sürtünme etkilerinin, yerel burkulma genliğini değiştirmesiyle BÖÇ’lerin yorulma performansını belirli bir ölçüde azalttığı raporlanmıştır. Bu durum, çekirdek ile burkulmayı önleyen mekanizma arasındaki aşırı sürtünmenin, yerel basınç gerilmelerini artırarak çaprazları uç bölgelerde yerel burkulmaya karşı daha hassas hale getirdiğini göstermiştir. ABRB 7 numunesinin basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.79’a ulaşarak standart limitleri aşmıştır. Şekil 2.81’de verilen histeretik eğrilerde çekme negatif basınç pozitif olarak verilmiştir.



Şekil 2.81 Histeretik eğriler

Sürtünme etkisi ayrıca, BÖÇ eksenel kuvvetinin uçlarda daha büyük, ortada ise daha küçük olduğu üniform olmayan bir dağılıma neden olmaktadır. Buna bağlı olarak, enerji sönümleyici bölümdeki burkulma dalga boyu uçlara yakın yerlerde daha kısa, ortada daha uzun bir model sergilemiş ve bu durum BÖÇ'lerde belirgin bir çevrimsel pekleşme davranışına yol açmıştır.

Sonuç olarak, 'tamamı çelik' BÖÇ'lerin tasarımında sürtünme etkilerini azaltmak, yerel stabiliteyi iyileştirmek, basınç dayanımı düzeltme katsayılarını düşürmek ve yorulma performansını artırmak amacıyla ayırıcı malzemelerin kullanılması tavsiye edilmiştir.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

Doktora tezi kapsamında deneysel ve nümerik çalışmalar yürütülmüştür. Deneysel çalışmalar, Manisa Celal Bayar Üniversitesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda (MCBU-YDML) yapılmıştır. Nümerik araştırmalar sonlu elemanlar tabanlı ABAQUS yazılımı ile bilgisayar ortamında yapılmıştır. Bu araştırmalarda kullanılan materyal ve izlenen yöntemler, alt başlıklarda ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Deneysel Araştırmalar

Deneysel araştırma programı, iki temel aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada, en hafif ve en yüksek enerji sönmüleme kapasitesine sahip değiştirilebilir çekirdekli burkulması önlenmiş çapraz (BÖÇ) elemanını geliştirmek amacıyla, yarı çerçeve deney düzeneğinde 5 farklı burkulmayı önleme mekanizmasına (BÖM'e) sahip 10 farklı numune test edilmiştir. İkinci aşamada ise bulon sayısı ve aralığının BÖÇ performansı üzerindeki etkisini incelemek üzere, aynı deney düzeneği kullanılarak 5 adet numune üzerinde deney yapılmıştır.

3.1.1. Deney Düzeneği

Burkulması önlenmiş çapraz numunelerinin sismik performansını araştırmak amacıyla bir deney düzeneği kurulmuştur. Söz konusu düzenek, Şekil 3.1'de gösterilen betonarme reaksiyon duvarı ve güçlü döşeme sistemine bağlanmıştır. Bu güçlü döşeme/reaksiyon duvarı sistemi, 5 metre yüksekliğinde, 2.5 metre payanda derinliğine sahip reaksiyon duvarı ile 1.0 metre derinliğinde güçlü döşemeden oluşmakta olup, 2021 yılında 2020-115 numaralı ve "İyileştirilmiş Boşluklu Betonarme Perdelerin Yapısal Davranış Üzerindeki Etkisinin Araştırılması" isimli MCBÜ-BAP Altyapı projesi kapsamında inşa edilmiştir.



Şekil 3.1 MCBÜ-BAP 2020-115 numaralı projede yapımı gerçekleştirilen güçlü döşeme/reaksiyon duvarı sistemi

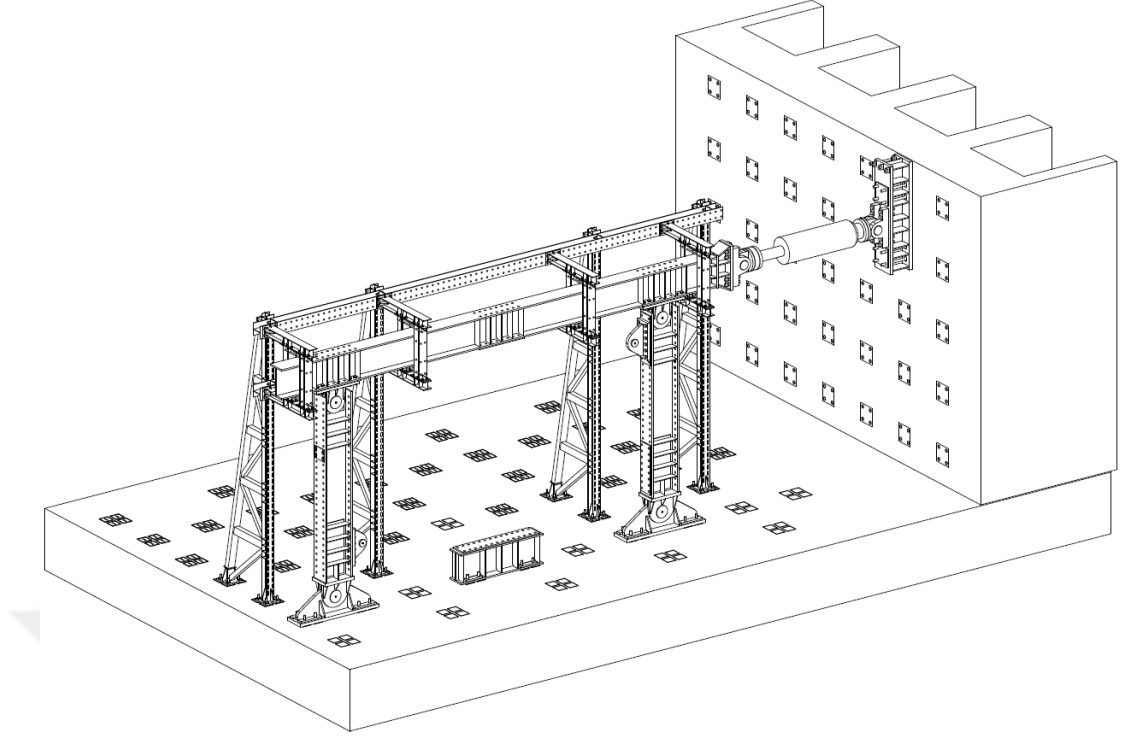
Deneyler sırasındaki yatay yükler, servo-kontrollü bir hidrolik aktüatör sistemi ile sağlanmıştır. Bu sistem; 2000 kN çekme ve basınç kapasiteli bir hidrolik piston, kontrol sistemi ve hidrolik ünitelerden oluşmakta olup 2021-104 numaralı ve “V-Tipi Çapraz Düzenine Sahip Burkulması Önlenmiş Çapraz Elemanların Deneysel İncelenmesi” isimli MCBÜ-BAP Altyapı projesi kapsamında temin edilmiştir. Sistemin temel bileşenleri Şekil 3.2’de sunulmuştur.

Aktüatör, toplam 850 mm strok kapasitesine ve maksimum 100 mm/dak (yaklaşık 1.7 mm/s) hıza sahiptir. Bu kapasite, tam ölçekli BÖÇ testlerinin quasi-statik olarak yapılmasına olanak tanımıştır. Sistemin servo-kontrol özelliği, 0.1 mm hassasiyetinde deplasman kontrollü yükleme yapmayı mümkün kılmaktadır. Ayrıca hidrolik pistonun her iki ucu mafsallı bir tasarıma sahiptir. Bu tasarım, pistonun hem reaksiyon duvarına hem de test çerçevesine sadece eksenel kuvvetler iletmesini sağlayarak istenmeyen moment etkilerinin önüne geçmektedir.

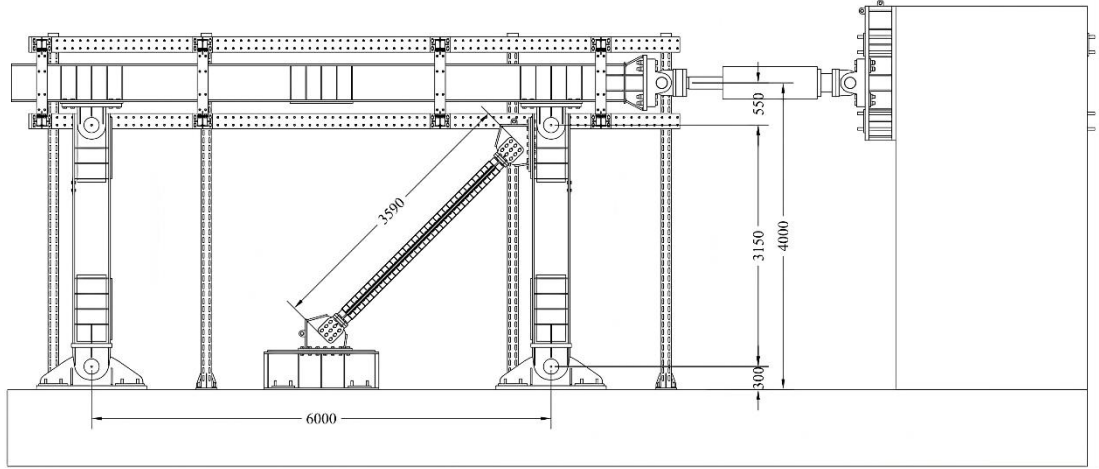


Şekil 3.2 Sırasıyla hidrolik piston, hidrolik ünite, kontrol yazılımı ve kontrol paneline ait görseller

Deney düzeneği olarak 6 metre açıklığa sahip S275 sınıfı çelik kullanan HEA 500 profillerden teşkil edilmiş deney düzeneği kullanılmıştır. Bu düzenek, 221M156 numaralı ve “Yenilenebilir Burkulması Önlenmiş Çaprazların Geliştirilmesi” isimli TÜBİTAK 1001 projesi kapsamında kurulmuştur. Uygulanan yatay yükün tamamının doğrudan çapraz eleman tarafından taşınmasını sağlamak amacıyla, kolon-kiriş ve kolon-mesnet birleşimleri mafsallı olarak tasarlanmıştır. Ayrıca, çerçevenin yatay yükleme esnasındaki düzlem dışı hareketleri bir düzlem dışı hareket tutucu sistem ile sınırlandırılmıştır. Deney düzeneğine ait izometrik ve geometrik özelliklerinin verildiği kesit görüntüleri sırasıyla Şekil 3.3 ve Şekil 3.4’te sunulmaktadır.



Şekil 3.3 Deney düzeneğine ait izometrik görünüş



Şekil 3.4 Deney düzeneğine ait kesit görünümü

3.1.2. Deney Numuneleri

Araştırmanın iki temel hedefine, yani en verimli değiştirilebilir çekirdekli BÖÇ elemanını geliştirmesine ve bulon konfigürasyonunun etkisini incelemeye odaklanabilmek için, deneylerdeki değişken sayısı sınırlandırılmıştır. Bu yaklaşımla, tüm numunelerin aynı çelik plakadan kesilmesine dikkat edilmiştir. Buna ek olarak, çekirdek plakalarının geometrisi, akma bölgesi uzunlukları, kullanılan ayırıcı malzemenin özellikleri ve uygulanan yükleme protokolü de bütün deneyler için

standart tutulmuştur. Deneyleri gerçekleştirilen BÖÇ numunelerinin değişkenleri Tablo 3.1’de sunulmuştur.

Tablo 3.1 BÖÇ numunelerinin değişkenleri

Araştırma Programı	Numune No	BÖM	BÖÇ Toplam Ağırlık (kg)	Bulon Aralığı (mm)	Pcr/Pysc
1. Araştırma Programı	BÖÇ-01	BÖM-1	571.7	80	25.6
	BÖÇ-02				
	BÖÇ-03	BÖM-2	493.2		11.4
	BÖÇ-04				
	BÖÇ-05	BÖM-3	444.8		9.4
	BÖÇ-06				
	BÖÇ-07	BÖM-4	396.5		7.8
	BÖÇ-08				
	BÖÇ-09	BÖM-5	348.2		6.6
	BÖÇ-10				
2. Araştırma Programı	BÖÇ-11	BÖM-4	396.5	160	7.8
	BÖÇ-12			240	
	BÖÇ-13			320	
	BÖÇ-14			400	
	BÖÇ-15			640	

3.1.2.1. Malzemelerin Mekanik Özellikleri

BÖÇ numunelerinin 18 mm kalınlığındaki çekirdek plakalarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla, plakalardan üçer adet kupon numune alınarak çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler neticesinde elde edilen ortalama akma gerilmesi, kopma gerilmesi ve birim uzama değerleri Tablo 3.2’de özetlenmiştir.

Kupon testlerine ait görsellerden; kuponların deney düzeneğindeki görünüşü Şekil 3.5’te, kopma öncesi ve sonrası halleri Şekil 3.6’da ve gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri Şekil 3.7’de sunulmaktadır. Ayrıca, bu deneylere ilişkin detaylı test raporları EK-2’de yer almaktadır.

Tablo 3.2 Kuponların çekme deneyi sonuçları

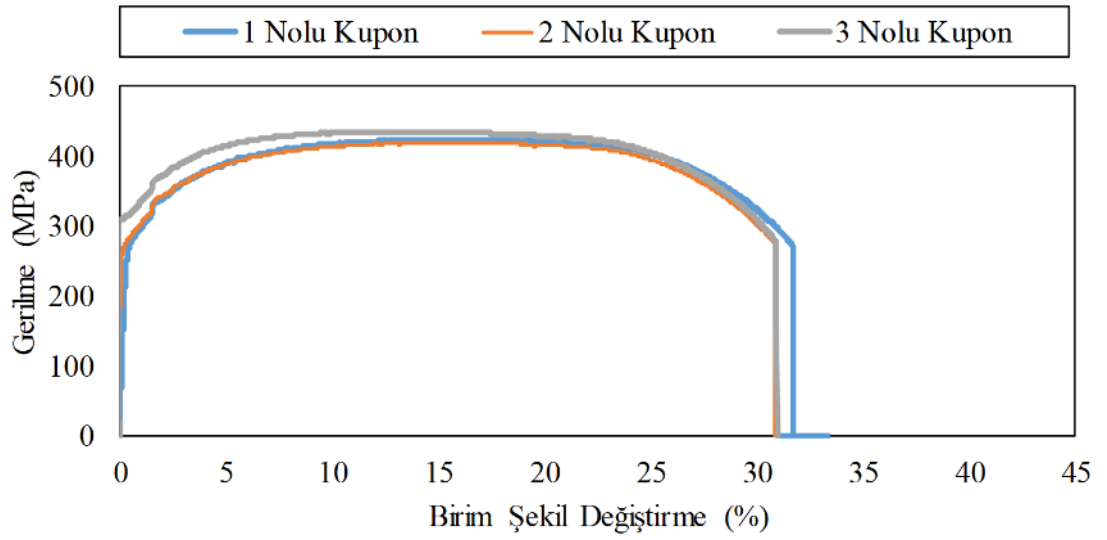
Numune No	Kalınlık (mm)	Genişlik (mm)	Akma Gerilmesi (Mpa)	Çekme Gerilmesi (Mpa)	Birim Uzama (%)
18-1	18.02	24.40	271.9	424.5	31.6
18-2	18.05	24.50	271.8	419.9	30.8
18-3	18.08	24.55	304.8	435.8	30.9
Ortalama	18.05	24.48	282.8	426.7	31.1



Şekil 3.5 Kupon numunelerinin deney düzeneğindeki görünüşü



Şekil 3.6 Kupon numunelerinin kopma öncesi ve sonrası halleri



Şekil 3.7 18mm plakaya ait gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri

Tablo 3.3 Çekirdek plakasının karakteristik ve gerçek akma dayanımları

Akma	Kalınlık(mm)	Kesit Alanı(mm ²)	Akma Gerilmesi (Mpa)	Akma Dayanımı (kN)
Karakteristik	18	1548	329	509
Gerçek	18.05	1552	283	439

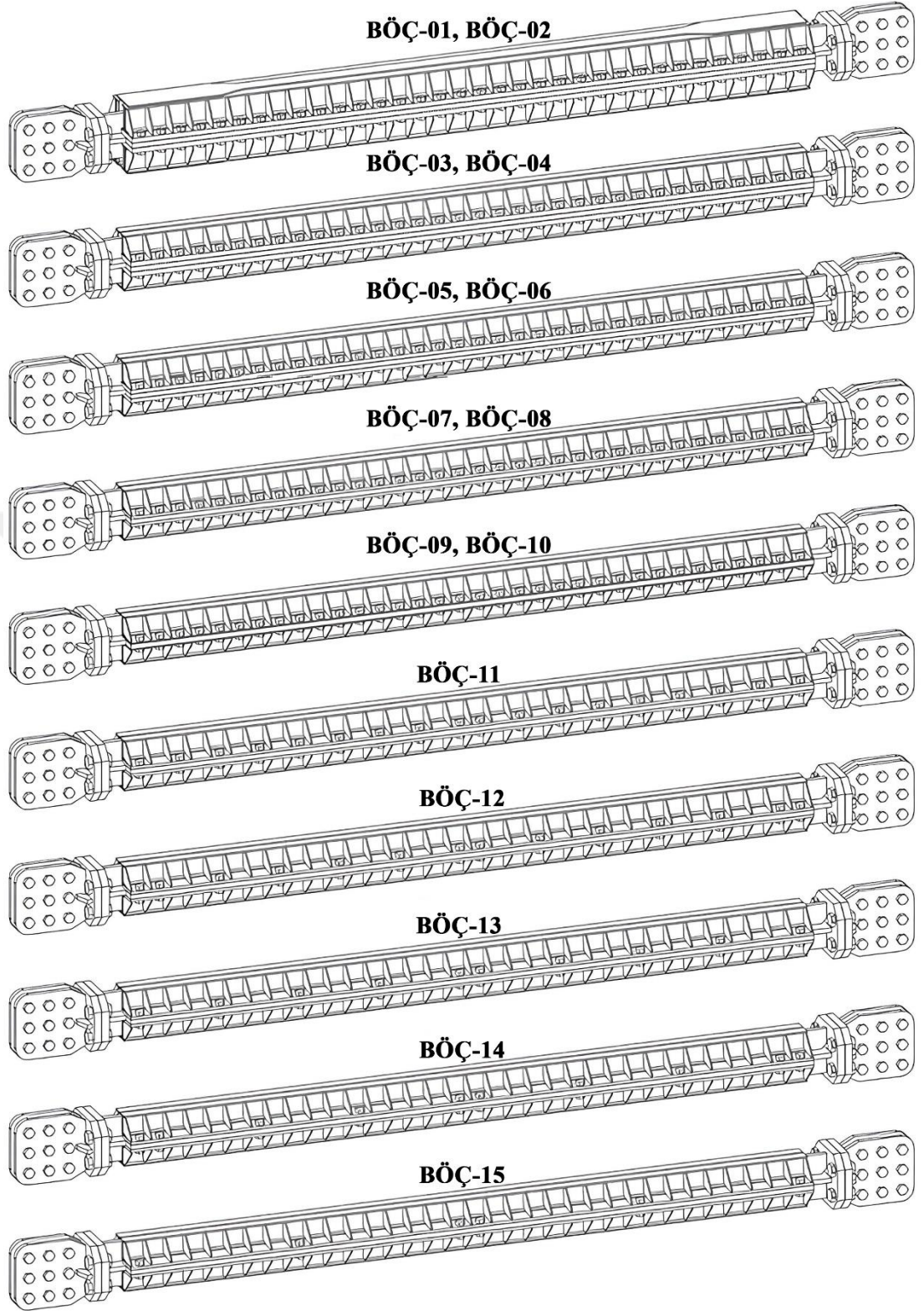
3.1.2.3.Burkulmayı Önleyen Mekanizma

Çalışmada kullanılan burkulmayı önleyici mekanizma (BÖM), dolgu malzemesi içermeyen ve tamamen çelik elemanlardan imal edilmiş bir sistemdir. BÖM, aralarına bir ayırıcı plaka konularak M20 bulonlarla birleştirilen simetrik iki yarıdan (üst ve alt) oluşmaktadır. Bu çalışmada, tekrarlı yükler altında yeniden kullanılabilirliklerini test etmek amacıyla 5 farklı BÖM konfigürasyonu incelenmiştir.

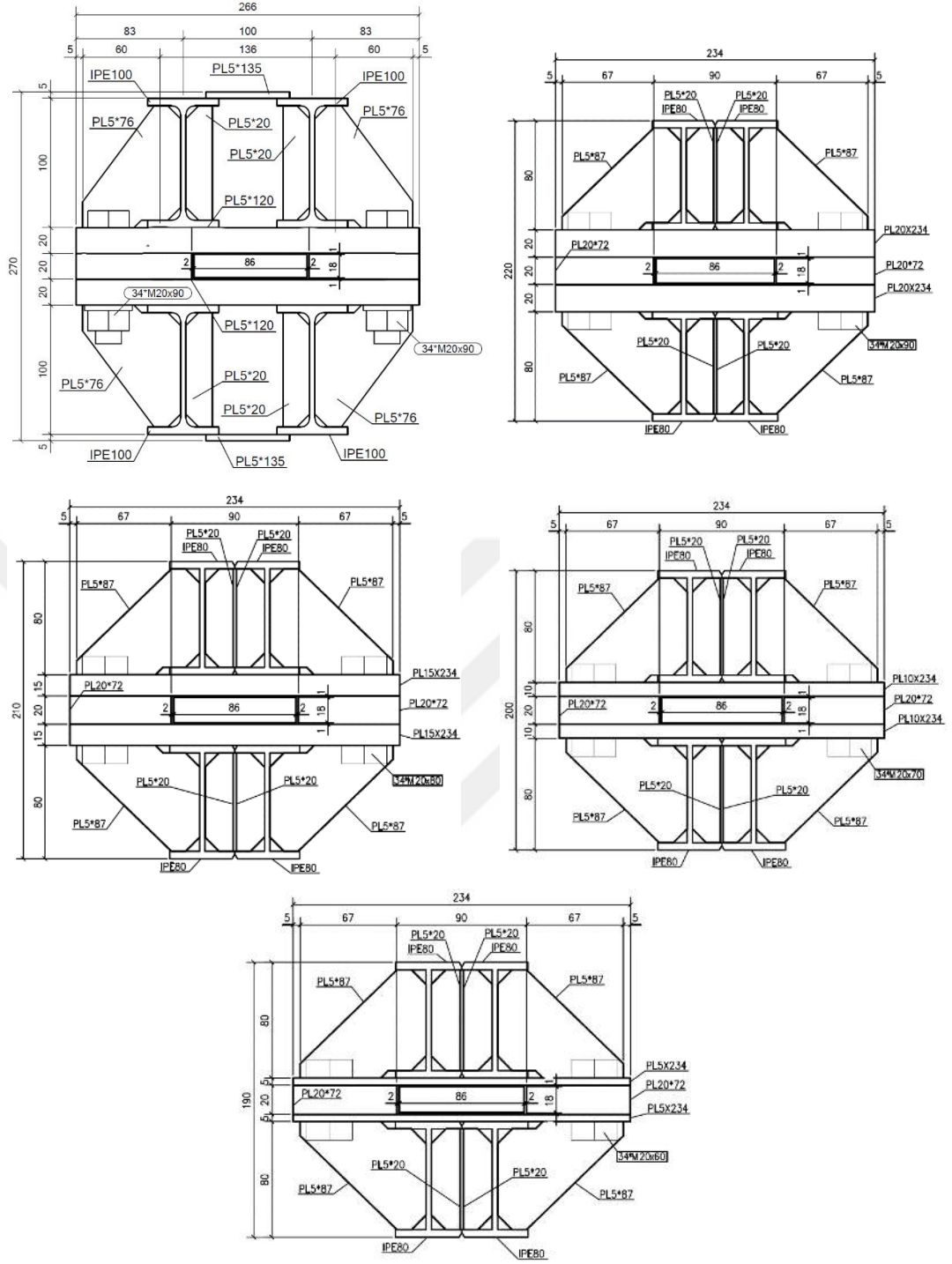
Tüm BÖM'lerin ana iskeleti 2730 mm uzunluğunda IPE80 ve IPE100 profillerinden, berkitmeleri ise 80 mm aralıklarla teşkil edilmiştir. Üst bağlantı BÖM-1'de 5 mm'lik plaka ile kaynatılırken, diğerlerinde sürekli flanş kaynağı ile birleştirilmiştir. İncelenen konfigürasyonlar arasındaki diğer değişkenler ise taban plakası kalınlığı ve ikinci aşamadaki BÖM'leri birleştiren M20 bulonların aralıklarıdır. Taban plakası için 5, 10, 15 ve 20 mm olmak üzere farklı kalınlıklar kullanılmıştır. Bu değişken özelliklerin tamamı Tablo 3.4'te ve izometrik görünüşleri Şekil 3.9'da sunulmuştur. BÖM enkesitlerinin imalat resim görünüşleri sırasıyla Şekil 3.10, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de verilmiştir.

Tablo 3.4 Numune bazında BÖM ve bulon değişken özellikleri

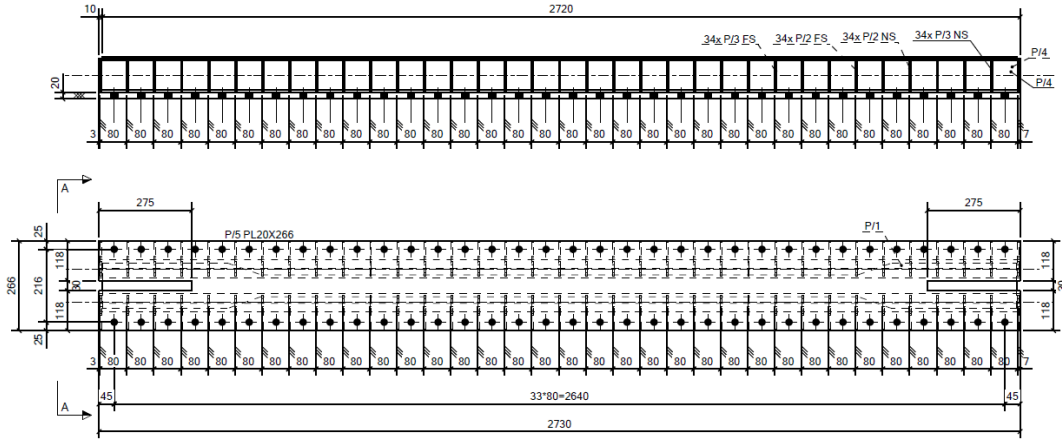
Numune No	BÖM	Profil	Taban Plakası Kalınlığı (mm)	Genişlik (mm)	Uzunluk (mm)	Bulonlar arası mesafe (mm)
BÖÇ-01	BÖM-1	IPE 100	20	266	2730	80
BÖÇ-02						
BÖÇ-03	BÖM-2	IPE 80	20	234		
BÖÇ-04						
BÖÇ-05	BÖM-3	IPE 80	15			
BÖÇ-06						
BÖÇ-07	BÖM-4	IPE 80	10			
BÖÇ-08						
BÖÇ-09	BÖM-5	IPE 80	5			
BÖÇ-10						
BÖÇ-11	BÖM-4	IPE 80	10			160
BÖÇ-12						240
BÖÇ-13						320
BÖÇ-14						400
BÖÇ-15						640



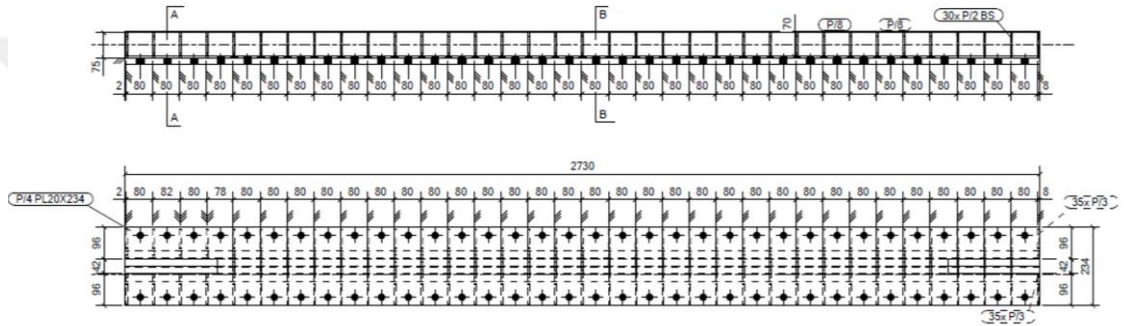
Şekil 3.9 BÖM ve bulon değişkenlerinin izometrik görünüşleri



Şekil 3.10 Sırasıyla BÖM-1, BÖM-2, BÖM-3, BÖM-4 ve BÖM-5 enkesitlerinin imalat resimleri



Şekil 3.11 BÖM-1 imalat resimleri



Şekil 3.12 BÖM-2 ~ BÖM-5 imalat resimleri

BÖM'lere ait geometrik özellikler ile mekanik dayanım parametreleri Tablo 3.5'te bir araya getirilmiştir. Bu tabloda tasarımların toplam ağırlıkları, enkesit alanları, asal eksenlere göre atalet momentleri, atalet yarıçapları, elastik burkulma dayanımları (P_{cr}) ve P_{cr}/P_{ysc} oranları yer almaktadır. Tabloda sunulan elastik burkulma dayanımı (P_{cr}), Denklem (3.2) kullanılarak belirlenmiştir.

$$P_{cr} = A_g \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{i_{min}} \right)^2} \quad (3.2)$$

Denklemden kullanılan terimlerden E elastisite modülünü (200 GPa), A_g BÖM'ün enkesit alanını, KL burkulma boyunu ve i_{min} ise en küçük atalet yarıçapını ifade etmektedir.

Tablo 3.5 BÖÇ deney numunelerinde kullanılan BÖM'lerin dayanım hesapları

Numune No	Ağırlık (kg)	Enkesit Alanı (cm²)	Atalet Momenti (cm⁴)		Atalet Yarıçapı (cm)		P_{cr} (kN)	P_{ysc} (kN)	P_{cr}/P_{ysc}
			I_x	I_y	i_x	i_y			
BÖÇ-01	437	180	4932	10108	5.23	7.49	13040	509	25.6
BÖÇ-02									
BÖÇ-03	345	152	2182	6476	3.79	6.52	5783		11.4
BÖÇ-04									
BÖÇ-05	297	129	1804	5408	3.74	6.48	4779		9.4
BÖÇ-06									
BÖÇ-07	249	105	1499	4341	3.77	6.42	3953		7.8
BÖÇ-08									
BÖÇ-09	200	82	1256	3273	3.92	6.32	3337		6.6
BÖÇ-10									
BÖÇ-11	249	105	1499	4341	3.77	6.42	3953		7.8
BÖÇ-12									
BÖÇ-13									
BÖÇ-14									
BÖÇ-15									

3.1.2.4. Ayırıcı Malzeme

Çekirdek plakası ile burkulmayı önleyici mekanizma (BÖM) arasındaki sürtünmeyi en aza indirmek amacıyla, ayırıcı malzeme olarak 0.5 mm kalınlığında teflon plaka kullanılmıştır. Bu plaka, burkulma anında temasın beklendiği kritik bölge olan çekirdek plakası ile taban plakası arasına konumlandırılmıştır. Deneylerde her testin ardından hasar gören teflon plaka yenisiyle değiştirilmiştir. Teflon plakanın deney öncesi ve sonrası durumunu gösteren görseller Şekil 3.13'te sunulmuştur.

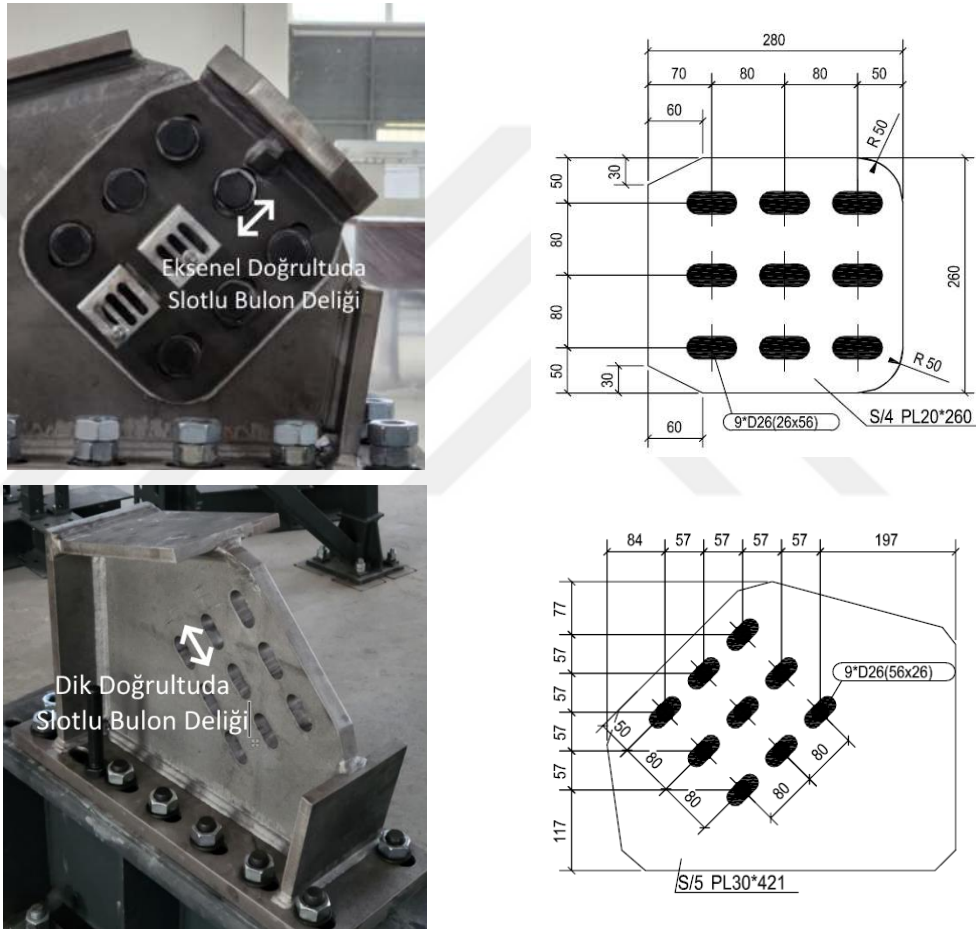


Şekil 3.13 Teflon plakanın deney öncesi ve sonrası durumunu gösteren görseller

Ayrıca her deney sonrası temas eden ve hasar alan yüzeyler avuç içi taşlama makinası ve 80-120-200-400 kum kağıt zımpara yardımıyla pürüzler giderilmiştir.

3.1.2.5. Düğüm Noktası Birleşim Detayı

BÖÇ elemanlarının çerçeve sistemlerine montajı; pimli, bulonlu veya kaynaklı gibi birleşimlerle sağlanabilir. Pimli yani mafsallı birleşimler sadece eksenel yük aktarırken, bulonlu ve kaynaklı birleşimler moment de transfer edebilmektedir. Bu tez kapsamındaki tüm deney numunelerinde, moment aktarımına izin veren bulonlu rijit birleşim detayı kullanılmıştır.



Şekil 3.14 Deneylerde kullanılan birleşim detayı

Kullanılan birleşim detayı, Şekil 3.14'te görüldüğü gibi, deprem sonrası değiştirilebilirliği artırmak üzere tasarlanmıştır. Bu amaçla, hem birleşim plakasında (çapraz eksenine paralel) hem de guse plakasında (çapraz eksenine dik) 30 mm genişliğinde slot oluşturulmuştur. Böylece eleman, kalıcı deformasyonlar sonrasında dahi pratik bir şekilde yenilenebilir. Birleşim sürtünme esasına göre tasarlanmış olup, gerekli görülen 9 adet M24 bulon, kalibrasyonu yapılmış torkmetre aracılığıyla sıkılmıştır.

3.1.2.6.Ölçüm Sistemleri ve Yöntemleri

Test edilen BÖÇ elemanlarının eksenel deformasyonlarını ölçmek amacıyla, Şekil 3.15'te görüldüğü gibi elemanın iki yanına LVDT'ler(Linear Variable Differential Transformer) yerleştirilmiştir. Olası dönme etkilerinden kaynaklanacak ölçüm hatalarını bertaraf etmek için, deplasman kontrollü deneyler boyunca bu iki LVDT'nin okumalarının ortalaması esas alınmıştır.

Birleşimin sürtünme esaslı ve slotlu yapısı, deney sırasında oluşabilecek rölatif kaymaların da ölçülmesini gerekli kılmıştır. Bu kaymayı tespit edebilmek için, birincil LVDT'lerin aksine (alın levhasına bağlı), doğrudan birleşim plakalarına monte edilen ikincil bir LVDT kullanılmıştır. Böylece iki farklı LVDT grubundan alınan okumalar arasındaki fark hesaplanarak bağlantıdaki net kayma miktarı izlenmiştir. Ayrıca, sisteme uygulanan yatay yük piston ucundaki 2000 kN'luk yük hücresi ile ölçülürken, genel yatay deplasman ise pistonun gömülü pozisyon sensörü ile takip edilmiştir.



Şekil 3.15 Sırasıyla eksenel deformasyonu ve kayma miktarını ölçmek için kullanılan LVDT'ler

3.1.2.7.Yükleme Protokolü

Deneylerde, AISC 341-22 standardında tanımlanan ve Tablo 3.6’da verilen yüklem protokolünün değiştirilmiş bir versiyonu kullanılmıştır. Bu yüklem protokolü, çalışma kapsamında YP-1 olarak adlandırılmıştır.

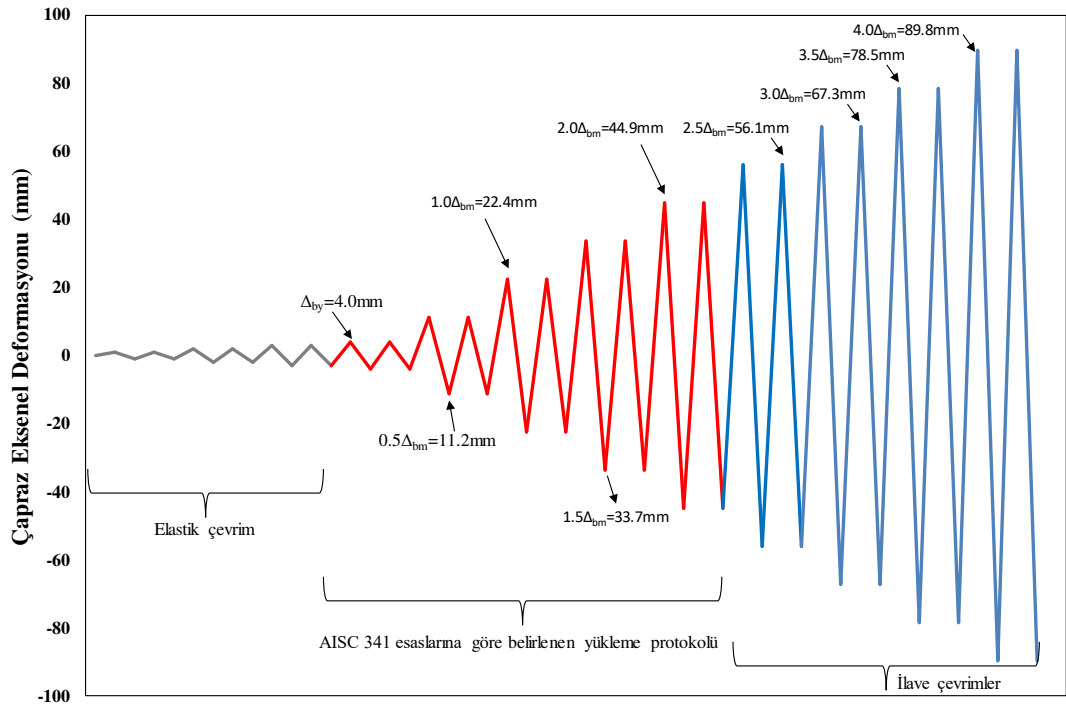
YP-1 protokolü, $2.00 \times \Delta_{bm}$ tepe deformasyonuna kadar olan adımlarda standart AISC 341-22 protokolü ile birebir aynıdır. Bu noktanın ardından ise numunelerin daha büyük deplasman talepleri altındaki performansını ve nihai deformasyon kapasitesini belirlemek amacıyla, standart protokole ek olarak sırasıyla 2.50, 3.00, 3.50 ve $4.00 \times \Delta_{bm}$ seviyelerinde ikişer ilave yüklem çevrimi uygulanmıştır.

Tablo 3.6 AISC 341-22 standardında tanımlanan yüklem protokolü

Çevrim adedi	Eksenel deformasyon
2	Δ_{by} ’e karşılık gelen eksenel deformasyon
2	$0.50 \Delta_{bm}$ ’e karşılık gelen eksenel deformasyon
2	$1.00 \Delta_{bm}$ ’e karşılık gelen eksenel deformasyon
2	$1.50 \Delta_{bm}$ ’e karşılık gelen eksenel deformasyon
2	$2.00 \Delta_{bm}$ ’e karşılık gelen eksenel deformasyon
4	$1.50 \Delta_{bm}$ ’e karşılık gelen eksenel deformasyon

Yüklem protokolünde yer alan Δ_{bt} ve Δ_{bm} terimleri, sırasıyla BÖÇ elemanının akma ve tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonlarını ifade etmektedir. AISC 341-22 şartnamesi, Δ_{bm} değerinin en az %1’lik kat ötelenmesine tekabül eden deformasyon olmasını gerektirmektedir.

Literatürde Tremblay vd. (2006), Δ_{bm} değerinin çapraz açısı, çekirdek plaka uzunluk oranı ve çerçeve rijitliği gibi birçok faktörden etkilendiğini belirtmiştir. Aynı çalışma, aşırı kısa çekirdek plakalar haricinde, birim şekil değiştirme talebinin genellikle %1-%2 aralığında kaldığını ortaya koymaktadır. Bu bilgiler ışığında ve Bozkurt ve Topkaya’nın (2016) çalışmasındaki yaklaşıma benzer şekilde, bu tezdeki deneyler için Δ_{bm} deformasyon değeri, akma bölgesi uzunluğunun %1’ine eşdeğer olan 22.44 mm olarak belirlenmiştir. Uygulanan YP-1 yüklem protokolünün grafiksel gösterimi Şekil 3.16’da sunulmuştur.



Şekil 3.16 YP-1 yükleme protokolünün grafiksel gösterimi

3.1.3. Deney Kurulumu

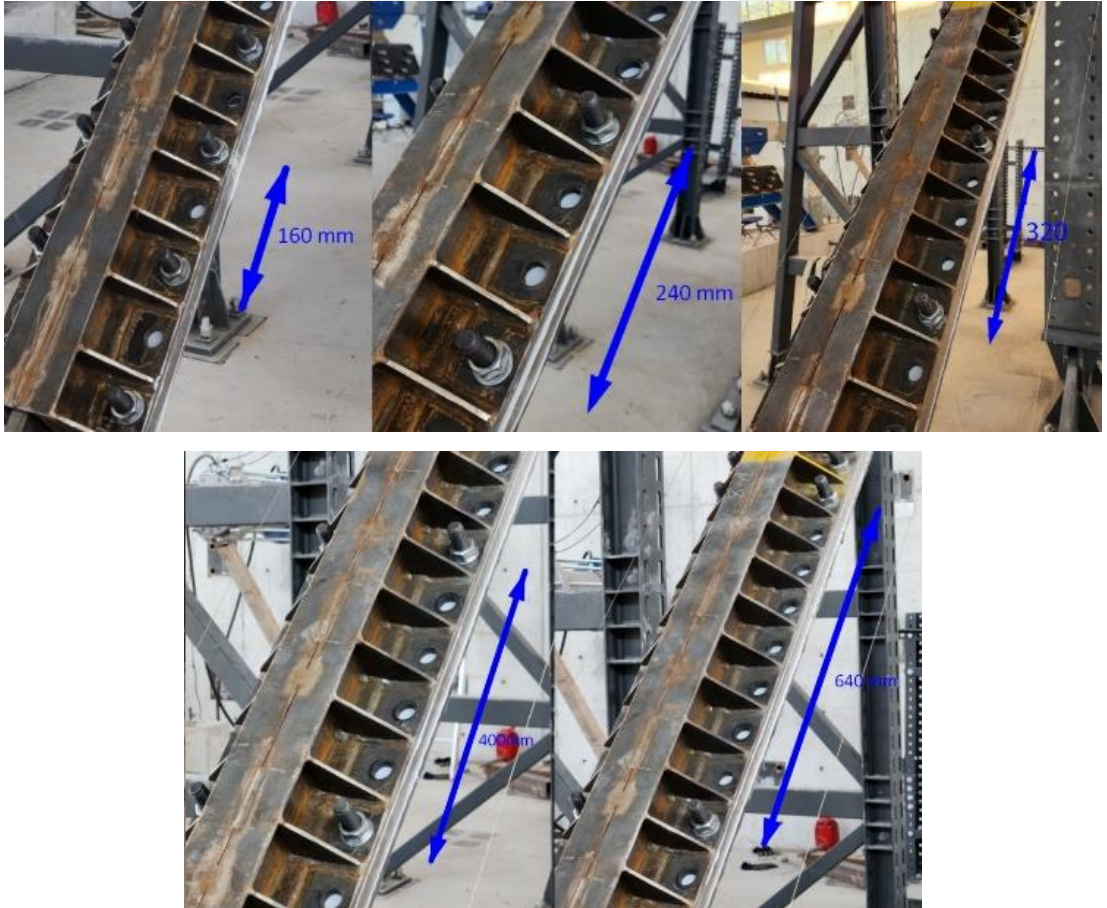
Tasarım parametreleri Bölüm 3.1.2'de açıklanan deney numuneleri, Bölüm 3.1.1'de tanıtilan test düzeneğine monte edilmiştir. Numunenin kurulum sonrası genel görünüşü ve detayları Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de sunulmaktadır. Ayrıca BÖÇ-11 ile BÖÇ-15 arası numunelerde uygulanan farklı bulon aralıklarının detayları Şekil 3.19'da fotoğraf olarak sunulmuştur.



Şekil 3.17 Numunelerin deney düzeneği içerisindeki tipik görünüşü-1



Şekil 3.18 Numunelerin deney düzeneği içerisindeki tipik görünüşü-2



Şekil 3.19 Farklı bulon aralıklarının detayları

3.2.Nümerik Araştırmalar

Sonlu elemanlar tabanlı nümerik çalışmalar, ABAQUS yazılımı kullanılarak çapraz seviyesinde gerçekleştirilmiştir. Bu analizler, deneysel olarak çevrimsel yük altındaki davranışını bilgisayar ortamında simüle etmeyi ve optimum BÖM tasarımını araştırmayı amaçlamıştır. Çalışmada SI(mm) birim sistemi kullanılmıştır. SI(mm) birim sistemine göre kütle birimi ton, uzunluk birimi mm, gerilme birimi MPa, kuvvet birimi N, zaman birimi saniye ve enerji birimi ise N.mm dir

3.2.1. Deneysel Davranışının Nümerik Kalibrasyonu

Nümerik analizler, deneysel programdaki her iki ana grubu da (BÖÇ-01~BÖÇ-10 ve BÖÇ-11~BÖÇ-15) kapsamaktadır. İlk grupta (BÖÇ-01~BÖÇ-10), önerilen BÖM tasarımların histeretik davranışa etkisinin minimum olduğu saptandığından, bu gruba temsilen yalnızca BÖÇ-08 numunesi modellenmiştir.

BÖÇ-08 numunesindeki burkulmayı önleme mekanizması, aynı zamanda BÖÇ-11~BÖÇ-15 grubunda da kullanılan tasarım olduğundan, ikinci grubun modellenmesinde de bu tasarım esas alınmıştır. Bu yaklaşım, modellemeyi basitleştirerek yalnızca bulon sayısı/aralığının değiştirilmesi ile modelleme kolaylığı ve hız sağlamıştır. Modellenen numunelerin teknik özellikleri Tablo 3.7’de sunulmaktadır.

Tablo 3.7 Deneysel davranışı simüle etmek için modellenen BÖÇ numuneleri

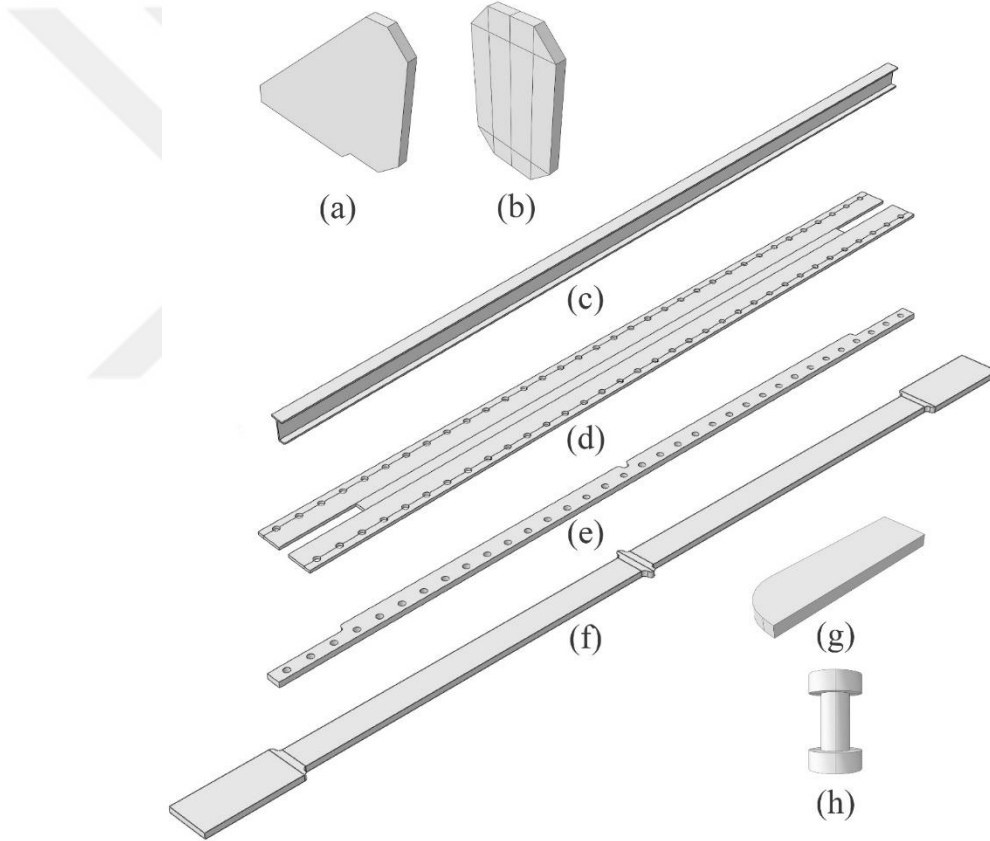
Numune Adı	Malzeme Modeli	Bulon	Bulon Aralığı (mm)
BÖÇ-08	Malzeme-1	2x34 M20	80
BÖÇ-11	Malzeme-1	2x18 M20	160
BÖÇ-12	Malzeme-1	2x14 M20	240
BÖÇ-13	Malzeme-1	2x10 M20	320
BÖÇ-14	Malzeme-2	2x10 M20	400
BÖÇ-15	Malzeme-3	2x6 M20	640

Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması, ABAQUS yazılımındaki standart modül sırası takip edilerek gerçekleştirilmiştir.

İlk olarak, 'Part' modülünde, modelin geometrik bileşenleri tanımlanmıştır. Bulon, burkulmayı önleyici mekanizma, ayırıcı kılavuz plakası ve çekirdek plakası,

3 boyutlu (3D) deforme olabilen katı elemanlar kullanılarak oluşturulmuştur. Bu bileşenlerin her birinin modeli Şekil 3.20’de sunulmuştur.

Bir sonraki aşama olan 'Property' modülünde ise malzeme tanımlamaları ve kesit atamaları yapılmıştır. Çekirdek plakasının karmaşık çevrimsel davranışını yansıtabilmek için, Chaboche (1986, 1989) tarafından geliştirilen ve iteratif yöntemle kalibre edilen doğrusal olmayan kinematik-izotropik pekleşme modeli tercih edilmiştir. Diğer tüm bileşenler için ise doğrusal olmayan bi-lineer izotropik pekleşme modeli kullanılmıştır. Analizlerde kullanılan malzeme özelliklerine ait parametreler Tablo 3.8 ve Tablo 3.9’da yer almaktadır.



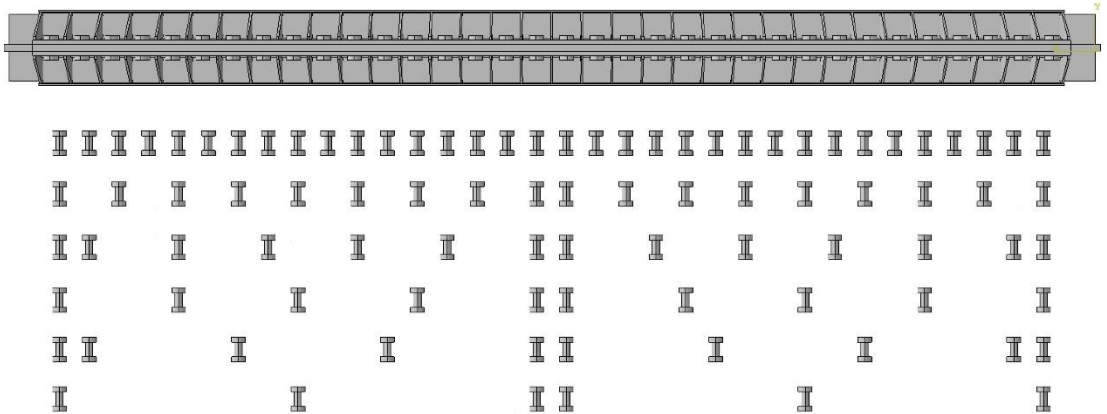
Şekil 3.20 a-BÖM dış berkitme plakası, b- BÖM iç berkitme plakası, c- IPE80 profil, d- BÖM taban plakası, e- ayırıcı kılavuz plakası, f- değişken geometrili çekirdek plakası, g- çekirdek berkitme plakası, h- M20 8.8 Bulon

Tablo 3.8 Doğrusal olmayan kinematik-izotropik pekleşme modeli (Chaboche)

Çek. Malzeme-1	Çek. Malzeme-2	Çek. Malzeme-3
*Material, name=Cekirdek-1 *Density 7.85e-09, *Elastic 196000., 0.3 *Plastic, hardening=COMBINED, datatype=PARAMETERS, number backstresses=5 206., 89600., 2600.,29600., 480.,5515., 165., 987.50, 6.25, 260., 1. *Cyclic Hardening, parameters 206.,86., 1.8	*Material, name=Cekirdek-2 *Density 7.85e-09, *Elastic 196000., 0.3 *Plastic, hardening=COMBINED, datatype=PARAMETERS, number backstresses=5 190.,40600., 1150.,20050., 440., 4220., 107., 750., 3.75, 300., 1. *Cyclic Hardening, parameters 190.,100., 2.5	*Material, name=Cekirdek-3 *Density 7.85e-09, *Elastic 196000., 0.3 *Plastic, hardening=COMBINED, datatype=PARAMETERS, number backstresses=5 206., 89600., 2600.,29600., 480.,5515., 165., 987.50, 6.25, 260., 1. *Cyclic Hardening, parameters 206.,77., 1.6

Tablo 3.9 Doğrusal olmayan bi-lineer izotropik pekleşme modeli

M20 – 8.8 Bulon	BÖM ve Ayırıcı Kılavuz Plakası
*Material, name=Bulon *Density 7.85e-09, *Elastic 200000., 0.3 *Plastic 640., 0., 800., 0.178	*Material, name=Plakalar *Density 7.85e-09, *Elastic 200000., 0.3 *Plastic 327., 0., 607.5, 0.2985



Şekil 3.21 “Assembly” modülünde montajı tamamlanmış tipik BÖÇ numunesi ve sırasıyla 80mm, 160mm, 240mm, 320mm, 400mm ve 640mm aralıklarla bulon yerleşim detayları

Geometri ve malzeme tanımlamalarını takiben, "Assembly" modülüne geçilmiştir. Bu aşamada, 'Part' modülünde oluşturulan tüm bileşenler bir araya getirilerek modelin bütünleşik montajı tamamlanmıştır. Şekil 3.21, montajı tamamlanmış tipik bir BÖÇ numunesinin sonlu elemanlar modelini ve bulon yerleşim detaylarını göstermektedir.

Modelin analiz adımlarının tanımlandığı "Step" modülünde, çözümleyici seçimi yapılmıştır. Modelin; bulonlar, burkulmayı önleyen mekanizması, ayırıcı kılavuz plakalar ve çekirdek plakası arasında çok sayıda karmaşık temas yüzeyi içermesi nedeniyle, 'Abaqus/Standard' çözümleyicisinin yakınsama sorunlarına yol açacağı öngörülmüştür. Bu potansiyel problemin önüne geçmek amacıyla, analiz yöntemi olarak dinamik "Abaqus/Explicit" çözümleyicisi tercih edilmiştir. Ayrıca bu modülde, analiz süresince kaydedilmesi istenen çıktı talepleri de tanımlanmıştır.

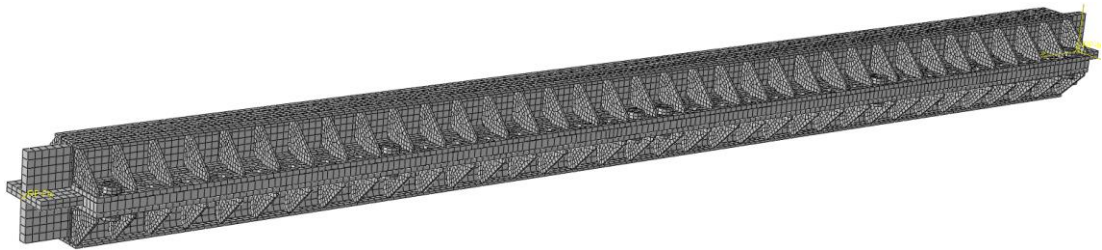
Bir sonraki aşama olan "Interaction" (Etkileşim) modülünde, modeli oluşturan farklı parçalar arasındaki temas ve bağlantı koşulları tanımlanmıştır. BÖM'de kaynakla birleştirilen sürekli parçalar, birbirinden ayrılmaz bir bütün olarak çalışması için "Tie" kısıtlaması ile tanımlanmıştır. Diğer tüm temas yüzeyleri için ise, yüzeylerin birbirinin içinden geçmesini önleyen "Hard Contact" (sert temas) algoritması ve bu yüzeyler arasındaki sürtünme davranışını simüle etmek için "Penalty" yöntemi kullanılmıştır. Tüm bileşenler arasında tanımlanan etkileşim tiplerinin özeti Tablo 3.10'da sunulmuştur.

Analiz ayarlarının son adımı olan "Load" modülünde, modelin sınır koşulları ve yüklemeleri tanımlanmıştır. Deneysel programı yansıtacak şekilde, numunenin bir ucu tüm serbestlikler kısıtlanarak sabit mesnet olarak tanımlanmış, diğer ucu ise yüklemenin uygulanacağı serbest uç olarak bırakılmıştır. Yükleme, 1 mm/saniye hızında deplasman kontrollü olarak uygulanmıştır. Deplasman kontrollü yüklemeye geçilmeden önce, modelde bulon öngerme kuvvetlerini ve yer çekimi etkilerini uygulamak amacıyla 5 saniyelik bir ön yükleme adımı tanımlanmıştır.

Tablo 3.10 Bileşenler arasında tanımlanan etkileşim tipleri

Parça Etiketi	BÖM Dış Berkit. Plakası	BÖM İç Berkit. Plakası	IPE80 Profil	BÖM Taban Plakası	Ayırıcı Kılavuz Plakası	Çekirdek Plakası	Çekirdek Bekitme Plakası	M20 Bulon
BÖM Dış Berkitme Plakası	-	-	Tie	Tie	-	-	-	-
BÖM İç Berkitme Plakası	-	-	Tie	-	-	-	-	-
IPE80 Profil	Tie	Tie	Tie	Tie	-	-	-	-
BÖM Taban Plakası	Tie	-	Tie	-	HC+F	HC+F	HC+F	HC+F
Ayırıcı Kılavuz Plakası	-	-	-	HC+F	-	HC+F	-	HC+F
Çekirdek Plakası	-	-	-	HC+F	HC+F	-	Tie	-
Çekirdek Bekitme Plakası	-	-	-	HC+F	-	Tie	-	-
M20 Bulon	-	-	-	HC+F	HC+F	-	-	-
Tie: Kaynaklı birleşimler, HC+F: Sert cisim teması ve sürtünme.								

Sonlu eleman ağ yapısı "Mesh" modülünde tanımlanmıştır. Tüm bileşenler için, 8 düğüm noktalı, 3 boyutlu bir katı eleman olan ve azaltılmış integrasyon tekniğini kullanan "C3D8R" eleman tipi tercih edilmiştir. Modelde kullanılan sonlu eleman ağı oluşturma teknikleri ve eleman sayıları Tablo 3.11'de detaylandırılmıştır. Tipik bir sonlu eleman ağı görünümü Şekil 3.22'de sunulurken, analizlerdeki toplam eleman sayıları Tablo 3.12'de özetlenmiştir. Ayrıca Şekil 3.23'te sonlu eleman ağ yapısı boyutunun/sayısının analiz süresi ve deneysel-nümerik hata üzerine etkisi ilişki verilmiştir



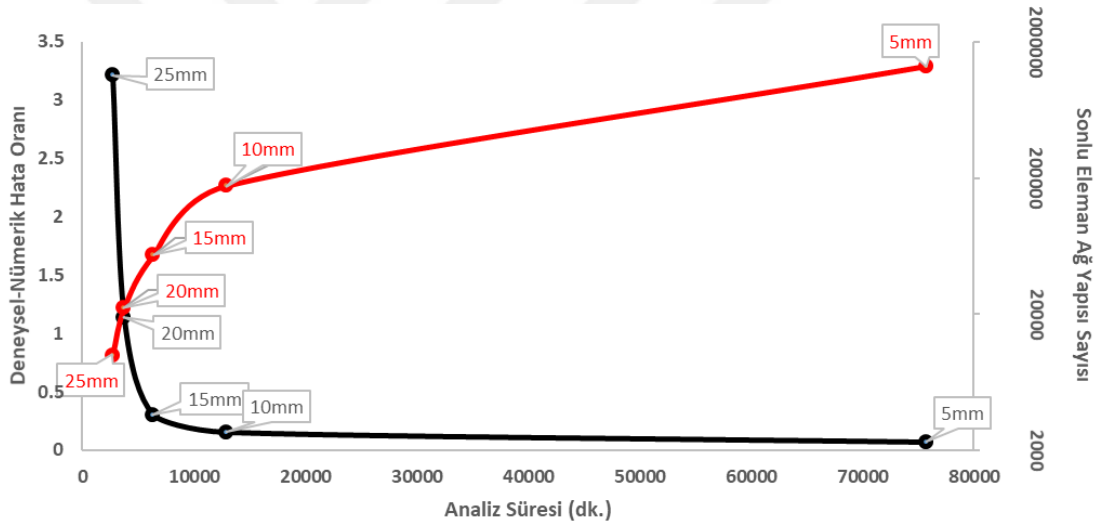
Şekil 3.22 Tipik sonlu eleman ağ yapısı

Tablo 3.11 Sonlu eleman ağ yapısı boyutları, teknikleri ve sayıları

Parça Etiketi	Mesh Tekniği	Mesh Boyutu	Parça Mesh Sayısı	Parça Adedi	Toplam Mesh
BÖM DışBer.Pla.	Sweep	10	58	140	8120
BÖM İç Ber.Pla.	Structured	10	100	54	5400
IPE 80 Profil	Sweep	15	2656	4	10624
BÖM Taban Pla.	Sweep	15	4254	2	8508
Ayrıcı Kıl. Pla.	Sweep	15	1324	2	2648
Çekirdek Pla.	Sweep	15	3034	1	3034
Çek. Berk. Pla.	Sweep	15	99	4	396
M20-Bulon	Swe. ve Stru.	7.5	228	Değişken	-

Tablo 3.12 Analizlerdeki toplam sonlu eleman ağ yapısı sayıları

BRB-08	BRB-11	BRB-12	BRB-13	BRB-14	BRB-15
54234	46938	45114	43290	43290	41466



Şekil 3.23 Sonlu eleman ağ yapısı boyutunun/sayısının analiz süresi ve deneysel-nümerik hata üzerine etkisi

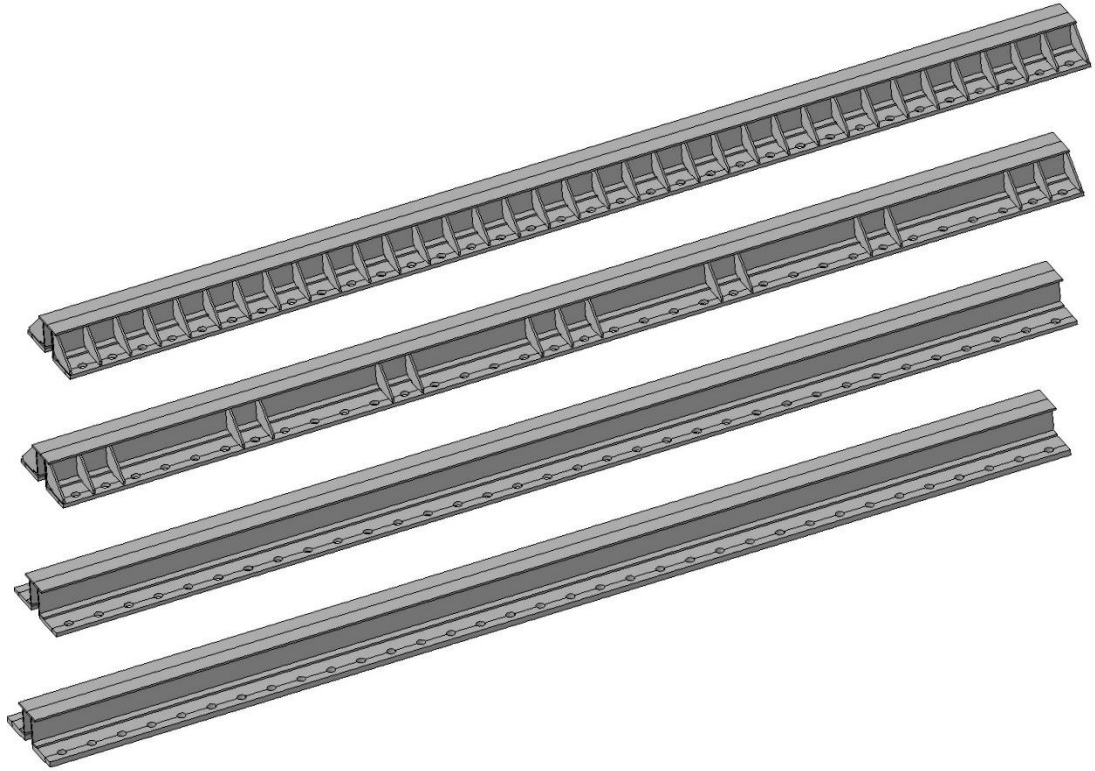
Son olarak, "Job" modülünde analiz görevi tanımlanmıştır. Analiz süresini kısaltarak zamandan kazanç sağlamak amacıyla, çoklu işlemci yani paralel işlem desteği aktive edilmiş ve simülasyon bu ayarlar altında çalıştırılmıştır.

3.2.2. Burkulmayı Önleyen Mekanizma Numerik Optimizasyonu

Burkulmayı önleyen mekanizmanın (BÖM) nümerik optimizasyonu amacıyla, 24 farklı modelden oluşan bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Bu nümerik çalışmalarda deneysel programda hasar alarak açılan BÖÇ-25 numunesinin davranışına göre kalibre edilmiş malzeme modeli kullanılmıştır.

Optimizasyon analizlerinde üç temel parametre değişken olarak incelenmiştir. Bunlar sırasıyla berkitme plakalarının yerleşim tipleri, bulon aralığı ve taban plakası kalınlığıdır. Bu üç değişkenin etkisine net bir şekilde odaklanabilmek için, ayırıcı kılavuz plakası ve taban plakasındaki delik konumları gibi diğer tüm geometrik özellikler sabit tutulmuştur.

Değişken parametreler kapsamında; 6 farklı bulon aralığı (80, 160, 240, 320, 400 ve 640 mm), 2 farklı taban plakası kalınlığı (10 ve 15mm) ve çeşitli berkitme tiplerini içeren toplam 24 farklı BÖM konfigürasyonu modellenmiştir. Şekil 3.24'te, bu tasarımlardan 400 mm bulon aralığına sahip olan örnek tipler sunulmuştur. Modellerin tamamı, deneysel çalışmada kullanılan çevrimsel yükleme protokolüne (YP-1) tabi tutulmuştur.



Şekil 3.24 400 mm bulon aralığı için değişkenler sırasıyla: Tamamen Berkitme Bulunması-10mm Taban Plakası, Bulon Çevresi Berkitme Bulunması-10mm Taban Plakası, Berkitmesiz-10mm Taban Plakası, Berkitmesiz-15mm Taban Plakası

Son olarak, analizlerde yakınsama problemlerinin önüne geçmek ve işlem yükünü azaltarak hesaplama süresini kısaltmak amacıyla, malzeme modelindeki kopma kriterleri bu optimizasyon çalışmalarında göz önüne alınmamıştır.

4. BULGULAR

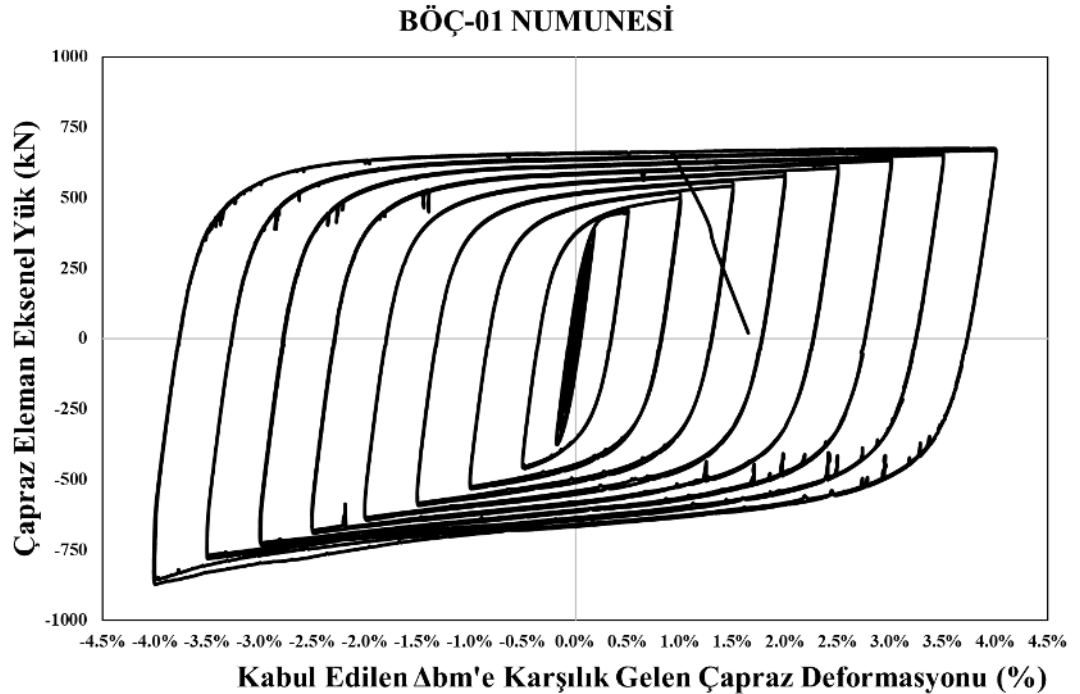
Bu bölüm deneysel ve numerik çalışma sonucunda elde edilen bulguları içermektedir. Deneysel ve nümerik çalışma sonucunda elde edilen bulgular alt başlıklar halinde sunulmuştur.

4.1.Deneysel Bulgular

Deneysel çalışmanın amacı değiştirilebilir çekirdek plakası tasarımına sahip enerji sönmüleme kapasitesi en yüksek ve en hafif BÖÇ elemanının geliştirilmesidir. Bu amaç kapsamında 15 adet deney numunesine Bölüm 3.1.2.7’te detayları verilmiş olan YP-1 yükleme protokolü deplasman kontrollü olacak şekilde etkilmiştir. Test edilen numunelere ait bulgular alt başlıklarda sunulmuştur.

4.1.1. BÖÇ-01

Çekirdek plakasının burkulmasını BÖM-1 ile önleendiği BÖÇ-01 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.1’de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1 BÖÇ-01 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-01 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-01 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine

karşılık gelen çapraz deformasyon (Δ_{bm}) seviyesinde, 2 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 3. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.1 BÖÇ-01 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	387	375	0.967	0.883	0.854	3335	3335	35	0
Δ_{by}	4.0	387	372	0.960	0.883	0.847	3372	6707	35	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	453	1.013	1.018	1.031	14077	20784	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	460	461	1.003	1.047	1.050	14706	35490	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	498	525	1.054	1.134	1.195	35533	71023	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	520	532	1.022	1.185	1.211	36955	107978	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	540	584	1.081	1.230	1.330	60969	168947	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	559	593	1.061	1.272	1.350	62680	231627	51	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	576	635	1.103	1.311	1.446	88806	320434	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	591	643	1.089	1.346	1.466	90856	411290	52	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	605	679	1.121	1.379	1.546	120311	531601	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	619	689	1.112	1.411	1.569	122299	653899	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	631	724	1.148	1.437	1.649	153150	807049	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	642	734	1.143	1.462	1.672	155602	962651	53	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	651	768	1.180	1.482	1.749	187213	1149864	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	660	781	1.182	1.504	1.778	190539	1340403	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	668	854	1.280	1.520	1.946	224921	1565324	52	658
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	675	871	1.291	1.536	1.984	246955	1812279	57	744

Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon

Tablo 4.1'te görüldüğü üzere, BÖÇ-01 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.2'de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.3'te sunulmuştur.

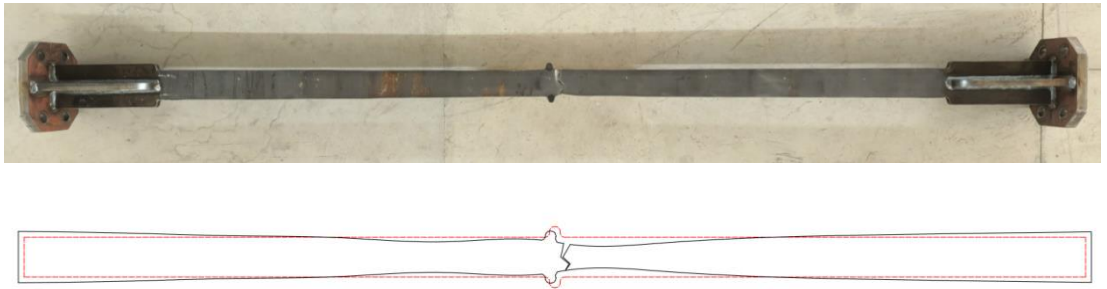


Şekil 4.2 BÖÇ-01 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.3 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.4'te, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.2'de sunulmuştur.



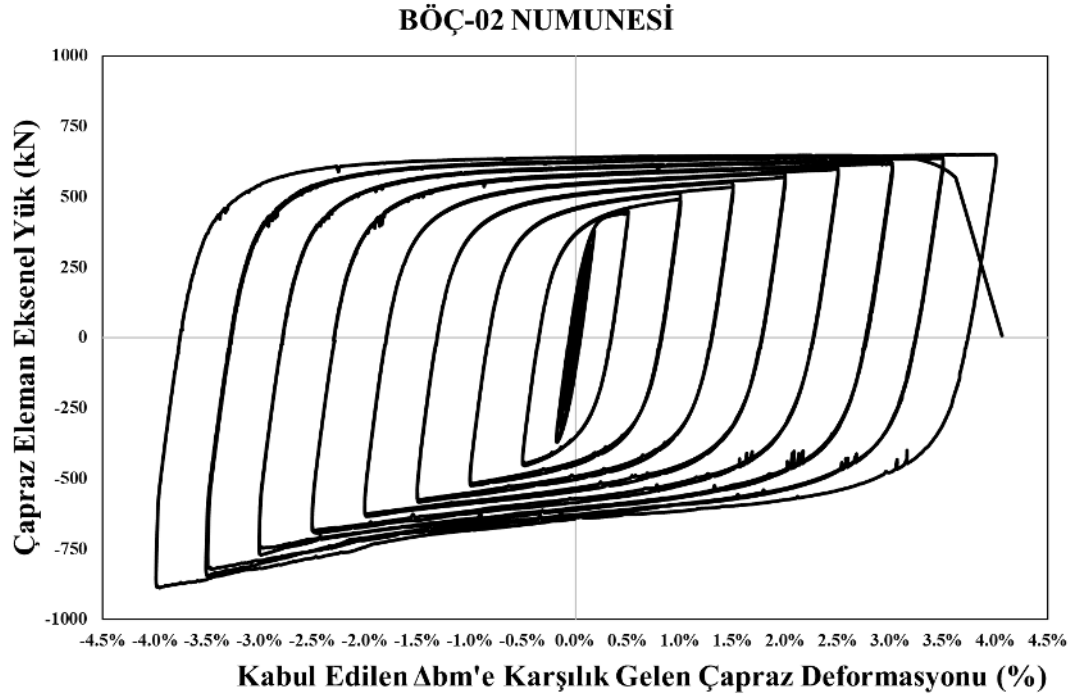
Şekil 4.4 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.2 BÖÇ-01 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89,5	6	1395	81,06
1	233	88,37	7	1625	84,6
2	466	86,93	8	1855	87,01
3	699	84,8	9	2085	88,5
4	932	79,85	10	2315	89,9
5	1165	81,4	K*	1135	76,2

4.1.2. BÖÇ-02

Kılıfın tekrar kullanılabilirliğinin kanıtlanması için BÖÇ-01 numunesi ile aynı kılıf mekanizmasına sahip BÖÇ-02 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.5'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.3'te verilmiştir.



Şekil 4.5 BÖÇ-02 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-02 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-02 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.3 BÖÇ-02 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	379	362	0.955	0.863	0.825	3619	3619	39	0
Δ_{by}	4.0	385	358	0.930	0.876	0.815	3601	7220	39	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	438	440	1.003	0.999	1.002	14181	21401	46	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	453	445	0.984	1.031	1.015	14717	36119	47	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	482	512	1.062	1.098	1.166	35556	71675	51	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	506	522	1.031	1.153	1.189	36967	108642	51	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	525	574	1.094	1.195	1.308	60984	169626	52	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	542	583	1.076	1.234	1.327	62684	232311	53	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	556	619	1.115	1.266	1.411	89028	321339	54	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	574	636	1.108	1.308	1.450	91184	412523	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	585	684	1.169	1.334	1.559	133766	546289	60	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	605	693	1.145	1.379	1.578	127884	674173	56	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	617	747	1.211	1.404	1.701	151767	825940	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	619	771	1.244	1.411	1.756	153981	979922	52	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	636	822	1.291	1.450	1.871	185596	1165518	52	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	642	844	1.315	1.462	1.923	188546	1354064	51	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	649	887	1.366	1.479	2.020	221654	1575718	51	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.3'te görüldüğü üzere, BÖÇ-02 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu sonuçlar ışığında kılıfın tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.6'da, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.7'de sunulmuştur.

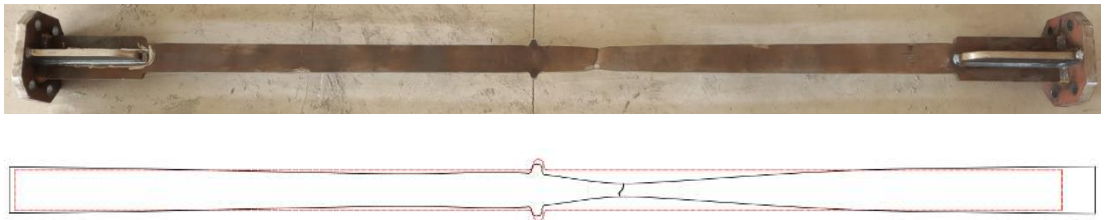


Şekil 4.6 BÖÇ-02 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.7 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.8’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.4’te sunulmuştur.



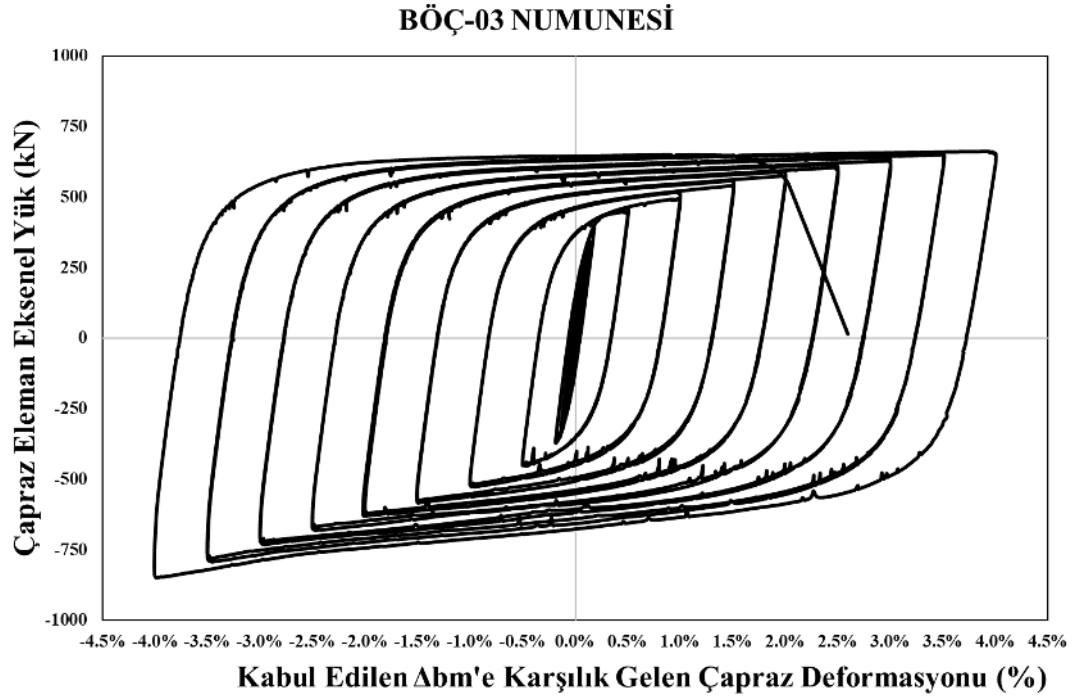
Şekil 4.8 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.4 BÖÇ-02 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	88.5	6	1411	74.3
1	233	87.5	7	1657	81.5
2	466	85.6	8	1903	86.3
3	699	83.7	9	2149	88
4	932	82.9	10	2395	89.1
5	1165	82.6	K*	1350	63.6

4.1.3 BÖÇ-03

Çekirdek plakasının burkulmasını BÖM-2 ile önlediği BÖÇ-03 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.9'da ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.9 BÖÇ-03 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-03 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-03 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.5 BÖÇ-03 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	393	373	0.950	0.895	0.850	3538	3538	37	0
Δ_{by}	4.0	392	369	0.942	0.892	0.841	3556	7093	37	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	443	0.991	1.018	1.008	14005	21099	45	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	460	453	0.985	1.047	1.031	14811	35910	46	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	494	518	1.049	1.124	1.179	35227	71137	50	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	516	526	1.019	1.176	1.198	36785	107922	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	539	574	1.066	1.227	1.308	60723	168645	52	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	557	583	1.046	1.269	1.327	62580	231224	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	574	621	1.081	1.308	1.414	88448	319673	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	588	628	1.067	1.340	1.430	91066	410739	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	604	668	1.105	1.375	1.520	118917	529656	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	615	680	1.106	1.401	1.549	121144	650800	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	626	718	1.147	1.427	1.636	151715	802514	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	641	731	1.141	1.459	1.665	154595	957109	53	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	649	781	1.203	1.479	1.778	187075	1144184	53	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	658	793	1.206	1.498	1.807	190353	1334537	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	662	849	1.282	1.507	1.933	225330	1559867	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.5'te göröldüğü üzere, BÖÇ-03 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.10'da, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.11'de sunulmuştur.

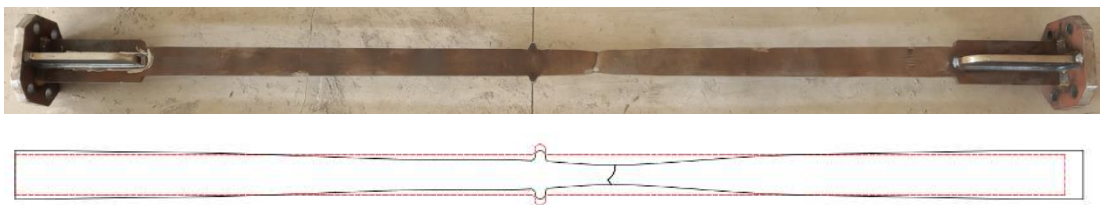


Şekil 4.10 BÖÇ-03 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.11 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.12’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.6’da sunulmuştur.



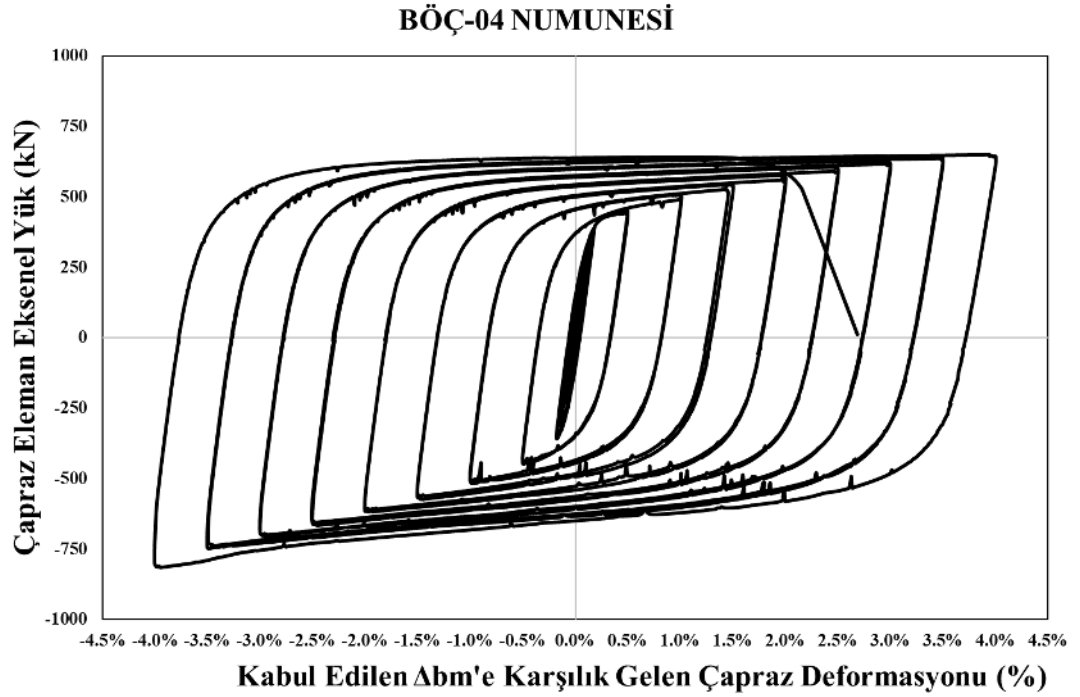
Şekil 4.12 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.6 BÖÇ-03 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	90	6	1394	77.5
1	231	88.7	7	1633	84.8
2	462	87.3	8	1872	87.3
3	693	84.3	9	2111	89.1
4	924	81.7	10	2350	89.9
5	1155	80.7	K*	1300	60.5

4.1.4. BÖÇ-04

Kılıfın tekrar kullanılabilirliğinin kanıtlanması için BÖÇ-03 numunesi ile aynı kılıf mekanizmasına (BÖM-2) sahip BÖÇ-04 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.13'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.13 BÖÇ-04 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-04 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-04 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek

plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.7 BÖÇ-04 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	386	358	0.927	0.879	0.815	3274	3274	35	0
Δ_{by}	4.0	385	355	0.923	0.876	0.809	3346	6620	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	443	441	0.997	1.008	1.005	13916	20536	45	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	454	448	0.988	1.034	1.021	14427	34963	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	489	508	1.038	1.115	1.156	35259	70222	50	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	506	518	1.022	1.153	1.179	36271	106493	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	526	563	1.070	1.198	1.282	58651	165144	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	543	573	1.055	1.237	1.305	61060	226204	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	559	610	1.091	1.272	1.388	86981	313184	53	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	576	618	1.074	1.311	1.408	89188	402372	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	590	655	1.110	1.343	1.491	117348	519720	54	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	602	665	1.103	1.372	1.514	119682	639402	54	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	615	699	1.136	1.401	1.591	149496	788897	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	628	700	1.115	1.430	1.594	151704	940602	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	635	737	1.160	1.446	1.678	182766	1123368	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	645	750	1.162	1.469	1.707	185475	1308842	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	648	816	1.260	1.475	1.859	219309	1528152	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.7’de görüldüğü üzere, BÖÇ-04 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu sonuçlar ışığında kılıfın tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.14’te, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.15’te sunulmuştur.

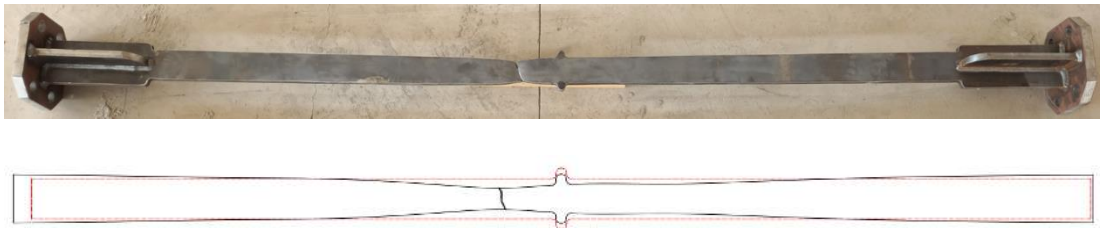


Şekil 4.14 BÖÇ-04 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.15 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.16'da, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.8'de sunulmuştur.



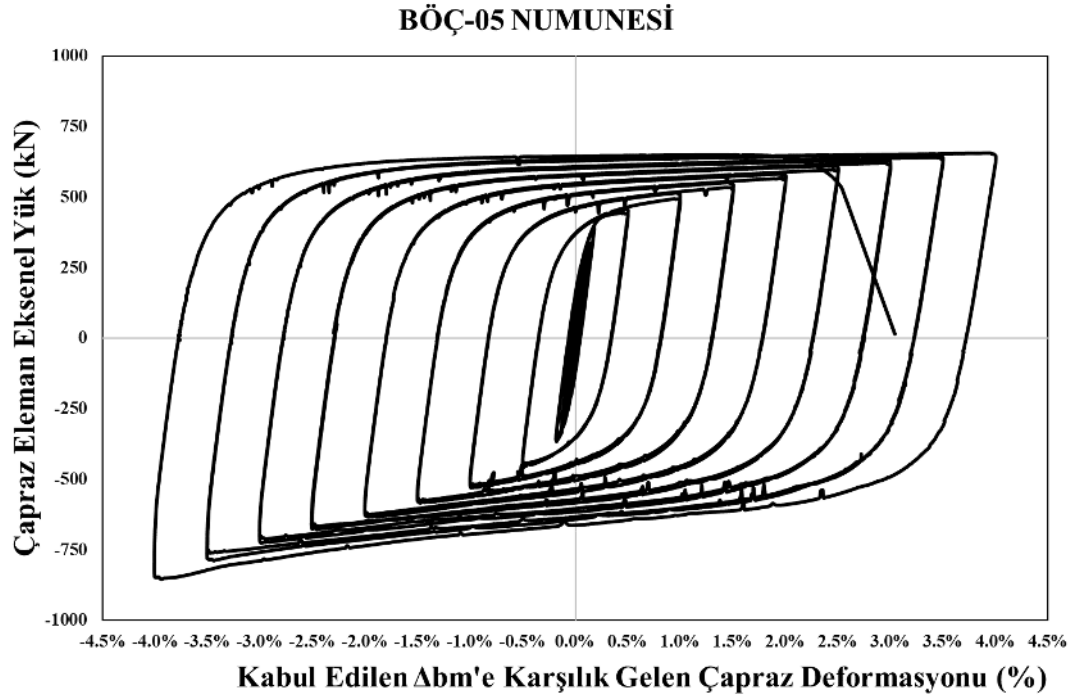
Şekil 4.16 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.8 BÖÇ-04 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.5	6	1427	81.5
1	239	88.3	7	1659	84.2
2	478	86.8	8	1891	86.9
3	717	85.5	9	2123	88.4
4	956	80	10	2355	89.2
5	1195	80.9	K*	1065	61.1

4.1.5. BÖÇ-05

Çekirdek plakasının burkulmasını BÖM-3 ile önlediği BÖÇ-05 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.17’de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.9’da verilmiştir.



Şekil 4.17 BÖÇ-05 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-05 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-05 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.9 BÖÇ-05 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	393	363	0.924	0.895	0.828	3411	3411	36	0
Δ_{by}	4.0	393	363	0.924	0.895	0.828	3437	6848	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	444	445	1.003	1.011	1.015	14060	20909	45	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	457	457	1.000	1.040	1.040	14661	35569	46	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	494	520	1.054	1.124	1.185	35484	71053	50	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	515	530	1.030	1.172	1.208	36616	107669	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	533	576	1.080	1.214	1.311	60365	168034	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	552	584	1.059	1.256	1.330	62098	230133	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	566	625	1.105	1.288	1.424	87975	318108	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	581	634	1.090	1.324	1.443	90274	408381	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	597	666	1.116	1.359	1.517	118426	526807	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	610	677	1.111	1.388	1.543	121238	648045	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	619	717	1.158	1.411	1.633	151163	799208	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	631	724	1.148	1.437	1.649	153368	952577	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	639	761	1.190	1.456	1.733	185882	1138459	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	649	789	1.216	1.479	1.797	188821	1327280	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	655	854	1.305	1.491	1.946	222907	1550187	52	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.9’da göröldüğü üzere, BÖÇ-05 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.18’de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.19’da sunulmuştur.

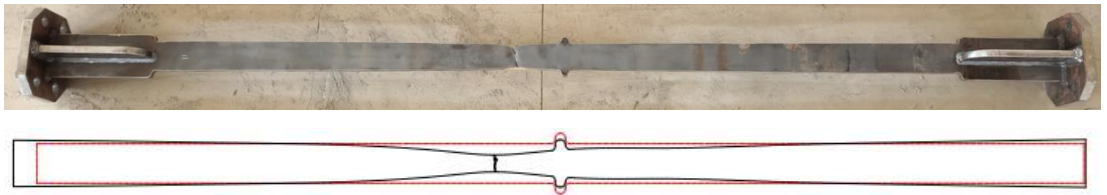


Şekil 4.18 BÖÇ-05 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.19 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.20’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.10’da sunulmuştur.



Şekil 4.20 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

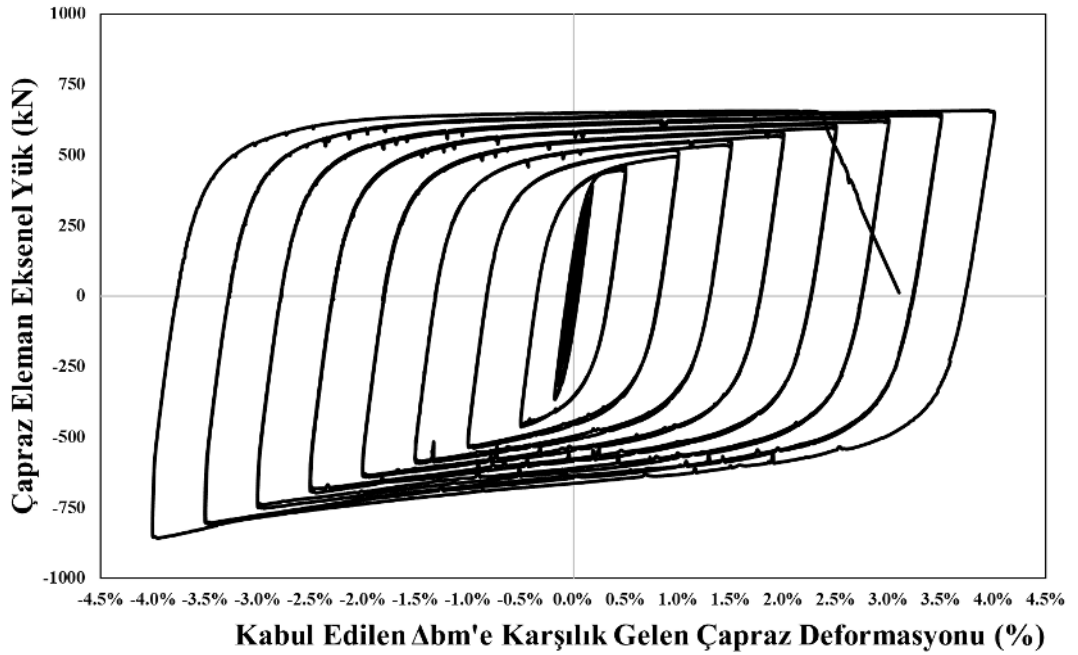
Tablo 4.10 BÖÇ-05 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89	6	1437	82.1
1	241	88.1	7	1669	84.6
2	482	86.7	8	1901	86.7
3	723	85	9	2133	88.2
4	964	79	10	2365	89.6
5	1205	80.6	K*	1055	61.4

4.1.6. BÖÇ-06

Kılıfın tekrar kullanılabilirliğinin kanıtlanması için BÖÇ-05 numunesi ile aynı kılıf mekanizmasına (BÖM-3) sahip BÖÇ-06 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.21’de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.11’de verilmiştir.

BÖÇ-06 NUMUNESİ



Şekil 4.21 BÖÇ-06 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-06 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-06 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek

plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.11 BÖÇ-06 numaralı deney numunesinin sonuçları

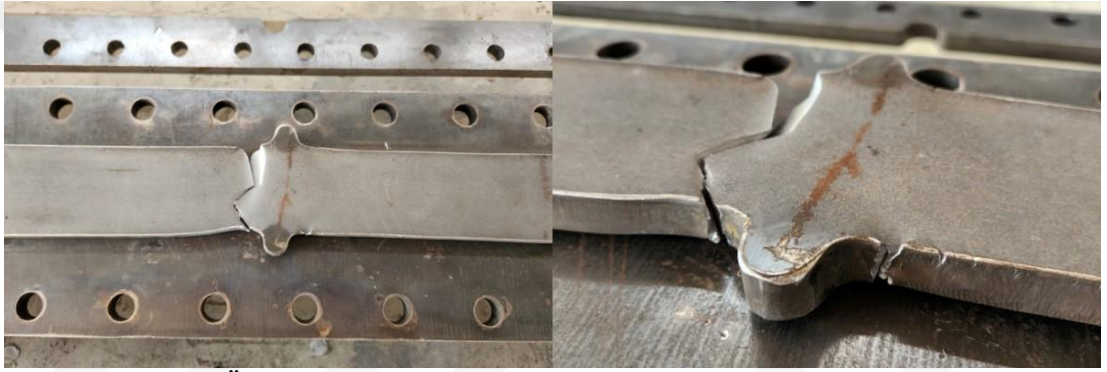
Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	395	366	0.928	0.899	0.834	3336	3336	35	0
Δ_{by}	4.0	393	366	0.932	0.895	0.834	3470	6806	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	453	1.013	1.018	1.031	14041	20847	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	460	464	1.009	1.047	1.057	14711	35558	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	496	533	1.074	1.131	1.214	35631	71190	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	518	537	1.038	1.179	1.224	37060	108250	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	536	585	1.092	1.221	1.334	60980	169230	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	553	593	1.072	1.259	1.350	62782	232012	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	567	636	1.122	1.292	1.450	88585	320597	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	583	642	1.102	1.327	1.462	90779	411377	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	597	683	1.145	1.359	1.556	119111	530488	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	610	697	1.144	1.388	1.588	121706	652195	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	619	741	1.196	1.411	1.688	152239	804434	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	632	752	1.190	1.440	1.714	155694	960128	53	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	641	805	1.256	1.459	1.833	187548	1147676	53	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	652	809	1.241	1.485	1.842	190094	1337771	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	658	858	1.305	1.498	1.955	223665	1561435	52	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.11’de göröldüğü üzere, BÖÇ-06 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu sonuçlar ışığında kılıfın tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.22’de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.23’te sunulmuştur.

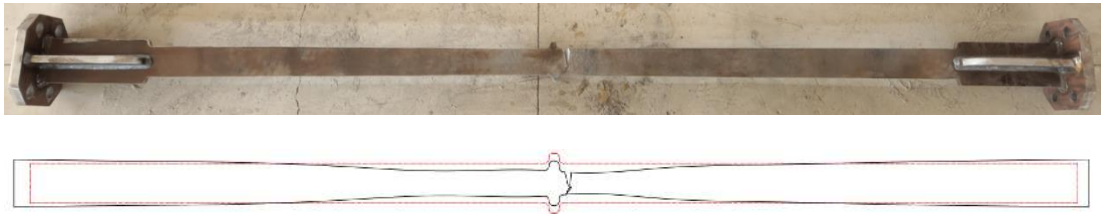


Şekil 4.22 BÖÇ-06 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.23 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.24'te, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.12'de sunulmuştur.



Şekil 4.24 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

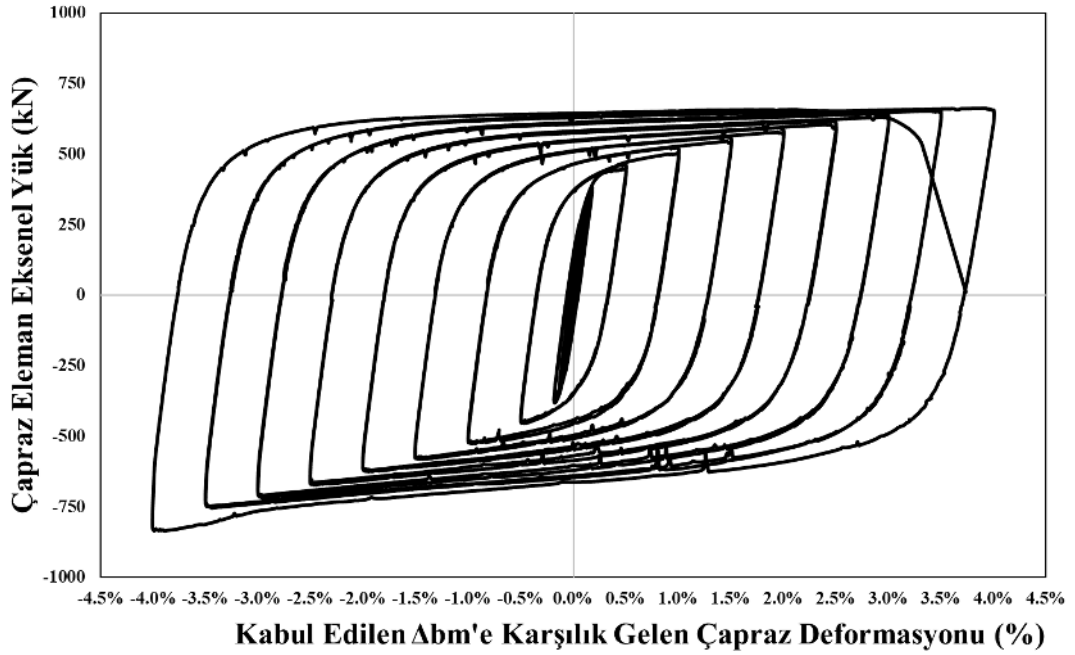
Tablo 4.12 BÖÇ-06 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.4	6	1426	82
1	238	88.2	7	1662	85
2	476	87.1	8	1898	86.9
3	714	83.7	9	2134	88.4
4	952	79.5	10	2370	89.5
5	1190	79.5	K*	1225	74.7

4.1.7. BÖÇ-07

Çekirdek plakasının burkulmasını BÖM-4 ile önlediği BÖÇ-07 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.25'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.13'te verilmiştir.

BÖÇ-07 NUMUNESİ



Şekil 4.25 BÖÇ-07 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-07 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-07 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.13 BÖÇ-07 numaralı deney numunesinin sonuçları

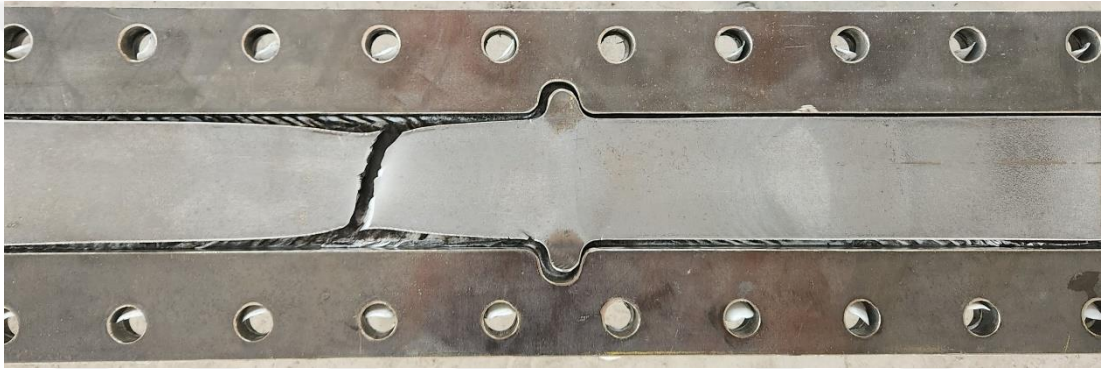
Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	378	382	1.011	0.860	0.870	3322	3322	35	0
Δ_{by}	4.0	385	376	0.978	0.876	0.857	3418	6740	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	448	1.003	1.018	1.021	14063	20803	45	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	462	454	0.982	1.053	1.034	14498	35301	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	503	522	1.037	1.147	1.189	35570	70871	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	525	528	1.005	1.195	1.201	37168	108039	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	546	576	1.054	1.243	1.311	60794	168833	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	561	581	1.035	1.279	1.324	62237	231070	51	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	578	619	1.071	1.317	1.411	88414	319484	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	591	626	1.060	1.346	1.427	90293	409777	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	604	665	1.101	1.375	1.514	118537	528315	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	618	673	1.089	1.408	1.533	120532	648847	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	619	710	1.146	1.411	1.617	151490	800337	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	642	718	1.119	1.462	1.636	154130	954468	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	652	748	1.148	1.485	1.704	186120	1140588	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	658	751	1.142	1.498	1.710	187804	1328392	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	662	836	1.263	1.507	1.904	223252	1551644	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.13'te görüldüğü üzere, BÖÇ-07 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.26'da, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.27'de sunulmuştur.

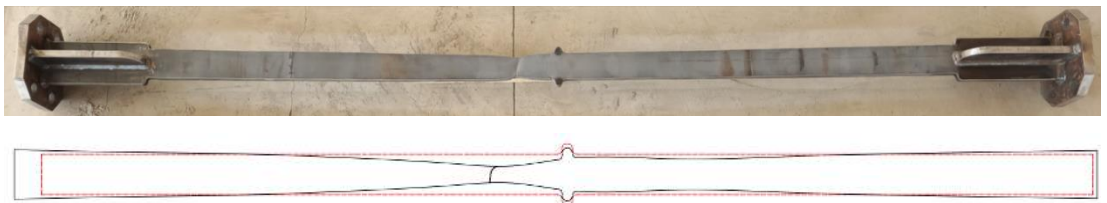


Şekil 4.26 BÖÇ-07 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.27 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.28’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.14’te sunulmuştur.



Şekil 4.28 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

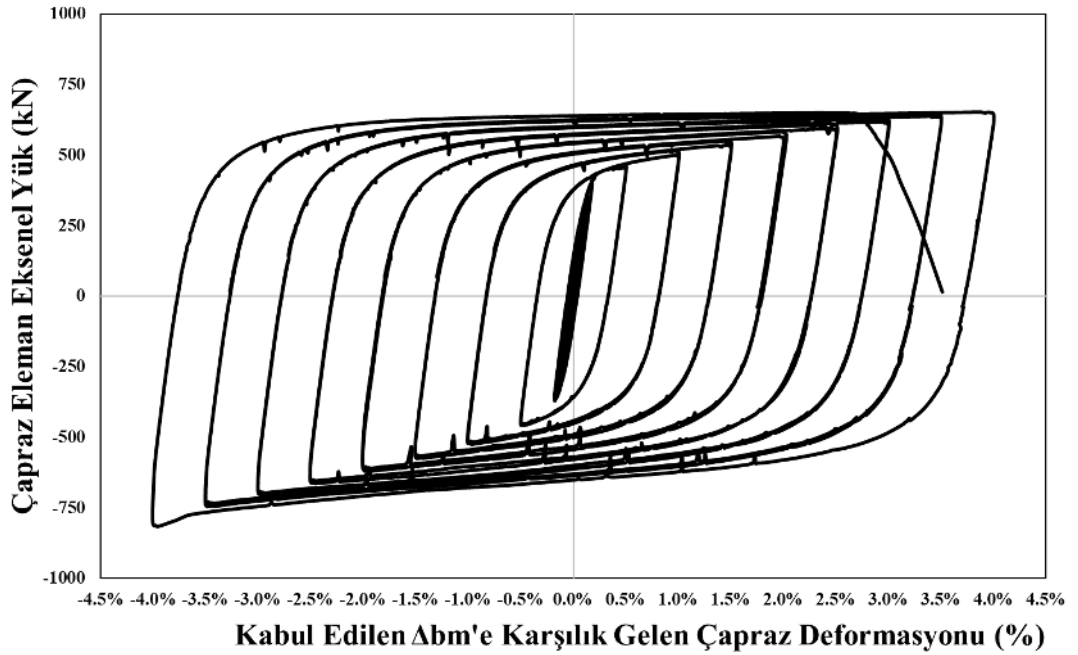
Tablo 4.14 BÖÇ-07 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.4	6	1426	82
1	238	88.2	7	1662	85
2	476	87.1	8	1898	86.9
3	714	83.7	9	2134	88.4
4	952	79.5	10	2370	89.5
5	1190	79.5	K*	1225	74.7

4.1.8. BÖÇ-08

Kılıfın tekrar kullanılabilirliğinin kanıtlanması için BÖÇ-07 numunesi ile aynı kılıf mekanizmasına (BÖM-4) sahip BÖÇ-08 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.29’da ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.15’te verilmiştir.

BÖÇ-08 NUMUNESİ



Şekil 4.29 BÖÇ-08 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-08 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-08 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek

plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.15 BÖÇ-08 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	402	372	0.926	0.915	0.847	3315	3315	34	0
Δ_{by}	4.0	400	365	0.912	0.912	0.831	3438	6752	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	457	454	0.994	1.040	1.034	14264	21016	45	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	467	458	0.982	1.063	1.044	14829	35845	46	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	499	518	1.037	1.137	1.179	35479	71324	50	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	515	525	1.019	1.172	1.195	36948	108272	51	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	536	567	1.058	1.221	1.292	60249	168521	52	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	550	576	1.046	1.253	1.311	61730	230251	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	567	611	1.077	1.292	1.392	87866	318117	53	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	585	621	1.060	1.334	1.414	90381	408498	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	594	655	1.102	1.353	1.491	117716	526214	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	607	665	1.096	1.382	1.514	120122	646335	54	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	618	699	1.130	1.408	1.591	149616	795951	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	628	706	1.124	1.430	1.607	152116	948067	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	638	735	1.153	1.453	1.675	183281	1131348	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	646	747	1.155	1.472	1.701	185593	1316941	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	652	815	1.249	1.485	1.855	218868	1535809	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.15'te görüldüğü üzere, BÖÇ-08 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu sonuçlar ışığında kılıfın tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.30'da, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.31'de sunulmuştur.

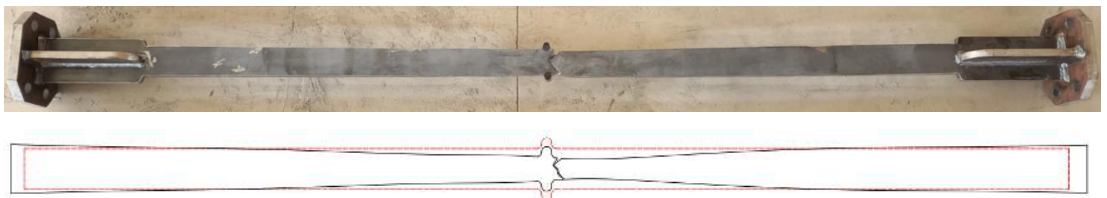


Şekil 4.30 BÖÇ-08 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.31 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.32’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.16’da sunulmuştur.



Şekil 4.32 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

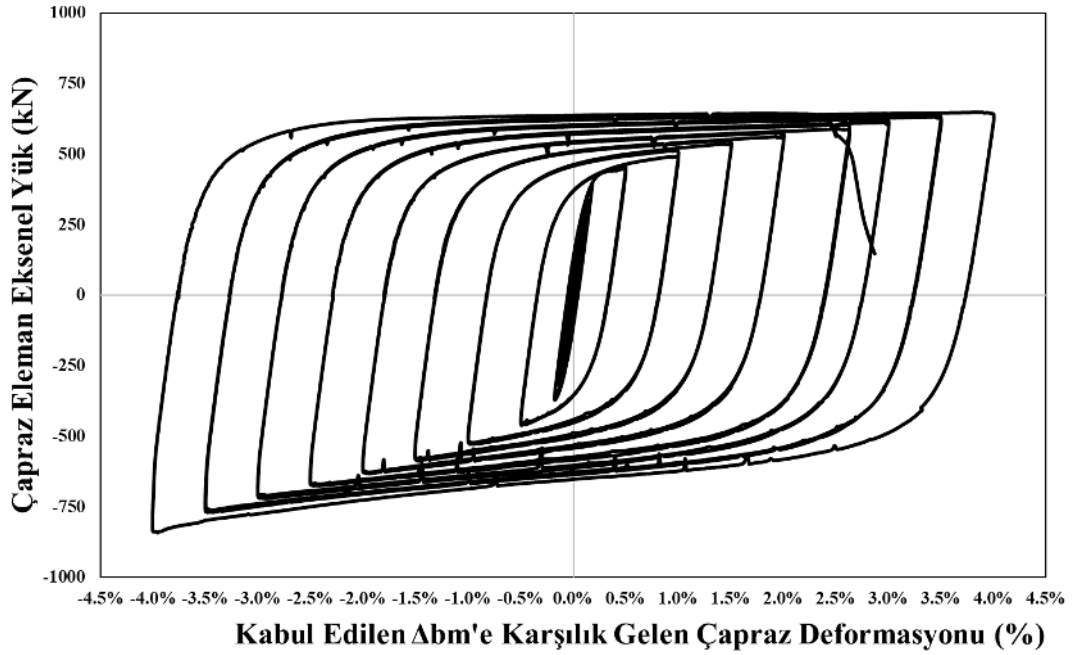
Tablo 4.16 BÖÇ-08 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.6	6	1424	79.4
1	237	87.5	7	1663	84.3
2	474	86.2	8	1902	86.9
3	711	83.7	9	2141	87.6
4	948	81	10	2380	89.1
5	1185	78.7	K*	1205	72.3

4.1.9. BÖÇ-09

Çekirdek plakasının burkulmasını BÖM-5 ile önlediği BÖÇ-09 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.33'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.17'de verilmiştir.

BÖÇ-09 NUMUNESİ



Şekil 4.33 BÖÇ-09 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-09 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-09 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.17 BÖÇ-09 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	390	372	0.953	0.889	0.847	3329	3329	35	0
Δ_{by}	4.0	393	372	0.946	0.895	0.847	3383	6712	35	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	457	1.022	1.018	1.040	14004	20716	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	458	462	1.009	1.044	1.053	14592	35308	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	491	523	1.066	1.118	1.192	35310	70619	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	513	529	1.030	1.169	1.205	36590	107208	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	536	578	1.079	1.221	1.317	60567	167775	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	547	587	1.072	1.247	1.337	62022	229797	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	561	628	1.118	1.279	1.430	87708	317505	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	574	632	1.101	1.308	1.440	89554	407059	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	588	670	1.139	1.340	1.527	121041	528099	55	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	604	676	1.119	1.375	1.540	123691	651791	55	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	612	711	1.162	1.395	1.620	150060	801851	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	624	721	1.156	1.421	1.643	152744	954595	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	632	764	1.208	1.440	1.739	183885	1138480	53	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	642	771	1.200	1.462	1.756	186187	1324667	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	646	843	1.304	1.472	1.920	220672	1545339	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.17’de görüldüğü üzere, BÖÇ-09 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.34’te, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.35’te sunulmuştur.

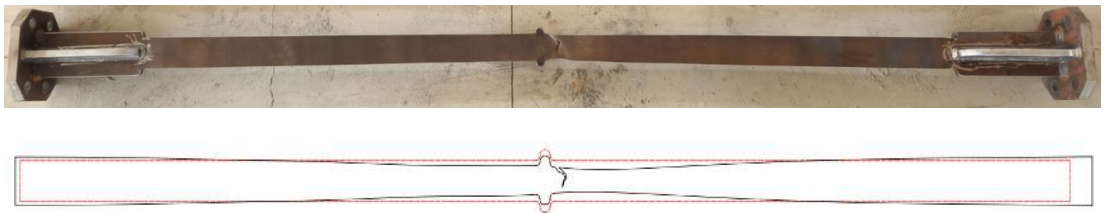


Şekil 4.34 BÖÇ-09 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.35 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.36’da, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.18’de sunulmuştur.



Şekil 4.36 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

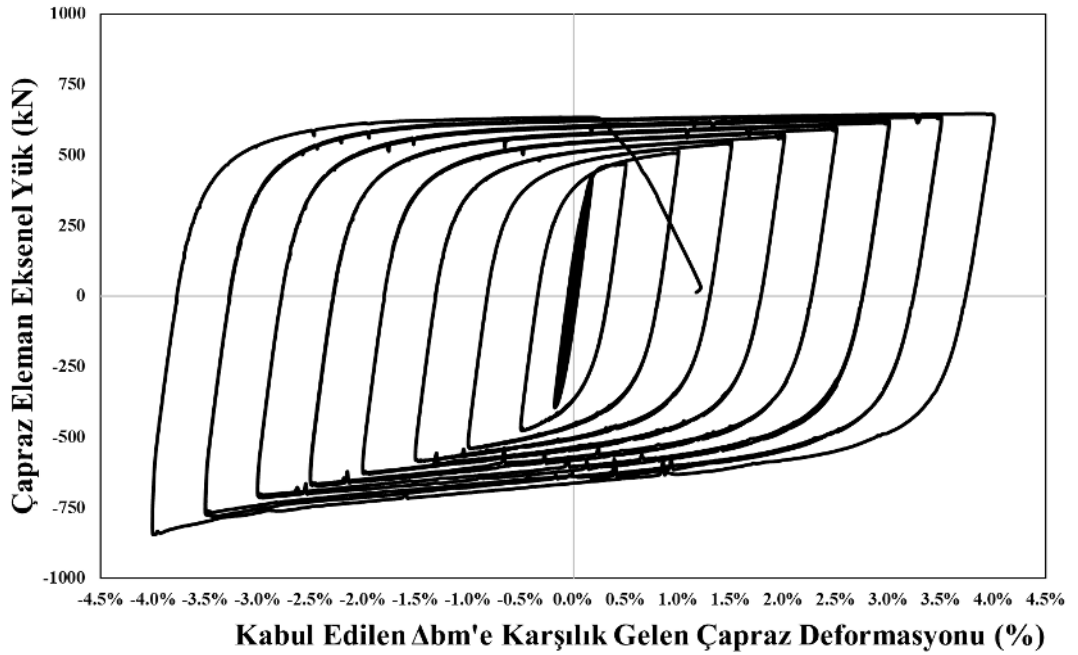
Tablo 4.18 BÖÇ-09 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.1	6	1406	79.9
1	233	88.6	7	1647	84.5
2	466	86.7	8	1888	87.2
3	699	84.8	9	2129	88.5
4	932	81.8	10	2370	89.3
5	1165	80.4	K*	1215	70.4

4.1.10. BÖÇ-10

Kılıfın tekrar kullanılabilirliğinin kanıtlanması için BÖÇ-09 numunesi ile aynı kılıf mekanizmasına (BÖM-5) sahip BÖÇ-10 numaralı BÖÇ numunesinin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.37’de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.19’da verilmiştir.

BÖÇ-10 NUMUNESİ



Şekil 4.37 BÖÇ-10 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-10 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-10 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek

plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.19 BÖÇ-10 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	424	396	0.933	0.966	0.902	3521	3521	34	0
Δ_{by}	4.0	417	393	0.942	0.950	0.895	3537	7058	35	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	468	475	1.015	1.066	1.082	14642	21700	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	477	478	1.003	1.086	1.089	15121	36821	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	508	540	1.064	1.156	1.230	36196	73017	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	522	542	1.038	1.189	1.234	37368	110385	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	540	584	1.081	1.230	1.330	60995	171380	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	559	587	1.051	1.272	1.337	62333	233713	51	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	566	624	1.103	1.288	1.421	88085	321798	53	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	578	631	1.090	1.317	1.437	89939	411737	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	591	666	1.127	1.346	1.517	117836	529573	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	604	675	1.117	1.375	1.536	119940	649513	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	614	706	1.150	1.398	1.607	149754	799267	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	626	716	1.142	1.427	1.630	152814	952080	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	635	768	1.209	1.446	1.749	184683	1136764	53	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	643	782	1.215	1.466	1.781	187287	1324051	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	646	846	1.309	1.472	1.926	220490	1544541	52	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.19’da göröldüğü üzere, BÖÇ-10 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır. Bu sonuçlar ışığında kılıfın tekrar kullanılabilirliği kanıtlanmıştır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.38’de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.39’da sunulmuştur.

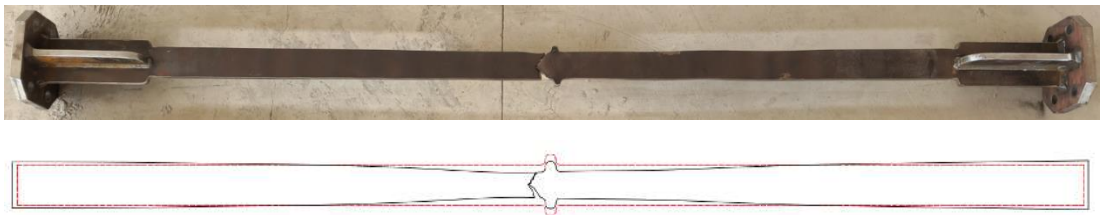


Şekil 4.38 BÖÇ-10 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.39 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.40'da, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.20'de sunulmuştur.



Şekil 4.40 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

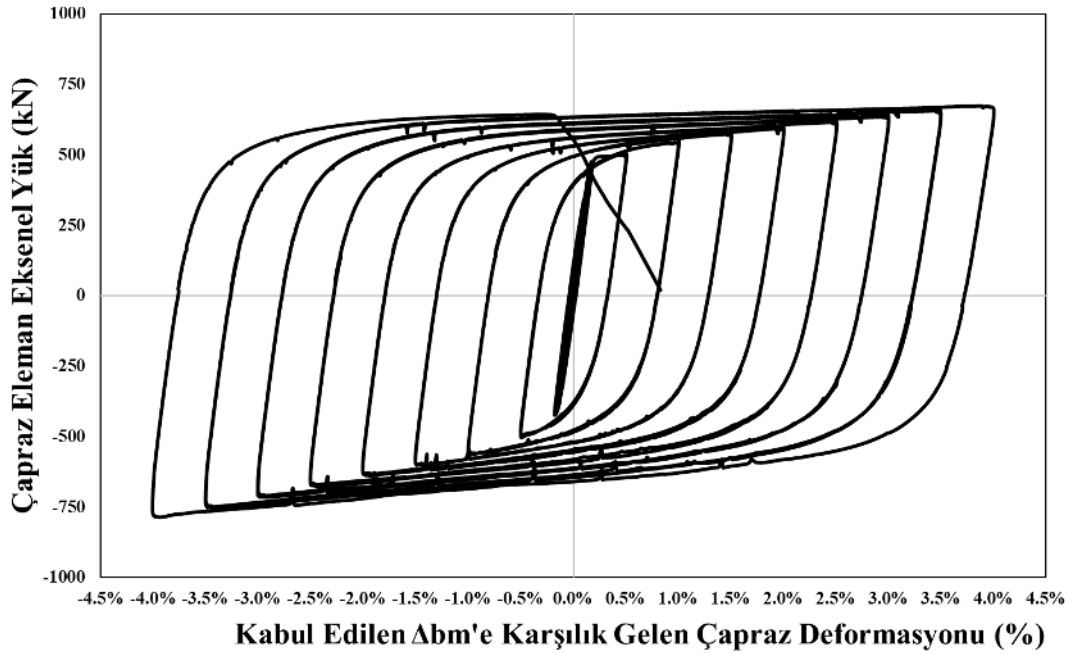
Tablo 4.20 BÖÇ-10 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	88.5	6	1398	81.5
1	233	88.2	7	1631	84.9
2	466	86.9	8	1864	86.9
3	699	85.6	9	2097	88.4
4	932	81.9	10	2330	89.6
5	1165	80	K*	1120	79.4

4.1.11. BÖÇ-11

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında, bulon aralığının kılıf mekanizmasının performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, toplam bulon sayısını azaltarak imalat kolaylığı sağlamak amacıyla bulon aralığı 160 mm olarak belirlenen BÖÇ-11 numaralı numunenin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.41’de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.21’de verilmiştir.

BÖÇ-11 NUMUNESİ



Şekil 4.41 BÖÇ-11 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-11 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-11 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve

simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.21 BÖÇ-11 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	474	424	0.896	1.079	0.966	3718	3718	33	0
Δ_{by}	4.0	462	419	0.905	1.053	0.953	3752	7470	34	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	499	495	0.992	1.137	1.127	15499	22969	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	506	502	0.992	1.153	1.144	15782	38751	44	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	542	563	1.039	1.234	1.282	38144	76895	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	560	560	1.000	1.276	1.276	39217	116112	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	573	602	1.052	1.305	1.372	63791	179903	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	577	602	1.044	1.314	1.372	64334	244237	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	593	634	1.069	1.350	1.443	90548	334785	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	604	639	1.059	1.375	1.456	91916	426702	52	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	614	672	1.094	1.398	1.530	120561	547262	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	625	679	1.086	1.424	1.546	122420	669682	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	634	709	1.118	1.443	1.614	152554	822236	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	645	716	1.110	1.469	1.630	154254	976490	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	656	750	1.142	1.495	1.707	185874	1162364	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	663	768	1.158	1.511	1.749	188268	1350632	53	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	673	786	1.168	1.533	1.791	220726	1571358	54	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.21’de göröldüğü üzere, BÖÇ-11 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.42’de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.43’te sunulmuştur.

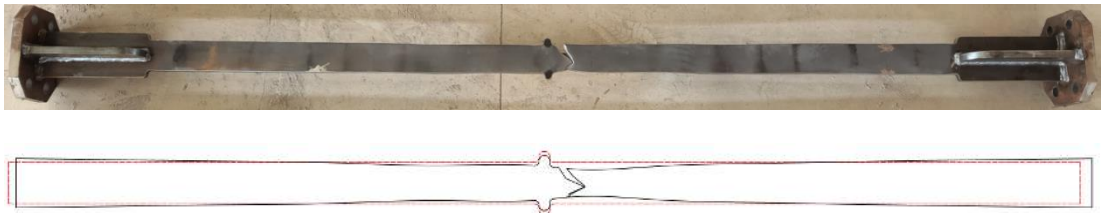


Şekil 4.42 BÖÇ-11 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.43 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.44’te, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.22’de sunulmuştur.



Şekil 4.44 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

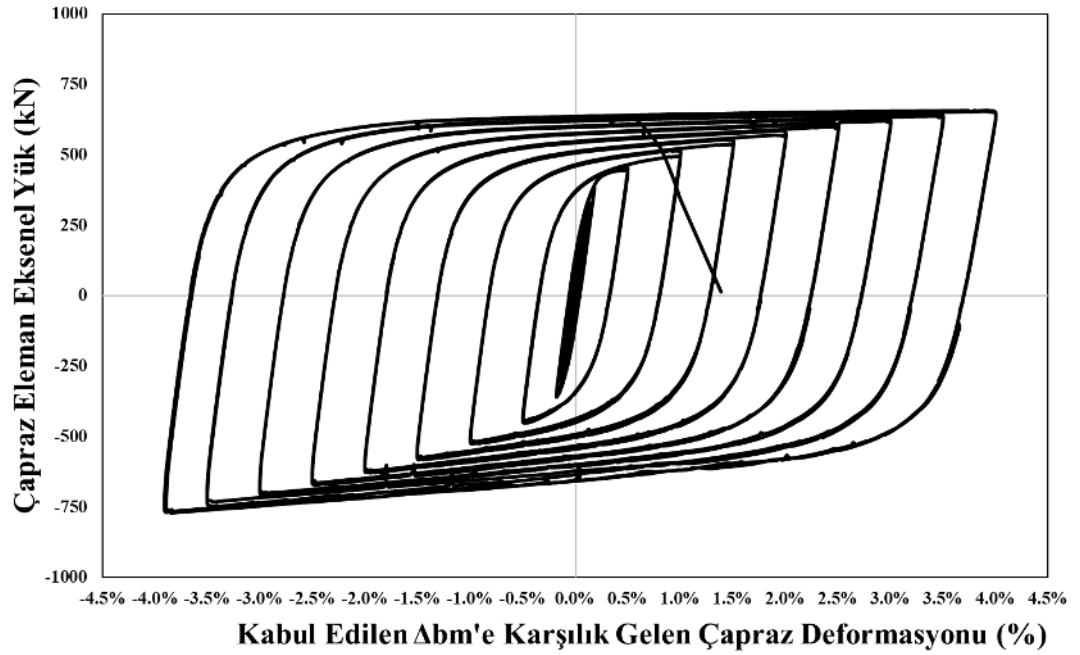
Tablo 4.22 BÖÇ-11 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	89.1	6	1376	82.5
1	228	88	7	1612	85.1
2	456	86.8	8	1848	86.7
3	684	85.6	9	2084	88
4	912	83.3	10	2320	89
5	1140	82.6	K*	1200	75.9

4.1.12. BÖÇ-12

BÖM-4 kılıf mekanizmasında bulon aralığı etkisini incelemeye devam etmek amacıyla, bulon aralığı 240 mm olarak belirlenen BÖÇ-12 numaralı numunenin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.45'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.23'te verilmiştir.

BÖÇ-12 NUMUNESİ



Şekil 4.45 BÖÇ-12 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-12 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-12 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 2 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 3. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek

plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.23 BÖÇ-12 numaralı deney numunesinin sonuçları

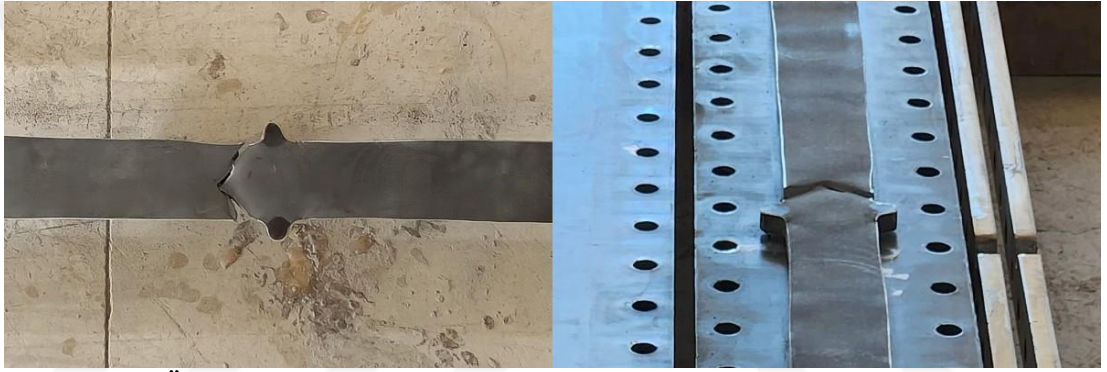
Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	382	356	0.933	0.870	0.812	3302	3302	36	0
Δ_{by}	4.0	389	356	0.916	0.886	0.812	3356	6658	36	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	447	444	0.994	1.018	1.011	13784	20442	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	458	453	0.988	1.044	1.031	14424	34866	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	495	519	1.049	1.127	1.182	35115	69981	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	515	526	1.022	1.172	1.198	36536	106517	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	537	576	1.071	1.224	1.311	60108	166625	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	553	583	1.054	1.259	1.327	62058	228683	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	569	622	1.095	1.295	1.417	88035	316718	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	585	629	1.075	1.334	1.433	89883	406601	52	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	595	665	1.116	1.356	1.514	118026	524627	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	610	673	1.104	1.388	1.533	120052	644679	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	619	700	1.130	1.411	1.594	149401	794080	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	632	707	1.119	1.440	1.611	151553	945633	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	638	733	1.149	1.453	1.669	182355	1127988	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	648	748	1.155	1.475	1.704	185780	1313769	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	653	765	1.171	1.488	1.743	214065	1527833	53	658
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	656	771	1.175	1.495	1.756	216395	1744228	54	744
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.23'te göröldüğü üzere, BÖÇ-12 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.46'da, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.47'de sunulmuştur.

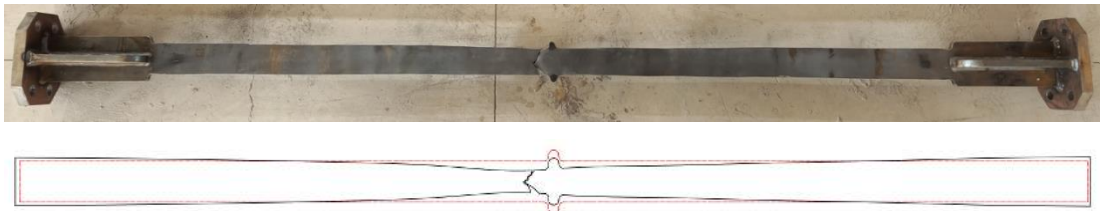


Şekil 4.46 BÖÇ-12 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.47 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.48’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.24’te sunulmuştur.



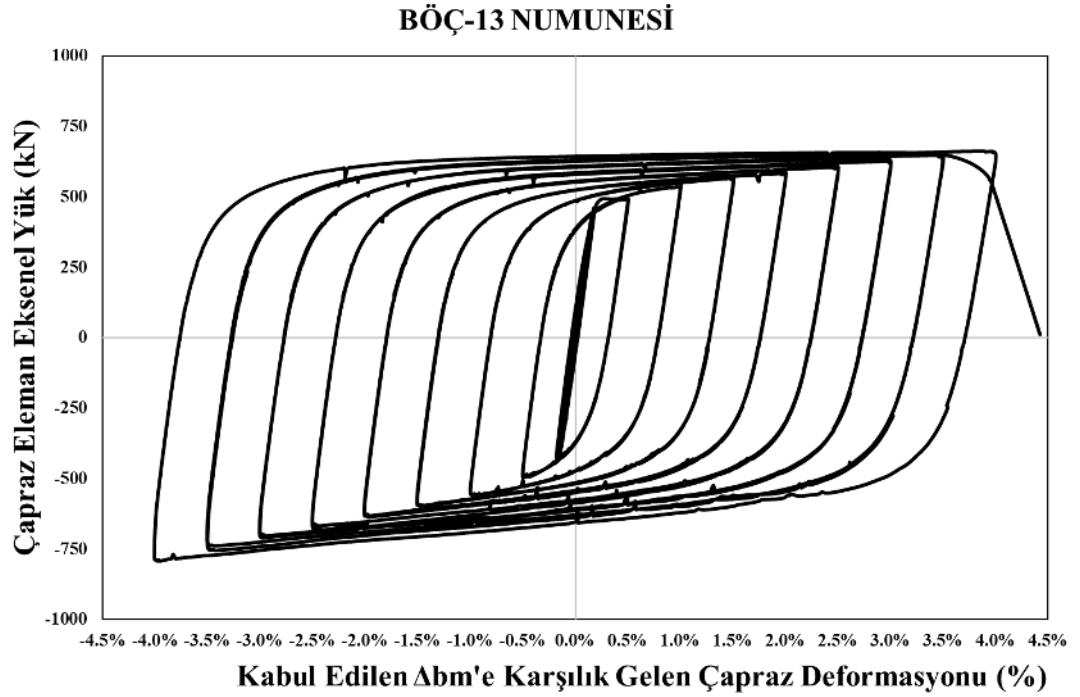
Şekil 4.48 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.24 BÖÇ-12 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	88.9	6	1397	82.2
1	233	88.2	7	1629	84.5
2	466	86.9	8	1861	86.1
3	699	85.2	9	2093	88.4
4	932	81.6	10	2325	89.5
5	1165	79.5	K*	1120	77

4.1.13. BÖÇ-13

Parametrik çalışma kapsamında BÖM-4 kılıf mekanizmasıyla bulon aralığının 320 mm'ye çıkarıldığı BÖÇ-13 numaralı numunenin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.49'da ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.25'te verilmiştir.



Şekil 4.49 BÖÇ-13 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-13 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-13 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.25 BÖÇ-13 numaralı deney numunesinin sonuçları

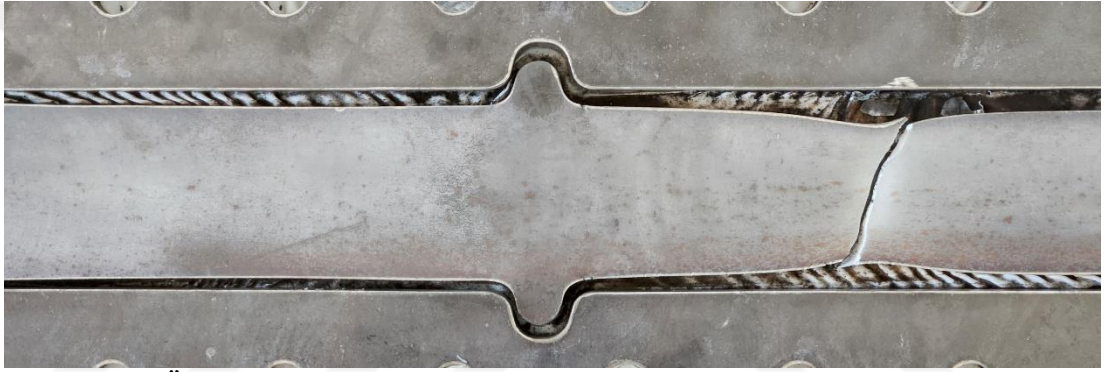
Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	461	429	0.929	1.050	0.976	3688	3688	33	0
Δ_{by}	4.0	453	429	0.947	1.031	0.976	3735	7423	34	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	494	489	0.991	1.124	1.115	14989	22412	43	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	496	495	0.997	1.131	1.127	15545	37957	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	535	559	1.045	1.218	1.272	37558	75515	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	552	560	1.015	1.256	1.276	38431	113946	49	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	566	597	1.055	1.288	1.359	62899	176845	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	573	598	1.044	1.305	1.363	63772	240617	51	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	583	632	1.085	1.327	1.440	89557	330173	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	593	638	1.076	1.350	1.453	91148	421321	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	604	668	1.105	1.375	1.520	118997	540318	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	617	683	1.108	1.404	1.556	121459	661778	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	621	704	1.134	1.414	1.604	151171	812949	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	636	711	1.118	1.450	1.620	152856	965805	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	648	740	1.142	1.475	1.685	183831	1149636	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	656	755	1.151	1.495	1.720	186932	1336568	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	662	793	1.199	1.507	1.807	219553	1556121	53	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümülatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.25'te görüldüğü üzere, BÖÇ-13 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümülatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğu gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.50'de, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.51'de sunulmuştur.

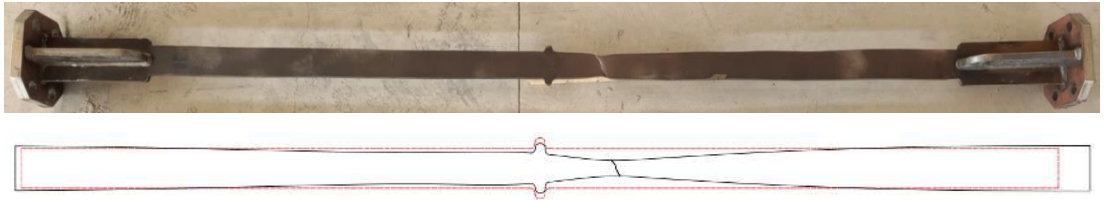


Şekil 4.50 BÖÇ-13 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.51 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.52’de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.26’da sunulmuştur.



Şekil 4.52 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

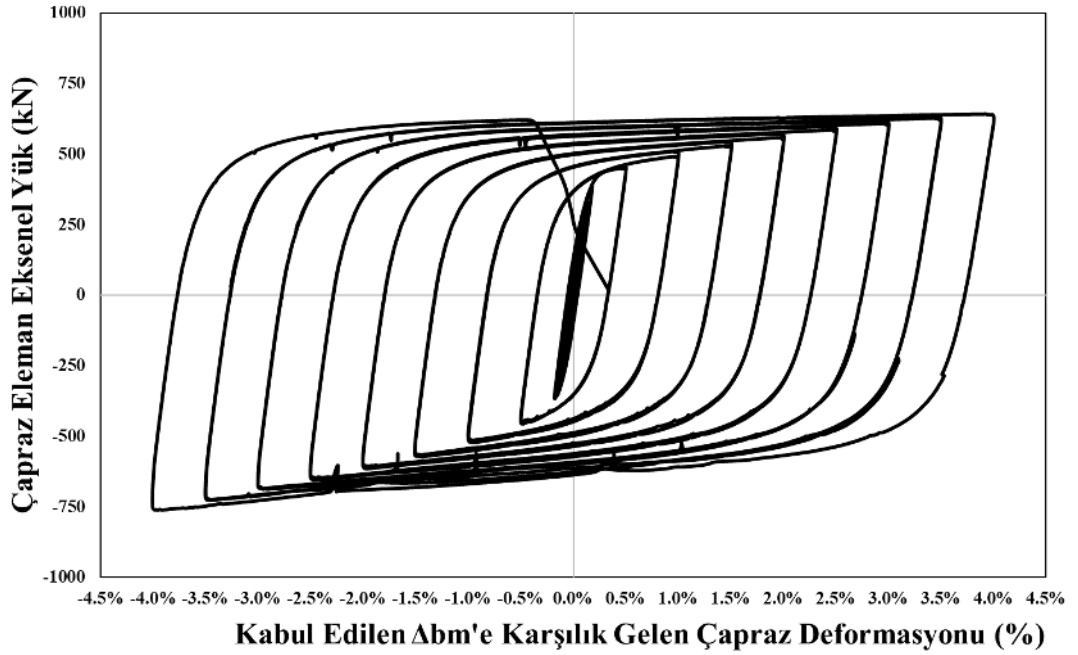
Tablo 4.26 BÖÇ-13 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	88.1	6	1415	77
1	234	87.1	7	1660	82.6
2	468	85.3	8	1905	86.2
3	702	83.3	9	2150	88
4	936	82.5	10	2395	88.4
5	1170	81.5	K*	1325	62.1

4.1.14. BÖÇ-14

BÖM-4 kılıf mekanizmasıyla bulon aralığının 400 mm'ye çıkarıldığı BÖÇ-14 numaralı numunenin yükleme sonucunda göstermiş olduğu histeretik davranış Şekil 4.53'te ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.27'de verilmiştir.

BÖÇ-14 NUMUNESİ



Şekil 4.53 BÖÇ-14 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-14 numaralı deney numunesi, YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-14 numaralı deney numunesi, 4.0 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde, 1 çevrim boyunca kararlı ve simetrik bir performans sergilemiştir. 2. Çevrimde çekme yönüne giderken çekirdek plakasında kopma tipi hasar gözlemlenmesi sonucunda BÖÇ taşıma kapasitesini kaybetmiştir.

Tablo 4.27 BÖÇ-14 numaralı deney numunesinin sonuçları

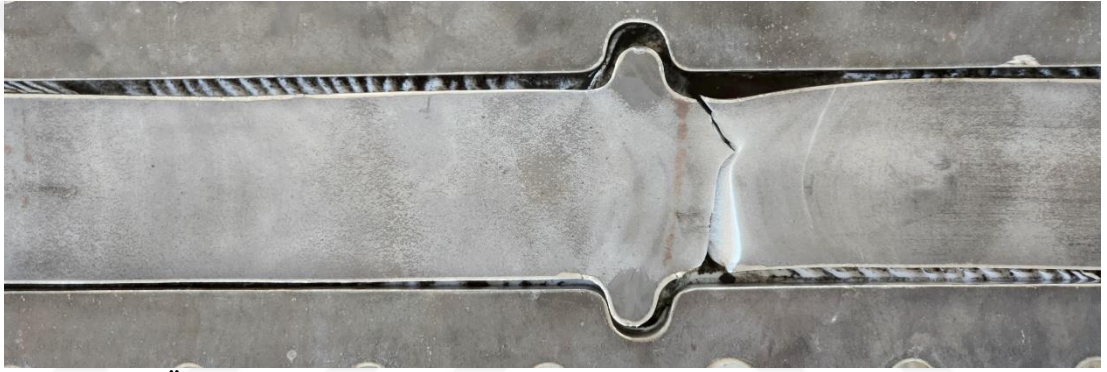
Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	387	368	0.949	0.883	0.837	3284	3284	35	0
Δ_{by}	4.0	387	365	0.942	0.883	0.831	3300	6585	35	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	451	450	0.997	1.028	1.024	13983	20568	44	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	458	457	0.997	1.044	1.040	14582	35150	45	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	491	515	1.049	1.118	1.172	34993	70143	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	509	522	1.025	1.160	1.189	36188	106330	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	528	567	1.075	1.201	1.292	59548	165879	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	543	571	1.052	1.237	1.301	61181	227060	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	557	608	1.091	1.269	1.385	86272	313332	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	573	615	1.074	1.305	1.401	88290	401622	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	585	648	1.106	1.334	1.475	115625	517247	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	598	655	1.095	1.363	1.491	118182	635429	54	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	614	682	1.111	1.398	1.553	147102	782530	54	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	615	687	1.117	1.401	1.565	149333	931863	54	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	628	724	1.153	1.430	1.649	179192	1111055	54	498
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	635	727	1.145	1.446	1.656	181996	1293051	54	572
$4.0\Delta_{bm}$	89.8	642	762	1.187	1.462	1.736	213071	1506122	54	658
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölenen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.27’de göröldüğü üzere, BÖÇ-14 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin 200’ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5’in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağılı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğı, kopmanın ise çekirdek plakasının ortasında durdurucu çevresinde olduğı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağılı deformasyon izleri Şekil 4.54’te, çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı ise Şekil 4.55’te sunulmuştur.

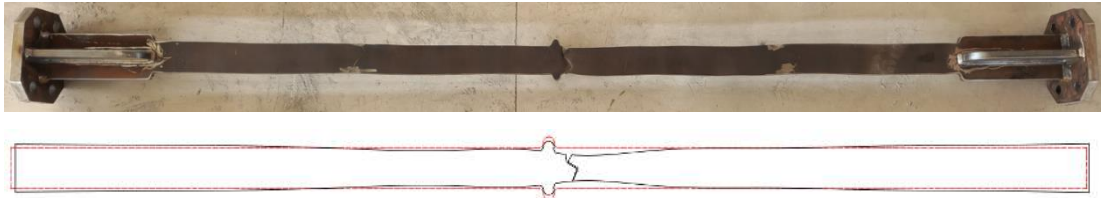


Şekil 4.54 BÖÇ-14 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri



Şekil 4.55 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen kopma fotoğrafı

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.56’da, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.28’de sunulmuştur.



Şekil 4.56 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

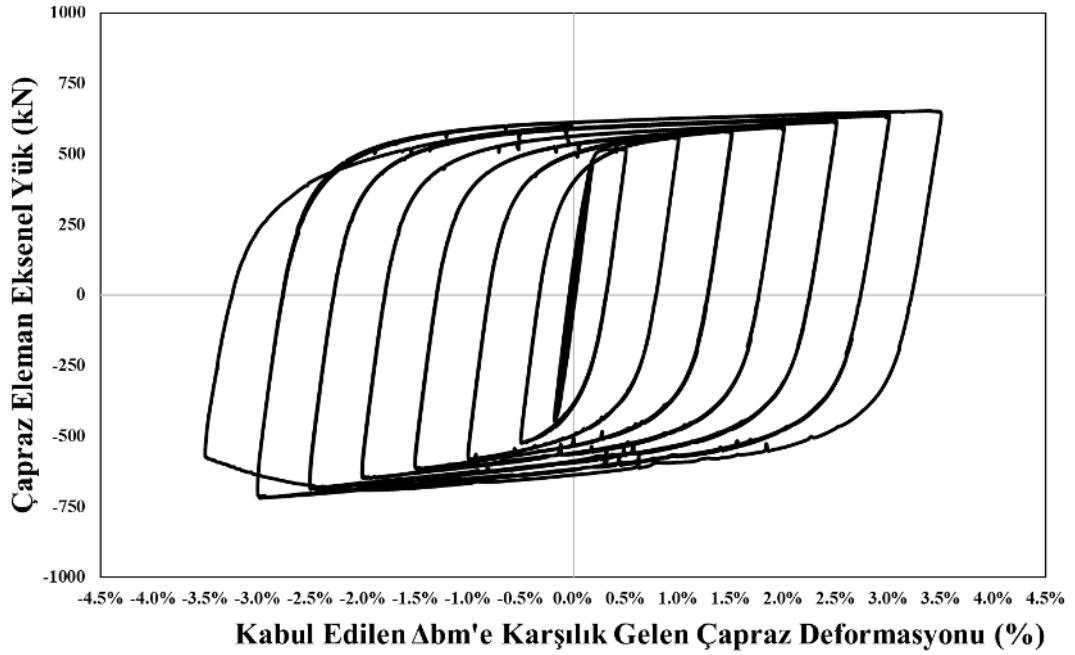
Tablo 4.28 BÖÇ-14 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	88.8	6	1377	83.8
1	229	88.3	7	1609	85.4
2	458	87.7	8	1841	87.2
3	687	85.5	9	2073	88
4	916	83.5	10	2305	89.2
5	1145	82.5	K*	1175	75.9

4.1.15. BÖÇ-15

Deneysel çalışmanın son adımı olarak, bulon aralığının 640 mm'ye çıkarıldığı BÖÇ-15 numaralı numune test edilmiştir. Bu numuneye ait histeretik davranış Şekil 4.57'de ve deney sonucu elde edilen sonuçlar Tablo 4.29'da verilmiştir.

BÖÇ-15 NUMUNESİ



Şekil 4.57 BÖÇ-15 numaralı deney numunesinin histeretik davranışı

BÖÇ-15 numaralı deney numunesi, göreceli olarak daha düşük performans göstermiş olsada YP-1 yükleme protokolünü başarıyla tamamlamıştır. BÖÇ-15 numaralı deney numunesi, 3.5 tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyon (Δb_m) seviyesinde 1. çevrimde, çekme yönüne giderken kararlı bir performans sergilemiş ancak basınç yönüne giderken BÖM'de açılma meydana gelerek taşıma kapasitesi %80'in altına düşmesi sonucu BÖÇ taşıma kapasitesini

kaybettiği kabul edilerek deney sonlandırılmıştır. Deney numunesinde gözlemlenen basınç altındaki BÖM açılması Şekil 4.58’de sunulmuştur.



Şekil 4.58 BÖÇ-15 numunesinde gözlemlenen BÖM açılması

Tablo 4.29 BÖÇ-15 numaralı deney numunesinin sonuçları

Çevrim	ED (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	β	ω	$\omega\beta$	E_h (N.m)	E_{ht} (N.m)	ζ_{eq} (%)	KPBD
Δ_{by}	4.0	477	447	0.938	1.086	1.018	3874	3874	33	0
Δ_{by}	4.0	472	436	0.922	1.076	0.992	3889	7763	34	0
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	518	522	1.008	1.179	1.189	15803	23566	43	7
$0.5\Delta_{bm}$	11.2	522	525	1.005	1.189	1.195	16181	39747	44	14
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	559	585	1.048	1.272	1.334	39213	78959	49	33
$1.0\Delta_{bm}$	22.4	564	583	1.033	1.285	1.327	39957	118916	50	51
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	580	617	1.063	1.321	1.404	64810	183726	51	81
$1.5\Delta_{bm}$	33.7	585	615	1.051	1.334	1.401	65502	249228	52	111
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	594	648	1.090	1.353	1.475	91669	340897	52	152
$2.0\Delta_{bm}$	44.9	605	649	1.072	1.379	1.479	93327	434224	53	192
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	614	682	1.111	1.398	1.553	120986	555210	53	245
$2.5\Delta_{bm}$	56.1	625	689	1.102	1.424	1.569	123526	678736	53	297
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	635	717	1.129	1.446	1.633	152873	831609	53	360
$3.0\Delta_{bm}$	67.3	646	718	1.112	1.472	1.636	154099	985708	53	423
$3.5\Delta_{bm}$	78.5	653	576	0.881	1.488	1.311	176576	1162284	58	498
Δ_{by} : BÖÇ elemanının akma deformasyonu, Δ_{bm} : tasarım kat ötelenmesine karşılık gelen çapraz deformasyonu, β : basınç dayanımı düzeltme katsayısı, ω : pekleşme etkisi düzeltme katsayısı, ED: eksenel deformasyon, E_h : sönmölen enerji, ζ_{eq} : eşdeğer sönmö oranı, KPBD: kümölatif plastik birim deformasyon										

Tablo 4.29’da göröldüğü üzere, BÖÇ-15 numaralı numune, AISC 341-22 standardında belirtilen kümölatif plastik birim deformasyon (KPBD) kapasitesinin

200'ün üzerinde olması ve basınç dayanımı düzeltme katsayısının(β) 1.5'in altında bulunması sınır koşullarını sağlamaktadır.

Deney sonrası kılıf açılarak detaylı bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Plastik deformasyon, burkulma belirtileri ve BÖM üzerindeki sürtünmeye bağlı deformasyon belirtileri mesnet bölgelerine yakın olduğu, çekirdek plakasındaki burkulma davranışı açılmanın gözlemlendiği kılıf bölgesi çevresinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Sürtünmeye bağlı deformasyon izleri Şekil 4.59'da, çekirdek plakası ve BÖM üzerinde meydana gelen hasarların fotoğrafı ise Şekil 4.60'da sunulmuştur.

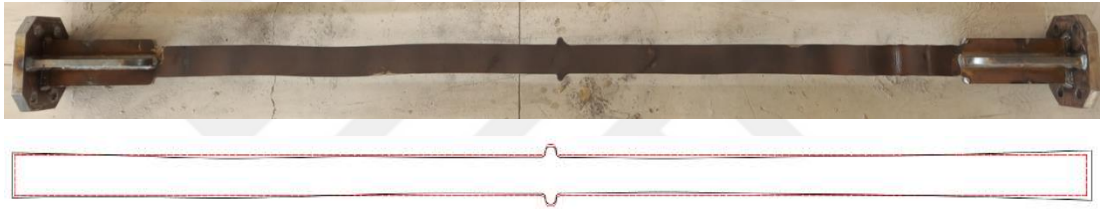


Şekil 4.59 BÖÇ-15 numunesinin sürtünmeye bağlı deformasyon izleri

Deney süresince çekirdek plakası ile mesnet bölgesindeki deplasmanlar sürekli olarak izlenmiş, deney süresince ve sonrasındaki gözlemler neticesinde, slot bölgesinde herhangi bir kayma meydana gelmediği tespit edilmiştir. Deney sonrası, çekirdek plakasının akma bölgesi 10 eşit parçaya ayrılarak, kopma bölgesindeki kalınlık değişimleri kumpas yardımıyla ölçülmüş ve deformasyona bağlı genişlik farklılıkları detaylı şekilde incelenmiştir. Genişlik farklarının 5 kat büyütülmüş hâli Şekil 4.61'de, ölçülen genişlik değerleri ise Tablo 4.30'da sunulmuştur.



Şekil 4.60 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasında meydana gelen hasarlar



Şekil 4.61 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakası fotoğrafı ve 5 kat büyütülmüş genişlik farkları (Kırmızı renk: Deney Öncesi)

Tablo 4.30 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasının deney sonrası genişlik değerleri

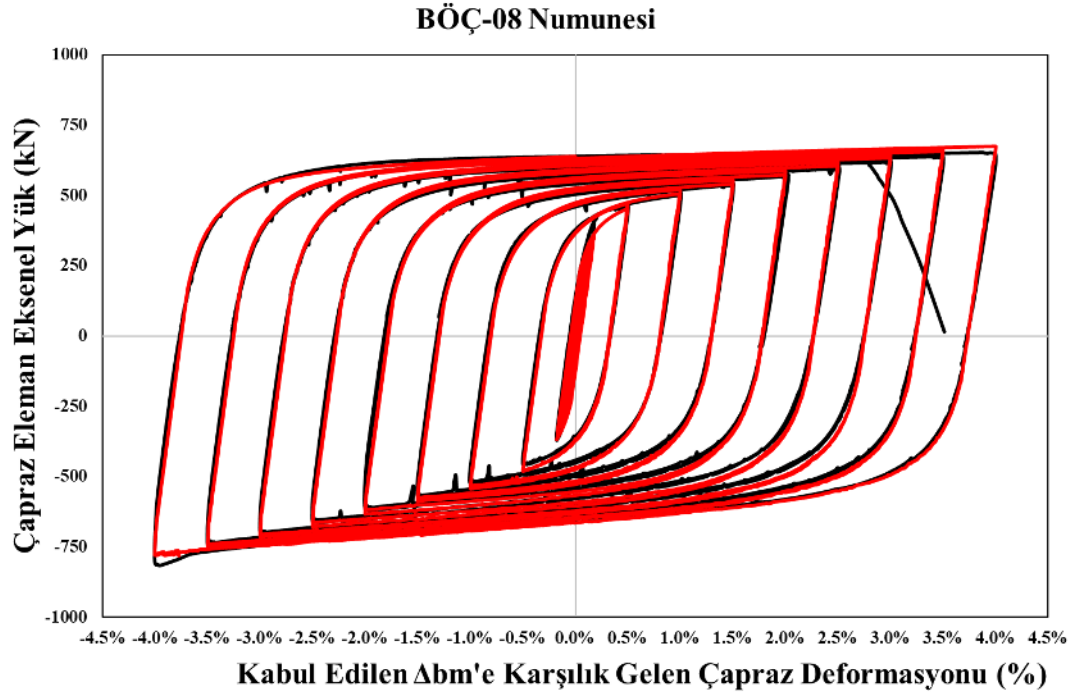
Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)	Ölçüm Noktası	Koordinat (mm)	Genişlik (mm)
0	0	87.7	6	1393	83
1	232	86.2	7	1626	84.2
2	464	85.4	8	1859	85.1
3	696	85.1	9	2092	87
4	928	84	10	2325	89.8
5	1160	84.2	K*	-	-

4.2. Nümerik Bulgular

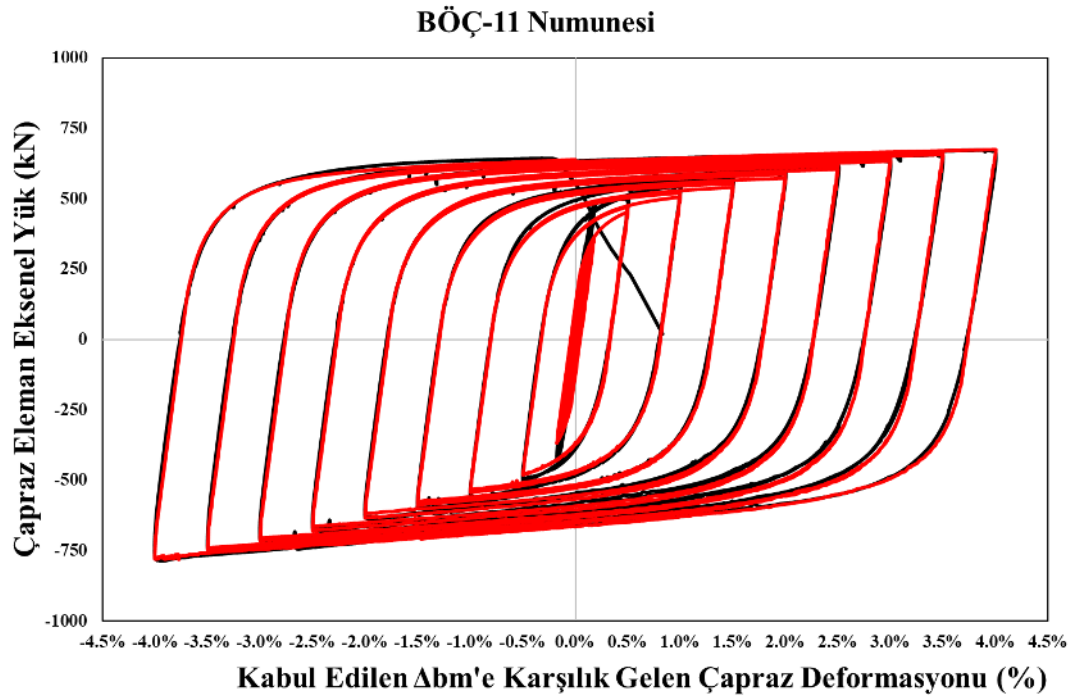
Nümerik çalışma bulguları, deneyi yapılan numunelerin sonlu elemanlar yöntemi kullanan bilgisayar ortamında deneysel davranışı simülasyon bulguları ve BÖM optimizasyonu bulguları şeklinde iki alt başlık halinde sunulmuştur.

4.2.1. Deneysel Davranış Simülasyonu Bulguları

Bölüm 3.2.1'e göre ABAQUS programında modellenerek malzeme özellikleri tanımlanan ve analizleri gerçekleştirilmiş olan numunelerin histeretik davranışları ve deneysel numune histeretik davranışları karşılaştırılmıştır.

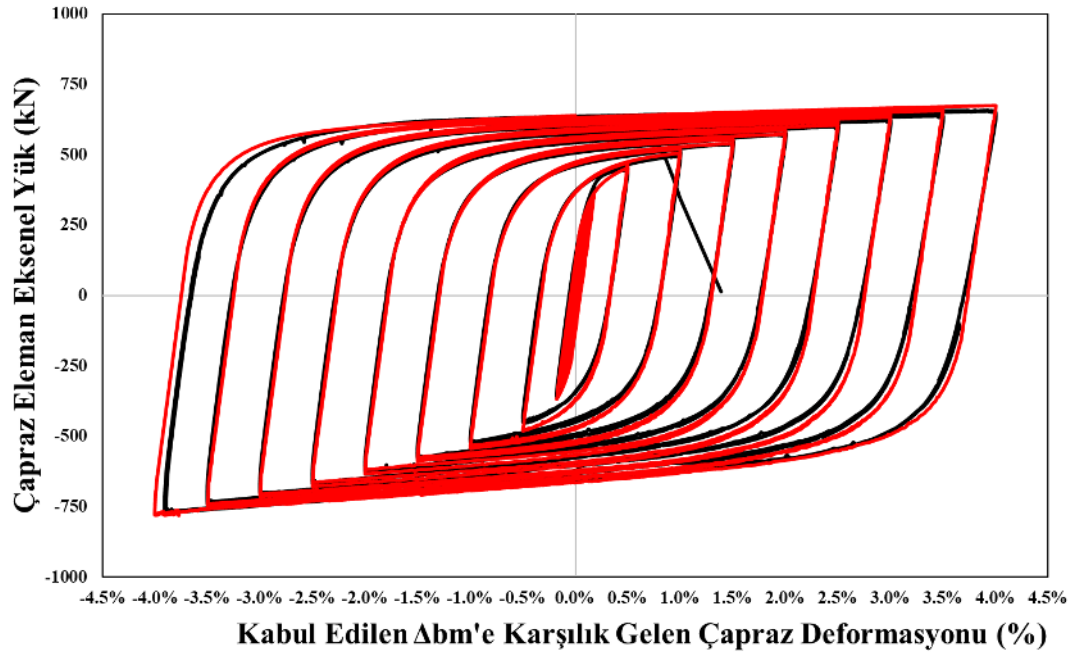


Şekil 4.62 BÖÇ-08 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı



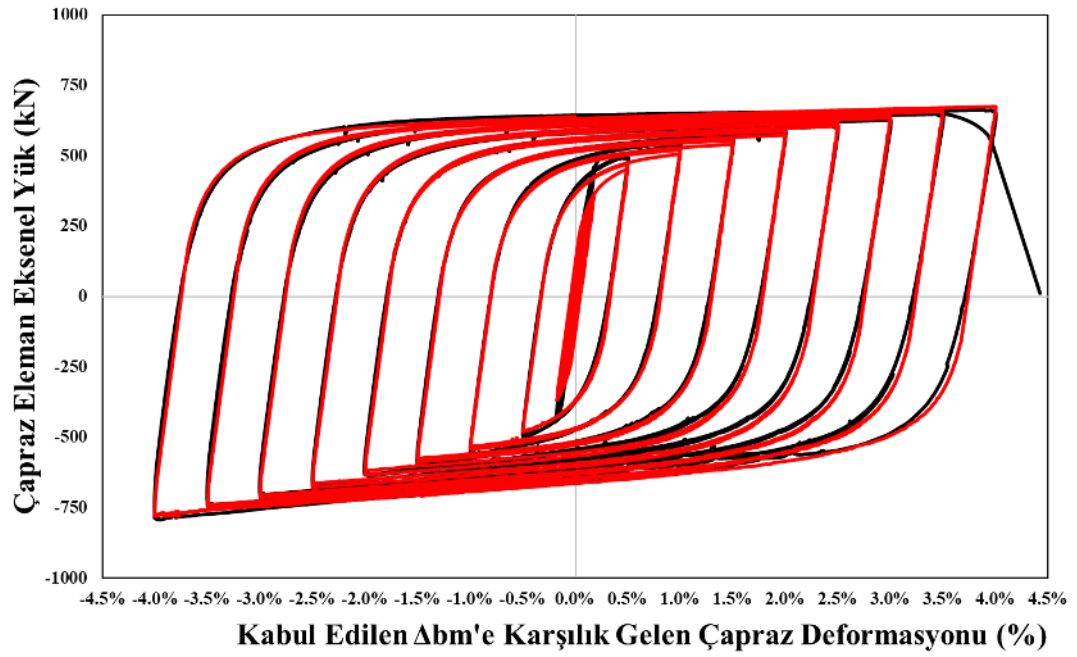
Şekil 4.63 BÖÇ-11 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı

BÖÇ-12 Numunesi



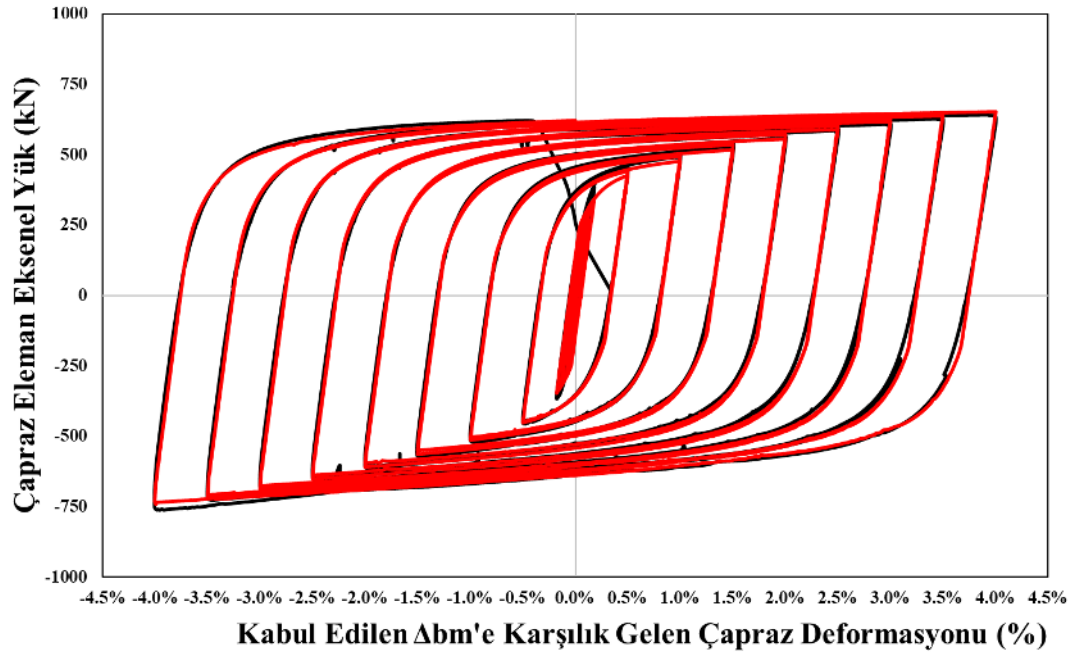
Şekil 4.64 BÖÇ-12 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı

BÖÇ-13 Numunesi



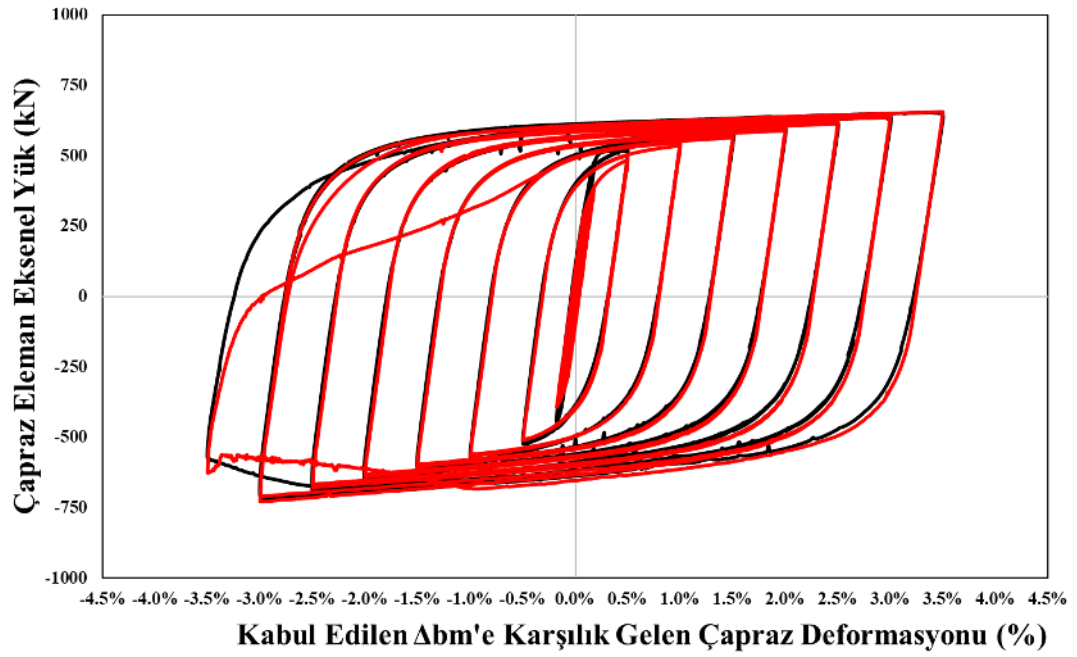
Şekil 4.65 BÖÇ-13 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı

BÖÇ-14 Numunesi



Şekil 4.66 BÖÇ-14 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı

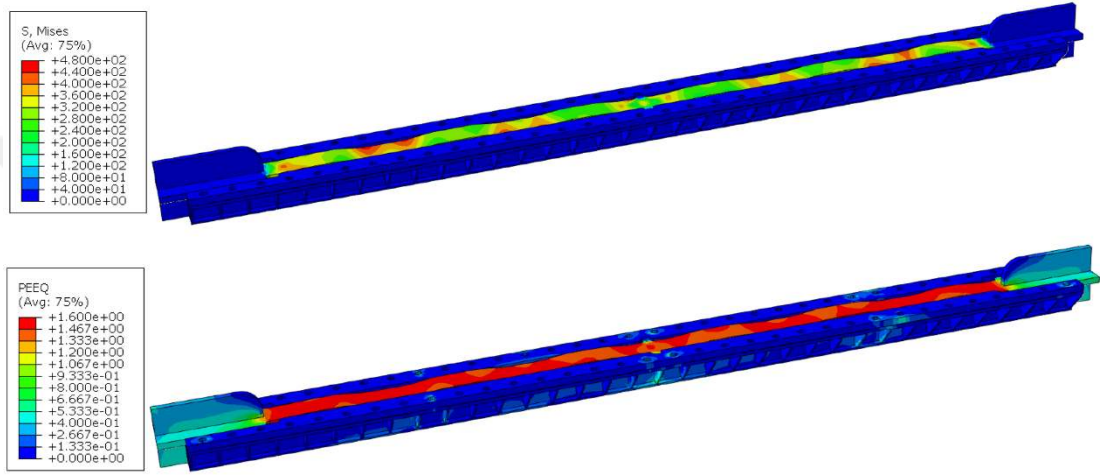
BÖÇ-15 Numunesi



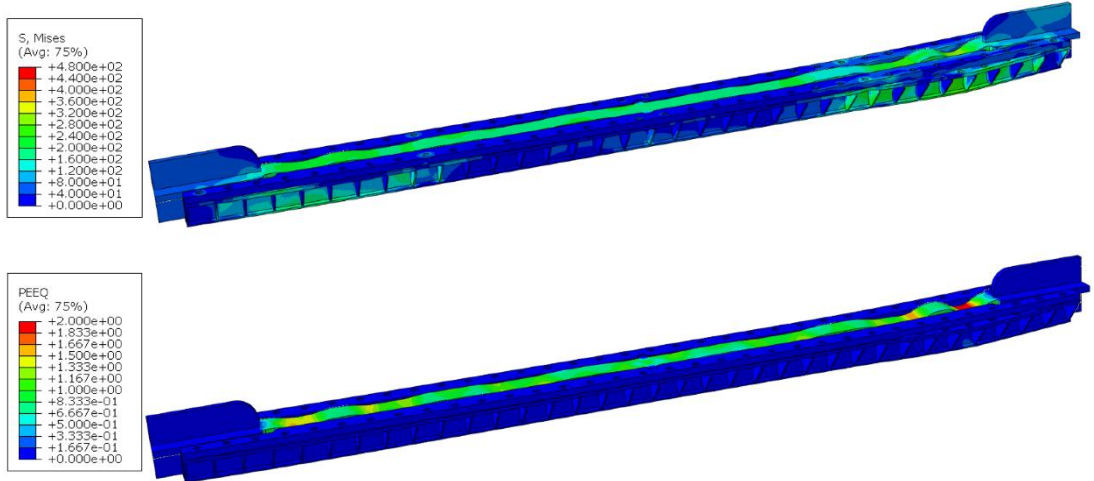
Şekil 4.67 BÖÇ-15 Numunesinin deneysel(siyah) ve nümerik(kırmızı) davranışı

Simülasyon bulgularının deneysel davranış ile karşılaştırılması için histeretik eğrilerin kapsayıcılık analizi yapılmıştır. BÖÇ-11 ve BÖÇ-13 numuneleri %100'lük tam bir uyum göstermiştir. BÖÇ-08 ve BÖÇ-12 numuneleri ~%98'lik bir doğruluk oranı yakalarken, BÖÇ-14 ve BÖÇ-15 numuneleri için bu oranlar sırasıyla ~%96 ve ~%92 olarak hesaplanmıştır.

Nümerik analizlerden elde edilen detaylı sonuçlar kapsamında, tipik bir çekirdek plakasına ait von-Mises gerilme dağılımı ve plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler Şekil 4.68 ve 4.69'da sunulmuştur.

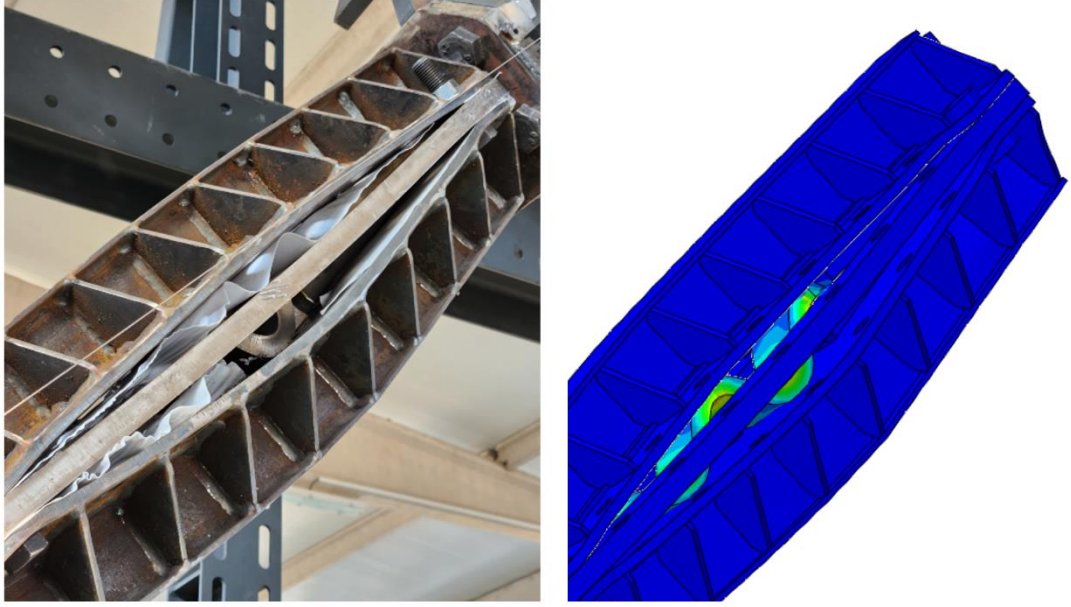


Şekil 4.68 BÖÇ-01~BÖÇ-14 numunelerine ait tipik çekirdek plakası von-Mises gerilme dağılımı plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler



Şekil 4.69 BÖÇ-15 numunesinin çekirdek plakasına ait von-Mises gerilme dağılımı plastik deformasyonun yoğunlaştığı bölgeler

Ayrıca, nümerik modelin doğrulanması amacıyla, BÖÇ-15 numunesinin deney sırası ve sonrasındaki deformasyonları ile analizden elde edilen deformasyon şeklinin karşılaştırmalı görsellerine Şekil 4.70 ve 4.71'te yer verilmiştir.



Şekil 4.70 Deney sırasındaki deformasyonları ile analizden elde edilen deformasyon şeklinin karşılaştırmalı görseli



Şekil 4.71 Deney sonrasındaki deformasyonları ile analizden elde edilen deformasyon şeklinin karşılaştırmalı görseli

4.2.2. Burkulmayı Önleyen Mekanizma Optimizasyonu Bulguları

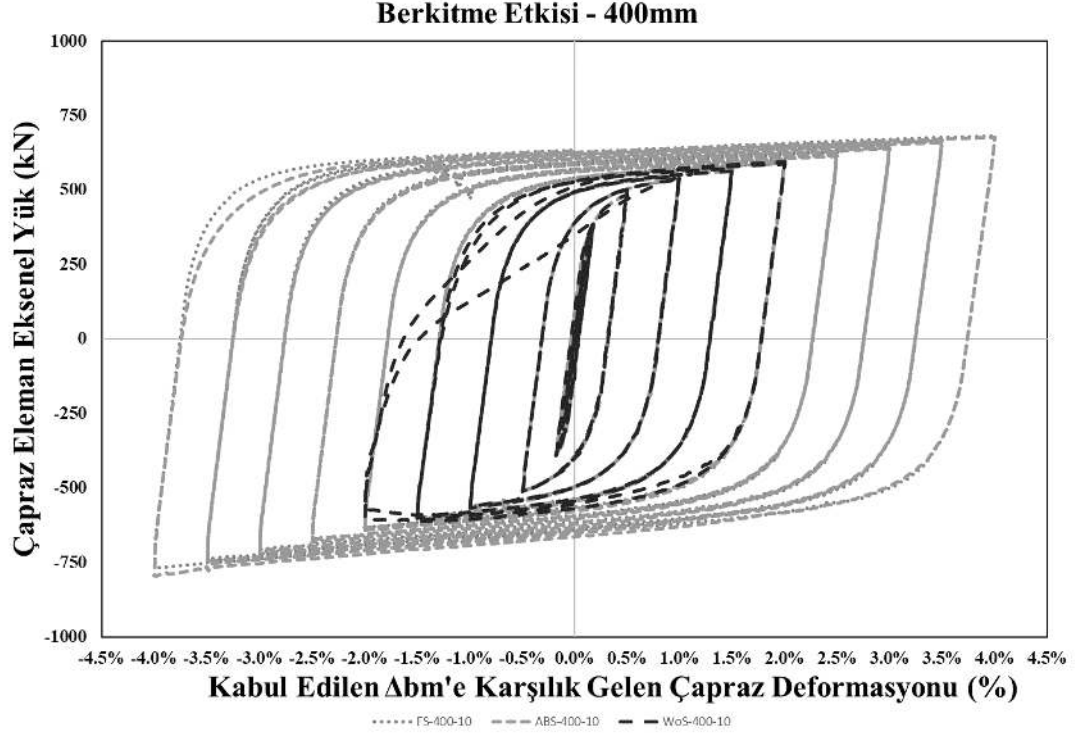
Bölüm 3.2.2’de detaylandırılan değişkenlere göre ABAQUS programında gerçekleştirilen nümerik analizler, iki farklı göçme senaryosunun ortaya çıkabileceğini göstermiştir. Gözlemlenen ilk göçme modu, kılıfın açılmasıyla birlikte basınç kapasitesinin %80’in altına düşmesidir. İkinci göçme modu ise, basınç kapasitesi korunsada, elemanın çekme yönüne geçişi sırasında histeretik çevrimde 'daralma' (pinching) meydana gelmesidir. Bu boğumlanma durumu, çevrim başına sönümlenen enerjiyi azalttığı için bir performans kaybı ve dolayısıyla göçme olarak kabul

edilmiştir. Tüm parametrik analizlerin sonuçları, ulaşılan performans seviyeleri/kapasiteleri ve bu göçme modları Tablo 4.31'de verilmiştir.

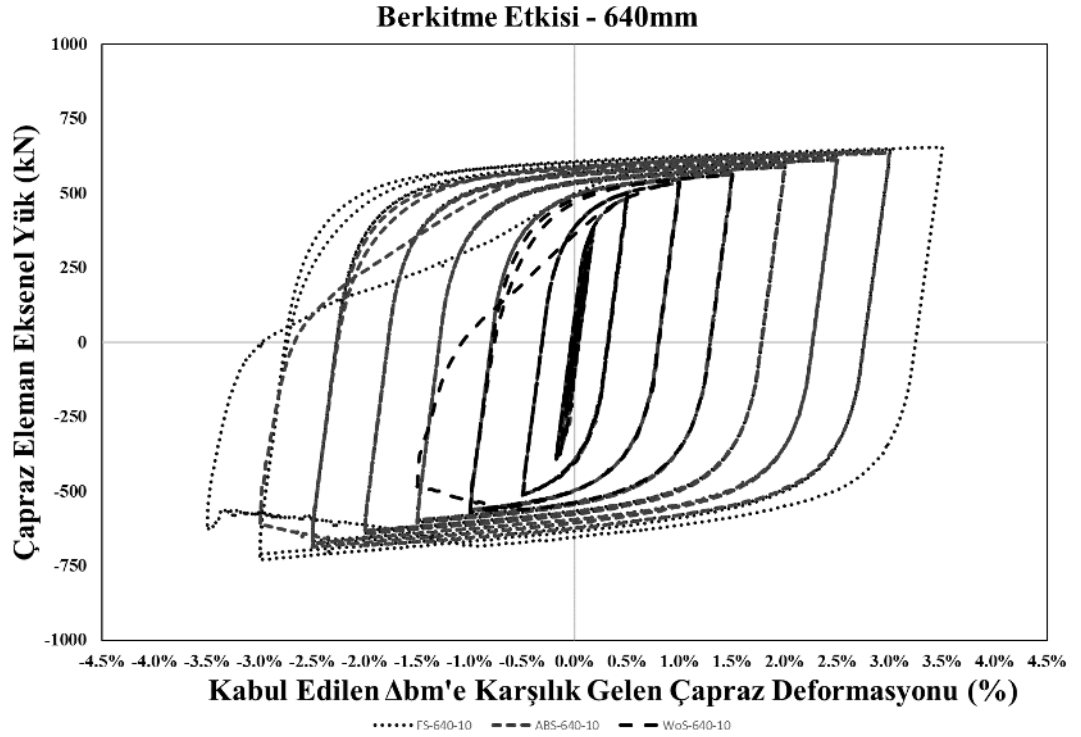
Tablo 4.31 Analiz değişken parametrelerine bağlı göçme tipleri ve performans seviyeleri/kapasiteleri

Numune Adı	Berkitme Durumu	Bulon Aralığı	Taban Plaka Kalınlığı	BÖM Ağırlığı	Göçme Tipi	Kapasite
		(mm)		(kg)		
FS-80-10	Tamamında	80	10	91.3	-	4.0 Δ bm - 2
FS-160-10		160		91.3	-	4.0 Δ bm - 2
FS-240-10		240		91.3	-	4.0 Δ bm - 2
FS-320-10		320		91.3	-	4.0 Δ bm - 2
FS-400-10		400		91.3	-	4.0 Δ bm - 2
FS-640-10		640		91.3	Basınç kapasitesi	3.5 Δ bm - 1
ABS-80-10	Bulon Çevresi	80	10	91.3	-	4.0 Δ bm - 2
ABS-160-10		160		91.3	-	4.0 Δ bm - 2
ABS-240-10		240		88.1	-	4.0 Δ bm - 2
ABS-320-10		320		86.2	-	4.0 Δ bm - 2
ABS-400-10		400		85.6	-	4.0 Δ bm - 2
ABS-640-10		640		83.6	Basınç kapasitesi	3.0 Δ bm - 1
WoS-80-10	Berkitme-siz	80	10	80.1	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-160-10		160		80.1	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-240-10		240		80.1	Daralma/Boğumlanma	3.5 Δ bm - 1
WoS-320-10		320		80.1	Daralma/Boğumlanma	3.0 Δ bm - 2
WoS-400-10		400		80.1	Daralma/Boğumlanma	2.0 Δ bm - 2
WoS-640-10		640		80.1	Basınç kapasitesi	1.5 Δ bm - 1
WoS-80-15	Berkitme-siz	80	15	103.25	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-160-15		160		103.25	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-240-15		240		103.25	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-320-15		320		103.25	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-400-15		400		103.25	-	4.0 Δ bm - 2
WoS-640-15		640		103.25	-	4.0 Δ bm - 2

Nümerik analiz sonuçları, 80 mm ve 160 mm bulon aralığına sahip BÖM konfigürasyonlarının, incelenen tüm senaryolarda yüksek performans sergilediğini ortaya koymuştur. Berkitme plakası yerleşiminin histeretik davranış üzerindeki etkisi, özellikle bulon aralığının arttığı 400 mm ve 640 mm'lik modellerde belirgin hale gelmiştir. Bu iki model grubuna ait karşılaştırmalı histeretik eğriler Şekil 4.72 ve 4.73'te sunulmuştur.

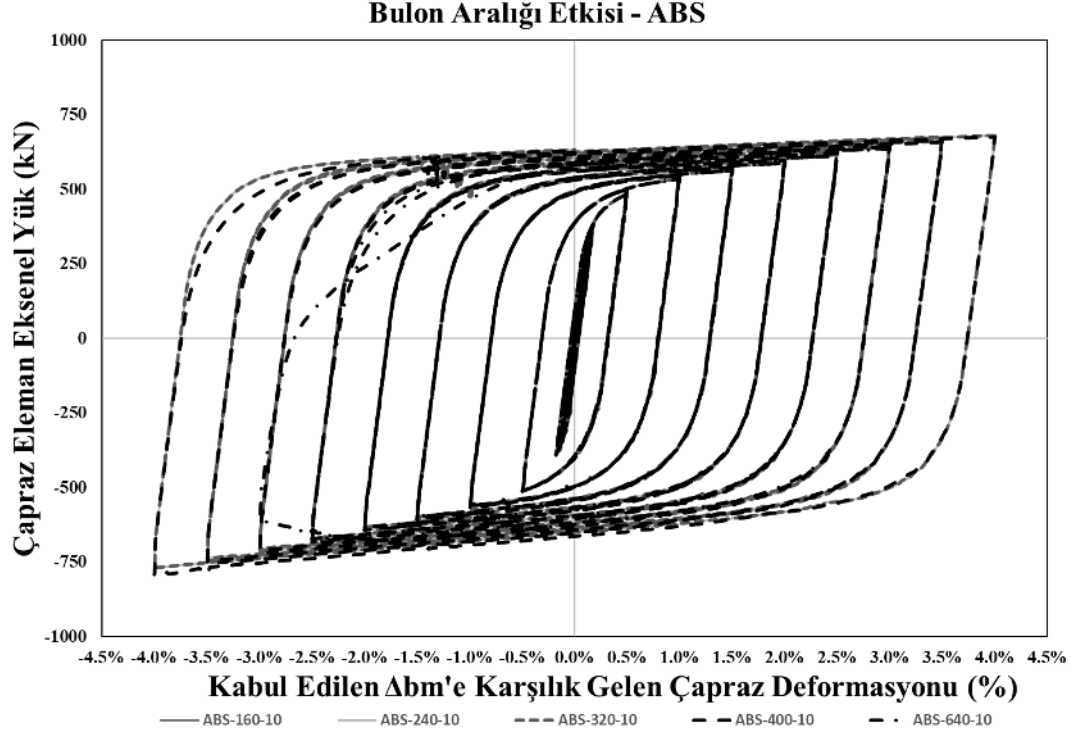


Şekil 4.72 Berkitme etkisinin histeretik davranış üzerindeki etkileri – 400mm

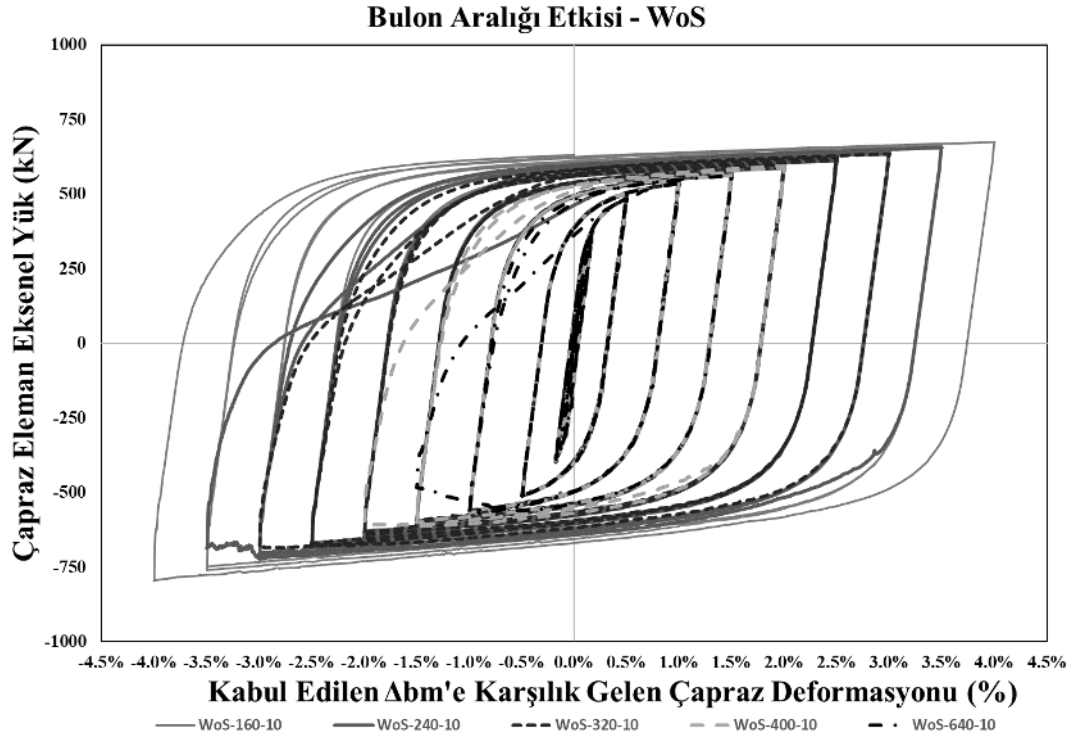


Şekil 4.73 Berkitme etkisinin histeretik davranış üzerindeki etkileri – 640mm

Parametrik çalışmada incelenen değişkenlerden Bulon aralığının genel performansa etkisi Şekil 4.74 ve 4.75'te verilmiştir.

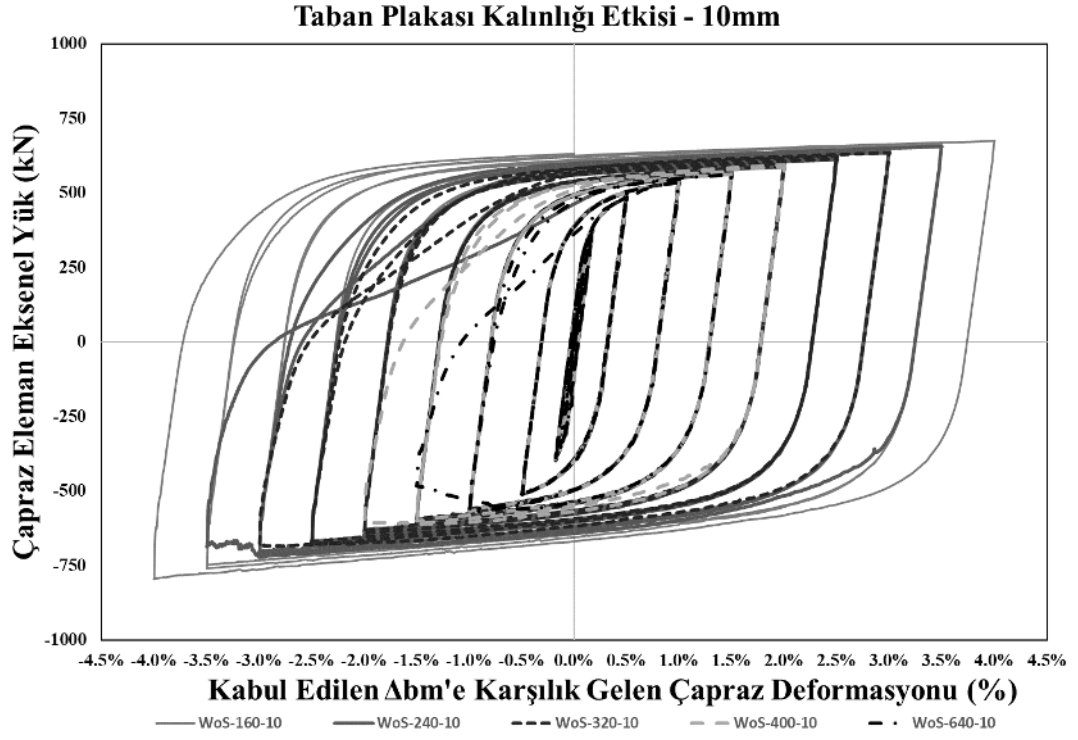


Şekil 4.74 Bulon aralığının histeretik davranış üzerindeki etkileri - ABS

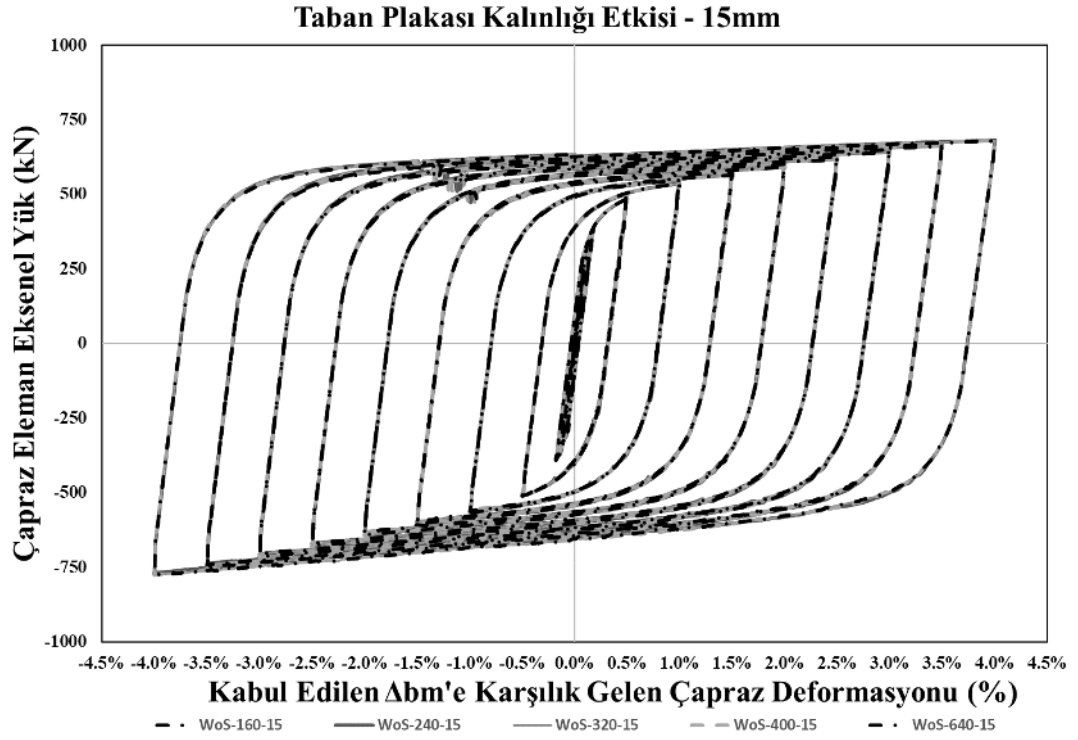


Şekil 4.75 Bulon aralığının histeretik davranış üzerindeki etkileri -WoS

Parametrik çalışmada incelenen değişkenlerden taban plakası kalınlığının histeretik performansa etkisi ise Şekil 4.76 ve 4.77'de verilmiştir.



Şekil 4.76 Taban plakası kalınlığının histeretik davranış üzerindeki etkileri – 10mm



Şekil 4.77 Taban plakası kalınlığının histeretik davranış üzerindeki etkileri – 15mm

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, tamamı çelik malzemeden oluşan burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) çekirdek plakasının değiştirilebilirliği ve burkulmayı önleyen mekanizmanın (BÖM) yeniden kullanılabilirliği, deneysel ve nümerik bir araştırma programı ile incelenmiştir. Deneysel çalışma sonucu elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

- İncelenen tüm numuneler, AISC 341-22'de tanımlanan en düşük %2 eksenel birim şekil değiştirme sınırın iki katı olan %4 eksenel birim şekil değiştirme seviyesine kadar kararlı ve simetrik bir histeretik davranış göstermiştir.
- Kümülatif plastik birim deformasyon kapasitesi, AISC 341-22'de tanımlanan en düşük 200 şartını aşarak, BÖÇ-01/BÖÇ-12 için 744, BÖÇ-15 için 498 ve diğer numuneler için 643 olarak elde edilmiştir.
- Elde edilen deneysel sonuçlara göre, AISC 341-22 yeterlilik sınırı olan %2 eksenel birim şekil değiştirme seviyesinde gözlemlenen maksimum basınç dayanım düzeltme katsayısı (β) 1.122, maksimum pekleşme etkisi düzeltme katsayısı(ω) 1.379 ve bu iki değer çarpımı ($\beta\omega$) 1.479 olarak ölçülmüştür. Deneylerin ulaştığı nihai deformasyon seviyesi olan %4 (BÖÇ-15 için %3.5) eksenel birim şekil değiştirmede ise bu katsayılar sırasıyla 1.366, 1.536 ve 2.020 olarak hesaplanmıştır.
- Numunelerin toplam enerji sönmleme kapasiteleri, BÖÇ-01/BÖÇ-12 için yaklaşık 1.8 MJ ve diğerleri için 1.5 MJ olarak ölçülmüştür. Elde edilen eşdeğer viskoz sönm oranı ise %51-%52 bandında seyretmektedir.
- Tüm testler sonucunda çelik burkulmayı önleyen mekanizmaların(BÖM) ve bağlantı plakalarının yeniden kullanıma uygun olduğu doğrulanmıştır. Bununla birlikte, çekirdek ile kılıf arasındaki sürtünme nedeniyle 0.5 mm'lik ayırıcı Teflon plakanın hasar gördüğü ve çekirdek değiştirilirken bu plakanın da yenilenmesi gerektiği tespit edilmiştir.

Nümerik çalışma sonucu elde edilen başlıca sonuçlar ise aşağıda listelenmiştir:

- Deneysel davranışın simüle edilmesi amacıyla geliştirilen sonlu elemanlar modeli, numunelerin tepe yüklerini ve genel çevrimsel davranışını başarılı bir şekilde temsil etmiştir. Deneysel ve nümerik histeretik eğriler üzerinde yapılan

kapsayıcılık analizi, iki sonuç arasında %92 ila %100 aralığında bir uyum olduğunu ortaya koymuş, bu da geliştirilen modelin geçerliliğini doğrulamıştır.

- Berkitme plakası sayısının azaltılmasının, BÖM'ün global burkulma talebini artırarak histeretik çevrimde daralmaya yol açtığını göstermiştir. Bu etki berkitmesiz (WoS) modellerde daha belirgin olmasına rağmen, sadece bulon çevresine (ABS) berkitme eklenmesinin yüksek seviyede performans kazanımı sağladığı saptanmıştır.
- BÖM taban plakası 10 mm'den 15 mm'ye çıkarıldığı durumda bütün bulon aralıklarında yüksek performans göstermiştir.
- Bulon aralığının 400 mm'den 640 mm'ye artırılması, basınç kapasitesinde yerel burkulmaya bağlı yüksek düşüşlere neden olmuş (özellikle FS ve ABS tiplerinde); bu da BÖM stabilitesi için taban plakası kalınlığının önemini bir kez daha vurgulamıştır.

Sonuç olarak, yürütülen deneysel çalışmalar sonucunda önerilen değiştirilebilir çekirdekli, tamamı çelik yenilenebilir BÖÇ konseptinin sismik performansını kanıtlamıştır. Elemanların, hem ilk kullanımlarında hem de çekirdek değiştirildikten sonraki ikinci kullanımlarında AISC 341-22 gerekliliklerini karşıladığı gösterilerek, çekirdek plakasının değiştirilebilirliği ve BÖM ile bağlantı plakalarının yeniden kullanılabilirliği fikri doğrulanmıştır.

Ayrıca yürütülen nümerik çalışmalar sonucunda minimum işçilik, düşük maliyet, hafif ve hasarsız performans kriterlerini karşılayan "ABS-400-10" modeli optimum çözüm olarak öne çıkmıştır. Ancak, işçilik kalitesinin düşük olabileceği saha uygulamalarında, yeterli sismik performansı sağlamak için daha güvenli bir tercih olacak optimum tasarımdan %20.6 daha ağır olan 15 mm taban plakasının kullanımı önerilmektedir.

KAYNAKLAR

American Institute of Steel Construction (AISC) 2005, "Seismic provisions for structural steel buildings" AISC 341-05.

American Institute of Steel Construction (AISC) 2010, "Seismic provisions for structural steel buildings" AISC 341-10.

American Institute of Steel Construction (AISC) 2016, "Seismic provisions for structural steel buildings" AISC 341-16.

American Institute of Steel Construction (AISC) 2022, "Seismic provisions for structural steel buildings" AISC 341-22.

Avci-Karataş, C., Çelik, O. C. 2013 "Cyclic Testing of Aluminum Alloy Core Buckling Restrained Braces", 10th International Conference on Urban Earthquake Engineering (10th CUEE Conference), March 1-2, 2013, Tokyo, Japan.

Avci-Karataş, C. and Çelik, O. C. 2014 "Cyclic Testing of Steel-Core Buckling Restrained Braces (BRBs) having Simple End Details and Infilled with High Strength Grout", Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering, July 21-29, Anchorage, Alaska, USA.

Avci-Karataş, C., Çelik, O. C. 2017 "Alüminyum alaşımlı çekirdekli burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) tasarımı üretimi ve yön değiştiren tekrarlı yükler etkisindeki davranışı", Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(6), 659-670.

Avci-Karatas, C., Celik, O. C., Yalcin, C. 2018. "Experimental Investigation of Aluminum Alloy and Steel Core Buckling Restrained Braces (BRBs)", International Journal of Steel Structures, 18, 650-673.

Avci-Karataş, C., Çelik, O. C. 2019a "Çelik Çekirdekli Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) Tasarımı, Üretimi ve Deneysel İncelenmesi", Teknik Dergi, 8861-8886, Yazı 526.

Avci-Karatas, C., Celik, O. C., Eruslu, S. O. 2019b. "Modeling of Buckling Restrained Braces (BRBs) using Full-Scale Experimental Data", KSCE Journal of Civil Engineering, 23, 4431-4444.

Bai, J., Chen, H., Ma, G., Duan, L. 2022. "Development of a four-tube-assembled buckling-restrained brace for convenient post-earthquake damage examination.

Bozkurt, M. B., Topkaya, C. 2016. "Development of Welded Overlap Core Steel Encased Buckling-Restrained Braces", Journal of Constructional Steel Research, 127: 151-164.

Cao, X. Y., Feng, D. C., Wu, G., Zeng, Y. H. 2020. "Reusing & replacing performances of the AB-BRB with thin-walled concrete-infilled steel shells", *Thin-Walled Structures*, 157, 107069.

Cahis, X., Catalan, A., Benavent-Climent, A., Trias, D. 2023. "A new coplanar dual core buckling-restrained brace". *Journal of Building Engineering*, 70 (2023) 106286.

Chaboche, J.L. 1986. "Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity." *International Journal of Plasticity*, 2(2), 149-188.

Chaboche, J.L. 1989. "Constitutive Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity." *International Journal of Plasticity*, 5(3), 247-302

Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (2018), Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

Dehghani M., Tremblay R., Design and full-scale experimental evaluation of a seismically endurant steel buckling-restrained brace system, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 47 (2017) 105–129.

Eryaşar E, 2009 "Experimental and numerical investigation of buckling restrained braces" Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey.

Eryaşar E, Topkaya C. 2010 "An experimental study on steel-encased buckling-restrained brace hysteretic dampers" *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39: 561-581.

EN 15129: The European Standard on Anti-seismic Devices. 2018. European Standard, Comit Européen de Normalisation, Brussels, 2018.

Fahnestock L, Ricles JM, and Sause R. 2007 "Experimental evaluation of a large-scale buckling-restrained braced frame" *Journal of Structural Engineering*, 2007; 133: 1205-1214.

Huang, F., Duan, H., Cheng, B., Teng, N. 2021. "Hysteretic performance of all-steel assembled double-cores buckling-restrained braces using Q195 low-yield core". *Journal of Constructional Steel Research*, 187 (2021) 106925.

Kim DH, Lee CH, Ju YK and Kim SD. 2015 "Subassembly test of buckling-restrained braces with H-shaped steel core" *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 24: 243-256.

Ma, N., Ou, J.P., and Li, H. 2012. "Experimental Study of Low-yield Strength Steel Buckling Restrained Brace." *Proceedings of 15 WCEE*, Lisbon, Portugal.

Ma, N., Wu, B., Li, H., Ou, J., and Yang, W. 2009. "Full scale tests of all-steel buckling restrained braces." *Proceedings of SPIE*, Vol. 7288 728825-2.

Metelli G, Bregoli G, Genna F 2016 "Experimental study on the lateral thrust generated by core buckling in bolted-BRBs." *J Constr Steel Res* 122: 409–420.

Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B. 2015a "Farklı Burkulmayı Engelleyen Mekanizmaya Sahip Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazlar", 3. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı, İZMİR, TÜRKİYE, 14-16 Ekim 2015, ss.1-9

Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B. 2015b "Yeni Nesil Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Histeretik Davranışları", 6. Çelik Yapılar Sempozyumu, ESKİŞEHİR, TÜRKİYE, 9-11 Aralık 2015, ss.329-340

Özçelik R., Dikiciaşık Y., Civelek K.B. 2015c "Burkulması Engellenmiş Çelik Çaprazların Uç Stabilitelerinin Arttırılması", XIX. Ulusal Mekanik Kongresi, TRABZON, TÜRKİYE, 24-28 Ağustos 2015, ss.1-9

Piedrafita D, Cahis X, Simon E, Comas J. 2013 "A new modular buckling restrained brace for seismic resistant buildings" Engineering Structures, 2013; 56: 1967-1975.

Piedrafita D, Cahis X, Simon E, Comas J. 2015 "A new perforated core buckling restrained brace" Engineering Structures, 2015; 85: 118-126.

Q. Chen, C.-L. Wang, S. Meng, B. Zeng, 2016 "Effect of the unbonding materials on the mechanic behavior of all-steel buckling-restrained braces.", Eng. Struct. 111: 478–493

Qu, B., Liu, X., Hou, H., Qui, C. 2018. "Testing of Buckling-Restrained Braces with Replaceable Steel Angle Fuses", Journal of Structural Engineering, 144 (3).

Sutcu, F., Bal, Takeuchia, T., Matsui, R. 2014. "Seismic retrofit design method for RC buildings using buckling-restrained braces and steel frames", Journal of Constructional Steel Research, 101, 304-313.

Tremblay R, Bolduc P, Neville R, and Devall R. 2006 "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems" Canadian Journal of Civil Engineering, 33: 183-198.

Tsai, K., C., Lai, J., W., Hwang., Y., C., Lin, S., L., Weng, C.H., 2004 "Research and Application of Double-Core Cuckling Restrained Braces in Taiwan" Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver-Canada, pn: 2179.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, TBDY-2018. 2018. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. Ankara.

Uang C, and Nakashima M. 2004 "Steel buckling-restrained braced frames" In Earthquake Engineering from Engineering Seismology to Performance Based Engineering, CRC Press.

Usami T, Ge H, Kasai A. 2008 "Overall buckling prevention condition of buckling restrained braces as a structural control damper.", 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Usami T, Wang CL, Funayama J. 2012 “Developing high-performance aluminum alloy buckling- restrained braces based on series of low- cycle fatigue tests” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41: 643-661.

Wada, A., Saeki, E., Takeuchi, T., Watanabe, A., C., 1998 “Development of Unbonded Brace, Nippon Steel's Unbonded Braces” Nippon Steel Corporation Building Construction and Urban Development Division, Tokyo-Japan, pp: 1-16.

Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Yogoyama. H., Morisono, T. 1973. “Experimental study on the elastoplastic behavior of braces enclosed by precast concrete panels under horizontal cyclic loading – Parts 1 & 2.”, Kinki Branch of Architectural Institute of Japan.

Watanabe A, Hitomi Y, Saeki E, Wada A, and Fujimoto, M. 1988 “Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube” *Proceedings, 9th World Conference on Earthquake Engineering*, vol. IV.

Wu AC, Lin PC and Tsai KC. 2014 “High-mode buckling responses of buckling-restrained brace core plates” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 43: 375-393.

Wu, K., Wei, G., Zhang, L., Yu, W., & Lan, X. (2025). Experimental Study on the Seismic Behavior of All-Steel Buckling-Restrained Braces Without an Unbonded Material Layer. *Buildings*, 15(10), 1626. <https://doi.org/10.3390/buildings15101626>

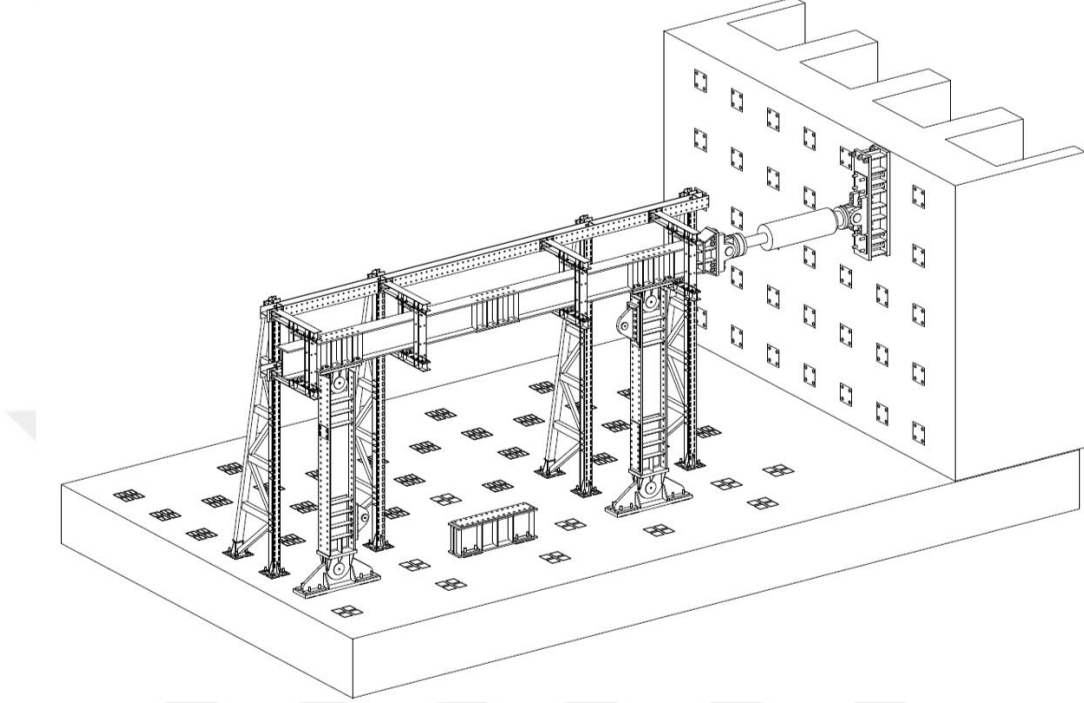
Xie Q. 2005 “State of the art of buckling-restrained braces in Asia” *Journal of Constructional Steel Research*, 61: 727-748.

Yuan, Y., Zhao, Y., Wang, C., Zeng, B. 2024. “Development and experimental study of a new dual tee-section buckling-restrained brace”. *Thin-Walled Structures*, 198 (2024) 111694.

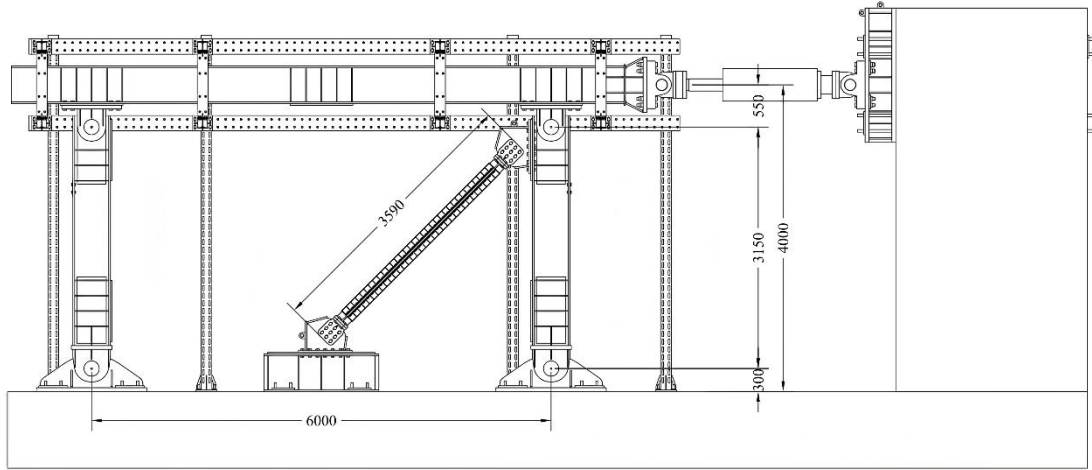
Zhao J, Wu B and Ou J. 2010 “A novel type of angle steel buckling-restrained brace: Cyclic behavior and failure mechanism” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40: 1083-1102.

EKLER

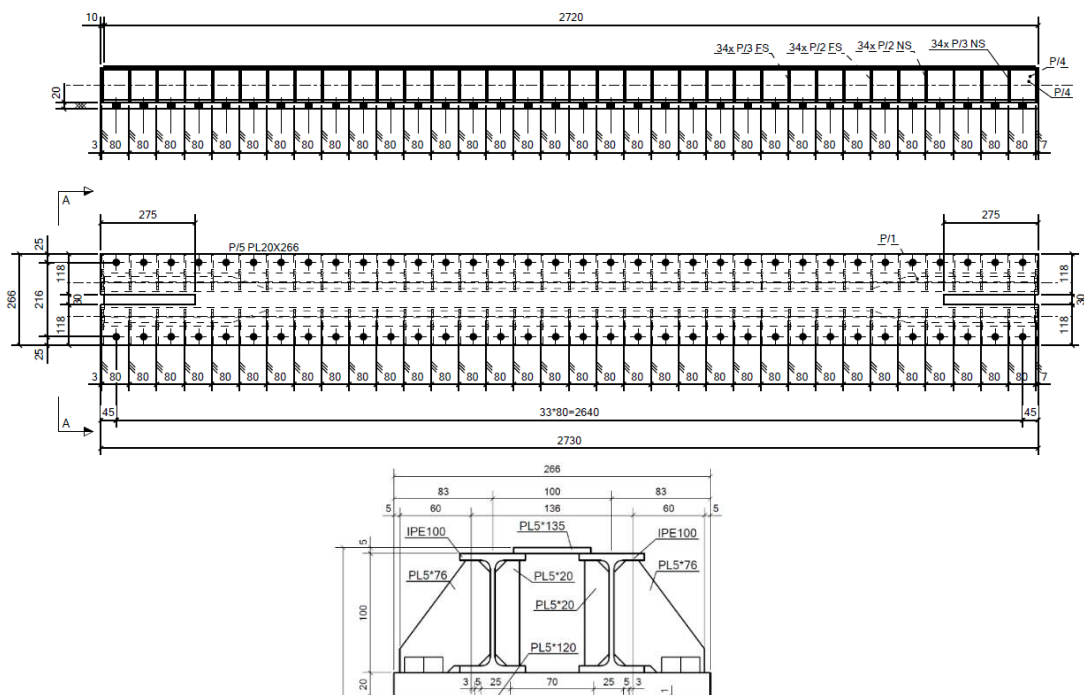
EK-1: Genel, İmalat ve Parça Resimleri



Deney düzeneği izometrik görünüşü



Deney düzeneği kesit görünüşü



EK-2: Kupon çekme testi sonuçları

Numune Adı	Kalınlık	Genişlik	İlk Boy
Birim	mm	mm	mm
18-1	18,02	24,40	210,0
18-2	18,02	24,40	210,0
18-3	18,05	24,50	210,0
18-4	18,08	24,55	210,0

İsim	Akma Gerilmesi	Maks Kuvvet	Maks Gerilme	Yüzde Uzama
Parametreler	0,2 %	Tüm Alan	Tüm Alan	Hassasiyet: 10
Birim	N/mm2	N	N/mm2	%
18-1	271,9	186642,9	424,5	31,6
18-2	341,3	203666,4	463,2	26,2
18-3	271,8	185671,5	419,9	30,8
18-4	304,5	193418,2	435,8	30,9

