

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ÇEKİRDEKLİ
BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN (BÖÇ) TASARIMI, ÜRETİMİ
VE YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

Çiğdem KARATAŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

ARALIK 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ÇELİK VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ÇEKİRDEKLİ
BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN (BÖÇ) TASARIMI, ÜRETİMİ
VE YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI**

DOKTORA TEZİ

**Çiğdem KARATAŞ
(501012019)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK

ARALIK 2012

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 501012019 numaralı Doktora Öğrencisi **Çiğdem KARATAŞ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**ÇELİK VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ÇEKİRDEKLİ BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN (BÖÇ) TASARIMI, ÜRETİMİ VE YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Oğuz Cem ÇELİK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Engin ORAKDÖĞEN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Cem YALÇIN
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Ercan YÜKSEL
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Z. Canan GİRGİN
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **2 Temmuz 2012**
Savunma Tarihi : **19 Aralık 2012**

*Biricik eşim Mehdi ve canım oğlum Aziz Emir,
Annem , babam, kardeşim, Nehir, Hasan, İlknur,*

Olmassa olmazlarım...

*Baştacım Prof.Dr.Oğuz Cem elik,
Değerli hocam Doç.Dr. Cem Yalçın,
Doktora yol haritamda ustam, yol arkadaşım İnş.Yük.Müh. Cem Haydaroğlu,
İMTAş Yapısal elik Grubu Md. Yrd. İnş. Müh ağlan etinkaya,
Canım arkadaşlarım Yrd.Doç.Dr. S. Özmen Eruslu, İnş.Yük Müh. Bahri Özdemir,
Doktorada dönüm noktası değerli hocam Prof.Dr.Reha Artan,
Rahmetle andığım değerli hocam Prof.Dr. Tevfik Seno Arda,
Makina Mühendisi Davut Belkızıoğlu,
Grafiker Hasan Güner,*

ÖNSÖZ

Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BÖÇ), bir tür mekanik sönümleyiciler olup önemli depremlerde çekmede ve basınçta akarak dengeli bir histeretik davranış gösterirler. Tezin ana amacı BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemlerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki elastik ve elastik olmayan davranışını deneysel ve kuramsal olarak incelenmesidir. Deneysel bölümde, aynı akma dayanımlı, 5'i çelik, 3'ü alüminyum alaşımlı malzemeden üretilen toplam 8 adet BÖÇ'ün, tekrarlı, yön değiştiren statik yükler altında davranışı incelenmiştir. Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında sünek çaprazın üretim kolaylığı ve tekrarlı yükler altındaki davranışının daha iyi tahmin edilebilmesi için olabildiğince az bileşenli, basit elemanlar olarak ve basit uç detaylarıyla üretilmesinin benimsendiği görülmüştür. Ayrıca, BÖÇ'lerin histeretik davranışını etkileyen başlıca parametrelere göre tasarım detayları geliştirilmiştir. Bu doğrultuda özgün olarak tasarlanan yeni BÖÇ'ler basit uç birleşim detaylarına sahip olmakla birlikte, kullanılan alüminyum alaşımlı malzemenin çelik malzemeye göre olası verimliliğinin/üstünlüğünün irdelenmesi ve malzeme karakteristiklerinin davranışa etkisinin gözlemlenmesi de amaçlanmıştır.

Histeretik davranış eğrisinin altında kalan alan yutulan enerjinin miktarını vermektedir. Her bir numuneye ilişkin deneylerden, yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme değişimine göre histeretik eğriler elde edilerek farklı tasarım özelliklerine sahip BÖÇ'lerin davranış karakteristikleri ve özellikle enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Çerçeve ve numunelere yerleştirilecek şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerler bu eğrilerin en doğru şekilde elde edilmesini sağlamıştır. Numunelerin çekme ve basınç taşıma kapasiteleri ile bu değerlerin yükleme geçmişine (load-history) bağlı olarak değişimleri ve kopma ömürleri elde edilmiştir. Çaprazların çekme ve basınçta benzer dayanımlar göstererek, burkulmadan, stabil, kendini tekrarlayan, olabildiğince dolu histeretik eğrilerin elde edilmesi bu tezin önemli başarı ölçütüdür. Elde edilen sonuçlar bu konuda çalışacak araştırmacılar için mevcut veritabanına bir ek veri sağlamaktadır. Ayrıca Amerika ve Japonya'da bulunan çeşitli firmaların patentinde üretilen BÖÇ'lere alternatif, farklı özelliklerdeki BÖÇ'lerin üretilmesi ve denenmesi gerçekleştirilmiştir. Uluslararası düzeyde bilindiği kadarıyla, ilk defa geliştirilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin üstünlüğü/verimliliği irdelenmiştir. Tezin deneysel bölümü için mevcut veritabanı bu kapsam doğrultusunda incelenerek modelleme için gerekli ve sistemin davranışına etkisi olan hesap parametreleri belirlenmiştir. İncelenen çaprazların deprem performanslarının belirlenmesi sonrasında tasarımların nasıl gerçekleştirileceğine ilişkin öneriler getirilmiştir.

Doktora tezinin deneysel bölümü İTÜ, İnşaat Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) gerçekleştirilmiştir. Çelik BÖÇ'lerin imalat, montaj ve nakliyesi için ÇİMTAŞ A.Ş.'den Ar-Ge desteği sağlanmıştır. Üretimde gerekli olan yüksek dayanımlı dolgu malzemesi KÖSTER tarafından sağlanmıştır. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak kendinden yapışkanlı Teflon bantlar kullanılmış ve Teflon bantların tamamı FIBERFLON tarafından karşılanmıştır.

Başta ana destekleyiciler TÜBİTAK-MAG ve İTÜ-BAP bürosu olmak üzere, değişik aşamalarda malzeme ve işçilik desteği sağlayan ÇİMTAŞ, FİBERFLON, KÖSTER, GEDİK KAYNAK A.Ş., TÜRK LOYDU, FENİŞ, AKGÜN BETON, SİNTA BETON, AS CİVATA, MİM MÜHENDİSLİK, IRMAK MAKİNA, deneylerin yönlendirilmesinde önemli katkıları olan Doç.Dr. Cem YALÇIN, Arş.Gör. Cem DEMİR, İnş.Müh. Seçkin ÇETİNKAYA, Arş.Gör. Barış GÜNEŞ, Arş.Gör. Mustafa CÖMERT, İTÜ, İnşaat Fakültesi, STEEL personeline, Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Laboratuvarı personeli Teknisyen Hasan ŞENEL, Mak. Müh. Nedim KAYA, Kaynak Mühendisi Mustafa Tümer, Arş. Gör. Cihan SOYDAN ve özel olarak değişik aşamalardaki destekleri için M. Mehdi KARATAŞ'a, en içten teşekkürlerimi sunarım.

Aralık 2012

Çiğdem Karataş
(İnş. Yük. Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
KISALTMALAR	xxv
SEMBOL LİSTESİ.....	xxvii
ÖZET.....	xxxi
SUMMARY	xxxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Motivasyon.....	1
1.2 BÖÇ Davranışı ve Bileşenleri	1
1.3 Konu ve Kapsam	10
1.4 Literatür Araştırması	13
1.5 İçerik	23
2. BÖÇ'Ü OLUŞTURAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ.....	25
2.1 Deney Düzenegi	25
2.2 Çelik ve Alüminyum Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çekme Deneyleri	27
2.2.1 Deney hazırlıkları.....	27
2.2.2 Deneyler	32
2.2.3 Deney sonuçları ve gözlemler	37
2.3 Alüminyum Alaşımlar.....	38
2.3.1 Yapısal uygulama çalışmaları	38
2.3.2 Özellikleri.....	42
2.3.3 Malzeme dayanımının artırılması yöntemleri	45
2.3.3.1 Isıl işleme uygun olmayan alaşımlar	46
2.3.3.2 Isıl işleme uygun olan alaşımlar	47
2.3.4 Alüminyum alaşımların kaynağa uygunluğu	49
2.3.4.1 Kaynaklı bağlantı için gereken koşullar ve kaynağa uygunluk	50
2.3.4.2 Kaynak dikişi hazırlığı ve ön ısıtma.....	52
2.3.4.3 Koruma gazları.....	55
2.3.4.4 Kullanılan kaynak telleri	57
2.3.4.5 Alüminyum kaynaklamada renk uyumu	61
2.3.5 Kaynaklı çekme numunesi ve çekme deneyleri	62
2.4 Sürtünmesiz Yüzey Malzemesi.....	72
2.5 Dolgu Malzemesi	75
3. BÖÇ NUMUNELERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENENMESİ.....	77
3.1 Numunelerin Tasarımı	77
3.2 Numunelerin Boyutlandırılması.....	83

3.2.1 Alın plakasının tasarımı ve boyutlandırılması	93
3.2.2 Mafsal plakasının tasarımı ve boyutlandırılması	94
3.2.3 Yüksek mukavemetli bulonların tasarımı ve boyutlandırılması	96
3.3 Kullanılan Kaynak Hesap Yöntemi.....	97
3.4 Bayrak Levhalarının Tasarımı ve Boyutlandırılması	100
3.5 Bayrak Levhalarının Deney Çerçevesine Bağlantısı.....	105
3.6 Alüminyum Alaşım-Çelik Etkileşimi ve Korozyon.....	108
3.7 Numunelerin Üretimi	109
3.8 Deney Düzenegi ve Numunelerin Montajı.....	113
3.8.1 Deney düzenegi montajı.....	113
3.8.2 Numunelerin montajı.....	115
3.8.2.1 BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri	115
3.8.2.2 BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri	118
3.9 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Aletleri	120
3.9.1 Tek eksenli şekildeğiştirme ölçerler (Strain Gauges)	124
3.9.2 Yerdeğiştirme ölçerler (LVDTs).....	125
3.9.3 Veri toplama sistemi.....	128
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	131
4.1 Yükleme Protokolü	131
4.2 Statik İtme (Pushover) Analizi	134
4.3 Deney Düzeneginin Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı.....	145
4.4 Deneysel Gözlemler	147
4.4.1 BRB-AC1 numunesi	148
4.4.2 BRB-AC2 numunesi	154
4.4.3 BRB-SC1 numunesi	162
4.4.4 BRB-SC2 numunesi	169
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	179
5.1 Genel	179
5.2 BRB-AC1 Numunesi.....	181
5.2.1 Kümülatif histeretik enerji	184
5.2.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi	185
5.2.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi	187
5.2.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi	188
5.3 BRB-AC2 Numunesi.....	188
5.3.1 Kümülatif histeretik enerji	192
5.3.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi	193
5.3.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi	193
5.3.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi	194
5.4 BRB-SC1 Numunesi	195
5.4.1 Kümülatif histeretik enerji	199
5.4.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi	199
5.4.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi	200
5.4.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi	201
5.5 BRB-SC2 Numunesi	202
5.5.1 Kümülatif histeretik enerji	206
5.5.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi	206
5.5.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi	207
5.5.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi	209
5.6 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Performans Değerlendirmesi.....	209
5.7 Deney Sonrası Numunelerin Kesit Açılımı.....	215

5.8 Numunelerin Etkili (Eşdeğer) Sönüm Oranlarının Belirlenmesi	220
5.8.1 Genel	220
5.8.2 BRB-AC1 numunesi	225
5.8.3 BRB-AC2 numunesi	228
5.8.4 BRB-SC1 numunesi	231
5.8.5 BRB-SC2 numunesi	234
5.8.3 Karşılaştırma	237
6. BÖÇ'LERİN YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ	241
6.1 Genel	241
6.2 Parametreler ve Modelleme İçin Yapılan Varsayımlar	248
6.2.1 ANSYS-Workbench model formu	248
6.2.2 Malzeme modeli	251
6.2.3 Uç sınırları (Serbestlik Dereceleri) ve yükleme biçimi	253
6.2.4 Sonlu elemanlara bölme işlemi (MESH işlemi)	254
6.2.5 Temas yüzeyleri	258
6.2.6 İnelastik bölgenin tanımlanması	259
6.3 Metallerde pekleşme ve pekleşme üsteli kavramı ile sonuca yakınsama	260
6.4 ANSYS-Workbench Çözüm ve Sonuçlar	264
6.5 Deneysel ve Kuramsal Histeretik Eğrilerin Karşılaştırılması	270
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	277
7.1 Genel	277
7.2 Sonuçlar	279
7.3 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler	285
KAYNAKLAR	287
EKLER	295
ÖZGEÇMİŞ	363

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : BÖÇ'lü çerçeve modelinin davranışını belirleyen ana parametreler.	8
Çizelge 1.2 : Deney numunelerinin özellikleri.	9
Çizelge 2.1 : Şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri.....	29
Çizelge 2.2 : Çelik çekirdekli BÖÇ malzeme mekanik özellikleri.....	35
Çizelge 2.3 : Çelik dış tüp malzeme mekanik özellikleri.	35
Çizelge 2.4 : Alüminyum alaşım çekirdekli BÖÇ malzeme mekanik özellikleri.....	35
Çizelge 2.5 : Çekme deneyi sonuçları.	36
Çizelge 2.6 : Alüminyum dış tüp malzeme mekanik özellikleri.	37
Çizelge 2.7 : Alüminyum karakteristik özelliklerinin demir ile karşılaştırılması.	43
Çizelge 2.8 : Alüminyum alaşımlarının serileri ve özellikleri.....	45
Çizelge 2.9 : Isıl işleme uygun olmayan elemanların sertlik durumu.	47
Çizelge 2.10 : Isıl işleme uygun olan alaşımların sertlik durumu.	47
Çizelge 2.11 : A36 yapı çeliği ile A6061-T6 alüminyum alaşımı karşılaştırması. ...	48
Çizelge 2.12 : Ön ısıtma sıcaklıkları ve bekleme süreleri.	54
Çizelge 2.13 : Koruma gazı için kullanılan karışım oranları.	56
Çizelge 2.14 : Koruma gazlarının kaynağa olan etkileri.	56
Çizelge 2.15 : AWS D1.2/D1.2M'ye göre kaynaklı çekme numunesi boyutları.	66
Çizelge 2.16 : AWS D1.2/D1.2M'ye göre çift V alın kaynağında maksimum kep.	66
Çizelge 2.17 : AWS D1.2/D1.2M'ye göre tek V alın kaynağında maksimum kep.	67
Çizelge 3.1 : Numunelerin çekirdek elemanı geometrik özellikleri.	78
Çizelge 3.2 : Numunelerin dış tüp geometrik özellikleri.....	80
Çizelge 3.3 : Çekirdek F_{cr} kritik burkulma gerilmesi.	85
Çizelge 3.4 : Çekirdeğin kritik inelastik burkulmalı burkulma gerilmesi.	86
Çizelge 3.5 : Numunelerin tahmin edilen akma dayanımı.	90
Çizelge 3.6 : Numunelerin hesaplanan üst/alt Δ_{by} elastik eksenel yerdeğiştirmesi. ..	92
Çizelge 3.7 : Mafsallık plakaları malzeme özellikleri.	94
Çizelge 3.8 : Bulon delik çapı ve malzeme özellikleri.	96
Çizelge 3.9 : Minimum köşe kaynak kalınlıkları.	98
Çizelge 3.10 : Tam penetrasyonlu, çift taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak sınır değerleri.	99
Çizelge 3.11 : Tam penetrasyonlu, tek taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak sınır değerleri.	100
Çizelge 3.12 : Bayrak levhası hesap parametreleri.....	101
Çizelge 3.13 : Ölçüm cihazlarının listesi.....	121
Çizelge 4.1 : Statik yükleme protokolü	133
Çizelge 4.2 : Statik itme analizi sonucu kuvvet, yerdeğiştirme hesap değerleri.	142
Çizelge 4.3 : Toplam eksenel yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.....	143
Çizelge 4.4 : Statik itme analizi sistem K_0^P , K_1^P rijitlikleri ve α^P rijitlik oranları... ..	144
Çizelge 4.5 : Hesaplanan ve statik analiz ile elde edilen K_i elastik rijitlikleri.	145

Çizelge 4.6 : Hesaplanan ve statik analiz ile elde edilen K_{toplam} elastik rijitlikleri..	145
Çizelge 4.7 : Boş deney düzeneği çevrimsel yerdeğiştirmei.....	146
Çizelge 4.8 : Görelî ötelenme oranlarına karşı gelen Δ_u eksenel yerdeğiştirmei. ..	146
Çizelge 5.1 : BRB-AC1 çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.	182
Çizelge 5.2 : BRB-AC2 çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.....	190
Çizelge 5.3 : BRB-SC1 çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.	197
Çizelge 5.4 : BRB-SC2 çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.	204
Çizelge 5.5 : Standart yükleme protokolü sonucu elde edilen katsayılar.	210
Çizelge 5.6 : η kümülatif inelastik yerdeğiştirme ve E_h enerji yutma miktarları. ...	212
Çizelge 5.7 : Deney ve statik itme analizi ile elde edilen rijitliklerin karşılaştırılması.	214
Çizelge 5.8 : BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranları.	225
Çizelge 5.9 : BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranları.	228
Çizelge 5.10 : BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranları.	231
Çizelge 5.11 : BRB-SC2 numunesi etkili sönüm oranları.	234
Çizelge 6.1 : BÖÇ numunelerinin hesaplanan σ_g gerçek gerilme değerleri K dayanım katsayıları.	263
Çizelge 6.2 : Numunelerin kuramsal ve deneysel E_h kümülatif histeretik enerji yutma miktarlarının, T_{max} çekme ve P_{max} basınç piklerinin karşılaştırılması.....	275
Çizelge A.1 : Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerin çekirdek geometrik özellikleri.	298
Çizelge A.2 : Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerin dış tüp geometrik özellikleri.	300

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : (a) Klasik çapraz. (b) İdealleştirilmiş BÖÇ. (c) Klasik çapraz ile BÖÇ histeresislerinin karşılaştırılması (Xie, 2005).	2
Şekil 1.2 : (a) BÖÇ'ün şematik gösterimi. (b) Çekirdek elemanın bölgeleri. (c) Akma bölgesi ile dolgu malzemesi arasındaki boşluk (Xie, 2005).	2
Şekil 1.3 : (a) Tasarlanan BÖÇ'ler. (a) Genel görünüşü. (b) Kesit görünüşü.	6
Şekil 1.4 : Deney düzeneğinin ve TURKBRACE-BRB'lerin 3 boyutlu genel görünüşü.	7
Şekil 1.5 : Iwata ve diğ.'nin (2000) deney numunelerine ait histeretik eğrileri.	15
Şekil 1.6 : Metal sönümleyicisi olan tek serbestlik dereceli sistemin örnek modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi (Vargas ve Bruneau, 2009).	18
Şekil 1.7 : Bayrak levhasında gerilmenin 30 ⁰ C'lik açı ile yayılması (Whitmore, 1952).	20
Şekil 1.8 : Düzlem dışı burkulmada, bayrak levhaları için gerekli minimum kenar mesafeleri (Astaneh-Asl ve diğ., 1982).	21
Şekil 2.1 : (a) Deney düzeneğinin üç boyutlu genel görünüşü (Haydaroğlu ve diğ., 2010). (b) Düzlem dışı hareketi engelleyen çift taraflı çelik payandalar (Karataş ve Çelik, 2012).	26
Şekil 2.2 : (a) Malzeme çekme deneylerinin yapıldığı mekanik cihaz. (b) Çekme numunesinin cihaza yerleştirilmesi.	28
Şekil 2.3 : (a) Plakalardan soğuk freze kesim ile çekme numunesi çıkarılması işlemi. (b) Çekme deneyi yapılacak çekme numuneleri.	28
Şekil 2.4 : Alüminyum alaşımlı çekme numunelerinin her iki yüzeyine farklı tip strain gauge yapıştırılması.	29
Şekil 2.5 : BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılacak kanalların genel görünüşü.	30
Şekil 2.6 : (a) Çekme numunelerine açılan kanalların genel görünüşü. (b) $\phi 2\text{mm}$ 'lik parmak freze kullanılarak açılan kanallara strain gauge'lerin yerleştirilmesi.	31
Şekil 2.7 : Strain-gauge yapıştırılan 19 adet çekme numunesi.	31
Şekil 2.8 : (a) Yerel boğumların oluştuğu noktalarda uzama sonucu kesit daralmaktadır. (b) Çekme deneyi sonucu çekme deney parçası.	32
Şekil 2.9 : Kanallı çekme numunelerinde deney sırasında oluşankesit daralması. ...	33
Şekil 2.10 : Akma gerilmesi-şekildeğiştirme diyagramı.	33
Şekil 2.11 : Çekme deneyi sonrası çelik (a) ve alüminyum (b) çekme numuneleri. .	34
Şekil 2.12 : BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan çelik ve alüminyum alaşımlı malzemelerin karşılaştırmalı gerilme (σ)-şekildeğiştirme (ϵ) eğrileri.	37
Şekil 2.13 : Numunelerin $\epsilon=0.05$ şekildeğiştirmesiyle sınırlandırılmış gerilme (σ)-şekildeğiştirme (ϵ) eğrileri.	38

Şekil 2.14 : Alüminyum alaşımlarının metalurjik bakımdan kaynaklanabilirliği (GEV-ATB, 2009).	51
Şekil 2.15 : Küt kök yüzeyli ve altlık pasolu tek V alın kaynağı için açılan ters pah.	52
Şekil 2.16 : (a) Çekme numunelerinin çıkarılacağı plakalara açılan küt alın kaynağı. (b) Kaynak ağzı açılmış A5083-H111 plakası.	62
Şekil 2.17 : Kaynak ağız genişliğinin en üst yüzeyden ölçülmesi.	63
Şekil 2.18 : (a) Kaynak ağzı açılmış plakaların karşılıklı yüzeylerinin sabitlenmesi. (b) Ön ısıtma işlemi.	63
Şekil 2.19 : (a) Kaynak pasosu. (b) Her pasodan sonra kaynak ağzının çelik tel ile temizlenmesi.	64
Şekil 2.20 : (a) Kaynak işlemi sonrası plakalar. (b) AWS D1.2/D1.2M'ye göre kaynaklı çekme numunesi boyutları.	65
Şekil 2.21 : A5083-H111 ve A6061-T6 kaynaklı çekme numunelerinin deney sonrası kopma şekilleri.	67
Şekil 2.22 : A5083-H111 kaynaklı çekme numunesi gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	69
Şekil 2.23 : A6061-T6 kaynaklı çekme numunesi gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.	69
Şekil 2.24 : Esas metal ve kaynaklı çekme numunelerinin karşılaştırmalı eğrileri.	70
Şekil 2.25 : Çeşitli BÖÇ enkesit biçimleri (Xie, 2005).	72
Şekil 2.26 : (a)Yapışkan bantlı silikon kauçuk ve EPDM kauçuk sünger levhalar. (b)Kendinden yapışkanlı polietilen bantlar.	74
Şekil 2.27 : (a) KÖSTER-VGM5. (b) Dolgu malzemesinin hazırlanması.	75
Şekil 3.1 : (a) BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-AC1'in üç boyutlu genel görünüşü. (b) BRB-AC2'nin üç boyutlu genel görünüşü.	81
Şekil 3.2 : (a) Eksenel basınç altında haç enkesitli çekirdeğin eğilmesi. (b) Bir kenarı serbest, üç kenarı sabit mesnetli plakanın eksenel kuvveti altındaki davranışı (Black ve diğ., 2002).	85
Şekil 3.3 : Klasik çekirdek enkesiti.	87
Şekil 3.4 : (a) İki doğrulu Kuvvet-Yerdeğiştirme ilişkisi. (b) $2\Delta_{bm}$ tasarım görelî ötelenme sınırında T_{max} ve P_{max} kuvvetlerinin belirlenmesi (AISC 341-10, 2010).	88
Şekil 3.5 : Diyagonal BÖÇ'ün yerdeğiştirmesi (Kim ve Choi, 2004b).	90
Şekil 3.6 : Alın plakası tasarım değişkenleri.	93
Şekil 3.7 : Numunelerin mafsallık plakası önden görünüş (a), yandan görünüş (b), plan görünüşü (c).	95
Şekil 3.8 : Tam penetrasyonlu, çift kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak detayı (AWS D1.1/D1.1M, 2008, AWS D1.2/D1.2M, 2008).	99
Şekil 3.9 : (a) Bayrak levhası genel görünüşü. (b) Bayrak levhası boyutlandırma.	101
Şekil 3.10 : Bayrak levhalarının burkulması ve burkulma kapasitesinin hesap modeli (Astaneh-Asl, 1998).	103
Şekil 3.11 : C düğüm noktası bayrak levhasına gelen normal kuvvet ve kesme kuvveti.	106
Şekil 3.12 : (a) Çelik çekirdekler. (b) Kaynak ağızları açılmış çekirdekler. (c) Çekirdeklerin zımparalanması. (d) Strain-gauge'lerin kanallara yerleştirilmesi. (e) Kanalların epoksi ile doldurulması. (f) Çelik çekirdeklerin 0.2mm kalınlığında teflon ile sarılması.	110

Şekil 3.13 :	(a) Çekirdeklerin kauçuklu gres yağ ile yağlanması. (b) Kanal içindeki strain-gauge direnç kontrolünün yapılması. (c) Dış tüp içerisine yerleştirilen BÖÇ'lerin çekirdek merkezleştirilmesinin yapılması. (d) Ahşap kutular içinde BÖÇ'lerin beton santraline getirilmesi.....	111
Şekil 3.14 :	(a) BÖÇ'ler için tasarlanan merkezleştirme sehpası. (b) Dolgu malzemesi ile doldurulması. (c) Dolgu malzemesinden basınç dayanımının belirlenmesi için numune alınması. (d) Metal içindeki strain-gauge akım kontrolünün yapılması. (e) Penetrasyon deneyi tamamlanan BRB-AC1 numunesi. (f) Montaja hazır BÖÇ'ler.	112
Şekil 3.15 :	(a) 250kN çekme-itme kapasiteli hidrolik veren (actuator). (b) Actuator güçlü döşeme uç bağlantısı ve M20 bulonların torklanması. (c) Actuator-kolon uç bağlantısı. (d) Actuator-kolon birleşimini sağlayan M20 bulonların torklanması.	114
Şekil 3.16 :	(a) Deney düzeneği genel görünüş. (b) Düzlem dışı hareketi engellemek için oluşturulan kayıcı roller. (c) Kolon-Kiriş mafsalı. (d) Kiriş-BÖÇ mesnet noktası berkitme takviyesi.....	115
Şekil 3.17 :	(a) Bayrak plakalarının birleşimi. (b) Numunelerin montajı. (c) Bayrak plakası delikleri ile mafsal plakası deliklerinin çakıştırılması. (d) BRB-SC1 montaj sonrası genel görünüş. (e) BRB-SC2'nin montaj sonrası genel görünüşü.	116
Şekil 3.18 :	(a) Çaprazın üst mafsal birleşimi ve M40 bulonun torklanması. (b) Çaprazın alt mafsal birleşimi ve M40 bulonun torklanması. (c) Alt bayrak plakasının deney düzeneğine birleşimi ve M24 bulonların torklanması. (d) Üst bayrak plakasının deney düzeneğine bağlantısı ve M24 bulonların torklanması.	117
Şekil 3.19 :	Kanaldaki strain-gauge'in (BRBKN) çekirdekten çıktığı nokta.	118
Şekil 3.20 :	(a) Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin mafsal plakalarına 1 kat epoksi boya uygulamasının yapılması. (b) Birleşim bulonlarının torklanması. (c) BRB-AC1 numunesi montaj sonrası genel görünüş.....	119
Şekil 3.21 :	(a) BRB-AC2'nin haçvari uç kesitin montajı. (b) Alüminyum besleme plakalarının yerleştirilmesi. (c) Uç birleşimin yandan görünüşü. (d) Uç birleşimin üstten görünüşü. (e) BRB-AC2'nin montaj sonrası görünüşü.	120
Şekil 3.22:	Düzlem içi yerdeğiştirme ölçümü yapan cihazların şematik yerleşimi.....	122
Şekil 3.23 :	Bayrak levhasına strain-gauge yerleşimi.....	124
Şekil 3.24 :	Çapraz dış tüp boyunca strain-gauges yerleşimi.	125
Şekil 3.25 :	(a) T1E ve T1W yerdeğiştirme ölçerlerin deney çerçevesi üzerine yapılan yerleşimi. (b) T2 yerdeğiştirme ölçerinin deney çerçevesine yerleşimi.....	126
Şekil 3.26 :	Düzlem dışı ölçüm yapan cihazların yerleşimi.	126
Şekil 3.27 :	Çaprazın düzlem dışı hareketini kontrol eden T5 ve T7 yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.	127
Şekil 3.28 :	Kiriş birleşimlerindeki olası kaymaları kontrol eden yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.	127
Şekil 3.29 :	(a) Switch Box. (b) Merkez kontrol odası genel görünüş ve Data Logger. (c) Visual Log TDS-7130. (d) BRB-AC2 deney veri ve grafiği.....	129
Şekil 4.1 :	Δ_{by} 'ye göre normalize edilmiş yükleme protokolü.	131

Şekil 4.2 : Numunelerin SAP2000 modeli.....	136
Şekil 4.3 : SAP2000 pushover modelinde gerçek malzeme özellikleri ile tanımlanan kesit etiketleri.	136
Şekil 4.4 : Statik itme analizi basitleştirilmiş yerdeğiştirme kontrollü plastik mafsallı kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi (FEMA 356, 2000, p. 165).	137
Şekil 4.5 : Numunelerin statik itme analizinde kullanılan BÖÇ eksenel plastik mafsallı özellikleri.	138
Şekil 4.6 : İki doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde K_0 ve K_1 rijitliklerinin, ω ve β dayanım düzeltme katsayılarının gösterimi.....	138
Şekil 4.7 : BRB-AC1 ve BRB-AC2 numunelerinin yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri.	140
Şekil 4.8 : BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri.	141
Şekil 4.9 : Numunelerin zarf eğrilerinin karşılaştırılması.....	142
Şekil 4.10 : Boş deney düzeneği histeretik eğrisi.	147
Şekil 4.11 : BRB-AC1 numunesi histeretik eğrisi.	150
Şekil 4.12 : BRB-AC1 numunesi deney fotoğrafları.	151
Şekil 4.13 : BRB-AC2 numunesi deney sonrası birleşim durumu.	153
Şekil 4.14 : BRB-AC2 numunesi histeretik eğrisi.	156
Şekil 4.15 : BRB-AC2 numunesi deney fotoğrafları.	157
Şekil 4.16 : BRB-AC2 numunesi deney sonrası birleşim durumu.	161
Şekil 4.17 : BRB-SC1 numunesi histeretik eğrisi.....	164
Şekil 4.18 : BRB-SC1 numunesi deney fotoğrafları.....	165
Şekil 4.19 : (a) Üst birleşim alın plakasına tam nufuziyetli kaynak birleşimi. (b) Üst birleşim civataları. (c) Üst birleşim genel görünüş. (d) Alt birleşim genel görünüş.	169
Şekil 4.20 : BRB-SC2 numunesi histeretik eğrisi.....	171
Şekil 4.21 : BRB-SC2 numunesi deney fotoğrafları.....	173
Şekil 4.22 : BRB-SC2 deney sonrası birleşim durumu.	177
Şekil 5.1 : BRB-AC1 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.....	183
Şekil 5.2 : BRB-AC1 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.	185
Şekil 5.3 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	186
Şekil 5.4 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	186
Şekil 5.5 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrisi.	187
Şekil 5.6 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	188
Şekil 5.7 : BRB-AC2 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.....	191
Şekil 5.8 : BRB-AC2 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.	192
Şekil 5.9 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	193
Şekil 5.10 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrisi.	194
Şekil 5.11 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	195

Şekil 5.12 : BRB-SC1 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.	198
Şekil 5.13 : BRB-SC1 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.	199
Şekil 5.14 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	200
Şekil 5.15 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrisi.	201
Şekil 5.16 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	202
Şekil 5.17 : BRB-SC2 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.	205
Şekil 5.18 : BRB-SC2 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.	206
Şekil 5.19 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	207
Şekil 5.20 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.	207
Şekil 5.21 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi akma noktasını gösterir histeretik eğrisi.	208
Şekil 5.22 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	209
Şekil 5.23 : BRB-AC1 (a), BRB-AC2 (b), BRB-SC1 (c) ve BRB-SC2 (d) numuneleri deney histeretik eğrileri.	211
Şekil 5.24 : BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri kümülatif enerji grafiklerinin karşılaştırılması.	213
Şekil 5.25 : BRB-AC1 numunesi kesit açılımı fotoğrafları.	216
Şekil 5.26 : BRB-AC2 numunesi kesit açılımı fotoğrafları.	217
Şekil 5.27 : BRB-SC1 numunesi kesit açılımı fotoğrafları.	218
Şekil 5.28 : BRB-SC2 numunesi kesit açılımı fotoğrafları.	219
Şekil 5.29 : BÖÇ'ün histeretik kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde yutulan enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisinin gösterimi.	223
Şekil 5.30 : BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.	226
Şekil 5.31 : BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.	227
Şekil 5.32 : BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.	229
Şekil 5.33 : BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.	230
Şekil 5.34 : BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.	232
Şekil 5.35 : BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.	233
Şekil 5.36 : BRB-SC2 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.	235
Şekil 5.37 : BRB-SC2 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.	236
Şekil 5.38 : Tüm numunelerin etkili sönüm oranının çevrim sayısı ile değişimini gösteren karşılaştırma.	239

Şekil 5.39 :	Deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme eğrisi. (a) BRB-AC1 numunesi. (b) BRB-AC2 numunesi. (c) BRB-SC1 numunesi. (d) BRB-SC2 numunesi.	240
Şekil 6.1 :	(a) Sonlu eleman modeli. (b) Deneysel ve kuramsal gerilme-şekildeğiştirme histeretik eğrilerinin karşılaştırılması (Wigle ve Fahnestock, 2010).....	243
Şekil 6.2 :	(a) Elasto-plastik BÖÇ modeli. (b) Deneysel ve histeretik deney sonuçlarının karşılaştırılması (Usami ve diğ., 2009).	244
Şekil 6.3 :	(a) Basit çubuk elemanlar ve kompleks malzeme ile oluşturulan BÖÇ'ün OPENSEES modeli. (b) Deneysel ve histeretik eğrilerin karşılaştırılması (Zsarnóczy, 2012).	246
Şekil 6.4 :	(a) BÖÇ modeli. (b) Sürtünme katsayısı değişiminin değişimi etkisi (Budaházy, 2012).	247
Şekil 6.5 :	(a) BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri: (a) Katı modelin genel görünüşü. (b) Çekirdeğin görünüşü. (c) Alt uç genel görünüşü. (d) Üst uç önden görünüşü.	249
Şekil 6.6 :	BRB-AC2 numunesi: (a) Katı modelin genel görünüşü. (b) Çekirdeğin görünüşü. (c) Alt uç genel görünüşü. (d) Üst uç önden görünüşü.	250
Şekil 6.7 :	(a) Lineer elastik malzeme modeli. (b) Lineer olmayan elastik malzeme modeli. (c) Elasto-plastik malzeme modeli. (d) Rijit inelastik/plastik malzeme modeli. (e) İdeal elasto-plastik malzeme modeli. (f) Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme modeli	252
Şekil 6.8 :	Yerdeğiştirme oluşturan yükleme doğrultusu ve yerdeğiştirme pikleri .	253
Şekil 6.9 :	Tanımlanan uç mesnet ve burkulmayı önleyen ortam sınır şartları.	254
Şekil 6.10 :	(a) BRB-AC1 numunesi deney akma gerilmesini verecek optimum eleman sayısı. (b) BRB-SC1 numunesi deney akma gerilmesini verecek optimum eleman sayısı.	255
Şekil 6.11 :	BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri (a) Hassas ağırlara bölünmüş genel görünüşü. (b) Alt uç mesh işlemi yakın görünüşü. (c) Üst uç mesh işlemi yakın görünüşü	256
Şekil 6.12 :	BRB-AC2 numunesi (a) Hassas ağırlara bölünmüş genel görünüşü. (b) Akma bölgesi mesh işlemi yakın görünüşü. (c) Alt uç mesh işlemi genel görünüşü.	257
Şekil 6.13 :	(a) İzotropik pekleşmeyi gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi. (b) Kinematik pekleşmeyi gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi	260
Şekil 6.14:	(a) Çekme deneyi sonucu elde edilen gerçek eğri ve mühendislik eğrisinin karşılaştırılması (Çapan, 2003). (b) İki eğri üzerinde karşılıklı noktaların değişimi (Ay, 2012).	261
Şekil 6.15 :	Pekleşme üstelinin değişimi ile gerçek gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin değişimi arasındaki ilişki.	262
Şekil 6.16 :	Ana histeretik eğri kuvvet-yerdeğiştirme genel görünümü.	265
Şekil 6.17 :	(a) BRB-AC1 numunesi analiz sonucunda von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-AC1 numunesinde gözlenen boyun bölgesi burkulma dalgası.	266
Şekil 6.18 :	(a) BRB-AC2 numunesi analiz sonucunda von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-AC1 numunesinde gözlenen burkulma dalgaları.	267
Şekil 6.19 :	(a) BRB-SC1 numunesi analiz sonucunda akma bölgesi von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-SC1 numunesinde akma bölgesinin kopma genel görünüşü.	268

Şekil 6.20 : (a) BRB-SC2 numunesi analiz sonucunda akma bölgesi von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-SC2 numunesinde akma bölgesinin kopma genel görünüşü....	269
Şekil 6.21 : (a) BRB-AC1 numunesi kuramsal ve deneysel sonuçlarının karşılaştırılması.	271
Şekil 6.22 : (a) BRB-AC2 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.	272
Şekil 6.23 : (a) BRB-SC1 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	273
Şekil 6.24 : (a) BRB-SC2 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırılması.	274
Şekil A.1 : Ön çalışmalar kapsamında tasarlanan ve denenilen farklı uç tasarımları: (a) Çoklu bulonlu BÖÇ (BRB-AC2-0). (b) Tek bulonlu ve güçlendirme bölgesi serbest bırakılmış BÖÇ (BRB-SC3-0). (c) Tek bulonlu ve güçlendirme bölgesi burkulmayı önleyen ortamla sınırlandırılmış BÖÇ (BRB-SC1-0 ve BRB-SC2-0).....	297
Şekil A.2 : (a) Yakın fay yükleme protokolü (Uang ve diğ., 2000).	303
Şekil A.3 : (a) BRB-SC1-0 numunesi yakın fay yükleme protokolü.	303
Şekil A.4 : BRB-SC1-0 numunesi histeretik eğrisi.	305
Şekil A.5 : BRB-SC1-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $-1/2\Delta_{by}^E$ de alt birleşim elastik davranış. (c) $+1/2\Delta_{by}^E$ de üst birleşimin elastik davranış. (d) $-1/1.66\Delta_{by}^E$ de düzlem dışı durum. (e) $+1/11\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+5.32\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede (%0.28 görelî ötelenme oranı) alt uç eksenel açılımı. (f) $+1/11\Delta_{by}^E$ seviyesinde alt uç elastik davranış.....	306
Şekil A.6 : (a) Alt uç birleşim bulonlu birleşim durumu. (b) Üst uç kaynaklı birleşim durumu. (c) Üst uçta oluşan teflon hasarı. (d) Alt uç düzlem dışı durum. (e) Numunenin deney sonrası düzlem dışı durumu. (f) Deney ekibi (sol baştan): Araş.Gör. Cem Demir, Araş. Gör. Çiğdem Karataş, Prof.Dr.Oğuz Cem Çelik, İnş. Müh. Seçkin Çetinkaya.....	310
Şekil A.7 : BRB-SC2-0 numunesi histeretik eğrisi.	313
Şekil A.8 : BRB-SC2-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $-1/4\Delta_{by}^E$ de 1.77mm (%0.10 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt birleşim düzlem dışı elastik davranış. (c) $+3/4\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve 5.30mm (%0.28 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç elastik davranış. (d) $-3/4\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve 5.30mm yatay yerdeğiştirmede üst uç elastik davranış. (e) $+\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+6.98\text{mm}$ (%0.38 görelî ötelenme oranı) yatay akma yerdeğiştirmesinde eksenel alt uç açılımı. (f) $+\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+6.98\text{mm}$ yatay akma yerdeğiştirmesinde eksenel üst uç açılımı.....	314
Şekil A.9 : BRB-SC3-0 numunesi histeretik eğrisi.	319
Şekil A.10 : BRB-SC3-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $\pm 1/8.46\Delta_{by}^E$ de alt birleşim elastik davranış. (c) $+1/4.26\Delta_{by}^E$ de üst birleşim elastik davranış. (d) $-1/4.26\Delta_{by}^E$ de üst birleşim önden görünüş. (e) T5 orta nokta düzlem dışı LVDT yerleşimi ve T7 dış tüp alt nokta düzlem dışı LVDT yerleşimi. (f) Alt uç BRBKN strain-gauge'nin çekirdekten çıktığı nokta.....	320
Şekil A.11 : BRB-AC2-0 numunesi histeretik eğrisi.	325
Şekil A.12 : BRB-AC2-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $+1/4\Delta_{by}^E$ de ve $+1.72\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede alt birleşim elastik davranış. (c) $+2/4\Delta_{by}^E$ de ve $+3.44\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede üst birleşim	

elastik davranış. (d) $+3/4\Delta_{by}^E$ de ve +5.16mm yatay yerdeğiştirmede düzlem dışı durum. (e) BRBKN çekirdekten çıkış noktası. (f) T5 dış tüp orta nokta düzlem dışı LVDT, T7 dış tüp alt nokta düzlem dışı LVDT.	326
Şekil A.13 : BRB-SC1-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.	327
Şekil A.14 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	328
Şekil A.15 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	329
Şekil A.16 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.	329
Şekil A.17 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.	330
Şekil A.18 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak levhası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	331
Şekil A.19 : BRB-SC2-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.	331
Şekil A.20 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	332
Şekil A.21 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.	333
Şekil A.22 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	334
Şekil A.23 : BRB-SC3-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.	334
Şekil A.24 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	335
Şekil A.25 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	336
Şekil A.26 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.	337
Şekil A.27 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.	337
Şekil A.28 : (a) BRB-SC1-0 numunesi haçvari kesit görünüşü. (b) Akma bölgesi görünüşü, mafsallık plakası ve bulon deliği. (c) Bayrak plakası bulon delikleri.	339
Şekil A.29 : (a) Numunenin kesit açılımından sonra genel görünüşü. (b) BRB-SC2-0 numunesi çekirdek kesitinin koptuğu üst uç. (b) Akma bölgesi uçta oluşan yerel burkulmalar. (c) Mafsallık plakası ve plastik mafsallık noktası. (d) Akma bölgesi görünüşü.	340
Şekil A.30 : (a) BRB-SC3-0 numunesi çekirdek alt uç. (b) Üst uç berkitme plakalarının kaynak dönüş notasının kesitini daraldığı noktada oluşturduğu kopma. (c) Akma bölgesi yakın görünüş. (d) Numunenin genel görünüşü BRB-SC1-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.	341
Şekil A.31 : (a) BRB-AC2-0 numunesi çekirdek ITAB'ta kopma. (b) Üst uç güçlendirme ve birleşim bölgelerinin görünümü. (c) Alüminyum kaynaklama hatası: uç nokta köşelerinin dönülmesi ile bölge dayanımının azalması. (d) Kopma bölgesi yakın görünüş. (e) Numunenin genel görünüşü.	342
Şekil B.1 : Çelik çekme numunelerine ilişkin şekildeğiştirme eğrileri.	344
Şekil B.2 : Alüminyum çekme numunelerine ilişkin şekildeğiştirme eğrileri.	349
Şekil C.1 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	353

Şekil C.2 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	355
Şekil C.3 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	357
Şekil C.4 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.	359
Şekil D.1 : Çelik numunelerin kaynaklı imalatına ait WPS ve PQR raporları.	Cd-Rom-EK D
Şekil D.2 : Alüminyum numunelerin kaynaklı imalatının WPS raporu.	Cd-Rom-EK D
Şekil D.3 : Alüminyum numunelerin kaynaklı imalatının radyografik kalite kontrol raporu.	Cd-Rom-EK D
Şekil D.4 : Alüminyum numunelerin ultrasonic test raporu ve sıvı penetrant test raporu.	Cd-Rom-EK D
Şekil D.5 : A5183 alüminyum kaynak sertifikası.	Cd-Rom-EK D
Şekil E.1 : KÖSTER-VGM5 yüksek mukavemetli tamir harcı basınç dayanım raporu.	362

KISALTMALAR

AISC	: American Institute of Steel Construction
ALPS	: Alüminyum levha perdeli sistemler
ASCE	: American Society of Civil Engineers
AWS	: American Welding Society-Amerikan Kaynak Birliği
BRB-AC	: Buckling Restrained Brace-Alüminum Alloy Core
BRB-SC	: Buckling Restrained Brace-Steel Core
BÖÇ	: Burkulması Önlenmiş Çapraz
BW	: Bouc-Wen Histeretik davranış modeli
CFRP	: Karbon liflerle güçlendirilmiş polimer
EDD	: Energy Dissipating Devices
FEMA	: Federal Emergency Management Agency
FEM	: Sonlu Eleman Yöntemi
GFRP	: Cam liflerle güçlendirilmiş polimer
GMAW	: Gaz altı kaynak yöntemi
HYSS	: Yüksek akma dayanımlı çelik
ITAB	: Isıdan etkilenen bölge (Heat-Affected-Zone)
LYSS	: Düşük akma dayanımlı çelik
LRFD	: Taşıma gücüne göre tasarım yöntemi
MCEER	: Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research
NLD	: Non Linear Device
PTFE	: Politetrafluoroethylene (TEFLON)
PQR	: Welding Procedure Qualification Record
MIG	: Magnezyum İçeren Gazaltı Kaynağı
SKK	: Sürtünme karıştırma kaynağı
TIG	: Tungsten ark kaynağı
WPS	: Welding Procedure Specification

SEMBOL LİSTESİ

A_b	: Bulon alanı
A_{con}	: Çekirdek elemanın birleşim bölgesi enkesit alanı
A_k	: Numunenin kopma anındaki son alanı
A_{sc}	: Çekirdek elemanın akma bölgesi net enkesit alanı
A_{tr}	: Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi enkesit alanı
A_0	: Numunenin ilk kesit alanı
A_1	: Alın plakası alanı
b	: Haç enkesitinin sabit mesnet ve serbest kenar arasındaki kanat uzunluğu
b_{ysc}	: Çekirdek elemanın akma bölgesi genişliği
b_{con}	: Çekirdek elemanın birleşim bölgesi genişliği
b_{tr}	: Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi genişliği
B	: Alın plakasının varsayılan eğilme düzlemi genişliği
C_D	: Yerdeğiştirme büyütme faktörü
C_0	: Sistemin sönüm katsayısı
d_t	: Sürtünmesiz yüzey malzemesinin çekirdek kalınlığı boyunca olan et kalınlığı
d_w	: Sürtünmesiz yüzey malzemesinin çekirdek genişliği boyunca olan et kalınlığı
D_u	: Bulona uygulanan ortalama öngermenin, minimum öngermeye oranı
E	: Elastisite Modülü
E_c	: Dolgu malzemesi Elastisite Modülü
$E_{D,\Delta i}$	: Numune tarafından i sayılı çevrimde sönümlenen enerjidir
E_i	: Çekirdek elemanın Elastisite Modülü
E_0	: Dış tüp/dolgu malzemeli dış tüpün Elastisite Modülü
$E_i I_i$	: Çekirdek elemanın eğilme rijitliği
$E_0 I_0$	: Dış tüp/beton dolgulu dış tüp elemanın eğilme rijitliği
$E_{S,\Delta i}$	: i sayılı çevrimde depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisi
$E_{tüp}$	: Sadece dış tüpün Elastisite Modülü
E_t	: Çekirdek elemanın Tanjant Modülü
f'_c	: Belirlenen beton basınç dayanımı
F_u	: Çelik çekirdek kopma gerilmesi
F'_{by}	: Deney düzeneğine etkiyen yatay kuvvet
F_{cr}	: Kritik burkulma gerilmesi
F_e	: Elastik kritik burkulma gerilmesi
F_y	: Çelik çekirdeğin minimum akma gerilmesi

F_{ysc}	: Çekirdek elemanın belirlenen minimum akma gerilmesini ya da kupon deneylerinden elde edilen gerçek akma gerilmesini
$F_{ysc}^{0.2}$	: %0.2 değerindeki kalıcı inelastik şekildeğiştirmenin ϵ eksenindeki karşılığı olan $\epsilon^{0.2}$ noktasından başlayarak malzeme çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusal bölüme paralel giden doğrunun eğriyi kestiği noktadaki akma gerilmesi
h_i	: Kat yüksekliği
h_{sc}	: Bulon deliği faktörü
H_N	: Bina toplam yüksekliği
I_i	: Çekirdek elemanın atalet momenti
I_o	: Dış tüp/dolgu malzemeli dış tüpün atalet momenti
I_t	: Dış tüpün atalet momenti
K	: Malzeme dayanım katsayısı
K_0	: Çaprazın başlangıç rijitliği
K_1	: Akma sonrası rijitlik
K_{con}	: Çekirdek elemanın birleşim bölgesi rijitliği
K_{tr}	: Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi rijitliği
KL	: Etkin burkulma boyu
L	: Çaprazın toplam uzunluğu
L_1	: Çaprazın mafsallık noktaları arasındaki uzunluk
L_{w-w}	: Çaprazın sistem uzunluğu
L_{con}	: Çekirdek elemanın birleşim bölgesi uzunluğu
L_{fg}	: Bayrak plakası serbest uç boyu
L_{kp}	: Mafsallık plakası uzunluğu
L_{tr}	: Çekirdek elemanın güçlendirme bölgesi uzunluğu
$L_{tüp}$	: Dış tüp uzunluğu
L_{ysc}	: Çekirdek elemanın akma bölgesi uzunluğu
l	: Dış tüp tarafından tutulu olmayan çekirdek elemanın uzunluğu
l_k	: Numunenin kopmadan sonraki boyu
l_0	: Numunenin ilk ölçü boyu
m	: Yapısal sistemin kütlesi
M_{max}	: Maksimum moment
N	: Alın plakası eğilme düzlemi uzunluğu
N_s	: Bulon kayma düzlemi
n	: Pekleşme üsteli
n_{BW}	: Bouc-Wen modelinde kullanılan boyutsuz bir parametre
$P(t)$	: Çaprazla gelen eksenel kuvvet
P_{cr}	: Kritik tümsel burkulma yükü
P_e	: Euler burkulma yükü
P_{ysc}	: Çekirdek elemanın eksenel akma kuvveti
P_{max}	: Maksimum basınç kuvveti
P_{max}^E	: Deneyssel elde edilen maksimum basınç kuvveti
P_u	: Çaprazlı birleşimin çekme ve basınçta sahip olması gereken dayanım
p	: Alın plakası düzleminde oluşlan gerilme değeri

R	: Taşıyıcı sistem davranış katsayısı
R_y	: Malzeme dayanım faktörü
T_b	: Bulona uygulanması gereken minimum öngerme kuvveti
T_{max}	: Maksimum çekme kuvveti
T_{max}^E	: Deneysel elde edilen maksimum çekme kuvveti
T_y	: Akma kuvveti
t	: Çekirdek elemanın akma bölgesi et kalınlığı
t_{ep}	: Alın plakası et kalınlığı
$q(x)$	: Çekirdek elemanın dışındaki dolgu malzemesi/dış tüpün oluşturduğu burkulmayı önleyen sisteme uyguladığı yayılı yük
T_1	: Binanın birinci doğal titreşim periyodu
$U(t)$	: Çapraz doğrultusu boyunca sistem uzunluğunun yataydaki eksenel yerdeğiştirmesi
$u(t)$	: BÖÇ'lü çelik çerçevenin yatay yerdeğiştirmesi
$\ddot{u}_g(t)$	: Yer ivmesi
u_y	: BÖÇ'ün akmadaki yerdeğiştirmesi
w_c	: Dolgu malzemesinin yoğunluğu
x	: Yerdeğiştirme değışkeni
$V_{\Delta i}$	: i sayılı çevrimde elde edilen maksimum çekme/basınç kuvvetleri
$y(x)$	: Yanal yerdeğiştirme
$z(t)$	: Bouc-Wen modelinde kullanılan boyutsuz histeretik parametre
α	: Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranı
β_1	: Yayılı yay sabiti
β	: Basınç dayanım düzeltme faktörü
β_{BW}	: Bouc-Wen modelinde kullanılan boyutsuz bir parametre
Δ	: Tasarım görelî kat ötelenme miktarı
Δ_{bm}	: Çaprazın izin verilen maksimum inelastik yerdeğiştirmesi
Δ_{by}	: Deney numunesinin ilk akmadaki yerdeğiştirme miktarı
Δ_{by}^E	: Deneysel elde edilen BÖÇ akma yerdeğiştirmesi
Δ_E	: Yönetmelikte belirtilen deprem kuvvetleri altındaki görelî ötelenme
Δ_i	: i sayılı çevrimde elde edilen maksimum yerdeğiştirme
Δ_x	: Deney düzeneğinin yatay yerdeğiştirmesi
Δ_u	: Deneyde her numune için ulaşılan maksimum yerdeğiştirme
γ_{BW}	: Bouc-Wen modelinde kullanılan boyutsuz bir parametre
ψ	: Kesit daralması
ξ_{effb}	: Etkili sönüm oranı
μ	: Bulon hesabında kullanılan ortalama kayma katsayısı
μ_f	: Çerçeve sünekliği
μ_{max}	: Maksimum süneklik
ϕ	: Eksenel akma dayanımı azaltma faktörünü
θ	: Çaprazın çerçeve yatayı ile yaptığı açı
Ω_0	: Deprem yükü büyütme katsayısı
σ_g	: Gerçek gerilme
α	: Rijitlik oranı

ε_g	: Gerçek birim şekildeğiştirme oranı
ε	: Çaprazın izin verilen maksimum yerdeğiştirmeye ilişkin eksenel birim şekildeğiştirme oranı
ω	: Çekme dayanımı düzeltme faktörü
ν	: Poisson oranı

ÇELİK VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLI ÇEKİRDEKLİ BURKULMASI ÖNLENMİŞ ÇAPRAZLARIN (BÖÇ) TASARIMI, ÜRETİMİ VE YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ETKİSİNDEKİ DAVRANIŞI

ÖZET

1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri sonrasında moment aktaran çerçeve sistemlerinin beklenen performansı gösterememesi üzerine, depremin yıkıcı etkisini azaltmayı sağlayacak yeni çözümler arama yoluna gidilmiştir. Öncelikle Japonya’da yapılan bu çalışmalar ABD’de yayılmaya ve son zamanlarda hızlanmaya başlamıştır. Deprem enerjisinin yutulmasını sağlayan değişik türdeki yapısal sönümleyiciler bu anlamda yararlı sonuçlar vermiştir. Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BÖÇ) bu bağlamda üzerinde yoğun biçimde çalışılan elemanlardandır. Bunlar, bir tür metalik sönümleyiciler olup önemli depremlerde çekmede ve basınçta akarak dengeli bir histeretik davranış gösterirler. BÖÇ’lü çerçeveler mevcut betonarme ya da çelik binaların rijitlik ve dayanımlarının artırılması için güçlendirme amacıyla, yeni binalarda ise etkin enerji yutma elemanı olarak kullanılabilir. Köprülerde de özellikle sünek enerji yutma elemanları olarak yine Japonya ve ABD’de başlatılmıştır. BÖÇ’lerin çekme ve basınçta yaklaşık simetrik davranış göstermesi, rijitlik ve dayanım kaybı göstermeden, aynı zamanda stabil histeretik eğrilerin elde edilmesi kullanım alanını genişletmiştir. Bu özellik ve göreceli olarak daha ekonomik olmaları diğer alternatif sistemlere göre önemli üstünlükler getirmektedir. Yapılan ön araştırmada BÖÇ’lü çerçevelerin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek için çoğunlukla ideal elasto-plastik hesap modellerinin kullanıldığı, ancak Bouc-Wen (BW) ya da benzeri bir hesap modelinin pekleşmenin etkisini de dikkate alarak davranışını en iyi şekilde yansıtan model olduğu görülmüştür. Ayrıca, sünek çaprazın üretim kolaylığı ve davranışının daha iyi tahmin edilebilmesi için olabildiğince az bileşenli, basit elemanlar olarak ve basit uç detaylarıyla üretilmesi benimsenmektedir.

Çalışmanın amacı, farklı çekirdek malzemesine sahip BÖÇ’lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışını deneysel ve kuramsal olarak incelemektir. Çalışmanın özgün yönlerinden biri ise alüminyum alaşımlı çekirdekli ve alüminyum alaşımlı dış tüplü BÖÇ’lerin, bilindiği kadarıyla bu tezde incelendiği şekliyle ilk kez tasarlanması, üretilmesi ve denenmesidir. Alüminyum, çeliğe göre hafif, yumuşak, düşük sıcaklıklarda bile ani darbelerle gösterdiği dayanım, estetik ve kolay şekil verilebilme (ekstrüzyon gibi) özelliklerine sahiptir. Enerji sönümleme kapasitesine getireceği yararlılıklar açısından alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerin üretimi inşaat sektörünün bir isteği olarak görülmüştür. Çelik BÖÇ’lerde oluşan çekme ve basınç dayanımı arasındaki belirgin farkın, üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde azalacağı düşünülmektedir. İlk olarak, Amerika ve Japonya’da bulunan çeşitli firmaların patentinde üretilen BÖÇ’lere alternatif, farklılığı olan, aynı akma dayanımlı, basit uç detayına sahip, 5’i çelik çekirdek ve dış tüp, 3’ü alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum dış tüp olmak üzere toplam 8 adet BÖÇ tasarlanmış, üretilmiş ve denenmiştir. Birinci grupta 3’ü çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 1’i alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüp olmak üzere 4 adet BÖÇ bu çalışmada “Ön Çalışmalar” başlığı altında Ek A’da değerlendirilmiştir. Ana deneyler olan ve ikinci grup BÖÇ serisi olarak üretilen 2’si çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 2’si alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüpten oluşan toplam 4 adet BÖÇ’ün yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışının deneysel ve kuramsal olarak incelenmesi esas alınmıştır. Üretilen BÖÇ’ler, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği

Laboratuvarı'nda bulunan ve tez yürütücüsünün diğer doktora öğrencisi İnş.Yük.Müh. Cem Haydaroğlu tarafından tasarlanıp üretilen çok amaçlı mevcut deney çerçevesinde deneysel olarak incelenmiştir. Maksimum 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam $\pm 300\text{mm}$ yerdeğiştirme uygulayabilen hidrolik veren ile numunelere çekme ve basınç kuvvetleri, akmadan önce ve sonra yerdeğiştirme kontrollü olarak uygulanmıştır. Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki statik yükleme deneyleri, AISC-341 (2010)'te BÖÇ'ler için verilen standart yükleme protokolü kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. BÖÇ'lerin üretiminin yapıldığı çelik ve alüminyum alaşım malzemelerinin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme deneyi numunesi (kupon testleri) öngörülen standartlara göre (ASTM-A370-08a, ASTM-E8/E8M-09) ve gerçeğe yakın boyutlarda hazırlanmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplar revize edilerek üretime başlanılmıştır.

Üretilen BÖÇ'ler Amerika ve Japonya'daki mevcut BÖÇ'lerle karşılaştırıldığında, onlardaki teknolojik üstünlükleri üzerinde birleştirirken, varolan sakıncaları en alt düzeyde tutan özgün bir tasarımıdır. BÖÇ'lü çelik çerçeveler konusunda yapılan literatür taramasında yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışın daha net tahmin edilebilmesi bakımından özellikle kuramsal eksikliklerin olduğu görülmüştür. Tez içerik bakımından da bu boşluğu doldururken, deneysel içerik bakımından üstünlükleri olan, farklı tiplerde BÖÇ'lerin üretilmesi ile varolan teknolojiyi geliştirme bakımından önemlidir. BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri A5083-H111 alüminyum alaşımlı malzemeden çekirdeği olan BÖÇ'lerdir. BRB-AC1 numunesinin kesit alanı 525mm^2 ($15\text{mm} \times 35\text{mm}$), BRB-AC2 numunesinin kesit alanı 600mm^2 ($15\text{mm} \times 40\text{mm}$)'dir. BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri sırasıyla S235JR normal ve S355JR yüksek akma dayanımlı çelik malzemesinden çekirdeği olan BÖÇ'lerdir. BRB-SC1 numunesinin kesit alanı 480mm^2 ($16\text{mm} \times 30\text{mm}$), BRB-SC2 numunesinin kesit alanı 300mm^2 ($12\text{mm} \times 25\text{mm}$) seçilmiştir. Kupon deneyleri sonucu numunelerin elde edilen akma dayanımları BRB-AC1 için 182MPa, BRB-AC2 için 177MPa, BRB-SC1 için 257MPa, BRB-SC2 için 373MPa'dır. BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri için A6060-T66 alüminyum alaşımında, $150 \times 150 \times 4$ kare tüp kesitli ve akma dayanımı 200MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri için S355JR çelik malzemesinden, $140 \times 140 \times 5$ kare tüp kesitli ve akma dayanımı 345MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. Çelik BÖÇ'lerin üretim, montaj ve nakliyesi, üretimde gerekli olan yüksek dayanımlı dolgu malzemesinin sağlanması, sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak kendinden yapışkanlı Teflon bantların sağlanması için sanayiden Ar-Ge ve malzeme desteği alınmıştır. Akma bölgesi uzunluğu olarak toplam çapraz uzunluğunun %73'ünü geçmemesine dikkat edilmiştir. Toplam uzunluğu 2275mm olan numuneler, eksenel normal kuvveti S355JR çelik kalitesindeki bayrak levhaları aracılığı ile sürtünme tipi yüksek dayanımlı bulonlarla deney düzeneğine aktarmaktadırlar. Her bir numuneye ilişkin deneylerden, yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirmeye göre histeretik eğriler elde edilerek farklı tasarım özelliklerine sahip BÖÇ'lerin davranış özellikleri ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Buna göre çelik BÖÇ'ler grubunda enerji yutma BRB-SC1/BRB-SC2 oranı 1.02'dir. Alüminyum alaşımlı BÖÇ grubunda enerji yutma BRB-AC2/BRB-AC1 oranı 3.48'dir. Bunun nedeni, BRB-AC1 numunesinde alüminyum kaynaktan ileri gelen dayanım azalması ile erken hasarın oluşmasıdır. Tüm numuneler içinde en fazla enerji sönümleyen numune BRB-SC1 numunesidir. BRB-AC1 numunesi dışındaki tüm numuneler standart yükleme protokolünü başarıyla tamamlamışlardır. Tüm numuneler içinde en yüksek basınç dayanımı düzeltme katsayısı BRB-SC2 numunesinde $\beta=1.76$ olarak elde edilmiştir. En yüksek çekme dayanımı düzeltme katsayısı ise BRB-AC2 numunesinde $\omega=1.81$ olarak elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinden gelen bu katsayılarla β katsayısını arttıran faktörlerin çekirdek merkezleştirme ve sürtünmesiz yüzey oluşturma kusur ve eksikleri ile iç boşluk verme şekli olduğu anlaşılmıştır. Kümülatif inelastik yerdeğiştirmeler (η) alüminyum alaşımlı numunelerde $100\Delta_{by}$, çelik numunelerde $172\Delta_{by}$ 'nin üzerinde elde edilmiştir. Numunelerin deneysel ve kuramsal çalışmalarla elde edilen histeretik eğrilerinin monotonik davranışla elde edilen eğrilere benzer ve yakın olduğu görülmüştür. Başlangıç rijitlikleri açısından tahmin/deney başarı oranı alüminyum ve çelik numuneler dikkate alındığında %90~99

aralığındadır. Üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin sağladığı en büyük üstünlüklerden birisi ise korozyon dayanımının mükemmel olmasıdır. Sektörde patentli olarak satılan BÖÇ üreticilerinin karşılaştığı en büyük sorun olan bu durum, çaprazın kullanım ömrünü azaltan ve davranışını olumsuz yönde etkileyen önemli bir ayrıntıdır. Sektörün talebi olan, korozyon dayanımı yüksek, korunan BÖÇ üretimi çalışma kapsamında alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerle gerçekleştirilmiştir. Kuramsal çalışmada ANSYS-Workbench v12.0.1 programı kullanılarak, sonlu eleman yöntemiyle pekleşmenin dikkate alındığı gerçeğe yakın, deney sonuçlarıyla uyumlu, dengeli ve kararlı histeretik davranış eğrileri elde edilmiştir. Malzeme nonlineerliliği von Mises akma koşulu kullanılarak tanımlanmış, böylece çelik ve alüminyum alaşımlı malzeme karakteristiklerinin davranış üzerine olan etkisi ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Deneysel bölüm için mevcut veritabanı bu kapsam doğrultusunda incelenerek, modelleme için gerekli ve sistemin davranışına etkisi olan hesap parametreleri belirlenmiştir. Çalışmanın ana bölümlerinin kapsamı aşağıda özetlenmiştir:

Birinci Bölüm'de konu ve kapsamdan sözedilerek bu alanda önceden yapılmış çalışmalar kısaca özetlenmiştir.

BÖÇ'ü oluşturan malzemelerin özellikleri açıklanarak, BÖÇ çekirdeğinde kullanılan çelik/alüminyum alaşım malzemelerine ilişkin çekme deneyleri İkinci Bölüm'de verilmiştir.

Üçüncü Bölüm'de, 2'si çelik çekirdek ve çelik dış tüplü, 2'si alüminyum alaşımlı çekirdekli ve alüminyum alaşımlı dış tüplü toplam 4 BÖÇ'ün tasarımı, üretimi, deney düzeneği ve numunelerin montajı ile deneylerde kullanılan ölçüm aletleri verilmiştir. Alüminyum alaşımlı BÖÇ grubunda üretilen BRB-AC1, BRB-AC2, çelik BÖÇ grubunda üretilen BRB-SC1, BRB-SC2 numunelerinin tasarım ve boyutlandırılmasında yapılan varsayımlar ve nedenleri açıklanmıştır. BÖÇ bileşenleri, çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde uygulanan kaynak yöntemi, mevcut deney düzeneğinin montajı, üretilen BÖÇ'lerin deney sırasına göre deney düzeneğine montaj adımları, deney yöntemleri ile birlikte deneylerde kullanılan cihazların kodları ve yerleri de bu bölümde açıklanmıştır.

Tahmin edilen BÖÇ davranışı, statik itme (pushover) analizi sonuçları verilerek deneysel yöntem ve gözlemler deney sırasına göre Dördüncü Bölüm'de incelenmiştir.

Beşinci Bölüm'de denenen tüm BÖÇ'lerin deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak, elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik davranış eğrileri, histeretik enerji grafikleri, yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrileri, yatay-kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrileri, yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrileri verilmiştir. BÖÇ numunelerinin etkili sönüm oranları da hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

BÖÇ'lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında üç boyutlu modellenmesi ve elde edilen sonuçlar Altıncı Bölüm'de incelenmiştir.

Elde edilen tüm deney verisi Yedinci Bölüm'de özetlenerek ve karşılaştırılarak verilmiştir. Genel sonuçlar değerlendirilerek sonraki araştırmacılar için önerilerde bulunulmuştur.

Deneysel sonuçlar, alüminyum alaşımlı çekirdekli BÖÇ'lerin kümülatif enerji yutma kapasitelerinin kaynaksız tasarımla arttırılabileceğini göstermiştir. Üretilen BÖÇ'lerde herhangi bir tümsel burkulma sorunu gözlenmeksizin istenilen histeretik davranışlar elde edilmiştir. Kaynaklı alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin erken göçmesinin nedeni çekirdek akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte bulunan kaynaklarda ısıdan etkilenen bölgelerden dolayı dayanım kaybının oluşmasıdır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler özellikle yoğun korozyon ortamlarından olumsuz etkilenen köprü ve binalarda tercih edilmesi beklenilmektedir. Çelik BÖÇ'lerle karşılaştırıldığında, alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde nispeten daha simetrik histeretik eğriler elde edilmiştir. Sonuç olarak, alüminyum alaşımlı çekirdekli BÖÇ'lerin mevcut betonarme ya da çelik binaların rijitlik ve dayanımlarının arttırılması için güçlendirme amacıyla, yeni bina ve köprülerde ise etkin enerji yutma elemanı olarak kullanılabileceği görülmüştür.

DESIGN, FABRICATION, and CYCLIC BEHAVIOR of STEEL and ALUMINUM ALLOY CORE BUCKLING RESTRAINED BRACES (BRBs)

SUMMARY

Since steel moment resistant frame systems did not show the expected performance especially during the 1994 Northridge and the 1995 Kobe earthquakes, new structural solutions which could reduce the destructive effects of earthquakes have been sought. These studies which began in Japan and then have started to spread in the USA, have recently increased. Structural dampers of different types which dissipate seismic energy have beneficial results in this sense. Buckling Restrained Braces (BRBs, also as known as unbonded braces), being a sort of metallic damper, display a balanced hysteretic behavior by axial yielding under reversed cyclic tension and compression forces during major earthquakes. Frames incorporating BRBs could be used with the purpose of seismic retrofitting in order to increase lateral stiffness and strength of existing reinforced concrete (RC) or steel buildings. Recently, some further applications are being made in Japan and in the USA, particularly as ductile energy dissipating end diaphragms in steel bridges. Approximate symmetric behavior of BRBs under tension and compression and their feature of not causing any degradation in terms of stiffness and strength as well as obtaining stable hysteretic curves expand their area of use. Furthermore, when compared to other alternative seismic energy dissipation systems, BRBs have several advantages such as easy replacement following an earthquake (if needed), easy fabrication and construction with relatively low cost, simple end connection details.

The purpose of this thesis is to experimentally and analytically investigate the hysteretic behavior of BRBs having different core materials and end connection details under cyclic loadings. One of the unique aspects of this study is that, to the best knowledge of this research team, aluminum alloy core and aluminum alloy outer tube BRBs having details developed in this thesis are designed, produced, and tested for the first time in this area. Aluminum alloy is being used increasingly in a variety of structural engineering applications due to potential superior characteristics such as low density, high strength-to-weight ratio, good corrosion resistance, durability, recyclability properties, high strength similar to steel and, excellent formability (e.g., extrusion). These characteristics are of particular significance in the design of lightweight and transportable BRBs for which ease and speed of construction, low maintenance, and long service life are important considerations. When compared to steel core BRBs, aluminum alloy core BRBs are expected to dissipate seismic energy through more similar compression and tension inelastic cycles.

As an alternative to commercially available BRBs, produced firstly under the patent of various firms in the U.S.A and in Japan, a total of 8 BRB types, 4 as preliminary/pilot studies, 2 with steel core and outer steel tube, 2 with aluminum alloy core and aluminum alloy outer tube having the same yield strength and simple end connection details were designed, fabricated, and tested.

All BRBs were tested in the Structural and Earthquake Engineering Laboratory (STEEL) at the Technical University of Istanbul using a versatile test set-up designed and fabricated by one of the PhD students of the thesis advisor. The set-up composed of a steel L frame was designed to accommodate different bracing sizes and lengths. Using high safety factors, the test set-up was designed to remain elastic under the maximum actuator force. The steel grade for test set-up is S275JR. Loads were applied by a computer-controlled MTS hydraulic actuator, capable of producing up to 250kN horizontal loading. All specimens were designed well less than the capacity of the actuator's load cell. The AISC-341 (2010) loading protocol was used for all BRB tests.

In order to exactly determine the mechanical properties of steel and aluminum alloy core materials from which the BRBs were produced, numerous tensile test specimens (coupons) were prepared in almost prototype samples following the recommended standards (ASTM-A370-08a, ASTM-E8/E8M-09). Material test results contain valuable information on choosing the material classes to be used in designing and manufacturing the steel and aluminum alloy BRBs. Coupon test results were used as material data in static pushover analyses.

The BRBs used in the main tests, 2 of which were manufactured from steel core element and steel outer tube and 2 of which were manufactured from aluminum alloy core element and aluminum alloy outer tube material, have a unique design, combining their technological superiorities and minimizing the disadvantages of the existing BRBs developed in the U.S.A and in Japan.

Cross-sectional areas of the BRBs were selected based on the possible smallest core geometry. For all specimens, the longest core lengths used 73% of the total brace length. Aluminum alloy group BRBs (BRB-AC1 and BRB-AC2) use rectangular plates as core material having dimensions of 15mm x 35mm for BRB-AC1, and 15mm x 40mm for BRB-AC2. The core material is made of A5083-H111 nonheat-treated aluminum alloy, which mostly expands at the ends to form a cruciform section. Aluminum alloy tubes of BRB-AC1 and BRB-AC2 were made of A6060-T66 material. Steel core sections of BRB-SC1 and BRB-SC2 used rectangular plates (for BRB-SC1, 16mm x 30mm, and for BRB-SC2, 12mm x 25mm). Two types of steel grades are considered, namely S235JR (normal yield strength steel) for BRB-SC1, and S355JR (high yield strength steel) for BRB-SC2 respectively. Outer steel tubes were also made of S355JR steel material.

All specimens were subjected to reversed cyclic quasi-static loading. Standard displacement controlled loading protocol and low-cycle fatigue tests (in one specimen only) were conducted. Experimental results are tabulated and presented in the form of hysteresis loops. Cyclic performances of BRBs based on the acceptance criteria given in AISC-341, 2010 are investigated. All tests were performed until the brace fractured. Hysteretic curves, behavioral values such as the maximum strength in tension and compression cycles, hysteretic damping, and cumulative hysteretic energy dissipation values are presented.

All specimens, except for BRB-AC1, performed well under the Standard Loading Protocol. No fracture in welds, brace instability or no brace-to-end connection failures were observed. Plots showing the applied load versus brace deformation showed stable, repeatable behavior with positive incremental stiffness. Among all the BRBs, the highest compression adjustment factor at the design displacement level was obtained as $\beta=1.76$ in BRB-SC2. The highest tension adjustment factor at the

design displacement level was obtained as $\omega=1.81$ in BRB-AC2. It was understood that the reason for the increase in β factor is attributed to the higher bond features of the mortar used, potential flaws of unbonding surface, and the inner gap.

η values of cumulative inelastic deformations were obtained to be $100\Delta_{by}$ in aluminum alloy BRBs and greater than $172\Delta_{by}$ in steel BRBs. It was observed that hysteretic curves of specimens obtained as a result of experimental and analytical studies were similar and close to the curves obtained with coupon test results. Estimation of experimental success ratio in terms of initial stiffness ranged between 90% ~ 99% when aluminum alloy and steel specimens were taken into consideration.

The most significant superiority that would be obtained from aluminum alloy BRBs is the perfect corrosion resistance. This is the biggest problem faced by the licensed manufacturers for BRBs. Potential corrosion problems shorten the expected life of a brace and affect their behavior adversely. BRBs with high corrosion resistance requested by the industry were manufactured with aluminum alloy BRBs within the scope of this thesis.

In the analytical part, a nonlinear finite element method (FEM) is used with the help of ANSYS-Workbench v12.0.1. Hysteretic curves in which strain-hardening effect is also considered, are compliant with the experimental results. Well-balanced and stable curves are obtained. Non-linearity of materials was defined by using the von Mises yield criterion. Thus, effect of characteristics of steel and aluminum alloy materials on behavior and their energy absorption capacities were compared. For the experimental part of the thesis, the existing database was examined in the direction of this scope. Numerical parameters that are required for modeling were determined.

Contents of the main sections of this thesis are given below:

In Section 1, the subject and scope of the thesis are described. Brief review of past and current theoretical and experimental works on the hysteretic behavior of BRBs and steel frames braced with BRBs is given.

Coupon test results to exactly determine mechanical properties of steel and aluminum alloy core materials from which the BRBs were produced are presented in Section 2.

In Section 3, design, fabrication, and cyclic testing of the BRBs used in the main tests, 2 of which have steel core element and steel outer tube and 2 of which have aluminum alloy core and aluminum alloy outer tube, are given. The experimental program, testing set-up, data acquisition systems, and instrumentation are described. Furthermore, components of BRBs are explained, and the welding procedure to be applied to steel and aluminum alloy BRBs is summarized. Assembly of the existing test set-up in its current place in the laboratory, steps of assembly of BRBs to the test set-up according to the order of the test program, and channel codes and position of instruments used in the tests are explained.

Using the static pushover analysis results, the estimated BRB behavior is discussed in Section 4. Experimental observations are presented in detail. Hysteretic loops representing the cyclic behavior are given.

In Section 5, test results are analyzed, and obtained horizontal force- horizontal displacement hysteretic curves, cyclic energy dissipation curves, quantity of cyclic energy dissipation, horizontal force-out-of-plane displacement hysteretic curves, horizontal force-core deformation hysteretic curves, and horizontal force-gusset

plate displacement hysteretic curves are provided. Effective (or equivalent) damping ratios of BRBs are calculated and compared.

A 3D modeling of BRBs under reversed cyclic tension and compression loadings is developed in Section 6. Numerically obtained behavioral values are compared with the experimental results.

In Section 7, all the experimental and analytical results from this thesis are summarized. Recommendations are made for potential future studies.

Experimental results show that, cumulative energy dissipation of aluminum alloy core BRBs can be significantly increased when weld-free BRBs are used in design. The fabricated BRBs achieved the desired behavior while no global buckling occurred under inelastic displacement cycles. The BRB having welded details experienced premature failure due to the strength loss in heat effected zone from the core to the stiffened zone. Aluminum alloy BRBs could be preferable in buildings or bridges where severe corrosion effects are expected. Compared to steel core BRBs, relatively symmetrical hysteretic curves are obtained in aluminum alloy core BRBs.

As a result, aluminum alloy core BRBs showed promise for use in new buildings/bridges or as a retrofitting technique in buildings/bridges that lack strength, stiffness, and ductility.

1. GİRİŞ

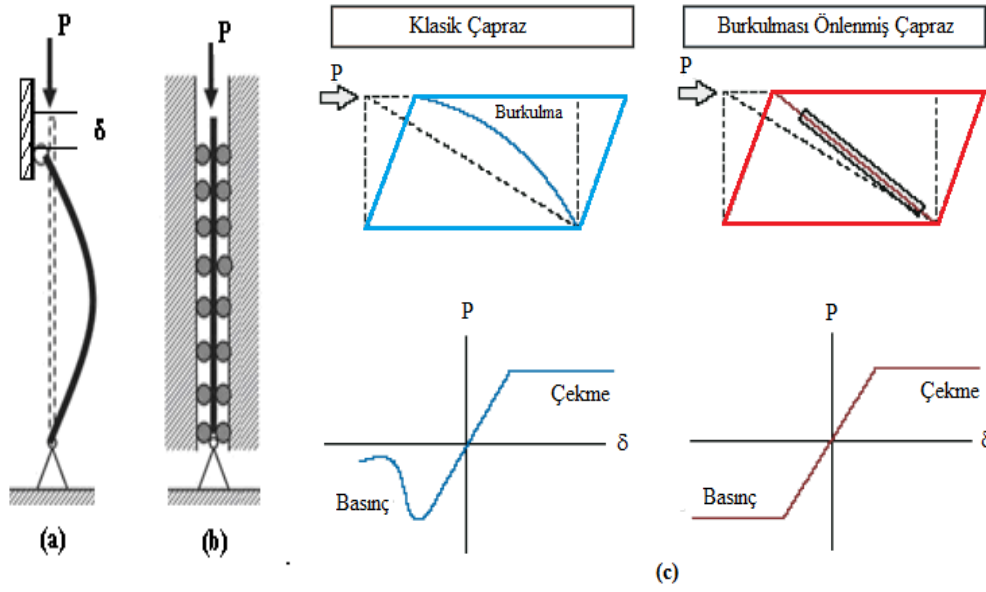
1.1 Motivasyon

1994 Northridge ve 1995 Kobe depremleri sonrasında rijit çerçeve sistemlerinin beklenen performansı gösterememesi üzerine, depremin yıkıcı etkisini azaltmayı sağlayacak yeni çözümler arama yoluna gidilmiştir. Öncelikle Japonya’da başlayan bu çalışmalar ABD’de de yayılmaya ve son zamanlarda diğer ülkelerde de hızlanmaya başlamıştır. Deprem enerjisinin yutulmasını sağlayan değişik türdeki yapısal sönümleyiciler bu anlamda yararlı sonuçlar vermiştir.

Burkulması Önlenmiş Çaprazlar (BÖÇ) bu bağlamda üzerinde yoğun biçimde çalışılan elemanlardandır. Bunlar, bir tür mekanik sönümleyiciler olup önemli depremlerde çekmede ve basınçta akarak dengeli bir histeretik davranış gösterirler. BÖÇ’lü çerçeveler mevcut betonarme ya da çelik binaların rijitlik ve dayanımlarının artırılması için güçlendirme amacıyla, yeni binalarda etkin enerji yutma elemanı olarak kullanılabilir. Köprülerde de özellikle sünek enerji yutma elemanları olarak çoğunlukla Japonya ve ABD’de yaygınlaşmaktadır. BÖÇ’lerin çekme ve basınçta yaklaşık simetrik davranış göstermesi, rijitlik ve dayanım kaybı göstermeden aynı zamanda stabil histeretik eğrilerin elde edilmesi kullanım alanını genişletmiştir. Bu özellik diğer alternatif sistemlere göre önemli üstünlükler getirmektedir.

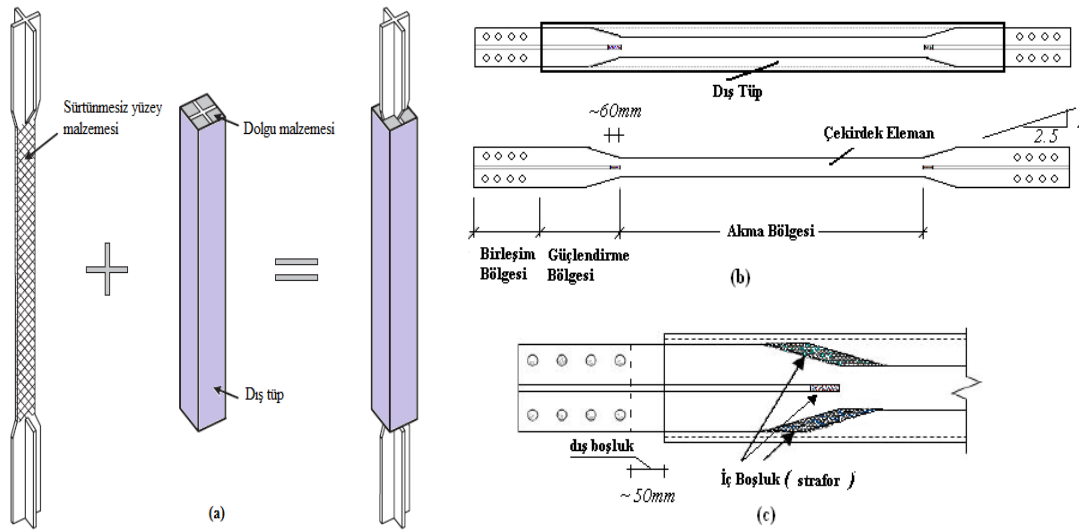
1.2 BÖÇ Davranışı ve Bileşenleri

Narin, burkulması önlenmemiş klasik bir çaprazın ve BÖÇ’ün burkulma biçimi Şekil 1.1(a) ve 1.1(b)’de verilmiştir. İki ucu mafsallı klasik çapraz ile karşılaştırıldığında, BÖÇ’ün basınç etkisinde yuttuğu enerjinin klasik çaprazinkinden çok daha fazla olduğu görülmektedir (Şekil 1.1c).



Şekil 1.1 : (a) Klasik çapraz. (b) İdealleştirilmiş BÖÇ. (c) Klasik çapraz ile BÖÇ histeresislerinin karşılaştırılması (Xie, 2005).

BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemleri klasik çaprazlı çerçevelerden daha sünek ve kararlı bir davranış göstermektedir. BÖÇ'lerin bileşenlerini gösteren örnek bir şematik çizim Şekil 1.2a ve 1.2b'de verilmiştir (Xie, 2005).



Şekil 1.2 : (a) BÖÇ'ün şematik gösterimi. (b) Çekirdek elemanın bölgeleri. (c) Akma bölgesi ile dolgu malzemesi arasındaki boşluk (Xie, 2005).

Tipik bir BÖÇ genellikle dört parçadan oluşmaktadır: Burkulması önlenen ve eksenel kuvveti taşıyan çelik/alüminyum çubuk "çekirdek eleman", çekirdek elemanın burkulmasını önleyen ve eksenini doğrultusunda çok küçük ya da sıfır yük alan dış eleman ise "dış tüp" olarak isimlendirilmektedir. BÖÇ'ün diğer bileşenleri

ise dış tüple birlikte burkulmayı önleyen sistemi oluşturan “dolgu malzemesi” ve çekirdek eleman ile dolgu malzemesi arasında görev yapan “sürtünmesiz yüzey malzemesi” dir. BÖÇ’ün tekrarlı yükler altındaki tam ve dengeli histeretik davranışı dış tüpten bağımsız olarak, çekirdek elemanın boyuna doğrultusundaki şekildeğiştirmesine izin verilerek ve çekmede olduğu gibi basınçta da elastik olmayan şekildeğiştirmeler yaparak, enerji yutulmasıyla sağlanır. Çekirdek eleman akarak δ kadar eksenel yerdeğiştirdiğinde yanal yerdeğiştirmesi dış tüp+dolgu malzemesi tarafından tutulurken, iki eleman arasındaki sürtünmesiz yüzey de eksenel kuvvetin dış tüpe aktarılmasını engellemektedir.

BÖÇ davranışını belirleyen başlıca etken, çekirdek elemanın geometrik yapısıdır. Çekirdek eleman üç bölgeye ayrılmıştır (Şekil 1.2b):

Akma Bölgesi : Elastik olmayan şekildeğiştirmelerin oluşmasının istenildiği bölgedir. Sünekliğin yüksek olması için bu bölgede çoğunlukla normal akma dayanımlı çelik malzeme (A36, S235 gibi) tercih edilmekle birlikte, yüksek akma dayanımlı çelik malzeme de (A572 Gr.50, S355 gibi) kullanılmaktadır; düşük akma dayanımlı çelik (LYSS) çekirdekli BÖÇ’ler de üretilmiştir (Chen ve diğ., 2003). Ayrıca dış tüp ve dolgu malzemesi ile tutulmuş bu bölgenin çekme ve basınçta uniform bir şekilde akması için çelik çekirdek enkesit alanı azaltılmaktadır. Tekrarlı yükler altında meydana gelen çok küçük yerdeğiştirmelerde bile tahmin edilebilir bir akma dayanımının beklendiği akma bölgesinin uzunluğu kontrol edilerek sismik enerji yutma kapasitesi belirlenmektedir. Uzun akma boyu, çaprazın yapıya giren deprem enerjisini daha çok sönümleyerek, yapı üzerindeki deprem etkisini azaltmaktadır.

Güçlendirme Bölgesi : Akma bölgesine göre daha geniş enkesiti olan bu bölge zayıf çekirdek elemanın tutulmuş uzunluk dışında yerel burkulma yapmasına engel olmaktadır. Böylece şekildeğiştirmeleri olabildiğince akma uzunluğu içerisinde kalmaktadır. Güçlendirme bölgesi kesiti için akma bölgesindeki çekirdek elemanın istavroz şeklinde düzenlenmiş şekli kullanılmaktadır. Böylece gerilme yığılmalarından kaçınmak için enkesit geçişlerinin pürüzsüzlüğü sağlanmaktadır. Öte yandan berkitme levhalarının kaynaklanmasıyla bu bölgenin enkesit alanının genişletilmesi de olanaklıdır. Çelik çekirdeğin basınç etkisinde akma bölgesi uzunluğu kısalmakta ve enkesiti Poisson etkisiyle artmaktadır. Akma bölgesinden

güçlendirme bölgesine, enkesit alanının genişletilmesiyle yapılan geçişte Şekil 1.2c'de görüldüğü gibi çelik eleman ile dolgu malzemesinin temasını önleyen iç boşluk bırakılmaktadır. Böyle bir temas beklenmedik şekilde çaprazın tasarım dayanımının ötesinde basınç kapasitesinde artışa neden olmaktadır; örneğin, merkezi ters V çaprazlı çerçeve sistemde dengelenmemiş düşey yükü arttırmaktadır. Çaprazın birleşim plakaları ile dış tüp arasındaki temasını engellemek için uygun bir aralık bırakılmaktadır. Dış boşluk BÖÇ'ün deprem etkisi altında elastik olmayan şekildeğiştirmelerin yutulması için üretimde düşünülmesi gereken önemli bir ayrıntıdır. İç, dış boşluk boyutları deprem kuvvetleri etkisinde oluşan göreceli kat ötelenmelerinin hesaplanması sonucuna göre belirlenmesi gerekse de uygulamada yaklaşık 50~60mm civarında bırakılmaktadır. Güçlendirme bölgesi uzunluğu için deneylerden elde edilen sonuçlar dikkate alınmaktadır. Uygulamada ise bu sonuçlara göre belirli sınırlar içinde interpolasyon yapılması mümkündür.

Birleşim Bölgesi : Bu bölge güçlendirme bölgesinin bir uzantısı olan çerçeveye bağlantının yapıldığı, dolgu malzemeli dış tüpün dışında kalan bölgedir. Güçlendirme bölgesindeki istavroz büyütülerek birleşimin elastik sınırlarda eksenel kuvveti aktarması sağlanır. Birleşim bölgesi uzunluğunun kısa olması dengeli ve kararlı bir histeretik davranışın elde edilebilmesine yarar sağlamaktadır. Çelik çekirdek ile dolgu malzemesi arasında oluşturulan sürtünmesiz yüzey malzemesi/boşluk çaprazın enine genişlemesine izin verirken birleşim bölgesinin yerel burkulmasını engellemesi bakımından da önem taşımaktadır. Genellikle bu bölgede çaprazın gerektiğinde (örneğin önemli bir deprem sonrasında) diğer çerçeve elemanların etkilemeden değiştirilebilmesi ve montaj kolaylığı açısından bulonlu birleşim tercih edilmektedir, buna karşın kaynaklı BÖÇ birleşimleri de vardır (Star Seismic, WildCat). BÖÇ'ün bayrak levhasına mafsallı birleşiminde çerçeveden çapraza kat ötelemelerinden dolayı oluşabilecek moment ve kesme kuvveti geçişi olmaz. Çapraz yalnızca eksenel normal kuvvet etkisi altında idealleştirilmiş bir eleman gibi davranır. Birleşim uzunluğunun azalmasıyla akan çelik çekirdek boyu uzar ve eksenel şekildeğiştirmeler artar.

Tezin amacı, farklı çekirdek malzemesine sahip BÖÇ'lü çerçeve sistemlerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışını kuramsal ve deneysel olarak

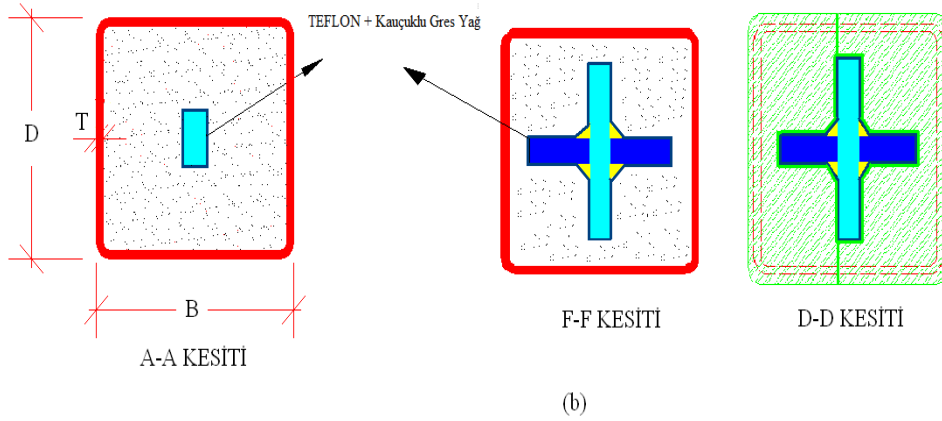
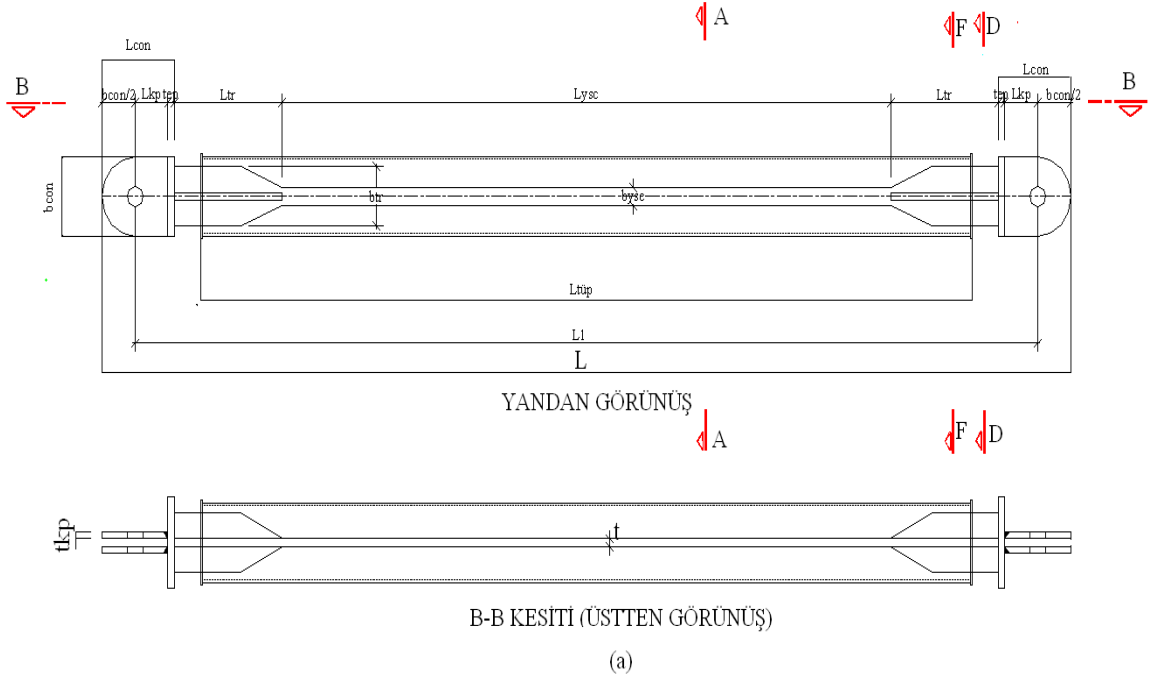
incelemektir. Çalışmanın özgün yönlerinden biri alüminyum çekirdekli ve alüminyum dış tüplü BÖÇ'lerin, bilindiği kadarıyla, burada ele alınış şekliyle ilk kez tasarlanması, üretilmesi ve denenmesidir. Alüminyum, çeliğe göre hafif, yumuşak, düşük sıcaklıklarda bile ani darbelere gösterdiği dayanım yüksek, estetik ve kolay şekil verilebilme (ekstrüzyon gibi) ve yüksek korozyon dayanımı özelliklerine sahiptir. Enerji sönümleme kapasitesine getireceği yararlılıklar açısından alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin üretimi inşaat sektörünün bir isteği olarak görülmüştür. Özellikle korozyon dayanımının yüksek olması kötü ortam koşullarına sahip binalarda ve köprülerde olası kullanım üstünlükleri getirmektedir.

Çelik BÖÇ'lerde oluşan çekme ve basınç dayanımı arasındaki farkın, üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde azalması beklenmiş ve deney sonuçlarından beklenen değerler elde edilmiştir. İlk olarak, Amerika ve Japonya'da bulunan çeşitli firmaların patentinde üretilen BÖÇ'lere alternatif, farklılığı olan, aynı akma dayanımlı, basit uç detayına sahip, 5'i çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 3'ü alüminyum çekirdek ve alüminyum dış tüp olmak üzere toplam 8 adet BÖÇ tasarlanmış, üretilmiş ve denenmiştir.

Birinci grup BÖÇ serisi "Ön Çalışmalar" başlığı altında Ek A'da değerlendirilmiş olup 3'ü çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 1'i alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum dış tüpten üretilen toplam 4 adet BÖÇ'ten oluşmaktadır.

Tez çalışması bütününde, ikinci grup BÖÇ serisi olarak üretilen 2'si çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 2'si alüminyum çekirdek ve alüminyum dış tüpten oluşan toplam 4 adet BÖÇ'ün tekrarlı ve yön değiştiren yükler altındaki histeretik davranışının deneysel ve kuramsal olarak incelenmesi esas alınmıştır.

Tasarlanan numunelerin tipik plan görünüşü Şekil 1.3a'da, tipik kesitleri 1.3b'de verilmektedir.

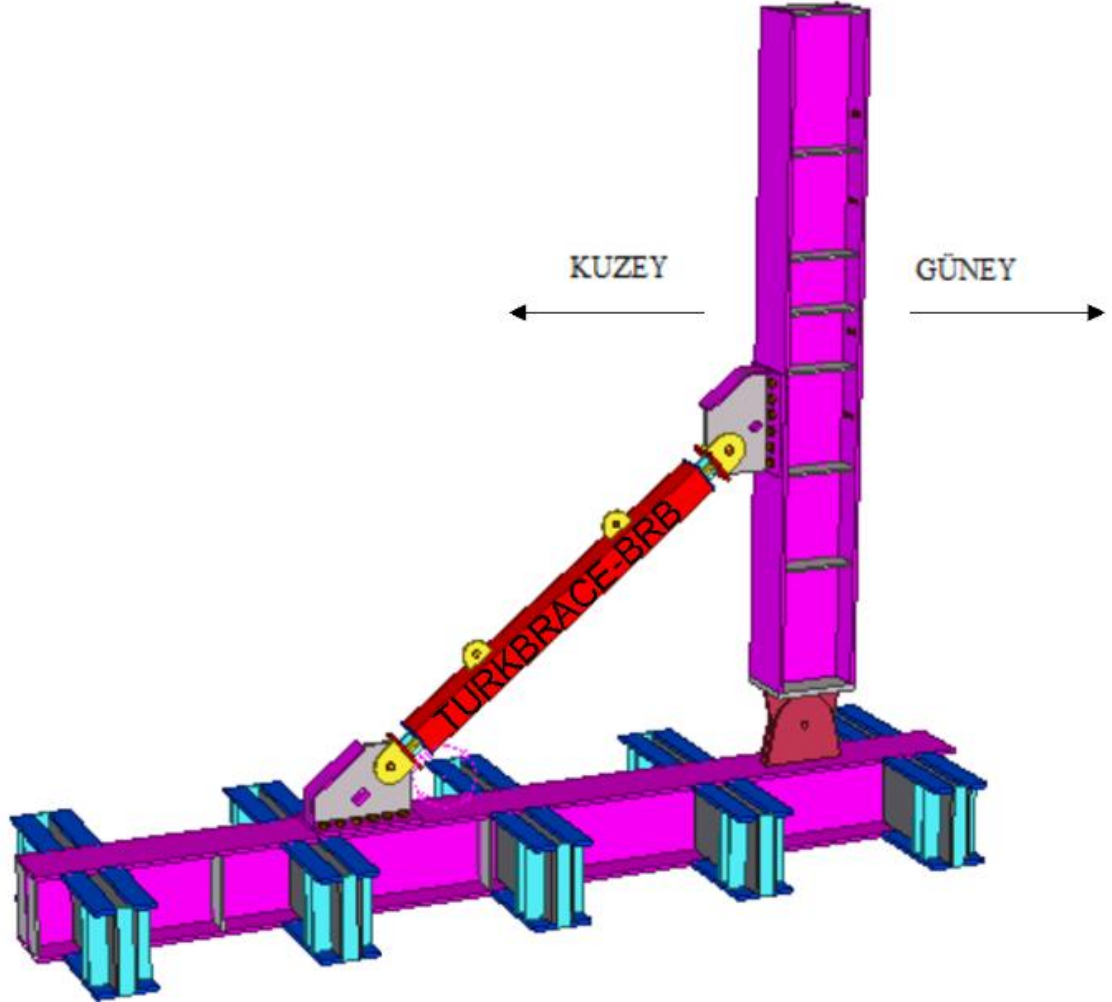


Şekil 1.3 : Tasarlanan BÖÇ'ler (a) Genel görünüşü. (b) Kesit görünüşü.

Yapılan ön araştırmada BÖÇ'lü çerçevelerin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek için çoğunlukla ideal elasto-plastik hesap modellerinin kullanıldığı, ancak Bouc-Wen (BW) ya da benzeri bir hesap modelinin pekleşmenin etkisini de dikkate alarak davranışını en iyi şekilde yansıtan model olduğu görülmüştür. Ayrıca, çaprazın üretim kolaylığı ve davranışının daha iyi tahmin edilebilmesi için olabildiğince az bileşenli, basit elemanlar olarak ve basit uç detaylarıyla üretilmesi benimsenmektedir. Tasarım ve modellemede bu noktalar dikkate alınmıştır.

Üretilen BÖÇ'ler, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan ve tez danışmanın bir başka doktora çalışması kapsamında İnş.Yük.Müh. Cem Haydaroğlu tarafından özellikle klasik çaprazlar için tasarlanıp

Üretilen mevcut deney çerçevesinde deneysel olarak incelenmiştir. Deney düzeneğinin ve B'n üç boyutlu genel görünüşü şekil 1.4'de verilmektedir. Deney düzeneğinin tasarlanan, üretilen, denenen TURKBACE-BRB olarak etiketlenen B'n üç boyutlu genel görünüşü şekil 1.4'de verilmektedir.



şekil 1.4 : Deney düzeneğinin ve TURKBACE-BRB'lerin 3 boyutlu genel görünüşü.

B'lerin üretiminin yapıldığı elik ve alüminyum alaşım malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için yeterli sayıda çekme deneyi numunesi öngörülen standartlara göre ve gerçeğe yakın boyutlarda hazırlanmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre hesaplar tekrar revize edilerek üretime başlanmıştır. Paralelinde yürütülen kuramsal çalışmada pekleşmenin dikkate alındığı gerçeğe yakın, deney sonuçlarıyla uyumlu, dengeli ve kararlı histeretik davranış eğrilerinin elde edilmesi hedeflenmektedir.

Böylece çelik ve alüminyum alaşım malzeme karakteristiklerinin davranış üzerine olan etkisi ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Tezin deneysel bölümü için mevcut veritabanı bu kapsam doğrultusunda incelenerek modelleme için gerekli ve sistemin davranışına etkisi olan hesap parametreleri Çizelge 1.1’de verilmiştir: Bu parametrelerdeki değişimlerin sistemin davranışına etkisi tezin ana kapsamını oluşturmaktadır. Kuramsal bölümde, BÖÇ’lerin davranışı inelastik akma bölgesi, elastik güçlendirme bölgesi ve birleşim bölgeleri olarak sonlu elemanlarla modellenmiştir. Böylece literatürde verilen BÖÇ’lerin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki %10 ~15 farkın azalarak, çekmedekine benzer basınç davranışı elde edilmiştir. Sonuçta tahmin edilebilir davranış modellenmesi bakımından literatürde yapılmış BÖÇ’lü çerçeve hesap modellerine önemli bir katkı sağlandığı düşünülmektedir.

Çizelge 1.1 : BÖÇ’lü çerçeve modelinin davranışını belirleyen ana parametreler.

Çekirdek elemanın enkesit şekli	Dikdörtgen
Dış tüp enkesit şekli	Kare /Dairesel Tüp
Çekirdek elemanın akma bölgesi enkesit alanı	A_{sc}
Çekirdek elemanın akma bölgesi uzunluğu	L_{ysc}
Çekirdek elemanın birleşim bölgesi+güçlendirme bölgesi alanı	$A_{nc} = A_{con} + A_{tr}$
Çekirdek elemanın birleşim bölgesi+güçlendirme bölgesi uzunluğu	$L_{nc} = L_{con} + L_{tr}$
Çekirdek elemanı akma dayanımı	F_{ysc}
Çekirdek elemanı kopma dayanımı	F_u
Çaprazın elastik rijitliği	K
Akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranı	α
BÖÇ süneklik oranlarının etkisi	μ

Numunelerin seçimde olabildiğince ölçek faktörü oluşturulmamaya, diğer bir deyişle sonlu eleman modeli ve deney modelleri için gerçek model boyutlarına gidilmeye çalışılmıştır. Bu yeni tasarım yoğun bir malzeme araştırması sürecini gerektirmiş olup tüm detaylar geliştirilerek hazır hale getirilmiştir. Numunelerin özellikleri Çizelge 1.2’de topluca verilmektedir.

Çizelge 1.2 : Deney numunelerinin özellikleri.

Numuneler	Dış Tüp	Çekirdek	Dolgu Malzemesi	Sürtünmesiz Yüzey Malzemesi	Birleşim Elemanları
BRB-AC1	Alüminyum	Alüminyum PL-15 x 35	Çimento esaslı, akışkan kıvamlı, yüksek dayanımlı tamir harcı (KÖSTER-VGM5)	TEFLON Kendinden Yapışkanlı Bant (FİBERFLON) +	Çelik
BRB-AC2		Alüminyum PL-15 x 40		Kauçuklu Gres Yağı (LUBCO) +	
				Hava Kabarcıklı Naylon	
BRB-SC1	Çelik	Normal akma dayanımlı çelik PL-16 x 30	Çimento esaslı, akışkan kıvamlı, yüksek dayanımlı tamir harcı (KÖSTER-VGM5)	TEFLON Kendinden Yapışkanlı Bant (FİBERFLON) +	Çelik
BRB-SC2		Yüksek akma dayanımlı çelik PL-12 x 25		Kauçuklu Gres Yağı (LUBCO) TEFLON Kendinden Yapışkanlı Bant (FİBERFLON) +	
				Kauçuklu Gres Yağı (LUBCO)	

Tezde buradaki özgün özellikleri ile ilk defa uygulanan alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin verimlilik ve üstünlükleri detaylı olarak incelenmiştir. Alüminyum, çeliğe göre daha yumuşak ve hafif bir metal olup mat ve gümüşümsü renktedir. Yoğunluğu çelik ve bakırın 1/3'ü kadardır. Bu yüksek dayanım/ağırlık oranı alüminyumu özellikle köprülerin rehabilitasyonu için aranan eleman yapmaktadır. Alüminyum ani darbelere karşı dayanıklıdır. Normal çeliğin düşük sıcaklıklarda ani darbelere karşı mukavemeti azalırken alüminyumun azalmamaktadır. Alüminyum çelik gibi yapısal eleman olarak kullanıma uygun ve istenilen dayanıma sahip bir metaldir. Örneğin 6xxx serisi yumuşak ekstrüzyonlu alaşımlar magnezyum ve silisyum içermekte olup mimari-inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Elastik rijitliği alüminyuma göre fazla olan çelik BÖÇ'lü çelik çerçevenin etkiyen deprem yükleri altında titreşim periyodu kısılırken, alüminyumun düşük elastik rijitliğinden dolayı uzamakta ve kat ötelenmelerinin artmasına karşın deprem yükleri azalmaktadır. Ayrıca alüminyumdan üretilen BÖÇ'lerin, basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki farkın, çelik BÖÇ'lere göre, daha az sürtünme oluşacağından azalması beklenmiş ve deneyler sonucunda bu beklenti gerçekleşmiştir. Bu özelliğin davranışa olan etkileri tez kapsamında detaylı olarak irdelenmiştir.

1.3 Konu ve Kapsam

Tezde Burkulması Önlenmiş Çapraz'lı (BÖÇ) çelik çerçeve sistemlerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki elastik ötesi davranışı kuramsal ve deneysel olarak iki bölümde incelenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, BÖÇ'lerin histeretik davranışını etkileyen başlıca parametrelere göre tasarım detayları geliştirilmiştir. Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında sünek çaprazın üretim kolaylığı ve tekrarlı yükler altındaki davranışının daha iyi tahmin edilebilmesi için olabildiğince az bileşenli, basit elemanlı ve basit uç detaylarıyla üretilmesi benimsendiği görülmüştür. Çalışmanın deneysel bölümünde, Amerika ve Japonya'da bulunan çeşitli firmaların patentinde üretilen BÖÇ'lere alternatif, farklılığı olan, aynı akma dayanımlı, basit uç detayına sahip, 5'i çelik çekirdek ve dış tüp, 3'si alüminyum çekirdek ve dış tüp olmak üzere toplam 8 adet BÖÇ tasarlanmış, üretilmiş ve denenmiştir.

Birinci grup BÖÇ serisi “Ön Çalışmalar” başlığı altında Ek A’da değerlendirilmiş olup 3’ü çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 1’i alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum dış tüpten üretilen toplam 4 adet BÖÇ’ten oluşmaktadır. Tez çalışması bütününde, ikinci grup BÖÇ serisi olarak üretilen 2’si çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 2’si alüminyum çekirdek ve alüminyum dış tüpten oluşan toplam 4 adet BÖÇ’ün tekrarlı ve yön değiştiren yükler altındaki histeretik davranışını deneysel ve kuramsal olarak incelenmesi esas alınmıştır.

Üretilen yeni BÖÇ’lerin elastik ve elastik olmayan davranışı, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı’nda bulunan ve tez danışmanın doktora öğrencisi İnş.Yük.Müh. Cem Haydaroglu tarafından özellikle çaprazlı sistemler için tasarlanıp üretilen mevcut deney çerçevesinde yön değiştiren yükler altında incelenmiştir. (Haydaroglu ve diğ., 2010, 2011). Tercih edilen ve kullanılan deney düzeneği özellikle Japonya’da tercih edilen ve klasik çaprazlar ve metalik ya da diğer türden sönümleyicilerin denenmesinde sıkça kullanılmaktadır.

Literatürde çelik BÖÇ’lerin basınç dayanımının çekmedeki dayanımından %10~15 daha büyük olduğu belirtilse de hesap kolaylığı için bu özellik bazı çalışmalarda terkedilmektedir (Celik ve Bruneau, 2009, 2010b). Basınç dayanımındaki bu artış Poisson etkisiyle çelik çekirdeğin burkulmayı önleyen sistem içinde genleşmesi ve sürtünmesiz yüzey malzemesi kusurundan dolayı çelik çekirdek ile dolgu malzemesi arasında oluşan sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Ek olarak, gerçekte çaprazın akma sonrası rijitliğin elastik rijitliğe oranı $\alpha=0.025$ değerine kadar ulaşabilse de “ideal elasto-plastik hesap modeli” kullanıldığında akma sonrası rijitlik yok varsayılmaktadır. Yapılan önceki çalışmalarda BÖÇ’lü çerçevelerin tekrarlı yükler altındaki davranışını incelemek için çoğunlukla simetrik ideal elasto-plastik histeretik hesap modelleri kullanıldığı, ancak Bouc-Wen (BW) ya da benzeri bir modelin pekleşmenin etkisini de dikkate alarak davranışı en iyi şekilde yansıtan model olduğu görülmüştür (Black ve diğ., 2002). Çalışmanın kuramsal bölümünde, gerçeğe yakın, hesap modeli ile deneysel çalışma sonuçlarının birbirine yeterince uyumlu, dengeli ve kararlı olduğu ve histeretik pekleşmenin dikkate alındığı bir sonlu eleman (FEM) modeli geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Yön değiştiren tekrarlı y¼kler altında oluşan histeretik davranış eğrisinin alanı sistemler tarafından yutulan enerjinin miktarını vermektedir. Her bir numuneye ilişkin deneylerden, yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirmelere g¼re histeretik eğriler elde edilerek ¼retilen B¼Ç'lerin enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Numunelerin ¼ekme ve basınç taşıma kapasiteleri ve bu değerlerin y¼kleme ge¼miřine (load-history) bağlı olarak değişimleri ve kopma ¼m¼rleri elde edilerek karşılaştırılmıştır. ¼aprazların ¼ekme ve basınçta benzer dayanımlar g¼stererek, burkulmadan, stabil, kendini tekrarlayan, olabildiğince dolu histeretik eğrilerin elde edilmesi bu ¼alıřmanın en ¼onemli başarı ¼lç¼tlerinden birini oluşturmuştur.

¼alıřmanın ¼zg¼n y¼nlerinden bir diğeride al¼minyum alaşımlı ¼ekirdekli ve al¼minyum alaşımlı dış t¼pl¼ B¼Ç ¼retilmesidir. B¼Ç'lerin ¼retiminin yapılacağı ¼elik ve al¼minyum alaşım malzemelerin mekanik ¼zelliklerini tam olarak belirleyebilmek i¼in yeterli sayıda ¼ekme deneyi numunesi ¼ng¼r¼len standartlara g¼re ve gerçeğe yakın boyutlarda hazırlanmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonu¼lara g¼re hesaplar revize edilerek ¼aprazlar ¼retilmiřtir. ¼elik B¼Ç'lerin ¼retimi, ¼elik ve al¼minyum alaşımlı B¼Ç'lerin bayrak levhalarının ve bulonlarının imalatı, montajı ve nakliyesi i¼in ¼İMTAř A.ř.'den Ar-Ge desteği alınmıştır. ¼retimde gerekli olan y¼ksek dayanımlı dolgu malzemesi K¼STER Waterproofing Systems tarafından temin edilerek hazır hale getirilmıştir. S¼rt¼nmesiz y¼zey malzemesi olarak FIBERFLON tarafından karşılanan kendinden yapışkanlı Teflon bantlar kullanılmıştır.

Amerika ve Japonya'daki mevcut B¼Ç'lerle karşılaştırıldığında, onlardaki teknolojik ¼st¼nl¼kleri ¼zerinde birleştirirken, varolan sakıncaları en alt d¼zeyde tutan 5'i ¼elik ¼ekirdek ve ¼elik dış t¼p, 3'¼ al¼minyum alaşımlı ¼ekirdek ve al¼minyum alaşımlı dış t¼p olarak ¼retilen B¼Ç'ler i¼in ¼zg¼n bir tasarım ger¼ekleřtirilmıřtir. U¼ birleşimi bakımından basit ve herhangi bir hasar alması durumunda kolayca s¼k¼l¼p takılabilmesi yeni tasarlanan B¼Ç'lerin getireceği faydalardan biri diğeridir. ¼elik B¼Ç'lere alternatif olarak geliştirilen al¼minyum alaşımlı B¼Ç'ler T¼rkiye'deki sekt¼r¼n bir işteği olarak ortaya ¼ıkmıř, b¼ylece al¼minyumun yapısal alanda kullanımının yaygınlaşmasını sağlayacak farklı bir alanın oluşması amacı ger¼ekleřtirilmıřtir. B¼Ç'l¼ ¼elik ¼erçeveler konusunda yapılan literat¼r taramasında

yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışın daha net tahmin edilebilmesi bakımından özellikle kuramsal eksikliklerin olduğu görülmüştür. Doktora tezi kuramsal içerik bakımından da bu boşluğu doldururken deneysel içerik bakımından üstünlükleri olan, farklı bir tip B üretildiğinden varolan teknolojiyi geliştirme bakımından önemli sonuçlar sağlamıştır. Uluslararası düzeyde, ulaşıldığı kadarıyla, buradaki tipik özellikleri ile ilk defa üretilen alüminyum alaşımlı B’lerin elik B’lere göre olası davranış verimliliğinin/üstünlüğünün irdelenmesi deprem mühendisliği uygulamaları bakımından önemli görülmektedir.

1.4 Literatür Araştırması

B’l elik çerçevelere ilişkin nc deneysel ve kuramsal alışmalar Japonya’da Wakabayashi ve diğ. (1973) tarafından yapılmış olup elik düz plakadan üretilmiş çaprazı bir çift prekast betonarme panel arasına yerleştirip ve aralarında sürtünmesiz yüzey tabası bırakarak “*Sandviç Model*” adı verilen bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistemde çapraz, yatay yükü karşılıarken betonarme panel çaprazın burkulmasını önlemektedir. İncelemelerde, sürtünmesiz yüzey oluşturma yollarını geliştirmek için “ekip çıkarma deneyleri”, prekast panellerin öngörülen rijitlik ve dayanımlarını incelemek için elik plakaların “basınç deneyleri”, uç birleşim detaylarının etkinliğini incelemek için “birleşim deneyleri” ve sistemin davranışını doğrulamak için ise “iki katlı ereve deneyleri” gerçekleştirilmiştir. Sonuçta, elik plakanın uniform olarak şekildeğiştirdiği ve çaprazın basınçtaki dayanımının çekmedeki dayanımından büyük olduğu görülmüştür. Bu çalışmaların uzantısında beton dolgu malzemesinin dayanım, rijitlik ve donatı ngrleri geliştirilmiştir.

elik aprazın dolgulu elik dış tüple zırhlandığı ilk deneysel çalışma ise Kimura ve diğ. (1976) tarafından yapılmıştır. Dolgu malzemesi ile elik çekirdek arasında sürtünmesiz yüzey oluşturulmamasına karşın dolgulu dış tüpün elik çekirdeğin burkumasını engellemede etkisinin büyük olduğu ve çaprazın basınç etkisinde ekmedekine göre yüksek dayanım sergilediği görülmüştür.

Takeda ve diğ. (1979) elik çekirdek ile dolgu malzemesi arasına uzun ve dar kesikler bırakılarak oluşturulan sürtünmesiz yüzeyli aprazların yn değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemişler ve dış tüpün Euler burkulma

yükünün çelik çekirdeğin akma yüküne oranının en az 1.9 alınması gerektiğini önermişlerdir. Böylece çelik çekirdeğin burkulmayarak çaprazın istenilen mükemmel histeretik davranışı gösterdiği belirtilmiştir.

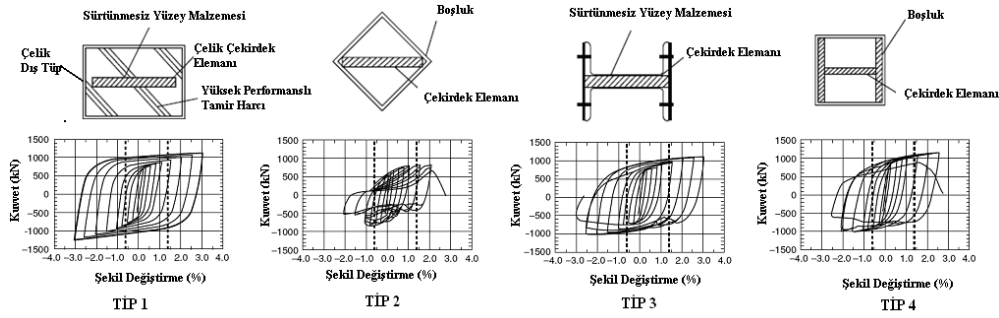
Watabane ve diğ.'nin (1988), çaprazın tümsel burkulma davranışı üzerine yaptıkları çalışmalarda dış tüpün Euler burkulma yükü P_e , çekirdek elemanın eksenel akma yükü P_y olmak üzere P_e/P_y oranları elde edilmiştir ($0.55 \leq P_e/P_y \leq 3.53$). Sonuçta, başlangıçtaki geometrik kusurların büyüklüğünün tümsel burkulmaların oluşmasına etkisi olduğu ve bu yüzden uygulamada P_e/P_y oranının en az 1.5 alınması gerektiği önerilmiştir.

Sürtünmesiz yüzey oluşturulmasının gerekliliğine yönelik ilk çalışmalar Mochizuki ve diğ. (1979) tarafından yapılmıştır. Deneysel çalışmalarında burkulmayı önleyen sistem olarak yalnızca kare enkesitli betonarme dış tüpün kullanıldığı BÖÇ'lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Deneyler betonarme dış tüpün dayanımının önemli bir kısmını kaybederek çatlamasıyla sonuçlanmıştır. Böylece dış tüp içindeki dolgu malzemesi ile çekirdek elemanı arasında sürtünmesiz yüzey malzemesi kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Japonya'da literatürde "*Unbonded Brace*" ismiyle geçen BÖÇ'ler bu çalışmalar sonucunda bulunmuştur.

ABD'de, Higgins ve Newell (2004) burkulmayı önleyen sistem olarak Ottawa kumundan oluşan daneli bir ortam ve çelik çekirdek olarak A36 çeliğini kullanmışlardır. Deney sonrasında çelik çekirdeğin uzunluğu boyunca yapılan incelemede, plaka burkulmasının 18. modda oluşmasının kohezyonsuz daneli ortamın mükemmel bir sargı görevi gösterdiğini göstermiştir. Çevrimsel yüklemeler altında yaklaşık %2 birim şekildeğiştirme oranıyla kararlı histeretik davranış elde edilmiştir.

Iwata ve diğ. (2000) deneysel çalışmalarında 4 tip BÖÇ'lü çerçeve sisteminin elastik olmayan tekrarlı yükler altındaki davranışını inceleyerek histeretik eğrilerini elde etmişlerdir (Şekil 1.5). Üretilmiş bu enkesitlerden Tip 2 ve 4'te sürtünmesiz yüzey malzemesi kullanılmamıştır. Tip 3'te burkulmayı önleyen sistem, 2U profili ve 2 plakanın yüksek dayanımlı bulonlarla birleştirilmesiyle sağlanırken Tip 1 ve Tip 3'te

sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak 1mm kalınlığındaki yumuşak kauçuk şeritler kullanılmıştır.



Şekil 1.5 : Iwata ve diğ. 'nin (2000) deney numunelerine ait histeretik eğrileri.

Şekil 1.5’de histeretik davranışları verilen numunelerden Tip 2 ve Tip 4’te yerel burkulmaları sınırlamak için sürtünmesiz yüzey elemanı kullanılmadığından istenilen kararlı ve dengeli davranış elde edilememiştir. Tip 3 numunesinin burkulmayı önleyen sistem etkisi çelik dış tüplü ve yüksek performanslı tamir harcından oluşan dolgu malzemeli Tip 1’e göre daha az olduğu görülmüştür. Çekirdek plaka ile U profilleri arasına bırakılan boşluğun yüksek seviyelerdeki yerdeğiştirmelerde artarak büyüdüğü ve sonuç olarak yüksek dayanımlı bulonların kesme kuvvetinden dolayı koptuğu gözlemlenmiştir. Bu çalışma sonucunda BÖÇ’lere ilişkin enkesit biçimlerinden en etkin histeretik davranışın Tip 1’in gerçekleştirdiği ve göçme modunun tamir harcının çatlaması sonucu çelik çekirdeğin yerel burkulmasıyla ve sonrasında da çekirdeğin kopması ile bağlantılı olduğu anlaşılmıştır.

Tez için uygulamada da sıkça kullanılan TİP 1 enkesit biçimli numunelerden seçilmiştir. Böyle bir seçim parametre sayısının azaltılmasına da yardımcı olmuştur.

Prasad (1992) çekirdek ve dış tüp için akrilik malzemelerin kullanıldığı ve aralarında bir boşluğun bulunduğu küçük numuneler üzerinde basınç deneyleri yaparak burkulma şekillerini saydam dış tüp dışından gözlemlemiştir. Numunenin ilk burkulma modunda çekirdek, dış tüpün her iki ucunda ve ortaya yakın bir noktasından eğilmektedir. Artan yük altında çekirdeğin bir moddan diğerine geçişi yükte ani ve geçici düşüslere neden olmaktadır Çekirdek ile dış tüp arasına bırakılan boşluğun azaltılması basınç yükü taşıma kapasitesini artırmıştır. Deneysel çalışma

sonucunda sıfır boşluk durumunda yüksek modlarda burkulamayan çelik çekirdeğin minimum taşıma gücü kapasitesi elde edilmiştir.

Tsai ve Lai (2002), sürtünmesiz yüzey malzemesinin BÖÇ'lü çelik çerçevelerin tekrarlı yükler altındaki davranışına etkisini araştırmış, en az eksenel yük farkının 1mm kalınlığındaki silikon kauçuk şeritlerle sağlandığı görülmüştür. İnelastik bölgede Poisson oranı $\nu = 0.5$ olarak alınır, inelastik çelik elemanın hacminin değişmeyeceği ve Poisson oranının yanı sıra çelik çekirdek ile dolgu malzemesi arasındaki sürtünme gibi etkenlerin çaprazın basınçtaki dayanımının artmasına neden olabileceği belirtilmiştir.

Mekanik sönümleyicilerde düşük akma dayanımlı çelikler ilk olarak 1990'lı yılların başında Japonya'da kullanılmaya başlanmıştır. Chen ve diğ. (2001) düşük akma dayanımlı ($F_y=100MPa$) çekirdeği olan BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemlerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. "Buckling-Inhibiting Braces" ismiyle bilinen çaprazların yüksek performanslı tamir harcından oluşan dolgu malzemesi, dış tüpü ve çelik plaka bir çekirdeği bulunmaktadır. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak bir tabaka silikon yağ uygulanmıştır. Böylece basınç etkisiyle genişleyen çelik çekirdek için gerekli boşluk oluşturulmuştur. Düşük akma dayanımlı çeliğin akma sahanlığı genelde belirgin olup sınır şekildeğiştirme oranı yüksektir ($>50\%$). Düşük akma dayanımlı çelik, akma yerdeğiştirmesinin azalmasını, düşük kat ötelemeleri seviyesinde bile çaprazın kolaylıkla akmasını sağlamaktadır. Chen ve diğ. (2001) diyagonal, dışmerkez V ve dışmerkez ters V BÖÇ'lü çerçeveler arasında dayanım performansından en yüksek şekilde faydalanma açısından diyagonal BÖÇ'lü çerçeve sistemlerini önermişlerdir. Dışmerkez V ve dışmerkez ters V BÖÇ'ler çerçevede net açıklığa izin vermesinden dolayı mimari bakımdan çok tercih edilmektedirler. Çekme ve basınç dayanımı arasındaki dengeden dolayı klasik çaprazlara göre çerçeve kirişi daha az etkilenmektedir. Ayrıca kirişin düşeydeki aşırı yerdeğiştirmeleri de sınırlandırılmıştır.

Tezde TİP 1 enkesit biçimli çaprazlar normal ve yüksek akma sahanlığına sahip çelik çekirdekli seçilerek çelik çerçeve sistemleri diyagonal olarak düzenlenmiştir. Böyle bir seçim parametre sayısının azaltılmasına da yardımcı olmuştur.

BÖÇ'ü çerçevelerin birleşim deneyleri ilk olarak Tremblay ve diğ. (1999) çalışmasında görülmekte olup mevcut bir çelik çerçeveli binanın statik karakterli yükleme deneyi ve lineer olmayan dinamik analiz sonuçları üzerine durulmuştur. Binanın klasik merkezi $\wedge$ (chevron) çaprazlama sistemi yerine BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemi kullanılarak güçlendirilmesinin yönetmelikte öngörülen kapasite tasarım koşulları açısından daha ekonomik sonuçlar verdiği görülmüş, temellerde ve kat diyaframlarında daha uygun sonuçlar elde edilmiştir. Deneylerde çelik boru kesitli dış tüpün P_e değeri, çelik çekirdeğin P_y akma değerinden daha büyük olacak şekilde tasarlanmıştır. Çekirdek plaka yüzeyinde sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak her tabakası 0.2mm kalınlığında 4 kat polietilen kullanılmıştır. Böylece BÖÇ'ün imalatı sırasında sürtünmesiz yüzey malzemesi en dış tabakasının hasar görmesine karşı güvenlik sağlanmaktadır. Yön değiştiren tekrarlı yükler altında BÖÇ'lü çelik çerçeve sisteminin kararlı ve simetrik histeretik eğrileri elde edilmiştir. Deneyde akma sonrası rijitliğin %10~15 arasında değiştiği görülmüştür. Bu kadar büyük akma sonrası rijitliğin bina yüksekliğince elastik olmayan şekildeğiştirmelerin dağıtılması için istenilen bir durum olduğu belirtilmiştir.

Black ve diğ. (2002) BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemlerinin oldukça kapsamlı eleman deneylerini yaparak bu deneylerin sonuçlarına dayanan kuramsal bir yaklaşım önermişlerdir. BÖÇ'lerin stabilite için 3 farklı burkulma modu tanımlamışlardır. Bu burkulma modları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

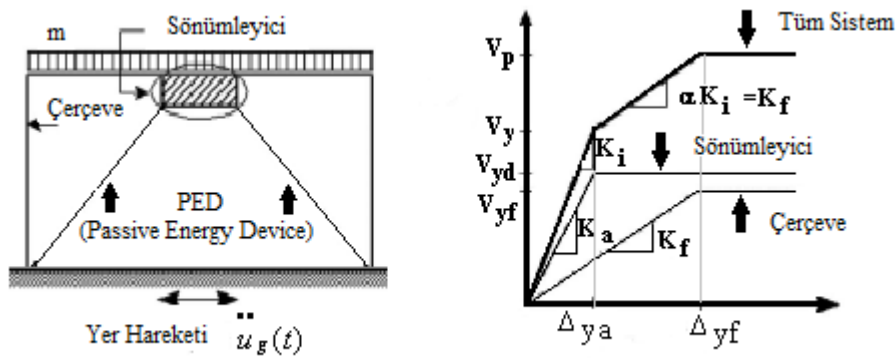
- a) Çaprazın tümsel eğilmeli burkulması
- b) Çelik çekirdeğin yüksek modlarda burkulması
- c) Dış tüp ve dolgu malzemeli çelik çekirdeğin inelastik burulmalı burkulması

(a) maddesi BÖÇ'ün tasarımını yöneten ana maddedir. Black ve diğ. (2002) BÖÇ'lü çerçeve sisteminin yaklaşık lineer olmayan histeretik davranışını incelemek için "Bouc-Wen" (BW) histeretik modelini kullanmışlardır. Deneysel çalışma sonucunda BÖÇ'ün maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetinden yaklaşık %13 daha büyük olduğu görülmüştür.

Bu ve benzeri az sayıda çalışmanın ulaştığı bu önemli sonuç BÖÇ'ün dengeli ve kararlı davranışını en mükemmel şekilde gösterecek bir modelleme gereksinimi olduğunu göstermektedir.

Usami ve diğ. (2012) özellikle köprü mühendisliği bakımından alüminyum alaşımlı BÖÇ kullanımının getireceği üstünlüklere ilişkin bilgi vermişlerdir. 18 numuneden oluşan az çevrimli yorulma deneylerinde alüminyum alaşımlı numunelerden kararlı histeretik eğriler elde edilmiştir. Çalışmada dolgu malzemesi kullanılmadan üretilen A5083-0 ve A6061-T6 alüminyum alaşımından çekirdeği olan farklı tipte BÖÇ'ler iki gruba ayrılmıştır. Birinci grupta üretilen A5083-0 alüminyum alaşımlı, kaynaklı BÖÇ'lerin kaynak ITAB noktasındaki dayanım azalması sonucu oluşan çekirdek kopmaları sonucu, ikinci grup farklı tipte kaynaklı olarak üretilen, A6061-T6 alüminyum alaşımlı çekirdeği olan BÖÇ'lerden hedeflenen kümülatif inelastik yerdeğiştirme değerleri elde edilmiştir. Çalışmada ayrıca önerilen Manson&Coffin bağıntılarının alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynaklı ve bulonlu uç durumlarına göre değerlendirilerek kullanılması yöntemleri verilmektedir.

Vargas ve Bruneau (2006, 2008, 2009a, 2009b) çalışmalarında metal sönümleyiciler için genel bir tasarım yöntemi önermişlerdir. Yapay yer hareketleri etkisindeki tek serbestlik dereceli sistemlerin lineer olmayan davranışları düşünülerek, çok serbestlik dereceli binalarda yapısal sigortaların tasarımına ilişkin çok sayıda sayısal inceleme sonucunda yatay kuvvetlere karşı davranışı yöneten parametreler tanımlanarak bir tablo oluşturulmuş ve kat öteleme limitleri elastik limit periyot ile ifade edilmiştir.



Şekil 1.6 : Metal sönümleyicisi olan tek serbestlik dereceli sistemin örnek modeli ve kuvvet yerdeğiştirme eğrisi (Vargas ve Bruneau, 2009).

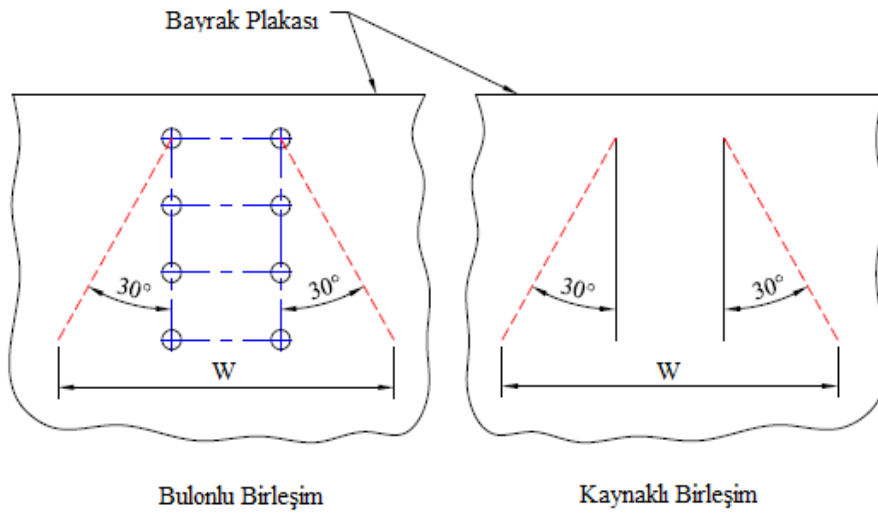
Şekil 1.6’da metal sönümleyicili ve tek serbestlik dereceli bir sistemin örnek modeli ve kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi verilmektedir. Performansa dayalı tasarım ilkesi gereğince çerçeve rijitliği ile toplam sistemin (çerçeve ve sönümleyici) başlangıçtaki rijitliği arasındaki oranın $\alpha \geq 0.25$ olması durumunda kolon ve kirişlerin sönümleyicilerden gelen akma kuvvetlerini karşılayacak kesit kapasitesine sahip olacağı belirtilmiştir. Çerçevenin akma sınırındaki yerdeğiştirmesi ile sönümleyicilerin akma sınırındaki yerdeğiştirmeleri oranı olan maksimum süneklik düzeyi μ_{max} ’ın sönümleyicilerin enerji yutma kapasitelerini arttırmak ve çerçevenin elastik olmayan şekildeğiştirmelerini önlemek için $\mu_{max} \geq 5$ olarak alınmasını önermişlerdir. Böylece daha küçük kesitli sönümleyicilerle daha fazla sünek davranış elde edilecektir. Çerçeve elemanlarında elastik olmayan şekildeğiştirmelerin oluşmaması için çerçeve sünekliğinin $\mu_f \leq 1$ olması gerektiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada, konuya ilişkin çalışmalar taranarak BÖÇ’lü çerçevelerin davranışına etki eden parametreler tanıtılmaktadır.

Gheidi ve diğ. (2009), çelik çekirdek elemanı ile dış tüp arasında bulunan dolgu malzemesinin BÖÇ’ün davranışı üzerine etkisi anlamak için yapmış oldukları BÖÇ’lü eksenel yükleme deneylerinde dolgu malzemesi olarak normal beton, hafif beton ve sıkıştırılmış agrega kullanmışlardır. Sonuçta, 28 günlük basınç dayanımı $25 \sim 30 \text{ MPa}$ olan normal betonun dikdörtgen kesitli çekirdek plakanın yerel ve tümsel burkulmalarını önlemek için yeterli ve güvenilir olduğunu görmüşlerdir. Çalışmada hafif agrega kullanılarak üretilen hafif beton kullanımının yapısal eleman ağırlığını azaltmada fayda getirmesine karşın, zaman, maliyet, üretim kolaylığı ve tekrarlı yön değiştiren yükler altında BÖÇ’ün davranışını iyileştirmesi açısından değerli bir katkı getirmemesinden dolayı normal beton kullanımı önerilmektedir. Hafif betonun basınç etkisindeki ezilme dayanımı daha azdır. Bu da çekirdekte yerel hasarın ve şekildeğiştirmelerin oluşmasına, böylece performansın %30 azalmana neden olmaktadır. Sıkıştırılmış agrega çekirdeğin burkulmasını yeteri kadar engelleyememektedir.

Nakamura ve diğ. (2000) çalışmada yorulma-göçme özellikleri ve kararlı histeretik davranışı düşük akma dayanımlı çelik malzeme kullanılarak üretilen BÖÇ’ler

üzerinde incelenerek, toplam inelastik şekildeğiştirme kapasitesi ve malzeme hasarına neden olan çevrim sayısı bulunmuşlardır.

BÖÇ davranışına bayrak levhalarının davranışı da çok etkili olduğundan, bu davranışı etkileyen parametreler üzerinde de kısa bilgi verilecektir. Whitmore (1952) alüminyum birleşimler üzerinde yaptığı deneysel çalışmalar sonucunda bayrak levhası üzerinde gerilmelerin, bayrak levhasına birleşen kafes elemanından itibaren 30° 'lik bir açı ile dağıldığını doğrulamıştır. Bu durum ,çevrimsel yükler altındaki bayrak levhaları içinde geçerlidir. Tezde bayrak levhalarında gerilme dağılımının bulon eksenine 30° 'lik açı ile gerçekleştiği kabul edilmiştir (Şekil 1.7).

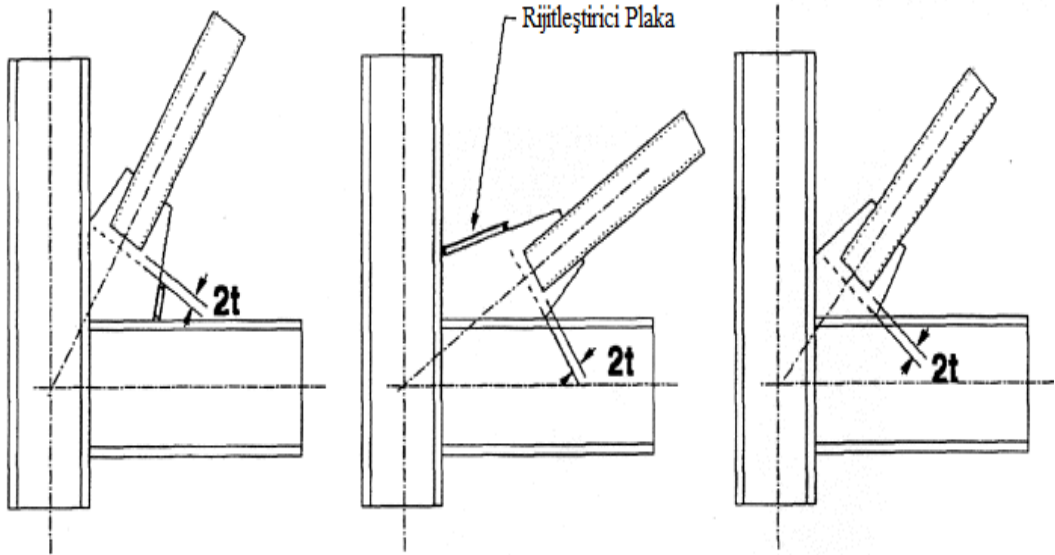


Şekil 1.7 : Bayrak levhasında gerilmenin 30° 'lik açı ile yayılması.

Bayrak levhalarının sismik davranışının araştırılmasına yönelik ilk çalışmalar Astaneh-Asl ve diğ. (1981)'e aittir. Deneysel çalışmada ana taşıyıcı elemanlara bayrak levhalarıyla bağlantısı yapılmış, 1/1 ölçekli, çift köşebentli 17 adet çapraz eleman monotonik olarak yüklenmiştir. Sonuçta çelik çaprazlı çerçevelerde çapraz elemanların burkulma doğrultusunun bayrak levhalarının çevrimsel yüklemeler altındaki davranışı üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Tezde çalışmasında da yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalarda BÖÇ'lerin bayrak levhasına birleşiminin davranışa olan etkisi de özel olarak gözlemlenmiştir.

Herhangi bir çapraz eleman, çerçeve düzlemi dışına doğru burkulursa, plastik mafsallar bayrak levhaları üzerinde meydana gelir. Bu plastik mafsalların dönmeye karşı serbest olması için bayrak levhalarının da bu dönme hareketine uyum

göstermesi gerekir. Astaneh-Asl ve diğ. (1982) çalışmalarında, çapraz elemanın ucu, bayrak levhasının kolon-kiriş gibi ana taşıyıcı elemana birleştirildiği uç kısımlarının köşe bölgelerinden en az $2t \sim 4t$ kadar uzakta oluşturulmasını önermektedir (Şekil 1.8). Burada t bayrak levhası kalınlığıdır. Bu çalışmada bayrak levhaları tasarlanırken bu noktaya da dikkat edilmiştir.



Şekil 1.8 : Düzlem dışı burkulmada, bayrak levhaları için gerekli minimum kenar mesafeleri (Astaneh Asl ve diğ., 1982).

Astaneh-Asl (1998) çalışmasında çapraz eleman üzerinde dört ayrı bölge tanımlamıştır:

- Çapraz elemanı
- Çapraz elemanın bayrak levhasıyla birleştiği bölge
- Bayrak levhası
- Bayrak levhasının kolon ya da kiriş gibi mesnet elemanlarına birleşim bölgesi

Bu dört farklı bölgenin herbirinde oluşacak hasar şeklinin akma davranışı gösterecek şekilde sağlanmalıdır. Herhangi bir bayrak levhasında istenilen hasar biçimleri:

- Bayrak levhasının Whitmore alanının yırtılması
- Bileşik gerilmeler altında bayrak levhası kritik kesitinin akması
- Bayrak levhasının burkulması

- Bayrak levhasının uçlarının burkulması
- Blok kayma
- Bayrak levhasının net alanının yırtılması

şeklinde sıralanabilir.

Berman ve Bruneau (2009), bayrak levhası performansının BÖÇ'lü çerçeve sistemlerinin performansına ve sistemin davranışına etkisini incelenmişlerdir. Bayrak levhasıyla kolon-kiriş bağlantısı olan bir çerçeve, olmayan çerçeveye göre daha rijittir. Sistemin rijitliği arttıkça titreşim periyodu kısılırken yatay deprem kuvveti istemi artar. Rijit bayrak levhaları BÖÇ'lere moment aktarabilir. Bu durum toplam inelastik eksenel şekil değiştirme kapasitesini azaltır. Çerçevenin hareketi sırasında bayrak levhalarının düzlem dışı burkulması, kolon ve kiriş arasında açılı oluşturabilir. Bayrak levhalarını kolon ve kirişe bağlayan kaynak dikişlerinde yorulma durumunda kritik koşullar gelişebilmektedir. Çerçevenin hareketi sırasında kolon-kiriş birleşiminin açılması durumunda çekme gerilmesi, birleşimin kapanması durumunda basınç gerilmesi oluşmaktadır. Bu tür yorulma koşulları kaynak dikişlerinin kopmasına neden olmaktadır. Bu olumsuzluklardan kaçınmak için çalışmada BÖÇ için bayrak levhası tasarlanırken levhanın kolon yerine kirişe bağlanması önerilmiştir. Böylece oldukça iyi bir performans elde edilirken istenmeyen göçme şekillerinin oluşması da en aza indirilmiştir.

Çelik ve diğ. (2004) çaprazlı çelik çerçevelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında performansları deneysel olarak incelemişlerdir. Çoğunlukla tıknaz çaprazların performanslarının narin olanlara göre daha iyi olduğu düşünüldüğünden, çaprazların narinliklerinin soğukta şekil verilmiş çelik dikmelerden oluşan duvar elemanlarıyla azaltılması yoluna gidilmiş, böylece bir tür BÖÇ elde edilmiştir. Çalışmada çaprazların burkulması yeterince önlenmiş ve daha dolu histeretik eğriler elde edilerek daha çok enerji sönümlendiği görülmüştür. Bayrak levhalarının tasarımında, levhanın yalnızca kirişe bağlanması durumu bu çalışmada da incelenmiştir.

Çelik ve Bruneau (2009) iki doğrultuda düzenlenen BÖÇ'lerin sünek enerji yutma elemanları olarak köprülerin uç diyaframlarında kullanılmasını ilk kez önermiştir. Böylece klasik çaprazın aksine, BÖÇ basınç etkisinde burkulmamakta ve büyük

şekildeğiştirmeler yaparak önemli enerji yutmaktadır. Çalışmada BÖÇ'lerin basınç dayanımının çekme dayanımından %10~15 daha büyük olduğu ve hesap kolaylığı için bu özelliğin bazı çalışmalarda terkedildiği, gerçekte çaprazın akma sonrası rijitliğinin elastik rijitliğe oranının ise $\alpha=0.025$ değerine kadar ulaştığı, ancak ideal elasto-plastik hesap modeli kullanıldığında akma sonrası rijitliğin yok varsayıldığı belirtilmiştir. Çelik ve Bruneau (2010a, 2010b) benzer bir uç diyafram sistemini verev köprülerde de uygulamış ve uygun sonuçlar elde etmişlerdir.

Zhou ve Young (2009) beton dolgulu dairesel kutu kesitli alüminyum kolonlar üzerine yapmış oldukları deneysel çalışmalarında, dairesel kutu kesitli alüminyum tüplerin geometrik özellikleri ve kullanılan beton dayanımının davranış üzerine olan etkilerini araştırmışlardır. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen tüpler 6061-T6 kalitesinde ve nominal akma dayanımları $240MPa$ 'dır. Çalışmada çap/et kalınlık (D/t) oranları 9.7~59.7 arasında değişmekte olan toplam 42 kolonun uzunluk/çap (L/D) oranı 3 olacak şekilde sabit tutulmuştur. Üniform eksenel basınç etkisindeki kolonların yük altındaki eksenel kısalması, birim şekildeğiştirmesi ve göçme modları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar konuyla ilgili standartların öngördüğü değerlerle karşılaştırılmıştır. Sonuçta, dairesel kesitli alüminyum tüplerin, kare kesitli olanlara göre içindeki betonunu çekirdeğe olan aderansının çok daha iyi gerçekleştiği görülmüştür.

Konuyla ilgili diğer çalışmalar genelde yukarıda verilen bu çalışmalar çerçevesindedir.

1.5 İçerik

Çalışmanın ana bölümlerinin içeriği aşağıda verilmiştir:

- Birinci Bölüm'de konu ve kapsamdan sözedilerek bu alanda önceden yapılmış çalışmalar kısaca özetlenmiştir.
- BÖÇ'ü oluşturan malzemelerin özellikleri açıklanarak, BÖÇ çekirdeğinde kullanılan çelik/alüminyum alaşım malzemelerine ilişkin çekme deneyleri İkinci Bölüm'de verilmiştir.

- Üçüncü Bölüm’de, 2’si çelik çekirdek ve çelik dış tüplü, 2’si alüminyum alaşımlı çekirdekli ve alüminyum alaşımlı dış tüplü toplam 4 BÖÇ’ün tasarımı, üretimi, deney düzeneği ve numunelerin montajı ile deneylerde kullanılan ölçüm aletleri verilmiştir. Alüminyum alaşımlı BÖÇ grubunda üretilen BRB-AC1, BRB-AC2, çelik BÖÇ grubunda üretilen BRB-SC1, BRB-SC2 numunelerinin tasarım ve boyutlandırılmasında yapılan varsayımlar ve nedenleri açıklanmıştır. BÖÇ bileşenleri, çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde uygulanan kaynak yöntemi, mevcut deney düzeneğinin montajı, üretilen BÖÇ’lerin deney sırasına göre deney düzeneğine montaj adımları, deney yöntemleri ile birlikte deneylerde kullanılan cihazların kodları ve yerleri de bu bölümde açıklanmıştır.
- Tahmin edilen BÖÇ davranışı, statik itme (pushover) analizi sonuçları verilerek deneysel yöntem ve gözlemler deney sırasına göre Dördüncü Bölüm’de incelenmiştir.
- Beşinci Bölüm’de denenen tüm BÖÇ’lerin deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak, elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik davranış eğrileri, histeretik enerji grafikleri, yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrileri, yatay-kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrileri, yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrileri verilmiştir. BÖÇ numunelerinin etkili sönüm oranları da hesaplanarak karşılaştırmalar yapılmıştır.
- BÖÇ’lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında üç boyutlu modellenmesi ve elde edilen sonuçlar Altıncı Bölüm’de incelenmiştir.
- Elde edilen tüm deney datası Yedinci Bölüm’de özetlenerek ve karşılaştırılarak verilmiştir. Genel sonuçlar değerlendirilerek sonraki araştırmacılar için önerilerde bulunulmuştur.

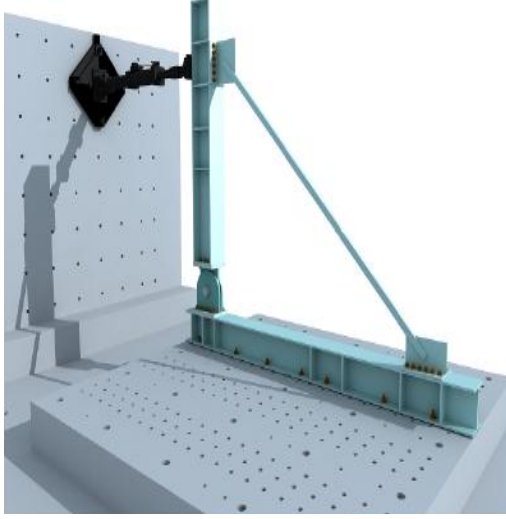
2. BÖÇ'Ü OLUŞTURAN MALZEMELERİN ÖZELLİKLERİ VE MALZEME DENEYLERİ

Tez deneysel ve kuramsal çalışma olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Deneysel bölüm kapsamında geliştirilen 8 adet yeni BÖÇ'ün yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki elastik olmayan davranışları incelenmiştir. Malzeme kaliteleri yerel olarak bulunabilen malzemelerden oluşmaktadır. Modelleme için gerekli hesap parametrelerindeki değişimlerin sistemin davranışına etkisi tezin ana kapsamını oluşturmaktadır. Sistemlerin davranışları yön değiştiren tekrarlı yükler altında ve gerçek malzeme özellikleriyle modellenmiştir. Modelleme sonuçları deney sonuçlarıyla karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Amaca ulaşmak için tez kapsamında yürütülen yöntemler aşağıda tanımlanmıştır.

2.1 Deney Düzeneği

Tez danışmanın başka bir doktora çalışması kapsamında İnş.Yük.Müh. Cem Haydaroglu tarafından üretilen deney çerçevesi güvenlik katsayısı en az 2 alınarak, laboratuvarda tek hidrolik verimle etkitilebilen maksimum yatay yük (250kN) altında elastik davranış gösterecek şekilde tasarlanmıştır. Güçlü döşeme üzerine montajı yapılmış tipik bir deney düzeneği Şekil 2.1a'da verilmektedir.

Deney düzeneği HEA400 profilinden üretilmiş olup çelik temel kirişine mafsallı bağlı çelik kolon ve bu kolonun düzlem dışı hareketini engelleyen çift taraflı çelik payandalardan oluşmaktadır. Payandalar, kolonu olası düzlemdışı hareketlere karşı, yüksekliği boyunca iki noktadan desteklenmekte olup destek noktaları kayıcı elemanlardan oluşturulmuş; kayıcı elemanlar ve kolon arasındaki teması ve olası yük aktarımını engellemek için yaklaşık 1~2mm boşluk bırakılmıştır. Birleşimler az sayıda yük tekrarında oluşabilecek yorulma göçmelerini engelleyecek şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 2.1 : (a) Deney düzeneğinin üç boyutlu genel görünüşü (Haydaroğlu ve diğ., 2010). (b) Düzlem dışı hareketi engelleyen çift taraflı çelik payandalar (Karataş ve Çelik, 2012).

Deney çerçevesi elastik olarak boyutlandırıldığından deney çerçevesini oluşturan HEA400 profiller ve plakalar için çekme deneyi yapılmamıştır. HEA400 profilleri S275JR, deney düzeneği için kullanılan berkitme plakaları S235JR kalitesindedir. Deney düzeneğinin önemli bir bölümü olan mafsallı, altta kirişe bağlanan alın levhasına küt kaynakla kaynaklanmış iki adet 30mm kalınlığında plakadan, üstte kolona bağlanan alın levhasına küt kaynaklanmış bir adet 30mm kalınlığında plakadan ve bu plakaları birbirine bağlayan E335 kalitesinde 70mm çaplı milden oluşmaktadır. Kolonun mafsallı levhasına ve kiriş elemanın mafsallı plakasına bağlantısında küt kaynak (tam nüfuziyetli birleşme) kullanılmıştır. Deney numuneleri deney düzeneğine hidrolik veren (actuator) ile herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirilmiştir; bu amaçla fotogrametrik cihazlardan da yararlanılmıştır. Hidrolik verenden gelen yük, çaprazın aksel doğrultusunun kolonla kesiştiği noktaya uygulanmıştır. Deney çerçevesinin BÖÇ'ün artırılmış maksimum kuvvetlerine göre yeterliliği de kontrol edilmiştir.

2.2 Çelik ve Alüminyum Numunelerinin Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Çekme Deneyleri

2.2.1 Deney hazırlıkları

Deneyssel ve kuramsal çalışmalara esas olacak 19 adet çekme numunesi için malzeme deneyleri yapılmış, gerilme-şekildeğiştirme eğrileri elde edilmiştir. Malzeme seçimi yapılırken mekanik özellikler esas alınmaktadır. Malzemelerin mekanik özellikleri de iç yapılarına bağlıdır. Malzemelerin iç yapıları ısıtılma işlemiyle değiştirilerek mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Farklı ısıtılma işlemleri mekanik özellikler üzerinde farklı etkiler oluşturmaktadır. Malzemeye uygulanan ısıtılma işleminin uygun olup olmadığı mekanik deneyler yapılarak belirlenmektedir. Mekanik deneyler içinde en çok kullanılanı çekme deneyidir. Çekme deneyinde malzemelerin statik yük altındaki mekanik özellikleri belirlenirken malzemelerin özelliklerine göre sınıflandırılmasında sağlanmaktadır. Deneyden elde edilen sonuçlar mühendislik hesaplarında doğrudan kullanılmaktadır. Çekme deneyi standartlara uygun hazırlanan bir deney parçasının tek ekseninde ve sabit bir hızla genellikle kopuncaya kadar çekilmesi işlemini kapsamaktadır.

Malzeme çekme deneyleri (kupon testler) İ.T.Ü. Yapı Malzemesi Laboratuvarında yapılmıştır. Deneylerde bir hidrolik piston ve silindirden oluşan 50ton çekme kapasitesine sahip JAMSLER-LAFFON&SOHN marka üniversal test cihazı kullanılmıştır. Şekil 2.2a'da görülen çekme deneyi aleti hidrostatik basınç ilkesine göre çalışmaktadır. Sağ tarafta deney makinesi, sol tarafta ise sarkaçlı manometre görülmektedir. Manometre üzerindeki vanalar presin yükleme ve boşaltmasını sağlamaktadır. Şekil 2.2b'de cihaza yerleştirilmiş çekme numunesi görülmektedir.

Çekme numunelerinin hazırlanmasında 3 eksenli $x=1600mm$, $y=1300mm$, $z=600mm$ kesim çerçevesi olan İSKAR-SUNWICK soğuk freze makinesi kullanılmıştır (Şekil 2.3a). Deneyssel çalışmada çelik numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ASTM A 370-08a, alüminyum alaşımlı numunelerin malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ASTM E8/E8M-09 standartlarına göre plakadan 19 adet çekme numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2.3b).

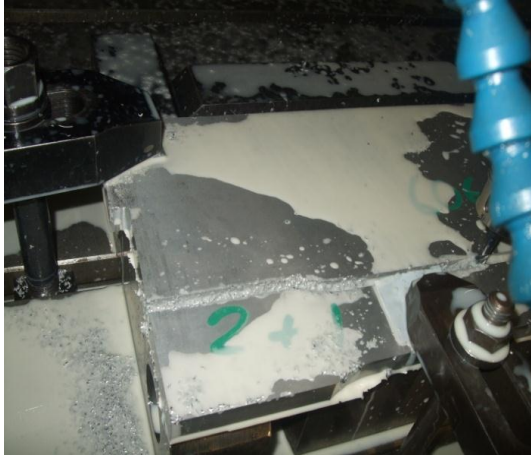


(a)



(b)

Şekil 2.2 : (a) Malzeme çekme deneylerinin yapıldığı mekanik cihaz. (b) Çekme numunesinin cihaza yerleştirilmesi.



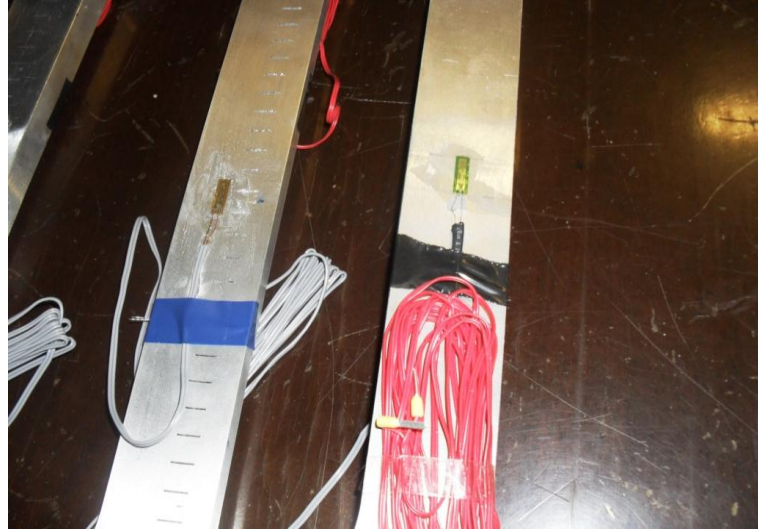
(a)



(b)

Şekil 2.3 : Plakalardan soğuk freze kesim ile çekme numunesi çıkarılması işlemi. (b) Çekme deneyi yapılacak çekme numuneleri.

Şekildeğiştirmelerin ölçülmesinde TML'nin akma sonrası şekildeğiştirmeleri ölçen çelik yüzeye uyumlu YFLA-10-3L, alüminyum yüzeye uyumlu FLA-10-23 tipindeki şekildeğiştirme ölçerler (strain-gauge) kullanılmıştır. Bu şekildeğiştirme ölçerler yaprak tipi olup özellikle uygulama kolaylığı, devreden yüksek akım geçmesi, kesit alanının yüzey alanına oranı daha büyük olması özellikleri ile tel şekildeğiştirme ölçerlere göre üstünlük sağlamaktadırlar. Deneylerde alüminyum alaşımlı çekme numuneleri için her iki tip strain gauge kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında bir karşılaştırmada yapılmıştır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4 : Alüminyum alaşımlı çekme numunelerinin her iki yüzeyine farklı tip strain gauge yapıştırılması.

Büyük parçalar için akma sonrası şekildeğiştirmeleri de okuyabilen YFLA-10-3L'nin, çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler için kullanılmasının uygun olduğu malzeme deneylerinde anlaşılmıştır. Çekme deneylerinde kullanılan şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmektedir.

Çizelge 2.1 : Şekildeğiştirme ölçerlerin mekanik özellikleri.

TML-YFLA-10-3L	Gauge Boyu	10mm
	Genişliği	2.6mm
	Direnci	120 ohm
	Uygulama Yüzeyi	Çelik/Alüminyum
	Gauge Faktörü	2.1
TML-FLA-10-23	Gauge Boyu	10mm
	Genişliği	2.5mm
	Direnci	120 ohm
	Uygulama Yüzeyi	Alüminyum
	Gauge Faktörü	2.14

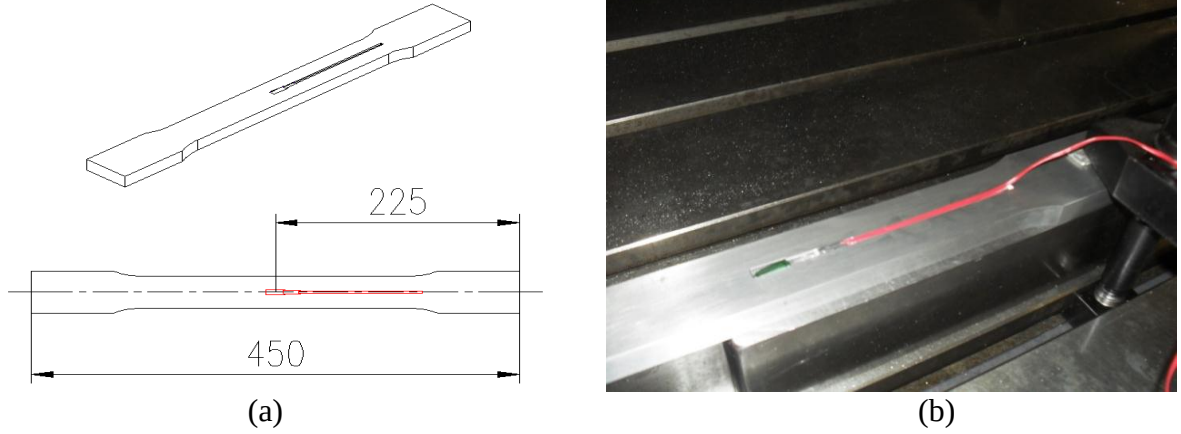
Şekildeğiştirme ölçerlerin yapıştırılacağı metal yüzeylerin pas ve kirden temizlenmiş olması gerekmektedir. Çelik çekme numuneler fabrikada Sa-2 $1/2$ İsveç Yöntemi ile kum püskürtülerek temizlenmiştir. Ancak bu temizleme yeterli bulunmayarak önce P320 kalın zımpara, sonra P120 ince zımpara yapılarak çelik yüzeyler parlak bir renk kazanıncaya kadar devam edilmiştir. Alüminyum yüzeylerde, yapısı gereği, temizleme işlemi yapılmamıştır. Önce tinerli keçe ile metal yüzeyler atölyede

silinmiştir. Strain gauge yapıştırmadan önce metal yüzeyi kalıntı bırakmayacak temiz bir bez ve aseton/eter gibi eritici bir malzeme kullanılarak temizlenmektedir. Bu işlemde özellikle tiner yağlı bir tabaka bıraktığından kullanılmamalıdır. Metal yüzeye yapıştırmak için tek bileşenli *TML-CN-CYANOACRYLATE* yapıştırıcılar kullanılmıştır. Yapıştırıcı ölçüm yapılacak yere ince bir tabaka halinde sürüldükten sonra starin-gauge yapıştırıcı tabaka üzerine dikkatlice yerleştirilmektedir. Plastik bir malzeme ile 60sn üzerine parmak ile basınç uygulanarak sabitlenmektedir . Akım devresinin düzgün çalışıp çalışmadığı dijital ölçüm aleti ile kontrol edilerek 120ohm'luk direnç tüm çekme numunelerinde sağlanmıştır. BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması deney kontrolü için çok önemli olup metal yüzeyine açılacak kanallara strain gauge yerleştirilmiştir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılacak kanalların genel görünüşü.

Bu uygulama, bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla, BÖÇ teknolojisi için yeni bir uygulama olmuştur. Şekil 2.6a'da açılan kanal boyutları verilmektedir. Yapılan bu uygulamanın başarısını ölçmek için önceden hazırlanan her çekirdek çekme numunesine, kullanılacak olan starin-gauge ölçülerine uygun şekilde $\phi 2\text{mm}$ 'lik parmak freze kullanılarak kanallar açılmıştır (Şekil 2.6b).



Şekil 2.6 : (a) Çekme numunelerine açılan kanalların genel görünüşü.(b) $\phi 2\text{mm}$ 'lik parmak freze kullanılarak açılan kanallara strain-gauge'lerin yerleştirilmesi.

Açılan kanallar içine önce bir tabaka yapıştırıcı ile strain-gauge'lerin yerleri sabitlendirilmiştir. Açılan kanal boşlukları epoksi esaslı, çift bileşenli metal dolgu malzemesi ile doldurularak kapatılmış, dolgu malzemesinin kuruması için 1 gün beklenilmiştir. BÖÇ'lere yerleştirilecek olan strain-gauge'ler bu işlemlerden sonra üzerleri ayrıca TML-SB bantla kapatılmıştır. Böylece, yük hücresinin monotonik hareketi sırasında dolgu malzemesinden etkilenmesinin önlenmesi amaçlanmaktadır. Çekme deneyleri sonucunda BÖÇ'ün çekirdek gerilme-şekildeğiştirme davranışını tam olarak anlayabilmek için uygulanacak kanala strain-gauge yerleştirme işleminin başarılı olduğu görülmüştür. Üretilen çaprazlara strain-gauge'ler sürtünmesiz yüzey malzemesinden önce yerleştirilmiştir. Tüm numunelere strain-gauge yapıştırılarak çekme deneyi için laboratuvara getirilmiştir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7 : Strain-gauge yapıştırılan 19 adet çekme numunesi.

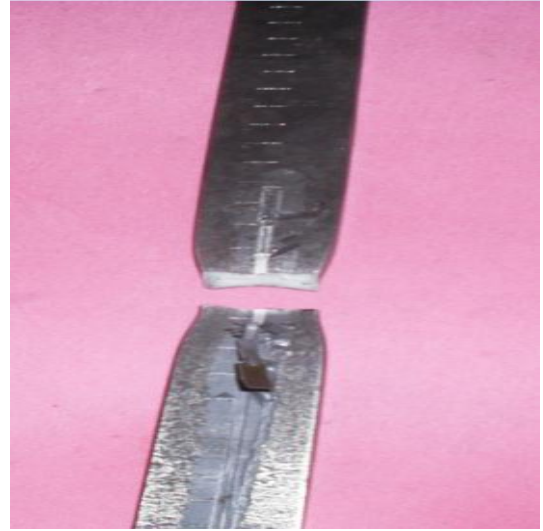
2.2.2 Deneyler

Çekme numunesine sürekli artan çekme kuvveti uygulanarak kopma anına kadar hem uygulanan kuvvet hem de numunede meydana gelen uzamalar kaydedilmektedir. Numuneye uygulanan yükü gösteren ibrenin salınması anı akma sınırını göstermektedir. Bu salınmanın başladığı en küçük kuvvetle en küçük akma sınırı, ulaştığı maksimum kuvvetle de maksimum akma sınırı bulunmaktadır. Yükün en büyük değerinde numunelerde yerel boğumlar oluşmaktadır. Numunelerinin akmaya başladığı kuvvete kadar oluşan uzamalar üniform olup numune boyca uzayıp kesitçe daralmaktadır. Yerel boğumların olduğu bu noktalarda oluşan ek uzamalar sonucu kesit gittikçe daralmaktadır (Şekil 2.8a). Kuvvetin azalmasıyla numune koparak ikiye bölünmektedir (Şekil 2.8b).



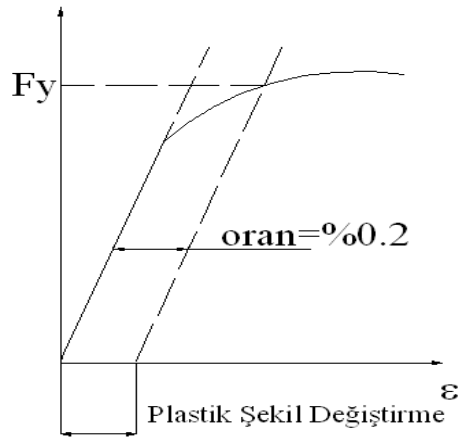
Şekil 2.8 : (a) Yerel boğumların olduğu noktalarda uzama sonucu kesit daralmaktadır. (b) Çekme deneyi sonucu kopan çekme deney parçası.

Kanallı çekme deneyi parçalarının deney sırasındaki davranışı ve kesit daralması Şekil 2.9’da verilmektedir. Bu deney parçalarında akmanın başladığı noktaya kadar okumalar alınmış sonrasında şekil değiştirme ölçerler hasar görmüştür.



Şekil 2.9 : Kanallı çekme numunelerinde deney sırasında oluşan kesit daralması.

Deneyde uygulanan kuvvetin kesit alanına oranı ile gerilme, Δl boy değişiminin l_0 ilk boya oranı ile ϵ birim şekildeğiştirme oranı hesaplanarak gerilme-şekildeğiştirme eğrisi elde edilmektedir.



Şekil 2.10 : Akma gerilmesi-şekildeğiştirme diyagramı.

Belirgin akma sahanlığı göstermeyen malzemelerin gerilme-şekildeğiştirme eğrisi tedrici akma özelliği gösterdiğinden akma sınırı “*Kalıcı Şekildeğiştirme*” (*Offset Method*) yöntemiyle hesaplanmıştır (Şekil 2.10). Bu yöntemde F_y akma gerilmesi, %0.2 değerindeki kalıcı inelastik şekildeğiştirmenin ϵ ekseninde karşılığı olan noktadan başlayarak gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusal bölüme paralel giden doğrunun eğriyi kestiği nokta ile tanımlanmaktadır. Yüksek karbonlu çelik gibi bazı metaller deney koşullarına bağlı olarak, belirgin

akma sahanlığı göstermemektedirler. Çekme dayanımı numunenin kopmadan dayanabileceği ve grafikteki en yüksek gerilme değeridir. Çekme numunesinin boyunda meydana gelen en büyük inelastik uzama oranının yüzde değeri kopma uzamasıdır. Çekme deneyi numunesinin kopan parçaları bir araya getirilerek son boy ölçülmektedir. Boyda meydana gelen uzama

$$\Delta l = l_k - l_0 \quad (2.1)$$

bağıntısı ile bulunmaktadır. Burada l_0 ilk ölçü uzunluğunu, l_k numunenin kopmadan sonraki boyunu göstermektedir. $KU(\%)$ kopma uzaması

$$KU(\%) = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100 \quad (2.2)$$

bağıntısıyla belirlenmektedir. Bu değer aynı zamanda malzemenin sünekliği hakkında bilgi vermektedir. $KB(\%)$ kesit daralması ise A_0 ilk kesit alanı ile A_k kopma anındaki son kesit alanı farkının ilk kesit alanına oranının yüzde olarak ifadesi olup

$$KB(\%) = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \cdot 100 \quad (2.3)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Sünek malzemelerde belirgin bir kesit daralması gözlemlendiği için kesit daralması malzemenin sünekliğini gösteren bir parametre olmaktadır. En yüksek çekme dayanımına sahip numunelerin kopma uzama değerleri daha büyüktür. Çekme deneyi sonrası çelik çekme numuneleri Şekil 2.11a'da ve alüminyum çekme numuneleri Şekil 2.11b'de verilmektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.11 : Çekme deneyi sonrası çelik (a) ve alüminyum (b) çekme numuneleri.

Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar Çizelge 2.5’de topluca verilmektedir. Ek B’de, çelik çekme deneylerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri için Ek B1, alüminyum alaşımlı çekme deneylerinin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri için Ek B2 alt bölümleri oluşturularak topluca verilmiştir. A6061-T6’dan imal edilecek BÖÇ’ün kaynak dayanımı yapılan kaynaklı çekme deneylerinde yeterli görülmeyerek bu seriden üretilen BÖÇ’ün uç tasarımı A5083-H111 malzemesinden BÖÇ üretilmiştir. Ek B’de hem A6061-T6 hem de A5083-H111 malzemelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri birlikte topluca verilmiştir. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre çelik çekirdekli BÖÇ hesaplarında kullanılan malzeme mekanik özellikleri Çizelge 2.2’de verilmektedir.

Çizelge 2.2 : Çelik çekirdekli BÖÇ malzeme mekanik özellikleri.

Numuneler	Çelik Kalitesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)	ν
BRB-SC1	S235JR (Fe360)	257	363	0.0015	38.21	195000	0.30
BRB-SC2	S355JR (Fe510)	373	543	0.0019	25.45	204000	0.25

Çelik dış tüplerin hesaplarında kullanılan malzeme mekanik özellikleri ise Çizelge 2.3’de verilmektedir. Yoğunluğu ortalama 7.83gr/cm^3 ’dür.

Çizelge 2.3 : Çelik dış tüp malzeme mekanik özellikleri.

Numuneler	Çelik Kalitesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)
BRB-SC-ST	S355JR (Fe510)	345	509	0.0038	18.35	189214

Alüminyum alaşımlı çekirdekli BÖÇ’lerin hesabında kullanılan malzeme mekanik özellikleri Çizelge 2.4’de verilmektedir. Yoğunluğu ortalama 2.69g/cm^3 ’dür.

Çizelge 2.4 : Alüminyum alaşımlı çekirdekli BÖÇ malzeme mekanik özellikleri.

Numuneler	Alüminyum Kalitesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	$\epsilon_y^{0.2}$ (mm/mm)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)	ν
BRB-AC1	A5083-	182	314	0.0027	17.51	73000	0.32
BRB-AC2	H111	177	318	0.0027	18.63	73000	0.33

Çizelge 2.5 : Çekme deneyi sonuçları.

Numune Adı	Çekme Numunesi Markası	Strain Gauge Konumu/ Tipi	Genişlik/Çap (mm)	Kalınlık (mm)	Alan (mm ²)	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)
BRB-AC1	5083-H111-15-KN	Yüzey/FLA	38	15	570	198	310	0.0029	15.25	69625
		Kanal/FLA				-	-	-	-	-
	5083-H111-15-KY-1	Yüzey/YFLA				189	301	0.0043	-	75026
	5083-H111-15-KY-2	Yüzey/YFLA				186	270	0.0045	-	75447
	5083-H111-15-N	Yüzey/FLA				203	318	0.0030	18.63	74592
		Yüzey/YFLA				203		0.0029	18.64	73829
BRB-AC2	6061-T6-15-KN	Yüzey/FLA	38	15	570	289	325	0.0045	11.35	73015
		Kanal/FLA				293		0.0045	11.37	68997
	6061-T6-15-KY-1	Yüzey/YFLA				-	219	-	-	-
	6061-T6-15-KY-2	Yüzey/YFLA				-	182	-	-	-
	6061-T6-15-N	Yüzey/FLA				293	329	0.0055	14.893	66339
		Yüzey/YFLA				293		0.0050	14.828	76320
BRB-AC1 ve BRB-AC2	6061-T6-8-AT1	Yüzey/FLA	38	15	570	283	312	0.0051	14.19	68191
		Yüzey/YFLA				287		0.0062	14.16	73725
	6061-T6-8-AT2	Yüzey/FLA				294	319	0.0058	14.08	74501
		Yüzey/YFLA				294		0.0074	14.09	72689
BRB-SC1	S235JR-16-KN	Yüzey/YFLA	35.28	16.14	569.42	234	362	0.0012	48.22	220602
		Kanal/YFLA				234	362	0.0013	48.23	198521
	S235JR-16-N	Yüzey/YFLA	35.23	16.30	574.25	231	355	0.0016	30.58	183051
	S235JR-16-CNC-PL	Yüzey/YFLA	36.96	16.00	591.36	257	363	0.0018	25.82	174183
BRB-SC2	S355JR-12-KN	Yüzey/YFLA	35.19	12.06	424.39	381	578	0.0023	32.84	208022
		Kanal/YFLA				381	578	0.0018	32.83	221564
	S355JR-12-N	Yüzey/YFLA	35.10	12.08	424.00	389	588	0.0021	20.07	186974
	S355JR-12-CNC-PL	Yüzey/YFLA	35.41	12.16	430.59	392	656	0.0023	16.04	198342
BRB-SC1 ve BRB-SC2	S355JR-5-ST-1	Yüzey/YFLA	35.09	5.25	184.22	346	501	0.0061	20.76	189117
	S355JR-5-ST-2	Yüzey/YFLA	35.07	5.18	181.66	346	502	0.0052	18.80	185855
	S355JR-5-CNC-PL	Yüzey/YFLA	36.44	5.09	185.48	344	523	0.0039	15.50	192670

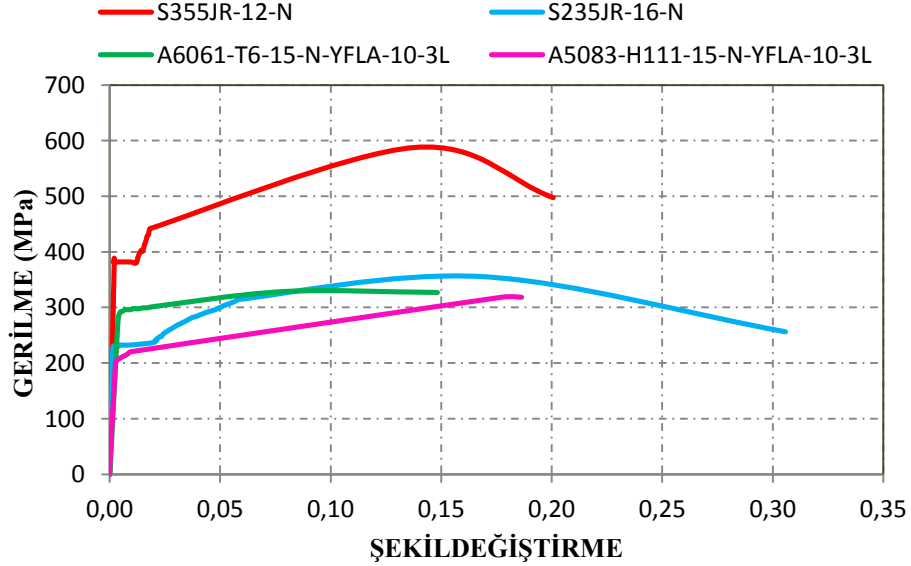
Alüminyum dış tüpler için iki adet, uygun boyutlarda alüminyum ekstrüzyon boru ve kutu profil temin edilmiştir. Alaşım serisi A6060-T66 olup malzeme deneyleri üretici firma tarafından İTÜ.Kimya ve Metalurji Fakültesinde yaptırılmış ve sonuçlar Çizelge 2.6’da verilmiştir.

Çizelge 2.6 : Alüminyum alaşımlı dış tüp malzeme mekanik özellikleri.

Numuneler	Alüminyum Kalitesi	Akma Gerilmesi (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	ϵ_y (mm/mm)	Toplam Uzama (%)	E (MPa)
BRB-AC1 ve BRB-AC2	A6060-T66 KUTU 150*150*4	200	227	(ölçülmemiştir)	10	75000

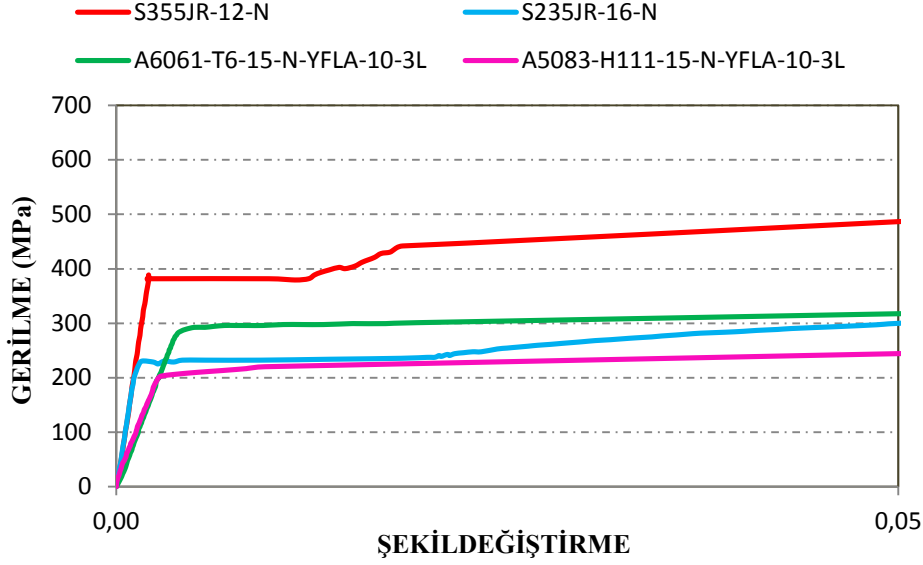
2.2.3 Deney sonuçları ve gözlemler

BÖÇ’lerde kullanılacak malzemelerin mekanik özellikleri birlikte değerlendirilerek gerilme (σ) - şekildeğiştirme (ϵ) eğrileri Şekil 2.12’te verilmiştir. Bu eğrilerden en yüksek dayanımın S355JR-12’ye, en sünek davranışın S235JR-16’ya ait olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 2.12 : BÖÇ’lerin üretiminde kullanılan çelik ve alüminyum alaşımlı malzemelerin karşılaştırmalı gerilme (σ)-şekildeğiştirme (ϵ) eğrileri.

Elastik rijitliğin daha iyi görülebilmesi için karşılaştırmalı eğri 0.05 mikrostrain’den kesilerek Şekil 2.13’te tekrar verilmiştir.



Şekil 2.13 : Numunelerin $\epsilon=0.05$ şekildeğiştirmesiyle sınırlandırılmış gerilme (σ)şekildeğiştirme (ϵ) eğrileri.

Çekme deneylerinden elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde, çelik BÖÇ'lere alternatif olacak alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin çekirdeklerinde kullanılacak serilerin istenilen amaca ulaşmak için yeterli olduğu görülmüş, bu doğrultuda büyük numunelerin üretimine başlanmıştır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ kullanımı ile dayanım ve rijitlik açısından çelik BÖÇ'lere göre daha simetrik ve olabildiğince elasto-plastik davranışa daha yakın histeretik eğriler elde edilmesi beklenmektedir.

2.3 Alüminyum Alaşımlar

Alüminyum alaşımlı BÖÇ üretildiğinden, öncelikle alüminyum alaşımlar üzerine çok kapsamlı bir araştırma yapılmıştır. Bu araştırmada ulaşılan bilgilerin bir özeti aşağıda verilmiştir.

2.3.1 Yapısal uygulama çalışmaları

Alüminyum saf ve alaşımlar halinde geniş kullanım alanına sahiptir. %8'lik oranı ile yeryüzünde en bol bulunan metallere dendir. Yaklaşık 8.3 milyon tonluk kullanımı Avrupa olmak üzere dünyada 31 milyon ton alüminyum kullanılmaktadır. Alüminyum çeliğe göre daha yumuşak ve hafif bir metal olup mat ve gümüşümsü

renktedir. Bu renk, havaya maruz kaldığında üzerinde oluşan ince oksit tabakasından (Al_2O_3) ileri gelmektedir. Doğada genellikle boksit cevheri halinde bulunur ve oksidasyona karşı üstün direnci ile tanınmaktadır. Boksit içerisinde bulunan elementlere göre 4 grupta ele alınır: beyaz oksit, kır oksit, silisli kır oksit, kırmızı boksit. Bu direncin temelinde “Pasivasyon” özelliği yatar. Işığı yansıtma özelliğinden dolayı iç ve dış mimari tasarıma uygun görünüm sağlanılmaktadır. Alüminyum zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz. Saf alüminyumun çekme dayanımı 9MPa iken alaşımlaştırıldığında bu değer 700MPa’ya kadar çıkmaktadır. Yoğunluğu, çeliğin ve bakırın 1/3’ü kadardır. Bu yüksek dayanım/ağırlık oranı alüminyumu özellikle köprülerin rehabilitasyonu için aranan eleman yapmaktadır. Tüm birleştirme yöntemleriyle birleştirilebilmektedir. Ergime derecesi $660^{\circ}C$ ’dir. Isı ve elektriği bakır kadar iyi iletebilmektedir. Çok üstün korozyon özelliklerine sahip olması üzerinde oluşan oksit tabakasının koruyucu olmasından kaynaklanmaktadır. Elastik bir malzeme olan alüminyum ani darbelere karşı dayanıklıdır. Normal çeliğin düşük sıcaklıklarda ani darbelere karşı dayanımı azalırken alüminyumun azalmamaktadır. Endüstrinin pek çok kolunda milyonlarca farklı ürünün yapımında kullanılmakta olup dünya ekonomisi içinde çok önemli bir yeri bulunmaktadır. Özellikle uzay ve havacılık sanayi için vazgeçilmezdir. Son yıllarda demiryolu ve otomobil üretiminde de alüminyum kullanımı hızlanmaktadır. Özellikle hızlı tren ve metro vagonlarının üretiminde alüminyum kullanımı artmaktadır. Otomobil sektöründe 2008 yılı itibari ile bir otomobilde ortalama olarak 130kg Alüminyum kullanılmaktadır (Kissell ve Ferry, 2002).

Alüminyum'a şekil vermek için döküm, dövme, haddeleme, presleme, ekstrüzyon, çekme gibi tüm yöntemler uygulanabilmektedir. Örneğin 0.01mm kalınlığında folyo/tel haline getirilebilmektedir. Alüminyum profil üretimi için haddeleme (çekme) ya da ekstrüzyon işlemlerinden yararlanılmaktadır. Karmaşık şekilli profiller için en çok kullanılan yöntem ekstrüzyondur. Ekstrüzyon istenilen şekle bağlı olarak üretilmiş kalıba konulmuş metalin, yüksek basınç kuvvetiyle kalıptan çıkacak şekilde akmaya zorlayarak şekil verme yöntemidir. Ekstrüzyon ile üretilen alüminyum profillerin başlıca kullanım alanları nakliye araçları, mimari uygulamalar, inşaat sektörü, elektroteknik endüstrisi, demir-çelik endüstrisi makine-ekipman imalatı, kimya ve gıda endüstrisidir. Üretilen alüminyumun %32.2’si ulaşım sektöründe,

%20.7'si saklama ve paketleme sektöründe, % 13.1'i yapı sektöründe kullanılmaktadır. Yapısal alüminyumun %67'si sac ve plaka, %33'ü ekstrüzyon şeklinde kullanılmaktadır. Bu miktarın %45'i plaka, profil vb. geri kalan %55'i ise döküm malzemelerdir.

Alüminyumun taşıyıcı bileşen olarak kullanılmasına yönelik olarak yapılan güncel çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir:

De Matteis ve diğ. (2003) ile Rai ve Wallace (2000) deprem ve rüzgar yüklerine karşı binalarda pasif koruma aracı olarak alüminyumun kullanılmasına yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır.

De Matteis ve diğ. (2006, 2008), A1050 ve A5154 alüminyum alaşımlarını kullanıldığı ve kalınlığı 5mm olan ince levhalardan oluşan perdelerin tekrarlı yön değiştiren yükler altındaki verimliliğini araştırmışlardır. Yatay yüklere karşı yüksek elastiklik sağlayan levhalar basınç etkisinde burkulup, çekme etkisinde akarak sünek davranış göstermişlerdir. Alüminyum levha perdelerde özellikle A1050 düşük akma dayanımlı ($\approx 20\text{MPa}$) alüminyum kullanarak enerji yutma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir.

Rai ve Jain (2006) A6063-O ve A1100-O alüminyum levha perdeli sistemlerin (ALPS) elastik olmayan burkulma davranışlarını etkileyen parametreleri deneysel olarak incelemişlerdir. Yumuşak alaşımlı alüminyumdan yapılan ALPS düşük akma dayanımı özelliğinden dolayı gövdenin burkulması probleminden daha az etkilenmektedirler. Çalışmada $t = 4.5, 6.5$ ve 7.6mm kalınlığında $h=152.4\text{mm}$ yüksekliği ve $b=100\text{mm}$ genişliğinde 19 deney numunesi hazırlanarak, hidrolik veren kapasitesi 500kN , yerdeğiştirme kapasitesi $\delta=\pm 125\text{mm}$ olan tekrarlı yön değiştiren yükler altında davranışları gözlemlenmiştir. Çalışmanın sonucunda ALPS'lerin dayanım ve rijitlik karakteristikleri, şekildeğiştirme kapasiteleri, çevrimsel pekleşme etkileri, büyük yerdeğiştirmeler altındaki şekildeğiştirmeleri hakkında mevcut veri tabanına yeterli düzeyde katkıda bulunulmuştur.

Zhou ve Young (2009) beton dolgulu dairesel kutu kesitli alüminyum kolonlar üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Dairesel kutu kesitli alüminyum tüpün geometrik özellikleri ve kullanılan beton dayanımının davranış üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Ekstrüzyon edilerek üretilen hazır tüpler A6061-T6 kalitesindedir.

Nominal akma dayanımı 240MPa'dır. Tüp kesitlerin çap/et kalınlığı oranları (yerel mariflikleri) 9.7~59.7 arasında değışmekte olan toplam 42 kolon tasarlanmıştır. Tümsel burkulmayı önlemek için kolonların uzunluk/ çap oranları sabit olacak şekilde seçilmiştir. Eksenel basınç kuvveti altındaki kolonların eksenel kısılması, birim şekildeğıştirmesi ve göçme modları araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut yönetmelik değerleriyle karşılaştırılmıştır. Dairesel kesitli tüplerin beton çekirdeğı sargılamasının kare tüp kesitlere göre daha iyi olduğı görülmüştür; bu, dairedeki çap/et kalınlığı oranlarının (D/t) kare tüp kesitlere göre daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde yırtılma oluşumunun daha az geliştiğı gözlemlenmiştir.

Zhu ve Young (2006) alüminyum kare ve dikdörtgen kesitli tüp kesitli kolonların basınç etkisindeki davranışlarını incelemişlerdir. 29 adet kolon alüminyum bayrak levhalarına her iki ucundan tungsten kaynak metodu (TIG) ile enine doğrultuda kaynaklanmışlardır. Kaynak teli olarak 4043 kullanılmıştır. Kaynak prosedürü ısı 200C, Voltaj 20V, Amper 120-200A, kaynak hızı 120mm/min olacak şekilde uygulanmıştır. 12 adet kolonunun kaynaksız olarak bayrak levhasına bağlantısı yapılmıştır. A6063-T5 ve A6061-T6 alüminyum serisi ekstrüzyon yöntemi ile fabrikada özel olarak üretilmiştir. Kaynaklı ve kaynaklı olmayan malzeme özelliklerini belirlemek için kupon deneyleri yapılmıştır. AWS (2008) kaynaklı alüminyum çekme numunleri için $w=38\text{mm}$, $A=250\text{mm}$ ölçü boyunu önermektedir. Kolonlarda tümsel burkulma, yerel burkulma biçimleri karşılaştırılmıştır. Kaynaklı kolonlarda ısıdan etkilenen bölgelerde (ITAB) yumuşamadan dolayı kesitte erken kopmalar görülmüştür. ITAB kaynak merkezinden iki yöne toplam 25.4mm'lik bölgeyi içermektedir (AWS, 2008). Deneylerden elde edilen sonuçlar standartlarda verilen değerlerle karşılaştırılmıştır. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarda ITAB'ta ana metal dayanımının yarı yarıya azaldığı görülmüştür. Bu çalışmanın benzer sonuçları çalışma kapsamında yapılan deneylerde de görülmüş, özellikle uç detayların iyileştirilmesinde yardımcı olmuştur.

Rai (2002) düşük akma dayanımlı alüminyum alaşım 3003-O kullanılarak üretilen APLS'lerin çevrimsel yükler altındaki davranışlarını incelemişlerdir. Gövde burkulmasının yük-şekildeğıştirme davranışına olan etkisini belirlemişlerdir.

Faella ve diğ. (2000) toplam 80 adet 6000 serisi (ısıt ışılem görmüş) kare ve dikdörtgen kutu kesitler üzerine yaptıkları kapsamlı deneylerden uniform basınç kuvveti altında kutu kesitlerin yerel burkulmalarını incelemişlerdir. Elde edilen sonuçlar uniform eğilme etkisindeki alüminyum kirişlerin dönme kapasitesini tahmin edecek yeni bir yöntemde veri olarak kullanılmıştır. Sünek davranış elastik bölgede oluşan yerel burkulmaların önlenmesi ile elde edilebilmektedir. Bu yüzden b/t oranının uygun şekilde sınırlandırılması gerektiği belirtilmiştir.

2.3.2  zellikleri

Alüminyumun en önemli özelliklerinden olan hafiflik, binaların  l  yüklerini azaltmakla birlikte zaman ve enerji kazancı açısından ek yarar sağlamaktadır. Böylece  retim, nakliye ve montaj süresince i  gücü ve ekipman tasarrufu ortaya çıkmaktadır. Saf alüminyumun çekme dayanımı düşük olmakla birlikte demir, bakır, çinko, magnezyum, manganez ve silisyum gibi pek çok elementle ala ımlandırarak mekanik özellikleri geliştirilmektedir. Alüminyum ala ımlandırılarak yüksek dayanımda bir malzemeye d n  ebilmesine karşın demir,  elik gibi metallerin üçte bir ağırlığına sahiptir. Yapısal alüminyum  r nleri, UV ışınlarının etkilerini önleyen, korozyon-dirençli ve hava geçirmez alaşımlardan yapılır; bu nedenle kullanım ömrü boyunca yüksek performansı garanti edilmektedir. Dış etkenlere ve değişik iklim koşullarına karşı dayanıklıdır. Biçim, boyut ve kesit esnekliği sayesinde tasarımcılar tarafından sıklıkla tercih edilmektedir. Kolaylıkla dövülebilir, makinede işlenebilir ve dökülebilir alüminyum ekstrüzyon yöntemi ile yassı ürünler yada döküm ürünleri olarak  retilenilmektedir. Ayrıca malzemenin kolaylıkla eğilebilmesi, kesilebilmesi, delinebilmesi, per inlenebilmesi, vidalanabilmesi, kaynaklanabilmesi, lehimlenebilmesi şantiye aşamasında büyük üstünlük sağlamaktadır.

Alüminyumun ışık yansıtıcılık özelliği, gün ışığı kontrolü açısından oldukça önemlidir. Alüminyum güneş enerjisi kolektörleri yapay aydınlatma ve ısınma için enerji yutulmasını d   r ken güneş kontrol elemanları soğutma ve havalandırma fonksiyonuna yardımcı olmaktadır. Alüminyum zehirleyici ve manyetik değildir. Kıvılcım çıkarmaz, yanıcı olmayan inşaat malzemesi olarak sınıflandırılmaktadır. Saf haliyle 660 C olan ergime noktası, alaşımlarda 570-660 C arasında değişmektedir. Alüminyumun  zerindeki koruyucu tabaka atmosferik paslanmaya

karşı direnç oluşturmaktadır. Bu nedenle malzemenin kullanım ömrü boyunca bakım maliyeti oldukça düşmektedir.

Alüminyum üretiminde en önemli hammadde kullanılmış alüminyum malzemeleri olduğundan alüminyumun geri dönüşümü yüksektir. Kullanılmış alüminyum malzemeler yeniden alüminyum üretiminde kullanılabilir. Alüminyum'un başlıca karakteristik özellikleri demir metali ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.7'de verilmektedir. Alüminyumun yüzey merkezli kübik yapısından dolayı (düşük sıcaklıklardaki dayanımı, mekanik işlemler karşısındaki davranışı vb.) çeliğe benzerlik göstermektedir. Diğer taraftan özellikle kaynak işlemi sırasındaki genleşme katsayısı demire göre 2 kat daha fazla olmaktadır (genel olarak 1m uzunluğundaki bir çubuğun her 100°C'lik sıcaklık artışında 2mm uzadığı varsayılmaktadır). Bununla birlikte, alüminyumda demire göre daha az iç gerilme oluşmaktadır. Çekme etkisindeki alüminyum malzemenin elastisite modülü basınç etkisinden %2 daha azdır (Kissell ve Ferry, 2002).

Çizelge 2.7 : Alüminyumun karakteristik özelliklerinin demir ile karşılaştırılması.

Özellik	Birim	Alüminyum (Al)	Demir (Fe)
Atom ağırlığı	(g/Mol)	26,98	55,84
Kristal yapısı	-	Yüzey Merkezli Kübik	Hacim Merkezli Kübik
Yoğunluk	(g/cm ³)	2,70	7,87
E-Modülü (MPa)	(GPa)	69	210
Genleşme katsayısı	(1/K)	24x10 ⁻⁶	12x10 ⁻⁶
R _{p0,2}	(MPa)	~ 10	~ 100
Akma Dayanımı			
R _m	(MPa)	~ 50	~ 200
Çekme Dayanımı			
Özgül Isı	(J/kgK)	~ 890	~ 460
Erime Isısı	(J/g)	~ 390	~ 272
Erime sıcaklığı	(°C)	660	1536
Isıl iletkenliği	(W/m.K)	235	75
Elektriksel iletkenliği	(m/W.mm ²)	38	~ 10
Oksitleri	-	Al ₂ O ₃	FeO/Fe ₂ O ₃ /Fe ₃ O ₄
Oksitlerinin Erime sıcaklığı	(°C)	2050	1400 / 1455 / 600

Alüminyumun basınç etkisindeki davranışı malzemenin şişmesine neden olurken, gevrek kopma davranışı göstermez. Isıl işlem görme şekli alüminyumun elastisite modülünü değiştirmez. Saf alüminyum çok düşük dayanım değerlerine sahiptir. Bu değerler alaşımlandırma, ısıl işlem, soğuk deformasyon yöntemleri ile arttırılmaktadır. Alaşımlandırma ile ulaşılabilecek bazı değerler, R_m (Çekme Dayanımı) ~ 350 MPa (Isıl işleme uygun olmayan alaşımlar), R_m (Çekme Dayanımı) ~ 600 MPa (Isıl işleme uygun olan alaşımlar). Alüminyum hadde ve döküm olarak iki gruba ayrılmaktadır. Her bir grup da ısıl işleme uygun ve uygun olmayan şeklinde iki alt gruba ayrılmaktadırlar. İşlenmiş alüminyum, ilave edilen metallere göre 4 rakamdan oluşan notasyonla, nümerik olarak gruplandırılarak seriler halinde sınıflandırılmaktadır. Seri numaraları herhangi bir değeri ifade etmeyip yalnızca alaşımların birbirinden farklı olduklarını belirtmektedirler. Birinci rakam alüminyuma eklenen esas metali göstermektedir. Çeşitli ABD normlarına göre alüminyum serilerin özellikleri Çizelge 2.8’de verilmektedir.

Alüminyum alaşımlarından 1xxx, 3xxx ve 6xxx serisi yumuşak, 2xxx, 5xxx ve 7xxx serisi sert ekstrüzyonlu alaşımlar olarak bilinmektedir. Alaşımlar, nümerik sistem dışında ayrıca kimyasal bileşimleri ile tanımlanabilmektedirler.

Örneğin; nümerik gösterimi ENAW-5456A için kimyasal bileşim esaslı gösterim ENAW- $AlMg_5Mn_1(A)$ şeklindedir. Burada EN; standart tanımın kısaltması, AW; ana malzeme teslim durumu, 5456; seri tanımı ve alaşım tanımı, A; varyant, AlMg; ana alaşım elementi, 5; ortalama içerik, Mn; diğer alaşım elementidir.

Çizelge 2.8 : Alüminyum alaşımlarının serileri ve özellikleri.

Alüminyum Alaşım Serisi	Ana Alaşım Elementleri	Özellik	Isıl İşleme Uygunluğu
1xxx	-	Saf alüminyumdur. Elektriksel iletkenliği ve korozyon dayanımı mükemmeldir. 1060'da %99.6 oranında alüminyum içermektedir.	Isıl işlemlerle sertleştirilemez. Uygun değil
xxx	Bakır	Yüksek dayanımlı fakat düşük koroziye etkilidir. Diğer adı duralümin'dir. 2024 özellikle havacılıkta en yaygın kullanılanıdır.	Isıl işlemlerle sertleştirilebilir. Uygun
3xxx	Mangan	Dayanımı, işlenebilirliği ve koroziye özellikleri iyidir. 3003, 3004 ve 3105 en çok kullanılanıdır.	Isıl işlemlerle sertleştirilemez. Uygun değil
4xxx	Silisyum	Ergime noktası silisyum ilavesiyle düşürülerek lehimlemeye elverişli hale getirilmiştir. 4043 en yaygın kullanılanıdır. Düşük çatlama hassasiyeti sayesinde kolayca kaynak edilebilirler.	
5xxx	Magnezyum	Koroziye özellikleri ve kaynaklanabilirlik dayanımı oldukça iyidir. Özellikle tekne yapımında kullanılmaktadır. Düşük çatlama hassasiyeti sayesinde kolayca kaynak edilebilirler.	
6xxx	Magnezyum ve Silisyum	Mimari amaç için üretilmektedir. 6061 ile karbon çeliğinin akma dayanımları yakındır. Yapı alanında kullanımı yaygındır. Düşük çatlama hassasiyeti sayesinde kolayca kaynak edilebilirler.	Isıl işlemlerle sertleştirilebilir. Uygun
7xxx	Çinko	7005 alüminyum-magnezyum-çinko ile 7075 ve 7178 alüminyum-çinko-bakır ile alaşımlandırılmıştır.	
8xxx	Diğer	-	Isıl işlemlerle sertleştirilemez. Uygun değil

2.3.3 Malzeme dayanımının artırılması yöntemleri

Alüminyum malzemenin özellikleri şunlara bağlıdır:

- Kimyasal birleşim
- Temper durumu
- Mamul şekli (sac, profil, vb.)

Saf alüminyum'un sahip olduğu dayanım değerlerinin oldukça düşük olduğu Çizelge 3.1'de verilmiş olan değerlerden görülmektedir. Ancak bu değerler aşağıdaki yöntemler yardımıyla arttırılabilmektedir (GEV-ATB, 2009):

- Alaşımlandırma
- Soğuk şekillendirme
- Isıl işlem (Çökelti tavlama)

Alaşımlandırmanın ardından, ısıl işlem ya da soğuk şekillendirme (haddeleme) uygulanarak malzeme dayanımının oldukça yüksek değerlere getirilmesi mümkündür. Ancak her alaşım grubu ısıl işlem için uygun değildir. Isıl işleme uygun olan malzemelere soğuk deformasyonun ardından ısıl işlem uygulanması mümkündür (termo-mekanik işlem).

2.3.3.1 Isıl işleme uygun olmayan alaşımlar

Bu alaşımlarda dayanım arttırımı aşağıdaki yollarla elde edilmektedir:

- Katı çözümleri sertleşmesi
- İkinci faz çökmesi ile sertleşme
- Tane sınırı sertleşmesi
- Soğuk deformasyon ile sertleşme

Alaşım elementlerinin eklenmesi ile kafes yapı içerisine yerleşen yabancı atomlar sayesinde; sertlik, çekme ve akma dayanımı değerlerinde artış ortaya çıkmaktadır. Alüminyuma eklenen alaşım elementlerinden bazıları dayanım artışına göre Çinko, Silisyum, Bakır, Manganez ve Magnezyum şeklinde sıralanmaktadır. Magnezyum ve Manganez dayanımı artırma üzerinde oldukça büyük bir etkiye sahiptir. Bu nedenle de birçok alaşım içerisinde yer almaktadırlar. Soğuk işlemle sertleştirme işlemi sonrasında genel olarak, malzemenin yumuşatılması amacı ile ısıl işlem uygulanmaktadır (250~300°C). Buradaki amaç, aşırı sertleşmenin ortadan kaldırılması ve malzemenin kullanımında (kaynak, bükme gibi) aşırı sertlik nedeniyle ortaya çıkabilecek sorunların önlenmesidir. Alaşımlar ısıl işlem görme (ergitme) şekillerine göre semboller almaktadır. Bu grup malzemelerde, alaşımın sertlik durumu temel gösterimin ardından Çizelge 2.9'da verilmektedir.

Çizelge 2.9 : Isıl işleme uygun olmayan elemanların sertlik durumu.

F	İmal edildiği durumda
O	Yumuşatma tavı uygulanmış
H	Soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş
H1X	Soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş ilave ısı işlem yapılmamış
H2X	Soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş ve tavlanmış: şekillendirilme yeteneği bir miktar arttırılmış
H3X	Soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş ve stabilize edilmiş
H4X	Soğuk deformasyon ile sertleştirilmiş ve verniklenmiş (fırınlanarak)

2.3.3.2 Isıl işleme uygun olan alaşımlar

Bu grupta yer alan alaşımların özellikleri çökelti sertleştirilmesi (çözündürme+su verme) ısı işlemi ile belirlenmektedir. Çözelti tavı genel anlamı ile, alaşımın katı çözeltili halinde iken etkin alaşım bileşenlerince zenginleşmesi şeklinde ifade edilebilir. İlave alaşım bileşenlerince zenginleştirilmiş olan katı çözeltilinin hızlı bir şekilde soğutulması yolu ile karma kristal aşırı doymun hale gelir. Çökelti sertleştirmesinin basamakları

- Çözelti tavı
- Su verme
- Yaşlandırma
 - Soğuk (doğal–oda sıcaklığı)
 - Sıcak (yapay–100-200 °C)

şeklinde. Bu grup malzemelerde, alaşımın ısı işlem (temper) durumu, temel gösterimin ardından Çizelge 2.10’da verilmektedir.

Çizelge 2.10 : Isıl işleme uygun olan alaşımların sertlik durumu.

T1	Sıcak şekillendirme sıcaklığından su verilerek soğutulmuş+doğal yaşlandırılmış
T2	Sıcak şekillendirme sıcaklığından su verilerek soğutulmuş+soğuk şekillendirilmiş
T3	Çözündürülmüş (Çözeltiye alınmış)+soğuk şekillendirilmiş+doğal yaşlandırılmış
T4	Çözündürülmüş+doğal yaşlandırılmış
T5	Sıcak şekillendirme sıcaklığından su verilerek soğutulmuş+yapay yaşlandırılmış
T6	Çözündürülmüş+yapay yaşlandırılmış
T7	Çözündürülmüş+dengelenmiş (Stabilize edilmiş)
T8	Çözündürülmüş+soğuk şekillendirilmiş + suni yaşlandırılmış
T9	Çözündürülmüş+yapay yaşlandırılmış + soğuk şekillendirilmiş
Tx51	Gerilim giderme amaçlı gerdirilmiş (Streç)
Tx52	Gerilim giderme amaçlı sıkıştırılmış
W	Çözelti ısı işlemi yapılmış (Kararsız temper. Doğal yaşlandırma zamanı verilebilir.)

Alüminyumun çelik gibi yapısal eleman olarak kullanımına uygun ve istenilen dayanıma sahip bir metaldir. Örneğin, 6xxx serisi yumuşak ekstrüsiyonlu alaşımlar magnezyum ve silisyum içermekte olup yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Çizelge 2.11’de korozyon özelliği yüksek, kaynaklanma yeteneği iyi olan A6061-T6 alüminyum alaşımının A36 yapı çeliği ile özellikleri karşılaştırılmaktadır.

Çizelge 2.11 : A36 yapı çeliği ile A6061-T6 alüminyum alaşımı karşılaştırması.

Özellik	Alüminyum A6061-T6	Karbon Çeliği A36
Ekstrüsiyon	Çok iyi	Pratik değil
Kaynaklanabilirlik/Kaynağa Uygunluk	İyi, ancak dayanımı azalır	İyi, dayanım azalmaz.
Korozyon Dayanımı	İyi	Oldukça iyi
Akma Dayanımı	240 MPa	250 MPa
Elastisite Modülü	68950 MPa	210000 MPa
Kopma Uzaması	%8~10	%20
Yoğunluk	2713 kg/m ³	7833 kg/m ³
Yorulma Dayanımı (5 milyon çevrimde)	70.33 MPa	165.48 MPa
Akma Dayanımı/Ağırlık	2.8	1.0~1.4
Birim Ağırlık Maliyeti	\$ 2.64 /kg	\$ 0.66 /kg
Birim Hacim Maliyeti	\$ 4.72 /cm ³	\$ 3.31 /cm ³

6xxx serisi alüminyum alaşımlarından yapı alanında en yaygın kullanılanlardan bazıları ise aşağıda özellikleri ile sıralanmaktadır:

- A6063 mimari uygulamalarda uzun zamandır kullanılan bir alüminyum alaşımıdır. Dayanımı düşük ve A6061’e göre maliyeti daha azdır.
- A6463 ile A6063 malzeme özellikleri bakımından birbirine çok yakın özellikleri bulunmakla birlikte A6463 kimyasal yapısından dolayı ışıyı yansıtıcılığı çok daha iyidir.
- A6005-T5 ve A6105-T5 aynı dayanıma sahip olmakla birlikte A6061-T6’ya göre kolay şekillenebilmektedirler.
- A6066 yüksek sertliğe sahip, A6061-T6’ya göre dış ortamlarda koruyucu malzeme ile kaplanması gerekmektedir.

- A6262-T6 ile A6061-T6 yakın malzeme özelliklerine sahip olmakla birlikte A6262-T6 %0.4~%0.7 kurşun içerdiğinden işlenebilirlik yeteneği diğer 6xxx serisi alaşımları içinde en yüksek olandır.
- A6351-T5'in korozyon dayanımı A6061-T6'dan yüksektir.
- A6082 kozyon dayanımı yüksek, kaynaklanabilme yeteneği oldukça iyidir. Makine yapımında kullanılabilir. Makine yapımında kullanılabilir.
- A7005 korozyon dayanımı A6061'den çok yüksek olmasına karşın karışık parçaların ekstrüzyonu zordur. Soğukta şekil verme için uygun değildir. Kaynak işleminden sonra yaşlandırma yapılmalıdır.
- A6061-T6'nın ısıdan etkilenen bölgelerinde (ITAB-heat-affected-zone) dayanım kaynaklanmadan ötürü %40 azalmaktadır.

2.3.4 Alüminyum alaşımların kaynağa uygunluğu

Alüminyum malzemeler kaynaklanırken malzemeye özgü bazı özelliklerin dikkate alınması gerekmektedir. Alüminyum malzeme çeliğe göre daha yüksek termik (ısı) iletkenliğe sahip olduğundan (yaklaşık çeliğin 3 katı) kaynak nüfuziyeti daha düşük ve kaynak banyosunun gazlarından arınması daha güç olmaktadır. Ayrıca yüksek ısı iletkenliğinden dolayı özellikle kalın malzemelerde kaynak öncesi “ön tavlama” işleminin uygulanması gerekmektedir. Bunun nedeni, yeterince ısı girişi yapılarak “yetersiz ergime” sorununun önüne geçilmesidir. Böylece birçok çelikte görülen sertleşme çatlakları alüminyumda görülmemektedir. Alüminyumda kaynak sırasında oluşan yüksek ısı metalin genişlemesine neden olmaktadır (yaklaşık çeliğin 2 katı). Soğuma sonucunda ise malzeme tekrar eski durumuna dönmeye çalışacak ve kendini çekecektir. Malzemenin yapısında ısınmayla meydana gelen genişleme ve soğumayla oluşan büzülme gerilmeleri, dolayısıyla çekmede çarpılması oldukça fazladır. Bu yüzden uygun kaynak sıralamasının yapılması gerekmektedir.

Alüminyum özellikle yüksek sıcaklıklarda kuvvetli oksijen emme eğilimi göstermektedir. Yüzeyde oluşan oksidin ergime derecesi 2100⁰C, alüminyumun ergime derecesinden çok fazladır. Kaynak sırasında yüzeydeki oksidin ergimesi için fazla ısı gerekmektedir. Bunun nedeni alüminyumun oksijene karşı afinitesinin (çekiliminin) çok yüksek olmasıdır. Oksidin ergimesi esas metalin bir anda ergiyerek

çökmesine neden olmaktadır. Bu sorunu gidermek için kaynak yapılacak alüminyum numunenin yüzeyindeki oksit tabakasının giderilmesi gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarını çekme gerilmelerinin yüksek olması ve birleştirilecek parçaları iyi sabitlenmediği takdirde kaynak metalinde sıcak çatlaklar oluşmasına neden olunmaktadır. Sonuç olarak kaynak dikişinde yetersiz ergime ve gözenekler oluşabilmektedir. Özellikle kalın kesitli malzemelere kaynaktan önce kesitin ergitilmesi için gerekli olan enerjinin sağlanabilmesi için ön ısıtma yapılması gerekmektedir. Numune parçası 500⁰C'nin üzerinde ön tavlama yapılarak, birleşim yerinin tasarımı değiştirilerek ve daha uygun elektrod seçilerek bu tür kaynak hataları önlenabilmektedir. Ön tavlama işlemi oksit-asetilen alevi kullanılarak yapılmaktadır.

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının birleşiminde %50 kaynak kullanılmaktadır. Ergitme kaynak yöntemleri ile kaynak yapılabilir. 1990'ların başında geliştirilen bir katı hal kaynak yöntemi olan sürtünme karıştırma kaynağı (SKK), geleneksel ergitmeli kaynak yöntemleriyle kaynağı güç olan özellikle yaşlanma sertleşmesine tabi tutulmuş genellikle silindirik kesitli alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılmıştır. SKK, kaynaklı birleşimi güç olan malzemelerin birleşiminde kısa kaynak süresi, minimum yüzey hazırlama ve otomasyon kolaylığı gibi kendine özgü üstünlüklerinden dolayı alternatif kaynak yöntemi haline gelmiştir. Örtülü elektrodla alüminyum kaynağı, genellikle istenilen şartları sağlamadığı için sık kullanılmamaktadır.

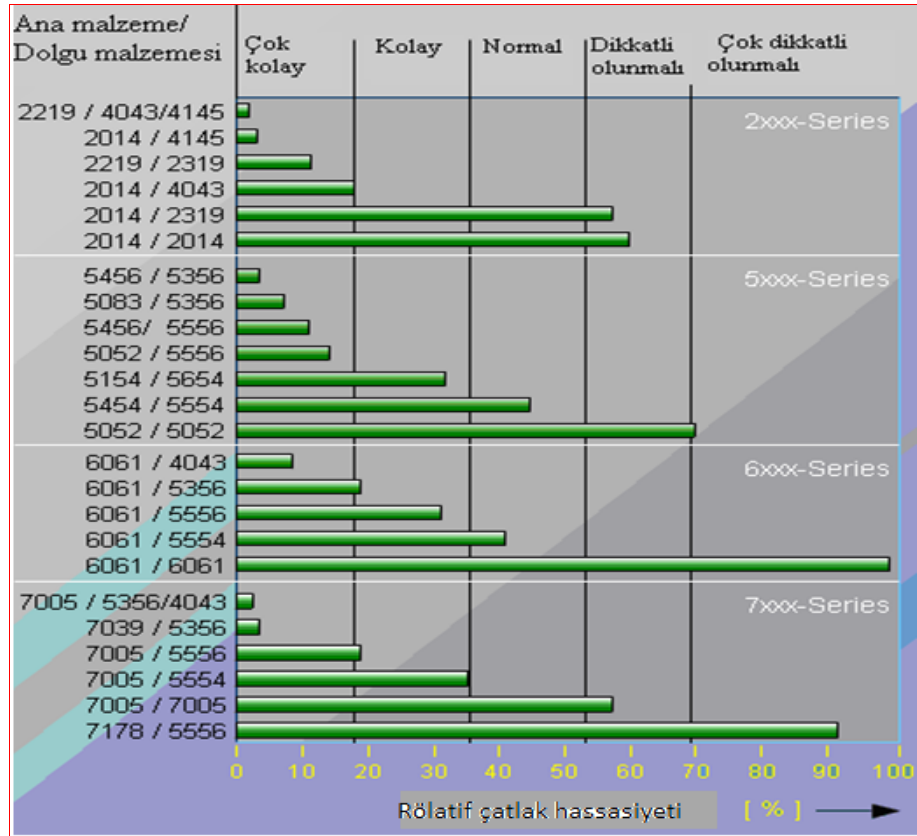
2.3.4.1 Kaynaklı bağlantı için gereken koşullar ve kaynağa uygunluk

Malzeme kaynak edilmeye uygun olmalıdır (çatlamaya elverişli olmamalıdır). Sertleşme çatlakları ve hidrojen tarafından tetiklenen çatlaklar (soğuk çatlaklar) alüminyumda görülmez. Kaynak bölgesi (kaynak metal + ısıdan etkilenen bölge (IEB)) ana malzeme ile aynı dayanım değerlerine sahip olmalıdır. Kaynak bölgesinin korozyon direnci en az ana malzeme kadar olmalıdır. Kaynak bölgesinin şekillendirilebilme özellikleri ana metalinki ile uyumlu olmalıdır.

Kaynağa uygunluk, alaşımın sıcak etkisi ile çatlak oluşumuna eğilimi ile belirlenir. Çatlaklar malzemenin kimyasal bileşimine bağlı olarak ortaya çıkan katılaşma karakteristikleri ile ilişkilidir. Saf alüminyumun kritik sıcaklık aralığı yoktur. Katılaşma sonrası katı Al atomları birbirine sıkıca bağlanırlar. Saf alüminyumda

gözenek ve çekme boşlukları oluşabilmektedir. Düşük alaşımlı alüminyumda kritik sıcaklık aralığı azdır. Katılaşma sağlanmakta, ancak bağ oluşmamaktadır. Ayrıca sıcak çatlak eğilimi bulunmaktadır. Yüksek alaşımlı alüminyumlar ise katı alüminyum kristalleri eriyik içerisinde yüzebilir ve sıcak çatlak eğilimi bulunmamaktadır. Sıcak çatlak oluşumu birçok değişkene bağlıdır. Katılaşma sırasında ortaya çıkan gerilmeler ısı etkileri ya da kaynak edilen elemanda çekmenin/çarpılmanın önlenmesi sonucunda çatlamlara neden olabilmektedir. Bu durumda kaynak parametreleri (özellikle ısı girdisi) önemli rol oynamaktadır.

Sıcak çatlakların ortaya çıkmasının önüne geçilmesinin en önemli yolu ise kaynak metalinin kimyasal bileşiminin kontrol altında tutulmasıdır. Bunun da yolu uygun kaynak ilave metalinin kullanılmasıdır. Kaynak ek metalleri genel olarak “Si” içeren ve “Mg” içerenler olmak üzere sınıflandırılırlar (Kimyasal bileşimleri ISO18273 standardında verilmektedir). Önemli alaşımların metalurjik bakımdan kaynak edilebilirliği Şekil 2.14’de verilmektedir.



Şekil 2.14 : Alüminyum alaşımlarının metalurjik bakımdan kaynaklanabilirliği (GEV-ATB, 2009).

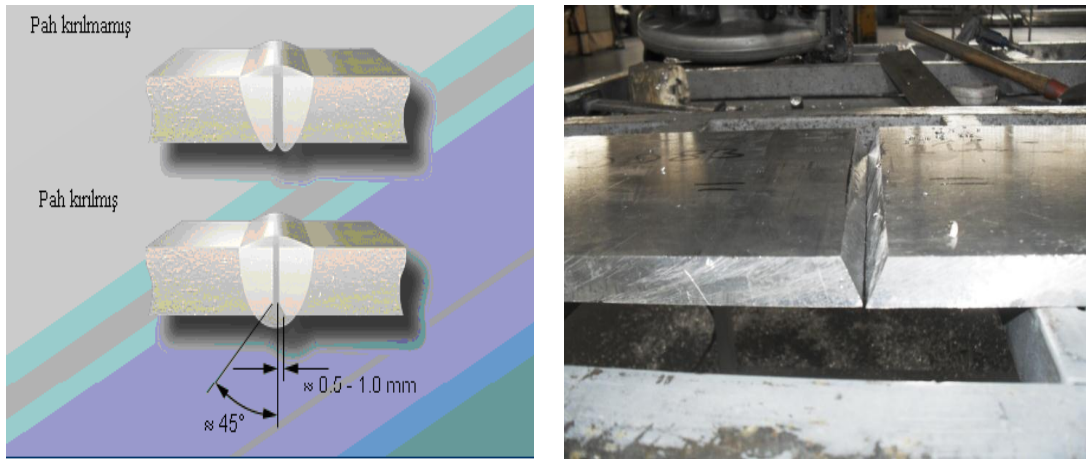
2.3.4.2 Kaynak dikişı hazırlığı ve ön ısıtma

Gazaltı kaynakları Metal İçeren Gazaltı kaynağı (MIG, GMAW) ve Gaz Tungsten Ark Kaynağı (TIG, GTAW) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

TIG kaynağı, ergimeyen (tükenmeyen) tungsten bir elektrod ile numune parçası arasında meydana gelen ark ve kaynak bölgesinin de asal bir gaz (argon, helyum, argon-helyum karışımı) tarafından korunduğu bir gazaltı kaynak yöntemidir. TIG kaynağı en çok, alüminyum, magnezyum, bakır ve titanyum gibi diğer ergitmeli kaynak yöntemleri ile birleşimlerin güç olduğu düşük yoğunluklu metallerin kaynağında kullanılır.

MIG kaynağında ark, numune parçası ve kaynak metali arasında ergiyen bir elektrod ile oluşur. Ark, helyum/argon gazı altında yanar ve sürekli bir gaz akışı olduğu için kaynak banyosu atmosferden korunur.

Alüminyum elemanlarda tercihen tek pasoda kaynak çekilmelidir. Çünkü alüminyumun sıcaklık karşısında hemen oksitlenmesi her pasodan sonra kaynak dikişinin temizlenmesi gerekecektir. Küt alın birleştirmelerinin tek pasoda kaynak edilmesinde kaynak yapılan yüzeyin ters tarafında kaynak ağzına pah kırılması gerekmektedir. Aksi halde kök oluşumu risk altına girmektedir (Şekil 2.17).



Şekil 2.15 : Küt kök yüzeyli ve altlık pasolu tek V alın kaynağı için açılan ters pah.

Her pasodan sonra kaynak elektrod ucunda oluşan krater keski ile açılmalıdır. Bu yapılmazsa elektrodun ucu kapanır, arkin oluşması engellenir ve bu kraterin ergimesi

çok güç olur. Kaynak dikişinin içine girmesi durumunda, kaynak metalinin soğumasıyla dikiş içerisinde curuf kalıntısı oluşmaktadır. Meydana gelen bu curuf kaynak metalinin dayanımını düşürerek çatlamasına neden olmaktadır. Bu nedenle daha yüksek hızda kaynak yapılması gerekmektedir. Kaynak hızı arttıkça malzemeye giren ısı miktarı azalmakta, malzeme daha çabuk soğumakta ve böylece dayanım arttırıcı partiküller daha homojen şekilde çökelerek çekme dayanımını ve sertliğini arttırmaktadır.

Kaynağa başlamadan önce, kaynak ağızları ve kaynağa yakın bölgeler (kaynak ağzının en az 50mm yakını) yağ, boya vb. pisliklerden arındırılmış ve kuru olmalıdır. Ayrıca, kaynak ağzında bulunan kalın oksit tabakasının da temizlenmesi gerekmektedir. Oksit tabakasının temizlenmesi kimyasal ve/ya da mekanik olarak yapılabilir. Mekanik temizlemede (tel fırça ile fırçalama) kullanılan malzemenin paslanmaz çelikten imal edilmiş olması uygundur. Alüminyum kaynağında kullanılan el aletleri çelik kaynağında kullanılamaz. Her kaynak dikişinden sonra oluşan curuflar tel fırça ile temizlenir, dikiş yüzeyi kaynaklama sırasında oluşan oksitten kazınarak temizlenir. Gözenek ve püskürmelere neden olduğu için elektroda çok fazla eğim verilmez. Ark boyu ergimenin fazla olmaması için 3-5mm arasında tutulmalıdır. Kaynaklı birleşimlerin kök kısmında gözle görülür bir çatlak görülmemesi gerçekleştirilen bağlantıların hatasız olduğunu gösterecektir.

Kaynak sırasında gerekli ergimenin sağlanması için ön ısıtma (tavlama) önerilmektedir. Tavlama soğuk şekildeğiştirme neticesinde sertleşmiş olan malzemeden sertliği kaldırmak ya da ısıl işleme tabi tutularak yaşlandırılan malzemeyi yumuşatmak için kullanılır. Yapıda mevcut tanelerin yeniden kristalleşmesini sağlamak amacıyla, alaşımı eritmek ve çökeltilme ısıl işlemleri sıcaklıkları arasında bir derece kadar ısıtmak tavlamanın esasıdır. Ön ısıtma yaşlanma sertleşmesinin, sertleşme etkilerini yok eder. Ön ısıtma sıcaklığına ve bu sıcaklıkta bekleme zamanına dikkat edilmelidir (Çizelge 2.12). Ön ısıtma yapılırken alaşımın kenar kısımlarının ve ince yerlerinin bozulmaması için tavlama ısısı yavaş yavaş arttırılır.

Çizelge 2.12 : Ön ısıtma sıcaklıkları ve bekleme süreleri.

Seri	Alaşım	Kalınlık (mm)		Ön Isıtma Sıcaklığı (en fazla) (°C)	Ön Isıtma Süresi (en fazla dakika)
		TIG	MIG		
6xxx	A6060	≥5~12 (>12)	>20	180	60
	A6063			200	30
	A6082			220	30
	A6005A			250	30
7xxx	A7020	≥ 4~12	>16	140	30
		(>12)		160	20
5xxx	A5083	≥ 6~12	>16	150~200	10
	A5754	(>12)			

Ön ısıtma sıcaklığı dikkatle seçilmelidir. Mevcut alaşım elemanlarının içinde en düşük ergime sıcaklığına sahip olana elementin ergime sıcaklığının altında bir sıcaklık seçilmelidir. Ön ısıtma hızı için ortalama bir hız önerilir. Malzeme soğuk şekilde değiştirmeye tabi tutulmuşsa tane büyümesine engel olmak için ön ısıtma hızı arttırılmalıdır. Ön ısıtma süresi, malzemenin sıcaklığına, tavlama şekline, malzemenin yapısına göre değişmektedir. Ön ısıtma sıcaklığında bekletilme süresinin ölçülmesine, malzemenin en soğuk kısmının istenilen minimum sıcaklık değerine varıldığında başlanılır. 200°C~300°C arası uzun süreli bekleme çekmeye neden olabilir ve taneler arası korozyon oluşabilir.

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlardaki son ısıl işlem aşaması 200°C seviyesidir. Dolayısı ile eğer kaynakçı alüminyuma 330°C düzeyinde bir öntav uygular ve bu sıcaklığı kaynak işlemi süresince korursa alüminyumun mekanik özellikleri değişir.

5xxx serisi gibi ısıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarında eğer kaynakçı sıcaklığı 100°C seviyesinde tutarsa, malzemeyi gerilmeli korozyon çatlamasına karşı hassas hale getirir. Birçok durumda yüzeydeki nemi kurutarak parçadan uzaklaştırmak amacıyla bir miktar öntav uygulaması kabul edilebilir, ancak bu durumda öntav sıcaklığı sınırlı seviyede tutulmalıdır.

Alüminyumun erime sıcaklığı (650°C) çeliğinkinden (1480°C) daha düşüktür. Bu düşük ergime noktasından dolayı birçok kaynakçı düşük güce sahip donanımların alüminyum kaynağı için yeterli olacağını düşünmektedir. Ancak alüminyumun ısı iletkenlik özelliğinin çeliğinkinden 5 kat daha yüksek olduğu unutulmamalıdır. Bu durum ise, oluşan ısının çok hızlı bir şekilde dağılacağı anlamına gelmektedir. Bu yüzden alüminyumun kaynağı için gerekli olan kaynak akımı ve kaynak voltajı çelik için gerekli olanlardan daha yüksektir.

2.3.4.3 Koruma gazları

Alüminyumun kaynak işlemlerinde koruyucu asal gaz olarak Argon, Helyum ya da bunların karışımı kullanılmaktadır. 12mm kalınlığına kadar alüminyum malzemelerin TIG ve MIG kaynağı yöntemlerinde en yaygın olarak kullanılan koruyucu gaz Argon'dur. Koruyucu gazların görevi, amlaları, kaynak banyosu ile ısıdan etkilenmiş bölgeyi (ITAB) havadan korur ve kaynak arkı davranışlarını iyileştirir. Argon en az nüfuziyet, en düşük ergime gücü, en dar kaynak dikişi verirken, helyum en derin nüfuziyet, daha yüksek ergitme gücü, geniş ve konveks bir kaynak dikişi oluşturur. Her iki gazın bu gazların karışımlarının metal sıçrama kayıplarını enaza indirgediği görülmüştür.

Koruyucu gaz seçimine etki eden faktörler aşağıda sıralanmıştır:

- Kaynak yapılacak metal ya da alaşım türü,
- Ark karakteristiği ve metalin damla geçiş biçimi,
- Kaynak hızı,
- Parça kalınlığı, gereken nüfuziyet ve kaynak dikişinin biçimi,
- Gazın maliyeti,
- Beklenen kaynak dikişi mekanik özellikleri.

12mm üzerindeki kalınlıklarda daha yüksek ısı elde etmek için Argon'un içerisine %25'den %75'e kadar değişen Helyum ilavesi ile ark performansı saf Argon'a göre arttırılmakta ve kaynak dikişi özelliklerinde (dikiş genişliği, penetrasyon) iyileşme sağlanılmaktadır. Helyum, ısıyı iyi ilettiğinden, derin nüfuziyetli kaynak dikişi elde edilir. Ark geriliminin düşümü argona göre yüksek

olduğundan, helyumun kaynak arkı yüksek enerjilidir. Aynı penetrasyon düzeyinde Helyum ilaveli koruma gazı altında daha yüksek kaynak hızlarına ulaşılabilir, gözeneklilik ve yetersiz ergime sorunlarında azalma sağlanır. Yüksek iyonizasyon potansiyeli nedeniyle, Helyum kullanımı ark kararlılığını olumsuz yönde etkiler. Dolayısıyla %100 oranında Helyum kullanımı genellikle uygun değildir. Helyum'un yoğunluğunun düşük olması nedeni ile Argon'a oranla 3 kat daha fazla gaz kullanılması gereklidir. Argon için kullanılan akış sayaçlarının, Helyum için de kullanılması mümkündür. Gaz miktarlarının ayarlanmasında düzeltme faktörlerine dikkatlice uyulmalıdır. Düzeltme faktörleri Çizelge 2.13'de verilmektedir.

Çizelge 2.13 : Koruma gazı için kullanılan karışım oranları.

Koruma Gazı		Düzeltilme Faktörü
ARGON (%)	HELYUM (%)	
100	0	1
75	25	1.14
50	50	1.35
25	75	1.75
0	100	3.16

Hangi gazın kullanılması gerektiği genel olarak malzeme kalınlığına bağlıdır. Gazların etkisi Çizelge 2.14'te verilmektedir.

Çizelge 2.14 : Koruma gazlarının kaynağa olan etkileri.

Koruma Gazı	%100 Ar → %100 He
Ark Davranışı	MIG: Düşük Kararlılık TIG: Difüzyon artar.
Dikiş Genişliği	Artar, dikiş düzelir.
Penetrasyon	Derin ve dairesel
Kaynak Hızı	Arttırılabilir
Yetersiz Ergime	Azalı
Hassasiyeti	
Gözenek Hassasiyeti	Azalı
Ön Isıtma	Azaltılabilir ya da iptal edilebilir.
Sıcaklık	Parça daha çok ısınır. Kaynak hızının artması ile giderilebilir.
Maliyet	Artar

2.3.4.4 Kullanılan kaynak telleri

Uygun kaynak teli seçimi kaynak bölgesinin dayanımı açısından önemlidir. Alüminyum alaşımlı kaynak telleri seçilirken sık ve öncelikli olarak dikkate alınması gereken noktalar şunlardır:

- Kaynak yapılacak olan esas ana metalin cinsi ve bağlantı bölgesinin kalınlığı doğru olarak belirlenmelidir.
- Uygulanacak kaynak yöntemi ve kaynak ağzı önceden belirlenmelidir.
- Kaynağın çatlak içermemesi, kaynak metalinin çekme ve kesme dayanımı, kaynak sünekliği, yüksek ve düşük çalışma sıcaklıkları, korozyon dayanımı, anodlama işlemi sonrası elde edilen renk uyumu belirlenmelidir.

1xxx serisi alaşımlar en yumuşak kaynak tellerinin üretilmesinde kullanılırlar ve tel sürme işleminin sorunsuz olması için özel dikkat ve önlem gerektirirler. Elektrik ve kimya endüstrisindeki uygulamalarda, genellikle düşük alaşım elementi içeren hatta hiçbir alaşım elementi içermeyen yüksek saflığa sahip malzemeler ve kaynak ürünleri tercih edilmektedir.

A5083-H111'in alın kaynaklı birleşiminde 5556, 5183, 5356 kaynak teli kullanılmaktadır. A6061-T6 için 4043, 5183, 5356, 5554, 5556, 5654 telleri kullanılmaktadır. Bu kaynaklar özellikle anotlama işlemi sonrası ana metalle renk uyumunda mükemmellik, yüksek kaynak sünekliği ve dayanım sağlamaktadır. Artan sıcaklık durumunda aynı alüminyum alaşımlar için en uygun kaynak teli 5554'tür.

4043, Alüminyum-Silis (Al-Si) ve Alüminyum-Magnezyum-Silis (Al-Mg-Si) alaşımlarının kaynağında kullanılan %5 Si içeren alüminyum gazaltı (MIG) kaynak telidir. %2'ye kadar alaşım elementleri içeren alüminyum alaşımlarının ve %7'ye kadar silis içeren döküm alaşımlarının kaynağına uygundur. Bilinen çekme dayanımı 200MPa'dır. 4043 kaynak telleri, 6xxx serisi malzemelerin kaynağında, dikişte çatlak oluşumuna karşı gösterdikleri düşük duyarlılık nedeniyle birçok kaynakçı tarafından özellikle tercih edilmektedir. Buna karşın AlMg esalı 5083, 5086 ve 5456 türü malzemelerin kaynağında kullanılmaya elverişli değildir. Çünkü bu tellerin kullanımı sonucunda kaynak bölgesinde oluşan Mg_2Si sünekliği azaltır ve çatlama eğilimini yükseltir.

4047, kaynak telleri kaynak metalindeki Si içeriğinin yükseltilerek sıcak çatlama riskinin en aza indirilmesi hedeflenen durumlarda kullanılmaktadır.

5356, Alüminyum-Magnezyum (Al-Mg) ve Alüminyum-Magnezyum-Silis (Al-Mg-Si) alaşımlarının kaynağında kullanılan, %5 magnezyum içeren gazaltı (MIG) kaynak telidir. Anodizasyon işleminden sonra ana metal ile renk uyumuna sahiptir. Sünekliliği ve özellikle deniz suyundan korozyon direnci son derece yüksektir. Bilinen çekme dayanımı 269MPa'dır. Akma dayanımı 131MPa'dır. 5356 herçeşit 5xxx serisi malzemelerin kaynağı için uygundur. 5083 ve 5654 serisi yüksek dayanıma sahip malzemelerin kaynağında yeterli mekanik dayanım 5356 kaynak teli ile sağlanamaz. Bunun yerine 5183, 5556 ve 5087 kaynak telleri kullanılmalıdır. Yüksek oranda Mn, Mg ve Zr içeren alaşımlar 5xxx serisi malzemelerin kaynağında aranan minimum çekme dayanımını sağlayabilmektedirler.

5183, Alüminyum-Magnezyum (Al-Mg) ve Alüminyum-Magnezyum-Mangan (Al-Mg-Mn) alaşımlarının kaynağında kullanılan gazaltı kaynak telidir. Yüksek çekme dayanım istenilen kaynaklı bağlantılarda tercih edilmektedir. Çekme dayanımı 250MPa, akma dayanımı 170MPa'dır.

5356, 5556, 5183 ve 5087 kaynak telleri 5xxx serisi malzemelerin, 6xxx serisi ve kaynaklanmaya elverişli 7xxx serisi malzemelerin kaynağına uygundur. Ancak yapılarında bulunan yaklaşık %3'lük Mg içeriğinden dolayı gerilmeli korozyona karşı hassasiyet gösterdikleri ve ani hasarlanmaya uğradıkları için 66⁰C'a ulaşan ortam sıcaklıklarında kullanılması sakıncalıdır.

Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları genellikle ana metal ile aynı kimyasal analize sahip kaynak telleri ile kaynaklanabilmektedirler. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları metalurjik açıdan daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve kaynak dikişinin soğuması sırasında "Sıcak Çatlak" oluşumuna hassasiyet göstermektedirler. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımlarının kaynağında genellikle ana malzemenin daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve dayanımları ana malzemeninki ile aynı ya da daha düşük olan, örneğin 4043 veya 4145 kaynak telleri kullanılmaktadır. Ana metalin kaynak dikişine komşu bölgede yapısında düşük ergime sıcaklığına sahip katkı elementleri içermesine izin verilmesi ile kaynak banyosunun katılma hızı artırılır ve soğuma sırasında ana metalde oluşan

gerilmeler en aza indirilir ve taneler arası çatlak oluşumu eğilimi büyük ölçüde azaltılır.

Isıl işlem uygulanabilen, örneğin %6.3 Cu içeren 2219 gibi alaşımlar ise kendilerine yakın alaşımlardan 2319 kaynak teli ile kaynaklanabilir. 6xxx serisi alaşımlar, eğer kaynak metali ana metal ile benzer kimyasal analize sahipse, düz alın kaynağı birleşimlerinde çatlamaya karşı yüksek hassasiyet gösterirler. Bu tür alaşımlar, kaynak ağzının açılması ve ana metal ile oluşturulan karışımda bulunan kaynak teli miktarının arttırılması ile kolayca kaynaklanabilmektedir. A6061 alüminyum alaşımların kaynağında, kaynak metali en az %50 oranında 4043 ya da %70 oranında 5356 kaynak teli içermelidir. 4145 kaynak telleri ile, 2014 ve 2618 gibi 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının, Al-Cu ve Al-Si-Cu türü döküm alüminyumlarının kaynağında çatlamaya karşı düşük hassasiyet göstermektedirler. 7xxx serisi alaşımlarının sahip olduğu yüksek çatlama hassasiyeti, içerdikleri bakır oranına bağlı olarak değişmektedir. 7004, 7005 ve 7039 gibi düşük oranda bakır içeren alaşımlar 5356, 5183 ya da 5556 türü kaynak telleri ile kaynaklanabilmektedir. Bu kaynak telleri konstrüksiyona yönelik köşe kaynaklarında kesme gerilmelerine karşı en yüksek dayanımı sağlamaktadırlar. 5183, 5356, 5556 ve 5654 gibi %3'ün üzerinde Mg içeren alüminyum kaynak tellerinin 66⁰C'ın üzerindeki sıcaklıklarda çalışacak olan uygulamalarda kullanılması gerilmeli korozyona karşı hassas bir yapının oluşmasına neden olacağı için sakıncalıdır.

7075 ya da 7178 gibi yüksek oranda bakır içeren alüminyum alaşımlarında ise ark kaynağı yöntemlerinin kullanılması uygun değildir. Yüksek oranda Si içeren 4xxx serisi kaynak telleri yüksek oranda magnezyum içeren 5xxx serisi alaşımların kaynağında kullanılmamalıdır. Çünkü kaynak dikişinde oluşan magnezyum-silis katmanları tokluğun düşmesine ve çatlama hassasiyetinin yükselmesine sebep olmaktadır. Yüksek oranda magnezyum içeren bir yapının yüksek oranda bakır içeren bir yapı ile karıştırılması sonucu oluşan alaşımlara ait kaynak bölgesinde de yine çatlama hassasiyeti artışı ve tokluk düşüşü gözlenmektedir.

Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımdan oluşan kaynak dikişine eğer kaynak işleminden sonra ısıtılacaksa, kaynak teli seçimi bazı sınırlamalar getirmektedir. 2219 ve 2014 alaşımlarının kaynağında ısıtılabilir

türdeki 2319 kaynak teli en yüksek dayanımın elde edilmesini sağlar. Genellikle, kaynak telleri ısıtıl işlem gerçekleştirmeye uygun bir kimyasal analize sahip değildir ya da ısıtıl işlem uygulanarak dayanımın artırılmasına düşük hassasiyet göstermektedirler. Örneğin, 12mm'nin altındaki A6061-T6 türü bir parçanın 4043 kaynak teli ile kaynağı sırasında, A6061 alaşımı içinde bulunan magnezyum, kaynak metalinin içerisindeki magnezyum silikat oluşturmaya yetecek ve ısıtıl işleme olumlu cevap verebilecek bir oranda göç eder. Daha kalın kesitli ve ağız açısı daha geniş kaynak dikişleri ile çalışılması durumunda ise magnezyumun kaynağın merkezine doğru yayınması önlenir ve bunun sonucunda da kaynak sonrası uygulanacak olan ısıtıl işleminden daha az, hatta bazen olumsuz bir sonuç alınır. 76mm kalınlığındaki A6061 alaşımının 4643 kaynak teli ile oluşturulan kaynak dikişlerine kaynaktan sonra ısıtıl işlem ve yaşlandırma ısıtıl işlemi uygulandığında 440N/mm^2 kopma dayanımı elde edilir ve bu da A6061-T6 alaşımının dayanımına yakındır. Başlıca nedeni ise 4643 kaynak telinin yeterli miktarda magnezyum içeriyor olmasıdır.

4043 özellikle 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının kaynağı için tasarlanmıştır. Aynı zamanda 3xxx ve 2xxx serisi alüminyum alaşımlarının kaynağında da kullanılmaktadır. 4043'ün ergime sıcaklığı 5356'dan düşük olmakla birlikte akışkanlığı 5356'dan fazladır. Ana metali daha iyi ısıtması ve daha akışkan olmasından dolayı ve 6xxx serisi ana malzemelerde kaynak çatlağı oluşturma hassasiyetinin 5356'ya oranla daha düşük olmasından dolayı 4043 tercih edilmektedir. 4043 magnezyum içermediği için yüzeyinde daha az is lekesi ve dolayısıyla daha parlak görünümlü MIG kaynağı dikişlerinin elde edilmesine olanak sağlar. 4043 ile elde edilen kaynak dikişinin nüfuziyeti 5356 ile elde edilenden daha fazladır. Ancak kaynak dikişinin sünekliği 5356'dan daha düşüktür. 4043 kaynak teli Al-Mg serisi alüminyum alaşımların kaynağına pek elverişli değildir. A5083, A5086 ya da A5456 gibi yüksek oranda magnezyum (Mg) içeren alüminyum alaşımların kaynağında kullanılmamalıdır. Bunun temel nedeni kaynak dikişinin metalurjik yapısında oluşan ve sünekliği azaltarak çatlama hassasiyetini yükselten yoğun miktardaki magnezyum silikat (Mg_2Si) oluşumudur.

5356 kaynak telleri sahip oldukları yüksek oranda dayanım özellikleri ve MIG kaynağı sırasında tel besleme yeteneklerinin iyi olması nedeni ile bütün alüminyum

dolgu malzemeleri içerisinde en sık kullanılan kaynak teli olmuştur. Bunlar 5xxx serisi yapısal alüminyum alaşımlarının ve 6xxx serisi ekstrüzyon yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımlarının kaynağında kullanılmak üzere üretilmiştir. Genelde döküm yöntemi ile üretilen alüminyum alaşımları dışında tüm alüminyum alaşım kaynağında kullanılmaktadır. Döküm alaşımlarında kullanılmamasının asıl nedeni döküm yolu ile üretilen alüminyum alaşımlardaki silisyum (Si) içeriğidir. 5356 için belirtilen bu genel kuralın dışında tek sınırlama, 5356'nın 60°C'yi geçen çalışma sıcaklıkları için uygun olmamasıdır. Çünkü yüksek sıcaklıklarda tane sınırlarında Al_2Mg oluşması, alaşımı gerilmeli korozyona karşı zayıf hale getirir. Kaynaktan sonra anotlama işlemi uygulanacak parçalarda, eğer kaynak işlemi 4043 ile yapılmışsa, en üst pasonun (kapak pasosunun) 5356 ile yapılması önerilir. Böylece 5356 kaynak dikişinin yüzeyinde anotlama işlemi sırasında koyu siyaha dönüşerek parça ile mükemmel renk uyumu sağlayacaktır.

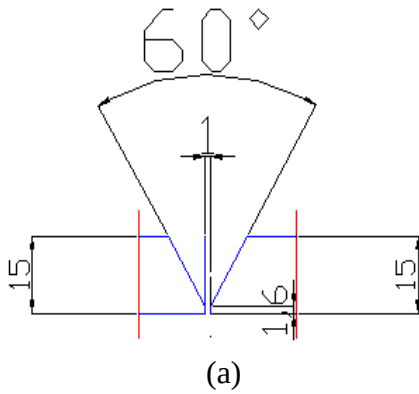
2.3.4.5 Alüminyum kaynaklamada renk uyumu

Ana metal ile kaynak metali arasındaki renk uyumu özellikle mimari uygulamalarda kullanılan ve son olarak parça geneline kimyasal ya da elektrokimyasal bir işlem uygulanan kaynak bağlantılarında istenilen bir özelliktir. Elde edilen son renk, dolgu metalinin alaşımına ve ana metalde bulunan elementlerin kaynak dikişi içinde ne oranda olduğuna bağlıdır. Bu konuyu en çok etkileyen elementler silisyum (Si) ve krom (Cr)'dur. Silisyum miktarının yükseltilmesi ile renk griden beyaza doğru değişir. Al-Si dolgu malzemeleri ile gerçekleştirilen kaynak dikişleri, Al-Si kaplı malzemeler ya da Al-Si döküm alaşımları dışında kalan bütün ana metaller üzerinde keskin bir renk kontrastı oluşturur. Krom elementi anotlama işlemi sonrasında, rengin sarıya ya da altın rengine dönmesine neden olur. Bu nedenle ana metaldekine yakın oranda krom içeren 5xxx serisi dolgu malzemeleri sık tercih edilen dolgu metalleridir. Alüminyum alaşımında bulunan bakır (Cu) ve mangan (Mn) ise dikiş renginde hafif bir kararmaya neden olmaktadır. 1188 kaynak telleri ile gerçekleştirilen kaynak dikişleri, 1xxx serisi ve hatta 3003, 5005 ve 5050 alaşımlarında iyi bir renk uyumu sağlamaktadır. 5356 kaynak teli 5xxx ve 6xxx serisi için renk uyumu açısından tercih edilen bir kaynak telidir.

2.3.5 Kaynaklı çekme numunesi ve çekme deneyleri

Tez kapsamında alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerden birinde kullanılacağından, alın kaynaklı alüminyum birleşimin çekme dayanımını ve kopma modunun belirlenmesi gerekmiş ve enine çekme numunesi hazırlanmıştır. Bunun için alın kaynaklı birleşimden enine olarak alınan deney parçasına kopana kadar artan bir çekme yükü sürekli olarak uygulanmaktadır. Kaynaklı çekme deney numunesi, kaynak eksenine deney numunesinin paralel uzunluğunun ortasında kalacak şekilde, kaynaklı birleştirme yerinden alınmaktadır. Kaynak yöntem şartnamesi onayı (PQR) için gereken kaynak parametrelerinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Alüminyum alaşımlı plakalardan 450*170mm boyutlarında iki adet plaka çıkarılmıştır. Bu plakalar önce ortadan ikiye kesilmiş, sonra Şekil 2.16a,b'de verilen boyutlarda küt kök yüzeyli ve altlık pasolu tek V alın kaynağı ağzı açılmış ve MIG kaynak yöntemi ile kaynaklanmıştır. Kaynak ağzı kenarlarının düzgün ve gönyesinde olmasına dikkat edilmiştir. Kalınlığa göre kök derinliği 1.5~6mm kök aralığı 0.8~1.5mm olarak tercih edilmektedir.

Tek taraflı küt kaynak ağzı kalınlığı 10~20mm arasında parçalara uygulanmaktadır. 20mm'den büyük kalınlıklarda kaynaklı çekme numunelerine X, K gibi çift taraflı olarak kaynak ağzı açılması gerekmektedir. Kaynak ağız genişliği en üst yüzeyden 12mm olarak ölçülmüştür (Şekil 2.17).



Şekil 2.16 : (a) Çekme numunelerinin çıkarılacağı plakalara açılan küt alın kaynağı. (b) Kaynak ağzı açılmış A5083-H111 plakası.



Şekil 2.17 : Kaynak ağız genişliğinin en üst yüzeyden ölçülmesi.

Deney numunelerinin kaynak işlemleri 20°C'lik oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan ilave metalin (kaynak telinin) rutubetsiz olmasına özen gösterilmiştir. Koruyucu gazın kaynak havuzu içinde kalması için altlık olarak bakır altlık kullanılmıştır. Plakaların arasına 1mm'lik plaka yerleştirilmiş ve kaynak ağızı açılan yüzeyler birbirine temas edecek şekilde plakalar karşılıklı olarak dikkatlice sabitlenmiştir (Şekil 2.18a). Aynı kalınlıkta uç uca kaynak edilen iki parça aynı hizada olmaması durumunda çentik etkisi oluşmaktadır. Kaynak işleminde deney numuneleri kaynaktan önce yaklaşık 50°C~200°C'de ve Çizelge 2.12'de verilen maksimum süreler dikkate alınarak ön tavlama yapılmış, kaynak işlemine başlanılmıştır (Şekil 2.18b). Bu işlem oksii-asetilen alevi ile yapılabilmektedir. Koruyucu gaz olarak Argon gazı kullanılmıştır.



(a)



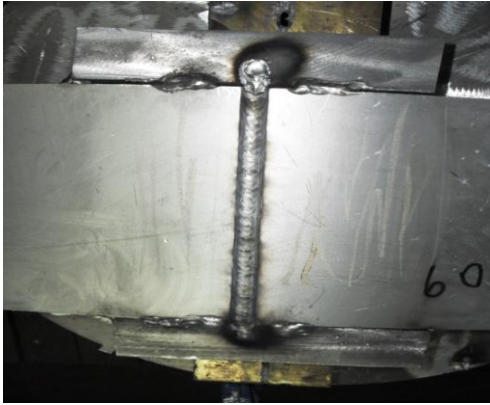
(b)

Şekil 2.18 : (a) Kaynak ağızı açılmış plakaların karşılıklı yüzeylerinin sabitlenmesi. (b) Ön ısıtma işlemi.

5183 kaynak teli “Lincoln Electric” marka kaynak teli olup, çapı 1.2mm’dir. Yeterli ısıya ulaşmamış bir kaynak telinin kaynak metalinde gözeneklere yol açmasını önlemek için ark parçalardan yaklaşık 25mm mesafeden başlatılmıştır ve hızla malzeme üzerine getirilmiştir. Parçalara soğumadan ardı ardına 4 paso kaynak işlemi uygulanmıştır (Şekil 2.19a). Her pasodan sonra kaynak ağızları tel fırça ile temizlenmiştir (Şekil 2.19b).

Cüruf kalıntıları çatlamalara ve kaynak hatalarına neden olmaktadır. Kaynaktan sonra oluşan oksit tabakasının tel fırça ile kazınarak temizlenmesi kaynağın dayanımı açısından çok önemlidir. 1 kök paso atılmıştır. Pasolar arasında ve yüzeyde cüruf kalıntısı kalıp kalmadığını anlamak için %5 gümüş nitrat eriyiği sürülerek kontrol edilir. Cüruf kalması durumunda köpürerek kendini belli eder.

Tek taraflı kök pasolu V kaynak dikişi çekilirken kaynak hacmi küçük tutulur. Hareket genişliği elektrod çapının iki katını geçmemelidir. Bir üst pasoda kapalı üçgen elektrod hareketi ile uygulanmıştır. Her pasoda elektroda bir önceki pasodan daha geniş salınım hareketi verilmiştir. Kaynak bölgesi, kaynak metalinden ana metale doğru 4 ayrı bölgeden oluşmaktadır. Sırasıyla; kaynak merkezi, ITAB, geçiş bölgesi ve ana metal.



(a)



(b)

Şekil 2.19 : (a) Kaynak pasosu. (b) Her pasodan sonra kaynak ağızının çelik tel ile temizlenmesi.

Kaynak sonrası oluşan dikiş yüksekliği, dikişlerin üzerindeki tırtıllarda, yanma olukları, sıçramalar ve kaynak dikiş kök sarkmasının yanı sıra dikiş genişliği, kökte oluşabilen yetersiz ergime bölgeleri görsel olarak detaylı incelenmiş, sıçrayan metal

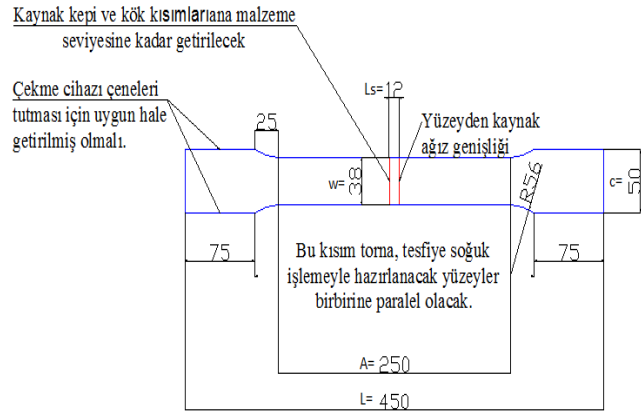
damlacıkların ve diğer özelliklerin kabul sınırları içerisinde olduğu görülmüştür. Plakadan çekme numunleri bu hataların olmadığı yerlerden alınmıştır.

Kaynak işlemi biten deney parçaları havaya soğumaya bırakılmıştır (Şekil 2.20a). Soğuyan parçalar zımparalandıktan sonra Al_2O_3 pasta kullanılarak parlatılmıştır. Kaynak kalitesini belirlemek için yapılan röntgen muayeneleri sonucunda A5083-H111'in kaynağında herhangi bir kaynak hatası bulunmamasına karşın, A6061-T6'nın kaynak sonrasında yapılan röntgen muayenesinde bünyesinde gözeneklerin olduğu görülmüştür. BÖÇ'lerin imalatlarında kullanılan alına köşe kaynaklı birleşimlerde röntgen muayenesi yerine ultrasonic ölçümlerle kaynak kalitesi kontrol edilmiştir.

Kullanılan TR problemleri (veri-alıcı) ile kaynak dikişine yaklaşıldıkça nüfuziyet azlığı daha kısa süreklilikte ekolar halinde alınmıştır. Hatasız noktalarda ses dalgası alt plakaya geçerken kaybolmuştur. Kaynaklı çekme numuneleri AWS D1.2/D1.2M'ye göre Çizelge 2.15'de verilen biçim ve boyutlara uygun olacak şekilde hazırlanmıştır (Şekil 2.20b). Kaynağın başlangıç ve bitiminde oluşabilecek hataların engellenmesi için kaynaklı levhaların başlangıç ve bitiminden 25mm'lik kısımları kesilerek atılmıştır (ıskarta).



(a)



(b)

Şekil 2.20 : (a) Kaynak işlemi sonrası plakalar. (b) AWS D1.2/D1.2M'ye göre kaynaklı çekme numunesi boyutları.

Deney numunesinin kalınlığı, A paralel uzunluk boyunca sabit olmalıdır. L_s makine işleminden sonra kaynağın en büyük genişliği olduğuna göre A paralel uzunluk alüminyum gibi bazı metallerde

$$A > L_s + 60 \quad \text{Çelik}$$

$$A > L_s + 100 \quad \text{Alüminyum, Bakır v.s. için}$$

olmalıdır. Çizelge 2.15’de AWS D1.2/D1.2M’ye göre kaynaklı çekme numunesi boyutları verilmektedir.

Çizelge 2.15 : AWS D1.2/D1.2M’ye göre kaynaklı çekme numunesi boyutları.

Kısa Gösteriliş	$T_p \leq 25mm$	
	Semboller	Boyutlar (mm)
Toplam uzunluk	L	Test makinasına uygun şekilde
Kaynağın en büyük genişliği	L_s	12
Baş kısmı tutma uçları genişliği	c	51
Paralel uzunluğun genişliği	w	38 ± 0.25
Paralel uzunluk	A	$>L_s+100$
Baş kısmı kavis yarıçapı	r	>25
Numunenin kalınlığı	$t=T_p$	-

Deney numune yüzeyleri bütün fazla kaynak metali giderilerek talaş kaldırma işlemine tabi tutulmalıdır. Deney numunesinin kenarı kaynak kırılma yerinin tayinine yardımcı olmak için gerektiğinde makro-dağlanmalıdır. Çift V alın kaynağında maksimum kaynak kepi (taşma miktarı) Çizelge 2.16’da verilmektedir (AWS D1.2/D1.2M).

Çizelge 2.16 : AWS D1.2/D1.2M’ye göre çift V alın kaynağında maksimum kepi.

Kalınlık, t (mm)	Maksimum kaynak kepi, R (mm)
$t \leq 9.5$	2.4
$9.5 < t \leq 19$	3
$t > 19$	5

Tek V alın kaynağı için maksimum kaynak kepi Çizelge 2.17’de verilmektedir (AWS D1.2/D1.2M).

Çizelge 2.17 : AWS D1.2/D1.2M'ye göre tek V alın kaynağında maksimum kepi.

Kalınlık, t (mm)	Maksimum kaynak kepi, R (mm)
$t \leq 6.4$	2.4
$6.4 < t \leq 12.7$	3
$12.7 < t \leq 25.4$	4
$t > 25.4$	5

AWS D1.2/D1.2M'ye göre A5083-H111'in 102mm'ye kadar minimum kaynaklı çekme dayanımı 262MPa, A6061-T6'nın ise 76.2mm'ye kadar 166MPa'dır. Kaynaklı deney numuneleri plakalardan çıkarılırken hiçbir ısıtma işlemi uygulanmamalıdır. Deney numunesini çıkarmak için kullanılan mekanik ya da ısıtma işlemleri deney numunesinin özelliklerini hiçbir şekilde değiştirmemelidir. Kaynaklı birleşimden deney numunesini çıkarmak için eğer ısıtma kesme ve diğer kesme yöntemleri uygulanacaksa, kesimlerin deney numunesi paralel uzunluk yüzeylerinden 8mm ya da daha uzaktan yapılması gerekmektedir. Isıtma kesme işlemi kaynaklı plaka ya da deney parçasının özgün yüzeyine paralel olmalıdır. Alüminyumda makaslama ve ısıtma kesmeye izin verilmez, yalnızca testere ya da freze ile kesim yapılmalıdır (TS-EN ISO 4136). Kaynaklı plakalar freze ile plakalardan çıkartılarak toplamda 4 adet kaynaklı çekme numunesi hazırlanmıştır. Laboratuvarında yapılan çekme deneyleri sonucu A5083-H111 ve A6061-T6 için kaynak çekme dayanımları elde edilmiştir. Numuneler kaynak bölgelerinden kopmuştur (Şekil 2.21a,b).



(a)



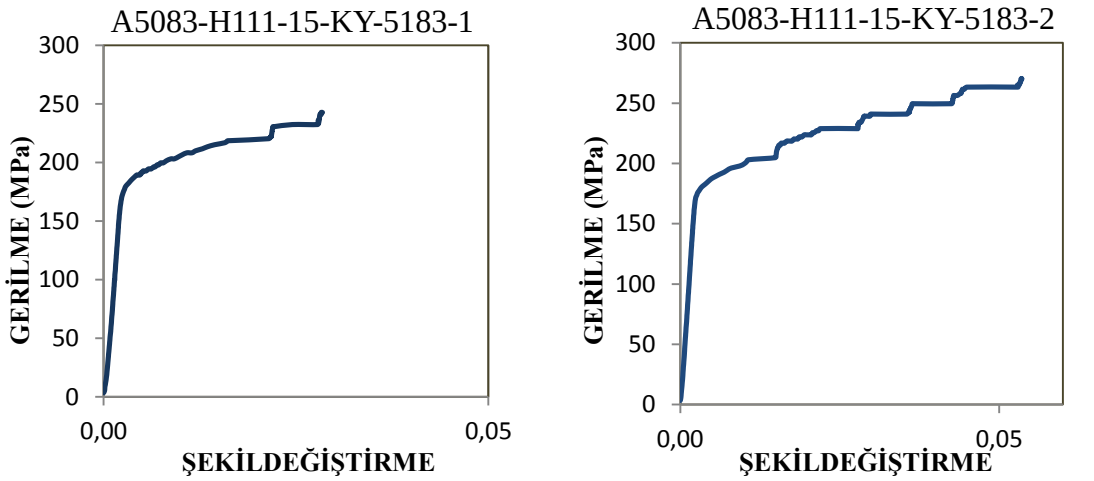
(b)

Şekil 2.21 : A5083-H111 (a) ve A6061-T6 (b) kaynaklı çekme numunelerinin deney sonrası kopma şekilleri.

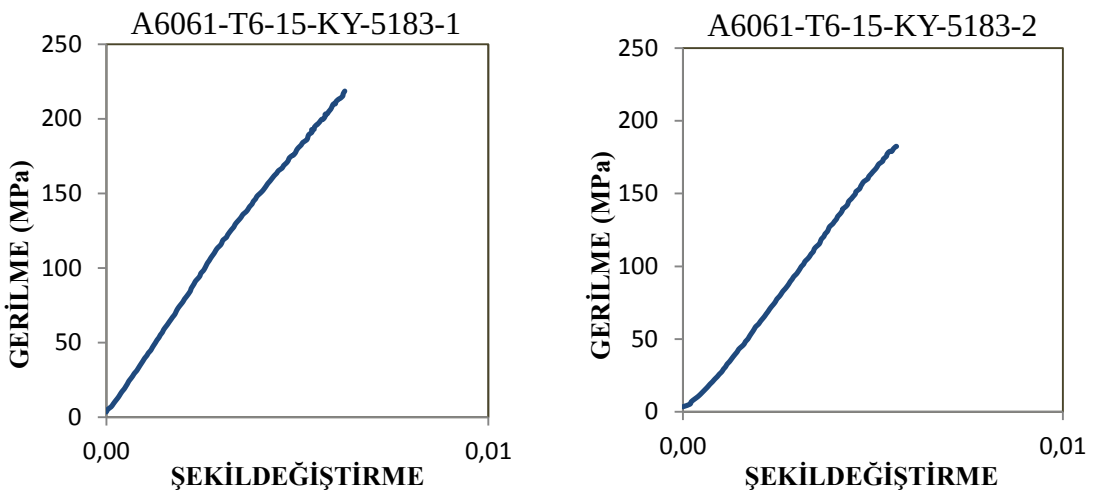
A5083-H111 kaynaklı çekme numunesi kaynak röntgen kontrollerinden geçmiştir. Çekme deneyinde ısıtılma işlemi uygun olmayan ve sıcak çatlama riskine karşı hassas olan A5083-H111 alaşımı için kaynak nüfuziyetini arttıran 5183 alüminyum kaynak teli kullanılmış ve yeterli dayanımı sağladığı görülmüştür. Kullanılan kaynak teli ana metal ile aynı kimyasal analize sahip bir kaynak telidir. Soğuk deformasyon uygulanarak dayanımı artırılmış A5083-H111 alüminyumunu kaynak yapılırken kaynak dikişinin etrafındaki bölgeye lokal olarak yaşlandırma işlemi uygulanmış ve malzeme 0-temperleme (yaşlandırma) haline dönmüştür. Bu hal durumunda esas metalin dayanımına yakın kaynaklama dayanımı elde edilebilmektedir.

A6061-T6'nın yapılan röntgen kontrolleri sonrasında kaynakta bulunan boşlukların nedenleri hakkında araştırma yapılmıştır. Öncelikle, her pasodan sonra curuf temizliğinin iyi yapılamadığı ve 1.2mm çapındaki 5183 kaynak telinin A6061-T6 için yeterli kaynaklanma dayanımı sağlamadığı düşünülmektedir. Yaşlandırma serleştirmesi yapılmış alüminyum alaşımlarının kaynağında çatlak ve boşluk oluşumuna sık rastlanmaktadır. Bu alüminyum alaşımların kaynağında genellikle ana metalden daha düşük ergime sıcaklığına sahip ve dayanımları ana metalle aynı ya da daha düşük olan bir kaynak telinin (%50 oranında 4043 ya da % 70 oranında 5356 kaynak teli gibi) kullanılması önerilmektedir. Böylece ana metalin kaynak dikişine yakın bölgede düşük erime sıcaklığına sahip çökeltiler içermesine izin verilmesi ile kaynak banyosunun katılma hızı artarken soğuma sırasında ana metalde oluşan gerilmeler ve tanelerarası çatlak oluşumu azalmaktadır. 6xxx serisi alaşımların ana alaşım elementleri magnezyum ve silisyumdur. Mg_2Si (magnezyum silikat) intermetalik bileşikler, çökelti sertleştirilmesi ile dayanım artırılmaktadır. Çökelti sertleşmesi yaratacak elementler çözünerek katı eriyik içinde hapsedilmektedir. Daha sonra su verme işlemi ile çözeltide kalan çözünen elementler oda sıcaklığında yavaşça çökelmeye başlar. Buna doğal yaşlandırma adı verilmektedir. Suni yaşlandırma ise alaşımın 100-200°C gibi sıcaklıklarda tutulması ve yaşlandırmanın hızlandırılmasıdır. Yaşlandırma sıcaklığında süre arttıkça çökelti yapısı yavaş oluşmakta sertlik artmaktadır. Yaşlandırmaya devam edildiğinde sertlik azalır ve aşırı yaşlanma durumu orta çıkmaktadır. Kaynak merkezine yakın noktalarda kaynak öncesi dayanımının önemli bir bölümünü yeniden kazanılabilmektedir. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça fazlalaşan aşırı yaşlanma bölgeleri ana metal/kaynak

metalinden daha zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Kaynak dikişinden sonra metale ısıtıl işlem uygulanmazsa kaynak dikişine yakın bölgelerin dayanımı ana metalin dayanımına göre %30~40 daha düşük olmaktadır. Bu nedenle A6061-T6 kaynaklı çekme numunesinin kaynak dayanımlı yeterli görülmeyerek bu seriden üretilen BÖÇ için ayrıca alternatif bulonlu uç bağlantısı tasarımı geliştirilmiştir. Böyle bir tasarım, farklı bir uç bağlantısının da denenmesine olanak sağladığından ayrıca tercih edilmiştir. Şekil 2.22’de A5083-H111 kaynaklı çekme numunesinin çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri verilmektedir. Şekil 2.23’de A6061-T6 kaynaklı çekme numunesinin çekme deneyi sonucu elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri verilmektedir.

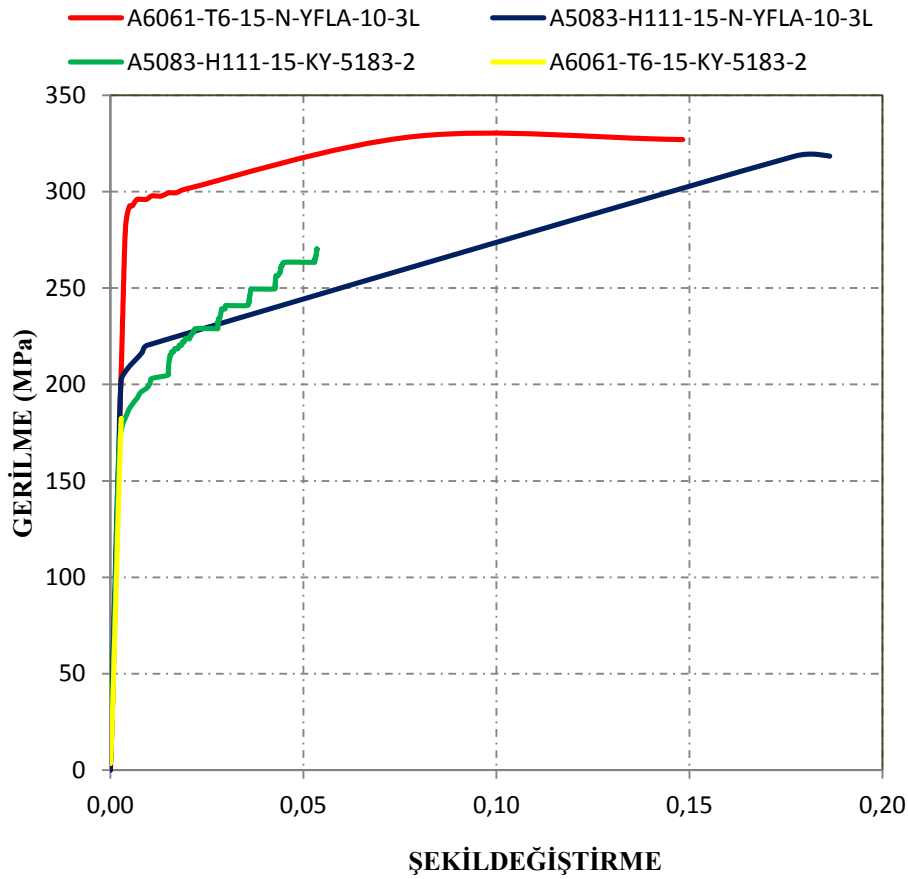


Şekil 2.22 : A5083-H111 kaynaklı çekme numunesi gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



Şekil 2.23 : A6061-T6 kaynaklı çekme numunesi gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

Ana metale ilişkin alüminyum alaşımlı çekme numunelerinin koptuğu bölge daralan ölçü uzunluğunun tam orta noktasıdır. A5083-H111 kaynaklı alüminyum çekme numunelerinde kopma yeniden kristalleşen kaynak metalinin akma ve çekme dayanım değerleri termo-dinamik olarak etkilenen, kaynaklı bağlantının en zayıf ve hassas bölgesi olan ITAB'dan başlayarak kaynak dikişinin hemen yanında olduğu saptanmıştır. En yüksek çekme dayanımı ana malzemede elde edilmiştir. A6061-T6 kaynaklı çekme numuneleri kaynak noktasından kopmuştur. Şekil 2.24'de esas metallerin ve kaynaklı çekme numunelerinin karşılaştırmalı eğrileri verilmektedir. Kaynaklı çekme numunelerinin kopma uzamaları ana metallerin kopma uzamalarının çok altında kalmıştır. Kaynak bölgesindeki sertliğin azalması sonucu çekme numuneleri kaynak bölgesinden kopmuştur. A5083-H111'in kaynak bölgesinde göstermiş olduğu az miktardaki sertlik artışı sonucu malzeme ana metale göre elastik bölge sınırında daha fazla kalmış ve sünek davranışa katkısı azalmıştır.



Şekil 2.24 : Esas metal ve kaynaklı çekme numunelerinin karşılaştırmalı eğrileri.

Kaynaklı bağlantının ITAB bölgesinde dayanım arttırıcı partiküllerin malzeme içinde daha kaba şekilde çökmesi ile bağlantının çekme dayanımı düşmektedir. A5083-H111'in kaynaklı deney numunesinin kök kısmında gözle görülür bir çatlama görülmemiştir. Bu seriden hazırlanan iki adet çekme numunesinin kaynak alanında göstermiş olduğu sertlik düşüşü birbirine yakın çıkmıştır. Bütün kaynaklı çekme numunelerinde ana metalden kaynak metaline doğru gidişte sertlik değerinde azalma görülmektedir. 5xxx serisi soğuk haddelenmiş Al-alaşımlarının kaynak esnasındaki ısı girdisi nedeniyle bu sertlik düşüşü normaldir. Kaynaklı çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynak hesapları, güvenlik katsayısı 2 alınarak revize edilmiştir.

Elde edilen sonuçları doğrulamak amacıyla, ek olarak Türk Loydu gözetiminde hazırlanan kaynak planlarına göre Tungsten ark kaynak yöntemi için kaynaklı alüminyum alaşımlı numuneler üretilmiştir. Kaynak planlarında imalatın bağlantı detayları, kaynak yükseklikleri ve tipleri belirlenerek, "*Kaynak Yöntem Şartnameleri*" (WPS) oluşturulmuştur. Böylece kaynak sırasında ve sonrasında oluşabilecek çarpımalara karşı ters eğimin verilmesi, "Ters Adım Yöntemi" gibi kaynak sıralama detayları ön hazırlık aşamasında belirlenmiş olmaktadır.

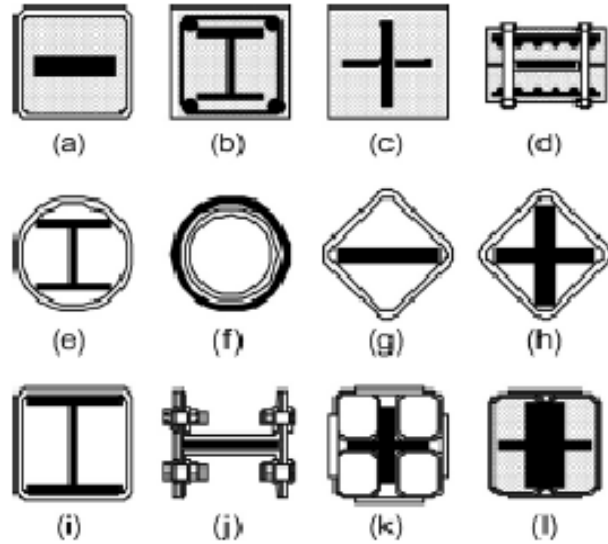
Alüminyum kaynaklı üretimler öncesi çelik numuneler için Çimtaş A.Ş.'ye, alüminyum alaşımlı numuneler için Türk Loydu'na alın ve köşe kaynakları için ayrı ayrı "*Kaynak Yöntem Şartnamesi Onayı*" (PQR) hazırlatılmıştır. Alüminyum kaynak üretiminde kullanılacak kaynakçılar sertifikalandırılmıştır.

Sonuçta üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynak yönteminde Tungsten ark kaynağının (TIG) kullanılmasına karar verilmiştir. Çelik kaynaklı üretimin WPS ve PQR'ları Ek D1'de, alüminyum kaynaklı üretimin WPS'leri Ek D2'de verilmektedir. Ek D3'de ise alüminyum alaşımların radyografik kontrol raporu verilmektedir. 5183 alüminyum kaynak teline ilişkin sertifika Ek D4'de verilmektedir.

2.4 Sürtünmesiz Yüzey Malzemesi

Çekirdek eleman akarak eksenel şekildeğiştirdiğinde yanal yerdeğiştirmesi dış tüp+dolgu malzemesi tarafından tutulurken, iki eleman arasındaki sürtünmesiz yüzey de eksenel kuvvetin dış tüpe aktarılmasını engellemektedir.

Literatürde sürtünmesiz yüzey elemanı olarak kullanılan malzemeler çoğunlukla epoksi/silikon reçinesi, bütül kauçuk şeritler (1.5mm), silikon kauçuk şeritler (2mm), polietilen şeritler (0.15mm~0.2mm), silikon yağ, vinil mastik bant, politetraflouretilen levha (TEFLON), lateks, strafor, kraft bantlar ve bunların birleşik kullanımlarından oluşabilmektedir. Örneğin, Wakabayashi ve diğ. (1973) deneysel çalışmalarında epoksi reçinesinin üzerine bir tabaka halinde silikon reçinesi uygulayarak sürtünmesiz yüzey oluşturmuşlardır. Sürtünmesiz yüzey malzemesi tabakasının kalınlığı yapılmış önceki uygulamalarda 0.15~5mm arasında değişmektedir (Xie, 2005). Çeşitli BÖÇ enkesit biçimleri Şekil 2.25’de verilmiştir. Çekirdek eleman ve dış tüp arasındaki sürtünmesiz yüzeyin eksenel yük aktarımının önlenmesini sağlayacak şekilde oluşturulması koşuluyla her türlü çelik profil kullanılabilmektedir.



Şekil 2.25 : Çeşitli BÖÇ enkesit biçimleri (Xie, 2005).

Şekil 2.25a'daki gibi klasik bir BÖÇ çekirdek enkesiti için sürtünmesiz yüzey boşluğu her kenarda $3mm$ 'dir. Şekil 2.25c haç şeklindeki çelik çekirdek, çelik liflerle güçlendirilmiş beton içine yerleştirilmiş olup Japonya'da uygulamada en çok tercih edilen enkesit biçimidir. Şekil 2.27d plaka şeklindeki çelik çekirdek bulonla birleştirilmiş iki beton panel arasına yerleştirilmiştir. Şekil 2.25e'den Şekil 2.25k'ya kadar olan enkesit biçimlerindeki çelik çekirdekler yalnızca çelik enkesitli dış tüp ile sınırlandırılmış olup dolgu malzemesi kullanılmamıştır. Şekil 2.25e'de geniş başlıklı çelik çekirdeğin burkulması çelik dış tüp ile önlenmektedir. Şekil 2.25f'de iki daire enkesitli tüplerden içte olan burkulmaya karşı dayanımı sağlarken dıştaki tüp eksenel kuvveti aktarmaktadır. Şekil 2.25j'de burkulmayı önleyen sistem, 2U profili ve iki plakanın yüksek dayanımlı bulonlarla birleştirilmesiyle oluşturulmuştur. Şekil 2.25k'da plakalarla birleştirilmiş 4 adet kare enkesitli dış tüp, çift T profilden oluşmuş çelik çekirdeğin burkulmasını önlemektedir. Şekil 2.25e'den Şekil 2.27i'ye kadar olan enkesit biçimlerinde dolgu malzemesi olmadığından sürtünmesiz yüzey malzemesi de kullanılmamıştır.

Çelik çekirdek ile dış tüp arasında her iki elemanın görelî şekildeğiştirmeleri için gerekli açıklığı sağlamak ve çekirdeğin burkulmasını önlemek için, kullanılacak çelik çekirdek elemanın şekline ve sürtünmesiz yüzey mekanizmasına bağlı olarak, $0.7mm \sim 3.5mm$ arasında değişen bir boşluk bırakılmaktadır (Xie, 2005).

Palazzo ve diğ. (2009) çalışmalarında burkulmayı önleyen ortam ile çekirdek arasındaki kayma gerilme transferini engellemek için uygun bir sürtünmesiz yüzey olarak çekirdek etrafına önce 3 kat Teflon, sonra yağlama yapılmasını ve en son kauçuk ile sarılmasını önermişlerdir. Burada kauçuğun amacı çekirdeğin burkulmayı önleyen ortam içinde serbestçe kaymasını sağlamak ve Poisson etkisinden dolayı basınçta akarak enine genişlemesine izin vermektir. Çalışmada kullanılan kauçuk kalınlığının BÖÇ tasarımı için çok önemli bir ayrıntı olduğu belirtilmiştir; kauçuğun gereğinden ince kullanılması durumunda çekirdek enine genişlemez. Aksine, gereğinden kalın kullanılırsa yerel burkulma oluşu artarak çaprazın yorulma ömrünü kısaltmaktadır. Palazzo ve diğ. (2009) $1.7mm$ kalınlığında kauçuk bantlar kullanılmıştır.

Tez kapsamında sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak kullanılacak olan malzemenin belirlenmesi bir uzmanlık alanı olduğundan bu konuda Marmara Ünv. Teknik Eğitim Fakültesi Polimer Eğitimi Bölümü'nün teknik danışmanlığına başvurulmuştur (kişisel görüşme, 2009).

Öneriler doğrultusunda kullanılabilecek sürtünmesiz yüzey malzemesi örnekleri Şekil 2.28'de verilmektedir. Silikon kauçuk ve EPDM kauçuk sünger Şekil 2.26a'da, polietilen bantlar Şekil 2.26b'de verilmektedir. Sonuçta düşük sürtünme katsayısı ve yüksek aşınma direncine sahip bir malzeme olan ve kendiliğinden metal yüzeyine yapışan TEFLON bantlar, kauçuklu gres yağ ve bazı numunelerde hava kabarcıklı naylon kullanılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 2.26 : (a)Yapışkan bantlı silikon kauçuk ve EPDM kauçuk sünger levhalar.
(b)Kendinden yapışkanlı polietilen bantlar.

Teflon, polytetrafluoroethylene (PTFE) polimerin ticârî adıdır. Saf teflon etch edilerek özel bir yapışkan (kauçuk/ silikon) ile yapıştırılabilir hale getirilmekte ve metal malzemenin yüzeyine yapıştırılabilmektedir. Etch edilmiş teflon filmin etch edilmiş yüzeyi homojen kahverengi renklidir. Teflonun aşınmaya ve yük altında deformasyona karşı direncini artırmak, termal genleşme ve katsayısını düşürmek, termal elektriksel iletkenlik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli dolgu malzemelerinin gereksimine göre eklenerek elde edildiği alaşımlı etch edilmiş teflon filmler bulunmaktadır. Bronzlu, cam elyafı ve karbonlu teflon bunlara örnektir.

Teflonun statik ve dinamik sürtünme katsayısı 0.04 , çekme dayanımı $21\sim35MPa$, eğilme modülü $500MPa$, aşınma direnci $85g/\mu m$ 'dir. Kauçuklu gres yağ korozyon dayanımından dolayı tercih edilmiştir.

2.5 Dolgu Malzemesi

Deneysel bölümde dolgu malzemesi olarak *KÖSTER@VGM5* çimento esaslı, yüksek dayanımlı, normal priz alan, rötresiz-büzüşmeyen, dökülebilir akıcı kıvamda yüksek dayanımlı tamir harcı (grout) kullanılmıştır (Şekil 2.27). Yoğunluğu $2.26g/cm^3$ 'tür. 28 günlük belirlenen basınç dayanımı $50MPa$ olan dolgu malzemesi tek bileşenlidir ve yalnızca su ile karıştırılarak üretilmektedir. Çelik, alüminyum gibi metal yüzeylere yüksek aderans sağlayan dolgu malzemesi, metalik agrega, klor ve elyaf içermemektedir.



Şekil 2.27 : (a) KÖSTER-VGM5. (b) Dolgu malzemesin hazırlanması.

Alınan örneklerden 3'ü 7. günde, diğer 3'ü 28. günde kırılmıştır. Ön hazırlık aşamasında 25kg VGM5 dolgu malzemesinin numunelere yerleştirilmesi sırasında 150mm*150mm küp kalıplara 6 adet numune alınarak kirece doygun suda küre bırakılmıştır. 7 ve 28 günlük ortalama karakteristik basınç dayanımı kontrol edilmiştir. Dolgu malzemesinin tamamı *KÖSTER* tarafından karşılanarak hazır hale getirilmiştir. VGM5, 3.975 litre su ile karıştırılarak harç oluşturulmuştur. Kalıplara yerleştirilen harç yaklaşık ilk 22 dakika içinde ön prizini almış ve 5 saat içinde donmuştur. Deney gününe kadar $23\pm20^{\circ}C$ sıcaklıkta, kirece doygun su içinde küre bırakılmıştır. Harcın dayanım raporuna göre 7 günlük basınç dayanımı ortalama

52.34MPa, 28 günlük basınç dayanımı ortalama 64.06MPa olarak bulunmuştur. Elastisite modülü 36.98GPa, 28 günlük eēilme dayanımı 8MPa, Poisson oranı $\nu=0.35$, çalışma sıcaklıēı +5~ +30⁰C'dir. Basınç dayanım raporu Ek E'de verilmiştir.

3. BÖÇ NUMUNELERİNİN TASARIMI, ÜRETİMİ VE DENENMESİ

3.1 Numunelerin Tasarımı

Deneylerde yükleme kapasitesi 250kN olan MTS hidrolik veren kullanılmış olup numuneler hidrolik verenin kapasitesini aşmayacak şekilde, 2.0 güvenlik katsayısı ile tasarlanmıştır. Numunelerin boyutlandırılmasında AISC 341-10 (2010) ve AISC-LRFD (2010) yönetmelikleri esas alınmıştır. Literatürde sıkça kullanılan kare tüp enkesit biçimli BÖÇ'lerin tercih edilmesi parametre sayısını azaltmaktadır. Ayrıca BÖÇ'lü çerçevelerden etkin davranış elde edebilmek için diyagonal çaprazlama kullanılmıştır.

Numuneler P_{ysc} eksenel akma dayanımları ve L çapraz toplam uzunlukları aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Böyle bir seçim numunelerin enerji yutma kapasitelerini karşılaştırırken kolaylık sağlamıştır. L_{w-w} çapraz sistem uzunluğu 3339mm'dir. Tüm numunelerin çekirdek akma bölgesi dikdörtgen enkesitlidir. Çekirdeğin tutulmayan uzunluğunda yerel burkulmaların oluşmaması için güçlendirme bölgesi haç enkesitli olarak tasarlanmıştır (Iwata ve diğ., 2000). Konu ile ilgili önceki çalışmalarda tasarıma başlarken, diyagonal çaprazın bulonlu birleşimlerinde önerilen maksimum akma bölgesi uzunluğu sistem uzunluğunun %65'i (Lopez ve Sabelli, 2004a, 2004b), mafsallı birleşimlerde önerilen akma bölgesi uzunluğu çaprazın birleşim bölgesi dışında kalan kısmının %73'ü olarak alınabileceği belirtilmektedir (Vargas ve Bruneau, 2006). Bu çalışmada aynı L boyundaki çaprazlar için maksimum akma bölgesi uzunluğu $L_{ysc} \leq 1410mm$ ($\%67 \cdot L_1$) olarak alınmıştır. Çizelge 3.1'de numunelerin çekirdek elemanlarının geometrik bilgileri, Çizelge 3.2'de dış tüp geometrik bilgileri verilmektedir.

Çizelge 3.1 : Numunelerin çekirdek elemanı geometrik özellikleri.

Numuneler	Toplam Çapraz Uzunluğu L (mm)	Burkulma Boyu (Mafsaldan Mafsala) $KL=L_1$ (mm)	Çekirdek Elemanı		
			Enkesit Boyutları $t \times b_{yc}$ (mm)	Malzeme Kalitesi	Elastisite Modülü E (GPa)
BRB-AC1	2275	2110	PL-15 x 35	A5083-H111	73
BRB-AC2	2275	1991	PL-15 x 40	A5083-H111	73
BRB-SC1	2275	2110	PL-16 x 30	S235JR (Fe360)	195
BRB-SC2	2275	2110	PL-12 x 25	S355JR (Fe510)	204

Çizelge 3.1 (devam) : Numunelerin çekirdek elemanı geometrik özellikleri.

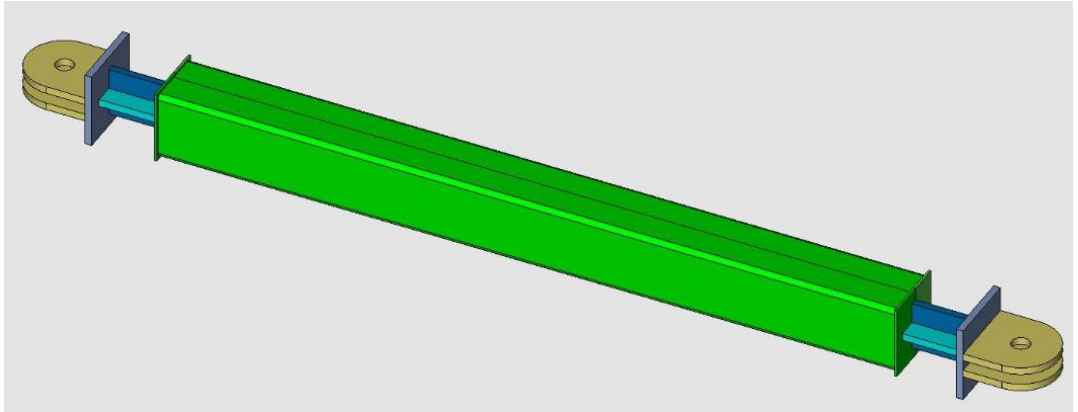
Numuneler	Çekirdek Elemanı												
	Birleşim Bölgesi (Mafsallı)					Birleşim Bölgesi (Bulonlu)		Güçlendirme Bölgesi		Akma Bölgesi			Net Enkesit Alanı A_{sc} (mm ²)
	Alın Plakası Kalınlığı t_{ep} (mm)	Mafsalsal Plakası Uzunluğu L_{kp} (mm)	Mafsalsal Plakası Kenar Uzunluğu $b_{con}/2$ (mm)	Birleşim Bölgesi Uzunluğu L_{con} (mm)	Birleşim Bölgesi Genişliği b_{con} (mm)	Birleşim Bölgesi Uzunluğu L_{con} (mm)	b_{con} (mm)	L_{tr} (mm)	b_{tr} (mm)	L_{ysc} (mm)	b_{ysc} (mm)	t (mm)	
BRB-AC1	15	86	83	184	165	-	-	315	115	1278	35	15	525
BRB-AC2	-	-	-	-	-	140	137	258	115	1195	40	15	600
BRB-SC1	16	86	83	185	165	-	-	249	100	1410	30	16	480
BRB-SC2	15	86	83	184	165	-	-	264	98	1380	25	12	300

Çizelge 3.2 : Numunelerin dış tüp geometrik özellikleri.

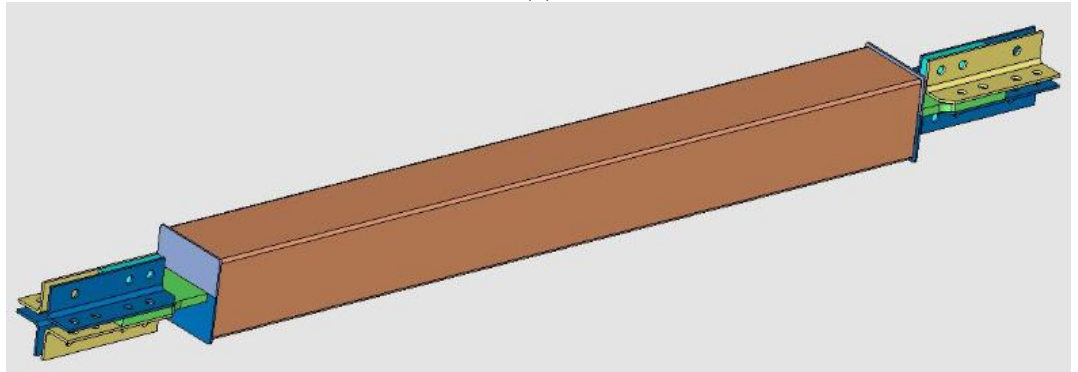
Numuneler	Dış Tüp							Güvenlik
	Enkesit Boyutları B x D x T (mm)	Malzeme Kalitesi	Deneysel Akma Gerilmesi $F_{ytüp}$ (N/mm ²)	Uzunluk $L_{tüp}$ (mm)	Atalet Momenti $I_{tüp}$ (mm ⁴)	Euler Burkulma Yükü $P_e = \pi^2 EI_{tüp} / (KL)^2$ (KN)	P_e / P_{ysc}	$P_e / P_{ysc} > 1.5$
BRB-AC1	□-150 x 150x 4	6060-T66	200	1670	8305259	1342.7	12.7	✓
BRB-AC2	□-150 x 150x 4	6060-T66	200	1585	8305259	1508.0	14.2	✓
BRB-SC1	□-140 x 140 x 5	S355JR (Fe510)	345	1768	8212500	3546.5	30.9	✓
BRB-SC2	□-140 x 140 x 5	S355JR (Fe510)	345	1738	8212500	3710.2	32.1	✓

BÖÇ'ün burkulma dayanımı malzeme özelliklerinden sonra tahmin edilen etkin burkulma boyu katsayısı K 'ya bağlıdır. Çaprazların burkulma dayanımlarının hesaplanmasında, düzlem dışı ve düzlem içi etkin burkulma boyu katsayıları, uç mesnet şartlarının mafsallı varsayımı ile $K=1$ olarak alınmıştır. KL etkin burkulma boyu için L_1 BÖÇ'lerin mafsal noktaları arasındaki uzunluk (*pin-to-pin*) dikkate alınmıştır. Burkulmayı önleyen ortam (dolgu malzemesi+dış tüp) geometrik olarak eşit atalet momenti oluşacak şekilde tasarlanmıştır.

Tasarlanan numunelerin genel plan ve üç boyutlu görünüşü Şekil 3.1'de verilmektedir. BRB-SC1, BRB-SC2 çelik çekirdekli ve çelik dış tüplü, tek bulon uç birleşimli olarak, BRB-AC1 alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüp olarak Şekil 3.1a'ya göre, BRB-AC2 ise alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüp, çoklu bulon uç birleşimli olarak Şekil 3.1b'ye göre tasarlanmıştır.



(a)



(b)

Şekil 3.1 : (a) BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-AC1'in üç boyutlu genel görünüşü.
(b) BRB-AC2'nin üç boyutlu genel görünüşü.

Karataş ve Çelik (2009, 2011) çelik BÖÇ'lere alternatif farklı uç ve malzeme özelliklerine sahip alüminyum alaşımlı klasik BÖÇ'lerin üretimi, tasarımı, davranışı ve hesap modelleri ile ilgili kapsamlı değerlendirme ve önerilerde bulunmuşlardır. Bu çalışmalarda önerilerek tasarlanan ve üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ çekirdekler, sonrasında Usami ve diğ. (2012) çalışmalarında, dolgu malzemesinin kullanılmadığı, yalnızca A5083-0 ya da A6061-T6 alüminyum alaşımlı çekirdek ve dış tüpten üretilen toplam 18 adet BÖÇ'ün yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak iki metal arasında kendinden yapışkanlı 1mm kalınlığında bütül kauçuk kullanılmıştır. Çalışmada alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler 4 farklı gruba ayrılmıştır. 1. ve 2. grupta A5083-0 alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin berkitme plakalarındaki kaynak kusurlarının çaprazın yorulma dayanımına olan olumsuz etkisi nedeniyle, malzeme ve tasarımı değiştirilmiş, civatalı bağlantıların kullanıldığı 3. ve 4. grup alüminyum alaşımlı BÖÇ üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneylerde, kaynaklı alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin göçme modunun genellikle berkitme plakalarının çekirdeğe kaynaklandığı yerden koparak gerçekleştiği görülmüştür.

Karataş ve Çelik (2011, 2012) alüminyum alaşımlı malzemenin kaynak dayanımı konusunda yapmış oldukları deneysel çalışmalardan elde ettikleri sonuç ve önerileri sunmuşlardır. Tezde A6061-T6 alüminyum alaşımlı malzemesinden üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynak performansı, yapılan kaynaklı çekme deneylerinde yeterli görülmeyerek uç tasarımı ve çekirdek malzemesi değiştirilerek A5083-H111 alüminyum alaşımından BRB-AC2 numunesi üretilmiştir. Klasik BÖÇ tasarımına uygun şekilde dolgu malzemeli, düşük akma dayanımına sahip A5083-H111 alüminyum alaşımından çekirdeği olan, özgün sürtünmesiz yüzey ve iç boşluğu oluşturulmuş, özgün bayrak levhası tasarımı ile deney çerçevesinde birleşimi yapılan BRB-AC2, deney çerçevesine uygulanan yatay yön değiştiren tekrarlı yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. Bu deneysel çalışma burada verilen tipik özellikleri ile bilindiği kadar ilk kez uygulanmaktadır. BRB-AC2 numunesinin performansı şimdiye kadar üretilmiş az sayıdaki alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin davranış performansının çok üstünde sonuçlar vermiştir. Alüminyum alaşımlı yüksek performanslı BÖÇ tasarımı, üretimi, deneysel ve kuramsal olarak davranışın istenilen

dengeli, kararlı histeretik eğrilerin elde edilmesi hedefi ilk kez bu çalışmada gerçekleştirilmiştir.

Alüminyum alaşım kullanılarak yüksek performanslı BÖÇ üretimi son zamanlarda sektöründe dikkatini çeken teknolojik bir gelişme olmuştur. Alüminyum ve alaşımlarının atmosferik ve kimyasal korozyon ajanlarına karşı korunmasına yapısı gereği gerek yoktur. Ayrıca BÖÇ'lerin köprülerde sünek uç elamanı olarak kullanılması durumunda sudaki PH değerinin 4~8 arasında olduğu denize yakın bölgelerde korozyon dayanımı açısından alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kullanımı önem kazanmaktadır (Celik ve Bruneau, 2009). BRB-AC2 numunesine uygulanan sürtünmesiz yüzey malzemelerinin ve oluşturulan özgün iç boşluk detayının, BÖÇ'lerin dayanımını olumsuz yönde etkileyen korozyon probleminde etkin olması beklenmektedir.

3.2 Numunelerin Boyutlandırılması

Numunelerin ön tasarımı için davranışlarının önceden tahmin edilmesi gerekmektedir. Black ve diğ. (2002) BÖÇ'lerin stabiliteleri için üç farklı burkulma modu tanımlanmışlardır. Tümsel burkulma yükü dış tüpün P_e Euler burkulma yüküne eşit alınmaktadır. Çekirdek elemanın elastik olmayan şekil değiştirme yapabilmesi ve gerekli burkulma stabilitesinin sağlanabilmesi için P_{cr} dış tüpün Euler burkulma yükü, $P_{y_{sc}}$ çekirdek elemanın eksenel akma yükünden yeterince büyük olmalıdır. Tasarımı kontrol eden ana koşul bu maddedir.

$$P_{cr} = P_e = \frac{\pi^2 EI_{tüp}}{(KL)^2} \geq P_{y_{sc}} = F_{y_{sc}} A_{sc} \quad (3.1)$$

Burada çekirdek eleman ile dış tüp arasında sürekli bir etkileşimin olduğu, çekirdek elemanın burkulmasının tüm uzunluğu boyunca tutulduğu, malzemenin elastik olduğu varsayılmaktadır. Tekrarlı yükler altında çevrimsel pekleşmenin etkisi dikkate alındığında çaprazın basınçtaki dayanımı ortalama %30 artar, dayanım faktörü $\phi=0.85$ alınırsa

$$\frac{P_e}{P_{ySC}} \geq 1.5 \quad (3.2)$$

güvenlik koşulu elde edilir (Watanabe ve diğ. 1988). Tüm numuneler bu güvenlik koşulunu sağlayacak şekilde boyutlandırılmıştır. BÖÇ'ün etkin olarak enerji yutabilmesi ancak çekirdek elemanın akarak amaçlanan aksenal kuvvetle taşıma gücüne ulaşmasına ve dış tüple tutulu uzunluğu boyunca yerel burkulmaların oluşmamasına bağlıdır. Çekirdeğin yüksek modlarda yerel ve tümsel burkulmasından kaçınmak için F_{cr} kritik burkulma gerilmesi

$$F_{cr} = \frac{P_{cr}}{A_{sc}} = \frac{2\sqrt{\beta_1 E_i I_i}}{A_{sc}} \geq F_{ySC} \quad (3.3)$$

koşulunu sağlamalıdır. Burada P_{cr} kritik tümsel burkulma yükü, E_i çekirdek elemanın malzeme elastisite modülünü, I_i çekirdek elemanın atalet momentini vermektedir. β_1 dolgu malzemesinin çekirdek eleman boyu üzerine uyguladığı yayılı kuvvete ilişkin yay sabiti olup boyutu $[F]/[L]^2$ 'dir. Çekirdeğin yüksek modlarda yerel burkulmalarını önlemek için daha büyük β_1 sabiti gerekmektedir. Bu durumda bir boyutlu çelik dış tüplü beton blok için yayılı yay sabiti

$$\beta_1 = E_c \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3.4)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır (Black ve diğ., 2002). Burada E_c dolgu malzemesi elastisite modülünü, ν dolgu malzemesi Poisson oranını vermektedir. Dolgu malzemesi için E_c elastisite modülü ACI-318-08 (2008)'e göre

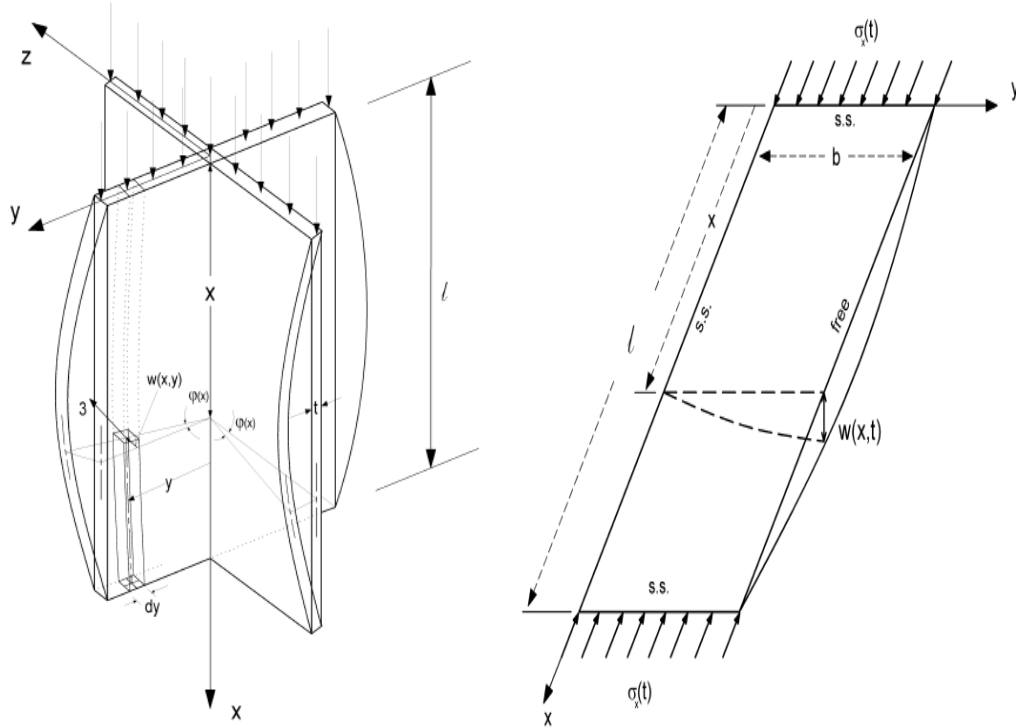
$$E_c = w_c^{1.5} 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (3.5)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada w_c dolgu malzemesinin yoğunluğu, f'_c 28 günlük beton basınç dayanımıdır. Dolgu malzemesi elastisite modülü $36.98GPa$, β_1 $59.35kN/mm^2$ olarak hesaplanmıştır. Numune çekirdeklerinin yüksek modlarda yerel ve tümsel burkulmasından kaçınmak için gereken kritik burkulma gerilmesi hesapları Çizelge 3.3'de verilmektedir.

Çizelge 3.3 : Çekirdek F_{cr} kritik burkulma gerilmesi.

Numuneler	Enkesit	E (kN/mm ²)	b_{ysc} (mm)	t (mm)	A_{sc} (mm ²)	F_{ysc} (kN/mm ²)	I_i (mm ⁴)	$F_{cr} \geq F_{ysc}$ (kN/mm ²)
BRB-AC1	PL-15x35	73	35	15	525	0.182	9843.80	23.69
BRB-AC2	PL-15x38	73	40	15	600	0.177	10687.50	23.74
BRB-SC1	PL-16x30	195	30	16	480	0.257	10240.00	43.20
BRB-SC2	PL-12x25	204	25	12	300	0.373	3600.00	41.92

Çekirdek eleman uç kısımları eşit atalet momenti oluşturacak şekilde haç enkesitli olarak tasarlanan BÖÇ'lerin olası bir diğer burkulma modu ise dış tüp tarafından tutulu olmayan çekirdek uzunluğunun burulmalı burkulmasıdır. Haç enkesitli bir çekirdeğin Şekil 3.2'de görüldüğü gibi bir kenarı serbest diğer üç kenarı sabit mesnetli aksenal basınç kuvveti alan bir plaka gibi düşünülmektedir.



Şekil 3.2 : (a) Aksenal basınç kuvveti altında haç enkesitli çekirdeğin eğilmesi. (b) Bir kenarı serbest, üç kenarı sabit mesnetli plakanın aksenal basınç kuvveti altındaki davranışı (Black ve diğ., 2002).

Tutulu olmayan uzunluğun kritik inelastik burulmalı burkulma gerilmesi

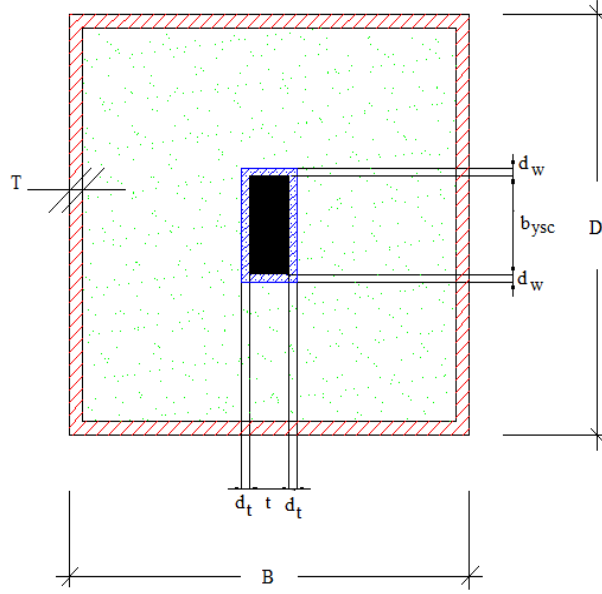
$$F_{cr} = \frac{E_t}{3} \left[\frac{\pi^2 b^2}{3 l^2} + 1 + 3 \frac{F_{ysc}}{E_t} \right] \frac{t^2}{b^2} \quad (3.6)$$

bağıntısıyla hesaplanabilmektedir. Burada E_t çekirdeğin Tanjant modülü olup başlangıçta E malzeme Elastisite modülü kadar büyüktür. b haç enkesitin sabit mesnet ve serbest kenarı arasındaki kanat uzunluğu, t enkesit kalınlığı, l burkulmayı önleyen ortam dışında kalan çekirdek uzunluğudur. Tekrarlı yüklemelerde basınç seviyesinde çekirdeğin akması ve Tanjant modülü azalırken, haç vari kesit kısılır ve genişir. Tüm numunelerin çekirdek tutulu olmayan uzunluğu boyunca kritik inelastik burulmalı burkulma gerilmesi hesaplamaları Çizelge 3.4’de verilmektedir.

Çizelge 3.4 : Çekirdeğin kritik inelastik burulmalı burkulma gerilmesi.

Numuneler	E_t (kN/mm ²)	b_{ysc} (mm)	t (mm)	A_{sc} (mm ²)	F_{ysc} (kN/mm ²)	b (mm)	l (mm)	F_{cr} (kN/mm ²)
BRB-AC1	73	35	15	525	0.182	42	115	2.21
BRB-AC2	73	40	15	600	0.177	45	65	6.99
BRB-SC1	195	30	16	480	0.257	42	69	20.97
BRB-SC2	204	25	12	300	0.373	43	70	11.90

Sürtünmesiz yüzey malzemesinin çok ince olması durumunda çekirdek elemanın kalınlık boyunca Poisson etkisiyle oluşan ve aksenal inelastik şekildeğiştirmesinden kaynaklanan genişmesi tolere edilememektedir. Diğer bir deyişle, dolgu malzemesinin dökümü sırasında önceden seçilen sürtünmesiz yüzey malzemesi kalınlığı aşınarak görevini yapamamaktadır. Sürtünmesiz yüzey malzemesinin gerekenden çok kalın olması durumunda çekirdek elemanın aksenal burkulması önlenememektedir. Şekil 3.3’de sürtünmesiz yüzey malzemesinin genel görünüşü verilmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda olduğu gibi sürtünmesiz yüzey malzemesinin d_t kalınlığı için t çekirdek plaka kalınlığının en az %0.5 ~10’u, d_w kalınlığı için b_{ysc} çekirdek plaka genişliğinin en az %0.5~10’u dikkate alınmıştır. Ayrıca dolgu malzemesinin yerleşimi sırasında, dolgu malzemesinin sürtünmesiz yüzey malzemesine uygulayacağı basınç dikkate alındığında d/t oranının %1.2~10 arasında olması sağlanmıştır. Tüm numuneler için genelde 0.2mm kalınlığında kendinden yapışkanlı politetrafluoretilen (TEFLON) bantlar kullanılmıştır.



Şekil 3.3 : Klasik çekirdek enkesiti.

BÖÇ'lerin elastik davranışı için akma bölgesine göre daha geniş enkesiti olan güçlendirme bölgesi, zayıf çekirdek elemanın tutulu olmayan uzunluk boyunca burkulmasını engellemekte ve inelastik şekildeğişimleri olabildiğince akma bölgesi uzunluğu içinde tutmaktadır. Çalışmada, güçlendirme bölgesi kesitlerinde BRB-SC1, BRB-SC2, BRB-AC1 için akma bölgesindeki çekirdek elemanın istavroz şeklinde düzenlenmiş şekli kullanılmıştır. Böylece gerilme yığılmalarından kaçınmak için enkesit geçişlerinin pürüzsüzlüğü sağlanmıştır. BRB-AC2 için ise yekpare çekirdek kesit kullanılmıştır. Önceki çalışmalarda, çekirdek elemanın burkulması diferansiyel modelde dikkate alınmazken çaprazın ilk eksenel yüklemesiyle birlikte eğilme gerilmesi nedeniyle burkulduğu ve bu davranıştan kaynaklanan momentin temas yüzeyinin artmasıyla birlikte güçlendirme bölgesi ile akma bölgesi uçlarında yoğunlaştığı görülmüştür (Prasad, 1992). Plastik mafsallaşmayı öteleyebilmek için A_{tr} güçlendirme bölgesi alanı $4A_{sc}$ 'den büyük olacak şekilde tasarlanmıştır.

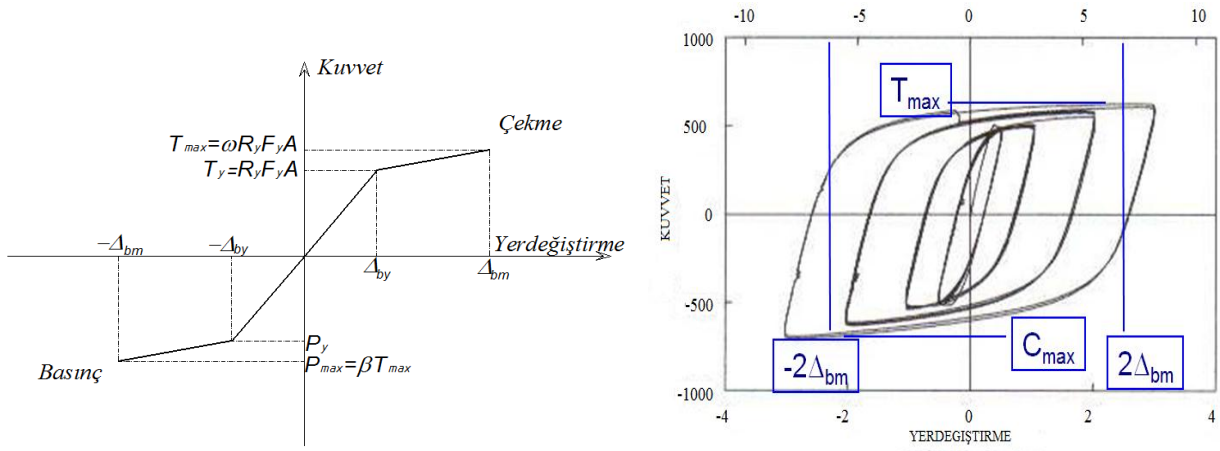
AISC 341-10 (2010)'te BÖÇ eksenel tasarım akma kuvveti ϕP_{ysc} akmanın çekme ve basınçtaki limit durumlarına göre aşağıdaki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\phi P_{ysc} = 0.9 F_{ysc} A_{sc} \quad (3.7)$$

Burada F_{ysc} çekirdeğin bir kupon (malzeme) deneyi yapılarak belirlenen gerçek akma dayanımı, A_{sc} çekirdek elemanın net enkesit alanı, ϕ aksenal akma dayanımı azaltma faktörü olup akma limit durumunda 0.9 alınmaktadır. Deneysel bölümde $\phi = 1$ alınmıştır. P_u çaprazın çekme ve akmada taşıması gereken kuvvet için aşağıdaki güvenlik koşulunun sağlanması gerekmektedir.

$$\frac{P_u}{\phi P_{ysc}} \leq 1.0 \quad (3.8)$$

BÖÇ'ün çekirdek alanı belirlendikten sonra düzeltilmiş çapraz dayanımı hesaplanır. Düzeltilmiş çapraz dayanımı, çapraz tarafından üretilen maksimum kuvvetler olup deney sonuçlarından elde edilmektedir. Arttırılmış maksimum kuvvetlerin hesaplanması birleşimlerin, kolon ve kirişlerin tasarımı için gerekli ve önemlidir. AISC 341-10 (2010)'te BÖÇ'lü çerçeveler için önerilen iki doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 3.4a'da, T_{max} ve P_{max} kuvvetlerinin nasıl belirlendiği Şekil 3.4b'de verilmektedir.



Şekil 3.4 : (a) İki doğrulu Kuvvet-Yerdeğiştirme ilişkisi. (b) $2\Delta_{bm}$ tasarım görelî ötelenme sınırında T_{max} ve P_{max} kuvvetlerinin belirlenmesi (AISC 341-10, 2010).

Δ_{bm} tasarım kat ötelenmesinin (çaprazın izin verilen maksimum elastik olmayan yerdeğiştirmesi) %200'üne karşı gelen yerdeğiştirme sınırındaki maksimum çekme kuvveti $T_{max} = \omega R_y P_{ysc}$, maksimum basınç kuvveti $P_{max} = C_{max} = \beta \omega R_y P_{ysc}$ 'dir. Çaprazın izin verilen maksimum yerdeğiştirmeye ilişkin aksenal birim şekildeğiştirme oranı

$\varepsilon=2A_{bm}/L_{ysc}$ 'dir. Bağıntılarda β basınç dayanımı düzeltme faktörü basınçtaki aşırı dayanım ile açıklanır ve $1 \leq \beta \leq 1.3$ arasında bir değer olarak alınır. ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı pekleşmeyle ilgili olup çelik çekirdeğin akma dayanımının çekme dayanımına oranına bağlıdır. Çelik/alüminyum kalitesi aynı olan iki çekirdekten çekme/akma oranı büyük olanda daha büyük ω değerleri görülmektedir (Newell ve diğ., 2006). ε çapraz eksenel birim şekildeğiştirme oranı deneylerden çıkarılan Kuvvet-Birim Şekildeğiştirme eğrisinde yerleştirildiğinde ω ve β dayanım düzeltme faktörleri elde edilmektedir. R_y malzeme dayanım faktörü olup AISC 341-10'dan (2010, Bölüm 1, p.20) alınmaktadır. Çaprazda yön değiştiren tekrarlı yükler altında tümsel burkulma/kopma oluşmaması için aşağıdaki şu koşulların sağlanması gerekmektedir.

$$T_{\max} \geq P_{ysc} \text{ ve } P_{\max} \geq P_{ysc} \quad (3.9)$$

$$P_{\max} \leq 1.3T_{\max} \quad (3.10)$$

Bu durumda BÖÇ'ün eksenel akma dayanımı

$$P_{ysc} = P_{\max} = \beta \omega R_y F_{ysc} A_{sc} \quad (3.11)$$

olarak tahmin edilebilmektedir (AISC 341-10, 2010). Çelik numunelerin tasarımında β ve ω değerleri maksimum şekildeğiştirme noktasındaki ortalama değerler için sırasıyla 1.15 ve 1.45 olarak alınmıştır (Meritt ve diğ., 2003, Lopez ve Sabelli, 2004a).

Alüminyum alaşımlı numunelerin tasarımı için ω değerinin belirlenmesinde çekme deneylerinden elde edilen maksimum çekme/akma dayanım oranı dikkate alınmıştır (Karataş ve Çelik, 2011). BRB-AC1 numunesi için $\omega=1.73$, BRB-AC2 numunesi için $\omega=1.80$ alınmıştır. Alüminyum alaşımlı numunelerin tasarımında $\beta=1.15$ olarak seçilmiştir. Aynı seriden olan alüminyum alaşımlı BÖÇ'ün çekme/akma oranı BRB-AC2 için daha büyüktür. R_y levhalar için malzeme dayanım faktörü tablodan 1.1 olarak alınmıştır. Eğer çekirdek malzeme özellikleri kupon deneyi yaparak belirlenmişse R_y 'nin hesaba katılması terk edilebilir. Ancak AISC 341-10'de (2010, Bölüm 1, p. 56) BÖÇ'ün akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesinde gerçek

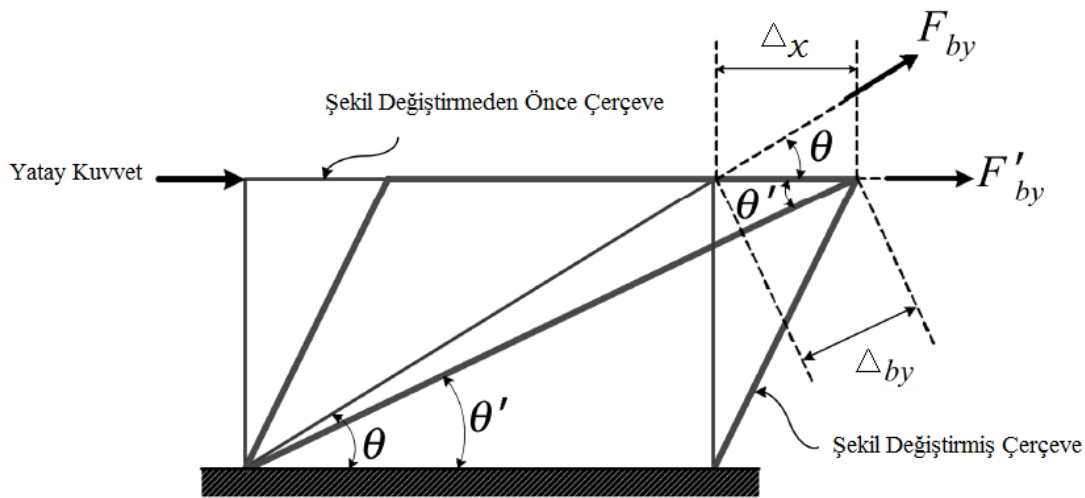
malzeme özelliklerinin kullanılmadığı durumlarda R_y 'nin hesaplara eklenmesi önerilmektedir.

Yapılan literatür araştırmasında, BÖÇ'lerin dış tüp tarafından tutulu olmayan uç kısımlarının yeterli l uzunluğunun maksimum $15\Delta_{by} \sim 20\Delta_{by}$ arasında alındığı belirlenmiştir. Bu çalışmada güvenlik nedeniyle numunelerin l uzunluğu belirlenirken bu hedefler düzeyinde kalınmasına dikkat edilmiştir. Çaprazlar $P_u=200kN$ 'a göre boyutlandırılmıştır. Her numunenin tahmin edilen $P_{y_{sc}}$ akma kuvvetleri Çizelge 3.5'de verilmektedir.

Çizelge 3.5 : Numunelerin tahmin edilen akma dayanımı.

Numuneler	$F_{y_{sc}}$ (MPa)	t (mm)	$b_{y_{sc}}$ (mm)	A_{sc} (mm ²)	β	ω	R_y	$P_{y_{sc}}=P_{max}$ (kN)	$P_u/\phi P_{y_{sc}} \leq 1$
BRB-AC1	182	15	35	525	1.15	1.73	1.1	212.73	0.94
BRB-AC2	177	15	40	600	1.15	1.81	1.1	243.16	0.82
BRB-SC1	257	16	30	480	1.15	1.45	1.1	226.27	0.88
BRB-SC2	373	12	25	300	1.15	1.45	1.1	205.25	0.97

ω çekme dayanımı düzeltme faktörü çaprazın $5\Delta_{by}$ seviyesine göre belirlenebilmektedir (Meritt ve diğ., 2003). Δ_{by} çaprazın ilk akma noktasındaki (Δ_x elastik kat ötelemesi noktasındaki) elastik eksenel yerdeğiştirme miktarıdır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5 : Diyagonal BÖÇ'ün yerdeğiştirmesi (Kim ve Choi, 2004b).

Burada çerçeveye etkiyen F'_{by} yatay kuvvet ve Δ_x yatay yerdeğiştirmesi, θ çaprazın ereve yatayı ile yaptığı açı olmak üzere

$$F'_{by} = F_{by} \cos \theta \quad (3.12)$$

$$\Delta_x = \Delta_{by} / \cos \theta \quad (3.13)$$

bağıntıları kullanılmaktadır. Δ_{by} hesaplanırken çaprazın çekirdek akma bölgesi inelastik şekildeğiştirmesi ile L_1 mafsal noktaları arasındaki uzunluk boyunca, akma bölgesi uzunluğu dışında kalan çekirdek parçasının elastik şekildeğiştirmesi birlikte dikkate alınarak

$$\Delta_{by} = \frac{P_{ysc} L_{ysc}}{EA_{sc}} + \frac{P_{ysc} \left[\frac{L_1 - L_{ysc}}{2} \right]}{EA_{tr}} \quad (3.14)$$

bağıntısıyla belirlenir (Meritt ve diğ., 2003, Newell ve diğ., 2006). Burada E malzeme elastisite modülü, A_{sc} çekirdek elemanın net enkesit alanı, A_{tr} çekirdek eleman güçlendirme bölgesi ha enkesit alanı, L_1 mafsal noktaları arasındaki uzunluk, L_{ysc} çekirdek akma bölgesi uzunluğudur. Numunelerin tek uç açılımı için hesaplanan Δ_{by} değerleri izelge 2.23'de verilmektedir. Burada t çekirdek et kalınlığı, b_{tr} çekirdek güçlendirme bölgesi genişliği, b_{ysc} akma bölgesi genişliğidir.

Alüminyum alaşımlı malzemelerin akma özelliği değişkendir ve belirgin akma sahanlığı göstermemektedir. $F_{ysc}^{0.2}$ akma gerilmesi %0.2 değerindeki kalıcı inelastik şekildeğiştirmenin ε eksenindeki karşılığı olan $\varepsilon^{0.2}$ noktasından başlayarak malzeme çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusal bölüme paralel giden doğrunun eğriyi keşiği nokta olarak tanımlanmaktadır. Alüminyum alaşımlı B'lerin elastik bölgedeki eksenel yerdeğiştirmesi hesaplanırken, $F_{ysc}^{0.2}$ akma gerilmesi yerine F_{ysc}^0 akma gerilmesi kullanılmıştır (Usami ve diğ., 2012). F_{ysc}^0 akma gerilmesi A5083-H111 alüminyum alaşımlı için $\varepsilon_0=0.8\varepsilon_y^{0.2}$ noktasından başlayarak gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusalın eğriyi keştiği noktadır. A6061-T6 alüminyum alaşımlı için $\varepsilon_0=0.9\varepsilon_y^{0.2}$ olarak alınması önerilmektedir. Kabul edilen yaklaşımın etkinliği deney sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.

Çizelge 3.6 : Numunelerin hesaplanan üst/alt Δ_{by} elastik eksenel yerdeğiştirmesi.

Numuneler	E (GPa)	$F_{ysc}^{0.2}$ (MPa)	F_{ysc}^0 (MPa)	t (mm)	b_{ysc} (mm)	b_{tr} (mm)	A_{sc} (mm ²)	P_{ysc} (kN)	$A_{tr} \cong 2b_{tr}t$ (mm ²)	L_1 (mm)	L_{ysc} (mm)	Δ_{by} (mm)
BRB-AC1	73	182	145.60	15	35	115	525	95.55	3450	2110	1278	2.68
BRB-AC2	73	177	141.60	15	40	115	600	106.20	1725	1991	1195	2.58
BRB-SC1	195	257	-	16	30	100	480	135.70	3200	2110	1410	2.13
BRB-SC2	204	373	-	12	25	98	300	111.90	2352	2110	1380	2.61

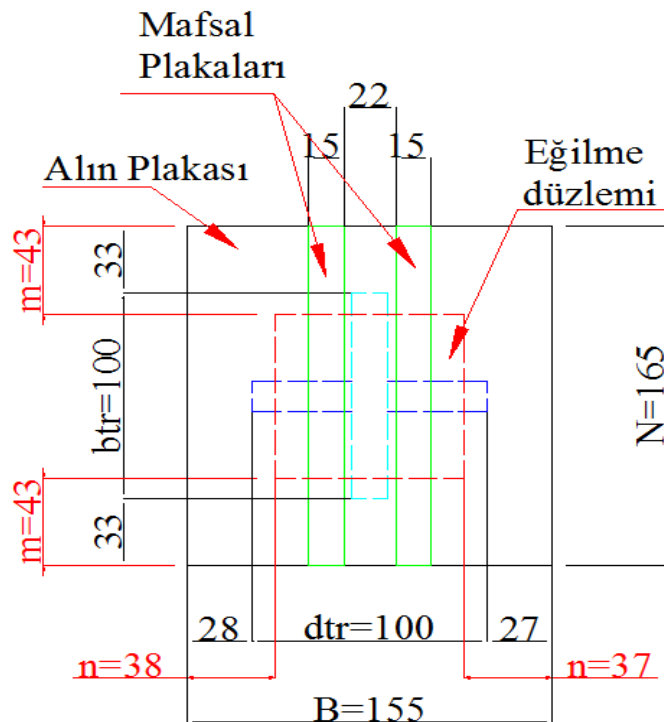
3.2.1 Alın plakasının tasarımı ve boyutlandırılması

Aşağıda önerilen hesap yaklaşımına göre, BÖÇ'ten gelen eksenel kuvvet yüzeyde uniform dağılmakta ve mafsalsal plakalarına aktarılmaktadır. Örneğin BRB-SC1'in alını plakasının hesabında, plakanın her iki doğrultuda konsol açıklıkları AISC-LRFD (2010)'ye göre

$$m = \frac{N - 0.95d_{tr}}{2} = \frac{165 - 0.95 \cdot 100}{2} = 35 \text{ mm} \quad (3.15)$$

$$n = \frac{B - 0.80b_{tr}}{2} = \frac{155 - 0.80 * 100}{2} = 37.5mm \quad (3.16)$$

olarak verilmiştir. Burada B alın plakası varsayılan eğilme düzlemi genişliği, N eğilme düzlemi uzunluğu, b_{tr} çekirdek güçlendirme bölgesi genişliği, d_{tr} çekirdek güçlendirme bölgesinin genişliğidir. Şekil 3.6'da alın plakası tasarım değişkenleri verilmektedir.



Şekil 3.6 : Alın plakası tasarım değişkenleri.

Alın plakası alanı

$$A_1 = BN = 165 * 155 = 25575 \text{ mm}^2 \quad (3.17)$$

BÖÇ'e gelen aksenal basınç kuvveti $P_u = 317.25 \text{ kN}$ olduğuna göre alın plakasında oluşan gerilme BRB-SC1 için

$$p = \frac{P_u}{A_1} = \frac{317.25}{25575} = 12.40 \text{ N/mm}^2 \quad (3.18)$$

Gerekli alın plakasının kalınlığı her iki doğrultu için kontrol edildiğinde

$$t_{ep} \geq m \sqrt{\frac{3p}{F_{ysc}}} = 35 * \sqrt{\frac{3 * 12.40}{235}} = 13.92 \text{ mm} \quad (3.19)$$

$$t_{ep} \geq n \sqrt{\frac{3p}{F_{ysc}}} = 37.5 * \sqrt{\frac{3 * 12.40}{235}} = 14.92 \text{ mm} \quad (3.20)$$

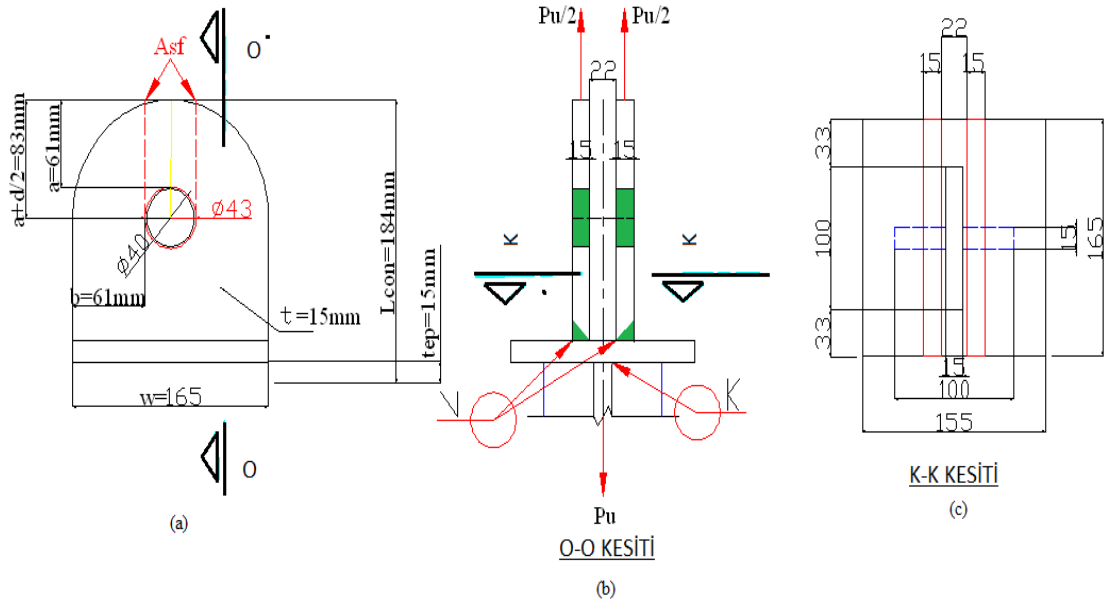
değerleri elde edilir. Böylece, seçilen $t_{ep} = 15 \text{ mm}$ alın plakası kalınlığının alın plakalı olarak tasarlanan BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-AC1 için uygun olduğu görülmektedir. Önerilen hesap yaklaşımının etkinliği deneylerde de kanıtlanmıştır.

3.2.2 Mafsal plakalarının tasarımı ve boyutlandırılması

BÖÇ'lerin iki uçtaki birleşim bölgesinde bulunan iki adet mafsal plakası, tekrarlı yükler altında aksenal doğrultuda BÖÇ'ten gelen çekme ve basınç kuvvetlerini aktarmaktadırlar. Mafsal plakaları malzeme özellikleri Çizelge 3.7'de, detay çizimleri Şekil 3.7'de verilmektedir.

Çizelge 3.7 : Mafsal plakaları malzeme özellikleri.

Numuneler	Çelik Kalitesi	t (mm)	E (MPa)	F_y (MPa)	F_u (MPa)
BRB-AC1	A5083-H111	15	73000	201	314
BRB-SC1	S235JR	16	195000	239	361
BRB-SC2	S355JR	15	204000	385	600



Şekil 3.7 : Numunelerin mafsal plakası önden görünüş (a), yandan görünüş (b), plan görünüşü (c).

Tüm numunelerin mafsal plakası en kritik durum için AISC-LRFD (2010)'de verilen aşağıdaki koşullara göre boyutlandırılmıştır.

$$b_{eff} = 2t + 16 \leq b \Rightarrow 2 * 15 + 16 = 46mm < 61mm \quad (3.21)$$

$$a \geq \frac{4}{3} b_{eff} \Rightarrow 61mm = 61mm \quad (3.22)$$

$$w \geq 2b_{eff} + d \Rightarrow 165mm > 132mm \quad (3.23)$$

Bir mafsal plakası için gereken tasarım dayanımı $P_u = 317.25 / 2 = 158.62kN$ 'dur. Net etkili alanda çekmede kopma dayanımı

$$\phi_t P_n = 0.75 * 2tb_{eff} F_u = 0.75 * 2 * 15 * 46 * 360 = 372.60kN > P_u \quad (3.24)$$

Kesmede kopma dayanımı

$$A_{sf} = 2t(a + d / 2) = 2 * 15 * 83 = 2490mm^2 \quad (3.25)$$

$$\phi_{sf} P_n = \phi_{sf} 0.6F_u A_{sf} = 0.75 * 0.6 * 360 * 2490 = 403.38kN > P_u \quad (3.26)$$

Taşıma kapasitesi

$$A_{pb} = dt = 40 * 15 = 600mm^2 \quad (3.27)$$

$$\phi_t P_n = 0.75 * 1.8 F_y A_{pb} = 0.75 * 1.8 * 235 * 600 = 190.35 kN > P_u \quad (3.28)$$

Çekmede akma dayanımı

$$A_g = wt = 165 * 15 = 2475 mm^2 \quad (3.29)$$

$$\phi_t P_n = \phi_t F_y A_g = 0.9 * 235 * 2475 = 523.46 kN > P_u \quad (3.30)$$

olup seçilen mafsall plakaları BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-AC1 numuneleri için yeterlidir.

3.2.3 Yüksek mukavemetli bulonların tasarımı ve boyutlandırılması

Toplam uzunluğu 2275mm olan numuneler eksenel normal kuvveti bayrak levhalarına sürtünme tipi yüksek dayanımlı bulonlarla aktarmaktadır. Tüm numunelerin bayrak levhalarına birleşiminde çapı $\phi 40mm$ olan ASTM A490-09a (2009) standardına uygun 10.9 çelik kalitesinde yüksek dayanımlı bulonlarla yapılmıştır ve bu bulonlar ÇİMTAŞ A.Ş. tarafından fabrikada özel olarak üretilmiştir. Uygunluğu için makaslanmaya (kesmeye) zorlanan çift tesirli bulon hesabı yöntemi kullanılmıştır. Montajda 65'lik lokma ile 2200Nm Tork değeri uygulanmıştır. AISC-LRFD (2010)'e göre bulon delik çapı bilgileri ve malzeme özellikleri Çizelge 3.8'de verilmektedir.

Çizelge 3.8 : Bulon delik çapı ve malzeme özellikleri.

Bulon Çelik Kalitesi	Bulon Çapı-Uzunluğu (mm)	Etkili Delik Çapı (mm)	Maksimum Delik Çapı (mm)	F_u (MPa)	F_y (MPa)
ASTM A490	$\phi 40 \times 110$	41	d+8=48	1040	940

Sürtünme tipi bulonu kesmeye zorlayan eksenel tasarım kuvveti $P_u=317.25kN$ 'dur.

Bulonun taşıma kapasitesi

$$\phi R_n = \phi \mu D_u h_{sc} T_b N_s \quad (3.31)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada; $\phi=0.85$ AISC-LRFD'ye göre birleşimde istenen dayanımda kaymanın oluşmaması için güvenlik faktörü, $\mu=0.35$ ortalama sürtünme katsayısı, $D_u=1.13$ uygulanan ortalama öngermenin uygulanan minimum

öngermeye oranını gösteren çarpan, $H_{sc}=1$ bulon deliği faktörü (Standart delikler için), $N_s=2$ kayma düzlemi sayısı, T_b bulona uygulanması gereken minimum öngörme kuvvetidir olup bulonun çekme kapasitesinin 0.70 katı olarak verilmiştir. Bulonun çekme kapasitesi

$$\phi R_n = \phi 0.75 F_u A_b \quad (3.32)$$

bağıntısı ile hesaplanmıştır. Burada $\phi=0.75$, bulonun kopma gerilmesi $F_u=1040MPa$, A_b bulon alanını vermektedir. Değerler yerine konursa yüksek dayanımlı bulonun çekme kapasitesi

$$\phi R_n = 0.75 * 0.75 * 1040 * \frac{\pi * 40^2}{4} = 734.76kN \quad (3.33)$$

olarak bulunmaktadır. 1 adet sürtünme tipi M40 (10.9) bulona uygulanması gereken minimum öngörme kuvveti

$$T_b = 0.70 \phi R_n = 0.70 * 734.76 = 514.33kN \quad (3.34)$$

elde edilir. Sürtünme tipi bulonların taşıma kapasitesinin, değerler yerine konulduğunda yeterli olduğu görülmektedir. Tüm numunelerde aktarılacak olan kuvvet aynı olduğundan bulon çapı BRB-SC1, BRB-SC2, BRB-AC1 için sabit tutulmuştur. BRB-AC2 numunesinin çerçeveye bağlantısında ASTM 490M-09a (2009) standartına uygun olarak bulon kalitesi 10.9, çapı M16'lık yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır. Yapılan kontroller sonucunda 8 adet M16x50'lık bulonların yeterli taşıma kapasitesini sağladığı anlaşılmıştır. Montaj sırasında 27'lik lokma ile 288Nm Tork değeri uygulanmıştır.

3.3 Kullanılan Kaynak Hesap Yöntemi

Çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde kullanılan kaynak yöntemi gaz altı kaynağıdır (GMAW). Gazaltı kaynak yöntemleri Amerikan kaynak standartlarından (AWS) çelik için AWS D1.1/D1.1M'de (2008), alüminyum alaşımlar için AWS D1.2/D1.2M'de (2008) tanımlanmaktadır. Çelik elemanların kaynağında kaynak teli olarak E70 elektrodu kullanılmıştır. Alüminyum elemanların kaynağında

kullanılan kaynak teli 1.2mm çapında A5183'dür. Bu kaynak teli 5xxx serisindeki alüminyum alaşımlarının kaynaklanması için geliştirilmekle birlikte 6xxx ve 7xxx serisindeki alüminyum alaşımların kaynaklanmasında da kullanılmaktadır. BRB-AC1 numunenin kaynağında kullanılan 5183 elektrodunun çekme dayanımı 270MPa olarak alınmıştır. Çizelge 3.9'da çelik numuneler için AISC-LRFD (2010) ve alüminyum alaşımlı numuneler için AWS D1.2/D1.2M (2008) standartlarında önerilen minimum köşe kaynağı kalınlıkları verilmektedir. T_{min} birleştirilen elemanların et kalınlıklarının en küçüğüdür.

Çizelge 3.9 : Minimum köşe kaynak kalınlıkları.

Numune Malzemesi	İlgili Standart	T_{min} (mm)	Önerilen Minimum Köşe Kaynak Kalınlığı (mm)
Çelik	AWS D1.1/D1.1M	$T_{min} \leq 6$	3
		$6 < T_{min} \leq 13$	5
		$13 < T_{min} \leq 19$	6
		$T_{min} > 19$	8
Alüminyum	AWS D1.2/D1.2M	$T_{min} \leq 6.4$	3
		$6.4 < T_{min} \leq 12.7$	5
		$12.7 < T_{min} \leq 20.0$	6

Yapılan hesaplamalar sonucunda, çelik ve alüminyum alaşımlı T_{min} koşullarına göre, güçlendirme plakalarının çekirdek elemana kaynaklanmasında $a=6\text{mm}$ kalınlıklı köşe kaynak kullanılmıştır. Seçilen kaynak kalınlığı $3\text{mm} \leq a \leq 0.7T_{min}$ sınır koşulunu sağlamaktadır. Çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin köşe kaynağında kullanılan hesap yönteminde

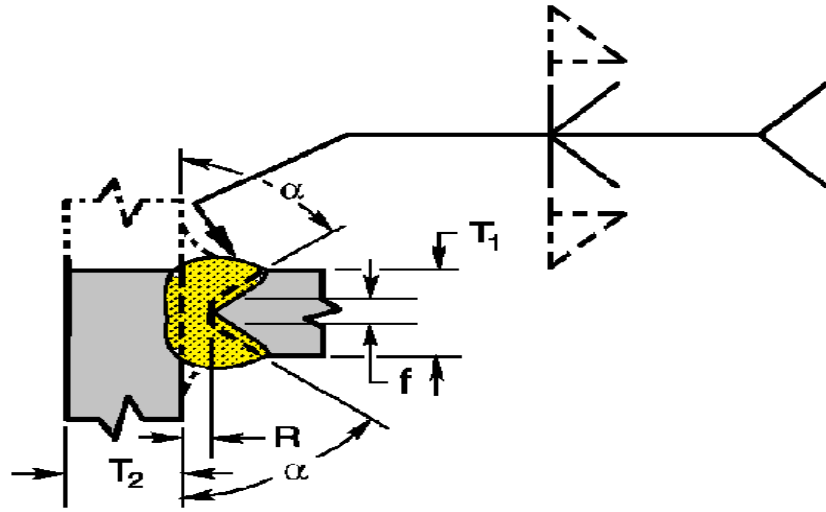
$$\phi R_n = \phi 0.6 F_{exx} l_k a \quad (3.35)$$

bağıntısı kullanılmıştır. Burada F_{exx} E70 elektrotta ait maksimum gerilme kapasitesi, l_k kaynak boyudur. E70 elektrodunun çekme dayanımı $F_{exx}=483\text{N/mm}^2$ 'dir. BRB-SC1'in güçlendirme bölgesi uzunluğu 249mm'dir. Kaynak uzunluğunun çalışan boyundan tek krater çıkartıldığında hesap uzunluğu BRB-SC1 için $l_k=243\text{mm}$ olup kaynak kalınlığının 100 katı kadar bir boyda etkili olarak çalışmaktadır. Değerler yerine konursa

$$\phi R_n = 0.75 * 0.6 * 483 * 4 * 243 * 6 = 1267.6\text{kN} > 2 * P_u = 634.50\text{kN} \quad (3.36)$$

BRB-SC1 için köşe kaynak kapasitesi 2 kat güvenlik durumu dikkate alındığında yeterlidir. Güçlendirme plakalarında kullanılan köşe kaynaklar tüm numuneler için yeterli kapasitededir.

Çekirdek güçlendirme bölgesi, birleşim bölgesine boyutları PL 165x155x15 olan alın plakasıyla bağlanmıştır. Bağlantıda tam penetrasyonlu, çift taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak kullanılmıştır. Şekil 3.8’de f kuramsal kök yüzeyi kalınlığını, R kök aralığını göstermektedir. Çizelge 3.10’da bu kaynak ağzı hazırlama ile ilgili standartlardaki sınır değerler verilmektedir.



Şekil 3.8 : Tam penetrasyonlu, çift kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak detayı (AWS D1.1/D1.1M, 2008, AWS D1.2/D1.2M, 2008).

Çizelge 3.10 : Tam penetrasyonlu, çift taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak sınır değerleri.

Numuneler	Kaynak Yöntemi	Önerilen Min. T ₁ (mm)	Önerilen Min. T ₂ (mm)	R Kök Aralığı (mm)	f Min. Kök Kalınlığı (mm)	α Kaynak Açısı (°C)	Kaynak Pozisyonu
BRB-SC1							
BRB-SC2	GMAW	Seçilen	Seçilen	0~3	0~3	45	Hepsi
BRB-AC1	GMAW	Seçilen	Seçilen	0~2	1.6~3	60	Hepsi

Çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerin tam penetrasyonlu, çift taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynağının hesap yönteminde

$$\phi R_n = \phi 0.8 F_{exx} l_k t_w \quad (3.37)$$

bağıntısı kullanılmıştır. l_k küt kaynak uzunluğu BRB-SC1 için toplam 184mm'dir. Değerler yerine konursa

$$\phi R_n = 0.8 * 0.6 * 483 * 184 * 15 = 639.88kN > P_u = 317.25kN \quad (3.38)$$

koşulu sağlanmaktadır. Aynı hesaplar tüm numuneler için tekrarlandığında koşul sağlanmaktadır. Mafsallı plakalarının alın plakasına birleşimi tam penetrasyonlu, tek taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak ile sağlanacaktır. İlgili standartlarda çelik ve alüminyum alaşımlı çapraz elemanlarının bu birleşimine ilişkin tüm sınır değerleri Çizelge 3.11'de verilmektedir.

Çizelge 3.11 : Tam penetrasyonlu, tek taraflı kaynak ağızlı, T birleştirme dikişli küt kaynak sınır değerleri.

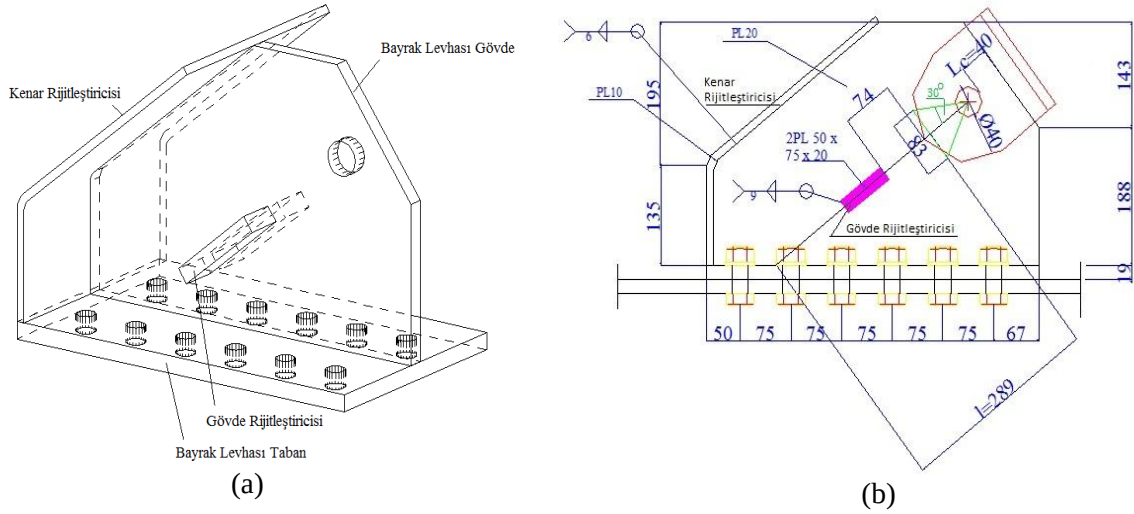
Numuneler	Kaynak Yöntemi	Min. T ₁ (mm)	Min. T ₂ (mm)	R Kök Aralığı (mm)	f Min. Kök Kalınlığı (mm)	α Kaynak Açısı (°C)	Önerilen Kaynak Pozisyonu
BRB-SC1	GMAW	Seçilen	Seçilen	0~3	0~3	45	Hepsi
BRB-SC2							
BRB-AC1	GMAW	Seçilen	Seçilen	0~2	1.6~3	60	Hepsi

Çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynağında kullanılan hesap yöntemlerinin uygulanan numuneler için yeterli olduğu görülmüştür.

3.4 Bayrak Levhalarının Tasarımı ve Boyutlandırılması

BÖÇ'lerin bayrak levhaları deney düzeneğine bulonlanarak istenildiğinde sökülüp tekrar takılacak şekilde tasarlanmıştır (Şekil 3.9a). Yerel burkulma kapasitesini artırmak için gövdelerine rijitleştirici plakalar kaynaklanmıştır (Şekil 3.9b). Ayrıca levhaların düzlem dışı burkulmaları, serbest kenarlarından rijitleştiriciler kullanılarak kısıtlanmıştır (Lin ve diğ. 2005). Kenar rijitleştiricilerin genişlikleri kiriş başlık genişliği ile eşit uzunluktadır. Birleşim hesaplamalarında AISC-LRFD (2010) yönetmeliğinin ve Astaneh-Asl ve diğ. (1998), Tsai ve diğ. (2006) çalışmaları dikkate alınmıştır. BÖÇ'lü çelik çerçevelerin çekirdeğin akmasına karşı gelen kuvvet

düzeylerinde akmadan kararlı olması için çaprazdan beklenilen maksimum kuvvetlere göre tasarlanması gerekmektedir.



Şekil 3.9 : (a) Bayrak levhası genel görünüşü. (b) Bayrak levhası boyutlandırma.

P_u çaprazlı birleşimin çekme ve basınçta sahip olması gereken dayanım

$$P_u = \beta \omega R_y F_{ysc} A_{sc} \quad (3.39)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada F_{ysc} çekirdek elemanın belirlenen minimum akma gerilmesi ya da deneylerden elde edilen gerçek akma gerilmesi, R_y levhalar için malzeme dayanım faktörü olup belirlenmesi gereken ω ve β faktörlerini aşan şekilde değişimlerin oluşması durumunda 1.1. alınmaktadır (AISC341-10, Table I-6-1, 2010). β basınç dayanımı düzeltme faktörü, ω çekme dayanımı düzeltme faktörü, A_{sc} çekirdek elemanın akma bölgesi net enkesit alanıdır. Deney sırasında birleşimlerde göçme durumu oluşmaması için güvenlik faktörü yüksek tutulmuştur. Deney için tasarım değeri $P_u=317.25kN$ olarak alınmıştır. Bayrak levhaları yüksek dayanımlı S355JR çelik kalitesinde olup malzeme özellikleri Çizelge 3.12’de verilmektedir.

Çizelge 3.12 : Bayrak levhası hesap parametreleri.

Bayrak Levhası	Çelik Kalitesi	t_L (mm)	E (GPa)	F_{yL} (MPa)	F_{uL} (MPa)
PL 20	S355JR	20	210	355	470

Bayrak levhasına açılan mafsallın taşıma gücü

$$\phi R_n = 0.75 * 1.2 L_c t_L F_{uL} \quad (3.40)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada F_{uL} bayrak levhası belirlenen minimum çekme dayanımı, L_c kuvvet doğrultusunda bayrak levhası kenarı ile mafsall deliği arasındaki mesafe, t_L bayrak levhası kalınlığıdır. Değerler bağıntıya yerleştirilirse levhanın taşıma gücü

$$\phi R_n = 0.75 * 1.2 * 40 * 20 * 470 = 338.40 kN > P_u \quad (3.41)$$

olmaktadır. Buna göre levha tüm modeller için uygundur. Bayrak levhasının akması, doğrudan çekme, basınç, eğilme momenti, kayma ya da bunların birleşik etkilerinden dolayı olabilir. Doğrudan çekme ve basınçtan dolayı akma davranışı Whitmore alanı üzerindeki “direkt” gerilmeden dolayı, Whitmore etkili geniş alanı içerisinde oluşur. Doğrudan eksenel yükten dolayı bir bayrak levhasının Whitmore alanının akma kapasitesi

$$\phi R_n = 0.9 F_{yL} A_g \quad (3.42)$$

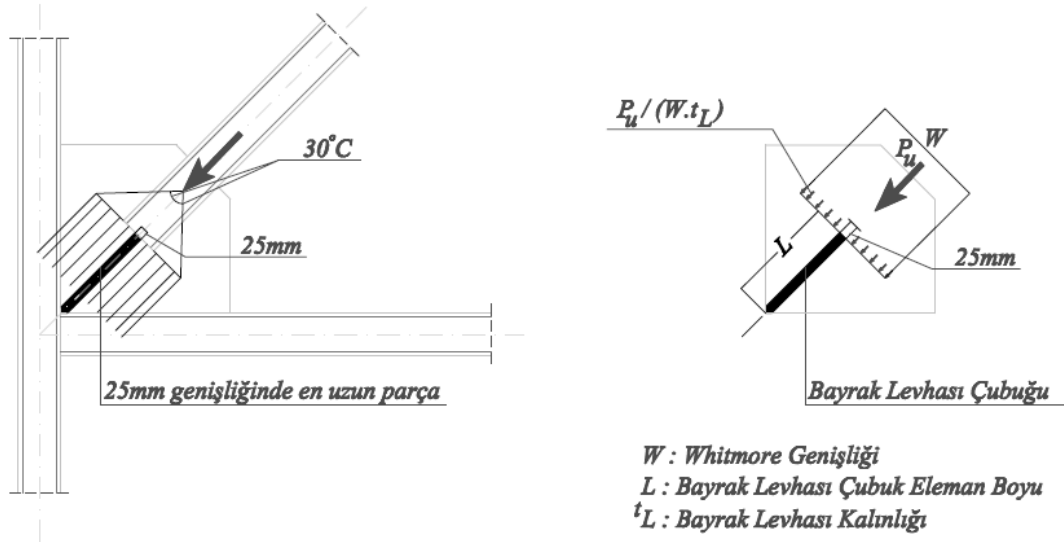
bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada F_{yL} bayrak levhasının belirlenen minimum akma dayanımı, A_g Whitmore’un 30° ’lik hattı üzerindeki bayrak levhası brüt alanı olup $A_g = W t_L$ bağıntısıyla hesaplanmaktadır. ϕ eksenel akma dayanımı azaltma faktörü 0.9 alınarak değerler bağıntıya yerleştirilirse levhanın çekmede akma kapasitesi

$$\phi R_n = 0.9 * 355 * 83 * 20 = 530.37 kN > P_u \quad (3.43)$$

olarak bulunmaktadır. Levha çekmede akma kapasitesine göre tüm modeller için uygundur. Doğrudan etkiyen basınç kuvvetlerinden dolayı diyagonal çaprazın uç kısmının hemen gerisinde kalan alanlarda bayrak levhası burkulabilir. Bu şekilde doğrudan basınç etkilerine maruz kalan bir bayrak levhasının burkulma kapasitesi, Whitmore etkili genişliği dikkate alınarak

$$\phi R_n = \phi F_{cr} A_g \quad (3.44)$$

şeklinde belirlenmektedir. Burada F_{cr} Whitmore etkili genişliği içinde kalan 25mm genişliğindeki bayrak levhası şeridi üzerine etkiyen kritik basınç gerilmesidir. Şekilde 3.10'da gösterilen 25mm genişliğindeki parça kolon gibi davranır ve ilgili kolon bağıntıları kullanılarak tasarlanır.



Şekil 3.10 : Bayrak levhalarının burkulması ve burkulma kapasitesinin hesap modeli (Astaneh-Asl, 1998).

Bayrak levhaları için etkili burkulma boyu katsayısının $K_L=1.2$ alınması önerilmektedir. Thornton (1984) çalışmasında aynı katsayının $K_L= 0.65$ alınmasını önermektedir. Lin ve diğ. (2005, 2006) bayrak plakası kenar rijitleştiricilerinin kullanılmaması durumunda $K_L=2$, kullanıldığında $K_L=0.65$ alınması gerektiğini belirtmişlerdir. Tsai ve diğ. (2006) tasarladıkları 22mm kalınlığında 4 bayrak plakasında kenar rijitleştiricileri kullanarak bayrak plakalarının basınç yüklemesi altındaki düzlem dışı yerdeğiştirmesinin engellenmesi için $0.65 \leq K_L \leq 1.00$ arasında alınmıştır. BÖÇ'lü çaprazların özelliği dolayısıyla burada $K_L=1$ alınmış ve yapılan deneylerde bunun geçerli olduğu görülmüştür. L bayrak levhası kolon eleman boyu olarak Whitmore etkili genişliği boyunca ölçülen en uzun ölçü alınmıştır. AISC-LRFD'de (2010) bayrak levhasının basınç etkisinde olması durumunda

$$F_e \geq 0.44F_{yL} \rightarrow F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_{Ly}}{F_e} \right] F_{yL}$$

$$F_e < 0.44F_{yL} \rightarrow F_{cr} = 0.877F_e$$

koşuları verilmektedir. Burada F_e elastik kritik burkulma gerilmesi olup aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır (AISC-LRFD, 2010).

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} \quad (3.45)$$

E malzeme Elastisite modülü 210GPa, r eylemsizlik/atalet yarıçapı 5.80mm, L bayrak levhası kolon boyu (kritik etkili uzunluk) 289mm alınarak bu değerler bağıntıya yerleştirilirse F_e elastik burkulma gerilmesi

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{KL}{r} \right)^2} = \frac{3.14^2 * 210000}{\left(\frac{1 * 289}{5.80} \right)^2} = 833.95MPa \quad (3.46)$$

olarak bulunur. $F_e \geq 0.44F_{yL}$ koşuluna göre

$$F_{cr} = \left[0.658 \frac{F_{yL}}{F_e} \right] F_{yL} = \left[0.658 \frac{355}{833.95} \right] * 355 = 297.06MPa \quad (3.47)$$

elde edilir. Bayrak levhasının burkulma kapasitesi

$$\phi R_n = \phi F_{cr} A_g = 0.9 * 297.06 * 83 * 20 = 443.81kN > P_u \quad (3.48)$$

olarak bulunmaktadır. Levhanın burkulma kapasitesi tüm modeller için yeterlidir. Serbest uçlu bayrak levhalarında uzun olan serbest uçlar burkulabilir. Bu serbest uçların burkulması istenmeyen bir hasar şekli olup BÖÇ'ten beklenen performans elde edilemeyebilir. Özellikle çevrimsel yükler altında, uç burkulması bayrak

levhasının sünekliğini azaltır. Uç burkulmasının oluşumunu önlemek için Astaneh-Asl (1998) tarafından aşağıdaki bağıntı önerilmiştir:

$$\frac{L_{fg}}{t_L} = 0.75 \sqrt{\frac{E}{F_{yL}}} \quad (3.49)$$

L_{fg} bayrak levhasının serbest uç boyu, t_L bayrak levhası kalınlığıdır. Değerler yukarıdaki bağıntıda yerleştirilirse L_{fg}

$$L_{fg} = 0.75 \sqrt{\frac{E}{F_{yL}}} t_L = 0.75 * \sqrt{\frac{210000}{355}} * 20 = 364.82mm > 188mm \quad (3.50)$$

elde edilir. Levhanın serbest uç kenarları BRB-SC1, BRB-SC2 ve BRB-AC1 modelleri için yeterlidir.

BRB-AC2 numunesi için diğerlerinden farklı olarak blok kayma kontrolü de yapılmıştır. Blok kayma gevrek bir davranıştır ve bu nedenle arzu edilmeyen bir hasar biçimidir. Sünek bir bayrak levhası tasarımı yapmak için, blok kayma hasarının akmadan önce oluşmasına izin verilmemelidir. BÖÇ'ün blok kayma hasarında, bayrak levhası kapasitesinin akma durumundaki kapasitesinden daha büyük olmasını sağlamak için (akmanın daha önce oluşmasını sağlamak için) aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır.

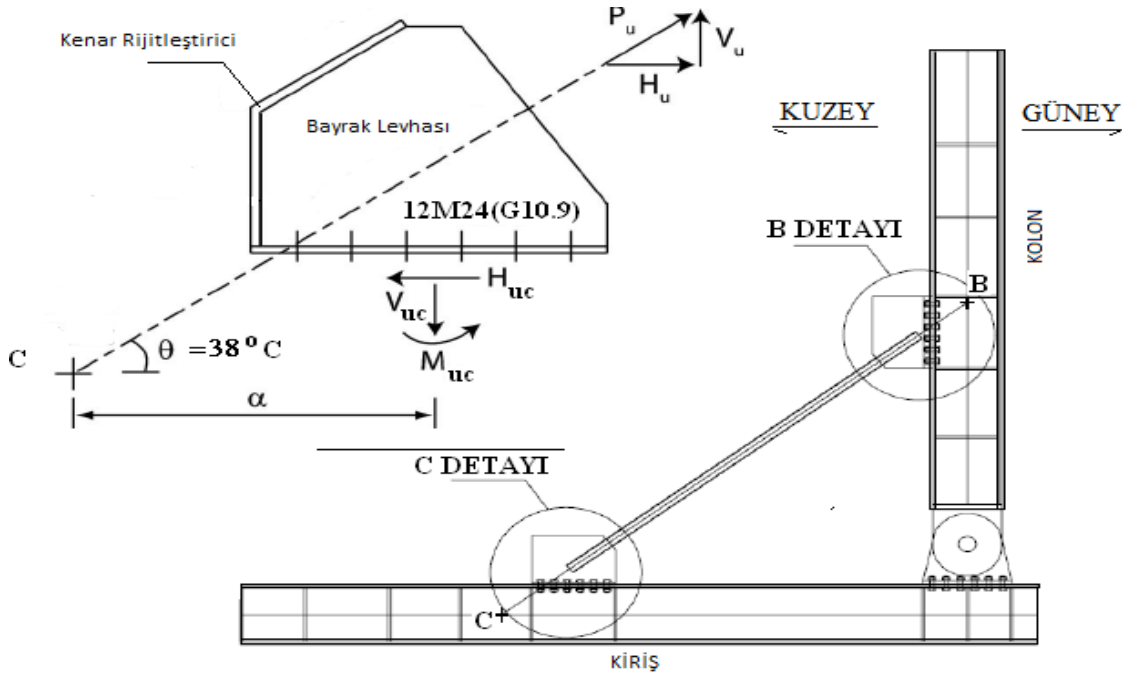
$$\phi R_n : \min \left[0.75(0.6F_{yL}A_{gv} + F_{uL}A_{nt}), 0.75(0.6F_{uL}A_{nv} + F_{uL}A_{nt}) \right] \quad (3.51)$$

Burada A_{gt} çekme etkisindeki brüt alan, A_{gv} kayma etkisindeki brüt alan, A_{nt} çekme etkisindeki net alan, A_{nv} kayma etkisindeki net alan, F_{uL} bayrak levhası minimum çekme dayanımıdır.

3.5 Bayrak Levhalarının Deney Çerçevesine Bağlantısı

Bir uçtaki kesme kuvvetini bayrak levhalarından deney çerçevesine aktaracak bulonlar sürtünme tipi olup 12 adet M24x75 (10.9) HSFG yüksek dayanımlı bulon özelliğindedir. Montaj sırasında bulonlara verilen tork değeri 1030Nm'dir. Şekil 3.11'de denge denklemlerinden mesnete ilişkin bulonlu birleşim için hesaplarda kullanılacak tasarım yükleri verilmektedir. Mesnete birleşim, güvenlik

katsayısı 2 alınarak etkiyen yükler altında göçme oluşmayacak şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin bayrak plakası-deney düzeneği birleşimi aynıdır.



Şekil 3.11 : C düğüm noktası bayrak levhasına gelen normal ve kesme kuvvetleri.

B düğüm noktası için:

$$H_{ub} = P_u \cos \theta = 500 \text{ kN}$$

$$V_{ub} = \phi P_u \sin \theta = 391 \text{ kN}$$

C düğüm noktası için:

$$H_{uc} = P_u \cos \theta = 634.50 * \cos 38 = 500 \text{ kN}$$

$$V_{uc} = \phi P_u \sin \theta = 634.50 * \sin 38 = 391 kN$$

Sürtünme tipi bulonların taşıma kapasitesi

$$\phi_n^R = \phi_u^D h_{sc} T_b^N s \quad (3.52)$$

bağıntısıyla hesaplanır. Burada; $\phi=0.85$ AISC-LRFD (2010)'ye göre birleşimde istenen dayanımda kaymanın oluşmaması için güvenlik faktörü, $\mu=0.35$, ortalama sürtünme katsayısı, D_u uygulanan ortalama öngermenin uygulanan minimum öngermeye oranını gösteren çarpan, $h_{sc}=1$ bulon deliği faktörü (Standart delikler için), $N_s=1$ kayma düzlemi sayısı, T_b bulona uygulanması gereken minimum

öngerme kuvveti olup bulonun çekme kapasitesinin 0.70 katı olarak verilmiştir. Birleşimde çekme bulunması durumunda sürtünme azalacağından (3.52) bağıntısıyla hesaplanan bulon kapasitesi, (3.53) ile hesaplanan k_s sayısı ile çarpılarak azaltılır.

$$k_s = 1 - \frac{T_u}{D_u T_b N_b} \quad (3.53)$$

Burada; N_b çekme kuvvetini aktaran bulonların sayısı, T_u uygulanan çekme kuvveti olduğuna göre bulonun çekme kapasitesi

$$\phi R_n = \phi 0.75 F_u A_b \quad (3.54)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Burada $\phi=0.75$, F_u bulon kopma gerilmesi, A_b bulon alanıdır. Bu durumda 1 adet M24 yüksek dayanımlı bulonun çekme kapasitesi

$$\phi R_n = 0.75 * 0.75 * 1000 \cdot \frac{\pi * 24^2}{4} = 254kN \quad (3.55)$$

olarak bulunmaktadır. 1 adet sürtünme tipi M24 (10.9) bulona uygulanması gereken minimum öngerme kuvveti

$$T_b = 0.70 \phi R_n = 0.70 * 254 = 178kN \quad (3.56)$$

olarak bulunmaktadır. Sürtünme tipi bulonların taşıma kapasitesi

$$\phi R_n = \phi \mu D_u h_{sc} T_b N_s = 0.85 * 0.35 * 1.13 * 1 * 178 * 1 = 59.83kN \quad (3.57)$$

olur. B düğüm noktası için azaltma aşağıdaki gibi:

$$k_s = 1 - \frac{500}{1.13 * 178 * 12} = 0.792 \quad (3.58)$$

1 adet sürtünme tipi M24 (10.9) bulon kesme kapasitesi

$$= 0.792 * 59.83 = 47.38kN$$

12 adet sürtünme tipi M24(10.9) bulon kesme kapasitesi

$$= 12 * 47.38 = 563.56kN > 391kN$$

C düğüm noktası için azaltma katsayısı $k_s=0.838$ bulunmaktadır. Hesaplar tekrarlanırsa; 1 adet sürtünme tipi M24(10.9) bulon kesme kapasitesi $=0.838*59.83=50.14kN$, 12 adet sürtünme tipi M24(10.9) bulon kesme kapasitesi $=12*50.14=601.68>500kN$ dir. Bulonların kapasitesinin yeterli olduğu görülmektedir.

3.6 Alüminyum Alaşım-Çelik Etkileşimi ve Korozyon

Korozyon oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre kimyasal ve elektro kimyasal korozyon olmak üzere iki tür korozyon bulunmaktadır. Kimyasal korozyon metal ve alaşımların gaz ortamlar içindeki oksitlenmesidir. Metal ve alaşımların sulu ortamlar içinde bozulmaları ise elektro kimyasal korozyon olarak bilinmektedir. İki farklı metal birbirine değiyorsa elektro kimyasal bir reaksiyon oluşur. Galvanik seride önce gelen metal daha aktif olup anot olan metaldir. Anot metal normalde olacağından daha önce çözünerek süratli bir biçimde aşınır, diğer metalin (*katot*) yapısı daha sonra bozulur. Galvanik seride birbirine uzak metallerin eşlenmesi önlenmelidir.

Deneyisel çalışmada karşılaşma olasılığı en büyük korozyon şekli Galvanik Korozyon'dur. Alüminyum anot, çelik bulon katot metali oluşturmaktadır. Birbiri ile temas halinde olan farklı türden metal ve alaşımların aynı korozyon terk edilmesi halinde bu metallerde daha reaktif olan korozyon etkisinde kalacaktır. Aktif olan metalin çözünen elektronları katot metal tarafından alınır. Elektron kaybeden metal korozyonu önce başlatır. Daha reaktif olan anodik malzemenin yüzey alanının mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir. Farklı metallerin elektriksel olarak birbirlerini izole etmeleri gereklidir. Bu amaçla genellikle magnezyum ya da çinko kullanılır. Çünkü, bu iki metal galvanik serinin anodik ucunda bulunurlar. Bir diğer yöntemde, korunmak istenen malzeme çinko ile kaplanır. Böylece alaşım korozyon ortamına maruz kaldığında çinko tabaka korozyona uğrayarak alta kalan alaşım korunmuş olacaktır. Korozyonlanma hızının yüksek olmadığı ve sürekli bakım ve yenilemenin sağlanabildiği ortamlarda yüzey kaplamaları yararlı olmaktadır. Sistemde korozyona uğraması mümkün kısımların kalınlıkları diğer kısımlara göre daha kalın tutulmalıdır. Alüminyum alaşımların çelik civatalı birleşimlerinde galvanik korozyona karşı genellikle flüorin reçinesi kullanılmaktadır. Bu çalışmada

alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin birleşiminde kullanılan çelik bulonlarla bu tür bir korozyon oluşturmaması için alüminyum bulon delikleri 1 kat epoksi esaslı boya ile boyanmıştır. Al-Mg türü kaynak telleri kendileri ile benzer oranda magnezyum içeren ana metallerin kaynağında kullanıldığı zaman genel korozyon koşullarına karşı yüksek dayanım göstermektedirler. Ancak bunun yanında, 5xxx serisi kaynak tellerinin 1xxx, 3xxx ve 6xxx serisi ana metallerin kaynağında kullanılması durumunda anodik etki oluşabilmektedir. Sulu ortamlarda ana metal üzerinde herhangi bir olumsuz etki oluşmazken, kaynak metali, kendisi ile ana metalin elektrik potansiyelleri arasındaki farka göre değişen hızlarda korozyona uğrayabilir. Bu nedenle A6061-T6 ana metalin 5183 tipi kaynak metali ile yapılan kaynaklı bağlantısında son pasoda, kaynak dikişinin korozyon dayanımını artırmak için 4043 ya da 4047 gibi Al-Si esaslı kaynak teli uygulanması önerilmektedir.

3.7 Numunelerin Üretimi

Çekme deneyi sonuçlarına göre tüm hesaplar revize edilerek imalatçı firmalara iletilmiş ve üretime başlanmıştır. Çelik numunelerin üretiminde ısıtılardan dolayı kesit yüzeyindeki gerilimi önlemek için parçalar 10mm tolerans verilerek alevle kesilmiş daha sonra soğuk freze ile işlenerek istenilen boyutlara getirilmiştir. BÖÇ'lerin çekirdekleri üzerine, şekil değiştirme ölçümlerinin yapılabilmesi için, metal yüzeyine açılacak kanallara bir adet strain gauge yerleştirilmiştir. Bu, bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla, BÖÇ teknolojisi için yeni bir uygulama olmuştur. Berkitme plakaları kaynaklanmış, bir uçta alın plakalarının kaynağı yapılmış, diğer uçta kaynak ağızları açılmış ve strain-gauge kanalları işlenmiş çelik çekirdekler üzerindeki pas ve kir strain-gauge ve teflon işlemlerinden önce zımparalanarak temizlenmiştir (Şekil 3.12a,b,c). Açılan kanallara strain-gauge CN ile yapıştırılarak, kabloları kanal içine yerleştirilmiştir (Şekil 3.12d). Kanal içine yerleştirilen strain-gauge'lerin üzerine yük hücresinin hasar almasını engellemek için çift bileşenli epoksi reçinesi ile doldurulmuştur (Şekil 3.12e). Tiner ile temizlenen çelik yüzeyler dış tüp boyunca 0.2mm kalınlığında teflonla sarılmıştır (Şekil 3.12f).



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

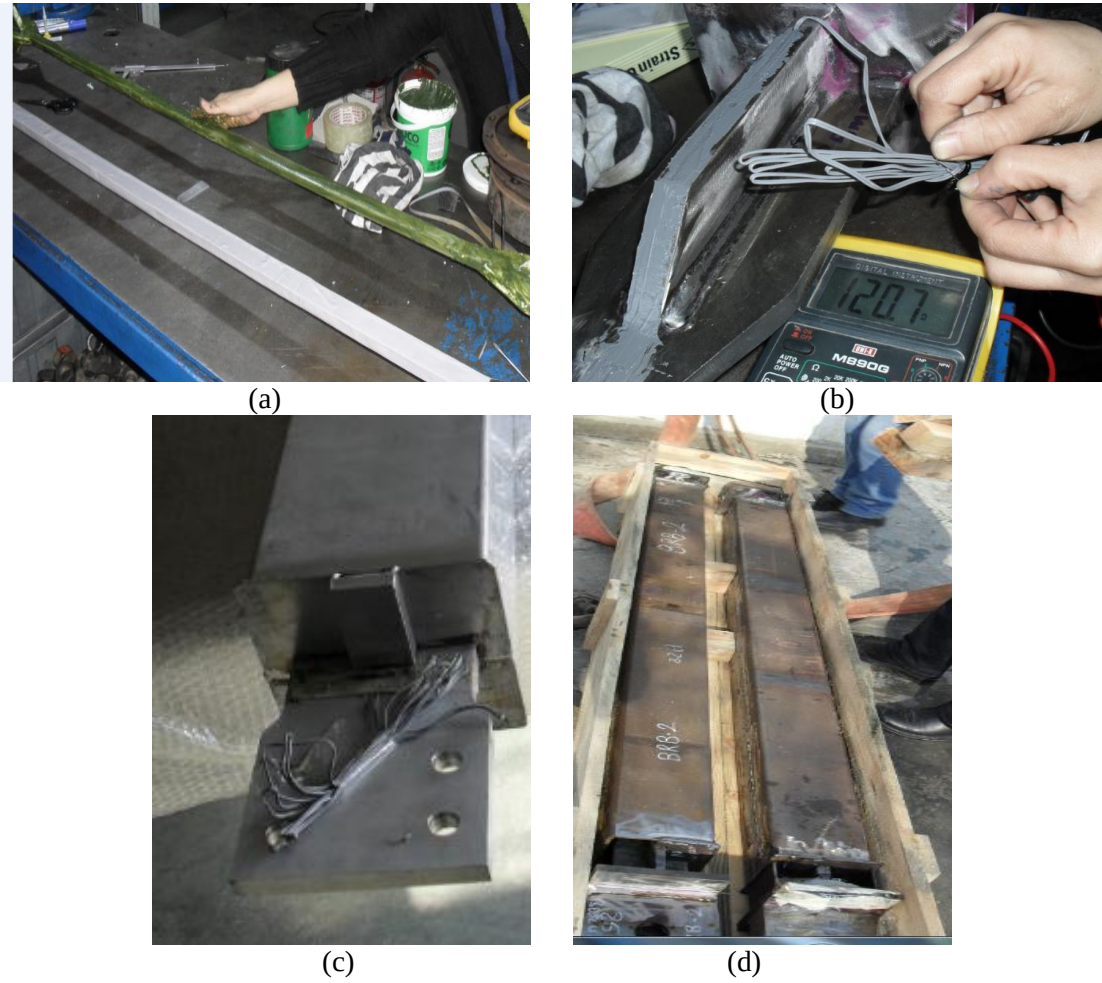


(f)

Şekil 3.12 : (a) Çelik çekirdekler. (b) Kaynak ağızları açılmış çekirdekler. (c) Çekirdeklerin zımparalanması. (d) Strain-gauge'lerin kanallara yerleştirilmesi. (e) Kanalların epoksi ile doldurulması. (f) Çelik çekirdeklerin 0.2mm kalınlığında teflon ile sarılması.

Teflonlama işleminden ve iç boşluk oluşturulması işlemlerinden sonra numuneler kauçuklu gres yağı ile yağlanmıştır (Şekil 3.13a). Kauçuklu gres yağının tercih

edilmesinin nedeni bu yağın suya ve dolayısıyla korozyona dayanıklı olması ve çalışma sıcaklığının yüksek olmadığı alanlarda çabuk ve etkin yağlama sağlamasıdır. BRB-AC2 numunesinde çekirdek kauçuklu gres yağ ile yağlandıktan sonra ayrıca 3mm kalınlıklı ikiyüzlü hava kabarcıklı naylon ile sarılmıştır. Numunelerin üretimi boyunca yapılan sürtünmesiz yüzey oluşturulması ve dolgu malzemesi uygulamalarından sonra kanal içindeki strain-gauge voltmetre ile 120~121.0 ohm direncinde olduğu kontrol edilmiştir (Şekil 3.13b). Dış tüp içinde alt-üst geometrik merkezleştirmesi hassas biçimde yapılan BÖÇ'ler dolgu malzemesi için beton santraline getirilmiştir (Şekil 3.13c,d).



Şekil 3.13 : (a) Çekirdeklerin kauçuklu gres yağ ile yağlanması. (b) Kanal içindeki starin-gauge direnç kontrolünün yapılması. (c) Dış tüp içerisine yerleştirilen BÖÇ'lerin çekirdek merkezleştirilmesinin yapılması. (d) Ahşap kutular içinde BÖÇ'lerin beton santraline getirilmesi.

Düşey pozisyonda özel olarak tasarlanan merkezlendirme sehpalara yerleştirilerek dolgu malzemesi ile doldurulmuştur (Şekil 3.14a,b). Dolum sırasında plastik uçlu tokmak ile dış tüpe hafif titreşimler verilerek malzemenin iyi yerleşmesi sağlanmıştır (Şekil 3.14c). Beton santralinde 3 gün süre ile kür odası koşullarında bekletilen BÖÇ'ler dış tüp kapak kaynakları yapıldıktan sonra ve kaynak ultrason, penetrasyon testlerinden sonra her bir BÖÇ için tasarlanan bayrak plakaları ile birlikte İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarına (STEEL) getirilmiştir. Kaynak penetrasyon testleri gerektiğinde yeniden kontrol edilmiştir (Şekil 3.14d,e).



Şekil 3.14 : (a) BÖÇ'ler için tasarlanan merkezlendirme sehpası. (b) Dolgu malzemesi ile doldurulması. (c) Dolgu malzemesinden basınç dayanımının belirlenmesi için numune alınması. (d) Metal içindeki strain-gauge akım kontrolünün yapılması.



(d)



(e)

Şekil 3.14 (devam) : (e) Penetrasyon deneyi tamamlanan BRB-AC1 numunesi.
(f) Montaja hazır BÖÇ'ler.

3.8 Deney Düzeneği ve Numunelerin Montajı

3.8.1 Deney düzeneği montajı

Deneysel çalışmada İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda en fazla 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam $\pm 300\text{mm}$ yerdeğiştirme uygulayabilen, tamamen bilgisayar kontrollü hidrolik veren (actuator) ile numunelere ters yönlü çekme ve basınç kuvvetleri, akmadan önce ve sonra yerdeğiştirme kontrollü çevrimler olarak uygulanmıştır (Şekil 3.15a). Deney numuneleri deney düzeneğine actuator ile herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirilmiş, actuatordan gelen yük, çaprazın aksenal doğrultusunun kolonla kesiştiği noktaya uygulanmıştır. Actuator dört noktasından güçlü duvara mesnetlenmiş ankraj plakasına, 8 adet M20 (10.9) bulonların bulunduğu ve $460 \times 280 \times 50\text{mm}$ boyutlarında alın plakası ile birleşimi yapılmıştır (Şekil 3.15b). Actuator yük hücresinin kolon güney yüzeyi ile birleşimi de aynıdır (Şekil 3.15c,d). Mekanik tork anahtarı actuatorun her iki uç mesnetlenme noktasındaki M20 bulonları 607Nm moment değeri ile torklanarak birleşimdeki olası kayma boşlukları alınmıştır.



(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.15 : (a) 250kN çekme-itme kapasiteli actuator. (b) Actuator güçlü duvar uç bağlantısı ve M20 bulonların torklanması. (c) Actuator-kolon uç bağlantısı. (d) Actuator-kolon birleşimini sağlayan M20 bulonların torklanması.

Deney düzeneği HEA400 profilinden üretilmiş, çelik temel kirişine mafsallı bağlı çelik kolon ve kolonun düzlem dışı hareketini engelleyen çift taraflı çelik payandalardan oluşmaktadır (Şekil 3.16a). Payandalar, kolonu olası düzlemdışı hareketlere karşı, yüksekliği boyunca iki noktadan desteklenmekte olup destek noktaları kayıcı elemanlardan oluşturulmuştur (Şekil 3.16b). Deney düzeneğinin ana parçalarını birbirine bağlayan mafsallı 70mm çaplı milden oluşmaktadır (Şekil 3.16c). BÖÇ'lerin deney düzeneğindeki stabilitesini sağlamak için gereken mesnet noktaları berkitme plakaları ile güçlendirilmiştir (Şekil 3.16d). Böylece düzeneğe olası düzlem dışı hareket engellenerek deney sisteminin elastik kalması sağlanmıştır.



(a)



(b)



(c)



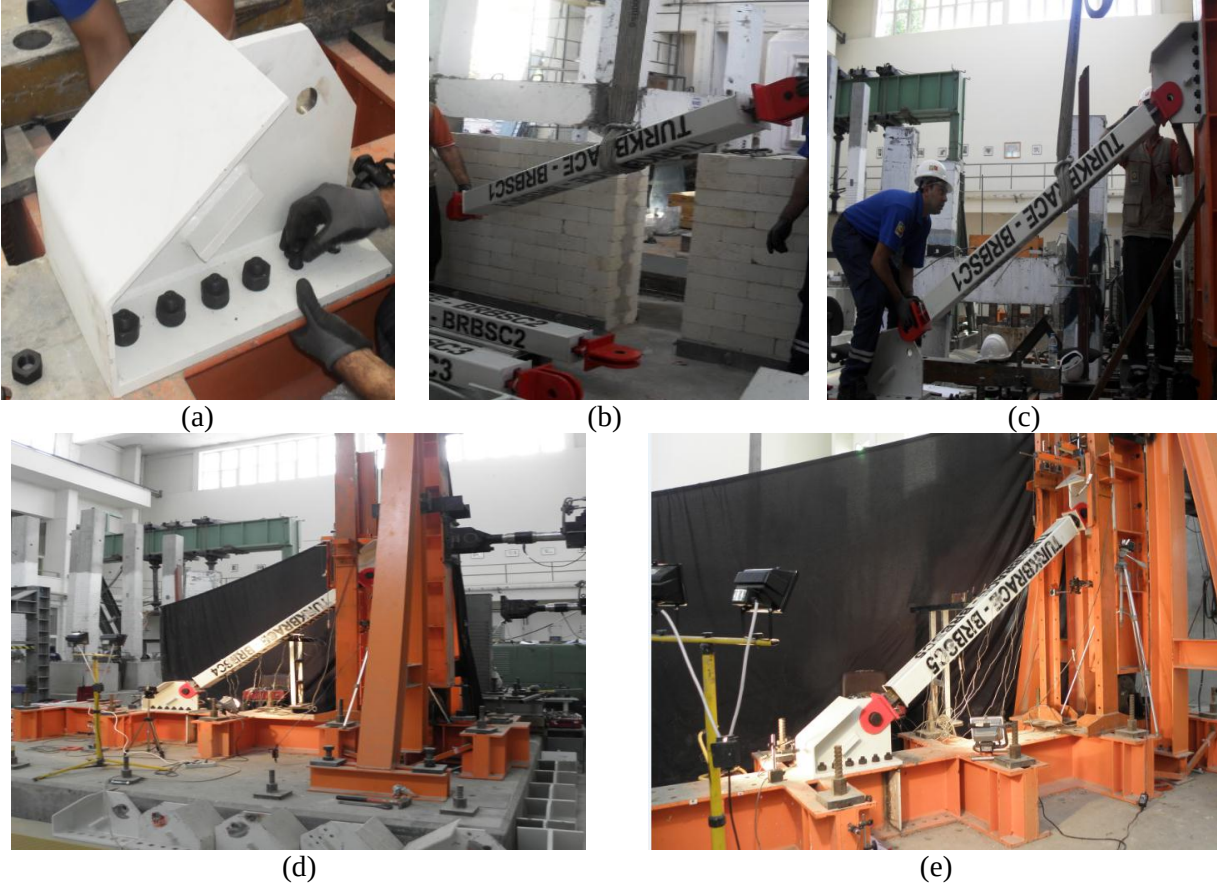
(d)

Şekil 3.16 : (a) Deney düzeneği genel görünüşü. (b) Düzlem dışı hareketi engellemek için oluşturulan kayıcı roller. (c) Kolon-Kiriş mafsalı. (d) Kiriş-BÖÇ mesnet noktası berkitme takviyesi.

3.8.2 Numunelerin montajı

3.8.2.1 BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri

Deney düzeneğinin montajından sonra deney sırasına göre önce çelik BÖÇ'lerden BRB-SC1-0'nın montajı yapılmıştır. Üst ve alt bayrak plakaları yerlerine yerleştirilip bulonlarla sabitleme yapılamadan önce dikkatli bir şekilde BÖÇ'ün mafsal plakaları ile bayrak plakası delikleri aynı konuma getirilerek M40 (10.9) bulonları yerlerine takılmıştır (Şekil 3.17a,b,c). Böylece numunenin yerleşiminde oluşabilecek eksantrisiteler engellenmiştir. Montaj sonrası BRB-SC1'in genel görünüşü Şekil 3.17d'de BRB-SC2'nin genel görünüşü Şekil 3.17e'de verilmiştir. BRB-SC2'nin montajı aynı sıra ve kurallara göre yapılmıştır. Deneysel etiket BRB-SC1 için TURKBACE-BRBSC4, BRB-SC2 için TURKBACE-BRBSC5'dir.



Şekil 3.17 : (a) Bayrak plakalarının birleşimi. (b) Numunenin montajı. (c) Bayrak plakası delikleri ile mafsal plakası deliklerinin çakıştırılması. (d) BRB-SC1 montaj sonrası genel görünüşü. (e) BRB-SC2'nin montaj sonrası genel görünüşü.

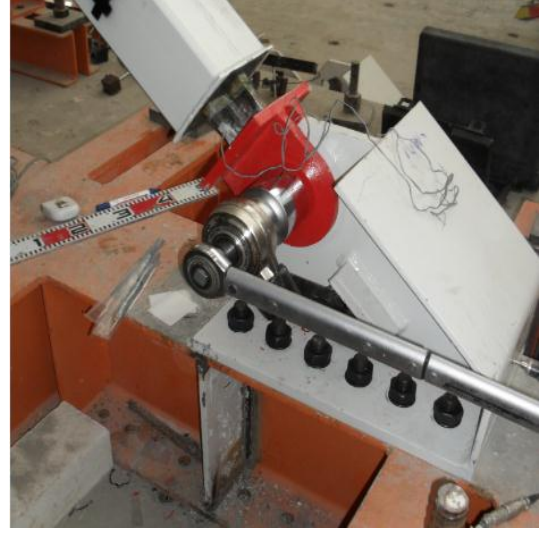
ASTM 490M-09a (2009) standardına uygun olarak 10.9 kalitesindeki yüksek dayanımlı bulonların torklanması ve kontrol edilmesi sırasında gövdesi ve dişleri hafif yağlanmış bulonlar yerlerine yerleştirilmiştir. Her birleşimde sürekli olarak kalacak bulonların en az üçte biri bağlanarak bulon boşluğu anahtar ile alınmış, montaj işlemi tamamlandığında bulon çapına bağlı olarak verilmesi gereken tork değeri ile somun tarafından torklama yapılmıştır. Bulon çapı ve kalitesine göre M40 (10.9) için 2200Nm (Mafsal plakası-Bayrak plakası), M24 (10.9) için 1030Nm (Bayrak plakası-Kolon/Kiriş başlık) M16 (10.9) için 288Nm tork değeri ayarlanabilir GEDORE-RASHOL mekanik tork anahtarıyla kontrol edilerek verilmiştir.

Şekil 3.18a'da çapraz üst uç mafsal plakasının bayrak plakasına, Şekil 3.18b'de çapraz alt uç mafsal plakalarının bayrak plakasına bulonlu birleşimleri verilmektedir. Şekil 3.18c ve 3.18d'de sırasıyla bayrak plakası-deney çerçevesi üst ve alt bulonlu birleşimi verilmektedir.

Tork anahtarı her iki yöne çevrilebilir kafa yapısına ve ayarlanabilen tork değerine sahiptir. M40 ve M24'lük bulonların uygulanan 5:1 arttırma oranına sahip tork arttırıcı kullanılmıştır. Bu tork arttırıcı yapısındaki birden çok kademesi olan planet dişler ile her kademede giriş torkunu 5 kat arttırmaktadır. Tork arttırıcı kullanılırken uygulanan kuvvette karşı gelen yüksek tork değerinin neden olduğu tepki kuvvetinin yutulması için sağlam bir yüzeye dayanması sağlanmıştır.



(a)



(b)



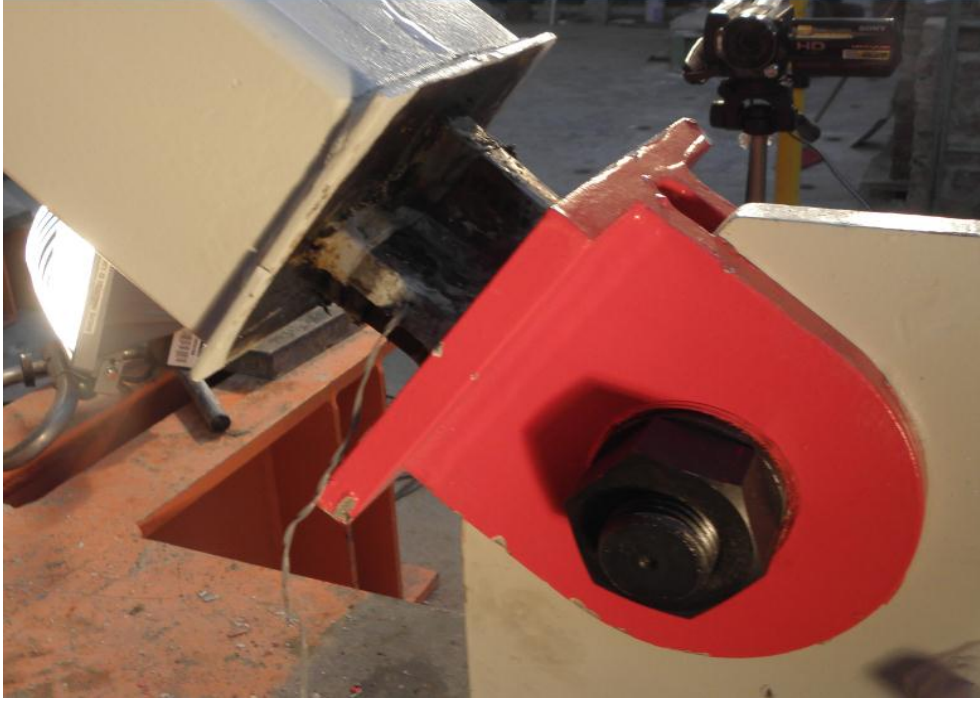
(c)



(d)

Şekil 3.18 : (a) Çaprazın üst mafsalsal birleşimi ve M40 bulonun torklanması. (b) Çaprazın alt mafsalsal birleşimi ve M40 bulonun torklanması. (c) Alt bayrak plakasının deney düzeneğine birleşimi ve M24 bulonların torklanması. (d) Üst bayrak plakasının deney düzeneğine bağlantısı ve M24 bulonların torklanması.

BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılan kanallara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer (BRBKN strain gauge) kablo ucunu, çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin deney çerçevesine montajı sırasında, switch box'a bağlantısının daha rahat yapılabilmesi için alt uçta kalacak şekilde düzenlenmiştir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19 : Kanaldaki strain-gauge'in (BRBKN) çekirdekten çıktığı nokta.

3.8.2.2 BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri

BRB-AC1 ve BRB-AC2 alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin birleşiminde kullanılan çelik bulonlarla galvanik korozyon oluşmaması için alüminyum bulon delikleri Doç. Dr. Cem Yalçın'ın önerisi ile 1 kat epoksi esaslı boya ile boyanmıştır (Şekil 3.20a). Bulon çapı ve kalitesine göre M40 (10.9) için 2200Nm (Mafsal plakası-Bayrak plakası), M24 (10.9) için 1030Nm (Bayrak plakası-Deney çerçevesi) tork değeri, ayarlanabilir GEDORE-RASHOL mekanik tork anahtarıyla verilmiştir (Şekil 3.20b). BRB-AC1'in montaj sonrası genel görünüşü Şekil 3.20c'de verilmektedir.



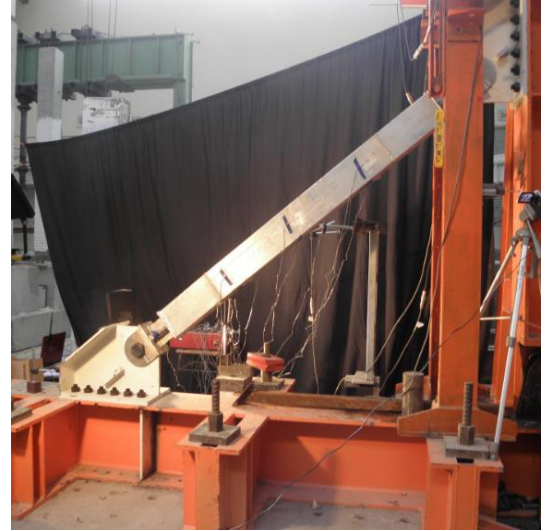
(a)



(b)



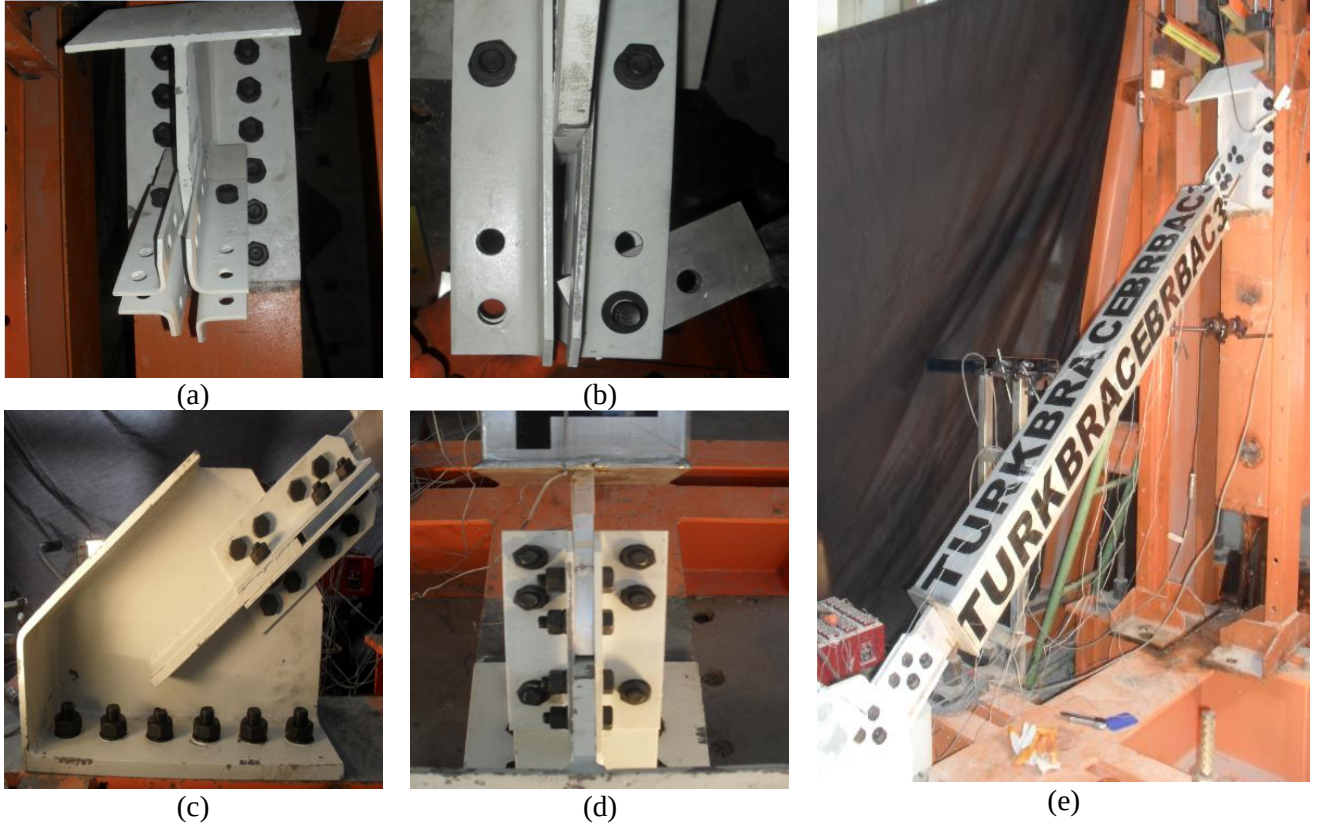
(c)



(d)

Şekil 3.20 : (a) Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin mafsallakalarına 1 kat epoksi boya uygulamasının yapılması. (b) Birleşim bulonlarının torklanması. (c) BRB-AC1 numunesi montaj sonrası genel görünüş.

Şekil 3.21'de BRB-AC2'nin bulonlu, alüminyum alaşımlı plakalardan oluşturulmuş haçvari uç kesitin montaj adımları verilmektedir (Şekil 3.21a,b). BRBAC2'nin uç bağlantısında kullanılan M16 (10.9) bulonları için 288Nm moment değeri, ayarlanabilir GEDORE-RASHOL mekanik tork anahtarıyla kontrol edilerek verilmiştir (Şekil 3.21c,d). Montajdan sonra BRB-AC2'nin genel görünüşü Şekil 3.21e'de verilmektedir. Deneysel etiket BRB-AC1 için TURKBRACE-BRBAC1, BRB-AC2 için TURKBRACE-AC3'dür.



Şekil 3.21 : (a) BRB-AC2'nin haçvari uç kesitin montajı. (b) Alüminyum besleme plakalarının yerleştirilmesi. (c) Uç birleşimin yandan görünüşü. (d) Uç birleşimin üstten görünüşü. (e) BRB-AC2'nin montaj sonrası görünüşü.

3.9 Deneylerde Kullanılan Ölçüm Aletleri

Ölçüm düzeneğinde tamamı TML marka yerdeğiştirme (LVDT) ve şekildeğiştirme (strain-gauge) ölçerler kullanılmıştır. Ölçüm aletlerinin yerleşimi çerçevenin ve BÖÇ'ün tümsel davranışını olabildiğince izlemek için tasarlanmıştır. Kolon, kiriş ve bayrak plakalarının elastik kalıp kalmadığı kritik noktalara yerleştirilen strain-gauge ve LVDT'lerle kontrol edilmiştir. Ana çerçevenin elastik kalması BÖÇ'ün etkili çalışması bakımından önemlidir.

Çizelge 3.13'de deneyden kullanılan tüm cihazların kodları ve yerleri verilmektedir. Her ölçüm kanalı özellik, eleman ismi ve yerine göre etiketlenmiştir.

Çizelge 3.13 : Ölçüm cihazlarının listesi.

#	LVTD'nin Kodu	LVTD'nin Tipi	Kanal Numarası	Not
1	T1W	SDP-300D	T1W-CH11	Actuator-Kolon, Batı, 1860mm
2	T1E	SDP-300D	T1E-CH12	Actuator-Kolon, Doğu, 1860mm
3	T2	CDP-100C	T2-CH13	Kolon, Kuzey, 1020mm
4	T3	CDP-5	T3-CH14	Kolon, Güney, 375mm
5	T4	CDP-5	T4-CH15	Kiriş, Güney, 0mm
6	T5	SDP-200D	T5-CH16	Düzlemdişi, BÖÇ-Orta, 884mm
7	T6	CDP-10	T6-CH17	Bayrak Plakası, Alt, 115mm
8	T7	SDP-100C	T7-CH18	Düzlemdişi, BÖÇ-Alt, 50mm
9	T8	CDP-10	T8-CH19	Kiriş, Batı-Doğu, 325mm
10	T9	CDP-10	T9-CH20	Kiriş, Doğu-Batı, 325mm
11	T10	SDP-100C	T10-CH42	BÖÇ, Alt, Boyuna doğrultuda
12	T11	SDP-100C	T10-CH43	BÖÇ, Üst, Boyuna doğrultuda
#	Strain-Gauges		Kanal Numarası	Not
13	BRB1U	Strain-Gauge	BRB1U-CH21	BÖÇ-DİŞTÜP, Alt, Üst
14	BRB1L	Strain-Gauge	BRB1L-CH22	BÖÇ-DİŞTÜP, Alt, Alt
15	BRB1W	Strain-Gauge	BRB1W-CH23	BÖÇ-DİŞTÜP, Alt, Batı
16	BRB1E	Strain-Gauge	BRB1E-CH24	BRB DİŞTÜP Alt, Doğu
17	GEL1	Strain-Gauge	GEL1-CH25	Bayrak Plakası, Alt, Doğu, Üst
18	GEL2	Strain-Gauge	GEL2-CH48	Bayrak Plakası, Alt, Doğu, Alt
19	GEU1	Strain-Gauge	GEU1-CH27	Bayrak Plakası, Üst, Doğu, Üst
20	GEU2	Strain-Gauge	GEU2-CH28	Bayrak Plakası, Üst, Doğu, Alt
21	BE1	Strain-Gauge	BE1-CH29	Kiriş, Doğu, Üst
22	BW1	Strain-Gauge	BW1-CH30	Kiriş, Batı, Üst
23	BRB2W	Strain-Gauge	BRB2W-CH31	BÖÇ-DİŞTÜP, Orta, Batı
24	BRB3U	Strain-Gauge	BRB3U-CH32	BÖÇ-DİŞTÜP, Üst, Üst
25	CW1	Strain-Gauge	CW1-CH33	Kolon, Batı, Üst
26	CE1	Strain-Gauge	CE1-CH34	Kolon, Doğu, Üst
27	BRB3L	Strain-Gauge	BRB3L-CH35	BÖÇ-DİŞTÜP, Üst, Alt
28	BRB3W	Strain-Gauge	BRB3W-CH36	BÖÇ-DİŞTÜP, Üst, Batı
29	BRBKN	Strain-Gauge	BRBKN-CH37	BÖÇ-Kanal
30	BRB3E	Strain-Gauge	BRB3E-CH44	BÖÇ-DİŞTÜP, Üst, Doğu
31	BRB2E	Strain-Gauge	BRB2E-CH45	BÖÇ-DİŞTÜP, Orta, Doğu
32	BRB2U	Strain-Gauge	BRB2U-CH46	BÖÇ-DİŞTÜP, Orta, Üst
33	BRB2L	Strain-Gauge	BRB2L-CH47	BÖÇ-DİŞTÜP, Orta, Alt

Bütün numunelere ilişkin ölçüm ve yerleşim cihazlarının genel görünüşleri Şekil 3.22'de verilmektedir.

Ölçüm Cihazları Yerleşimi		Ölçüm Cihazları Gösterimi	
BRB	BÖÇ Kesitini Gösterir		Doğrusal Yerdeğiştirme Ölçer (LVDT)
K	Kuzey Yüzündeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		
G	Güney Yüzündeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		
[...]	Arka Yüzdeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		Tek Doğrultuda Şekil Değiştirme Ölçerler (Strain-Gauge)
U	Üst Yüzdeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		
L	Alt Yüzdeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		
B	Kiriş Üzerindeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		Enine Doğrultuda Yerleştirilen Yerdeğiştirme
C	Kolon Üzerindeki Ölçüm Cihazlarını Gösterir		

Şekil 3.22 (devam) : Düzlem içi yerdeğiştirme ölçümü yapan cihazların şematik yerleşimi.

3.9.1 Tek eksenli şekildeğiştirme ölçerler (Strain Gauges)

Kritik noktalara yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerler çerçevenin davranışının kontrol edilmesini sağlamaktadır. Böylece çelik çerçevenin kolon ve kirişinde herhangi bir hasarın oluşmaması ve tasarlanan BÖÇ'ün etkinliği ve verimliliği irdelenmektedir. Her bir deneyde en fazla 24 adet şekildeğiştirme ölçer kullanılmıştır. Şekildeğiştirme ölçerlerden 2'si kolon ve 2'si kiriş başlık doğu-batı yüzlerine, 2'si alt, 2'si üst bayrak levhası doğu-batı yüzlerine monte edilerek deney düzeneğinin yüklemeler sırasında elastik kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.23 : Bayrak levhasına strain-gauge yerleşimi.

Tüm davranışı izleyebilmek için yalnızca ilk deneyde şekildeğiştirme ölçerler numunelerin dış tüp temiz boyunun 1/4'üne ve bütün yüzeylere olmak üzere toplam 12 adet monte edilmiştir (Şekil 3.24). TML-YFLA-10-3L-120ohm şekildeğiştirme ölçerler çelik yüzeyine uygun olup çelik BÖÇ'ler, çelik çerçeve ve çelik bayrak levhaları için kullanılmıştır.



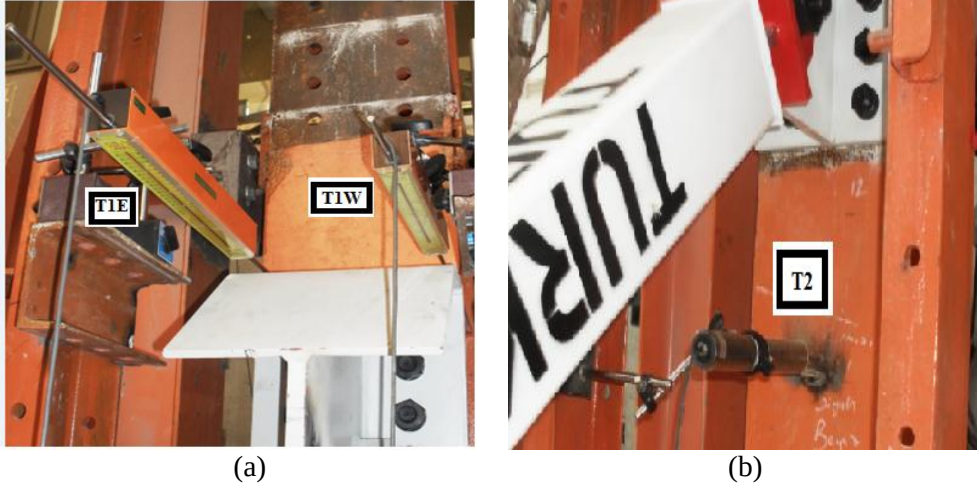
Şekil 3.24 : Çapraz dış tüp boyunca strain-gauges yerleşimi.

3.9.2 Yerdeğiştirme Ölçerler (LVDTs)

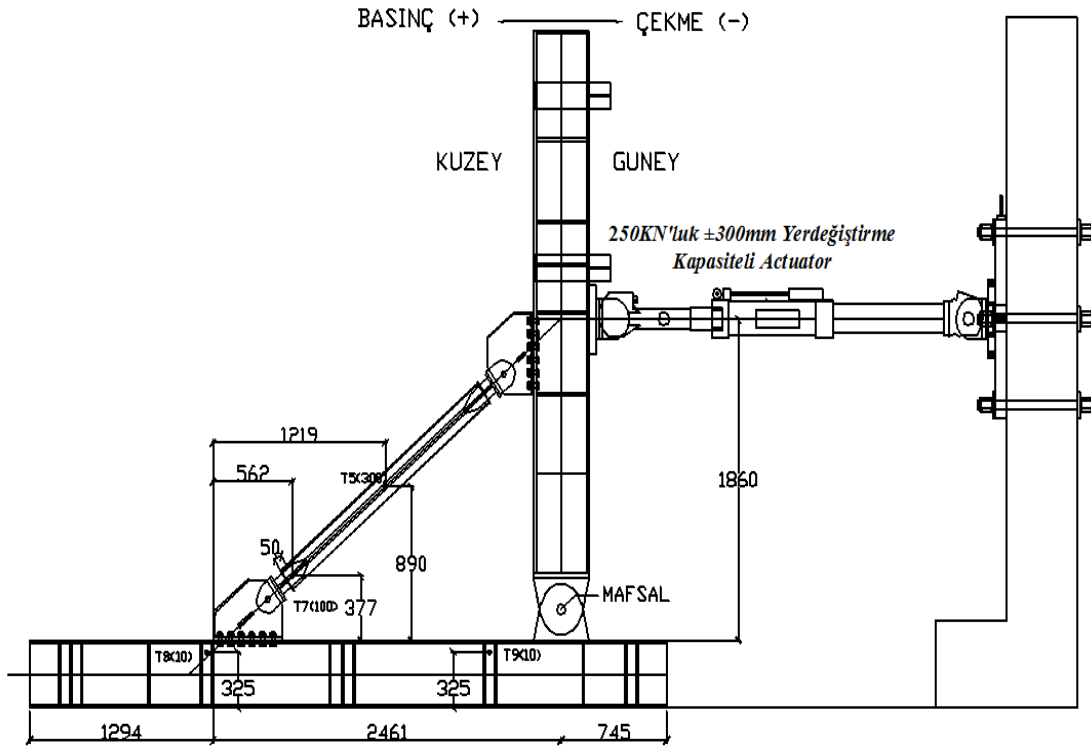
Burkulma deneylerinde yatay/yanal yerdeğiştirmeler olası burkulma sonrasında ani ve önemli değerlere vardığından deneyde kullanılacak yerdeğiştirme ölçerler bu değerleri ve hızı belirleyebilecek niteliktedir. Yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimleri bütün deney düzeneklerinde aynıdır. T1E ve T1W deney sırasında yerdeğiştirme kontrolü yapabilmek için kullanılmıştır. En önemli kontrol parametresi olan tepe yerdeğiştirmesi ölçümleri 300mm ölçüm kapasiteli yerdeğiştirme ölçerler kullanılarak yapılmıştır (Şekil 3.25a). T2 ise deney düzeneğini oluşturan kolonun yerdeğiştirmesinin ölçülmesinde kullanılmıştır (Şekil 3.25b).

BÖÇ'lerin çerçeve deneyleri oldukça hassas deneyler olduğundan ve doğru bilgi elde edebilmek için numunelere yeterli sayıda ölçüm cihazı yerleştirilmiştir. Çizimlerde karışıklığı önlemek adına gösterilmemiş olmasına karşın deney düzeneğinin düzlem dışı hareketini engelleyecek bir stabilite çerçevesi de kullanılmıştır (Şekil 3.26). BÖÇ'lerin düzlem dışı hareketlerini belirleyip yerdeğiştirmeleri ölçmek için çapraz ortasına T5 yerdeğiştirme ölçer, dış tüp uç noktasından 50mm içeride olacak şekilde T7 yerdeğiştirme ölçeri yerleştirilmiştir (Şekil 3.27). Genelde amaç düzlem içi ve

dışı burkulmaları engellemek olduğundan, bu değerlerin minimumda kaldığı deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır.



Şekil 3.25 : (a)T1E veT1W yerdeğiştirme ölçerlerin deney çerçevesi üzerine yapılan yerleşimi. (b) T2 yerdeğiştirme ölçerin deney çerçevesine yerleşimi.



Şekil 3.26 : Düzlem dışı ölçüm yapan cihazların yerleşimi.



Şekil 3.27 : Çaprazın düzlem dışı hareketini kontrol eden T5 ve T7 yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.

T3, T4, T6, T8 ve T9 ana kirişteki birleşimlerde oluşabilecek olası kaymaları kontrol etmek için kullanılmıştır (Şekil 3.28a,b). BÖÇ'ün aksel yerdeğiştirmesini kontrol edebilmek için ayrıca çaprazın üst ve alt açılım noktalarına T10 ve T11 yerdeğiştirme ölçerler yerleştirilmiştir (Şekil 3.28c).



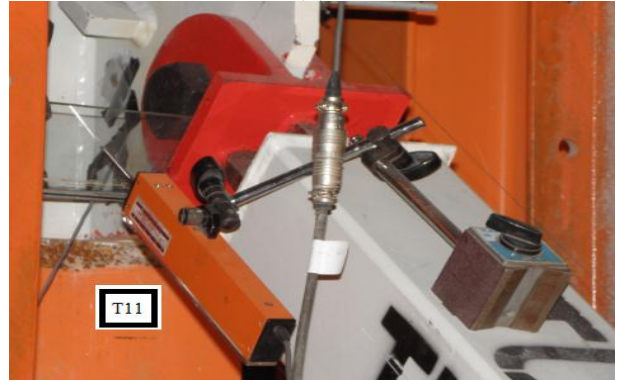
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 3.28 : Kiriş birleşimlerindeki olası kaymaları kontrol eden yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.

3.9.3 Veri toplama sistemi

Numuneler üzerine yerleştirilen, şekildeğiştirme ölçer, yerdeğiştirme ölçer ve yük ölçerlerin ürettiği analog bilgiyi fiziksel büyüklüğe çevirip saklamak üzere kullanılan veri toplama sistemi yönlendirme kutuları, veri dönüştürücü, GPIB kart ve kablosu, bilgisayar ve bir yazılımı içermektedir. Esasen birbirinden bağımsız olan yükleme ve veri toplama sistemleri, yükleme sistemini kontrol eden ünitenin gönderdiği uyarı işareti ile eş zamanlı olarak veri biriktirilmektedir. Uygulanan yatay ve düşey yükler değişik kapasitedeki yük hücreleri ile ölçülmüştür. Hidrolik veren hizasındaki yatay yerdeğiştirme çerçeveye bağlı olan ve hidrolik verenin kontrolü için de kullanılan 2 adet TML-SDP-D-300 yerdeğiştirme ölçerler ile saptanmıştır. Bu iki önemli büyüklükle birlikte, numunelerde meydana gelen şekildeğiştirme ve yerdeğiştirmeleri ölçmek için çok sayıda şekildeğiştirme (strain-gauges) ve yerdeğiştirme ölçerler (LVDTs) kullanılmıştır. Deneysel çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda MTS sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar merkez kontrol odasından yönetilmektedir (Şekil 3.29). Bu odada yer alan ve MTS sistemi OS/2 WARP İşletim Sistemi ile çalıştırılan donanım üzerinden desteklenmektedir. Bu işletim sistemi üzerinde çalıştırılan TestWare-SX isimli yazılım yerdeğiştirme kontrollü/kuvvet kontrollü olarak kullanıcı tarafından tanımlanmış limitlerle ve yerdeğiştirme adımları ile sisteme yüklenmektedir. Her bir tanımlı kayıt adımı için sırasıyla aşağıda verilen işlem adımları tekrarlanmaktadır:

RAM Kontrollü (Bu adımda donanım hafızası kontrol edilir, her adım için yaklaşık 1sn kadar bir süreyi ifade eder.)

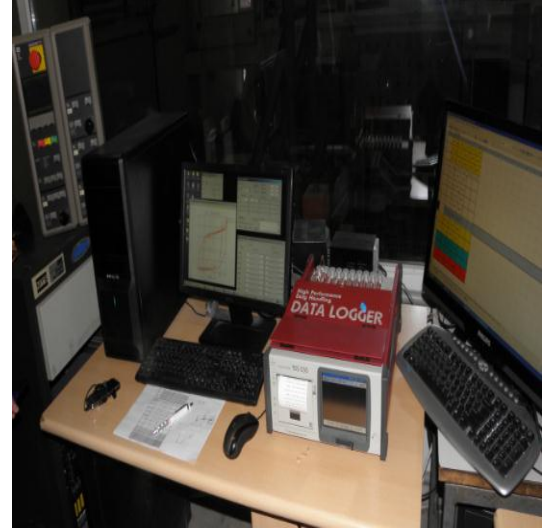
Trigger Delay (Bu adımda hidrolik sistem tarafından oluşturulan hareketin elemanlar üzerine tümüyle aktarılması için bir gecikme oluşturulur, her adım için yaklaşık 2sn kadar bir süreyi ifade eder.)

Veri Toplama (Bu adımda tüm okuma noktalarından o adımdaki durumları sorgulanarak veri transferi yapılır, her adım için kanal sayısı 0.08sn kadar bir süreyi ifade eder.)

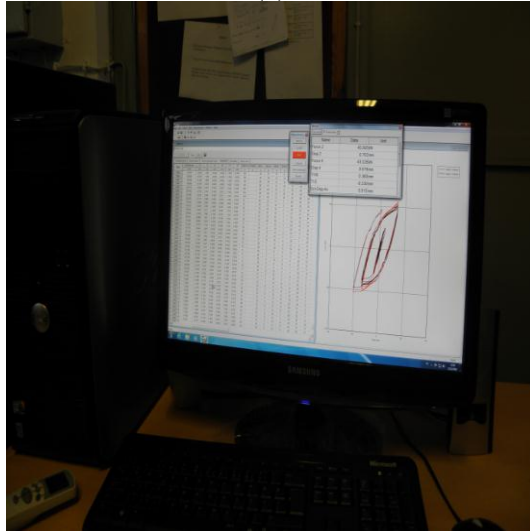
Deneyler sırasında yukarıda açıklanan şekilde yapılan okumalardan elde edilen veriler için verileri çoğaltarak veri toplayıcı üzerinden kontrol odasına aktaran AWS-50C Switch Box (Kanal Çoğalma Kutusu) (Şekil 3.29a) kullanılmaktadır. Sonrasında 10 kanallı TML-TDS 302 veri toplayıcı (data logger) ve buna bağlı Visual LOG TDS-7130 programı ile elde edilen elektriksel bilgi grafik ve text dosyası olarak kaydedilmektedir (Şekil 3.29b,c,d).



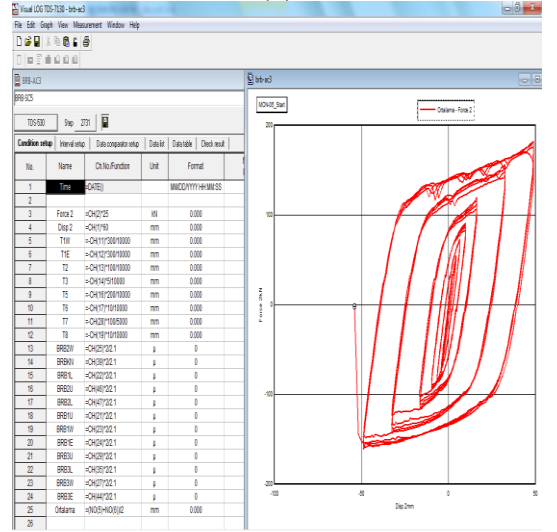
(a)



(b)



(c)



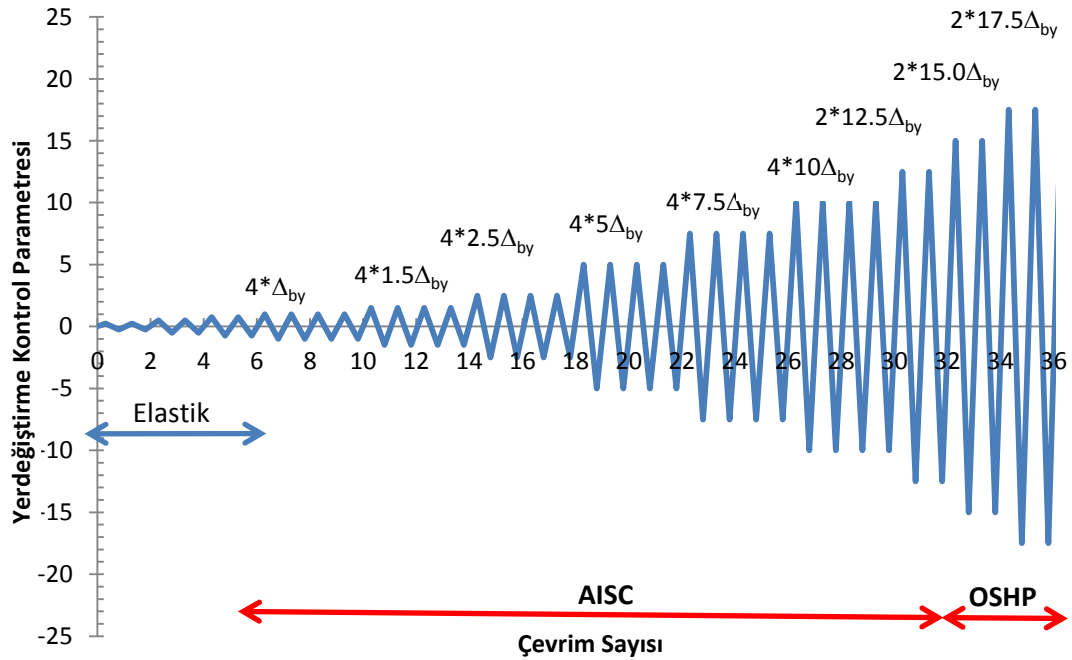
(d)

Şekil 3.29 : (a) Switch Box. (b) Merkez kontrol odası genel görünüş ve Data Logger. (c) Visual Log TDS-7130. (d) BRB-AC2 deney veri ve grafiği.

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1 Yükleme Protokolü

İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda en fazla 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam $\pm 300\text{mm}$ yerdeğiştirme uygulayabilen, tamamen bilgisayar kontrollü actuator ile ters yönlü çekme ve basınç kuvvetleri, akmadan önce ve akmadan sonra yerdeğiştirme kontrollü çevrimler olarak uygulanmıştır. Deneysel çalışma için 4 çaprazın yön değiştiren tekrarlı yüklemeler altındaki statik yükleme deneyleri, AISC-341 (2010)'te BÖÇ'ler için verilen yükleme ölçütlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Yükleme protokolü Şekil 4.1'de verilmektedir. Burada Δ_{by} BÖÇ'ün aksenal doğrultuda ilk akmasındaki yerdeğiştirmesidir.



Şekil 4.1 : Δ_{by} 'ye göre normalize edilmiş yükleme protokolü.

Bu yükleme protokolünde yerdeğiştirme pikleri simetrik alınmakla birlikte BÖÇ'ler için geliştirilen farklı protokoller vardır (Örneğin; yakın fay etkisini dikkate alan ve

simetrik olmayan pikler içeren protokoller gibi). Numunelerin eksenlerindeki boy değişimiyle ilişkili olan tepe yatay yerdeğiştirmesi kontrol parametresi olarak alınmıştır. Akmadaki yerdeğiştirme kuramsal olarak SAP2000 programında yapılan statik itme analizi ile gerçek malzeme karakteristikleri kullanılarak tahmin edilmiştir.

Çizelge 4.1’de numunelere uygulanan yükleme protokolünün özeti verilmektedir. AISC 341-10 (2010)’te, BÖÇ’lü çerçevesi sisteminin eksenel olmayan yükleme durumunda çaprazın tasarım kat ötelemesindeki şekildeğiştirme miktarı Δ_{bm} ’nin $5\Delta_{by}$ olarak alınabileceği önerilmektedir. Ayrıca, Δ_{bm} , kat yüksekliğinin %1’inden az olmamalıdır ($\Delta_{bm}/h > 0.01$). Akmadan önceki elastik bölgede $2*\Delta_{by}/4$, $2*2\Delta_{by}/4$, $2*3\Delta_{by}/4$ genlikli yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır. Ardından $4*1\Delta_{by}$, $4*1.5\Delta_{by}$, $4*2.5\Delta_{by}$, $4*5\Delta_{by}$, $4*7.5\Delta_{by}$, $4*10\Delta_{by}$ yerdeğiştirme genlikli standart yükleme protokolü, sonrasında ise $2*12.5\Delta_{by}$, $2*15\Delta_{by}$, $2*17.5\Delta_{by}$ OSHPD’nin (Office of Statewide Health Planning and Development) yüksek yerdeğiştirme genlikli yükleme protokolünün uygulanması amaçlanmıştır (Vargas ve Bruneau, 2006). Bu çalışma kapsamındaki numunelerde bu son adım olan ve OSHPD’nin önerdiği yerdeğiştirme düzeylerine ulaşılamamıştır.

Her numune için standart yükleme protokolü tamamlandıktan sonra numuneler kopuncaya kadar $3\Delta_{bm}$ sınırına kadar az tekrarlı yorulma deneyi uygulanması hedeflenmiştir. AISC 341-10 (2010) ilkelerine göre yükleme protokolü sonunda toplam inelastik eksenel yerdeğiştirmenin en az $200\Delta_{by}$ olması gerektiği belirtilmektedir. Bu koşul, eksenel yükleme deneylerinde zorunlu olmakla birlikte kullanılan deney düzeneğine benzer BÖÇ deneylerinde zorunlu tutulmamaktadır (AISC 341-10, 2010).

Çizelge 4.1 : Statik yükleme protokolü.

Çevrim Sayısı	Eksenel yerdeğiştirme		İnelastik yerdeğiştirme	η Kümülatif inelastik yerdeğiştirme	Numunelerin hesaplanan alt/üst uç eksenel yerdeğiştirmesi (mm)			
	$\Delta_{bm} = 5\Delta_{by}$				BRB-AC1	BRB-AC2	BRB-SC1	BRB-SC2
4	$0.2\Delta_{bm}$	$1.0\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (1.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 0\Delta_{by}$	$0\Delta_{by}$	2.68	2.58	2.13	2.61
4	$0.3\Delta_{bm}$	$1.5\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (1.5\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 4\Delta_{by}$	$4\Delta_{by}$	4.02	3.87	3.20	3.92
4	$0.5\Delta_{bm}$	$2.5\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (2.5\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 12\Delta_{by}$	$16\Delta_{by}$	6.70	6.45	5.33	6.53
4	$1.0\Delta_{bm}$	$5.0\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (5.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 32\Delta_{by}$	$48\Delta_{by}$	13.40	12.90	10.65	13.05
4	$1.5\Delta_{bm}$	$7.5\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (7.5\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 52\Delta_{by}$	$100\Delta_{by}$	20.10	19.35	15.98	19.58
4	$2.0\Delta_{bm}$	$10\Delta_{by}$	$2 \cdot 4 \cdot (10\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 72\Delta_{by}$	$172\Delta_{by}$	26.80	25.80	21.30	26.10
2	$2.5\Delta_{bm}$	$12.5\Delta_{by}$	$2 \cdot 2 \cdot (12.5\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 46\Delta_{by}$	$218\Delta_{by}$	33.50	32.25	26.63	32.63
2	$3.0\Delta_{bm}$	$15\Delta_{by}$	$2 \cdot 2 \cdot (15\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 56\Delta_{by}$	$274\Delta_{by}$	40.20	38.70	31.95	39.15

4.2 Statik İtme (Pushover) Analizi

Yapısal kapasite, yapının taşıyıcı sistemini oluşturan elemanların ve şekildeğiştirme kapasitelerinin bir birleşimi olarak belirlenir. Lineer elastik sınırın ötesindeki kapasitenin belirlenmesi istendiğinde, genel olarak malzeme ve geometri değişimleri bakımından lineer olmayan kurama göre hesap yapılması gerekmektedir. Statik itme (*pushover*) analizi ile elde edilen yapısal kapasite, yapısal kapasite eğrisi (*pushover eğrisi*) ile temsil edilir.

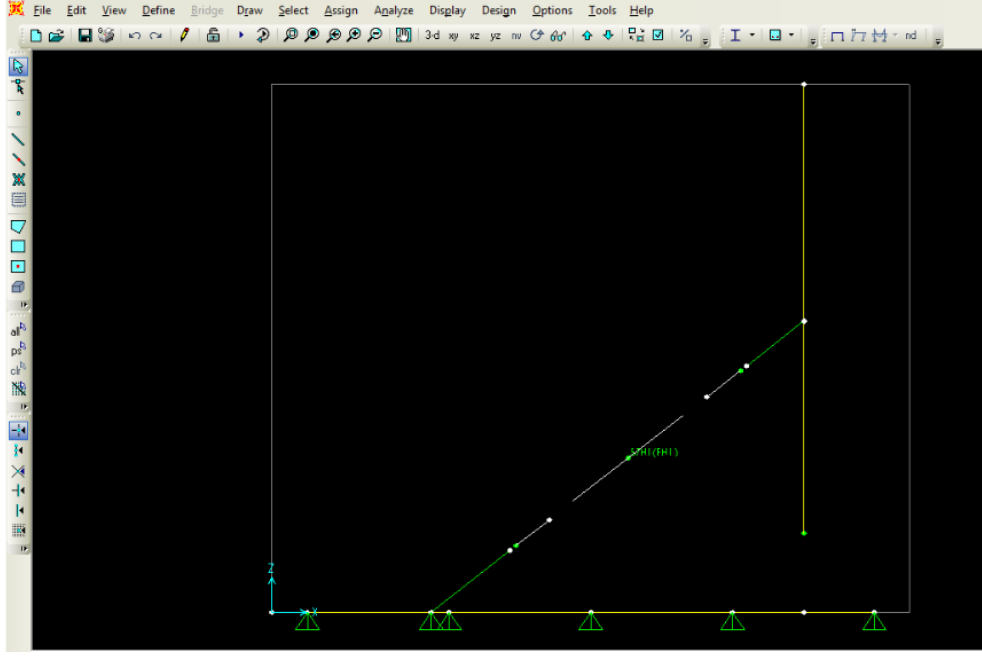
Dasgupta ve diğ. (2004) BÖÇ'leri kafes çubuk eleman olarak iki doğrulu (*bi-linear*) kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisine göre SNAP-2DX programında modellemişlerdir. Kafes elemanların maksimum basınç kapasitesinin, çekme kapasitesinden %10 daha büyük olduğu varsayılmıştır. Aniello ve diğ. (2006) akma sonrası rijitliği, elastik rijitliğin %3'ü olarak varsayarak bir plastik mafsalları tanımlamışlardır. Bu basitleştirilmiş yaklaşımla elastik bölgede deney sonuçlarına yakın sonuçlar elde edilmiştir. Akma sonrası inelastik bölgedeki kapasitenin yeterli yaklaşımda olmadığı görülmüştür. Sonuçta kuramsal çalışmada akma sonrası rijitlik değeri parametre değişkeni olarak seçilerek üç farklı model oluşturulmuştur. Deneme-yanılma yöntemi ile akması sonrası rijitlik deney sonuçlarındakilere yakın ve uyumlu olacak şekilde düzenlenmiştir. İki doğrultulu kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi kullanılarak plastik mafsallar tanımlanmıştır. BÖÇ'ün basınç dayanımının çekme dayanımından %10 daha fazla olduğu varsayılmıştır. Sistemin çekme yüklemesi altındaki rijitliği elastik rijitliğin %3'ü olarak alınırken basınç yüklemesi altında sistem rijitliği elastik rijitliğin %9'u alınmıştır.

Bordea ve Dubina (2009, 2010), çelik BÖÇ'lerle güçlendirilmiş betonarme bir yapı için deprem azaltma katsayısının alabileceği değerleri deneysel ve kuramsal yöntemlerle incelemişlerdir. BÖÇ'lerin elastik olmayan davranışının modellenmesinde iki doğrulu ve üç doğrulu (*tri-linear*) kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisini kullanmışlardır. Kesitin plastik mafsalları tanımlaması yapılırken maksimum kesit taşıma gücü azaltma katsayısı FEMA 356 (2000) ve ASCE-41 (2007)'ye göre 0.8 olarak alınmıştır. BÖÇ'ün çekirdek akma bölgesinin çekme ve basınçtaki akma davranışı benzer modellenmiştir.

Dutta ve Hamburger (2010) 40 katlı BÖÇ'lü çelik çerçeveli yapının performansa dayalı hesap kriterine göre tasarım ve optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir. BÖÇ'ler, çekirdek kesit etrafında elastik yayların tanımlandığı inelastik elemanlar olarak modellenmiştir. Modellemede CSI Perform 3D programı kullanılmıştır. BÖÇ'ün başlangıç rijitliği, çaprazın L_{ysc} akma bölgesi uzunluğu, A_{sc} çekirdek enkesiti olmak üzere $A_{sc}E/L_{ysc}$ 'e göre belirlenmiştir. L_{ysc} 'nin BÖÇ sistem uzunluğunun %70'i olduğu varsayılmıştır. Sistem uzunluğun %30'u rijit elemanlar olarak tanımlanmıştır. Üç doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinde çaprazın $10\Delta_{by}$ yerdeğiştirme sınırındaki maksimum çekme kuvveti T_{max} , maksimum basınç kuvveti P_{max} belirlenmiştir. $20\Delta_{by}$ maksimum yerdeğiştirme sınırına kadar akma sonrası rijitlikli olarak BÖÇ elamanının kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi modellenmiştir. Secant rijitliği, başlangıç rijitliğinin %1.25 katı olarak alınmıştır. Modellemede $R_y=1.1$, $\omega=1.25$, $\beta=1.1$ varsayılmıştır.

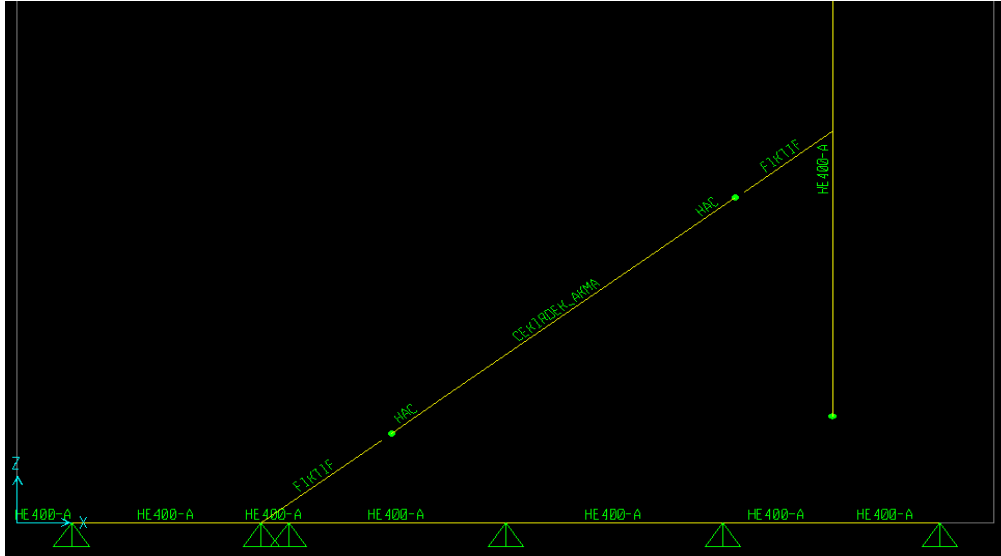
Deulkar ve diğ. (2010) çalışmalarında maksimum kesit taşıma gücü azaltma katsayısı 0.9 olarak alınmıştır. Çaprazın rijitliği akma bölgesi uzunluğu ve enkesit özelliklerine göre hesaplanmıştır. BÖÇ uç birleşimleri mafsallı olarak modellenmiştir. Akma bölgesi alanı akma bölgesi uzunluğunca azaltılarak bu bölgenin enkesit özellikleri tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında üretilen BÖÇ'lerin pushover analizlerinde bu yaklaşım ve yöntemler dikkate alınmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılarak yapılan itme (*pushover*) analizleri sonucunda, numunelere ilişkin monotik yükler altındaki yatay yerdeğiştirme çevrimlerinin belirlenebilmesi için, akma yerdeğiştirmeleri tahmin edilmiştir. Elle yapılan hesaplamalarla da bilgisayar sonuçlarının doğruluğu kontrol edilmiştir. Numunelerin tahmin edilen akma yerdeğiştirmeleri birbirinden farklı olduğundan, yatay yerdeğiştirme çevrimleri de birbirinden farklıdır. SAP2000 v14 (Computers and Structures Inc., 2009) ile modellenerek yapılan pushover analizi sonucunda numunelerin öngörülen süneklik kapasiteleri, dayanım, akma ve göçme limitleri belirlenmiştir. Şekil 4.2'de numunelerin statik pushover analizi için oluşturulan SAP2000 modeli verilmektedir.



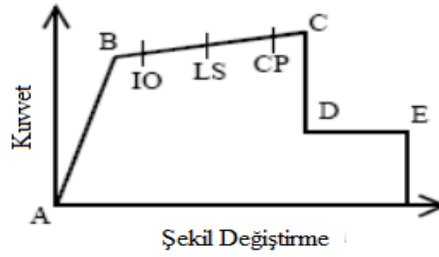
Şekil 4.2 : Numunelerin SAP2000 modeli.

Hesaplar yerdeğiştirme kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Modellemede, deney düzeneğindeki kolon-kiriş bağlantısı ve çaprazın bayrak plakalarına birleşimi basit mafsallı birleşim olarak idealleştirilmiştir. Çerçeve ve bayrak levhaları lineer elastik elemanlar olarak modellenmiştir. Çekirdeğin akma, güçlendirme ve birleşim bölgeleri kesit özellikleri ile tanımlanmışlardır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3 : SAP2000 pushover modelinde gerçek malzeme özellikleri ile tanımlanan kesit etiketleri.

Eksenel yük aktaran ve enerji yutan BÖÇ çekirdek orta noktasına P plastik mafsal tanımlanmıştır. FEMA 356'ya (2000, p. 165) göre yerdeğiştirme kontrollü plastik mafsal modelinin kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi Şekil 4.4'de verilmektedir. BÖÇ'ler elasto-plastik elemanlar yalnızca sadece eksenel doğrultuda akan elemanlar olup, pekleşme özellikleri FEMA 356'da (2000, p. 196) çekme etkisindeki çelik çaprazlar şeklinde modellenmiştir. Böylece, inelastik şekildeğiştirmelerin yalnızca akma bölgesinde oluşması, bu bölge dışında kalan çekirdek güçlendirme bölgesi ve çekirdek birleşim bölgesinde çaprazın elastik davranışı sağlanmıştır.



Şekil 4.4 : Statik itme analizi basitleştirilmiş yerdeğiştirme kontrollü plastik mafsal kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisi (FEMA 356, 2000, p. 165).

A-B noktaları arası elastik davranışı göstermekte, B noktasından sonra ise şekildeğiştirmeler artarak elastik ötesi davranış ve plastik mafsal oluşumu başlamaktadır. C noktası kesitin taşıma gücünü göstermektedir. D noktasından sonra artan şekildeğiştirme durumları için kesit taşıma kapasitesi küçük değerler almaktadır. E noktasından sonra kesit taşıma gücünü yitirmektedir. Çapraz kesiti taşıma gücüne erişinceye kadar IO, LS ve CP kabul edilebilirlik düzeyleri tanımlanmıştır. IO hemen kullanılabilirlik sınır durumunda çapraz elemanda herhangi bir hasar beklenmemektedir. LS can güvenliği sınır durumunda çaprazda oluşabilecek hasarın sistemin göçmesine neden olmayacak boyutta olması beklenmektedir. CP göçme sınır durumunda çaprazda oluşan yerel burkulmaların sistemin göçme sınır durumunda olması durumuna karşı gelmektedir. BÖÇ çekirdek orta noktasına tanımlanan plastik mafsal özellikleri Şekil 4.5'de verilmektedir.

Displacement Control Parameters

Point	Force/SF	Disp/SF
E	-0.8	-14.
D	-0.8	-11.
C	-1.66	-11.
B	-1.	0.
A	0.	0.
B	1.	0.
C	1.451	11.
D	0.8	11.
E	0.8	14.

☐ Symmetric

Type

☒ Force - Displacement

☐ Stress - Strain

Hinge Length

☐ Relative Length

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

Scaling for Force and Disp

☐ Use Yield Force

Force SF

Positive: 135.69

Negative: 135.69

☐ Use Yield Disp (Steel Objects Only)

Disp SF

Positive: 4.260E-03

Negative: 4.260E-03

Acceptance Criteria (Plastic Disp/SF)

☒ Immediate Occupancy

Positive: 0.25

Negative: -0.25

☐ Life Safety

Positive: 7.

Negative: -7.

☐ Collapse Prevention

Positive: 9.

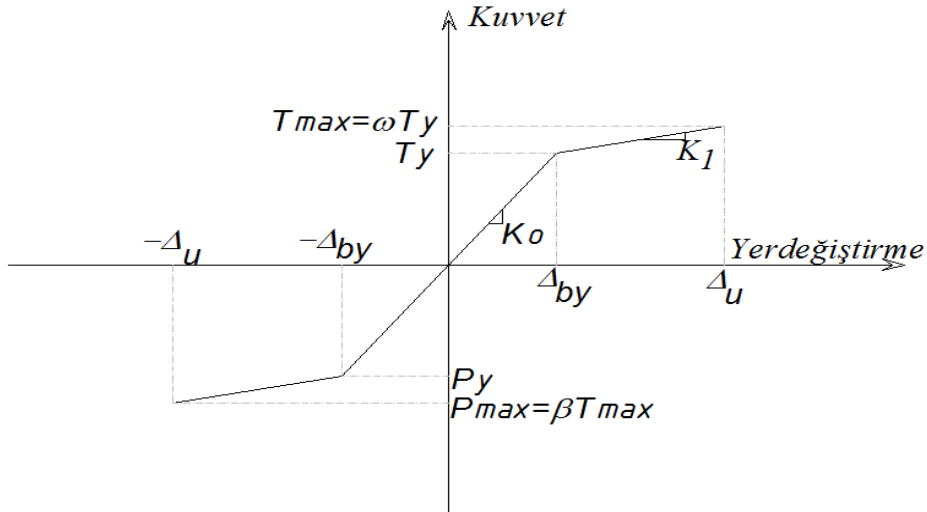
Negative: -9.

☒ Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Şekil 4.5 : Numunelerin statik itme analizinde kullanılan BÖÇ eksenel plastik mafsallı özellikleri.

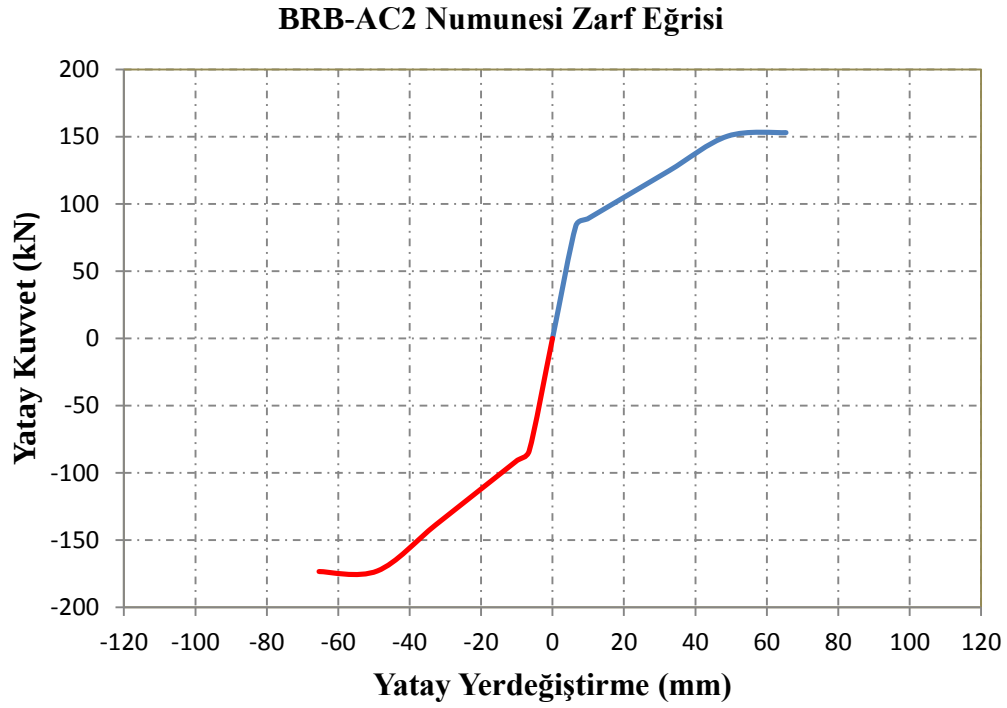
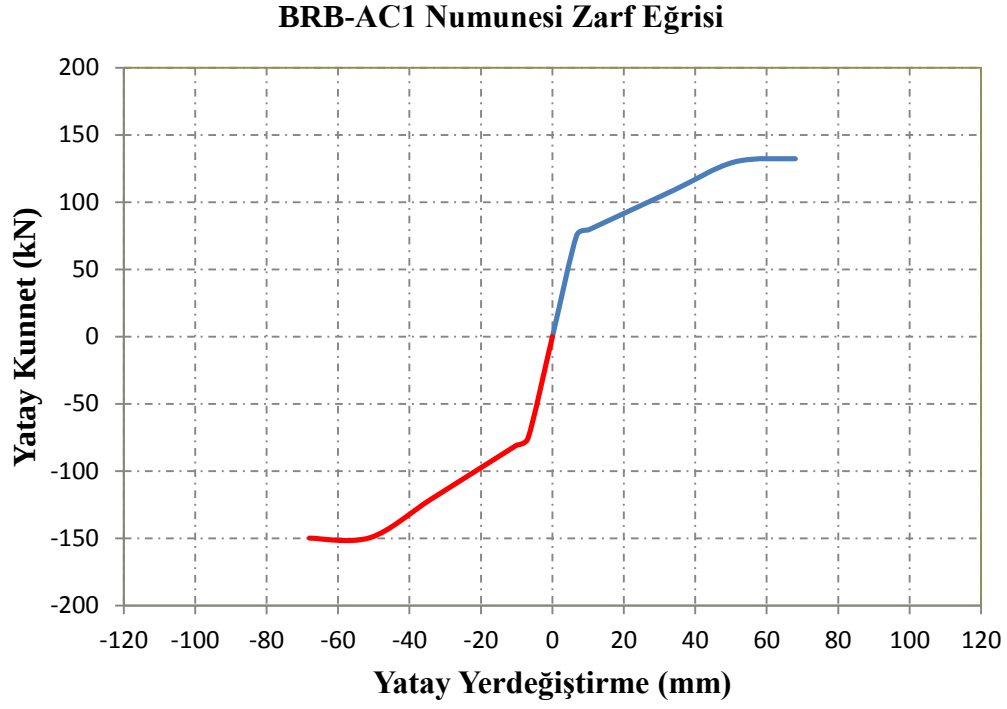
BÖÇ'lerin deney çerçevesine uç birleşimleri mafsallı birleşim olarak modellendiği için deney çerçevesinin yatay yük ve rijitliğe katkısı terkedilmiş olmaktadır. Numuneler deney düzeneğine, hidrolik veren eksenile herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirildiğinden çapraz mafsallı uç birleşim noktaları ile sistemin çalışma uzunluğu arasındaki dışmerkezlik engellenmiştir. Numunelerin yükleme altında başlangıçtaki elastik rijitlik değeri K_0 (*pre-yielding stiffness/ initial stiffness*) ve akma sonrası rijitlik değeri K_1 (*post-yielding stiffness/ tangent stiffness*) Şekil 4.6'da iki doğrusal kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinde verilmektedir.



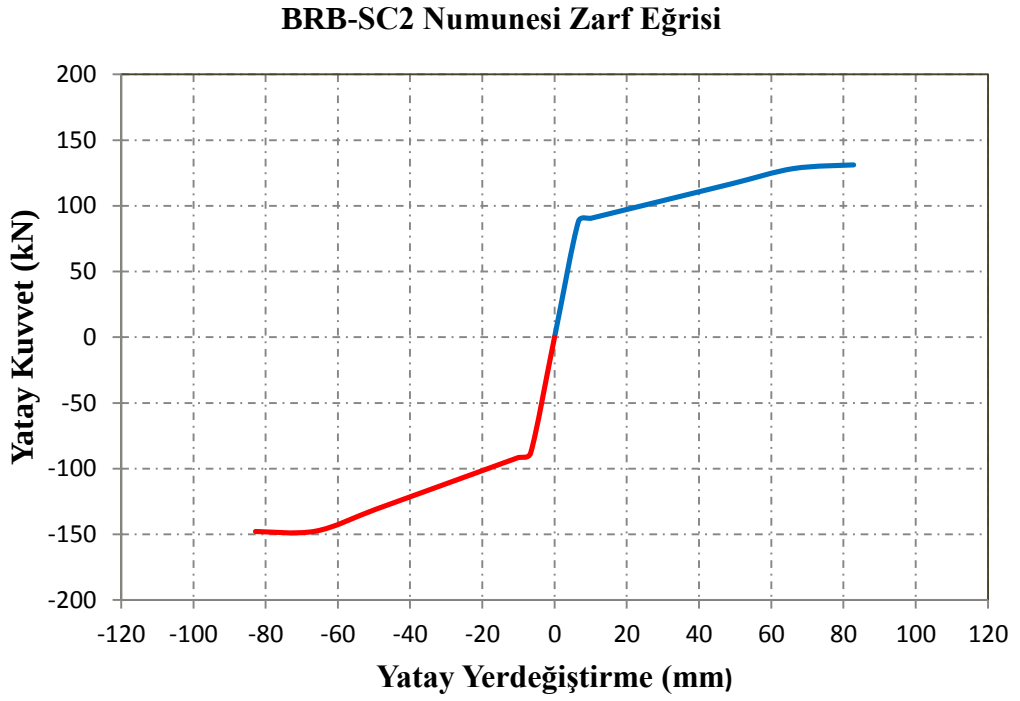
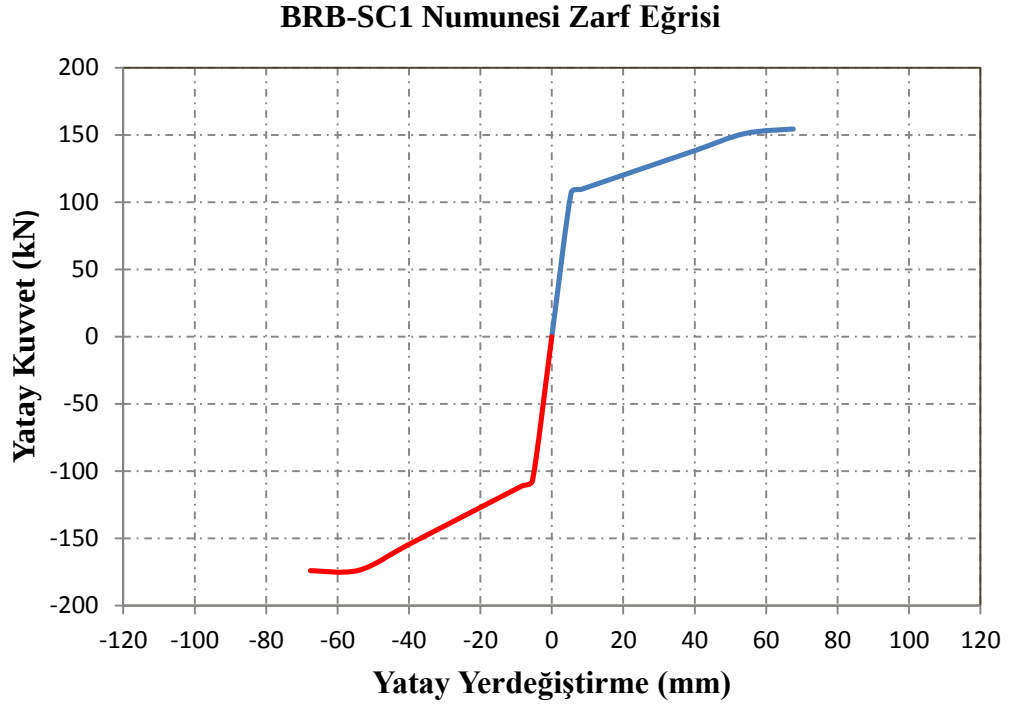
Şekil 4.6 : İki doğrusal kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde K_0 ve K_1 rijitliklerinin, ω ve β dayanım düzeltme katsayılarının gösterimi.

BÖÇ'lü çelik çerçeve sisteminin α rijitlik oranı K_1 akma sonrası rijitliğin, K_0 başlangıç rijitliğine oranıdır. Bu çalışmada çelik BÖÇ'lerin maksimum basınç kapasitesinin maksimum çekme kapasitesine oranının 1.15 (β = basınç dayanımı düzeltme faktörü), maksimum çekme kapasitesinin akma dayanımına oranının 1.45 (ω = çekme dayanımı düzeltme faktörü) olduğu varsayılmıştır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin yapılan çekme deneylerindeki pekleşme özelliklerine göre β katsayısı 1.15, ω katsayısı BRB-AC1 için 1.73, BRB-AC2 için 1.80 alınmıştır. μ_{max} maksimum süneklik oranı Δ_u sınırındaki yerdeğiştirme ile Δ_{by} akmadaki yerdeğiştirme arasındaki orandır. Numunelerin statik itme analiz modelinde μ_{max} maksimum süneklik oranı çelik BÖÇ'ler için 10, alüminyum alaşımlı numuneler için 7.5 olarak öngörülmüştür.

BRB-AC1 ve BRB-AC2 numunelerinin statik itme analizinden elde edilen, çekme ve basınç yüklemesi altında tahmini yatay yük-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri (pushover curves) Şekil 4.7'de, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin statik itme analizinden elde edilen, çekme ve basınç yüklemesi altında tahmini yatay yük-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri ise (pushover curves) Şekil 4.8'de verilmektedir. Bu eğriler, deneylerin yönlendirilmesinde çok yardımcı olmuştur.

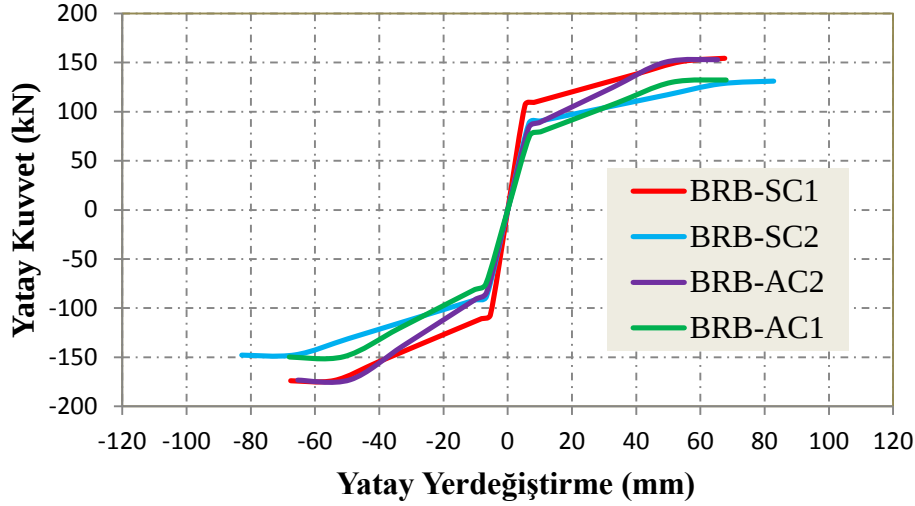


Şekil 4.7 : BRB-AC1 ve BRB-AC2 numunelerinin yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri.



Şekil 4.8 : BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme zarf eğrileri.

Şekil 4.9’da BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin zarf eğrileri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Her ne kadar numuneler aynı akma düzeyine göre boyutlandırılmış olsalarda pushover eğrilerinde malzeme değişiminden kaynaklanan küçük farklılıklar görülmektedir.



Şekil 4.9 : Numunelerin zarf eğrilerinin karşılaştırması.

Çizelge 4.2’de numunelerin statik itme analizi sonucunda elde edilen T_y akma kuvveti, T_{max}/P_{max} maksimum çekme/basınç kuvvetleri, Δ_{by} akma yerdeğiştirmesi, Δ_u maksimum yerdeğiştirme hesap değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.2 : Statik itme analizi sonucu kuvvet, yerdeğiştirme hesap değerleri.

Numuneler		Çekme	Basınç	Basınç/Çekme
BRB-AC1	T_y (kN)	+75.29	-75.29	1.00
	T_{max}/P_{max} (kN)	+129.90	-149.39	1.15
	Δ_{by} (mm)	+6.80	-6.80	1.00
	Δ_u (mm)	+51.01	-51.01	1.00
BRB-AC2	T_y (kN)	+83.69	-83.69	1
	T_{max}/P_{max} (kN)	+150.35	-172.90	1.15
	Δ_{by} (mm)	+6.54	-6.54	1
	Δ_u (mm)	+49.03	-49.03	1
BRB-SC1	T_y (kN)	+106.93	-106.93	1
	T_{max}/P_{max} (kN)	+151.03	-173.68	1.15
	Δ_{by} (mm)	+5.41	-5.41	1
	Δ_u (mm)	+54.06	-54.06	1
BRB-SC2	T_y (kN)	+88.18	-88.18	1
	T_{max}/P_{max} (kN)	+128.37	-147.63	1.15
	Δ_{by} (mm)	+6.62	-6.62	1
	Δ_u (mm)	+66.24	-66.24	1

Çekme deneylerinden elde edilen akma şekildeğiştirmesi $\varepsilon_y^{0.2}$ ve L_{ysc} akma bölgesi uzunluğu çarpıldığında Δ_{by}^K akmadaki yerdeğiştirme değeri elde edilmektedir. Alüminyum alaşım çekirdekli numunelerin akma şekildeğiştirmesi $0.8\varepsilon_y^{0.2}$ olarak varsayılmıştır (Usami ve diğ., 2012). Tez çalışmasında geliştirilen hesap modeli ile tahmin edilen Δ_{by}^H eksenel akma yerdeğiştirmesi değeri, çekme deneylerinden elde edilen Δ_{by}^K değeri, geliştirilen statik itme analiz modeli ile elde edilen Δ_{by}^P değeri ve deneylerden elde edilen Δ_{by}^E değeri Çizelge 4.3'te topluca verilmektedir. Deneysel değeriin hesaplanan değeriilerle büyük uyum içinde olduğu bu çizelgede görülmektedir.

Çizelge 4.3 : Toplam eksenel yerdeğiştirmelerin karşılaştırılması.

Numuneler	Hesaplanan Δ_{by}^H (mm)	Çekme Deneyi Δ_{by}^K (mm)	Pushover Δ_{by}^P (mm)	Deney Δ_{by}^E (mm)
BRB-AC1	±5.35	+5.50	±5.36	±5.35
BRB-AC2	±5.16	+5.16	±5.15	±5.14
BRB-SC1	±4.26	+4.26	±4.26	±4.65
BRB-SC2	±5.22	+5.24	±5.22	±5.21

Black ve diğ. (2002) çelik BÖÇ'lerin eksenel doğrultuda çevrimsel davranışlarını incelemişlerdir. T_{max} ve P_{max} maksimum çekme ve basınç kuvvet değeriiler, iki doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme eğriisinde $10\Delta_{by}$ maksimum yerdeğiştirme sınırı ve Δ_{by} akma yerdeğiştirme sınırı kabul edilerek modellendi. Deney sonuçları ile elde edilen akma yerdeğiştirmesi, statik itme analizi sonucu elde edilen akma yerdeğiştirmenin 1.25 katı olarak bulunmuştur. Tezde elde edilen sonuçlar, Black ve diğ. (2002) ile karşılaştırıldığında, Çizelge 4.3'teki akma yerdeğiştirmelerinin yakınsaklık oranı, bu çalışmada ilk kez denenen metal yüzeyinden gerçek akma yerdeğiştirmenin tahmin edilmesi yönteminin başarıya etkisini kanıtlanmıştır.

Numunelerde statik itme analizi sonucunda ulaşılan en büyük çekme kuvvetleri BRB-SC2 numunesi ile karşılaştırıldığında, BRB-AC1/BRB-SC2 oranı 1.01, BRB-AC2/BRB-SC2 oranı 1.17, BRB-SC1/BRB-SC2 oranı 1.18'dir. BÖÇ'lerin çekme ve

basıncıdaki davranışı benzer olduğundan ulaşılan en büyük basınç kuvvet oranları da aynı şekildedir.

Sistemin statik itme analizi sonucunda elde edilen K_0^P , K_1^P rijitlikleri ve α^P rijitlik oranları Çizelge 4.4'te verilmektedir.

Çizelge 4.4 : Statik itme analizi sistem K_0^P , K_1^P rijitlikleri ve α^P rijitlik oranları.

Numuneler	K_0^P (kN/mm)		K_1^P (kN/mm)		α^P	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
BRB-AC1	+11.07	-11.07	+1.24	-1.68	+0.11	-0.15
BRB-AC2	+12.80	-12.80	+1.57	-2.10	+0.12	-0.16
BRB-SC1	+19.78	-19.78	+0.91	-1.37	+0.05	-0.07
BRB-SC2	+13.31	-13.31	+0.67	-0.99	+0.05	-0.08

K_0 rijitlikleri BRB-AC1 numunesi ile karşılaştırıldığında, BRB-AC2 numunesi %116 oranında, BRB-SC2 numunesi %120 oranında, BRB-SC1 numunesi %178 oranında daha yüksek değere ulaşmıştır. Çelik BÖÇ'lerin α rijitlik oranları çekme etkisinde ortalama %5, basınç etkisinde %7.5, alüminyum alaşımlı BÖÇ α rijitlik oranları çekme etkisinde ortalama %11.5, basınç etkisinde %15.5 olarak elde edilmiştir. Dayanım rijitlikleri arasındaki bu fark malzeme özelliğinin bir sonucudur. BÖÇ'lerin eleman olarak toplam elastik rijitlik değeri $K_{toplaml}$ (3.1) bağıntısıyla hesaplanmaktadır.

$$K_{toplaml} = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_i} + 2 \frac{1}{K_{con}} + 2 \frac{1}{K_{tr}} \right)} \quad (3.1)$$

Burada K_i çekirdek akma bölgesi elastik rijitliği ve akma bölgesi uzunluğu dışında kalan K_{con} birleşim bölgesi ve K_{tr} güçlendirme bölgesi kısımların, rijitliğe katkısının ayrı ayrı toplamıdır. $K_i = EA_{sc}/L_{ysc}$, $K_{con} = EA_{con}/L_{con}$, $K_{tr} = EA_{tr}/L_{tr}$ bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Burada A_{sc} ve L_{ysc} akma bölgesi enkesit alan ve uzunluğunu, A_{tr} ve L_{tr} güçlendirme bölgesi enkesit alan ve uzunluğunu, A_{con} ve L_{con} birleşim bölgesi enkesit alanı ve uzunluğunu göstermektedir. Çizelge 4.5'de numunelerin statik itme analizi sonunda elde edilen ve hesaplanan K_i elastik rijitlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Elde edilen değerler deneysel sonuçlarla da uyumludur. Çizelge 4.6'da numunelerin hesaplanan $K_{toplaml}$ toplam elastik rijitlik değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.5 : Hesaplanan ve statik analiz ile elde edilen K_i elastik rijitlikleri.

Numuneler	Hesaplanan K_i^H (kN/mm)	Pushover K_i^P (kN/mm)	(K_i^P/K_i^H)
BRB-AC1	29.98	35.65	1.19
BRB-AC2	36.65	41.16	1.12
BRB-SC1	66.38	63.70	0.96
BRB-SC2	42.39	42.87	1.01

Çizelge 4.6 : Hesaplanan ve statik analiz ile elde edilen K_{toplam} elastik rijitlikleri.

Numuneler	Hesaplanan K_{toplam}^H (kN/mm)	Pushover K_{toplam}^P (kN/mm)	$(K_{toplam}^P/K_{toplam}^H)$
BRB-AC1	27.32	35.65	1.30
BRB-AC2	29.78	41.16	1.38
BRB-SC1	61.65	63.70	1.03
BRB-SC2	39.71	42.87	1.08

Numunelerin deneysel datası statik itme analizlerinden edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında SAP2000 modelinin gerçeğe yakın, deney sonuçları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Böylece modellemede yapılan varsayımların etkinliği kanıtlanmış olmaktadır.

4.3 Deney Düzeneğinin Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Altındaki Davranışı

Deney düzeneğinin numunelerin histeretik davranışına olan potansiyel etki miktarını anlayabilmek için deney düzeneğine boş durumda (numune yokken) benzer yerdeğiştirme geçmişi uygulanmıştır.

Çizelge 4.7’de boş deney düzeneğine uygulanan yükleme çevrimlerinin yerdeğiştirme protokolü verilmektedir. Yerdeğiştirme pikleri, deney düzeneği kiriş üst kotu ile actuator yük etki noktası arasındaki $1860mm$ uzunluğa göre hesaplanan görelî ötelenme oranlarına göre elde edilmiştir. Bu kotun alınmasıyla çapraz uç birleşimlerinin ötelemeye olan maksimum etkisi de hesaplara eklenmektedir.

Çizelge 4.7 : Boş deney düzeneği yükleme protokolü.

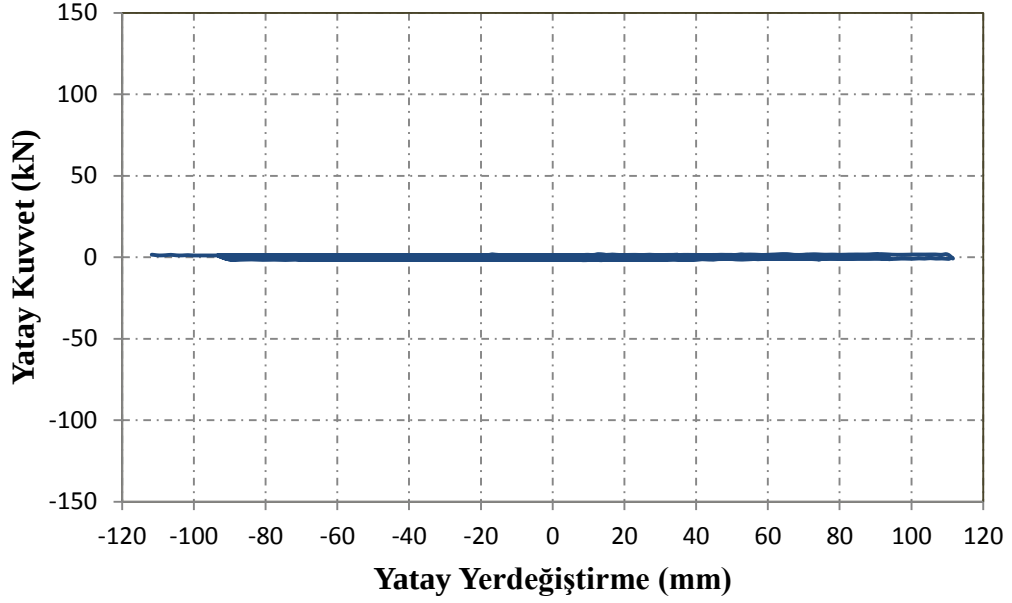
Yerdeğiştirme Adımı	Çevrim Sayısı	Toplam Çevrim Sayısı	Yerdeğiştirme (mm)	Görelî Ötelenme Oranı (%)
1	2	2	18.60	1
2	2	4	37.20	2
3	2	6	55.80	3
4	2	8	74.70	4
5	2	10	93.00	5
6	2	12	111.60	6

Çizelge 4.8’de numunelerin görelî ötelenme oranlarına karşı gelen eksenel yerdeğiştirmesi Δ_{by} cinsinden verilmiştir. Renkli kutucuklar numunelerin tamamladıkları deneysel yerdeğiştirme değeri ne karşı gelen görelî ötelenme oranlarını göstermektedir.

Çizelge 4.8 : Görelî ötelenme oranlarına karşı gelen Δ_u eksenel yerdeğiştirmesi.

Görelî Ötelenme Oranı (%)	BRB-AC1 (mm)	BRB-AC2 (mm)	BRB-SC1 (mm)	BRB-SC2 (mm)
1	2.73 Δ_{by}	2.84 Δ_{by}	3.44 Δ_{by}	2.81 Δ_{by}
2	5.47 Δ_{by}	5.69 Δ_{by}	6.88 Δ_{by}	5.62 Δ_{by}
3	8.20 Δ_{by}	8.53 Δ_{by}	10.32 Δ_{by}	8.42 Δ_{by}
4	10.94 Δ_{by}	11.38 Δ_{by}	13.76 Δ_{by}	11.23 Δ_{by}
5	13.67 Δ_{by}	14.22 Δ_{by}	17.20 Δ_{by}	14.04 Δ_{by}
6	16.41 Δ_{by}	17.07 Δ_{by}	20.64 Δ_{by}	16.85 Δ_{by}

Deney düzeneğine uygulanan yükleme protokolünden elde edilen histeretik eğri Şekil 4.10’da verilmektedir. Beklendiği üzere deney düzeneğinin sistemin tümsel davranışa yatay yük ve rijitlik olarak herhangi bir katkısı olmadığı kanıtlanmıştır.



Şekil 4.10 : Boş deney düzeneği histeretik eğrisi.

4.4 Deneysel Gözlemler

Deneyler gerçek ölçeklerdeki (ölçek=1/1) numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu alt bölümde, yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenen numunelerde deney sırasındaki gözlemlere yer verilmektedir. Deney boyunca numunelerin davranışları 2 dijital video kamera ile kayıt altına alınmıştır. Kameralardan biri tümsel davranışı, diğeri ise alt/üst uç eksenel yerdeğiştirmesini izlemiştir. Ayrıca, numunelerin çekme ve basınç yükleme altındaki davranışları, yerdeğiştirme pikleri, bu piklerin fotoğrafları, kuvvetler arasındaki oranlar eş zamanlı olarak not edilmiştir. Notlama sisteminde çekme bölgesi (+), basınç bölgesi (-) işaretleme ile gruplanmıştır.

Deneylerde numuneler ilk olarak güney doğrultusunda yüklenerek çekme etkisinde bırakılmışlardır. Çekme pik noktasına gelindikten sonra yük boşaltılarak ters yönde aynı pikin basıncına gidilmiş ve yük boşaltılarak çevrim tamamlanmıştır.

Deney başlangıcında kuramsal akma yerdeğiştirmesi ve akma kuvveti değerlerine göre deney kontrol edilmiştir (kuvvet kontrollü deney). Elastik çevrimlerden sonra kuvvet-yerdeğiştirme grafiğinde gözle görülür bir akmanın oluşması (nonlineerliğin belirginleşmesi) ile deneysel akma yerdeğiştirmesi ve akma kuvveti belirlenmiştir. Eş zamanlı olarak metal yüzeyine yerleştirilen şekildeğiştirme ölçerin kupon deneyi

ile elde edilen akma birim şekildeğiştirmesi değerinde olup olmadığı kontrol edilmiştir. İki kontrol parametresinden elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görölmüştür. Bu durum, metal yüzeyinden akma yerdeğiştirmesi kontrolünün yapılması yönteminin etkinliğini kanıtlamakla birlikte yapılan kupon deneyleriyle elde edilen malzeme özelliklerinin uygunluğunu da göstermektedir. Numunelerin gerçek akma yerdeğiştirmesi belirlendikten sonra akma sonrası çevrimlerde yükleme protokolü bulunan bu değere göre güncellenerek deneye devam edilmiştir.

4.4.1 BRB-AC1 numunesi

BRB-AC1 numunesi ilk olarak güney doğrultusunda yüklenerek çekme etkisinde bırakılmıştır. Deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.11’de verilmektedir. BRB-AC1 numunesinin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBAC1’dir.

BRB-AC1 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ ’ündeki (%0.09 görelİ ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.70\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ ’ündeki (%0.18 görelİ ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 3.40\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ ’ündeki (%0.27 görelİ ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 5.10\text{mm}$ olan 2 çevrimde lineer elastik davranmıştır. Elastik bölgedeki ilk çevrimde çekme yüklemesi altında metal yüzeyindeki şekildeğiştirme okuması $+1250\mu$, basınç yüklemesi altında -1100μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1700\mu$, basınç yüklemesinde -1400μ , üçüncü elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1700\mu$, basınç yüklemesinde -1400μ ’dür.

BRB-AC1 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme $\pm \Delta_{by}^P$ akma yerdeğiştirmesi $\pm 6.80\text{mm}$ (%0.37 görelİ ötelenme oranı)’dır. Deneyde, numunede çekme yüklemesinde Δ_{by}^E için $+6.80\text{mm}$ yerdeğiştirmesinde akma gözlenmiştir; deneysel ve tahmin edilen akma değerlerinin bu derece üst üste değişmesinin nedeni kupon deneylerinin ve çekirdek boyutlarının birbirine çok benzer özelliklerde olması ve sistemin olabildiğince doğru modellenmesidir. Eş zamanlı olarak metal yüzeyine yerleştirilen akmada BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden çekmede $+2200\mu$ birim şekildeğiştirme (strain), basınç etkisinde -3300μ okumaları yapılmıştır. Bu okumalar

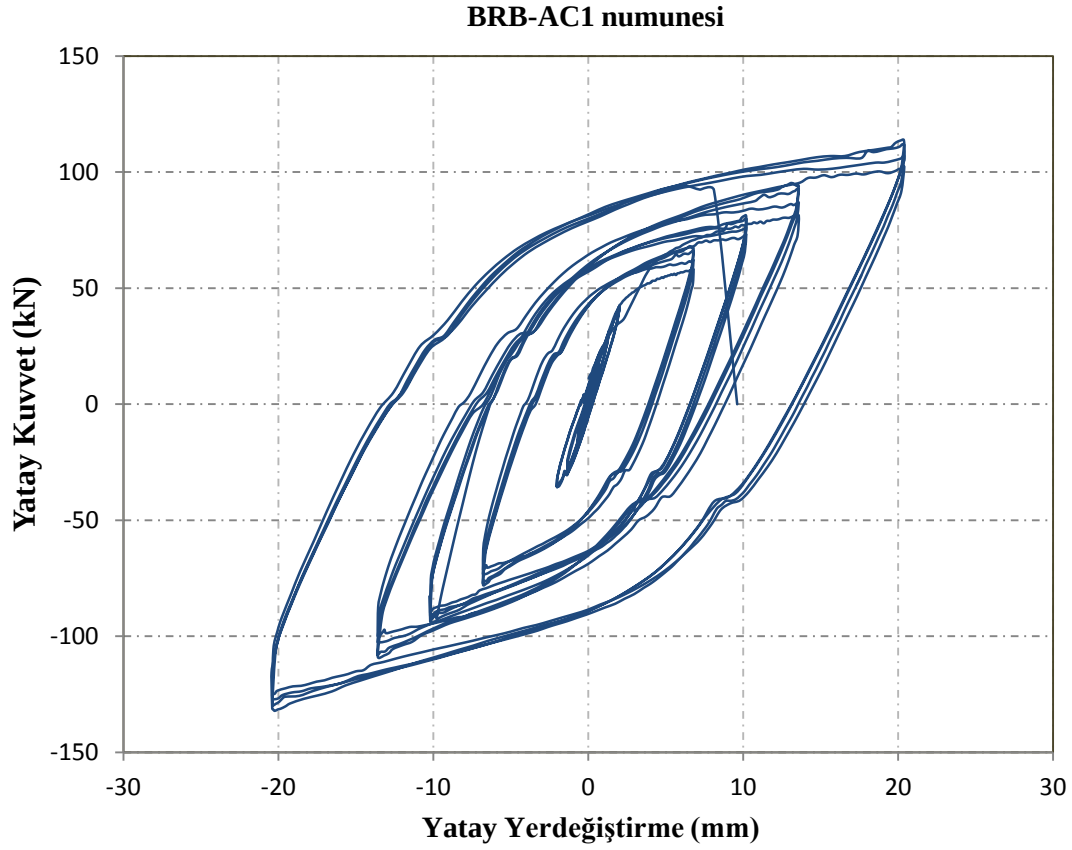
akma yerdeğiştirmesinin doğru belirlenmesindeki başarı oranını arttırmıştır. Deneylerde akma yerdeğiştirmelerinin belirlenmesinde bir güçlük yaşanmamıştır. Akma yerdeğiştirme deneyinde, beklendiği üzere; bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Düzlem dışı T5 yerdeğiştirme ölçerinden numunenin akma yerdeğiştirmesi sırasında +0.6mm değeri okunmuştur.

$\pm 1.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 10.19\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.55 görelı ötelenme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinde BRBKN değeri okunamamıştır. Çekme etkisinde maksimum kuvvet +81.41kN, basınç etkisinde -92.96kN bulunmuştur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.14'dür. Bayrak plakalarında ve çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

$\pm 2.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 13.59\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.73 görelı ötelenme oranı) yerdeğiştirmesinde, BRBKN çekme etkisinde hasar gördüğünden okuma alınamamıştır. T5'de çekme etkisinde batı doğrultusunda -0.84mm okuması yapılmıştır. Maksimum çekme kuvveti +95.25kN, maksimum basınç kuvveti -107.86kN'dur. β katsayısı 1.13'dür.

$\pm 5\Delta_{by}^E$ ($\pm 20.39\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.10 görelı ötelenme oranı) yerdeğiştirmesinde çaprazda çekme ve basınç etkisinde artan sesler gözlenmiştir. Alt ve üst uçlarda çekme ve basınç etkisinde açılmalar gözlenmiştir. Maksimum çekme kuvveti +113.97kN, maksimum basınç kuvveti -131.54kN'dur. T5 -0.78mm'dir.

$\pm 5\Delta_{by}^E$ seviyesindeki çevrimler tamamlandıktan sonra $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ ve %2.74 görelı kat ötelenme oranı seviyesindeki ilk çekme yerdeğiştirmesi pikine giderken +92.15kN'de numune çekirdek bölgesinden kopmuştur. Kopma sonrasında yapılan incelemelerde bayrak levhalarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. T5 -0.82mm'dir.

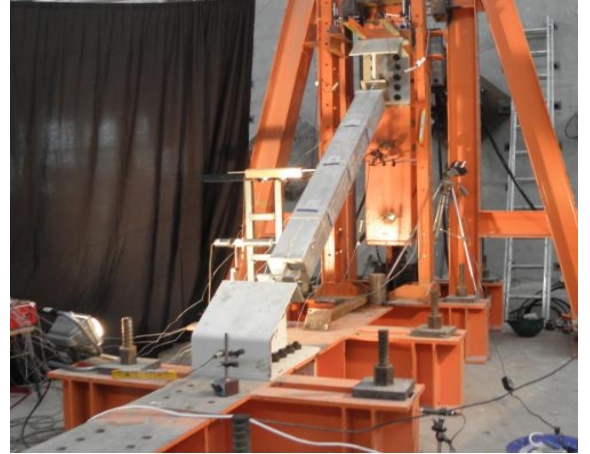


Şekil 4.11 : BRB-AC1 numunesi histeretik eğrisi.

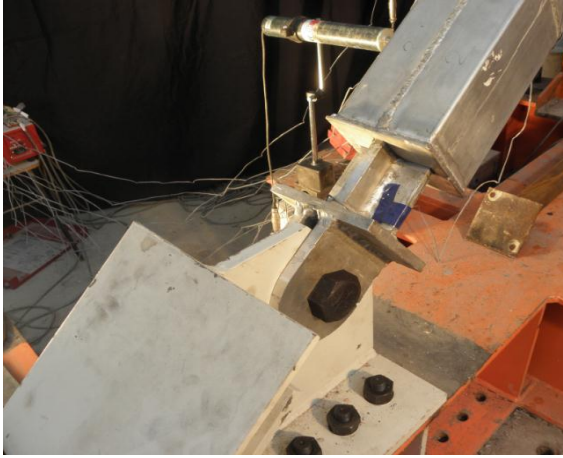
Deneysel çalışma sonucunda BRB-AC1'in maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %17 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı 1.72, β basınç dayanım düzeltme katsayısı 1.17'dir. Monotonik yüklemede bulunan değerle histeretik davranıştan elde edilen ω değerleri benzerdir. Şekil 4.12'de değişik adımlarda numune gözlenen oluşumlar verilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.12 : BRB-AC1 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) Elastik davranış, (c) Alt uç elastik davranış. (d) Üst uç elastik davranış, (e) Elastik davranış düzlem dışı durum. (f) $+3/4\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+5.10\text{mm}$ (%0.27 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesinde alt uça eksenel yerdeğiştirme.



(g)



(h)



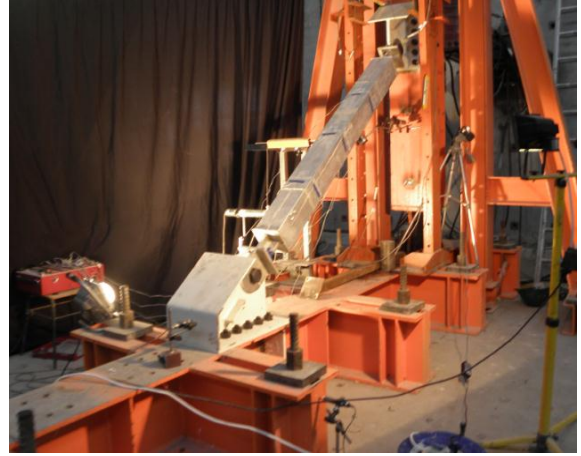
(i)



(j)



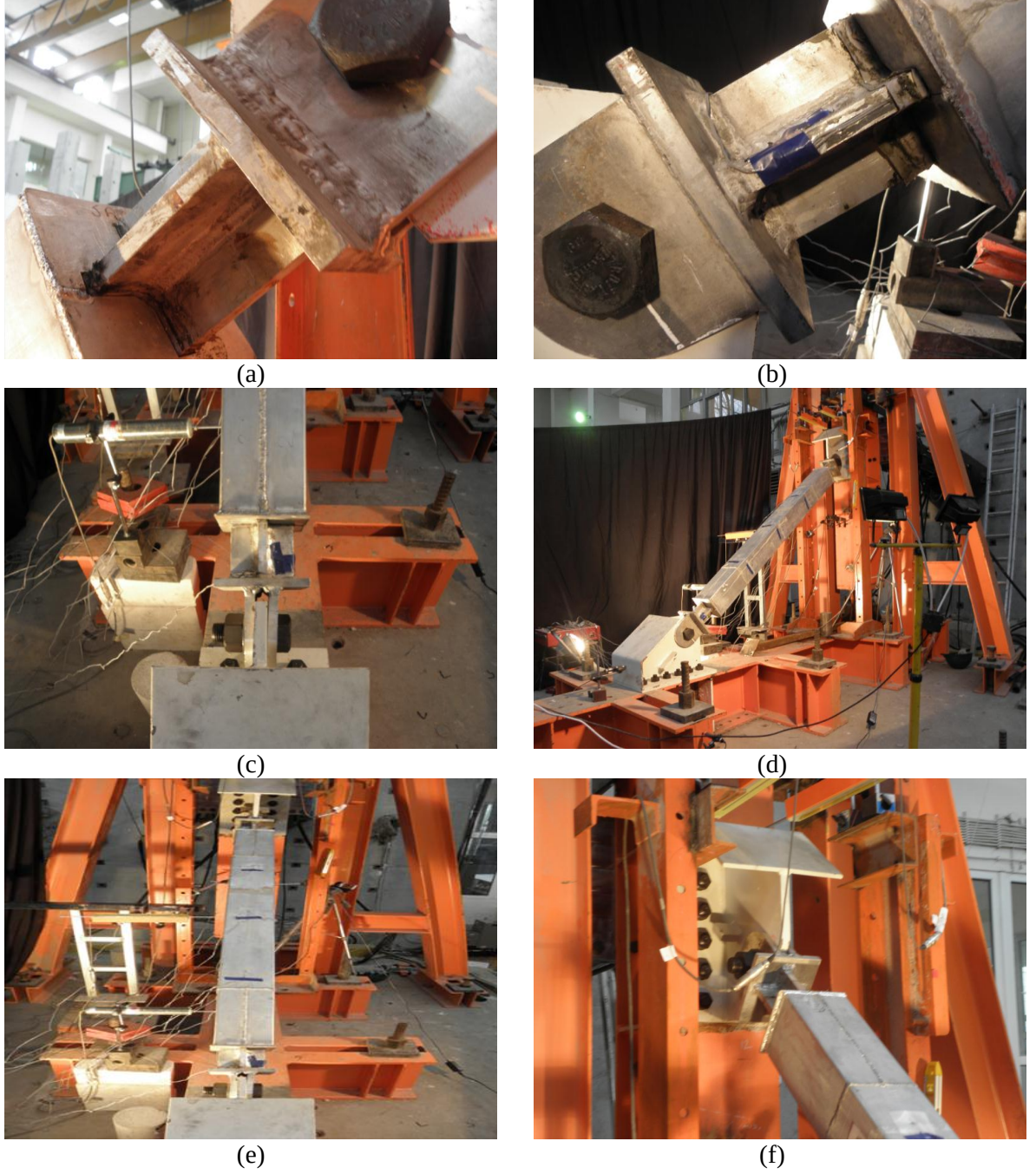
(k)



(l)

Şekil 4.12 (devam): (g) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+6.79\text{mm}$ (%0.37 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel akma yerdeğıştirmesi. (h) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğıştirme, (i) $-\Delta_{by}^E$ seviyesinde çaprazın genel görünüşü, (j) $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde düzlem dışı durum, (k) $-\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+20.39\text{mm}$ (%1.10 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirme, (l) BRB-AC1 numunesi çekirdek kopma sonrası genel görünüş.

BRB-AC1 numunesinin deney sonrası kaynak ve bulonlu birleşimlerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Deney sonrası numunenin birleşim durumunu gösteren fotoğraflar Şekil 4.13’de gösterilmektedir. BRB-AC1 deney sonrasında açılarak numune çekirdek akma bölgesi daha detaylı incelenmiştir. Buna ilişkin gözlemler Bölüm 5’de verilmektedir.



Şekil 4.13 : BRB-AC2 numunesinin deney sonrası birleşim durumu.

4.4.2 BRB-AC2 numunesi

Aynı koşullarda bir değerlendirme yapabilmek için BRB-AC2 numuneside BRB-AC1 numunesine uygulanan aynı yükleme protokolü ile denenmiştir. İlk olarak güney doğrultusunda yüklenerek çekme etkisinde bırakılmıştır. BRB-AC2 numunesinin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi Şekil 4.14’de verilmektedir. BRB-AC2’nin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBAC3’dür. Deneysel etiketlenme alüminyum ve çelik numunelerde imalat sırasına göre yapılmıştır. TURKBRACE-BRBAC3 alüminyum alaşımlı BÖÇ grubunda imal edilen 3. çaprazdır.

BRB-AC2 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ ’ündeki (%0.09 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.63\text{mm}$ 2 çevrimde, $\pm 2/4$ ’ündeki (%0.18 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 3.26\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ ’ündeki (%0.26 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 4.89\text{mm}$ olan 2 çevrimde lineer elastik olarak davranmıştır. Elastik bölgedeki ilk çevrimde çekme yüklemesi altında metal yüzeyindeki çekme şekildeğiştirmesi okuması $+1000\mu$, basınç okuması -900μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1000\mu$, basınç yüklemesi altında -935μ , üçüncü elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1975\mu$, basınç yüklemesinde -1600μ ’dür.

Numunenin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme $\pm \Delta_{by}^P$ akma yerdeğiştirmesi %0.35 görelî ötelenme oranına karşı gelen $\pm 6.54\text{mm}$ ’dir. Numunede, çekme etkisinde $\pm \Delta_{by}^E$ için $+6.52\text{mm}$ yerdeğiştirmesinde akma gözlenmiştir. Metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden $+2237\mu$ okuması alınmıştır. Deneyde net bir şekilde akma yerdeğiştirmesi belirlenmiştir. Akma yerdeğiştirmesi düzeyinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel durumunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Düzlem dışı T5 yerdeğiştirme ölçerinden numunenin çekme yüklemesi altında akma yerdeğiştirmesi sırasında batı doğrultusunda -0.24mm okuma alınmıştır. $\pm \Delta_{by}^E$ seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+85.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti -73.00kN ’dir.

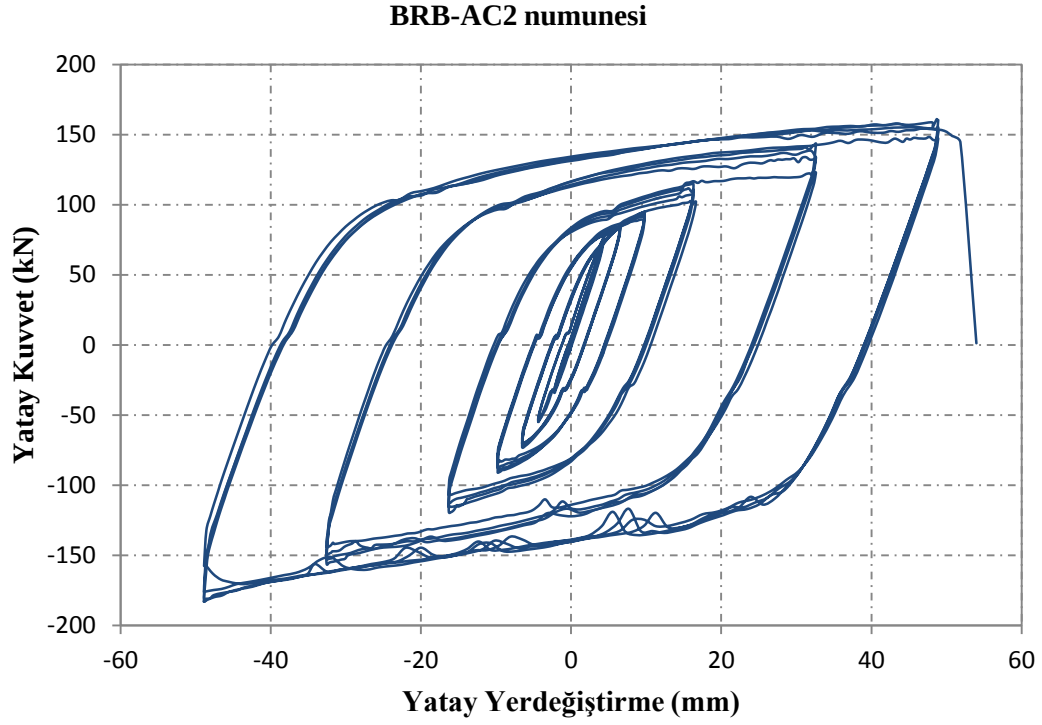
$\pm 1.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 9.78\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.53 görelî ötelenme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinde BRBKN’de çekme etkisinde $+3500\mu$, basınç etkisinde -3000μ

değerleri okunmuştur. Bu seviyedeki 4. son çevrimde çekme etkisinde $+3800\mu$, basınç etkisinde -2900μ birim şekildeğiştirme değerine ulaşılmıştır. Maksimum çekme kuvveti $+95.00\text{kN}$, basınç kuvveti -91.00kN elde edilmiştir. Bu çevrimde maksimum basınç kuvvetinin çekme kuvvetinden düşük olması olağandır ve litaretürdeki BÖÇ'lerin deneysel davranışlarıyla benzerdir.

$\pm 2.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 16.30\text{mm}$ yerdeğiştirme, $\%0.88$ görelî ötelenme oranı) seviyesindeki çekme yerdeğiştirmesinde BRBKN hasar gördüğü için okuma alınamamıştır. Bu seviyede elde edilen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+115.00\text{kN}$, -120kN 'dur. Bu seviyede β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.04 olup birleşimlerde, bayrak plakalarında herhangi bir olumsuz gelişme gözlenmemiştir.

$\pm 5\Delta_{by}^E$ ($\pm 32.60\text{mm}$ yerdeğiştirme, $\%1.75$ görelî ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+140.00\text{kN}$, -154.00kN olarak elde edilmiştir. Bu seviyede β basınç dayanım düzeltme katsayısı ortalama 1.14 civarındadır.

$\pm 7.5\Delta_{by}^E$ (48.90mm yerdeğiştirme, $\%2.63$ görelî ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+160.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti -183.00kN elde edilmiştir. Bu seviyede elde edilen β basınç dayanım düzeltme katsayısı ortalama 1.14 'dür. T5'den bu seviyenin ilk çevriminde doğru doğrultusunda $+2\text{mm}$ okuma alınmıştır. $\pm 10\Delta_{by}^E$ ve $\%3.51$ ötelenme oranı seviyesindeki ilk çekme yerdeğiştirmesi pikine ulaşılmadan $+65.20\text{kN}$ 'de numune çekirdeğin kopması ile göçme durumuna ulaşmıştır. Kopma sonrasında yapılan incelemelerde, birleşimlerde, bayrak plakalarında herhangi olumsuz bir durum görülmemiştir. Bu inelastik şekildeğiştirmelerin tasarlandığı gibi yalnızca çekirdek bölgesinde olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.14 : BRB-AC2 numunesi histeretik eğrisi.

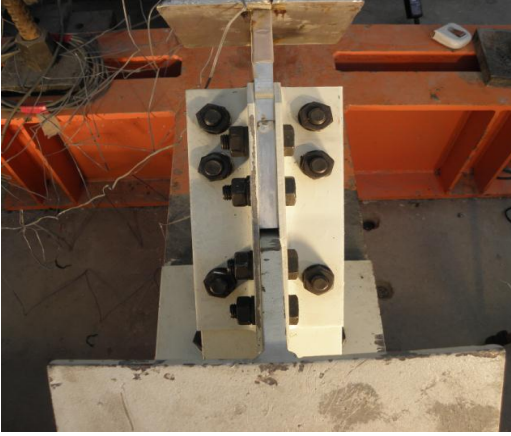
Deneyisel çalışma sonucunda BRB-AC2'nin maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden en çok %14 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneyisel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı 1.81, β basınç dayanım düzeltme katsayısı 1.14 olup numunenin çekme deneyi sonuçları ile aynı değerler elde edilmiştir. Şekil 4.15'de BRB-AC2'nin deney fotoğrafları verilmektedir.



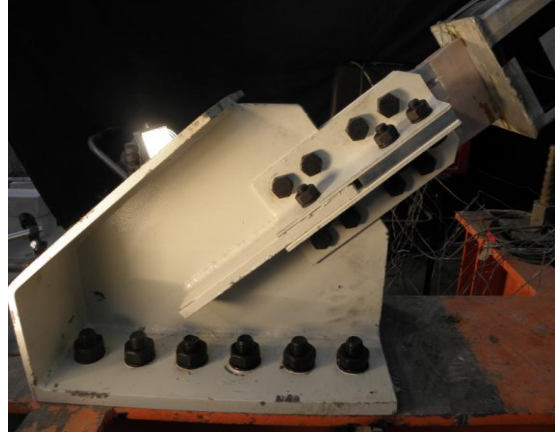
(a)



(b)



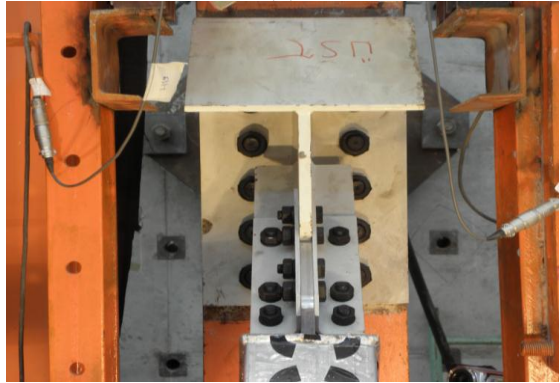
(c)



(d)

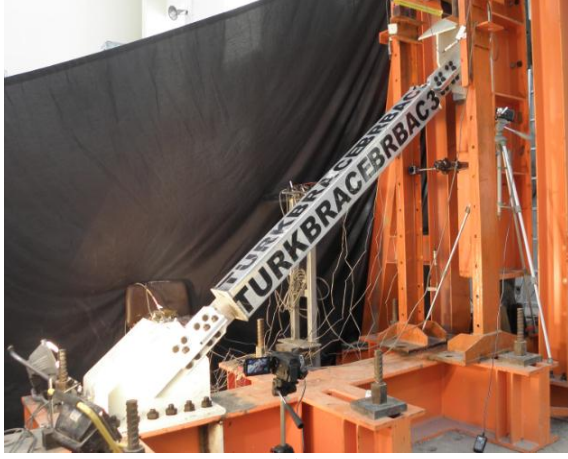


(e)



(f)

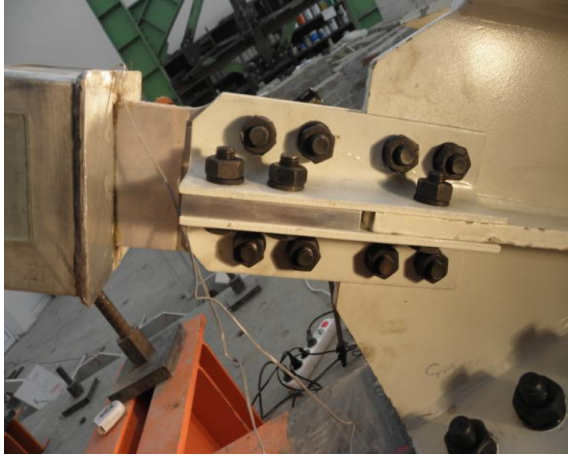
Şekil 4.15 : BRB-AC2 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b)Elastik davranış düzlem dışı. (c) Elastik davranış alt uç birleşim önden görünüş. (d) Elastik davranış alt uç yandan görünüş. (e) Elastik davranış üst uç genel görünüş. (f) Elastik davranış üst uç önden görünüş.



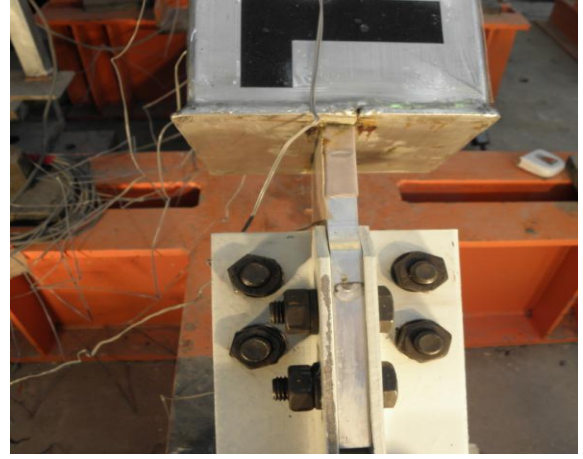
(g)



(h)



(i)



(i)



(j)



(k)

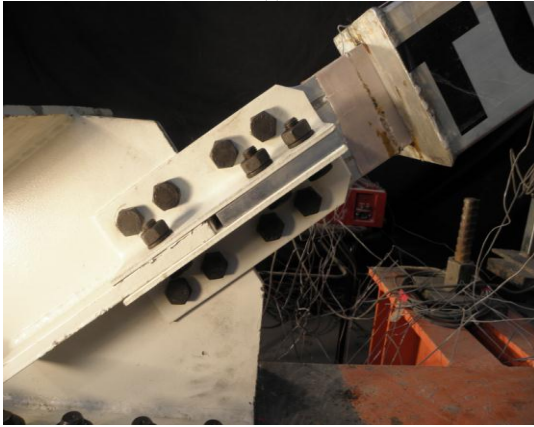
Şekil 4.15 (devam): (g) $+\Delta_{by}^E + 6.52\text{mm}$ (%0.35 görelî ötelenme oranı) yatay çekme etkisinde akma yerdeğiştirmesi genel görünüş. (h) $-\Delta_{by}^E$ akma yerdeğiştirmesi düzlem dışı davranış. (i) $+\Delta_{by}^E + 6.52\text{mm}$ yatay çekme etkisinde alt uç eksenel yerdeğiştirmesi. (i) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde alt uç düzlem dışı görünüş. (j) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç genel görünüş. (k) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel akma yerdeğiştirmesi.



(l)



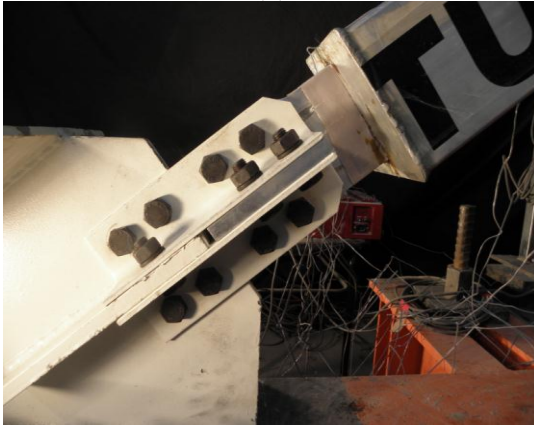
(m)



(n)



(o)

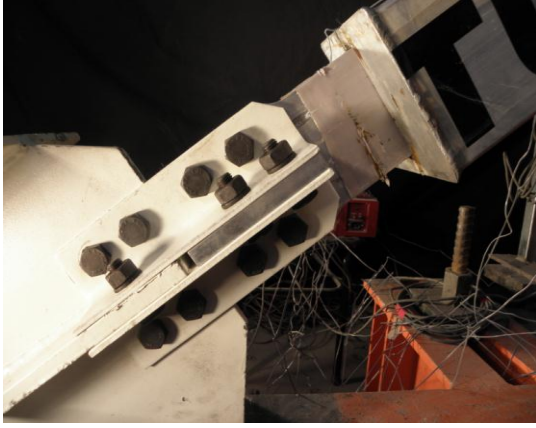


(ö)



(p)

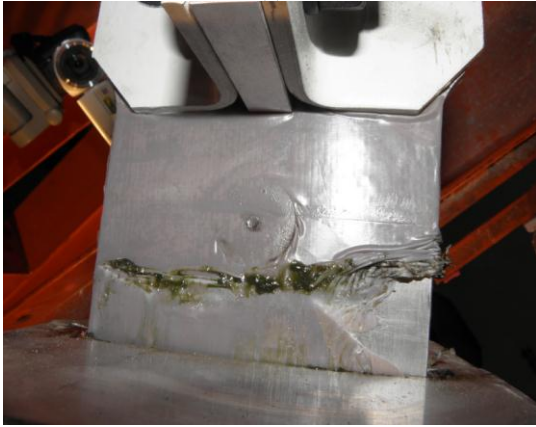
Şekil 4.15 (devam): (l) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+16.30\text{mm}$ (%0.88 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi. (m) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+16.30\text{mm}$ yatay yerdeğıştirmede üst uç eksenel yerdeğıştirme. (n) $+5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+32.60\text{mm}$ (%1.75 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi. (o) $+5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğıştirmesi. (ö) $-5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç eksenel yerdeğıştirmesi (net açıklık 65mm). (p) $\pm 5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde üst uç eksenel yerdeğıştirmesi.



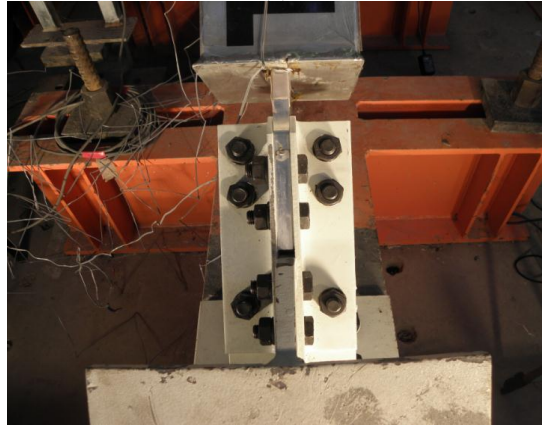
(r)



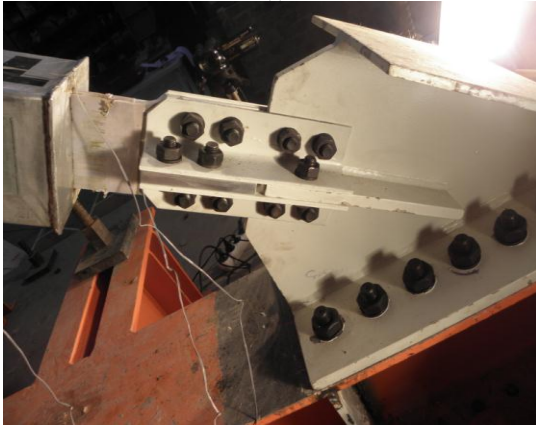
(s)



(t)



(u)



(ü)



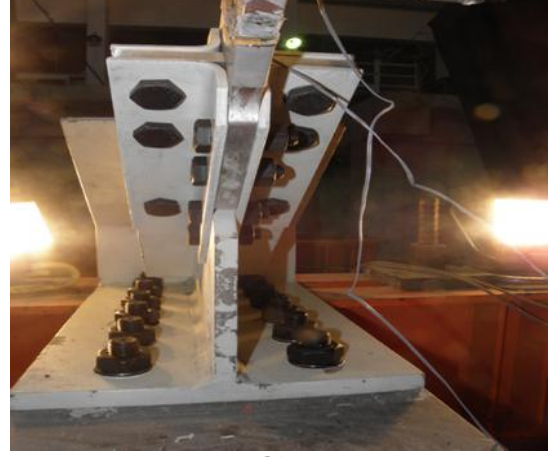
(v)

Şekil 4.15 (devam): (r) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+48.90\text{mm}$ (%2.63 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmesinde alt uç eksenel yerdeğıştirmesi. (s) $7.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç birleşimde net açıklık 85.00mm . (t) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+48.90\text{mm}$ yatay yerdeğıştirmesi üst uç eksenel yerdeğıştirmesi ve teflonda aşınma. (u) $-7.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç düzlem dışı durum ve teflonda aşınma. (ü) $+10\Delta_{by}^E$ ilk çekme pikine giderken çekirdek $+39.18\text{mm}$ (%2.11 görelî ötelenme oranı) eksenel yerdeğıştirmesinde kopma. (v) $\pm 10\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde numune genel görünüşü.

BRB-AC2 numunesinin deney sonrası bulonlu birleşimlerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Deney sonrası numunenin birleşim durumunu gösteren fotoğraflar Şekil 4.16’da gösterilmektedir.



(a)



(b)



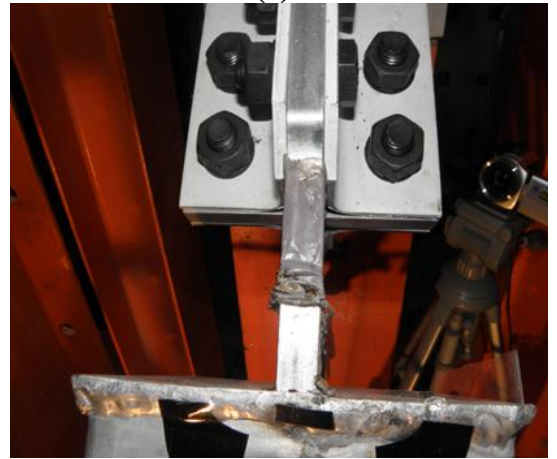
(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.16 : BRB-AC2 numunesi deney sonrası birleşim stabilitesi.

4.4.3 BRB-SC1 numunesi

BRB-SC1 numunesi ilk olarak güney doğrultusunda yüklenerek çekme etkisinde bırakılmıştır. Numunenin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.17’de verilmektedir. BRB-SC1 numunesinin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBSC4’dür. Numune çelik BÖÇ grubunda imal edilen 4. çaprazdır.

BRB-SC1 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ ’ündeki (%0.07 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.35\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ ’ündeki (%0.15 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 2.71\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ ’ündeki (%0.22 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 4.08\text{mm}$ olan 2 çevrimde elastik olarak davranmıştır. Elastik bölgede BRBKN şekildeğiştirmesi ilk çevrimde çekme etkisi altında $+1000\mu$, basınç etkisinde -455μ , ikinci elastik çevrimde çekme etkisinde $+1000\mu$, basınç etkisinde -430μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde $+1300\mu$, basınç etkisinde -400μ değerleri elde edilmiştir. BRB-SC1’in histeretik eğrisindeki gözle görülür akmanın oluştuğu nokta akma yerdeğiştirmesi olarak varsayılmıştır. BRBKN’nin erken hasar görerek okuma almamasının nedeni sonradan yapılan kesit açılımı ile anlaşılmıştır. Çekirdek, merkez noktadan koptuğundan akma yerdeğiştirmesi piklerinde BRBKN öngörülenden erken hasar görmüştür. Yapılan çekme deneylerinde de benzer bir durumla karşılaşmıştır.

BRB-SC1 numunesi statik itme analizi ile tahmin edilen Δ_{by}^P akma yerdeğiştirmesi $+5.41\text{mm}$ (%0.29 görelî ötelenme oranı)’dır. İlk çekme yüklemesinde tahmin edilen yerdeğiştirmesine çok yakın bir yerdeğiştirme değerinde akma gerçekleşmiştir. Numune çekme yüklemesinde $\pm \Delta_{by}^E$ için $+5.90\text{mm}$ yerdeğiştirmesi (%0.32 görelî ötelenme oranı) akma yerdeğiştirmesi olarak alınmıştır. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

$\pm 1.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 8.85\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.48 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+102.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti -103.00kN ’dur.

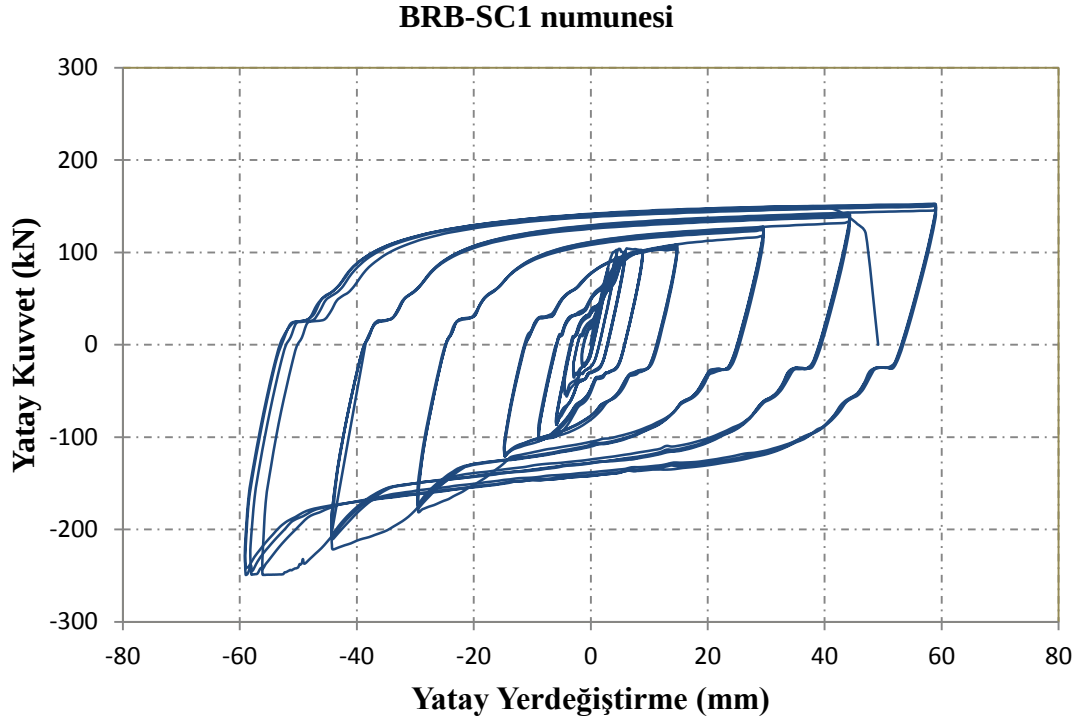
$\pm 2.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 14.75\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.79 görelı ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+107.00\text{kN}$ ve basınç kuvvetleri sırasıyla -120.00kN olarak elde edilmiştir. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.12'dir. Bu seviyede bayrak plakalarında, birleşimlerde ve çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. T5 düzlem dışı yerdeğiştirme ölçer bu seviyede batı doğrultusunda -0.48mm değerine ulaşmıştır.

$\pm 5\Delta_{by}^E$ (29.50mm yerdeğiştirme, %1.59 görelı ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+128.00\text{kN}$ olup maksimum basınç kuvveti ise -172.00kN 'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.34'dür. Bu seviyede basınç piklerinde basınç dayanımının artmaya başladığı gözlenmiştir.

$\pm 7.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 44.25\text{mm}$ yerdeğiştirme, %2.38 görelı ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+142.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti -203.00kN olarak elde edilmiştir. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.43'dür. Basınç piklerinde dayanımdaki artış devam etmiştir.

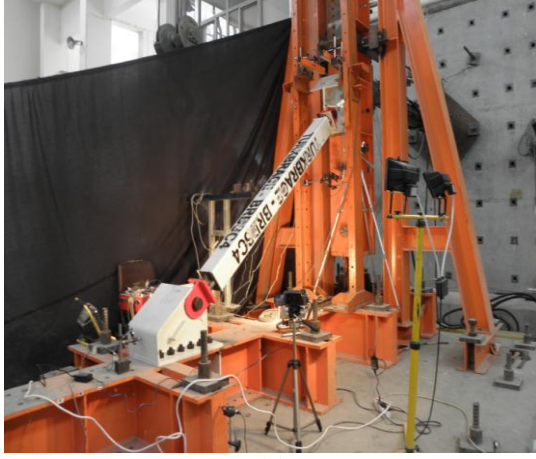
$\pm 10\Delta_{by}^E$ ($\pm 59.00\text{mm}$ yerdeğiştirme, %3.17 görelı ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+152.00\text{kN}$ ve -249.00kN olarak tespit edilmiştir. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.64'dür.

Numune $\pm 12.5\Delta_{by}^E$ ve %4.00 ötelenme oranı seviyesindeki ilk çekme pikine gidilirken $+50.14\text{mm}$ yerdeğiştirme düzeyinde ve $+120.12\text{kN}$ yatay yükte beklendiği üzere çekirdekten kopmuştur. Kopma sonrası çaprazın bayrak plakalarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Bu da numunenin tasarlandığı şekliyle davranış gösterdiğini ortaya çıkarmaktadır.

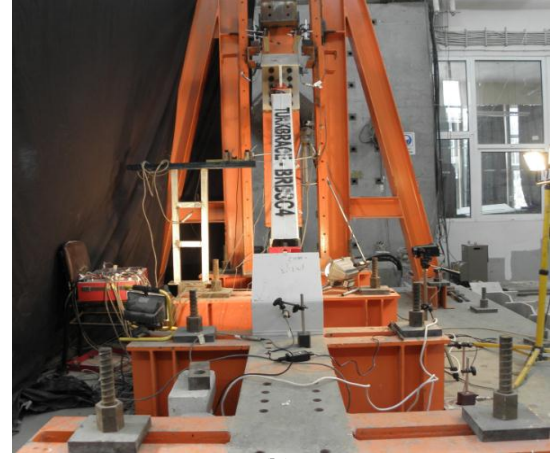


Şekil 4.17 : BRB-SC1 numunesi histeretik eğrisi.

Deneyisel çalışma sonucunda BRB-SC1'in maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %65 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Deneyisel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama olarak 1.47, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı ortalama olarak 1.65 bulunmuştur. Monotonik yüklemde bulunan değerle histeretik davranıştan elde edilen ω değerleri benzerdir. Şekil 4.18'de BRB-SC1'in deney fotoğrafları verilmektedir.



(a)



(b)



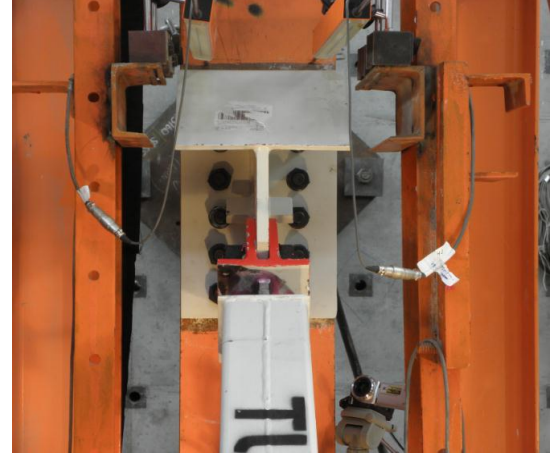
(c)



(d)



(e)



(f)

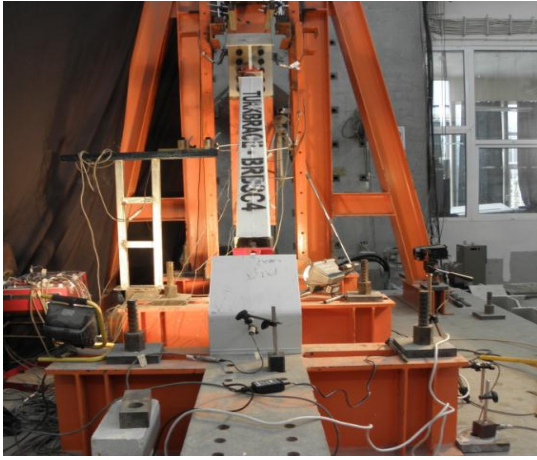
Şekil 4.18 : BRB-SC1 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) Elastik davranış düzlem dışı. (c) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+5.90\text{mm}$ (%0.32 göreceli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme alt uç eksenel akma yerdeğiştirmesi. (d) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+5.90\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel akma yerdeğiştirmesi. (e) $-\Delta_{by}^E$ alt birleşim düzlem dışı davranış. (f) $-\Delta_{by}^E$ üst birleşim düzlem dışı davranış.



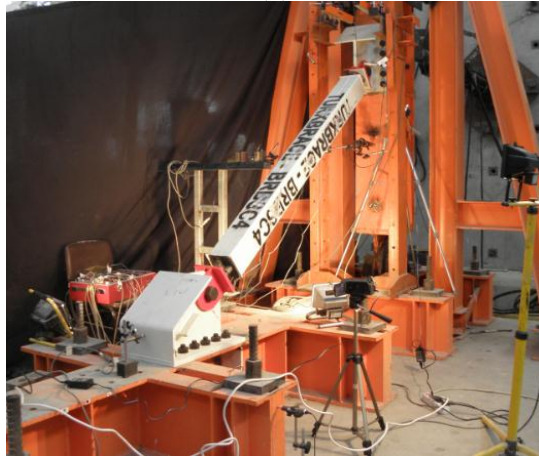
(g)



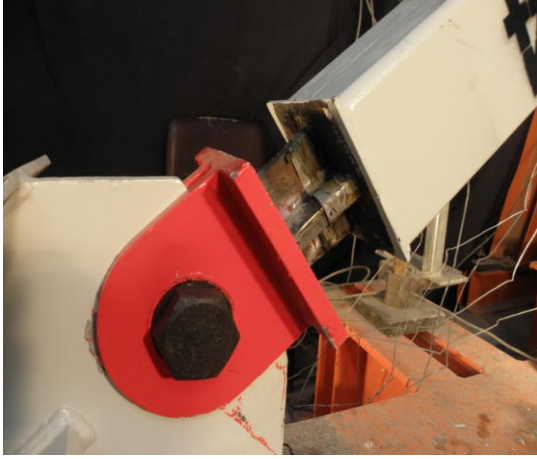
(h)



(i)



(j)



(k)

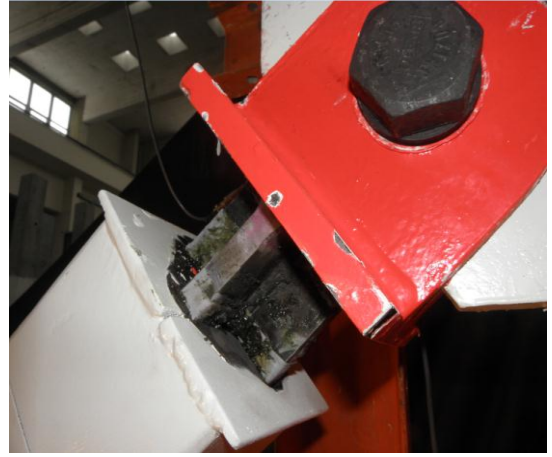


(l)

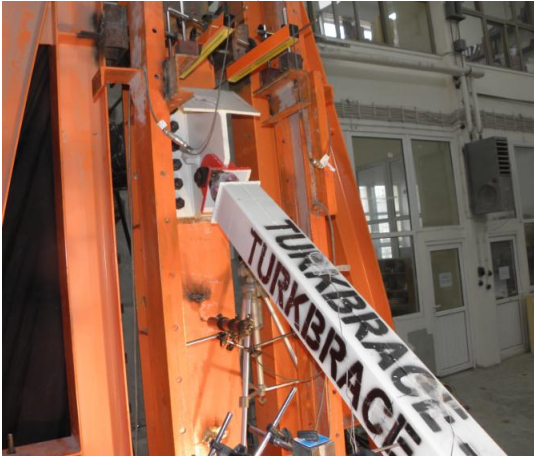
Şekil 4.18 (devam): (g) $+1.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+8.85\text{mm}$ (%0.48 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede eksenel yerdeğiştirme. (h) $+1.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğiştirme. (i) $-1.5\Delta_{by}^E$ düzlem dışı davranış. (j) $-1.5\Delta_{by}^E$ genel görünüş. (k) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+14.75\text{mm}$ (%0.79 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel yerdeğiştirme. (l) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğiştirmesi.



(m)



(n)



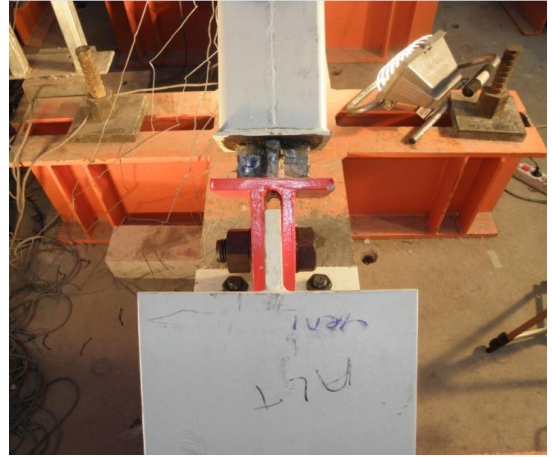
(o)



(p)



(r)



(s)

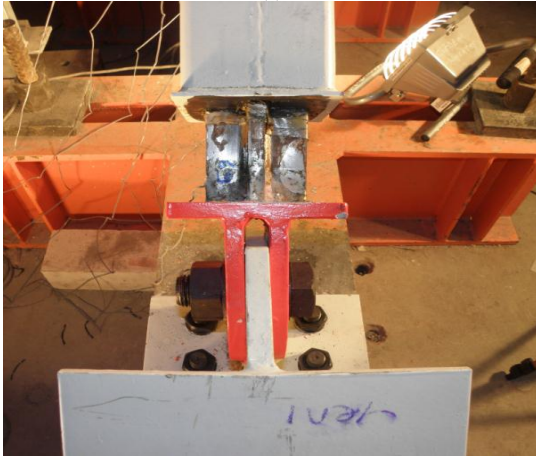
Şekil 4.18 (devam): (m) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+44.25\text{mm}$ (%2.38 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi. (n) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğıştirmesi. (o) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç birleşim davranış. (p) $-7.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç 69.00mm net açıklık. (r) $-7.5\Delta_{by}^E$ genel görünüş. (s) $-7.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç düzlem dışı davranış.



(t)



(u)



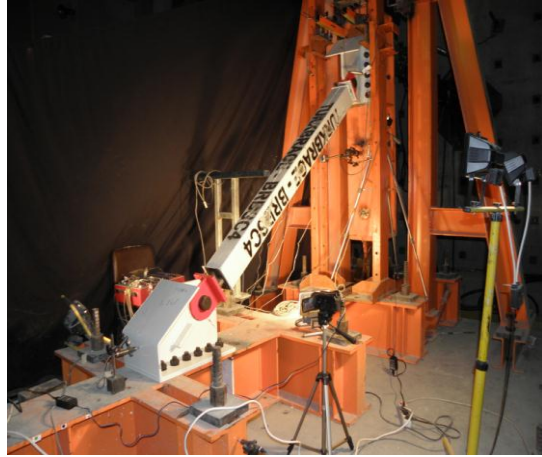
(ü)



(v)



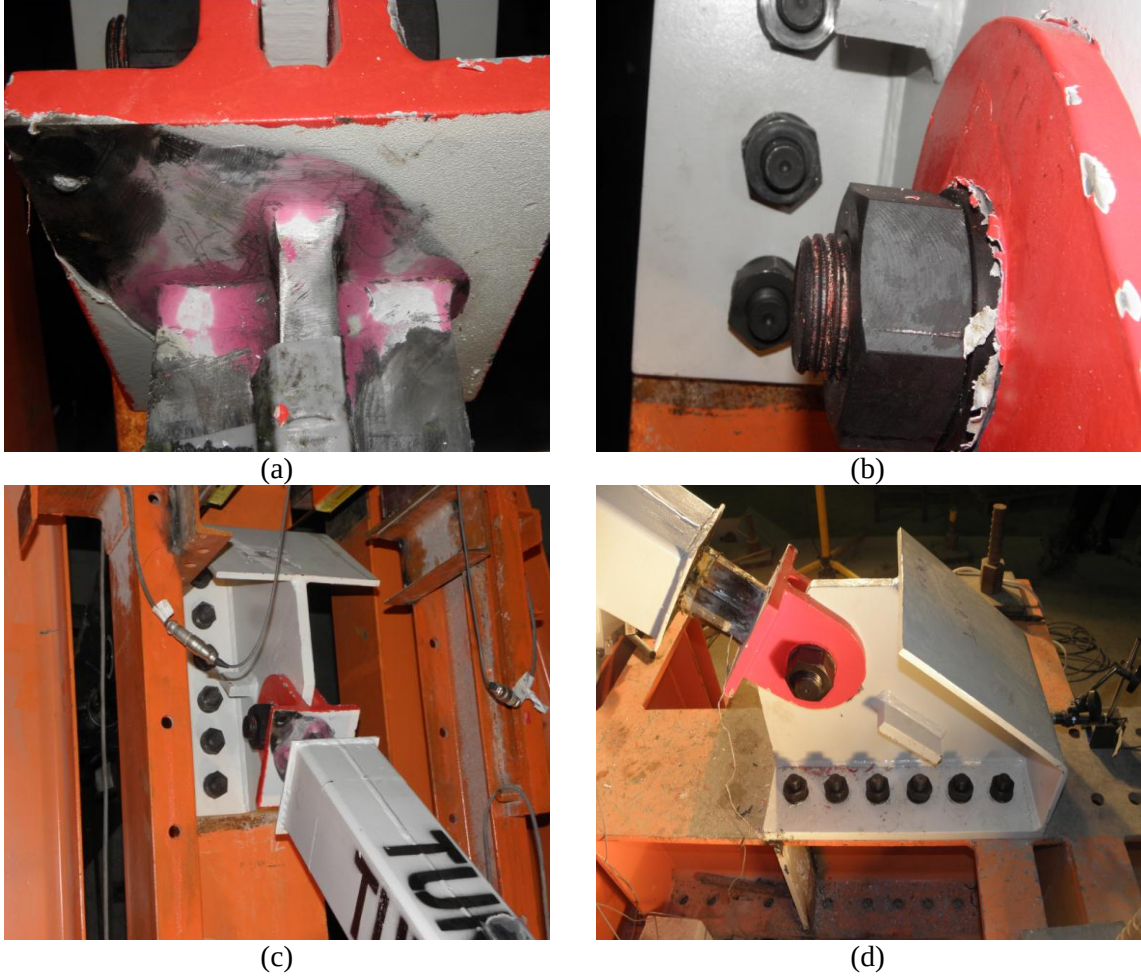
(y)



(z)

Şekil 4.18 (devam): (t) $-10\Delta_{by}^E$ birinci basınç pikinde alt uç 55.00mm net açıklık. (u) $+10\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde +59.00mm (%3.17 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi ve 115.49mm net açıklık. (ü) $+10\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde alt uç davranış. (v) $-10\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde üst uç birleşim davranış. (y) $-10\Delta_{by}^E$ dördüncü basınç pikinde alt uç 55.00mm net açıklık. (z) Çekirdek kopması sonrası BRB-SC1 genel görünüş.

BRB-SC1 numunesinin deney sonrası kaynak dikişlerinde ve bulonlu birleşimlerin gerekli kontrolleri yapılmış ve herhangi bir hasar oluşmadığı görülmüştür. Deney sonrası numunenin birleşimlerindeki mevcut durumu gösteren fotoğraflar Şekil 4.19’da gösterilmektedir.



Şekil 4.19 : (a) Üst birleşim alın plakasına tam nüfuziyetli kaynak birleşimi. (b) Üst birleşim bulonları. (c) Üst birleşim genel görünüş. (d) Alt birleşim genel görünüş.

4.4.4 BRB-SC2 numunesi

BRB-SC2 numunesinin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 4.20’de verilmektedir. BRB-SC2’nin deneysel etiketi TURKBACE-BRBSC5’dir. Numune çelik BÖÇ grubu içinde 5. olarak imal edilen çaprazdır. BRB-SC2 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ ’ündeki (%0.09 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.65\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ ’ündeki (%0.18 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 3.29\text{mm}$ olan 2

çevrimde, $\pm 3/4$ 'ündeki (%0.27 görelî ötelenme oranı) $\pm 4.94\text{mm}$ olan 2 çevrimde elastik davranmıştır. Elastik bölgede ilk çevrimde çekme yüklemesi altında BRBKN $+1500\mu$, basınç etkisinde -740μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde $+1588\mu$, basınç yüklemesinde -1000μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde $+1600\mu$, basınç etkisinde -1450μ değerleri okunmuştur.

BRB-SC2'nin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme $\pm \Delta_{by}^P$ akma yerdeğiştirmesi $\pm 6.62\text{mm}$ (%0.36 görelî ötelenme oranı)'dır. Numunede çekme yüklemesinde $\pm \Delta_{by}^E$ için $+6.61\text{mm}$ yerdeğiştirmesinde (%0.36 görelî ötelenme oranı) akma gerçekteşmiştir. Akma sırasında metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden $+1923\mu$, basınç yüklemesinde -1021μ okumaları yapılmıştır. Akma yüklemesinin 2. çekme pikinde BRBKN $+2100\mu$ değerinde okunmuştur. Bu değerler kupon deneylerinden elde edilen akma şekildeğiştirme değerleri ile aynıdır. Bu yolla, deneyde net bir şekilde akma yerdeğiştirmesi belirlenmiştir. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak plakalarında, birleşimlerde, çaprazın genel durumunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm \Delta_{by}^E$ seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+87.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti ise -75.00kN 'dur.

$\pm 1.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 9.92\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.53 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+88.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti ise -99.50kN 'dur. Bu seviyede BRBKN'de çekme piklerinde $3500\mu \sim 3680\mu$ arasında değerler okunmuştur.

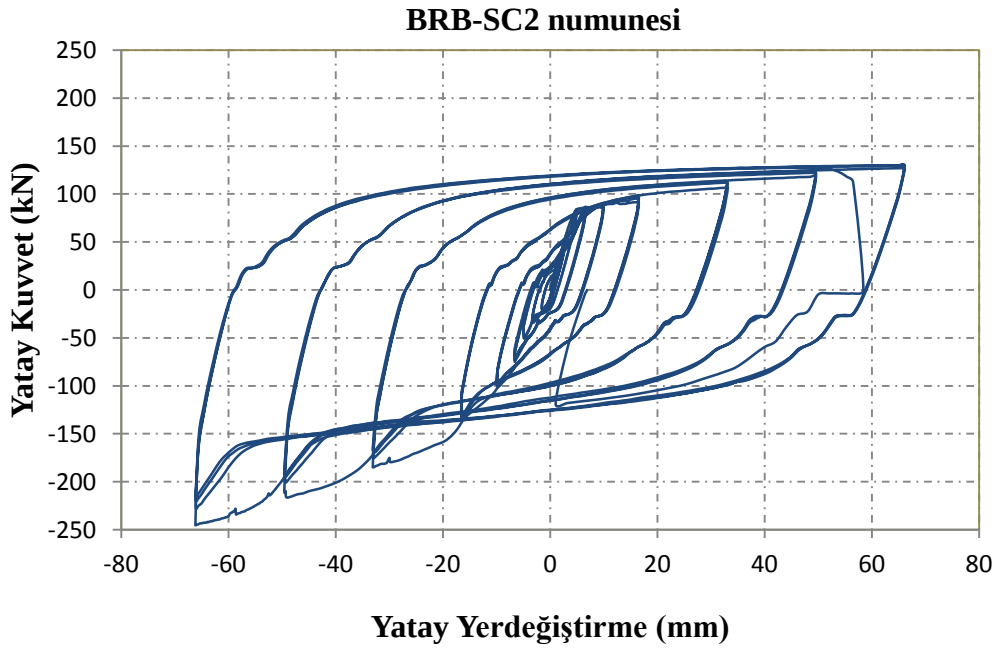
$\pm 2.5\Delta_{by}^E$ ($\pm 16.53\text{mm}$ yerdeğiştirme, %0.89 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+99.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti ise -132.00kN 'dur. BRBKN okuması bu seviyenin ilk çekme pikine giderken $+3082\mu$ 'a hasar görmüştür. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.33 değerini almaktadır. Bu seviyede bayrak plakalarında, birleşimlerde ve çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

$\pm 5\Delta_{by}^E$ ($\pm 33.05\text{mm}$ yerdeğiştirme, %1.78 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti $+111.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti ise

-165.00kN'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.49'dur. Bu seviyede basınç dayanımında artış gözlenmiştir.

$\pm 7.5\Delta_{by}^E$ (± 49.58 mm yerdeğiştirme, %2.67 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla +121.00kN ve -189.00kN'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.56'dır. Basınç dayanımındaki artış devam etmiştir.

$\pm 10\Delta_{by}^E$ (± 66.10 mm yerdeğiştirme, %3.55 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +130.00kN, maksimum basınç kuvveti -210.00kN'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.62'ye ulaşmıştır. Numune $\pm 12.5\Delta_{by}^E$ ve %4.44 görelî öteleme oranı seviyesinde ilk çekme pikine gidilirken +56.51mm yerdeğiştirme ve +112.53kN'da çekirdek bölgesinde kopmuştur. Kopma sonrası bayrak plakalarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.



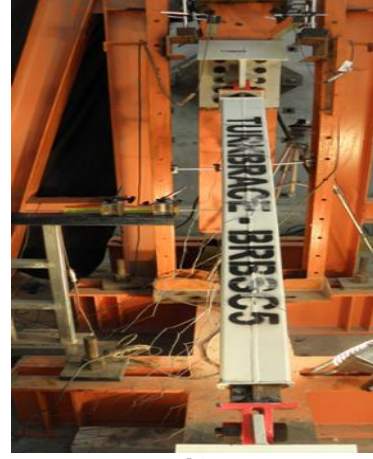
Şekil 4.20 : BRB-SC2 numunesi histeretik eğrisi.

Deneysel çalışma sonucunda BRB-SC2'nin maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %76 daha büyük olduğu bulunmuştur. Deneysel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.46, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.76'dır. Bu değerler kupon deneylerinde elde edilenler ve pushover analizi ile edilen değerlerle karşılaştırıldığında β basınç dayanımı düzeltme

katsayısı Deney/Pushover oranı 1.53'dür. Şekil 4.21'de BRB-SC2'nin deney fotoğrafları verilmektedir.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

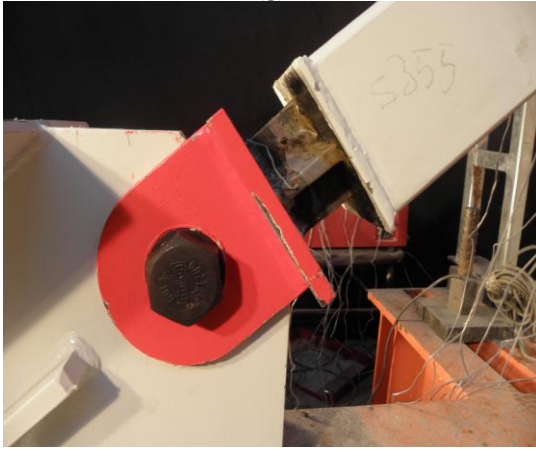
Şekil 4.21 : BRB-SC2 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) Elastik davranış düzlem dışı. (c) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+6.61\text{mm}$ (%0.36 görece ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel akma yerdeğiştirmesi. (d) $+\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel akma yerdeğiştirmesi. (e) $-\Delta_{by}^E$ seviyesinde düzlem dışı durum. (f) $-\Delta_{by}^E$ seviyesinde çaprazın genel görünüşü.



(g)



(h)



(i)



(j)



(k)



(l)

Şekil 4.21 (devam): (g) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme seviyesinde $+16.53\text{mm}$ (%0.89 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel yerdeğiştirme. (h) $+2.5\Delta_{by}^E$ çekme seviyesinde üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (i) $-2.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde -16.53mm yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel akma yerdeğiştirmesi (net açıklık 69.00mm). (j) $-2.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde -16.53mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel akma yerdeğiştirmesi. (k) $+5\Delta_{by}^E$ çekme seviyesinde $+33.05\text{mm}$ (%1.78 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel yerdeğiştirme. (l) $+5\Delta_{by}^E$ çekme seviyesinde üst uç eksenel yerdeğiştirmesi.



(m)



(n)



(o)



(p)



(r)



(s)

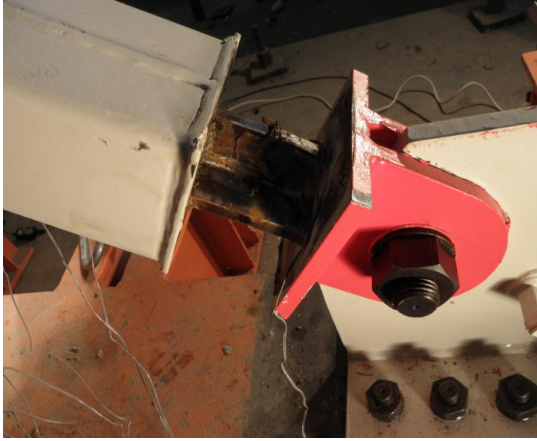
Şekil 4.21 (devam): (m) $+5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde alt uç düzlem dışı davranış. (n) $-5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç düzlem dışı davranış. (o) $+7.5\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+49.58\text{mm}$ (%2.67 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi (net açıklık=108.00mm). (p) $-7.5\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde alt uç 60.00mm net açıklık. (r) $+10\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde $+66.10\text{mm}$ (%3.55 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenelyerdeğıştirmesi. (s) $+10\Delta_{by}^E$ çekme etkisinde üst uç eksenel yerdeğıştirmesi.



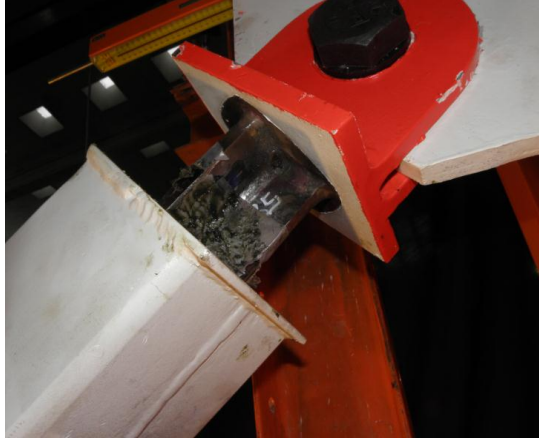
(t)



(u)



(ü)



(v)



(y)



(z)

Şekil 4.21 (devam): (t) $-10\Delta_{by}^E$ birinci basınç pikinde alt uç 55.00mm net açıklık. (u) $-10\Delta_{by}^E$ basınç etkisinde üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (ü) $+12.5\Delta_{by}^E$ çekme pikine giderken +56.51mm (%3.04 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç kopma eksenel yerdeğiştirmesi. (v) $\pm 12.5\Delta_{by}^E$ çekme pikine giderken +56.51mm yatay yerdeğiştirmede üst uç kopma eksenel yerdeğiştirmesi. (y) Çekirdek kopması sonrası genel görünüş. (z) Çekirdek kopması sonrası yerinde yapılan incelemeler.

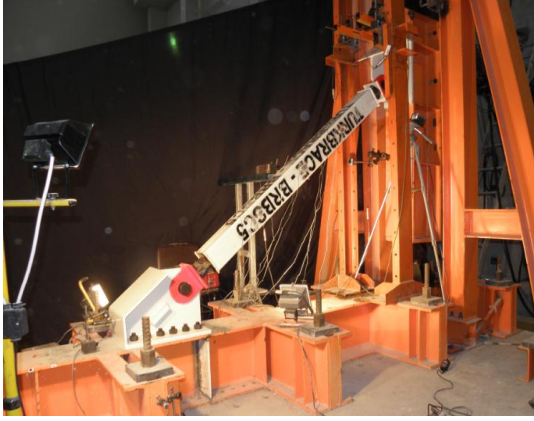
BRB-SC2 numunesinin deney sonrası kaynak dikişlerinde ve bulonlu birleşimlerinde herhangi bir hasar oluşmadığı görülmüştür. Deney sonrası numunenin birleşimlerinin durumunu gösteren fotoğraflar Şekil 4.22’de gösterilmektedir.



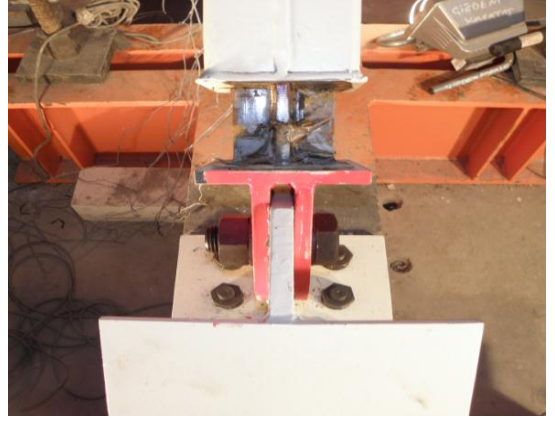
(a)



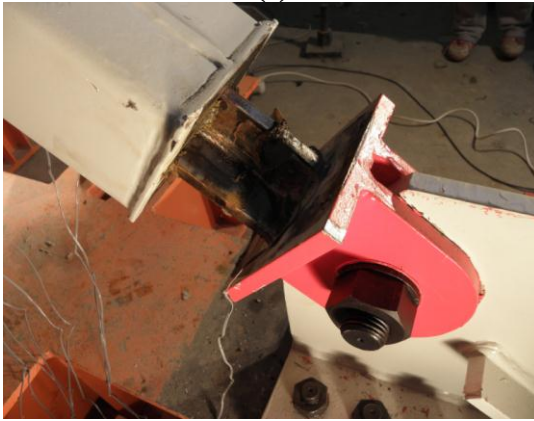
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Şekil 4.22 : BRB-SC2 deney sonrası birleşimlerin durumunu gösteren fotoğraflar (a) Üst uç bayrak levhası birleşimi. (b) Üst uç çekirdek alın plakası birleşimi. (c) Genel görünüş. (d) Alt uç bayrak levhası birleşimi. (e) Alt bayrak levhası deney düzeneği birleşim durumu. (f) Üst uç bayrak levhası deney düzeneği birleşim durumu.

5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1 Genel

Deneyleerin tamamı öngörölen yökleme protokollerine göre geröekleştirilmiş ve göömeye kadar başarı ile tamamlanmıştır. Her numune için standart yökleme protokolüne ve yüksek genlikli yökleme protokolüne göre elde edilen sonuölar aşağıda özetlenmiştir:

- Deneyleerde yön değıştiren yöklemeler etkisinde elde edilen ortalama yatay kuvvet-yatay yerdeğıştirme değıerleri her numune için ayrı ayrı öizelge halinde verilmiştir. Deney düzeneğinin actuator hizasındaki ortalama yatay yerdeğıştirmesi, T1E ve T1W yerdeğıştirme öölöerlerden elde edilen değıerlerin ortalaması alınmıştır Deneyler sırasında bu iki değıer sürekli olarak kontrol edilmiştir.
- ω öekme dayanım düzeltme katsayısının ve β basınö dayanım düzeltme katsayısının Δ_{by}^E öapraz yatay yerdeğıştirmesine göre deneysel değışimi her numuneye ilişkin öizelgede verilmiştir.
- Statik itme analizi ile tahmin edilen davranış ile deneylelerden elde edilen histeretik davranışlar karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Ayrıca yatay kuvvet-görelili ötelenme oranı histeretik eğırisi olarak ayrı bir karşılaştırma da yapılmıştır.
- Numunelerin kümölatif enerji yutma miktarları ayrı ayrı ve karşılaştırmalı olarak verilmektedir.
- Numunelerin düzlem dışı davranışlarını kontrol etmek ve anlamak için T5 ve T7 yerdeğıştirme öölöerlerinde alınan okumalar yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğıştirme histeretik eğırisi oluşturularak verilmektedir. Her öaprazın dış tüp üzerindeki şekildeğıştirmeleri dış tüp alt uö dört yüz; BRB1U, BRB1L, BRB1W, BRB1E, dış tüp orta dört yüz; BRB2W, BRB2E, BRB2U, BRB2L, dış tüp öst uö dört yüz; BRB3U, BRB3L, BRB3W, BRB3E'den alınan

okumalarla belirlenmiş olup karşılaştırmalı olarak EK C’de topluca verilmektedir.

- Metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden alınan okumalar yatay kuvvet-şekildeğiştirme grafiği oluşturularak verilmektedir.
- Bayrak plakalarının deney sırasında elastik kaldığını anlamak ve davranışı kontrol etmek için T6 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalar yatay kuvvet-T6 yerdeğiştirme grafiği oluşturularak verilmektedir. GEL1, GEL2, GEU1, GEU2 şekildeğiştirme ölçerlerindeki okumalar T6 yerdeğiştirme ölçerin yeterli görülmesinden dolayı bu kanal okumaları yapılmamıştır.

Elde edilen histeretik eğriler stabildir. Kuvvetin artış büyüklüğü ilk çevrimlerde özellikle basınç yüklemesinde azalmakta ancak çekirdek ile dolgu malzemesi arasındaki ayrılmalar arttıkça burkulmayı önleyen ortamla temas da arttığından bir yük aktarımı olmakta ve basınç dayanımı özellikle yüksek deplasmanlarda artmaktadır.

Çelik numunelerin histeretik eğrilerde görülen yatay sıçramaların nedeni mafsallık plakaları ile bayrak plakaları arasındaki bulon deliklerindeki 1mm’lik imalat fazlalığı olduğu düşünülmektedir; buna benzer durumlar literatürdeki pekçok deneyde de gözlenmiştir. Gerçekde bu istenmeyen bir durumdur. Alüminyum alaşımlı numunelerde bulon delikleri 0.5mm tolerans verilerek açıldığından yatay sıçramalar gözlenmemiştir.

İnelastik çekme davranışı eğriseldir ancak özellikle çelik numunelerde düz yatay bir köşesi olma eğilimindedir. İnelastik basınç yüklemesinde de aynı davranış mümkündür, ancak uç kısımları daha belirgindir. Bunun sebebi dolgu malzemesinin katkısından dolayı artan sürtünme kuvvetlerinin basınç dayanım kuvvetlerini arttırmasıdır. Çekme durumunda çekirdek ile burkulmayı önleyen sistem arasında oluşan sürtünmenin dayanıma katkısı olmadığı histeretik eğrilerinde açıkça görülmektedir. Ayrıca çekmede poisson etkisi nedeniyle çekirdek kesitinin küçülmesi de boşluğu artırmakta, böylece sürtünmeyi azaltmaktadır.

Çekirdeklerin kupon çekme deneylerindeki elastik davranışları deneysel BÖÇ davranışı ile benzerdir; ilk yerdeğiştirme çevrimlerinde bu açıkça görülmektedir. Malzeme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrilerinden anlaşılacağı

gibi ilk akma, sönümleyicinin ilk akma noktasına yakın hatta aynı noktadır. Aynı zamanda çekirdek ile burkulmayı önleyen sistem arasındaki ilk ayrılmanın oluştuğu noktadır.

5.2 BRB-AC1 Numunesi

Deneysel etiketi TURKBRACE-AC1 olan BRB-AC1 numunesinin yön değiştiren tekrarlı yükler altında yerdeğiştirme genlikleri ve bu yerdeğiştirmelere karşı gelen ortalama çekme ve basınç kuvvet pikleri Çizelge 5.1’de özetlenmiştir. Numunenin uygulanan standart yükleme protokolü boyunca performansı oldukça kararlıdır. Elde edilen histeretik eğride çelik numunelerde izlenen yatay sıçralamalar gözlenmemiştir. Bu, çelik numunelerde 1mm olan bulon delik çapı toleransının alüminyum alaşımlı numunelerde 0.5mm’ye düşürülmesinin sonucudur.

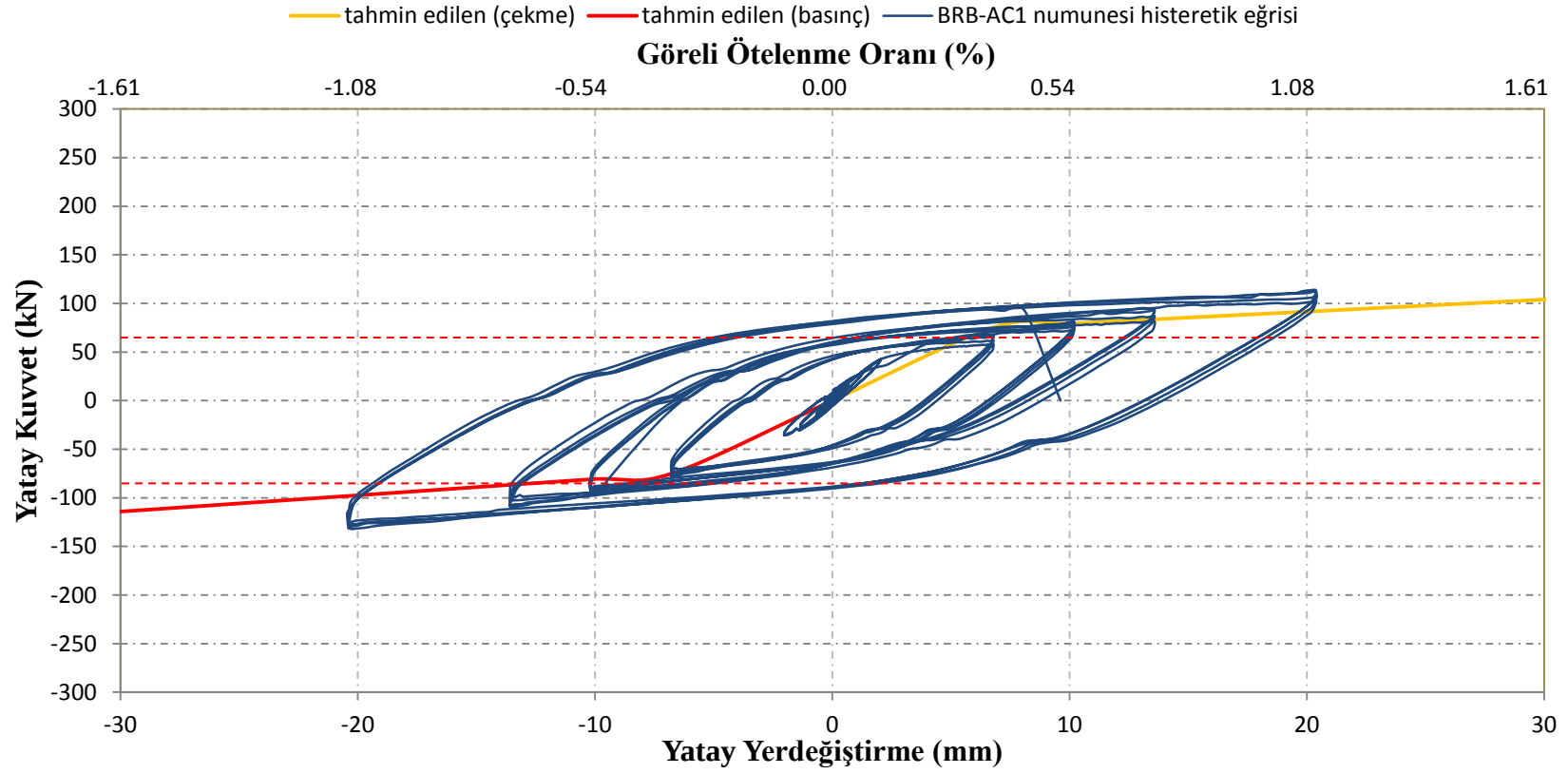
Deneysel çalışma sonucunda BRB-AC1’in maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %17 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı 1.72, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.17 olup monotonik çekme deneyinden elde edilenlerle aynı değerler civarındadır.

BRB-AC1 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen davranışında öngörülen $\mu_{\max}$ maksimum süneklik oranı 7.5 alındığında, Δ_u^P maksimum yerdeğiştirme sınırı $\pm 51.01\text{mm}$ ’de, maksimum çekme kuvveti $T_{\max}^P = +129.90\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti $P_{\max}^P = -149.39\text{kN}$ olarak tahmin edilmiştir. Tahmini akma kuvveti $T_y^P = \pm 75.29\text{kN}$ ’dur. Statik itme analizinden elde edilen sistem başlangıç rijitliği K_0^P çekme ve basınç yüklemesinde eşit olarak $\pm 11.07\text{kN/mm}$ ’dir. Akma sonrası sistem rijitliği K_1^P çekme yüklemesinde $+1.24\text{kN/mm}$ (başlangıç rijitliğinin %11.20’si), basınç yüklemesinde -1.68kN/mm (başlangıç rijitliğinin %15.18’i) olarak tahmin edilmiştir.

Numune $\pm 5\Delta_{by}^E$ yerdeğiştirmesini tamamlamış, $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ seviyesi $+33.98\text{mm}$ ’nin ilk çekme pikine giderken $+92.15\text{kN}$ ’da kopmuştur. Şekil 5.1’de BRB-AC1 numunesinin kuramsal olarak tahmin edilen zarf eğrisi ile deneyden elde edilen histeretik eğrinin karşılaştırması verilmektedir.

Çizelge 5.1 : BRB-AC1 numunesi çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	Kümülatif çevrim sayısı	Δ/Δ_{by}^E	Yatay kümülatif yerdeğiştirme Δ_{by}^E (mm)	T_{max}^E (kN)	P_{max}^E (kN)	β	ω	$\beta\omega$	İnelastik yerdeğiştirme	Kümülatif inelastik yerdeğiştirme η	Görelî ötelenme oranı (%)
1	2	2	0.25	± 1.69	24.60	-22.00	0.89	0.37	0.33	-	-	0.09
2	2	4	0.50	± 3.40	44.00	-40.00	0.91	0.66	0.60	-	-	0.18
3	2	6	0.75	± 5.10	59.50	-59.50	1.00	0.89	0.89	-	-	0.27
4	4	10	1.00	$\pm 6.80(\Delta_{by}^E)$	$63.26(T_y^E)$	-74.51	1.18	1.00	1.18	-	-	0.37
5	4	14	1.50	± 10.19	77.51	-90.73	1.17	1.23	1.43	$4\Delta_{by}^E$	$4\Delta_{by}^E$	0.55
6	4	18	2.50	± 13.59	89.31	-104.32	1.17	1.41	1.65	$12\Delta_{by}^E$	$16\Delta_{by}^E$	0.73
7	4	22	5.00	± 20.39	108.97	-127.95	1.17	1.72	2.02	$32\Delta_{by}^E$	$48\Delta_{by}^E$	1.10



Şekil 5.1 : BRB-AC1 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.

$\pm 5\Delta_{by}$ yerdeğiştirme seviyesindeki maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında Deney/Pushover oranı 1.00'dır. Aynı çevrim seviyesinde maksimum basınç kuvvetleri karşılaştırıldığında Deney/Pushover oranı 1.06'dır.

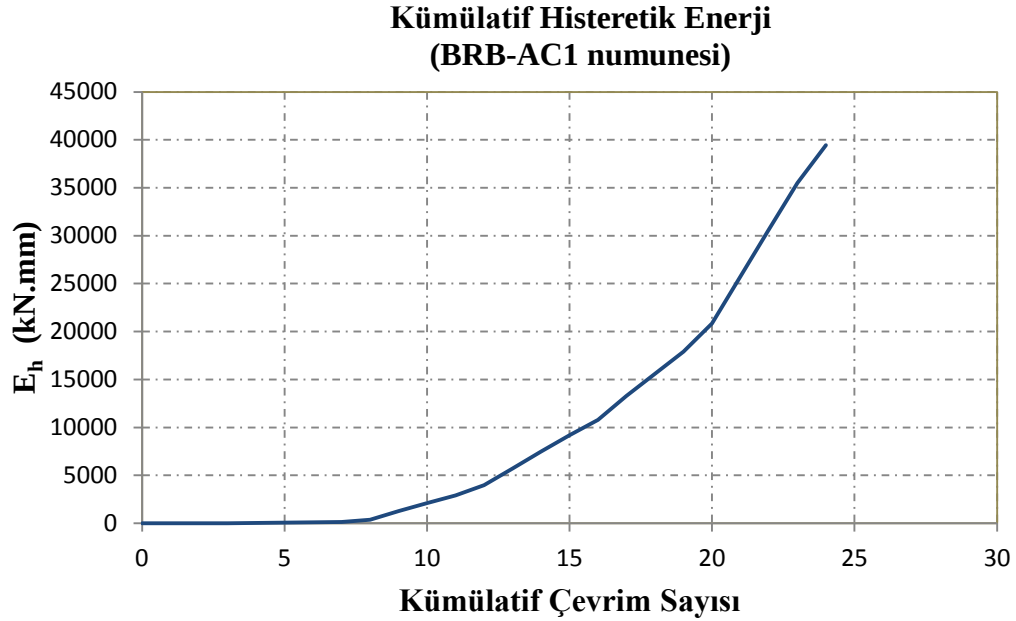
K_0^E deneysel sistem başlangıç rijitlikleri BRB-AC1 numunesi için, çekmede +9.31kN/mm, basınçta -10.97kN/mm olarak elde edilmiştir. Statik itme analizi ile karşılaştırıldığında Pushover/Deney oranı çekmede 1.19, basınçta 1.01'dir. K_1^E akma sonrası deneysel rijitlikler, BRB-AC1 numunesi için, çekmede +3.36kN/mm, basınçta -3.93kN/mm olarak elde edilmiştir. Buna göre K_1^E/K_0^E oranı çekme ve basınçta ± 0.36 değerini almaktadır. Deneylerde elde edilen değerler statik itme analizi ile karşılaştırıldığında K_1^E/K_1^P oranı çekmede 2.71, basınçta 2.34'dür. Bunun nedeni, numunenin statik itme analizi ile tahmin edilen göçme yerdeğiştirmesinin deneyde daha erken aşamada gerçekleşmesidir. Deneylerde yalnızca BRB-AC1 numunesinde karşılaşılan bu durum yapılan kesit ağılımlarında yapılan gözlemlerde de anlaşılmıştır. Çekirdek akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçiş noktasındaki berkitme plakalarına yapılan alüminyum kaynak bu noktada plastik mafsalları oluşumunu öngörölenden erken başlatmıştır; diğer bir deyişle, kaynak etkisiyle metalin bünyesi etkilenmiş ve çapraz beklenenden daha erken ve istenmeyen bir bölgede kopmuştur. Yine de davranış bu yerdeğiştirme düzeyine kadar kararlı ve BÖÇ'lerden beklenen düzeydedir.

Göçmede/kopmada kümülatif inelastik yerdeğiştirme $48\Delta_{by}^E$ olarak elde edilmiştir. AISC 341 (2010) ilkelerine göre eksenel yükleme deneylerinde, yükleme protokolü sonunda toplam inelastik yerdeğiştirmenin en az $200\Delta_{by}$ olması gerektiğini belirtmektedir. Bu koşul, eksenel yükleme deneylerinde zorunlu olmakla birlikte çalışmada kullanılan deney düzeneklerine benzer BÖÇ deneylerinde zorunlu tutulmamaktadır (AISC 341-10, 2010).

5.2.1 Kümülatif histeretik enerji

Deneylerden elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisinin kapsadığı alan numunenin deney sırasında yuttuğu enerji miktarını vermektedir. Kümülatif (birikimli) enerji hesabı, yapının deprem verimliliğini anlamada en etkin

ölçütlerden biridir. BRB-AC1 numunesi, E_h kümülatif yutulan enerjinin, kümülatif çevrim sayısıyla değişimini gösterir grafik Şekil 5.2’de verilmektedir (Dindar, 2009).

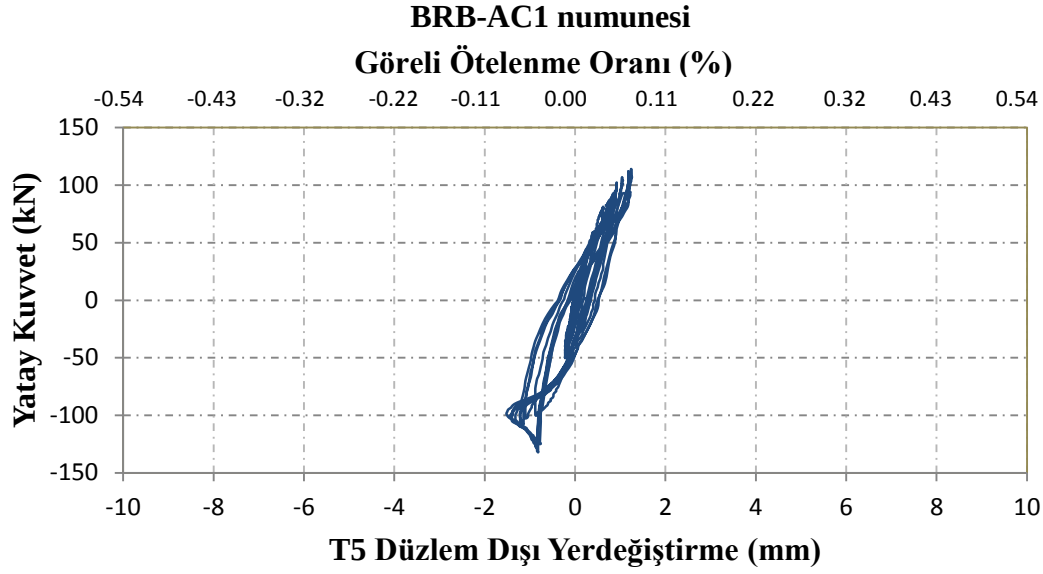


Şekil 5.2 : BRB-AC1 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.

Beklenildiği gibi elastik çevrimlerde önemli bir enerji yutumu gerçekleşmemiştir. Çekirdek, çekme ve basınç yüklemede benzer akma davranışı gösterdiğinden burkulan klasik çaprazların aksine daha uzun çevrimlerde yutulan enerji miktarı büyük olup çaprazın kopma ömrü uzamaktadır.

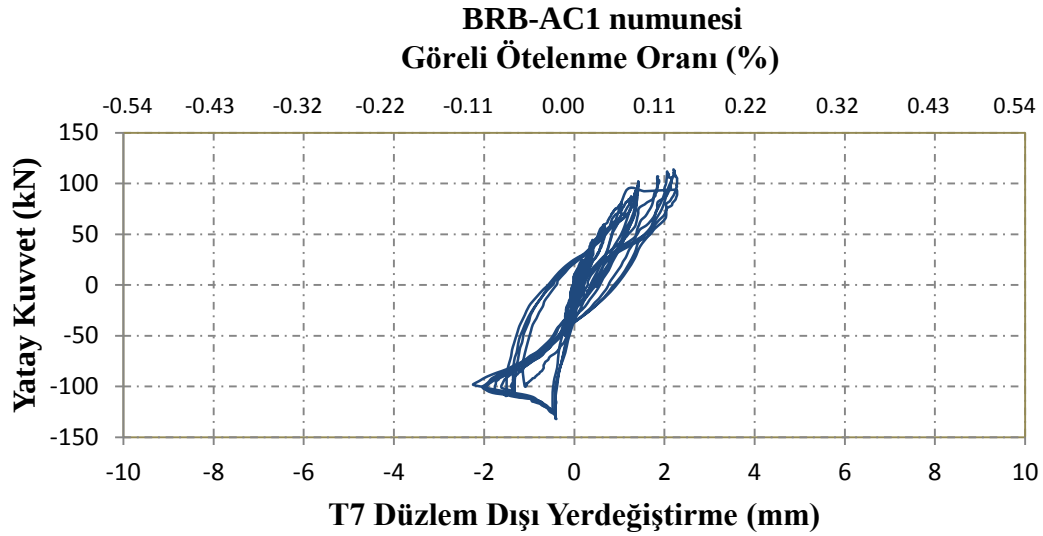
5.2.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BÖÇ’lerin verimliliğinin kanıtlanmasında en önemli ölçütlerinden biri bu çalışmadaki tüm deneylerde olduğu gibi çaprazın düzlem içi ya da dışı burkulmamasıdır. Bu çalışmadaki tüm deneylerde olduğu gibi BRB-AC1 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil 5.3’de yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta gözlenmektedir. Ulaşılan yerdeğiştirme pikleri -1.48mm~+1.24mm arasındadır.



Şekil 5.3 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

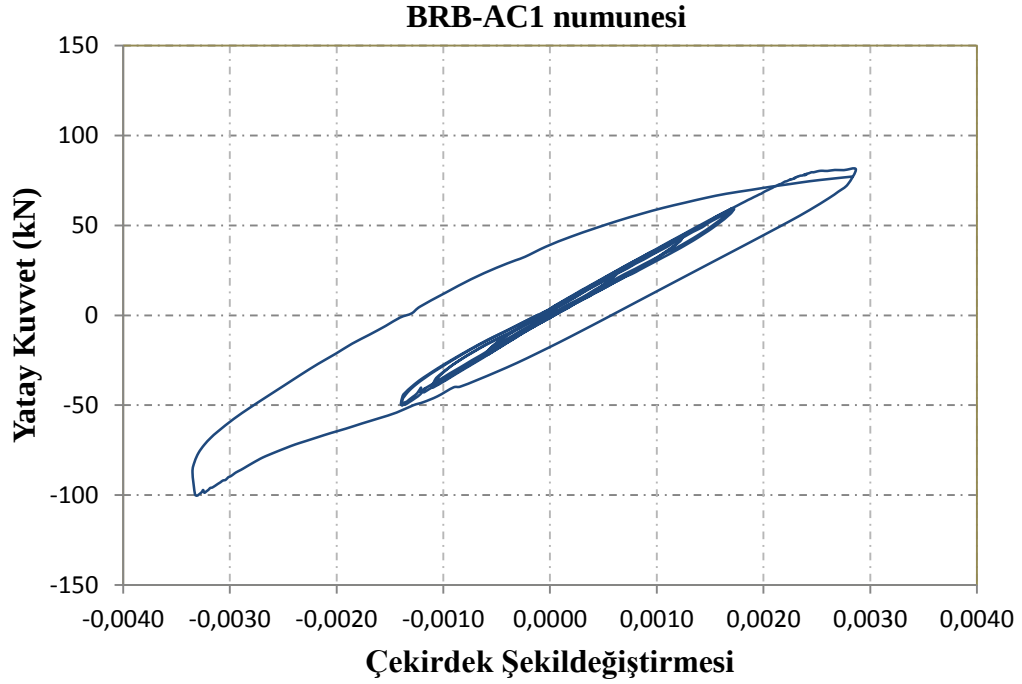
BRB-AC1 numunesi dış tüp alt kottan 50mm içeriye yerleştirilen T7 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla oluşturulan yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil 5.4'te verilmektedir. Bu grafik çaprazın burkulmayı önleyen ortama geçişte oluşan düzlem dışı yerdeğiştirmesi hakkında bilgi vermektedir. Bu eğriler çaprazın düzlem dışı/içi burkulmasının önlendiğini kanıtlamaktadır.



Şekil 5.4 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.2.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi

Metal yüzeye yerleştirilen şekildeğiştirme ölçeri BRBKN'den alınan şekildeğiştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi şekil 5.5'te verilmektedir. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden çekme etkisinde +2200 μ , basınç etkisinde -3300 μ birim şekildeğiştirme okumaları yapılmıştır. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinin 4. ve son çekme pikine giderken BRBKN hasar görerek okuma alınmamıştır.

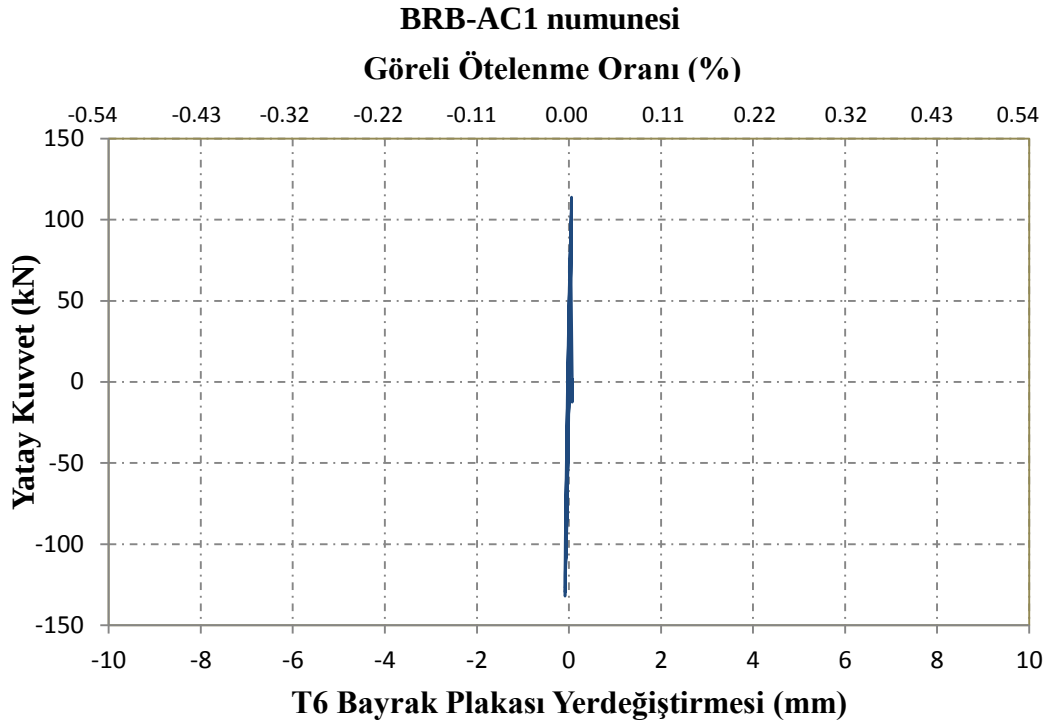


şekil 5.5 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.

BRB-AC1'in elastik bölgedeki eksenel yerdeğiştirmesi hesaplanırken, $F_{ysc}^{0.2}$ akma gerilmesi yerine F_{ysc}^0 akma gerilmesi kullanılmıştır (Usami ve diğ., 2012). F_{ysc}^0 akma gerilmesi 5083-H111 alüminyum alaşımı için $\epsilon_0=0.8\epsilon_y^{0.2}$ noktasından başlayarak gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusalın eğriyi keştiği noktadır. BRB-AC1 numunesinin çekme deneylerinde elde edilen $\epsilon_y^{0.2}$ değeri +0.0027, ϵ_0 değeri ise +0.0022 mikrostrain'dir. Deneyde hedeflenen akma birim şekildeğiştirmesi +2200 μ değerinin BRBKN okumalarında net bir şekilde elde edildiği şekil 5.5'de görölmektedir. Böylece metal yüzeyinden akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesi yöntemi ve hesap kabul yaklaşımlarının etkinliği deney sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.

5.2.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

Deney boyunca bayrak plakasının elastik kalması, akmanın yalnızca çekirdek akma bölgesinde oluştuğunu, çekirdek güçlendirme bölgesi ve birleşim bölgesinin elastik davrandığını göstermektedir. Yatay kuvvet altında T6 yerdeğiştirme ölçerinden elde edilen okumalar Şekil 5.6’da verilmektedir. Bayrak plakalarında BRB-AC1 numunesinin deneyi sırasında şekildeğiştirme ölçer kullanılmamıştır.



Şekil 5.6 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.3 BRB-AC2 Numunesi

DeneySEL etiketi TURKBRACE-AC3 olan BRB-AC2 numunesinin çevrimsel yükleme altında yerdeğiştirme genlikleri ve bu yerdeğiştirmelere karşı gelen ortalama çekme ve basınç kuvvet pikleri Çizelge 5.2’de verilmektedir. Numunenin uygulanan standart yükleme protokolü boyunca performansı oldukça kararlıdır. Elde edilen histeretik eğride çelik numunelerde olan yatay sıçramalar gözlenmemiştir. Bu, çelik numunelerinde 1mm olan bulon delik çapı toleransının alüminyum alaşımlı numunelerde 0.5mm’ye düşürölmesinin sonucudur.

Deneyisel çalışmada BRB-AC2'nin maksimum basınç kuvvetinin, maksimum kuvvetinden %14 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneyisel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı 1.82, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.14 olup numunenin monotonik çekme deneyi sonuçları ile aynı değerler elde edilmiştir.

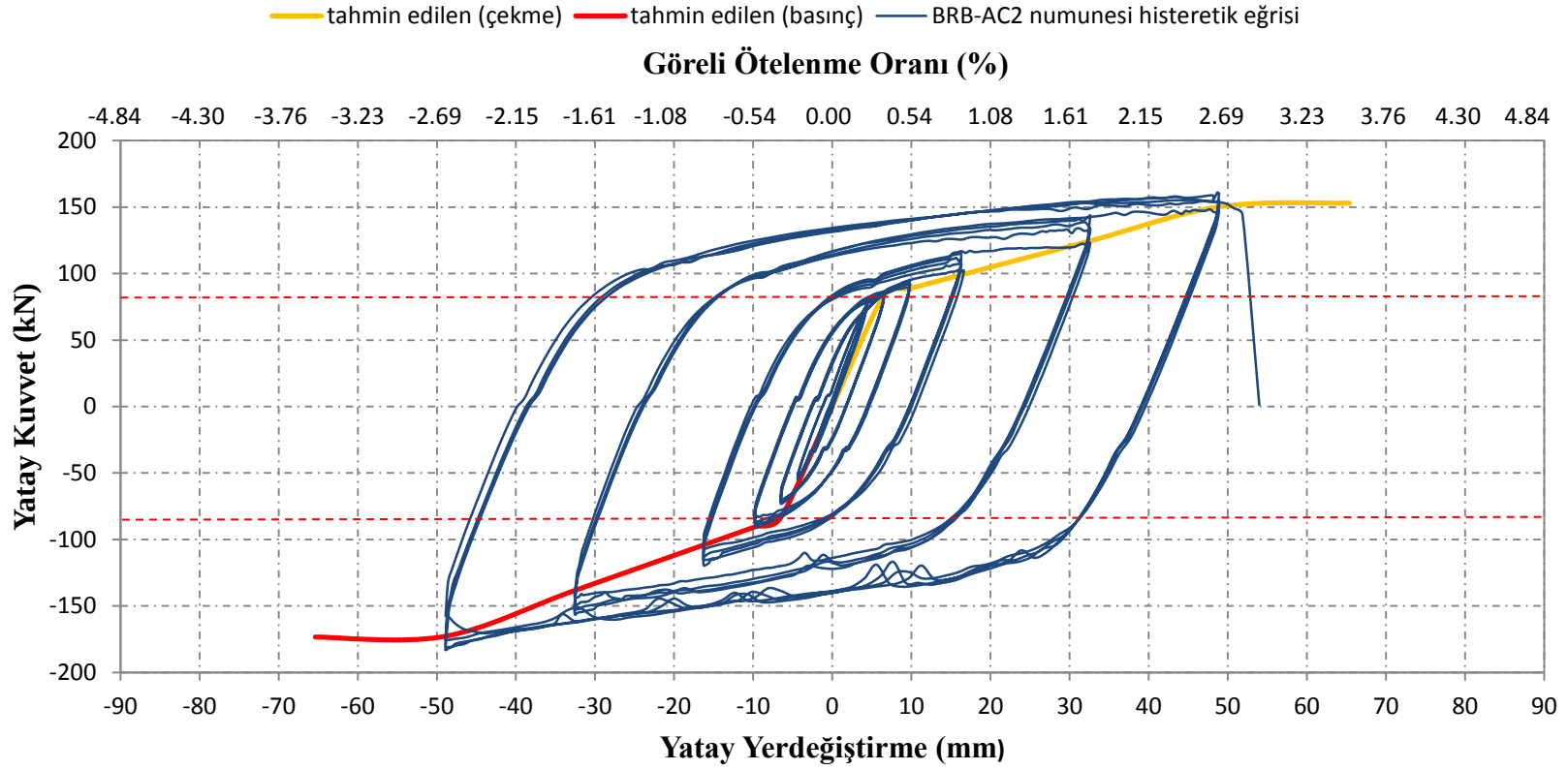
BRB-AC2 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen davranışında öngörülen $\mu_{\max}$ maksimum süneklik oranı 7.5 alındığında, Δ_u^P yerdeğiştirme sınırı $\pm 49.03\text{mm}$ 'de maksimum çekme kuvveti $T_{\max}^P = +150.35\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti $P_{\max}^P = -172.90\text{kN}$ olarak tahmin edilmiştir. Tahmini akma kuvveti $T_y^P = \pm 83.69\text{kN}$ 'dir. Statik itme analizinde elde edilen sistem başlangıç rijitliği K_0^P çekme ve basınç yüklemede eşit olarak $\pm 12.80\text{kN/mm}$ 'dir. Akma sonrası sistem rijitliği K_1^P çekme yüklemede $+1.57\text{kN/mm}$, basınç yüklemede -2.10kN/mm olarak tahmin edilmiştir.

Numune $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ seviyesini tamamlamış, $\pm 10\Delta_{by}^E$ seviyesi ilk çekme pikine giderken $+65.20\text{kN}$ 'de çekirdek akma bölgesi orta noktasından kopmuştur. Şekil 5.7'de BRB-AC2 numunesinin kuramsal olarak tahmin edilen zarf eğrisi ile deneyden elde edilen histeretik eğrisinin karşılaştırması verilmektedir.

$\pm 7.5\Delta_{by}$ seviyesindeki maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında deneyde Deney/Pushover oranı 1.02'dir. Aynı çevrim seviyesinde maksimum basınç kuvvetleri karşılaştırıldığında Deney/Pushover oranı 1.01'dir. K_0^E sistem başlangıç rijitlikleri BRB-AC2 numunesi için deneyde, çekme yüklemede $+12.96\text{kN/mm}$, basınç yüklemede -10.93kN/mm olarak elde edilmiştir. Statik itme analizi ile karşılaştırıldığında deneyde çekme etkisinde Deney/Pushover oranı 1.01, basınç etkisinde Pushover/Deney oranı 1.17'dir.

Çizelge 5.2 : BRB-AC2 numunesi çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.

Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	Kümülatif çevrim sayısı	Δ/Δ_{by}^E	Yatay kümülatif yerdeğiştirme Δ_{by}^E (mm)	T_{max}^E (kN)	P_{max}^E (kN)	β	ω	$\beta\omega$	İnelastik yerdeğiştirme	Kümülatif inelastik yerdeğiştirme η	Görelî ötelenme oranı (%)
1	2	2	0.25	± 1.63	21.00	-20.00	0.95	0.25	0.24	-	-	0.09
2	2	4	0.50	± 3.26	41.00	-32.00	0.78	0.49	0.38	-	-	0.18
3	2	6	0.75	± 4.89	59.50	-54.50	0.92	0.70	0.64	-	-	0.26
4	4	10	1.00	$\pm 6.52(\Delta_{by}^E)$	$84.50(T_y^E)$	-71.25	0.84	1.00	0.84	-	-	0.35
5	4	14	1.50	± 9.78	92.50	-87.50	0.95	1.09	1.04	$4\Delta_{by}^E$	$4\Delta_{by}^E$	0.53
6	4	18	2.50	± 16.30	108.75	-113.75	1.05	1.29	1.35	$12\Delta_{by}^E$	$16\Delta_{by}^E$	0.88
7	4	22	5.00	± 32.60	132.50	-149.25	1.13	1.57	1.77	$32\Delta_{by}^E$	$48\Delta_{by}^E$	1.75
8	4	26	7.50	± 48.90	153.25	-174.00	1.14	1.81	2.07	$52\Delta_{by}^E$	$100\Delta_{by}^E$	2.63



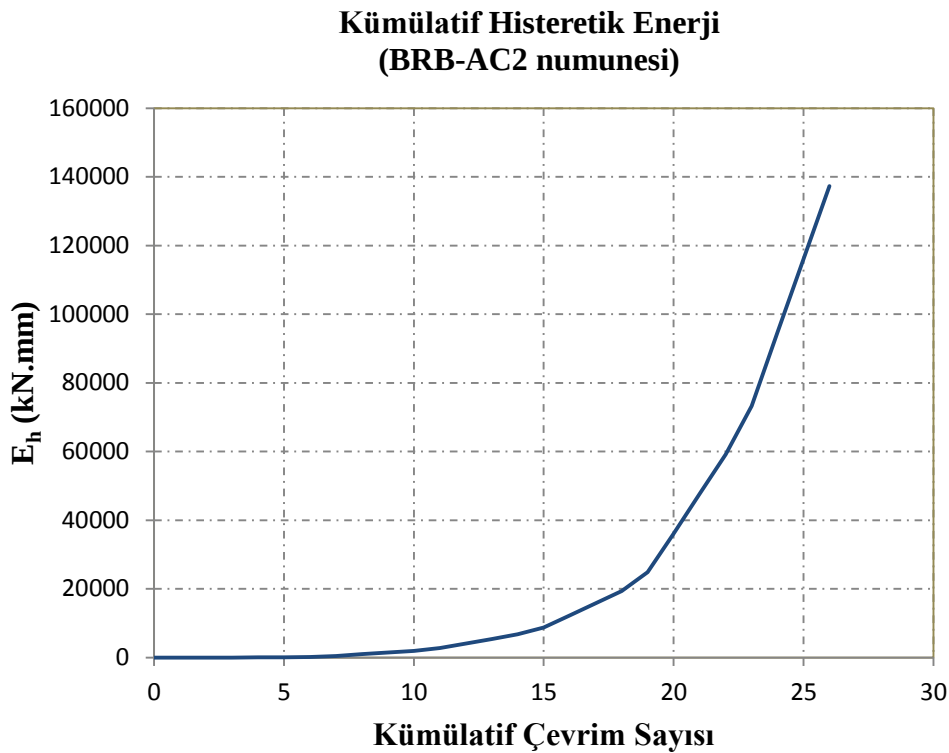
Şekil 5.7 : BRB-AC2 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.

K_1^E akma sonrası rijitlikler, BRB-AC2 numunesi için deneyde çekme yüklemesinde +1.62kN/mm, basınç yüklemesinde -2.42kN/mm olarak elde edilmiştir. Statik itme analizi ile karşılaştırıldığında çekme etkisinde Deney/Pushover oranı 1.03, basınç etkisinde Deney/Pushover oranı 1.15'dir. Deney sonuçları ve tahmin sonuçları oldukça uyumludur.

5.3.1 Kümülatif histeretik enerji

BRB-AC2 numunesi, E_h kümülatif yutulan enerjinin, kümülatif çevrim sayısı ile değişimini gösterir grafik Şekil 5.8'de verilmektedir (Dindar, 2009).

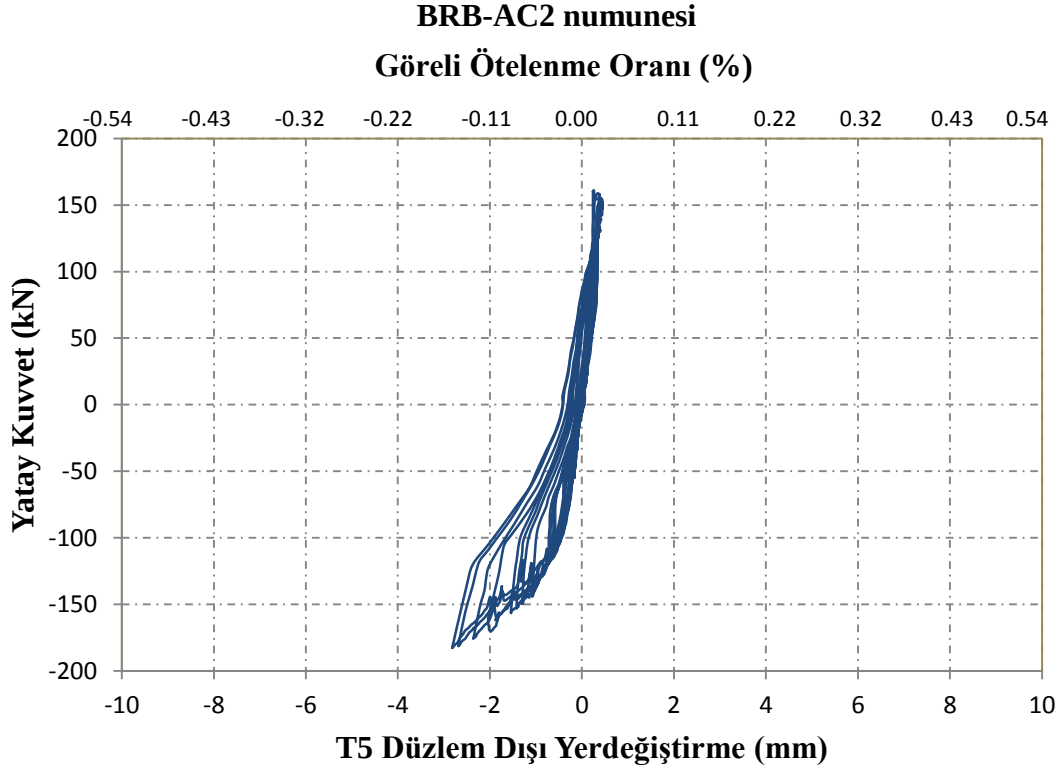
Beklenildiği gibi elastik çevrimlerde önemli bir enerji yutumu gerçekleşmemiştir. Çekirdek çekme ve basınç yüklemesinde benzer akma davranışı gösterdiğinden, burkulan tipik çaprazların aksine daha uzun çevrimlerde yutulan enerji miktarı büyüktür.



Şekil 5.8 : BRB-AC2 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.

5.3.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-AC2 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil 5.9'da yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta gözlenmektedir. Ulaşılan yerdeğiştirme pikleri -2.82mm~+0.44mm arasındadır.

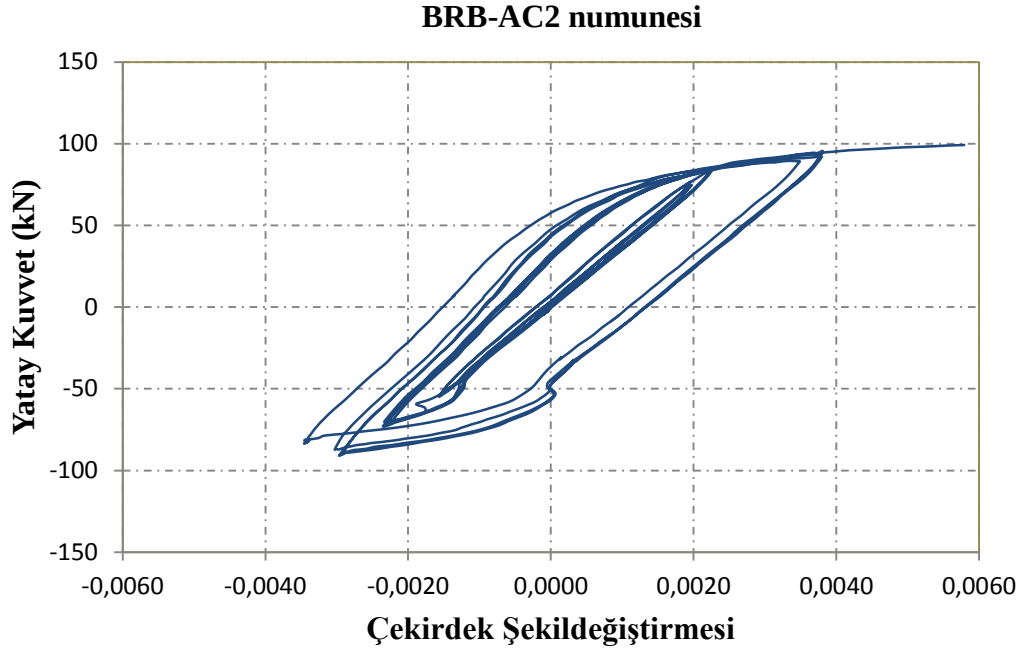


Şekil 5.9 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.3.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi

Metal yüzeye yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer BRBKN'den alınan birim şekildeğiştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi Şekil 5.10'da verilmektedir. BRB-AC2 numunesinin $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde ilk çekme pikinde kuvvet +83.75kN iken BRBKN değeri +2237 μ 'dir. Aynı seviyenin ilk basınç pikinde kuvvet -69.67kN'de iken BRBKN değeri -2242 μ 'dir. Çekirdek çekme ve basınçta aynı akma şekildeğiştirmesini yapmıştır. $\pm 1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinin son 4. çekme pikinde çekme bölgesinde +94.41kN kuvvet değerinde, BRBKN +3769 μ , bu seviyenin son basınç

pikinde kuvvet -80.94kN’de iken BRBKN -3382 μ okuması yapılmıştır. $\pm 2.5\Delta_{by}^E$ seviyenin ilk çekme pikinde +99.19kN’de hasar görmüş bu noktadan sonra okuma alınamamıştır.



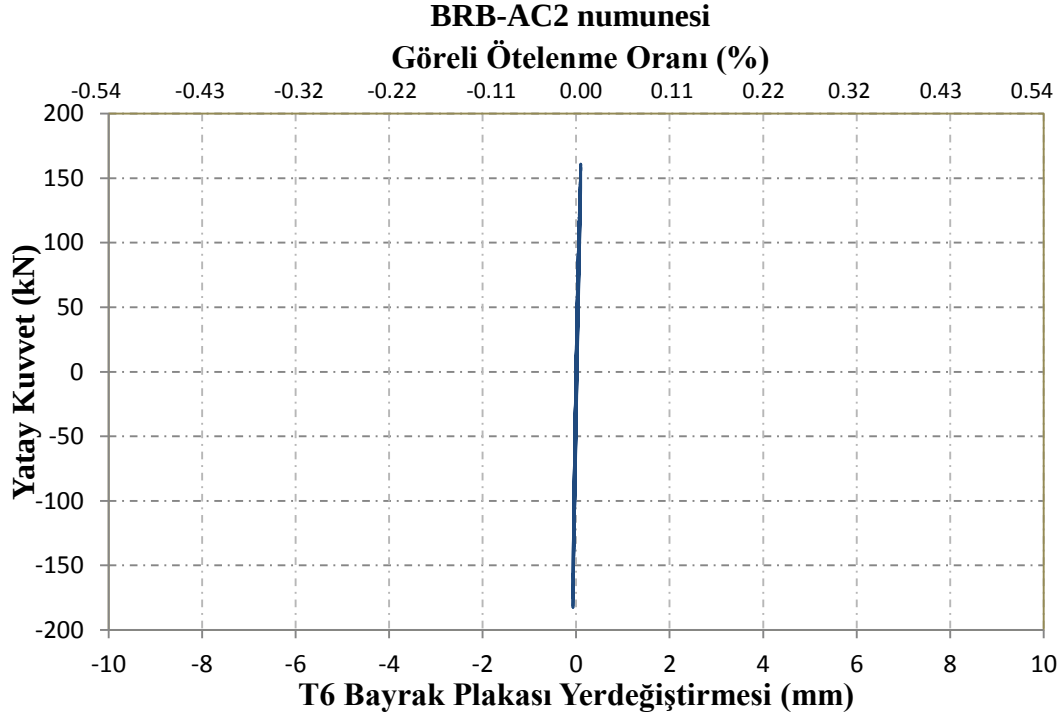
Şekil 5.10 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrisi.

BRB-AC2’nin elastik bölgedeki eksenel yerdeğiştirme hesaplanırken, $F_{y_{sc}}^{0.2}$ akma gerilmesi yerine $F_{y_{sc}}^0$ akma gerilmesi kullanılmıştır. $F_{y_{sc}}^0$ akma gerilmesi 5083-H111 alüminyum alaşımı için $\varepsilon_0=0.8\varepsilon_y^{0.2}$ noktasından başlayarak gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusalın eğriyi kestiği noktadır. BRB-AC2 numunesinin çekme deneylerinde elde edilen $\varepsilon_y^{0.2}$ değeri +0.0027, ε_0 değeri +0.0022 mikrostrain’dir. Deneyde hedeflenen akma birim şekildeğiştirme +2237 μ değeri olan BRBKN okumalarından net bir şekilde elde edildiği Şekil 5.10’da görülmektedir. Böylece metal yüzeyinden akma yerdeğiştirmesinin belirlenmesi yöntemi ve hesap kabul yaklaşımlarının etkinliği deney sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.

5.3.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

Deney boyunca bayrak plakasının elastik kalması, akmanın yalnızca çekirdek akma bölgesinde oluştuğunu, çekirdek güçlendirme bölgesi ve birleşim bölgesinin elastik davrandığını göstermektedir. BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet altında T6

yerdeğiştirme ölçerinden elde edilen okumalar Şekil 5.11’de verilmektedir. Bayrak plakalarında BRB-AC2 numunesinin deneyi sırasında şekildeğiştirme ölçer kullanılmamıştır.



Şekil 5.11 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.4 BRB-SC1 Numunesi

Deneysel etiketi TURKBRACE-SC4 olan BRB-SC1 numunesinin çevrimsel yükleme altında yerdeğiştirme genlikleri ve bu yerdeğiştirmelere karşı gelen ortalama çekme ve basınç kuvvet pikleri Çizelge 5.3’te verilmektedir. Numunenin uygulanan standart yükleme protokolü boyunca davranışı oldukça kararlıdır. Elde edilen histeretik eğride görülen yatay sıçramalara 1mm olan bulon delik çapı toleransının neden olduğu düşünölmektedir. Deneysel çalışma sonucunda BRB-SC1’in maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %65 daha büyük olduğu tespit edilmiştir. Deneysel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.47, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.65 bulunmuştur. Numune $\pm 12.5\Delta_{by}^E$ ve ± 73.75 mm yatay yerdeğiştirme (%4.00 görelİ ötelenme oranı) seviyesinde ilk çekme pikine gidilirken +50.14mm yerdeğiştirme (%2.70 görelİ ötelenme oranı) ve +120.12kN düzeyinde çekirdekten kopmuştur.

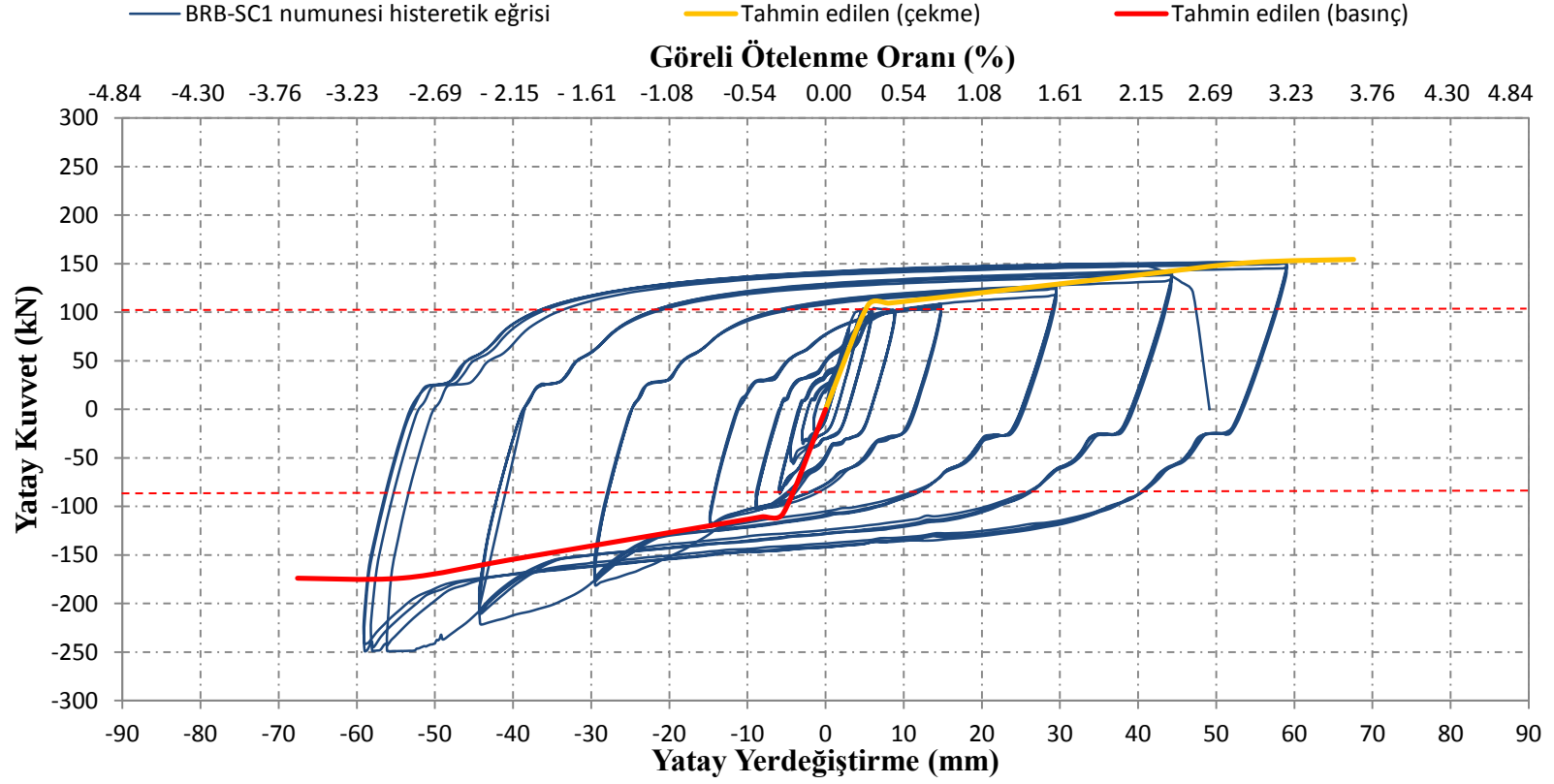
BRB-SC1 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen davranışında öngörülen $\mu_{\max}$ maksimum süneklik oranı 10 alındığında, Δ_u^P maksimum yerdeğiştirme sınırı $\pm 54.06\text{mm}$ 'de maksimum çekme kuvveti $T_{\max}^P = +151.03\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti $P_{\max}^P = -173.68\text{kN}$ olarak tahmin edilmiştir. Tahmini akma kuvveti $T_y^P = \pm 106.93\text{kN}$ 'dir. Statik itme analizinde elde edilen sistem başlangıç rijitliği K_0^P çekme ve basınç yüklemesinde $\pm 19.78\text{kN/mm}$ 'dir. Akma sonrası sistem rijitliği K_1^P çekme yüklemesinde $+0.91\text{kN/mm}$, basınç yüklemesinde -1.37kN/mm olarak tahmin edilmiştir. Şekil 5.12'de BRB-SC1 numunesinin kuramsal olarak tahmin edilen zarf eğrisi ile deneyden elde edilen histeretik eğrinin karşılaştırması verilmektedir.

$\pm 10\Delta_{by}$ seviyesindeki maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında Pushover/Deney oranı 1.01 olarak oldukça başarılı bir tahminde bulunulmuştur. Aynı çevrim seviyesinde maksimum basınç kuvvetleri karşılaştırıldığında Deney/Pushover oranı 1.42'dir. Çekme davranışında tahmin sonuçlarının deney sonuçları ile uyumlu ve benzer olması geliştirilen hesap modelinin başarı etkinliğini kanıtlamaktadır. Numunenin basınç davranışındaki tahmin edilen davranıştan farklılık göstermesi sürtünmesiz yüzey oluşturma tekniği ile ilgili olduğu yapılan kesimlerde anlaşılmıştır. Bu farklılıklara karşın üretilen BÖÇ kararlı, kendini tekrar eden ve başarılı bir davranış sergilemiştir.

K_0^E sistem başlangıç rijitlikleri BRB-SC1 numunesi için deneyde, çekme yüklemesinde $+17.29\text{kN/mm}$, basınç yüklemesinde -14.53kN/mm olarak elde edilmiştir. Statik itme analizi ile karşılaştırıldığında çekme etkisinde Pushover/Deney oranı 1.14, basınç etkisinde Pushover/Deney oranı 1.36'dır. K_1^E akma sonrası rijitlikler çekmede $+0.90\text{kN/mm}$, basınçta -3.04kN/mm bulunmuştur. K_1^E akma sonrası rijitlikler, BRB-SC1 numunesi için deneyde çekme yüklemesinde Pushover/Deney oranı 1.01, basınç yüklemesinde Deney/Pushover oranı 2.22'dir. Deney sonunda kümülatif inelastik yerdeğiştirme $172\Delta_{by}^E$ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 : BRB-SC1 numunesi çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.

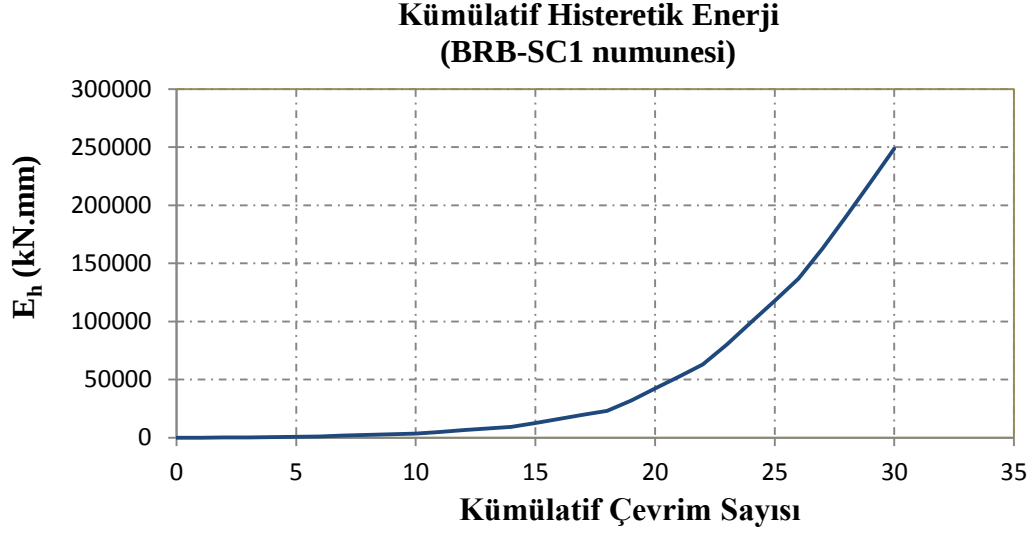
Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	Kümülatif çevrim sayısı	Δ/Δ_{by}^E	Yatay kümülatif yerdeğiştirme Δ_{by}^E (mm)	T_{max}^E (kN)	P_{max}^E (kN)	β	ω	$\beta\omega$	İnelastik yerdeğiştirme	Kümülatif inelastik yerdeğiştirme η	Görelî ötelenme oranı (%)
1	2	2	0.25	± 1.35	44.00	-21.00	0.48	0.43	0.21	-	-	0.07
2	2	4	0.50	± 2.71	82.75	-33.50	0.40	0.81	0.32	-	-	0.15
3	2	6	0.75	± 4.08	98.25	-53.75	0.55	0.96	0.53	-	-	0.22
4	4	10	1.00	$\pm 5.90(\Delta_{by}^E)$	$102.00(T_y^E)$	-85.75	0.84	1.00	0.84	-	-	0.32
5	4	14	1.50	± 8.85	101.75	-102.75	1.01	1.00	1.01	$4\Delta_{by}^E$	$4\Delta_{by}^E$	0.48
6	4	18	2.50	± 14.75	104.50	-117.50	1.12	1.02	1.14	$12\Delta_{by}^E$	$16\Delta_{by}^E$	0.79
7	4	22	5.00	± 29.50	123.75	-172.00	1.39	1.21	1.68	$32\Delta_{by}^E$	$48\Delta_{by}^E$	1.59
8	4	26	7.50	± 44.25	138.25	-203.00	1.47	1.37	2.01	$52\Delta_{by}^E$	$100\Delta_{by}^E$	2.38
9	4	30	10.00	± 59.00	149.63	-247.38	1.65	1.47	2.43	$72\Delta_{by}^E$	$172\Delta_{by}^E$	3.17



Şekil 5.12 : BRB-SC1 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.

5.4.1 Kümülatif histeretik enerji

BRB-SC1 numunesi için E_h kümülatif yutulan enerjinin, kümülatif çevrim sayısı ile değişimini gösterir grafik Şekil 5.13’de verilmektedir (Dindar, 2009).

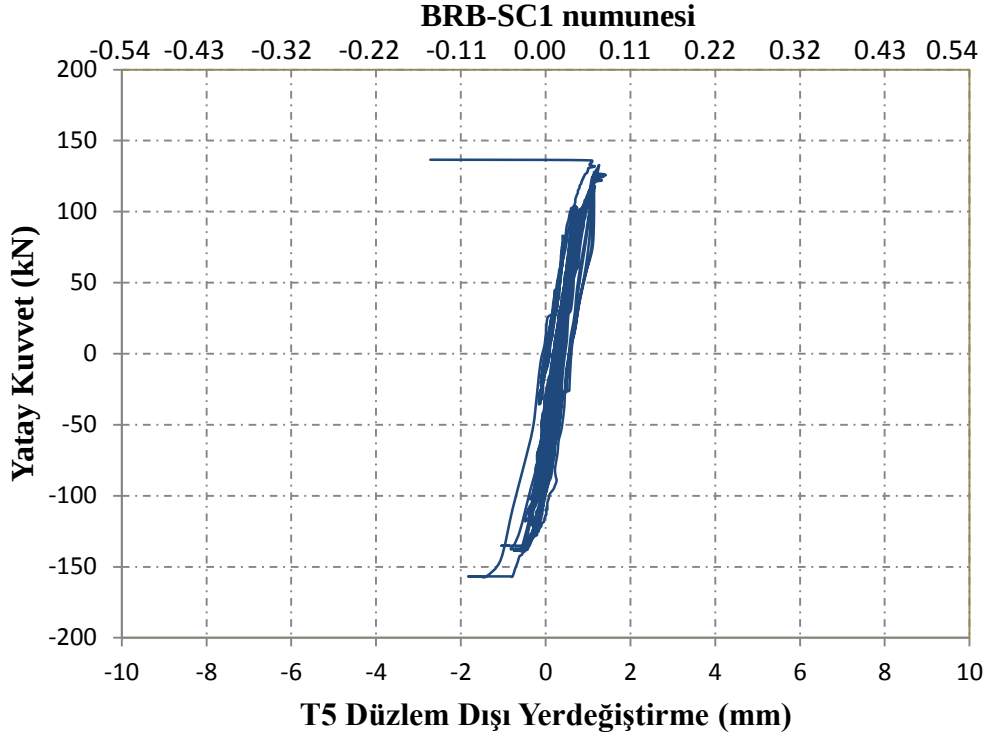


Şekil 5.13 : BRB-SC1 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.

Beklenildiği gibi, elastik çevrimlerde önemli bir enerji yutumu gerçekleşmemiştir. Çekirdek, çekme ve basınç yüklemede benzer akma davranışı gösterdiğinden burkulan tipik çaprazların aksine daha uzun çevrimlerde yutulan enerji miktarı büyüktür.

5.4.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC1 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil 5.14’de yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta gözlenmektedir. Ulaşılan yerdeğiştirme pikleri -1.64mm~+1.24mm arasındadır.



Şekil 5.14 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

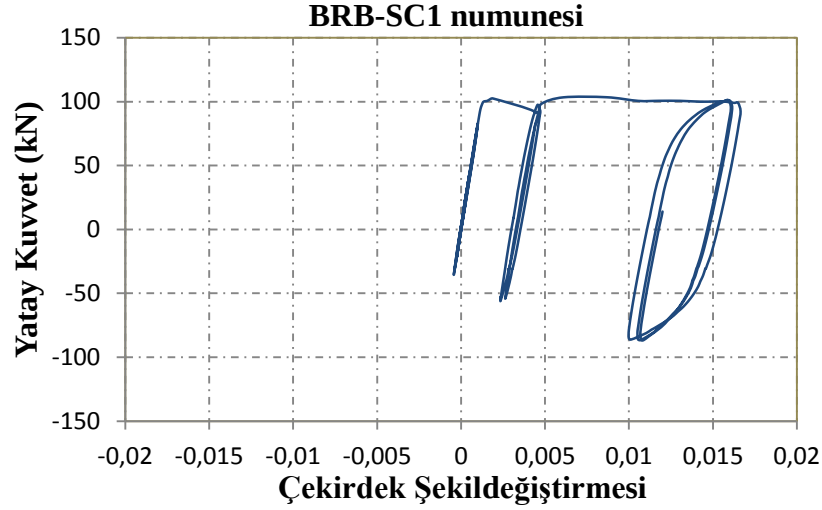
$\pm 7.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde numunenin +36.83 yatay yerdeğiştirme düzeyinde ve +136.72kN çekme yüklemesinde T5 yerdeğiştirme ölçerinin yatay düzecedan çıktığı farkedilerek bu yerdeğiştirme ölçerden veri alımı durdurulmuştur.

5.4.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi

Metal yüzeye yerleştirilen şekildeğiştirme ölçer BRBKN'den alınan birim şekildeğiştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi Şekil 5.15'de verilmektedir.

BRB-SC1 numunesinin elastik bölgede ilk çevrimde çekme yüklemesi altında BRBKN +1000 μ , basınç yüklemesinde -455 μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde +1000 μ , basınç yüklemesinde -430 μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde +1300 μ , basınç etkisinde -400 μ değerleri okunmuştur. $3/4\Delta_{by}^E$ seviyesinin son basınç piki tamamlanıp hedeflenen Δ_{by}^E akma yerdeğiştirmesinin ilk çekme pikine gidilirken +4.38mm yerdeğiştirme ve +100.03kN'de, BRBKN'deki +1562 μ değerinden +4138 μ değerine sıçrama yaptığı ve %264.90 oranında daha yüksek değer alındığı belirlenmiştir. Ayrıca, basınç bölgesindeki okumaların hatalı alındığı

gözlenmiştir. Bu tespit üzerine elastik bölgede metal yüzeyindeki BRBKN'nin hasar gördüğü kabul edilmiştir. Bu durumda grafik ekranın izlenmesi ile histeretik eğride gözle görülür bir akmanın oluştuğu nokta akma yerdeğiştirmesi ($\Delta_{by}^E = \pm 5.90\text{mm}$) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.15 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.

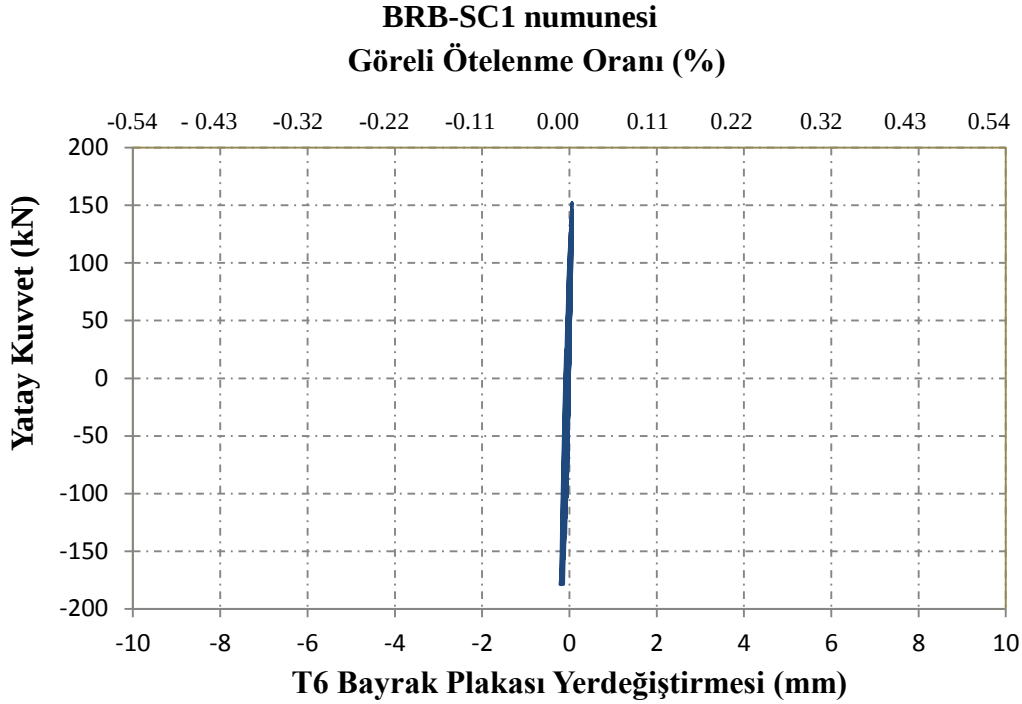
BRBKN'nin erken hasar görmesinin nedeni sonradan yapılan kesit açılımı ile anlaşılmıştır. BRBKN yük hücresi ile çekirdek merkez noktası aynı akslarda olacak şekilde metal içine yerleştirilmiştir. Çekirdek, merkez noktadan koptuğundan akma yerdeğiştirmesi piklerinde BRBKN öngörülenden erken hasar görmüştür. Yapılan çekme deneylerinde de benzer bir durumla karşılaşmıştır.

BRB-SC1 numunesinin çekme deneylerinde elde edilen $\varepsilon_y^{0.2}$ değeri $+0.0015$ mikrostrain'dir. Akma uzunluğu 1410mm olan numunenin çekme deneylerine göre hesaplanan Δ_{by}^K yatay akma yerdeğiştirmesi 5.41mm'dir. Bu değer, deney ve statik itme analiz sonuçları ile uyumludur.

5.4.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC1 numunesinin bayrak plakasının deney sırasında yatay kuvvet altında bayrak plakasının elastik davranışı T6 yerdeğiştirme ölçerinden elde edilen verilerle belirlenmiştir. Şekil 5.16'da yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik

eğrisi verilmektedir. Bu eğriden bayrak plakasının yükleme boyunca beklendiği gibi elastik kaldığı rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 5.16 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.5 BRB-SC2 Numunesi

Deneyisel etiketi TURKBRACE-SC5 olan BRB-SC2 numunesinin çevrimsel yükleme altında yerdeğiştirme genlikleri ve bu yerdeğiştirmelere karşı gelen ortalama çekme ve basınç kuvvet pikleri Çizelge 5.4’te verilmektedir. Numunenin uygulanan standart yükleme protokolü boyunca davranışı oldukça kararlıdır. Elde edilen histeretik eğride görülen yatay sıçramaların 1mm olan bulon delik çapı toleransının sonucu olduğu düşünölmektedir.

Deneyisel çalışma sonucunda BRB-SC2’nin maksimum basınç kuvvet kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %76 daha büyük olduğu bulunmuştur. Deneyisel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.46, β basınç dayanım düzeltme katsayısı 1.76 bulunmuştur. Bu değerler kupon deneylerinde ve pushover analizi ile elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında β basınç dayanım düzeltme katsayısı %153.04 oranında daha yüksek değere ulaşmıştır. Numune $\pm 12.5\Delta_{by}^E$ ve

%4.44 görelî ötelenme oranı seviyesinde ilk çekme pikine giderken +56.51mm yerdeğıştirme ve +112.53kN düzeyinde çekirdekten kopmuştur.

BRB-SC2 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen davranışında öngörülen $\mu_{\max}$ maksimum süneklik oranı 10 alındığından, Δ_u^P maksimum yerdeğıştirme sınırı $\pm 66.24\text{mm}$ 'de maksimum çekme kuvveti $T_{\max}^P = +128.37\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti $P_{\max}^P = -147.63\text{kN}$ olarak tahmin edilmiştir. Tahmini akma kuvveti $T_y^P = \pm 88.18\text{kN}$ 'dur. Statik itme analizinde elde edilen sistem başlangıç rijitliği K_0^P çekme ve basınç yüklemesinde $\pm 13.31\text{kN/mm}$ 'dir. Akma sonrası sistem rijitliği K_1^P çekme yüklemesinde $+0.67\text{kN/mm}$, basınç yüklemesinde -0.99kN/mm olarak tahmin edilmiştir.

Şekil 5.17'de BRB-SC2 numunesinin kuramsal olarak tahmin edilen zarf eğrisi ile deneyden elde edilen histeretik eğrinin karşılaştırması verilmektedir.

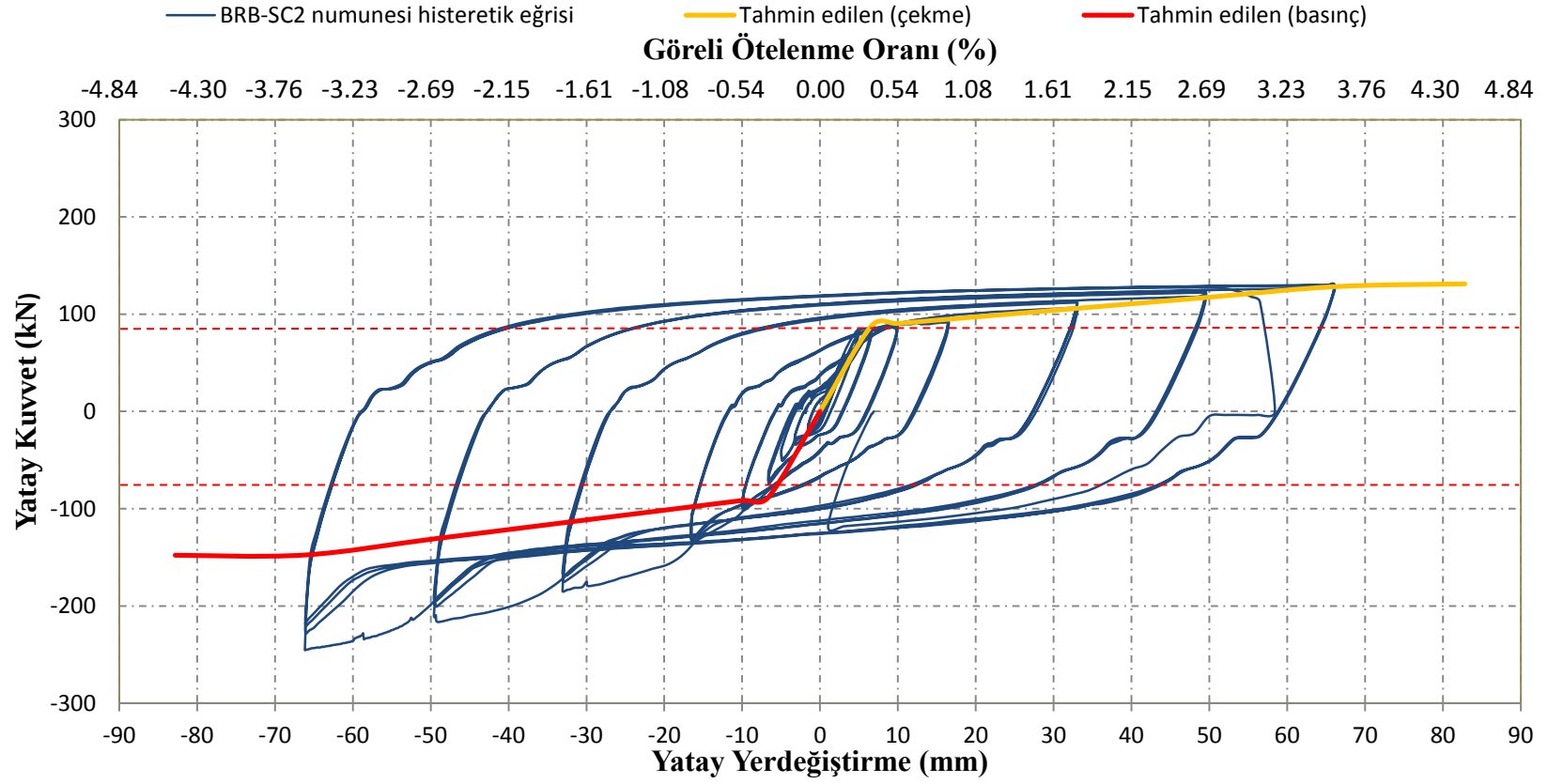
$\pm 10\Delta_{by}$ seviyesindeki maksimum çekme kuvvetleri karşılaştırıldığında Pushover/Deney oranı 1.01, maksimum basınç kuvvetleri karşılaştırıldığında ise Deney/Pushover oranı 1.52'dir. Basınç dayanımındaki farkın sürtünmesiz yüzey oluşturma tekniğı ile ilgili olduğu yapılan kesit açılımı ile anlaşılmıştır.

K_0^E sistem başlangıç rijitlikleri BRB-SC2 numunesi için deneyde, çekme yüklemesinde $+13.01\text{kN/mm}$, basınç yüklemesinde -11.06kN/mm olarak elde edilmiştir. Statik itme analizi ile karşılaştırıldığında çekme etkisinde Pushover/Deney oranı 1.02, basınç etkisinde Pushover/Deney oranı 1.20'dir.

K_1^E akma sonrası rijitlikler çekmede $+0.70\text{kN/mm}$, basınçta -2.55kN/mm olarak elde edilmiştir. K_1^E akma sonrası rijitlikler için çekme etkisinde Deney/Pushover oranı 1.04, basınç etkisinde Deney/Pushover oranı 2.55 olarak elde edilmiştir. Kümülatif inelastik yerdeğıştirme $172\Delta_{by}^E$ olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.4 : BRB-SC2 numunesi çevrimsel yükleme yerdeğiştirme, kuvvet pikleri.

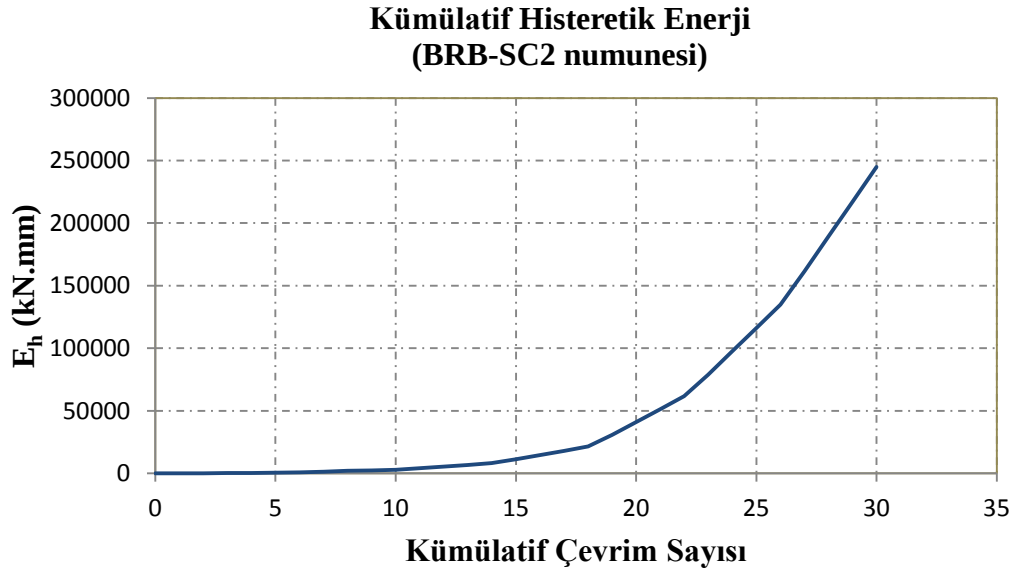
Yerdeğiştirme adımı	Çevrim sayısı	Kümülatif çevrim sayısı	Δ/Δ_{by}^E	Yatay kümülatif yerdeğiştirme Δ_{by}^E (mm)	T_{max}^E (kN)	P_{max}^E (kN)	β	ω	$\beta\omega$	İnelastik yerdeğiştirme	Kümülatif inelastik yerdeğiştirme η	Görelî ötelenme oranı (%)
1	2	2	0.25	± 1.65	32.50	-28.00	0.86	0.38	0.33	-	-	0.09
2	2	4	0.50	± 3.29	57.05	-30.00	0.53	0.67	0.36	-	-	0.18
3	2	6	0.75	± 4.94	81.48	-47.00	0.58	0.96	0.56	-	-	0.27
4	4	10	1.00	$\pm 6.61^{(\Delta_{by}^E)}$	$86.00^{(T_y^E)}$	-73.13	0.86	1.00	0.84	-	-	0.36
5	4	14	1.50	± 9.92	87.13	-98.78	1.13	1.01	1.14	$4\Delta_{by}^E$	$4\Delta_{by}^E$	0.53
6	4	18	2.50	± 16.53	94.13	-130.75	1.39	1.09	1.52	$12\Delta_{by}^E$	$16\Delta_{by}^E$	0.89
7	4	22	5.00	± 33.05	109.88	-165.00	1.50	1.28	1.92	$32\Delta_{by}^E$	$48\Delta_{by}^E$	1.78
8	4	26	7.50	± 49.58	119.75	-189.00	1.58	1.39	2.19	$52\Delta_{by}^E$	$100\Delta_{by}^E$	2.67
9	4	30	10.00	± 66.10	127.50	-225.00	1.76	1.48	2.60	$72\Delta_{by}^E$	$172\Delta_{by}^E$	3.55



Şekil 5.17 : BRB-SC2 numunesi deneysel histeretik eğrisi ve statik itme analizi ile tahmin edilen davranışların karşılaştırılması.

5.5.1 Kümülatif histeretik enerji

BRB-SC2 numunesi için E_h kümülatif enerji yutumunun kümülatif çevrim sayısıyla değişimini gösterir grafik Şekil 5.18’de verilmektedir (Dindar, 2009).

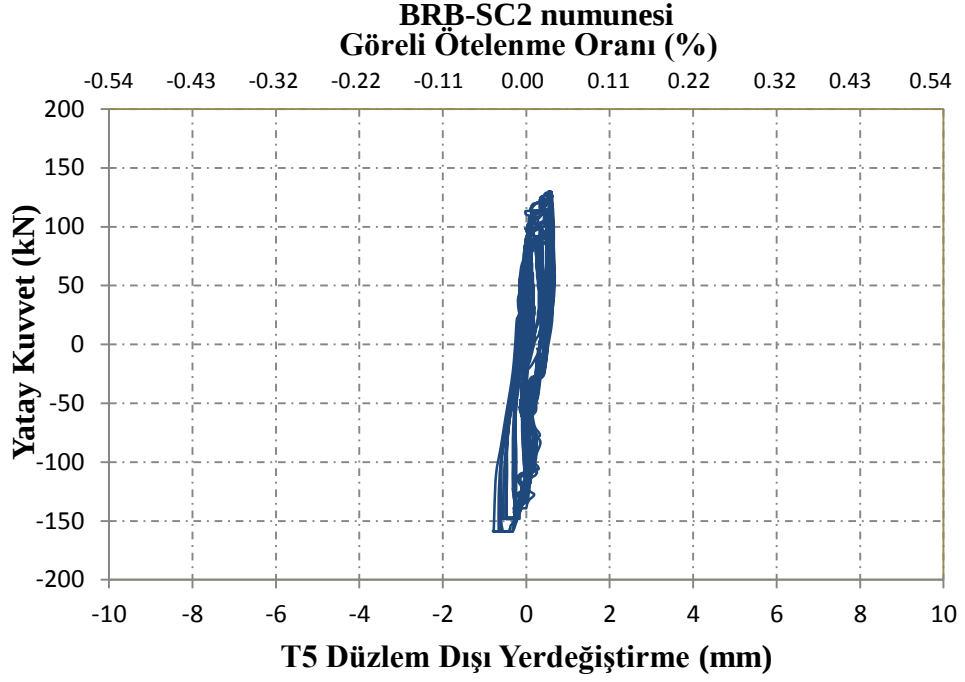


Şekil 5.18 : BRB-SC2 numunesi kümülatif histeretik enerji grafiği.

Beklenildiği gibi, elastik çevrimlerde önemli bir enerji yutulması gerçekleşmemiştir. Çekirdek çekme ve basınç yüklemesinde benzer akma davranışı gösterdiğinden burkulan tipik çaprazların aksine daha uzun çevrimlerde yutulan enerji miktarı büyüktür.

5.5.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

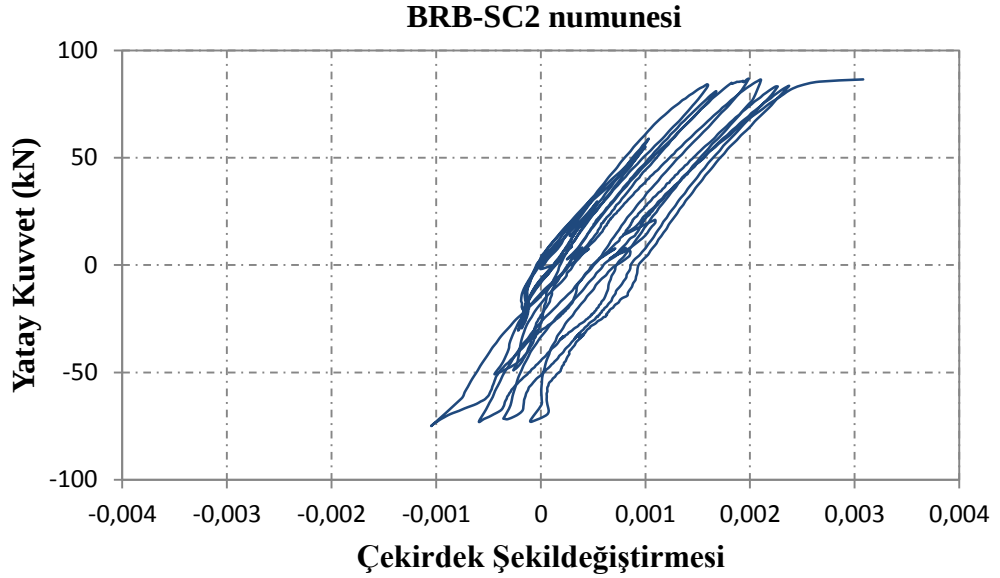
BRB-SC2 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil 5.19’da yatay-kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta gözlenmektedir. Ulaşılan maksimum yerdeğiştirme pikleri $\pm 0.52\text{mm}$ arasındadır.



Şekil 5.19 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

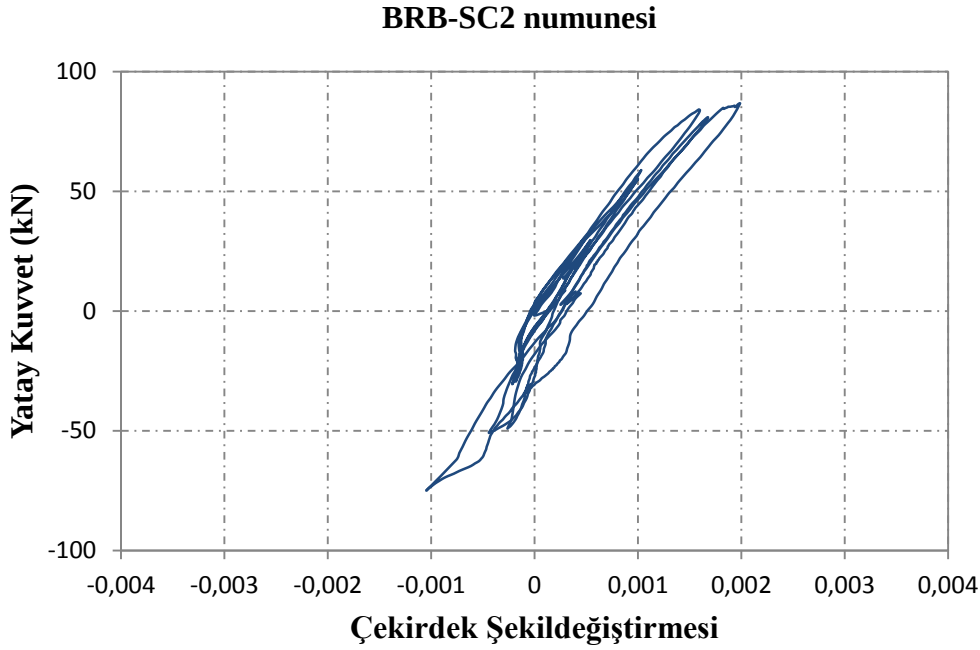
5.5.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi

Metal yüzeye yerleştirilen şekildeğiştirme ölçeri BRBKN'den alınan birim şekildeğiştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi Şekil 5.20'de verilmektedir.



Şekil 5.20 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.

Şekil 5.20’de akma noktası net bir şekilde görülemediğinden veri nokta sayısı azaltılarak grafik Şekil 5.21’de yeniden verilmiştir.



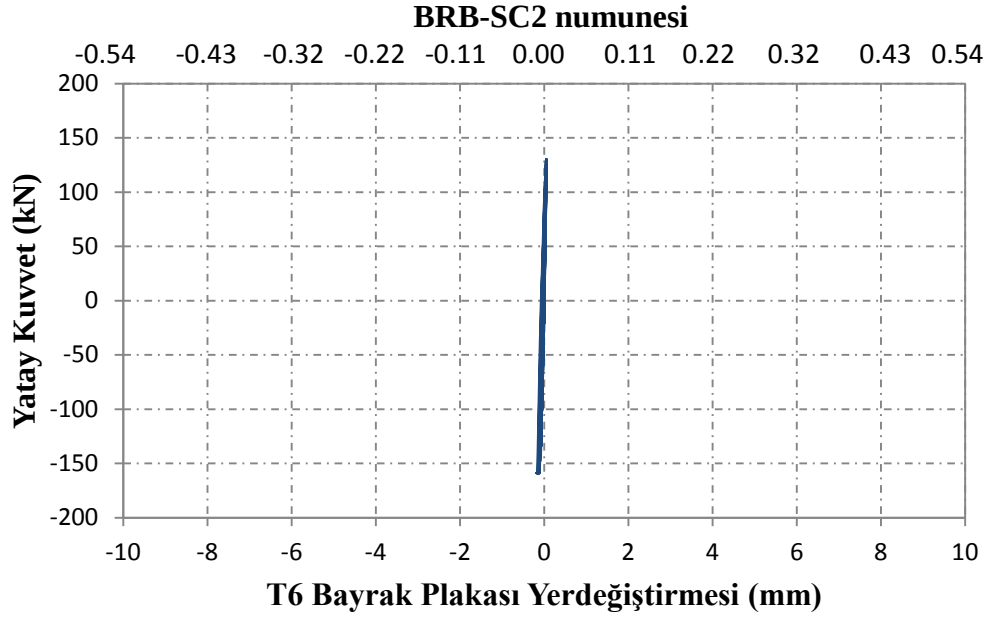
Şekil 5.21 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme akma noktasını gösterir histeretik eğrisi.

$\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde çekme yüklemesinde akmanın tam başladığı noktada kuvvet +85.60kN’da BRBKN +1923 μ , basınç yüklemesinde kuvvet -73.85kN’da -1021 μ okuması yapılmıştır. Akma yüklemesinin 2. çekme piki BRBKN +2100 μ değerinde okunmuştur. Bu değerler kupon deneylerinde elde edilen akma yerdeğiştirme birim şekildeğiştirme değerleri ile aynıdır. Deneyde net bir şekilde akma yerdeğiştirme belirlenmiştir. $\pm 2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinin ilk çekme pikine giderken +86.51kN kuvvet ve +3082 μ şekildeğiştirme düzeyinde BRBKN hasar görmüştür.

BRB-SC2 numunesinin çekme deneylerinde elde edilen $\varepsilon_y^{0.2}$ değeri +0.0019 mikrostrain’dır. Akma uzunluğu 1380mm olan numunenin çekme deneylerine göre hesaplanan Δ_{by}^K yatay akma yerdeğiştirme 6.65mm’dir. Bu değer deney ve statik itme analiz sonuçları ile uyumludur.

5.5.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC2 numunesinin deney sırasında bayrak plakasının yerdeğiştirmesi T6 yerdeğiştirmeden alınan okumalarla belirlenmiştir. şekil 5.22’de yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir; davranış elastiktir.



şekil 5.22 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

5.6 Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması ve Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin deneylerden elde edilen histeretik davranış özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Numunelerin deneylerde standart yükleme protokolü sonucunda elde edilen ortalama ω çekme ve β basınç dayanımı düzeltme katsayıları Çizelge 5.5’te özetlenmiştir. BRB-AC1 numunesi, çekirdek akma-güçlendirme geçiş noktalarındaki alüminyum kaynakların dayanımı %60 oranında azaltması sonucu bu noktadan çekirdeğin erkenden kopması nedeniyle öngörülen yükleme protokolünü tamamlayamamıştır. BRB-SC2 numunesinde, diğer numunelerle karşılaştırıldığında, en büyük β basınç dayanım düzeltme katsayısı elde edilmiştir. BRB-SC2 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen basınç davranışının deneylerde daha yüksek piklerde elde edilmesinin nedenleri; çekirdek malzeme karakteristiği

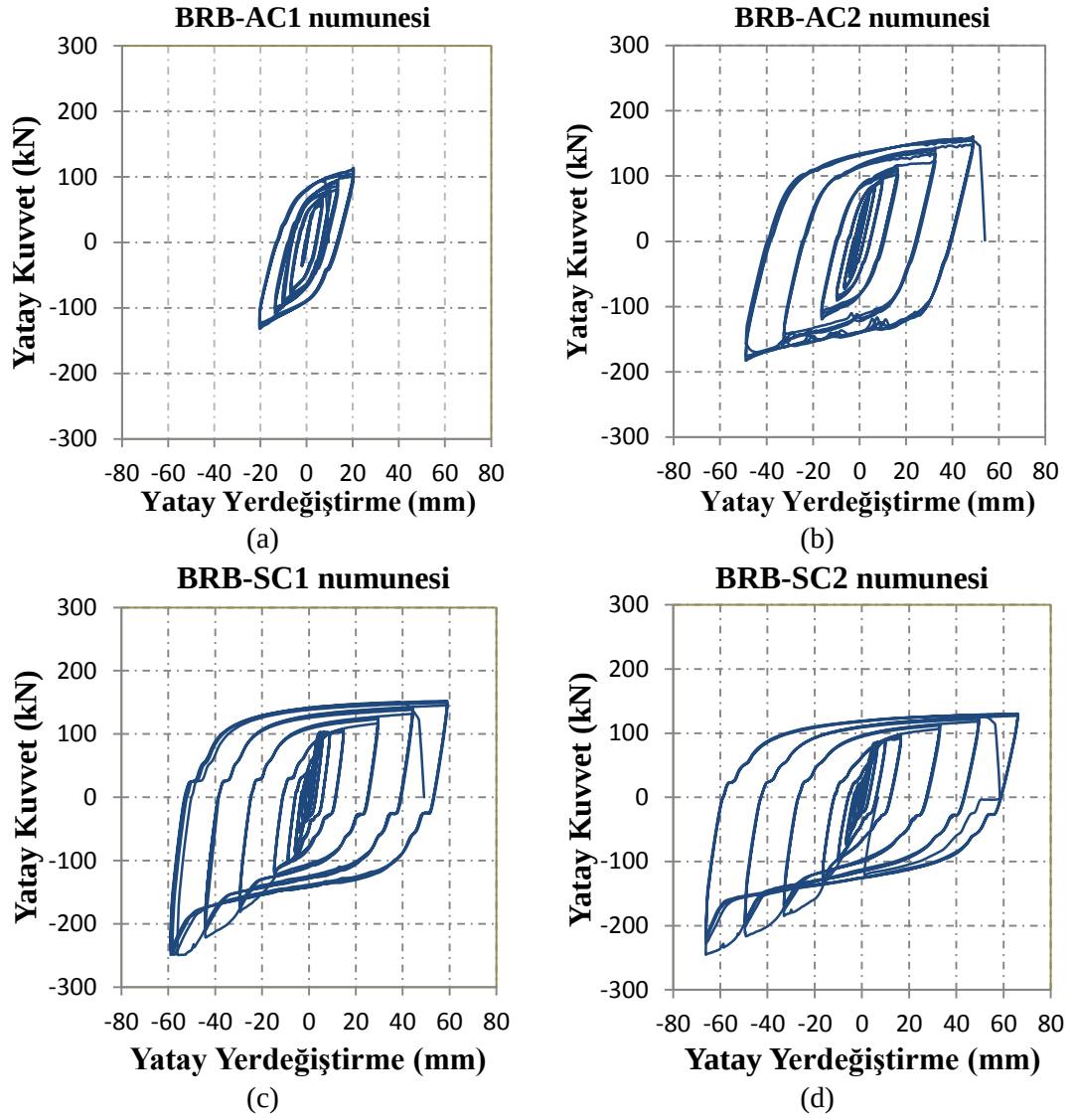
gereği yüksek akma dayanımına sahip olması sonucu ve dış tüp-çekirdek merkezleştirme mekanizmasında çekirdek başlangıç kusurundan kaynaklanan olası kaçıklık olduğu düşünülmektedir. Bu etkenler deneyde elde edilen parametrelerin doğruluğunu değiştirmezken basınç dayanımını arttırmıştır. Buna karşın davranış tipik bir BÖÇ davranışının pekçok özelliklerini içermektedir.

Çizelge 5.5 : Standart yükleme protokolü sonucu elde edilen katsayılar.

Numuneler	β	ω	$\beta\omega$
BRB-AC1	1.17	1.72	2.02
BRB-AC2	1.14	1.81	2.07
BRB-SC1	1.65	1.47	2.43
BRB-SC2	1.76	1.48	2.60

Deneylerde alüminyum alaşımlı numunelerde maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetine oranı olan basınç dayanımı düzeltme katsayısı $\beta \leq 1.3$ olması koşulu sağlanmıştır (AISC-341, 2010). Çelik numunelerde meydana gelen basınç dayanımı artışının sürtünmesiz yüzey oluşturma tekniği ile ilgili olduğu yapılan kesit açılımlarında anlaşılmıştır. BRB-AC1 numunesinin dışında tüm numuneler standart yükleme protokolünün sonunda çekirdekten kopmuştur. Deneylerde akmadan sonraki çevrimlerde elde edilen çekme ve basınç kuvvet pikleri T_y^E kuvvetinden az olamaz koşulu sağlanmıştır (AISC-341, 2010).

Şekil 5.23'te BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin deneylerden elde edilen histeretik eğrileri topluca verilmektedir.



Şekil 5.23.: BRB-AC1 (a), BRB-AC2 (b), BRB-SC1 (c) ve BRB-SC2 (d) numuneleri deney histeretik eğrileri.

Numunelerin η kümülatif inelastik yerdeğiştirmeye ve E_h kümülatif histeretik enerji yutma miktarları Çizelge 5.6’da özetlenmiştir. Burada BRB-AC1 numunesinin, yukarıda açıklanan nedenle, öngörülen yerdeğiştirme sınırından önce çekirdekten kopmuş olduğu dikkate alınmalıdır. Kümülatif inelastik yerdeğiştirmeler alüminyum alaşımlı numuneler için $100\Delta_{by}$, çelik numuneler için $172\Delta_{by}$ ’nin üzerindendir. Deney düzeneğine benzer BÖÇ deneylerinde, eksenel çapraz deneylerinde olduğu gibi kümülatif inelastik yerdeğiştirmenin en az $200\Delta_{by}$ olması zorunluluğu bulunmamaktadır (AISC-341, 2010).

Çizelge 5.6 : η kümülatif inelastik yerdeğiştirme ve E_h enerji yutma miktarları.

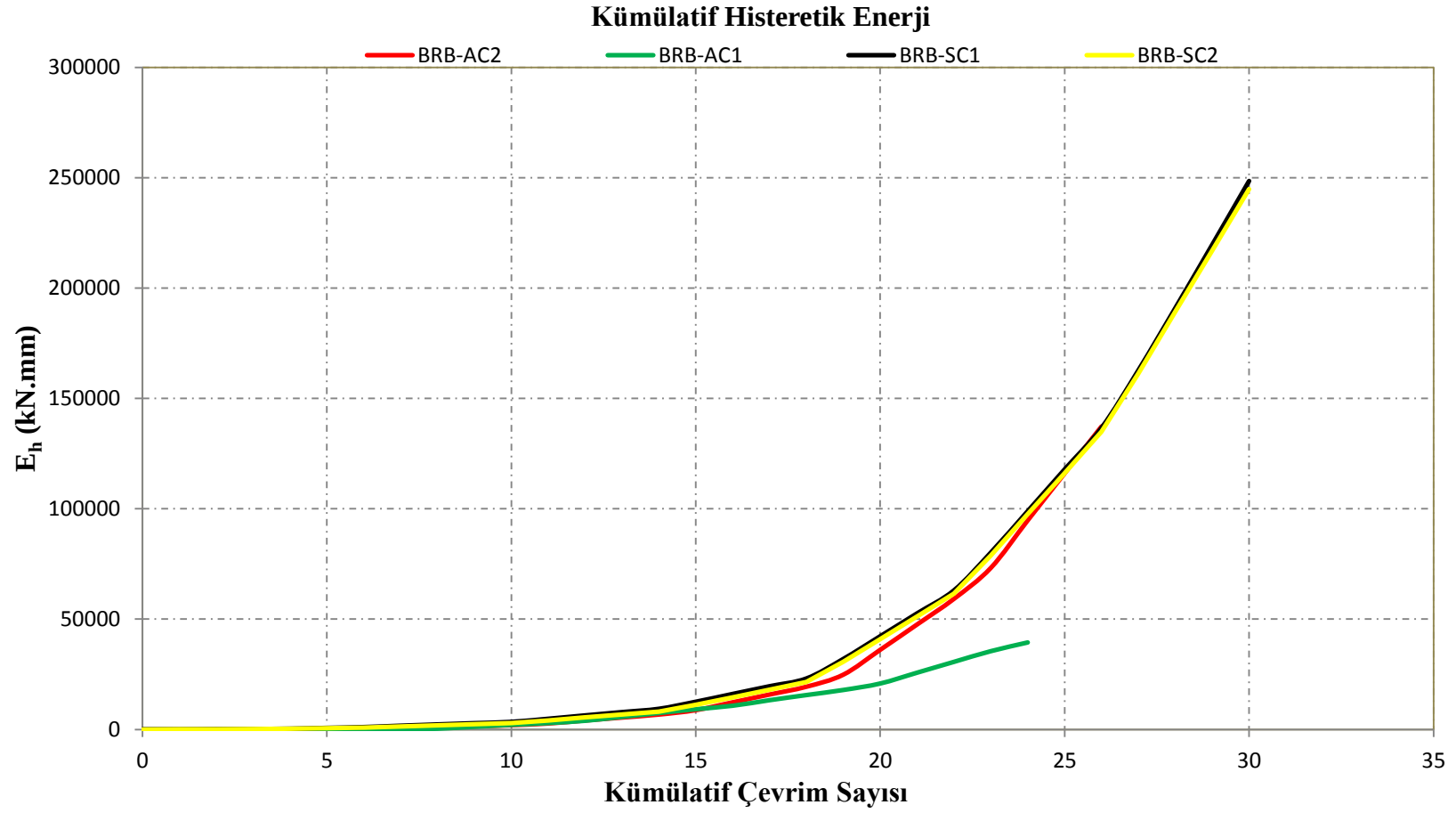
Numuneler	Kümülatif inelastik yerdeğiştirme η	E_h (kN.mm)
BRB-AC1	$48\Delta_{by}^E$	39,443.33
BRB-AC2	$100\Delta_{by}^E$	137,301.40
BRB-SC1	$172\Delta_{by}^E$	248,507.90
BRB-SC2	$172\Delta_{by}^E$	244,763.50

Çelik BÖÇ numunelerin enerji yutma miktarları karşılaştırıldığında BRB-SC1/BRB-SC2 oranı 1.02'dir. Alüminyum alaşımlı BÖÇ numunelerin enerji yutma miktarları karşılaştırıldığında BRB-AC2/BRB-AC1 oranı 3.48'dir. Tüm numuneler içinde en fazla enerji sönmleyen numune, stabil davranış gösteren BRB-SC1 numunesi olmuştur. BRB-AC1 numunesi erken koptuğundan doğal olarak en az enerji sönmleyen numunedir.

Şekil 5.24'de BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin kümülatif enerji grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Numunelerin enerji yutma miktarları maksimum yerdeğiştirme sünekliği ile orantılıdır. BRB-SC1 numunesi düşük akma dayanımlı çelikten, BRB-SC2 numunesinin çekirdeği yüksek akma dayanımlı çelik malzemesinden üretilmiştir. BRB-SC1 numunesinin sünek davranışı çekirdekte kopma ömrünü BRB-SC2'ye göre arttırmıştır.

Numunelerin 3 farklı bölgesinin çaprazın toplam rijitliğine olan katkısı deneylerde incelenmiştir. Çaprazın eksenel yerdeğiştirmelerini ölçmek için üzerine yerleştirilen T10, T11 yerdeğiştirme ölçerlerinden alınan uzamaların ortalaması kullanılmıştır. Çizelge 5.7'de deney ve statik itme analizi sonucu elde edilen rijitliklerin karşılaştırması topluca verilmektedir.

Deney sırasında numunelerin kaynaklı birleşimlerde, bayrak plakasına bulonlu birleşimlerinde olumsuzluk gözlenmemiştir. Bayrak plakalarının deney numunesine olan birleşim performansı da mükemmeldir.



Şekil 5.24 : BRB-AC1, BRB-AC2, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri kümülatif histeretik enerji grafiklerinin karşılaştırılması.

Çizelge 5.7 : Deneysel ve statik itme analizi ile elde edilen rijitliklerin karşılaştırılması.

Numuneler	Tahmin edilen						Deney sonucu bulunan					
	K_0^P (kN/mm)		K_1^P (kN/mm)		$\alpha^P=K_1^P/K_0^P$		K_0^E (kN/mm)		K_1^E (kN/mm)		$\alpha^E=K_1^E/K_0^E$	
	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç	Çekme	Basınç
BRB-AC1	+11.07	-11.07	+1.24	-1.68	+0.11	-0.15	+9.31	-10.97	+3.36	-3.93	+0.36	-0.36
BRB-AC2	+12.80	-12.80	+1.57	-2.10	+0.12	-0.16	+12.96	-10.93	+1.62	-2.42	+0.13	-0.22
BRB-SC1	+19.78	-19.78	+0.91	-1.37	+0.05	-0.07	+17.29	-14.53	+0.90	-3.04	+0.05	-0.21
BRB-SC2	+13.31	-13.31	+0.67	-0.99	+0.05	-0.08	+13.01	-11.06	+0.70	-2.55	+0.05	-0.23

5.7 Deney Sonrası Numunelerin Kesit Açılımı

Göçme durumunun belirlenebilmesi için her bir numune deneyden sonra yarı boyu kesitinde açılarak, gözlem ve incelemelerde bulunulmuştur. Kuramsal olarak tahmin edilen davranışla, deneysel davranışın uyum/uyumsuzluk durumu, deneysel gözlemlerin nedenleri yapılan kesit açılımları ile anlaşılmıştır. Genel olarak gözlemler ve bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- BRB-AC1 numunesi akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte haç vari kesitte, berkitme plakaları-çekirdek kaynak noktasından kopmuştur. Kaynak noktası ITAB bölgesinde dayanım %60 oranında azalmaktadır. BRB-AC1 numunesinin kesit açılım fotoğrafları Şekil 5.25’de verilmektedir.
- BRB-AC2 numunesi, beklendiği üzere çekirdek orta noktasına çok yakın bir noktadan kopmuştur. BRB-AC2 numunesinin kesit açılım fotoğrafları Şekil 5.26’de verilmektedir.
- BRB-SC1 numunesi, beklendiği üzere çekirdek orta noktasından kopmuştur. İnelastik şekildeğiştirmeler strain-gauge civarında yoğunlaştığından ve kopma bu bölgede olduğundan metal yüzeyine yerleştirilen strain-gauge erken hasar görmüştür. Numunenin çelik çekirdekte zayıf eksenî doğrultusunda yerel burkulmaların fazla olduğu görülmüştür. Çekirdekler orijinal şekline benzer inelastik şekildeğiştirme yapmıştır. BRB-SC1 numunesi kesit açılım fotoğrafları Şekil 5.27’de verilmektedir.
- BRB-SC2 numunesi çekirdek orta noktasına çok yakın bir noktadan kopmuştur. Numunenin çekirdek zayıf eksenî doğrultusunda yerel burkulmalar fazladır. Çekirdekler orijinal şekline benzer inelastik şekildeğiştirme yapmıştır. BRB-SC2 numunesi kesit açılım fotoğrafları Şekil 5.28’de verilmektedir.
- Tüm numunelerde birleşim bölgesi ve güçlendirme bölgesi tasarlandığı ve beklenildiği üzere elastik olarak davranmıştır.

Numunelerde, yüksek dayanımlı dolgu harcında herhangi bir çatlak gözlenmemiştir. Bu, dolgu malzemesinin yük aktarmadığını da kanıtlamaktadır.



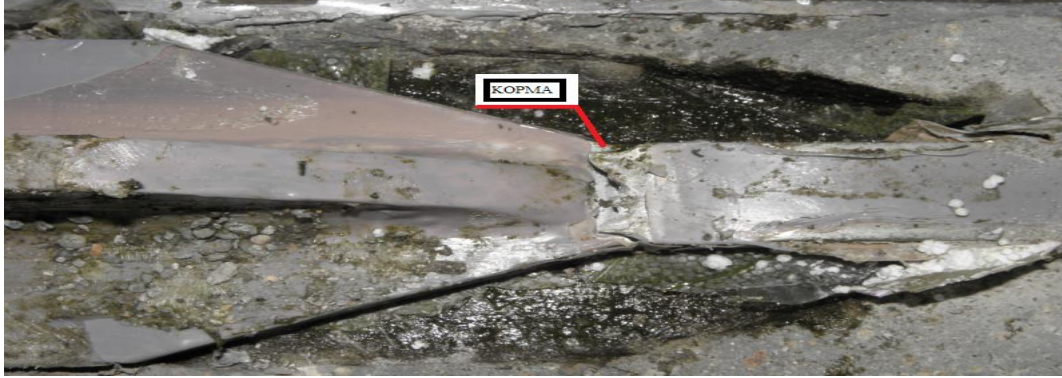
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.25 : BRB-AC1 numunesi kesit açılım fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) Akma bölgesi kuvvetli eksen boyunca gözle görülür inelastik şekil değişimi. (c) Numune alt uç akma-güçlendirme bölgesi geçişte zayıf eksen boyunca yerel burkulma oluşması ve çekirdek düzlem dışı hareketi. (d) Numune üst uç zayıf eksen boyunca alüminyum kaynak ITAB bölgesinde çekme kopması.



(a)



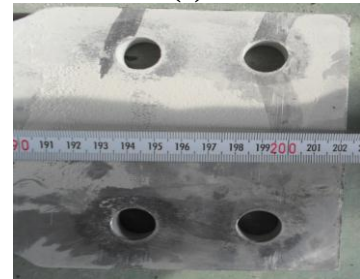
(b)



(c)



(d)



(e)

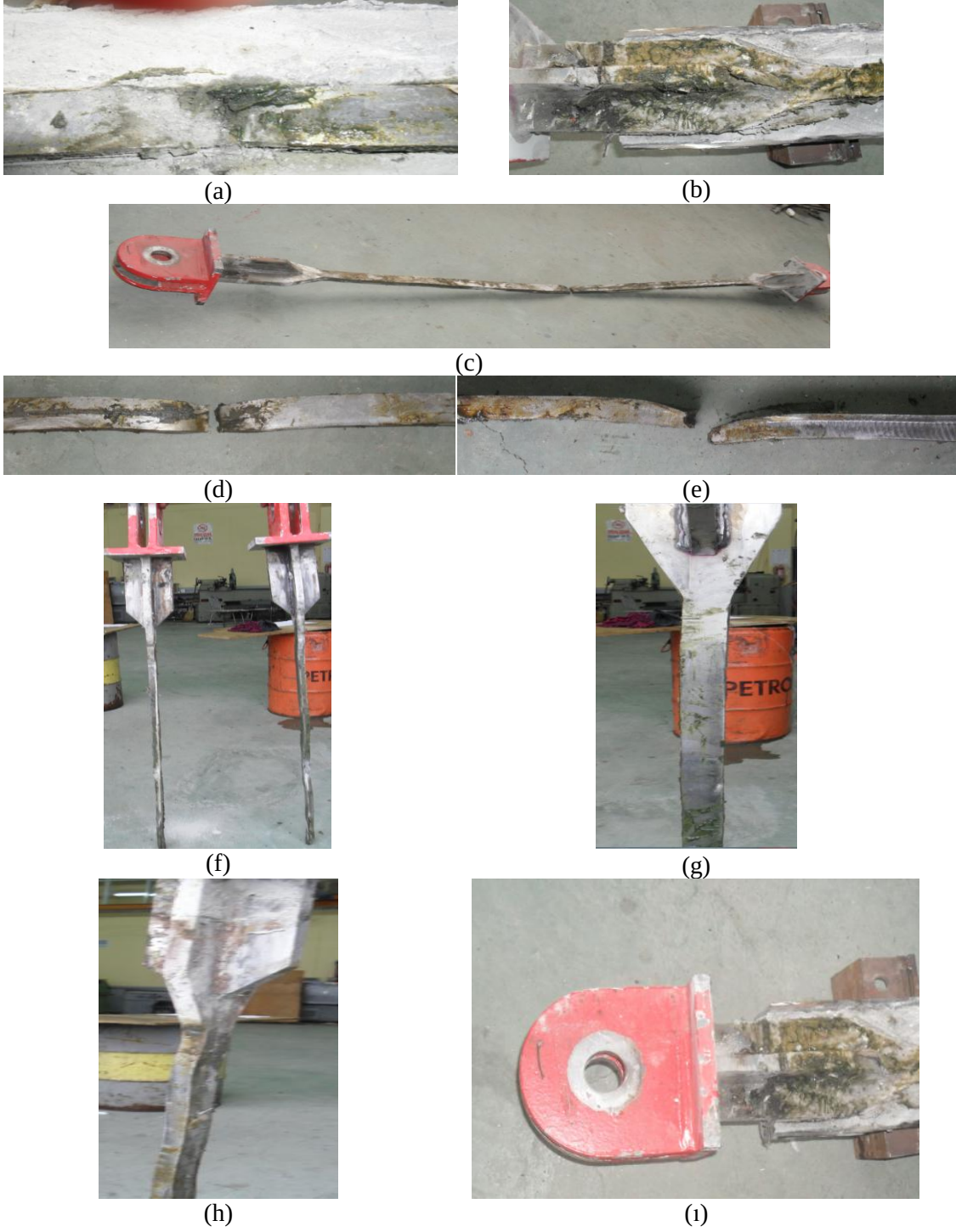


(f)

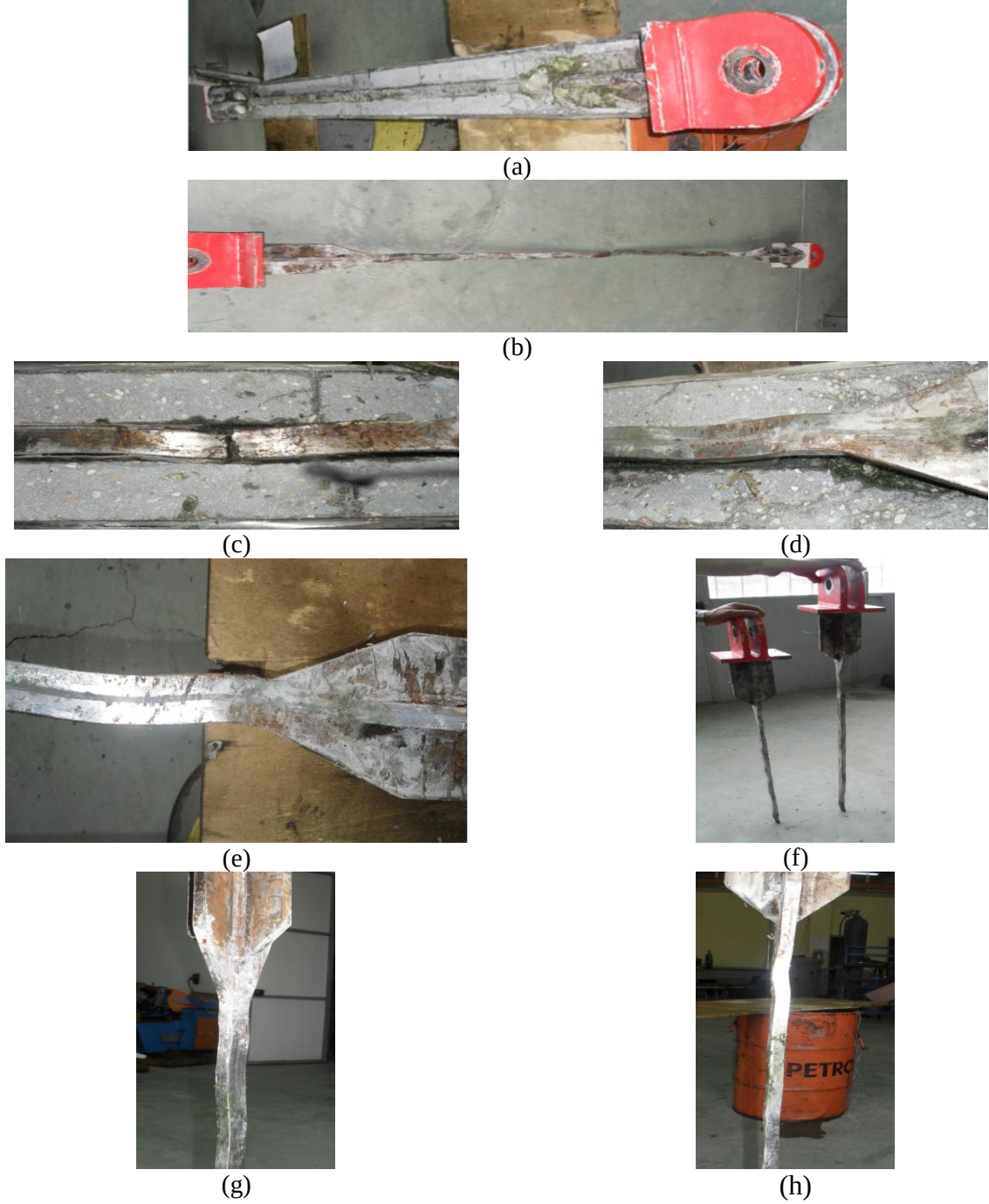


(g)

Şekil 5.26 : BRB-AC2 numunesi kesit açılımı fotoğrafları: (a) Çekirdek kopma durumu, genel görünüş. (b) Akma bölgesi kuvvetli eksen boyunca inelastik şekildeğiştirme görülmemekte. (c) Akma bölgesi zayıf eksen boyunca oluşan inelastik şekildeğiştirmeler ve burkulma dalgaları. (d) Çekirdek kopma yüzeyi. (e) Deney sonrası elastik birleşim bölgesi. (f) Çekirdek zayıf eksen boyunca kopma şekli ve burkulma dalgaları. (g) Hasarsız çekirdek, elastik güçlendirme bölgesi.



Şekil 5.27 : BRB-SC1 numunesi kesit açılımı fotoğrafları: (a) Çekirdek orta noktadan kopması, (b) Güçlendirme bölgesinin elastik davranış. (c) Çekirdeğin kopması, genel görünüş. (d) Çekirdek kuvvetli eksen boyunca kopma yüzeyi yakın görünüş. (e) Çekirdeğin zayıf eksen boyunca orta noktada kopma yüzeyi ve kalıcı inelastik uzama. (f) Numune zayıf eksen boyunca iki uç genel görünüşü ve burkulma dalgaları. (g) Çekirdeğin akma bölgesi uç noktasında kalıcı inelastik şekildeğiştirme. (h) Çekirdek akma bölgesi uç noktasında zayıf eksen boyunca oluşan burkulma dalgalarının yakın görünüşü. (i) Deney sonrası elastik birleşim bölgesinin genel görünüşü.



Şekil 5.28 : BRB-SC2 numunesi kesit açılımı fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) Çekirdeğin orta noktadan kopması. (c) Çekirdeğin kuvvetli eksen boyunca kopma yüzeyinin yakın görünüşü. (d) Çekirdeğin alt uç akma bölgesi-güçlendirme bölgesi geçişte düzlem dışı hareketi ve burkulma dalgaları. (e) Çekirdeğin üst uç akma bölgesi-güçlendirme bölgesi geçişte düzlem dışı hareket ve burkulma dalgaları. (f) Numunenin zayıf eksen boyunca iki uç genel görünüşü. (g) Çekirdeğin akma bölgesi uç noktasında kalıcı inelastik şekildeğiştirme. (h) Çekirdeğin akma bölgesi uç noktasında zayıf eksen boyunca oluşan burkulma dalgalarının genel görünüşü.

5.8 Numunelerin Etkili (Eşdeğer) Sönüm Oranlarının Belirlenmesi

5.8.1 Genel

Yapılarda pek çok elemanın enerji yutma kapasitesine katkısı vardır. Bunlar arasında çelik birleşimlerdeki sürtünmeler, betondaki mikro çatlakların açılıp kapanması ve yapısal olan ve olmayan elemanlar arasındaki sürtünmeler örnek olarak verilebilir. Yapı enerji sönümleme yeteneğinin sayısallaştırılması diğer özelliklerinin belirlenebilmesi kadar kolay değildir. Bu belirsizlik sönümleme mekanizmasına giren elemanların çokluğundan ve yapının deprem süresince değişen davranışsal özelliklerinden kaynaklanmaktadır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında klasik yaklaşım, her yapı elemanının deprem etkilerine direnç gösterebilecek dayanıma sahip olması ve deprem enerjisini sönümleyecek yeterli süneklik kapasitesini sağlamasıdır. Bu yaklaşımla çok büyük bir deprem enerjisi yapının ana taşıyıcı sistem elemanları tarafından yutulur ve bazı yapı elemanları çok büyük inelastik şekil değiştirme yapar; böylece yapı çoğunlukla önemli bir deprem sonrasında ilk konumuna gelemmez. Bu olumsuz durum geliştirilen yapı kontrol tekniklerine göre tasarlanan sönümleyicilerin kullanılmasıyla azaltılmaktadır. Yapılarda BÖÇ'ler gibi pasif enerji sönümleyici elemanların kullanılması durumunda yapısal hasarın azaltılmasının yanında giren enerjinin önemli bir bölümünün yapıya eklenen bu elemanlar tarafından sönümlenmesi sağlanmış olur.

Deprem enerjisinin yapı içinde dağıtılması ve yutulması aşağıda dış ve iç etkilere bağlıdır:

- Enerjinin sönümlenme nedeni malzeme viskozitesidir. Bu işlem şekil değiştirmelerin zamanla değişim hızına bağlıdır. Bu tür sönümlemeye *viskoelastik sönümleme* denilmektedir.
- Enerji sönümlemesi, malzemede çevrimsel bir inelastik davranışı ve bazı artık şekil değiştirmeleri oluşturarak davranışın sonlanmasını sağlar. Enerji dağıtmayı sağlayan çevrimsel inelastik şekil değiştirme

bir histeretik döngü biçimindedir. Bu sönümleme *histeretik sönümleme* olarak adlandırılır.

- Enerjinin dağıtılması, birbiriyle temas halindeki iki malzemenin hareket etmesi ile sürtünmenin aşılması sonucu sağlanır. Sürtünme kuvveti büyüklüğünün sabit olduğu *Coulomb sönümü* bu durumu ifade etmektedir. *Yapısal sönümleme (sürtünme sönümlemesi)* olarak adlandırılır.
- Enerji dağıtma, yapı ile onun çevresel unsurları arasındaki etkileşiminden ortaya çıkar. Yapının rölatif (bağıl) hareketi, harekete karşı koyan ve yapıdan enerjiyi çıkartan kuvvetleri üretir.

Sönümleyicilerin üç ana grupta uygulamaları mevcuttur:

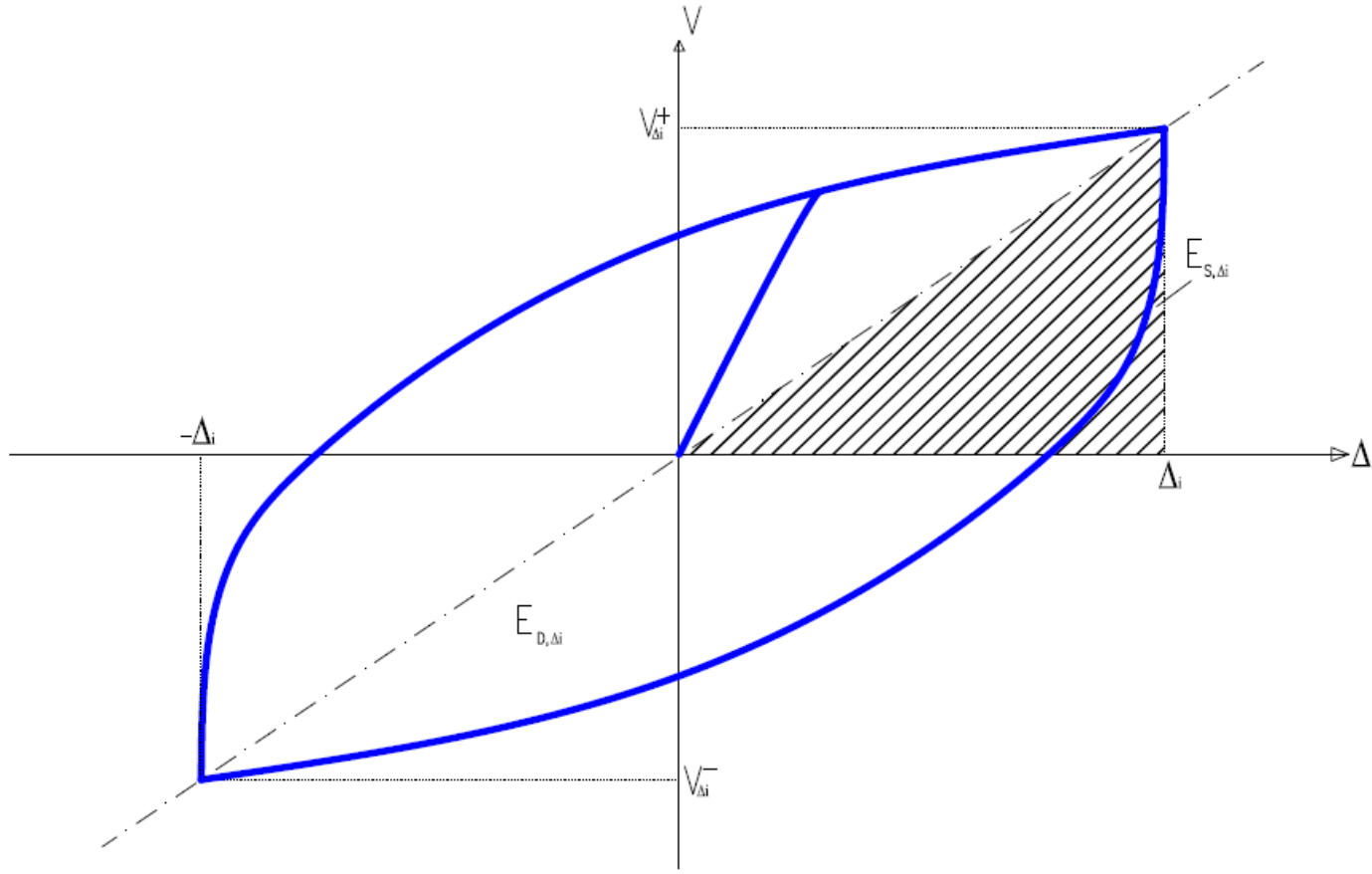
- Viskoelastik ve viskoz sönümleyiciler (Sönümlü serbest titreşimde, sistemin salınmadığı durumda elde edilen en küçük sönüm miktarı olan kritik sönüm oranı bu grupta %25~35 arasında değişmektedir),
- Metalik sönümleyiciler (BÖÇ'ler bu gruba girmektedir),
- Sürtünmeli sönümleyiciler,

Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altında sönümledikleri enerji miktarını ifade etmenin bir diğer yolu etkili sönüm oranının hesaplanmasıdır. Viskoz sönüm gerçek fiziksel bir özellik değildir. Bu model daha çok matematiksel bir yaklaşım yapmak için kullanılmaktadır. Gerçekte yapılarda sönümleyici elemanlar yoksa yapının sönümünü modellemek için viskoz sönüm yaklaşımı kullanılmaktadır. Rayleigh sönümü olarak da bilinen, kütle ve rijitlik orantılı sönüm bir diğer modeldir. Sözü edilen her iki sönüm modeli de yapının gerçek fiziksel özelliklerine dayalı olarak üretilen ve analitik olarak gereksinim duyulan özellikleri içermektedir.

Kim ve Choi (2004a) etkili sönüm oranındaki artışın akma gerilmesi ile doğru orantılı olduğunu, sistem rijitliği arttıkça etkili sönüm oranının da arttığını belirtmişlerdir. Bu durum BÖÇ'ün akma bölgesi kesit alanı büyüdükçe etkili sönüm oranının da artacağı sonucunu vermektedir. BÖÇ'ün optimum akma dayanımı, etkili sönüm oranını maksimum yapan bir bağıntı ile elde edilmiştir. Ayrıca BÖÇ'ün rijitlik artışı ile optimum akma gerilmesi azalırken, optimum dayanım oranı da artmaktadır. Başka bir deyişle, daha büyük akma

bölgesi kesit alanı kullanılması durumunda eşdeğer sönümü maksimum yapmak için BÖÇ’de kullanılan çeliğin düşük akma gerilmesine sahip olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Chopra (2001)’de etkili sönüm oranı için verilen (5.1) genel bağıntısındaki terimler şematik olarak Şekil 5.29’da BÖÇ’ün histeretik kuvvet-yerdeğiştirme eğrisinde gösterilmektedir.



Şekil 5.29 : BÖÇ'ün histeretik kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi üzerinde yutulan enerji ve depolanan elastik şekildeğiştirme enerjisinin gösterimi.

$$\xi_{effb} = \frac{1}{4\pi} \frac{E_{D,\Delta_i}}{E_{S,\Delta_i}} \quad (5.1)$$

Burada ξ_{effb} etkili (eşdeğer) sönüm oranı, E_{D,Δ_i} numune tarafından i sayılı çevrimde sönümlenen enerjidir. E_{S,Δ_i} i sayılı çevrimde depolanan elastik şekil değiştirme enerjisi

$$E_{S,\Delta_i} = \frac{V_{\Delta_i} \Delta_i}{2} \quad (5.2)$$

bağıntısıyla hesaplanmaktadır. V_{Δ_i} i sayılı çevrimde elde edilen maksimum çekme/basınç kuvveti, Δ_i i sayılı çevrimde elde edilen maksimum yer değiştirmedir. BÖÇ'lerde depolanan elastik şekil değiştirme enerjisi çekme ve basınç yüklemeleri için ayrı ayrı bulunan depolanan elastik şekil değiştirme enerjisinin ortalamasıdır. (5.2) bağıntısı (5.1)'de yerine konursa bağıntı aynı zamanda EN 15129 3.1.10'da (2010, Bölüm 3, p.6) lineer olmayan sönümleyicilerin (Non Linear Device-NLD) etkili sönüm oranı (effective damping ratio) için verilen (5.3) bağıntıya dönüşür.

$$\xi_{effb} = E_{D,\Delta_i} / (2\pi V_{\Delta_i} \Delta_i) \quad (5.3)$$

BÖÇ'lerin çekme ve basınç piklerindeki farklılık bağıntıya yerleştirilirse

$$\xi_{effb} = E_{D,\Delta_i} / (\pi (T_{\Delta_i} + P_{\Delta_i}) \Delta_i) \quad (5.4)$$

elde edilir. Burada T_{Δ_i} ve P_{Δ_i} sırasıyla i sayılı çevrimde BÖÇ'ün deneysel çekme ve basınç piklerinde ulaşılan ortalama kuvvetler, ξ_{effb} deprem sönümleyicilerinin karakteristik davranış özelliğini tanımlayan bir parametredir. Bu parametre yapı sisteminin dinamik kuramsal davranışının modellenmesinde kullanılmaması gerektiği buna karşın verilen doğrultuda aynı sönüm ve rijitliğe sahip sönümleyicilerin lineer analiz problemlerinde kullanılabileceği önerilmektedir. Ayrıca numunelerin metal sönümleyiciler (Energy Dissipating Devices- EDD) sınıfında değerlendirilebilmesi için etkili (eşdeğer) viskoz sönüm oranı $\xi_{effb} > \%15$ koşulunu sağlamalıdır (EN 15129, 2010, Bölüm 3, p.7). Malzemenin yön değiştiren tekrarlı yükler altında stabil ve kararlı davranışı sağlayacak özellikte olması ayrı bir sınırlayıcı koşuldur (Bölüm 6, p.23). Etkili sönüm seviyesi BÖÇ'ün akma bölgesi şekil değiştirme kapasitesine bağlıdır. Bu ilişki bu çalışmada BÖÇ'lerin deneysel verisine en iyi şekilde uyacak şekilde geliştirilen logaritmik bir fonksiyonla ifade edilmiştir. Çoğu zaman veri tablosuna tam olarak uyan bir fonksiyon bulmak mümkün olmadığından veri tablosuna en iyi uyan fonksiyon belirlenmeye çalışılmaktadır. Bir veri tablosuna en iyi uyan fonksiyonu bulma sürecine *regresyon*

analizi denir. Regresyon analizi yapılırken en çok kullanılan yöntemlerden biri En Küçük Kareler Yöntemi'dir. Bir veri tablosuna en iyi uyan doğrusal fonksiyonun grafiği olan doğruya *regresyon doğrusu* ya da *en küçük kareler doğrusu* denir.

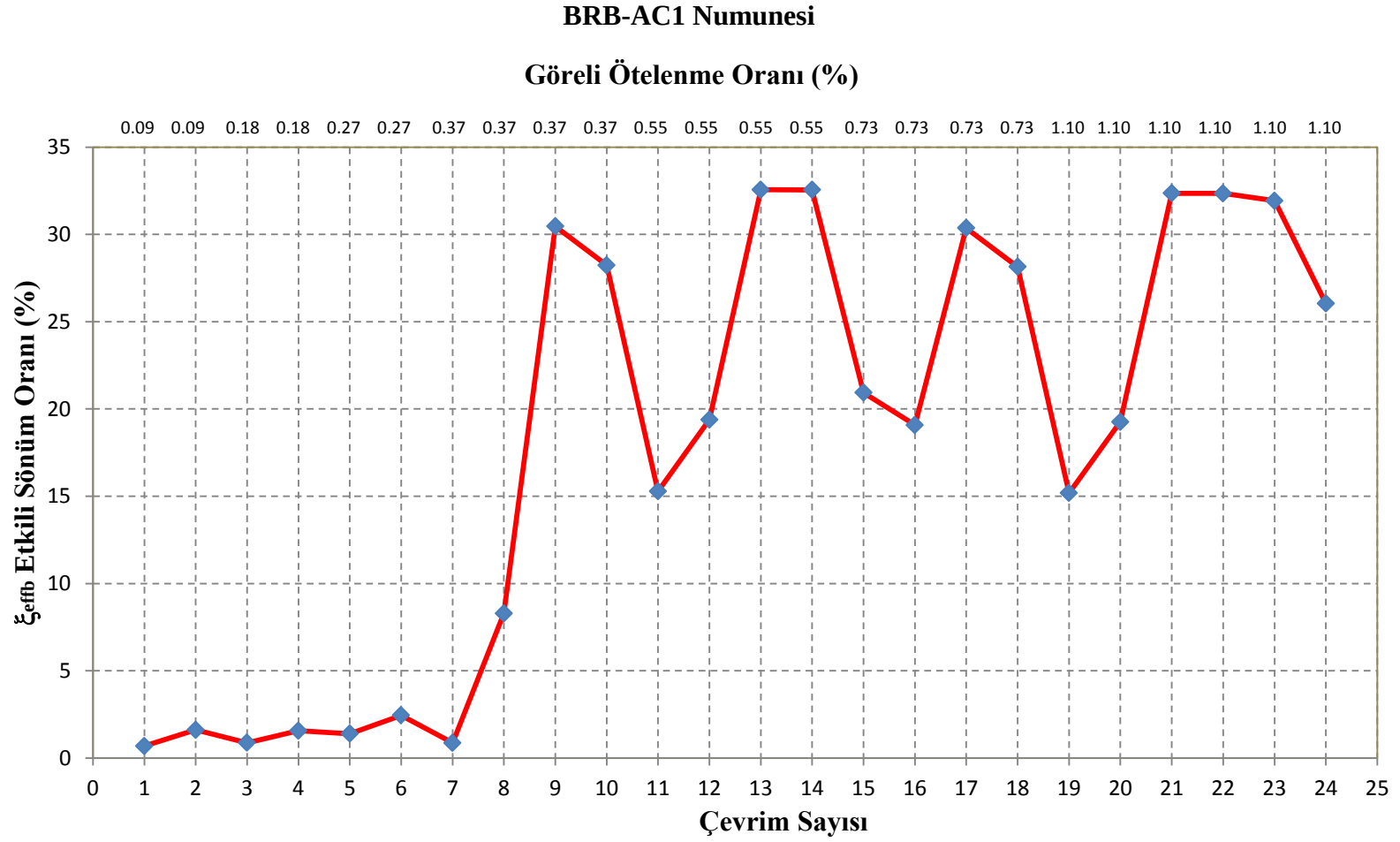
5.8.2 BRB-AC1 numunesi

Çizelge 5.8'de BRB-AC1 numunesinin deneysel histeretik eğri kullanılarak hesaplanan etkili sönüm oranları verilmektedir. 7. çevrimle birlikte akma başlamıştır.

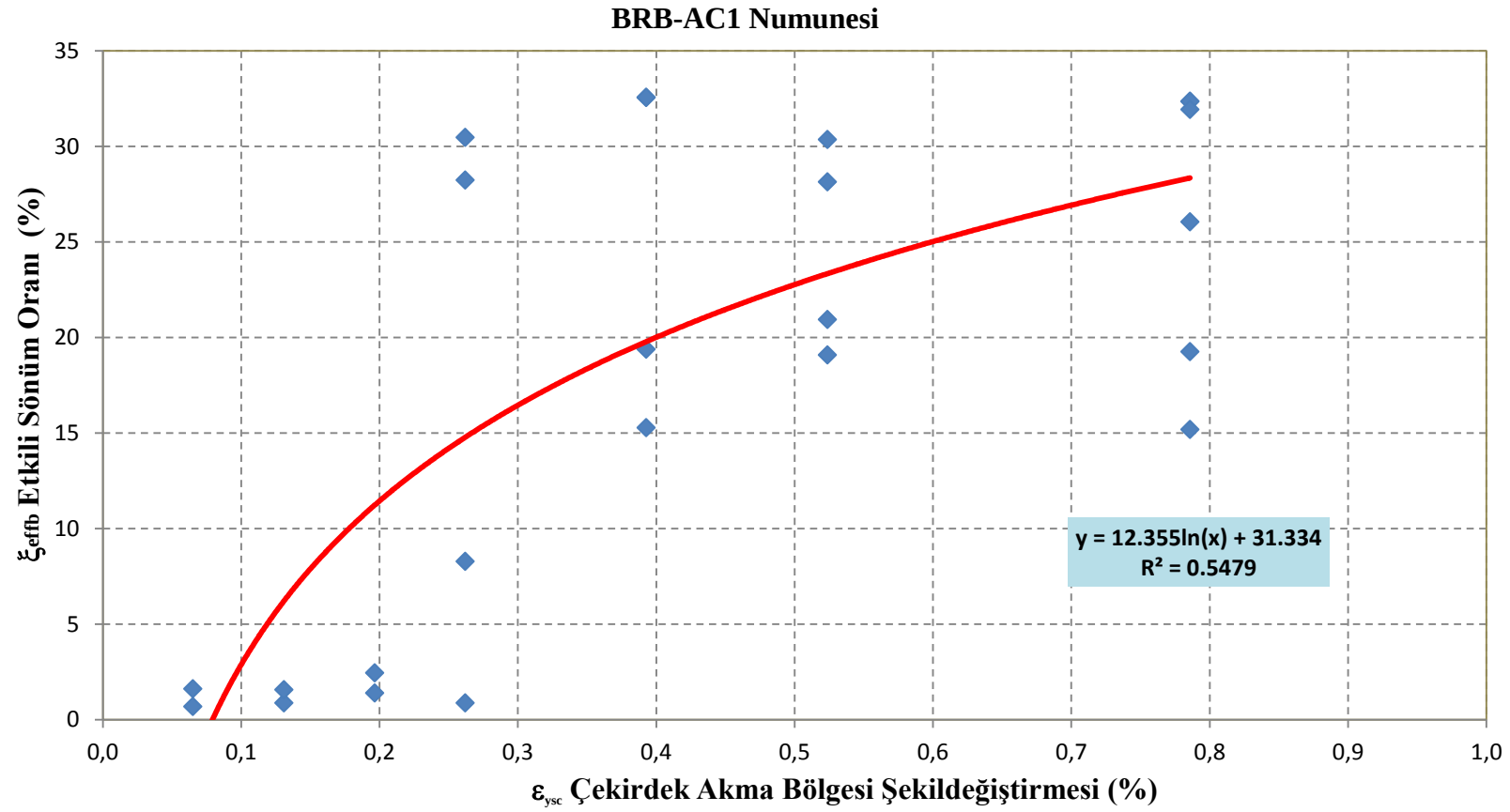
Çizelge 5.8 : BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranları.

	Çevrim Sayısı	ξ_{effb}	%
ELASTİK	1	0.01	0.69
	2	0.02	1.62
	3	0.01	0.88
	4	0.02	1.57
	5	0.01	1.39
	6	0.02	2.45
İNELASTİK	7	0.01	0.87
	8	0.08	8.29
	9	0.30	30.46
	10	0.28	28.23
	11	0.15	15.28
	12	0.19	19.38
	13	0.33	32.56
	14	0.33	32.55
	15	0.21	20.94
	16	0.19	19.08
	17	0.30	30.36
	18	0.28	28.14
	19	0.15	15.19
	20	0.19	19.26
	21	0.32	32.36
	22	0.32	32.35
	23	0.32	31.93
	24	0.26	26.05

BRB-AC1 numunesinin etkili sönüm oranları inelastik bölgede %8.29~%32.56 arasında değişmektedir. Şekil 5.30'da çevrim sayısına ve görelî ötelenme oranına göre etkili sönüm oranının değişimi görülmektedir. $+1.5\Delta_{by}$ seviyesinde (%0.55 görelî ötelenme oranı) 3. çekme pikinde elde edilen maksimum etkili sönüm oranı %32.56'dır. Şekil 5.31'de BRB-AC1 numunesinin akma bölgesi şekildeğiştirmesi farklı seviyelerinde etkili sönüm oranının değişimi verilmektedir.



Şekil 5.30 : BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.



Şekil 5.31: BRB-AC1 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.

5.8.3 BRB-AC2 numunesi

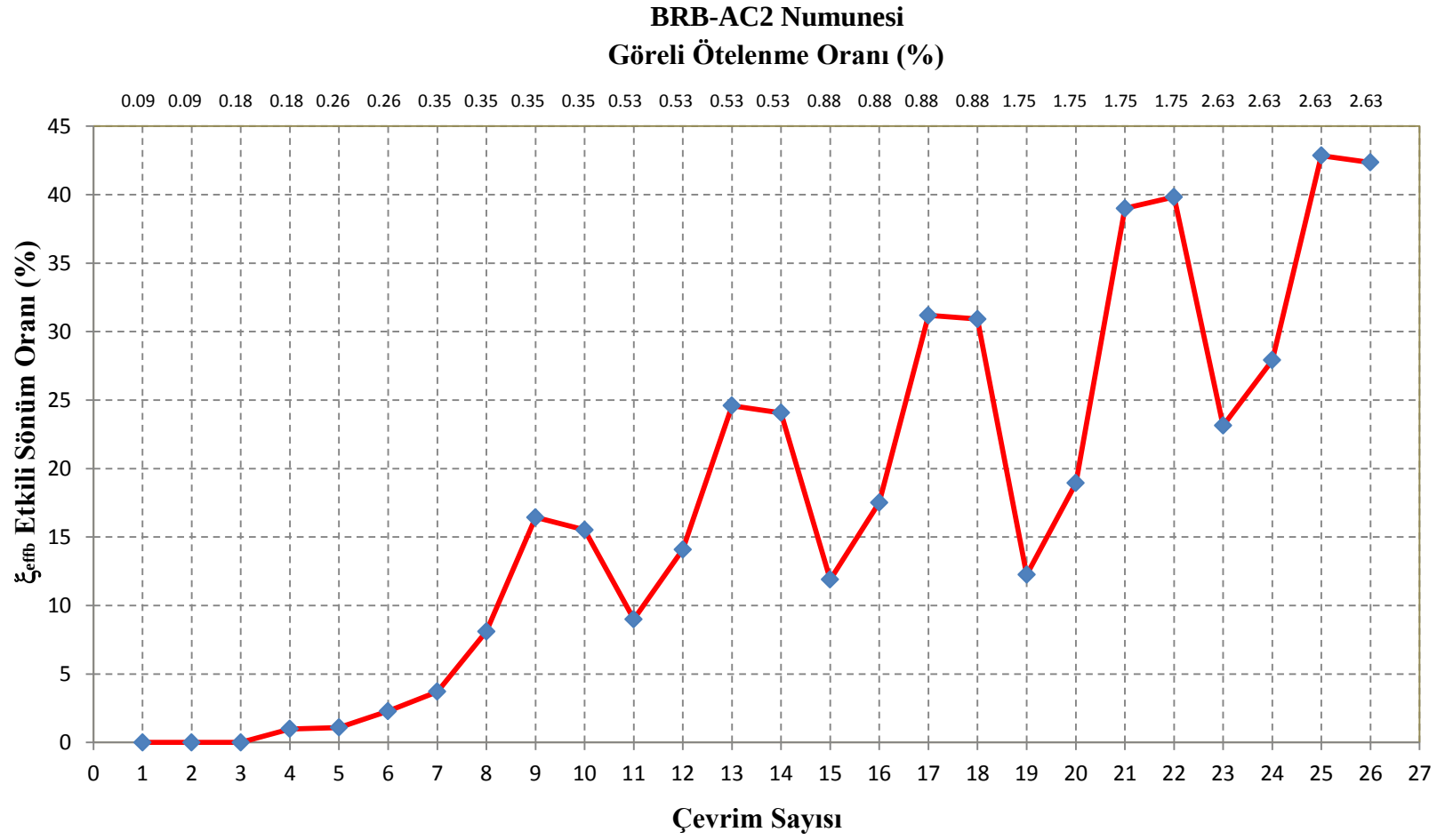
Çizelge 5.9’da BRB-AC2 deneysel ve histeretik eğrileri kullanılarak hesaplanan numunesinin etkili sönüm oranları verilmektedir.

Çizelge 5.9 : BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranları.

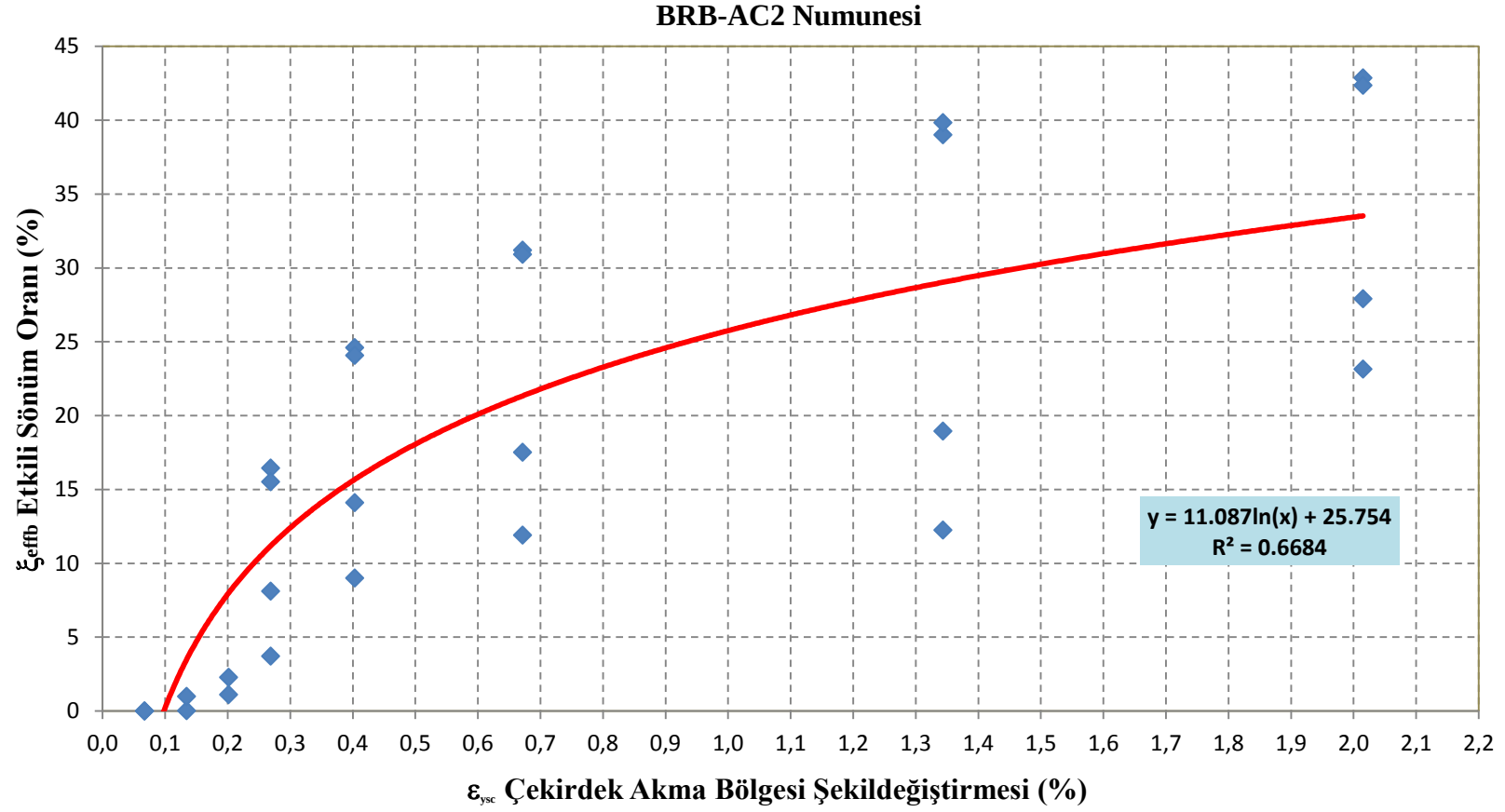
	Çevrim Sayısı	ξ_{effb}	%
ELASTİK	1	0.00	0.00
	2	0.00	0.00
	3	0.00	0.01
	4	0.01	0.99
	5	0.01	1.09
	6	0.02	2.28
İNELASTİK	7	0.04	3.71
	8	0.08	8.10
	9	0.16	16.44
	10	0.16	15.52
	11	0.09	8.99
	12	0.14	14.09
	13	0.25	24.59
	14	0.24	24.07
	15	0.12	11.89
	16	0.18	17.51
	17	0.31	31.19
	18	0.31	30.92
	19	0.12	12.25
	20	0.19	18.94
	21	0.39	39.00
	22	0.40	39.83
	23	0.23	23.13
	24	0.28	27.91
	25	0.43	42.85
	26	0.42	42.35

BRB-AC2 numunesinin etkili sönüm oranları inelastik bölgede %8.10~%42.85 arasında değişmektedir. Şekil 5.32’de çevrim sayısına göre etkili sönüm oranının değişimi görülmektedir. $+7.5\Delta_{by}$ (%2.63 görelî ötelenme oranında) 3. çekme pikinde maksimum etkili sönüm oranı %42.85’dir.

Şekil 5.33’de BRB-AC2 numunesinin akma bölgesi şekildeğiştirmesi farklı seviyelerinde etkili sönüm oranının değişimi verilmektedir.



Şekil 5.32 : BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.



Şekil 5.33: BRB-AC2 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.

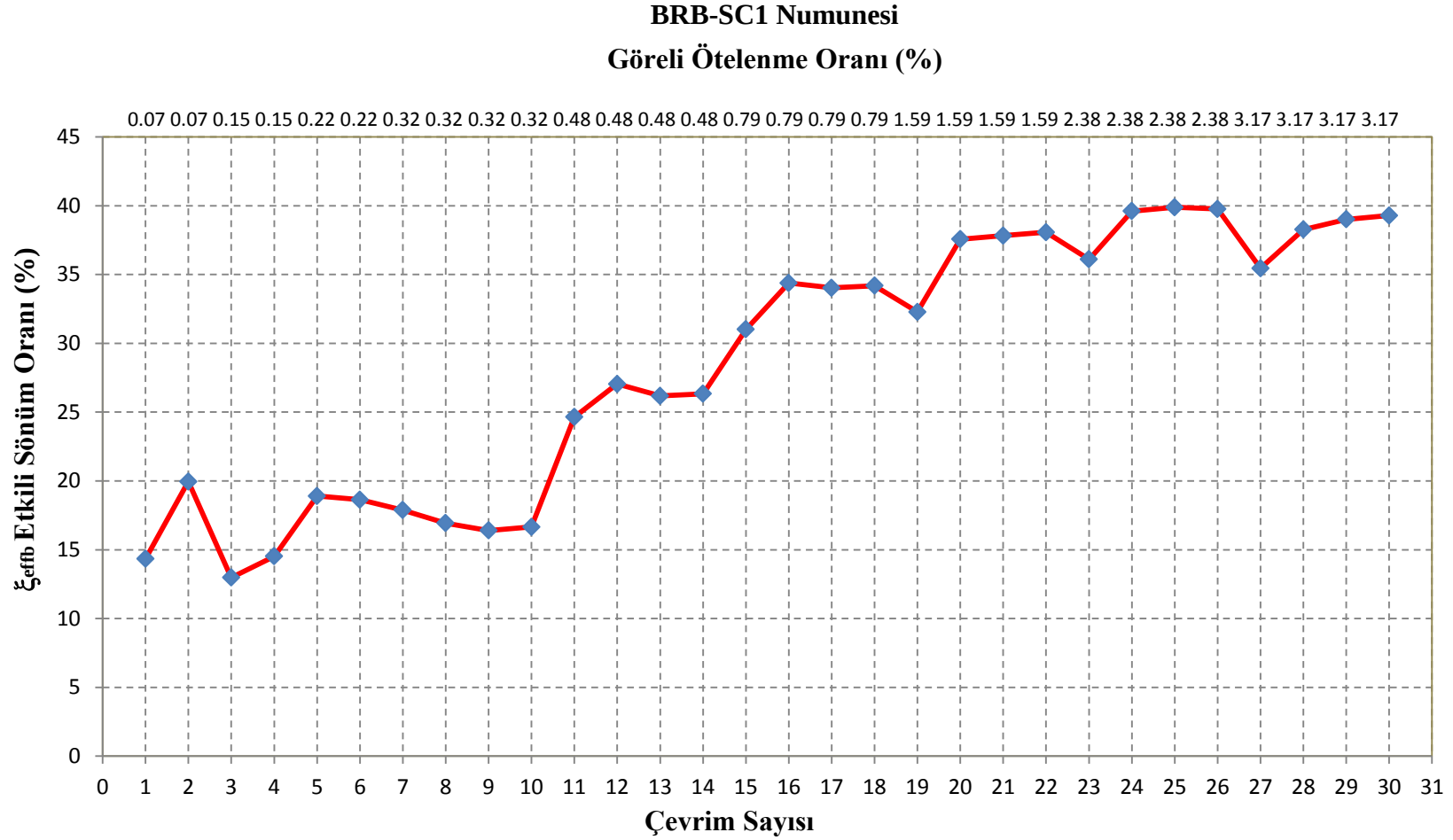
5.8.4 BRB-SC1 numunesi

Çizelge 5.10'da BRB-SC1 numunesinin deneysel ve histeretik eğrileri kullanılarak hesaplanana etkili sönüm değerleri verilmektedir.

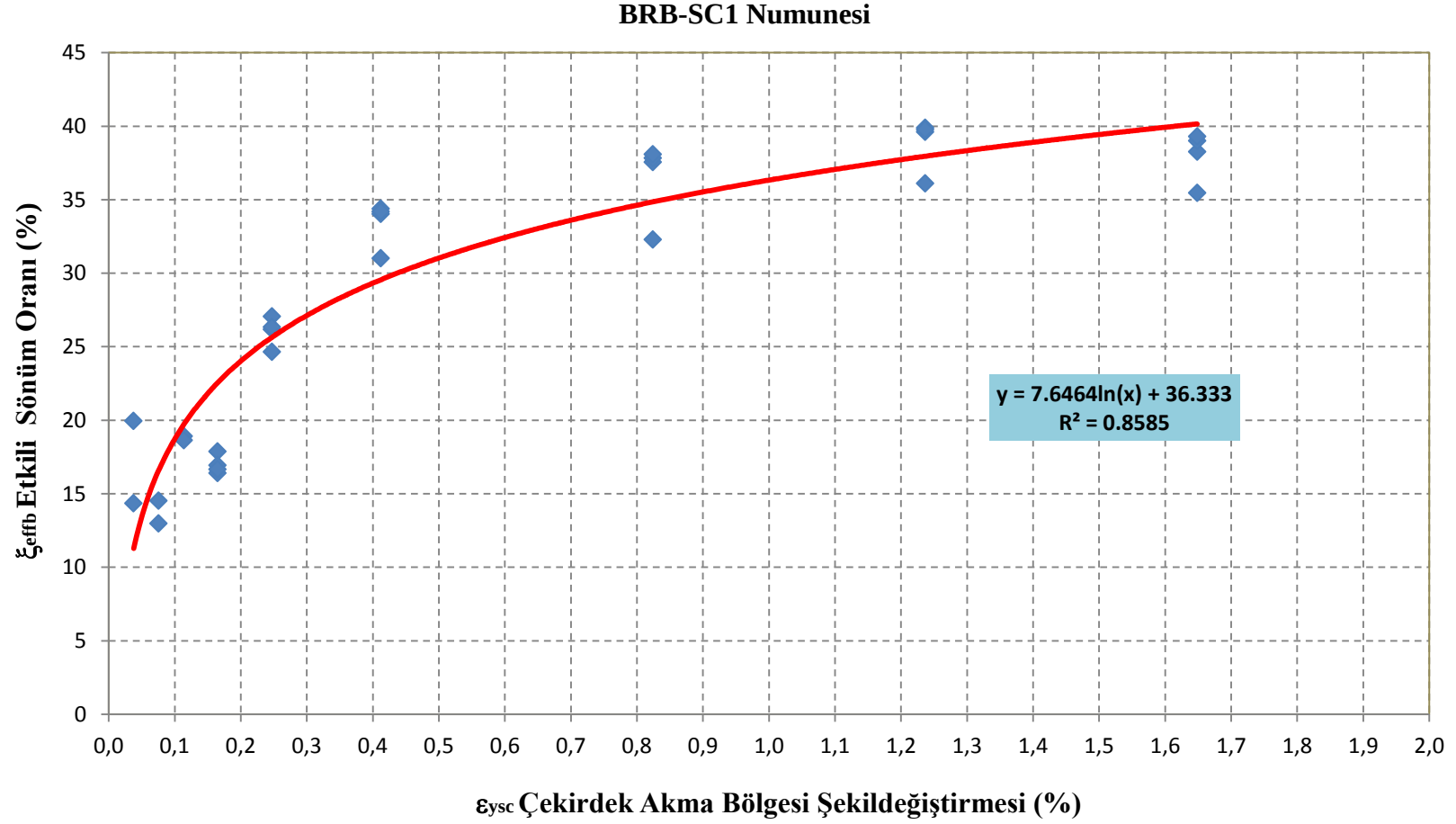
Çizelge 5.10 : BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranları.

	Çevrim Sayısı	ξ_{effb}	(%)
ELASTİK	1.00	0.14	14.34
	2.00	0.20	19.95
	3.00	0.13	12.98
	4.00	0.15	14.52
	5.00	0.19	18.90
	6.00	0.19	18.64
İNELASTİK	7.00	0.18	17.88
	8.00	0.17	16.93
	9.00	0.16	16.40
	10.00	0.17	16.65
	11.00	0.25	24.64
	12.00	0.27	27.05
	13.00	0.26	26.18
	14.00	0.26	26.33
	15.00	0.31	31.01
	16.00	0.34	34.38
	17.00	0.34	34.03
	18.00	0.34	34.18
	19.00	0.32	32.28
	20.00	0.38	37.56
	21.00	0.38	37.82
	22.00	0.38	38.07
	23.00	0.36	36.10
	24.00	0.40	39.61
	25.00	0.40	39.89
	26.00	0.40	39.76
	27.00	0.35	35.45
	28.00	0.38	38.26
	29.00	0.39	39.01
	30.00	0.39	39.29

BRB-SC1 numunesinin etkili sönüm oranları inelastik bölgede %16.40~%39.89 arasında değişmektedir. Şekil 5.34'de çevrim sayısına göre etkili sönüm oranının değişimi görülmektedir. $+7.5\Delta_{by}$ (%2.38 görelî ötelenme oranı) 3. çekme pikinde maksimum etkili sönüm oranı %39.89'dur. Şekil 5.35'de BRB-SC1 numunesinin akma bölgesi şekildeğiştirmesi farklı seviyelerinde etkili sönüm oranının değişimi verilmektedir.



Şekil 5.34 : BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.



Şekil 5.35: BRB-SC1 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirmesi ile değişimi.

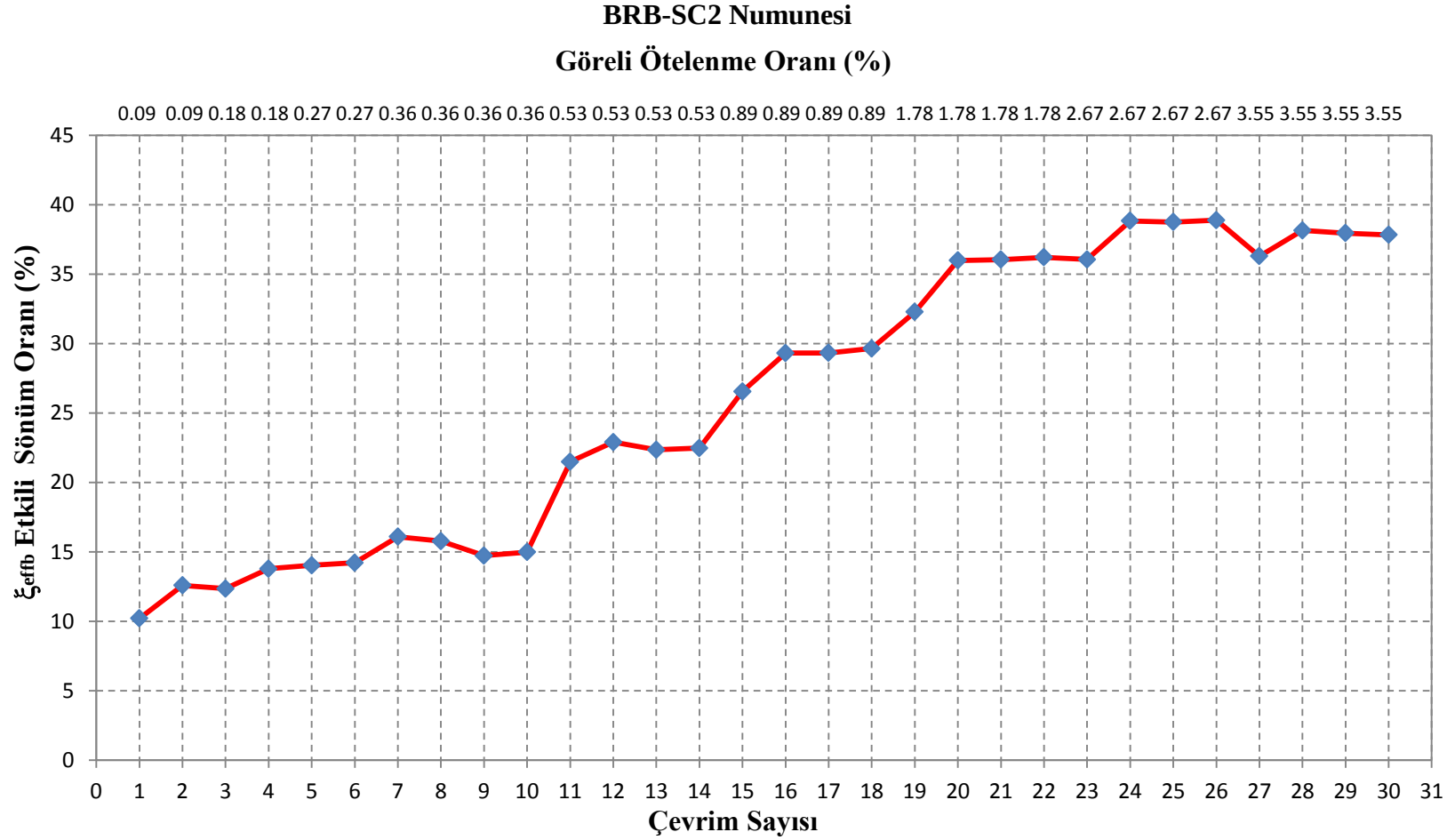
5.8.5 BRB-SC2 numunesi

Çizelge 5.11’de BRB-SC1 numunesinin etkili sönüm değerleri verilmektedir.

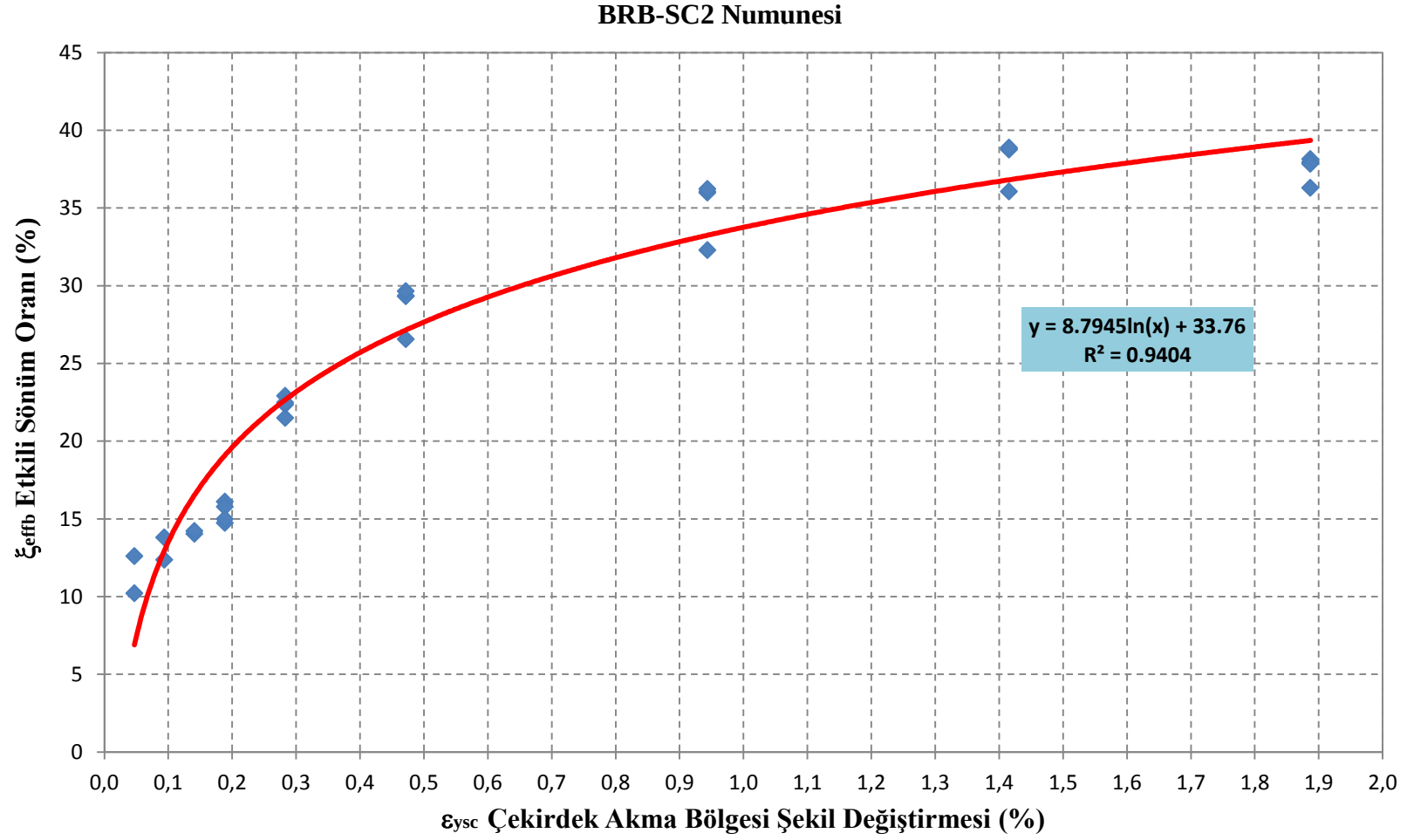
Çizelge 5.11 : BRB-SC2 numunesi etkili sönüm değerleri.

	Çevrim Sayısı	ξ_{effb}	(%)
ELASTİK	1	0.10	10.21
	2	0.13	12.59
	3	0.12	12.35
	4	0.14	13.79
	5	0.14	14.04
	6	0.14	14.21
İNELASTİK	7	0.16	16.09
	8	0.16	15.77
	9	0.15	14.73
	10	0.15	14.99
	11	0.21	21.49
	12	0.23	22.90
	13	0.22	22.35
	14	0.22	22.48
	15	0.27	26.55
	16	0.29	29.32
	17	0.29	29.33
	18	0.30	29.65
	19	0.32	32.28
	20	0.36	35.98
	21	0.36	36.04
	22	0.36	36.21
	23	0.36	36.06
	24	0.39	38.83
	25	0.39	38.75
	26	0.39	38.88
	27	0.36	36.29
	28	0.38	38.14
	29	0.38	37.95
	30	0.38	37.83

BRB-SC2 numunesinin etkili sönüm oranları inelastik bölgede %14.73~%38.88 arasında değişmektedir. Şekil 5.36’da çevrim sayına göre etkili sönüm oranının değişimi görülmektedir. $+7.5\Delta_{by}$ (%2.67 görelî ötelenme oranı) 4. çekme pikinde maksimum etkili sönüm oranı olan %38.88’dir. Şekil 5.37’de BRB-SC1 numunesinin akma bölgesi şekildeğiştirmesi farklı seviyelerinde etkili sönüm oranının değişimi verilmektedir.



Şekil 5.36 : BRB-SC2 numunesi etkili sönüm oranının çevrim sayısına göre değişimi.



Şekil 5.37: BRB-SC2 numunesi etkili sönüm oranının çekirdek akma bölgesi şekildeğiştirilmesi ile değişimi.

5.8.6 Karşılaştırma

Numunelerin etkili sönüm oranının çevrim sayısı ile değişimi ve göreceli ötelenme oranları ile değişimi bir karşılaştırma yapabilmek için Şekil 5.38’de verilmektedir.

Numuneler arasında en fazla etkili sönüm oranı BRB-AC2 numunesinde %42.85 olarak elde edilmiştir. BRB-AC1 numunesinin çekirdek akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçiş noktasındaki berkitme plaklarına yapılan alüminyum kaynak bu noktada plastik mafsalları oluşumunu öngörülenden erken başlatmış, çaprazda göçme beklenenden daha erken gerçekleşmiştir. Bu nedenle enerji sönümleme oranları, aynı alüminyum alaşım malzemesine sahip BRB-AC2 numunesinde ulaşılan seviyelere ulaşamamıştır. BRB-AC2 numunesinin A_{sc} akma bölgesi kesit alanı ($A_{sc}=600\text{mm}^2$), BRB-AC1 numunesi kesit alanından ($A_{sc}=525\text{mm}^2$) fazla olması etkili sönüm oranının daha yüksek değerlere ulaşmasının bir başka nedenidir (Kim ve Choi, 2004a).

Alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde inelastik bölgede yer değiştirmelerin değiştiği her ilk çevrimde etkili sönüm oranları azalırken aynı seviyenin son çevrimlerde artmaktadır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde etkili sönüm oranlarında görülen bu iniş çıkışların nedeni olarak, alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki inelastik bölgede kalıcı şekil değiştirmesinin çelik BÖÇ’lere göre daha az olması düşünülmektedir.

Alüminyum alaşımlı malzemenin kristal (metalik) kafes yapısı yüzey merkezli kübik, çelik malzemenin ise hacim merkezli kübiktir. Dislokasyon (çizgisel kusur) kristal yapıda atomların hatalı dizilimi boydan boya bir çizgi boyunca uzanan kristal yapı kusurudur. Çelik/alüminyum alaşımlı kristal yapıları metallerin inelastik şekil değiştirmesi, kayma etkisiyle hareket eden dislokasyonlar tarafından oluşmaktadır. Dislokasyonların hareket etmeye başlayarak kayma olayını başlatması için gereken minimum kayma gerilmesi kritik kayma gerilmesidir. Yüzey merkezli kübik kafes yapıları alüminyumun kritik kayma gerilmesi, hacim merkezli kübik kafes yapıları çelikten daha düşüktür.

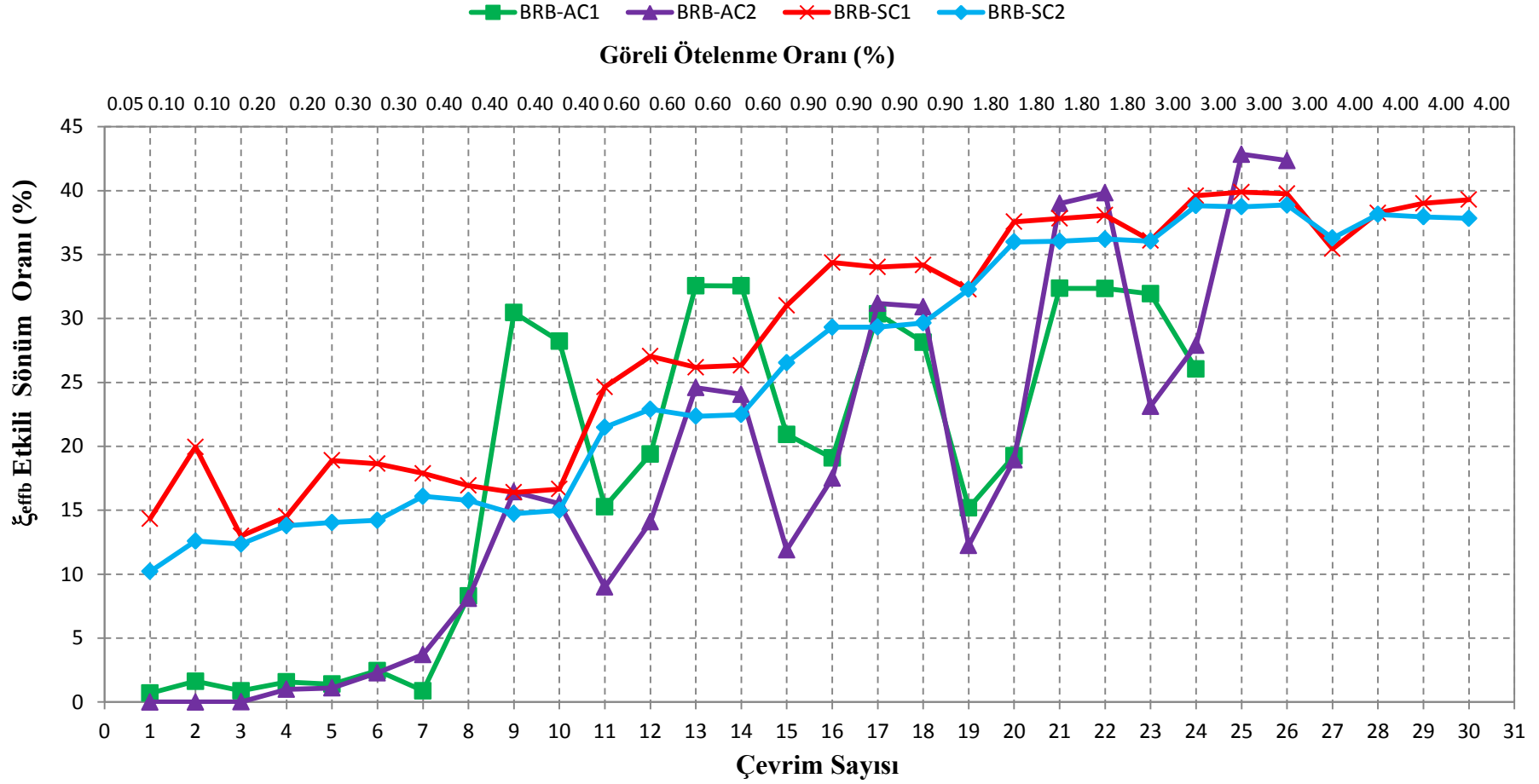
Akma öncesi BRB-AC1 numunesinin etkili sönüm oranları %0.69~%2.45, BRB-AC2 numunesinin %0.00~%2.28 arasında değişmektedir. Çelik BÖÇ’lerin akma öncesi etkili sönüm oranları BRB-SC1 numunesinde %12.98~%19.95,

BRB-SC2 numunesinde %10.21~%14.21 arasında değişmektedir. %0.30 görelî ötelenme oranlarından az olan görelî ötelenme seviyelerinde çelik BÖÇ'lerin akma öncesi etkili sönüm oranları, alüminyum alaşımlı BÖÇ'lere göre daha fazladır. Akma öncesi çelik çekirdekli BÖÇ'lerin histeretik eğrileri altında kalan alanın elastik şekildegıştirme enerjisi değerine oranı alüminyum çekirdekli BÖÇ'ler için aynı koşullarda hesaplanan orandan daha büyük olduğundan, çelik çekirdekli BÖÇ'lerin etkili sönüm oranları daha yüksek olarak elde edilmiştir.

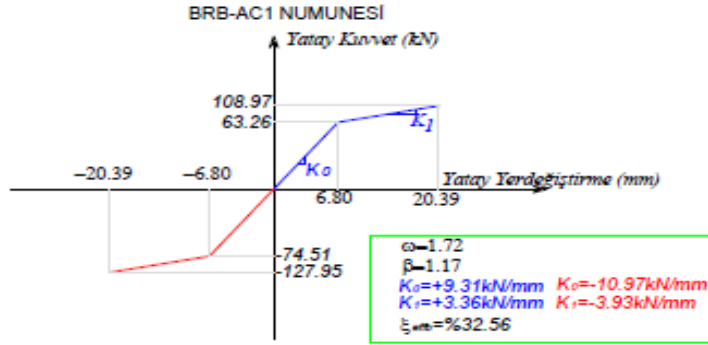
Akma öncesi elastik çevrim seviyelerindeki küçük yerdegıştirme piklerinde etkili sönüm oranının çelik BÖÇ'lerde fazla olmasının bir başka nedeni de birleşim bölgelerinde az da olsa yutulan enerji miktarıdır.

Kim ve Choi'de (2004a) verildiğı gibi bu tez çalışmasında da çelik BÖÇ'ler arasında normal akma dayanımına sahip ve akma bölgesi kesit alanı fazla olan BRB-SC1 numunesinde, yüksek akma dayanımlı BRB-SC2 numunesine göre daha fazla etkili sönüm oranı elde edilmiştir.

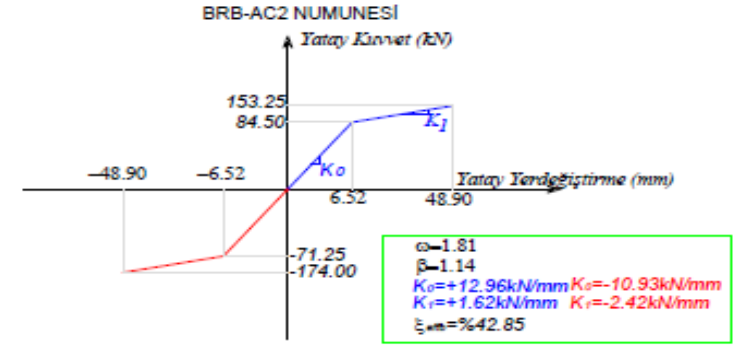
Şekil 5.39'da numunelerin davranışını gösteren önemli parametreler deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yerdegıştirme eğrileri üzerinde verilmektedir.



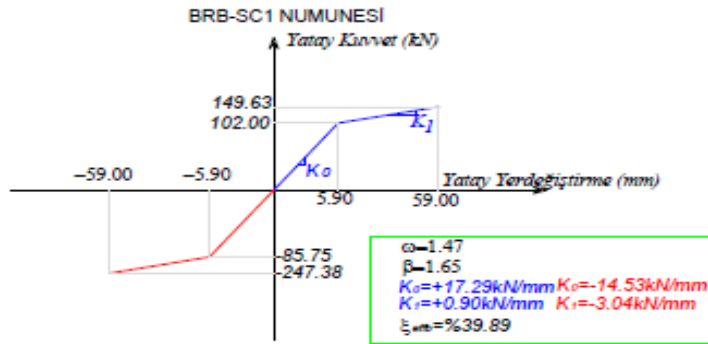
Şekil 5.38 : Tüm numunelerin etkili sönüm oranının çevrim sayısı ile değişimini gösteren karşılaştırma.



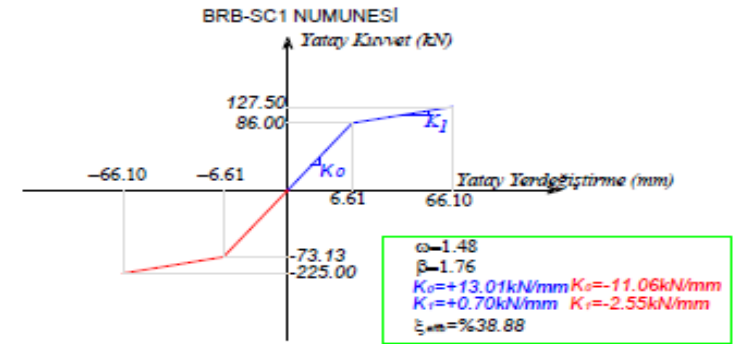
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 5.39 : Deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme eğrisi. (a)BRB-AC1 numunesi. (b) BRB-AC2 numunesi. (c) BRB-SC1 numunesi. (d) BRB-SC2 numunesi.

6. BÖÇ'LERİN YÖN DEĞİŞTİREN TEKRARLI YÜKLER ALTINDA ÜÇ BOYUTLU MODELLENMESİ

6.1. Genel

Bu bölümde, çalışmanın ana numuneleri olan çelik çekirdekli ve çelik dış tüplü BRB-SC1, BRB-SC2, alüminyum alaşımlı ve alüminyum alaşımlı dış tüplü BRB-AC1 ve BRB-AC2 numunelerine ilişkin deneysel davranışların uygun bir modelleme ile doğrulanması amaçlanmaktadır. Modelleme BÖÇ'ün tüm bileşenlerini içerdiğinden doğru davranışı veren parametreler üzerinde de durulmuştur. Histeretik davranışın elde edilmesinde sonlu elemanlar yönteminden (FEM) yararlanılmıştır.

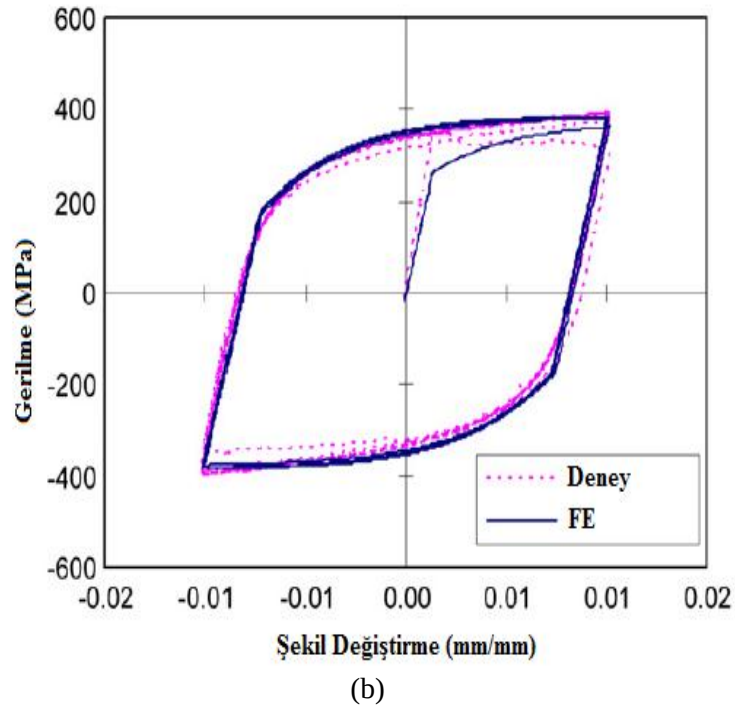
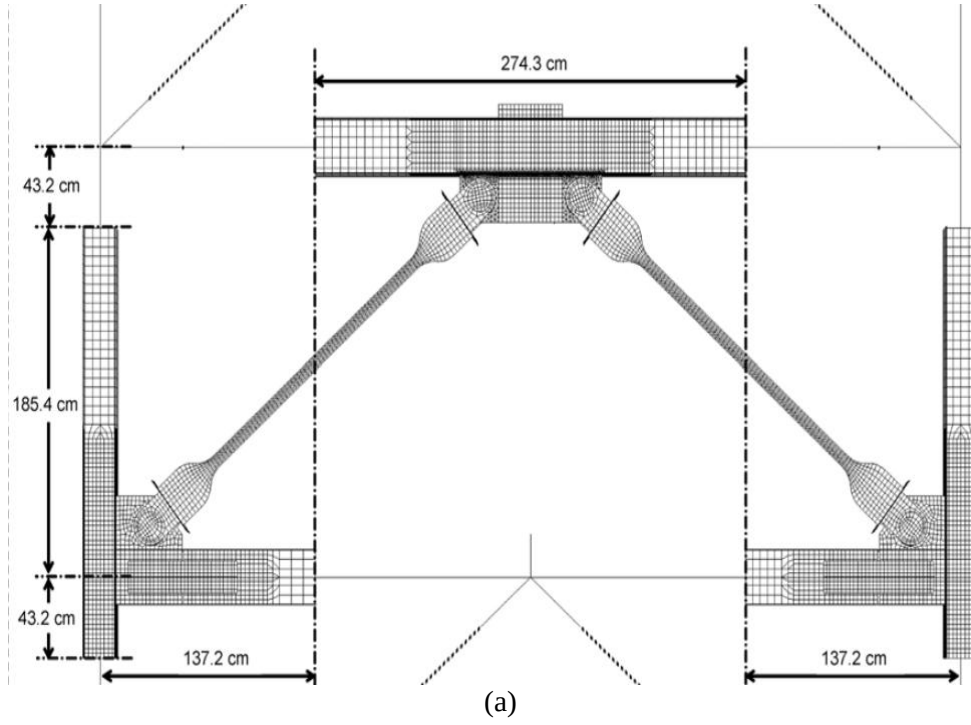
Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışlarının modellenmesinde en önemli gereklilik malzemenin nonlineerliliği, birleşimlerin histeretik moment-dönme ilişkilerinin model üzerinde tanımlanabilmesidir.

Bu kuramsal bölümde doğrusal olmayan malzeme ve geometri etkilerini etkin şekilde inceleyebilmek için ANYSY-Workbench v12.0.1 (2009) programı kullanılmıştır. Program bir çeşit tümevarım yöntemi esasına dayanır. Sonuca ulaşmak için kullanılan sonlu elemanlar yöntemi, önce sistem özelliklerini içeren bağıntıların çıkartılıp, sonrasında tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman bağıntılarıyla birleştirilerek, sisteme ilişkin lineer denklem takımının (rijitlik matrisinin) elde edilmesi ilkesine dayanmaktadır. Kuramsal yöntemlerin karmaşık yapı modellerine uygulanmasındaki zorluk ve kabul edilebilecek tolerans sınırları aralığında kalma hassasiyeti elemanların sonlu küçük parçalara ayrılması (Mesh işlemi) ile tanımlanabilir. Böylece çeşitli yükleme koşullarında güvenilir modelleme biçimi oluşturulabilir.

Literatürde yer alan BÖÇ'lerin kuramsal modellenmesi ile ilgili seçilen başlıca yayınlar aşağıda özetlenmiştir:

Wigle ve Fahnestock (2008, 2010) BÖÇ'lerin kolon-kiriş bağlantısını kuramsal olarak inceleyerek deney sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Birleşim şekli değiştirilerek BÖÇ'ün performansını etkileyen ana etkenler araştırılmıştır. Sonuçta,

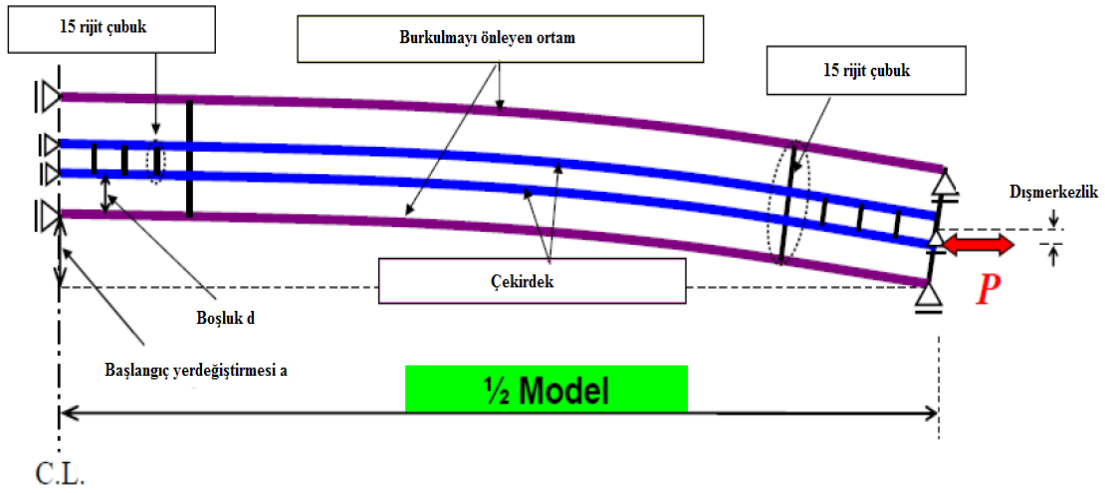
birleşim durumunun BÖÇ'ün tümsel davranışa önemli etkisinin olduğu görülmüştür. Kuramsal bölümde BÖÇ'lü test düzeneği ABAQUS v6.6 (2006) programı kullanılarak modellenmiştir. Katı modelleme ile birleşimlerdeki gerilme-şekildeğiştirme ilişkisini daha etkin elde edilebileceği belirtilmesine karşın kabuk (Shell) elamanlarla modelleme yapılmıştır. BÖÇ'lerin modellenmesinde çubuk (frame) elemanlar kullanılmış, akma bölgesinin detaylandırılması ön plana çıkartıldığından, burkulmayı önleyen ortam açık modellenmemiştir. Burkulmayı önleyen ortam özellikleri eğilme ve dönme rijitliği eşit bir kiriş elemanın çekirdek merkezine bağlanması ile tanımlanmıştır. Kaynaklı ara yüzler yapıştırılarak (merge) modellenmiştir. Bulonlu kiriş eklerinde bulon ve bulon deliklerinin modellenmemesine karşın bulonların aktardığı kuvvet tanımlanmıştır. Malzemenin lineer olmayan davranış özellikleri von Mises akma koşulu ile nonlineer izotropik ve kinematik pekleşme özellikleri dikkate alınarak modellenmiştir. Pekleşme modeli ABAQUS v.6.6 metallerin plastikleşmesi içeriğinden Lemaitre ve Chaboche modeline göre tanımlanmıştır (Lemaitre ve Chaboche, 1990). Malzeme gerilme-şekildeğiştirme özellikleri kupon deneylerinden elde edilen sonuçlara göre tanımlanmıştır. Kuramsal çalışmada BÖÇ'lerin pekleşme özellikleri deneysel histeretik davranışla düzeltilerek tanımlanmıştır. Deney sonuçlarına pekleşme açısından yeterli yakınsaklığı sağlamak için başlangıçtaki akma gerilmesi olan 262MPa yerine gerçek akma gerilmesi olarak 317MPa tanımlanmıştır. Burada mafsal ve mafsal delikleri tanımlanmadan mafsal plakalarının doğrudan bayrak plakalarına kaynaklı olduğu varsayılmıştır. Şekil 6.1a'da çalışmada kullanılan model ve Şekil1b'de BÖÇ'ün deneysel ve kuramsal inceleme sonucunda elde edilen gerilme-şekildeğiştirme histeretik eğrisi karşılaştırmalı olarak verilmektedir; yapılan modelleme ile gerçek davranışa çok yakın bir davranış elde edildiği görülmektedir.



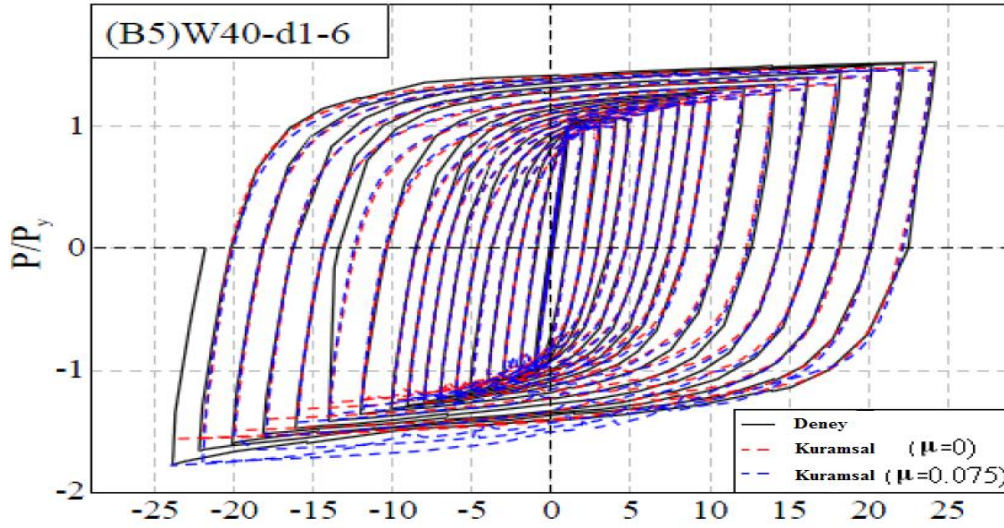
Şekil 6.1 : (a) Sonlu eleman modeli. (b) Deneysel ve kuramsal gerilme-şekildeğiştirme histeretik eğrilerinin karşılaştırılması (Wigle ve Fahnestock, 2010).

Usami ve diğ. (2009) çelik köprülerde deprem etkisine karşı yüksek performanslı sönümleyicilerin kullanılması durumunda bu performans koşullarının artırılmasına yönelik deneysel ve kuramsal çalışmalarda bulunmuşlardır. BÖÇ'lerin şiddetli depremlerde klasik sönümleyecilere göre üç kat daha etkin olduğunu belirtilmiştir. Çalışmanın kuramsal bölümünde ise ABAQUS v6.6 (2006) programında sonlu elemanlar yöntemi ile BÖÇ'lerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki davranışı

modellenmiştir. Yarım geometrik ölçülerle ve tümsel burkulması elasto-plastik olarak modellenen BÖÇ'te çekirdek ve burkulmayı önleyen ortam iki düzlem çubuk ile oluşturulmuştur (Şekil 6.2a). Çubuklar birbirlerine rijit çubuklarla bağlanmıştır. Sürtünmesiz yüzey malzemesinin rijitliği terkedilmiştir. Basınç etkinde, sürtünmesiz yüzeyin burkulmayı önleyen ortama teması ile oluşan sürtünme etkisi $0 \leq \mu \leq 0.075$ sürtünme katsayılarıyla modellemeye dikkate alınmıştır. Ayrıca, basınç dayanımının çekme dayanımından %10 daha fazla olduğu ve burkulmayı önleyen ortam ile çekirdek arasındaki boşluğun değişmediği varsayılmıştır. Yük, yerdeğiştirme doğrultusunda $e=1.8\text{mm}$ dışmerkezlik ile uygulanmıştır. Sonuçta deney sonuçlarıyla uyumlu histeretik eğriler elde edilmiştir (Şekil 6.2b).



(a)



(b)

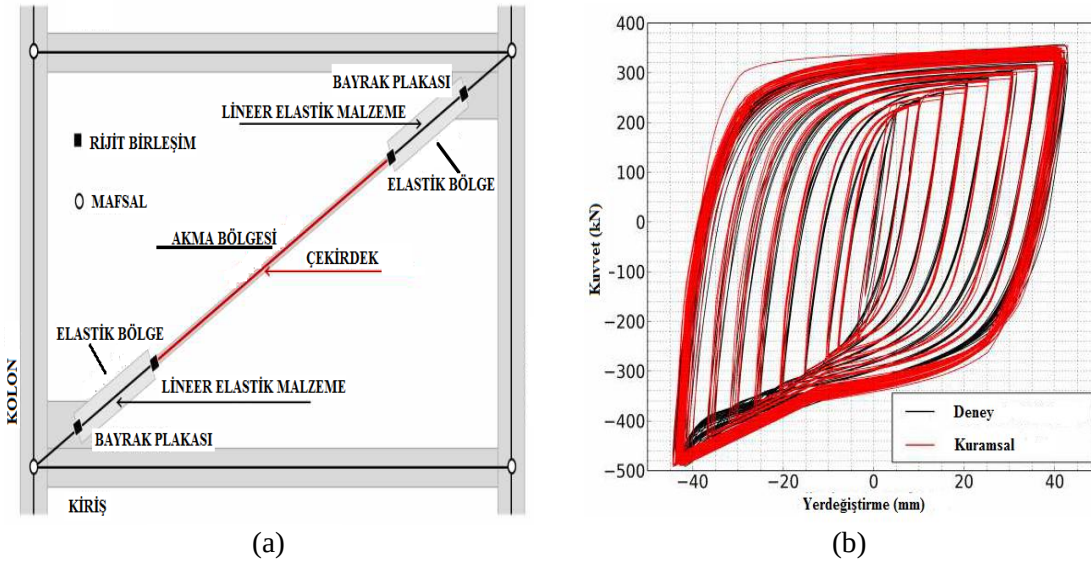
Şekil 6.2 : (a) Elasto-plastik BÖÇ modeli. (b) Deneysel ve histeretik deney sonuçlarının karşılaştırması (Usami ve diğ., 2009).

Takeuchi ve diğ. (2010) BÖÇ'lerin genel burkulmasını önlemek için çekirdek etrafındaki burkulmayı önleyen ortam kalınlığının olması gereken sınır durumları ile ilgili araştırma ve tasarım yöntemleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada ABAQUS v6.5-6 (2006) programı kullanılmıştır. Dış tüp kalınlığının değiştirilmesinin BÖÇ'ün sünekliği ve dayanımı üzerine olan etkisi deneysel ve kuramsal olarak yön değiştiren tekrarlı yükler altında incelenmiştir. Dolgu malzemesinin burkulmayı önlemeye katkısının sınırlı olduğu, çekirdeğin doğrudan dış tüple temas halinde olduğu varsayılarak model oluşturulmuş ve çekirdeğin zayıf eksen doğrultusundaki yerdeğiştirme ve dönmesi tutulmuştur. Bu doktora tezi kapsamında burkulmayı önleyen ortamın modellenmesinde bu yöntem ve yaklaşım dikkate alınmıştır.

Rahai ve diğ. (2009) BÖÇ'ler için burkulmayı önleyen ortam oluşturulmasında farklı dış tüp malzemelerinin kullanılma olanaklarını ve farklı çelik malzemesi kullanılmasının BÖÇ'ün davranışı üzerine etkisini deneysel ve kuramsal yöntemlerle araştırılmışlardır. Dolgu malzemesi olarak beton harç kullanılan ve gerçek boyutlarından 1/7 ölçeğinde küçük olan, toplam 620mm uzunluğunda 4 farklı modelde dış tüp malzemesi olarak çelik, FRP şeritler, PVC boru kullanılırken bir modelde dış tüp kullanılmadan yalnızca beton harç dolgu malzemesi kullanılarak burkulmayı önleyen ortam oluşturulmuştur. Çekirdek malzemesi akma dayanımları 240~692MPa arasında değişmektedir. Kuramsal bölümde 1/1 ölçeğinde numunelerin modellenmesinde ANSYS v6.1 (2002) programı kullanılmıştır. Çekirdek kabuk (shell) elamanlarla ve iki doğrulu kuvvet-şekildeğiştirme ilişkisine göre teğet rijitliği dikkate alınarak modellenmiştir. Çekirdek ile burkulmayı önleyen ortam arasındaki sürtünmesiz yüzey malzemesi 2.5mm boşluklu temas yüzeyi az da olsa bir sürtünme katsayısı verilerek tanımlanmıştır. Dış tüp ile dolgu malzemesi arasında oluşturulan temas yüzeyi farklı olarak yapıştırmalı (bonded) temas ile oluşturulmuştur.

Zsarnóczay (2012) BÖÇ'lerin kuramsal modellenmesi üzerine kapsamlı çalışmalarda bulunmuştur. BÖÇ'lerin tasarım yöntemi için EN 15129 ve FEMA P645'e göre artımsal dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın bir amacı da Amerika ve Japonya'da mevcut BÖÇ'lü çerçevelere ilişkin standartlara eşdeğer doğruluğu kanıtlanmış bir standart oluşturulmasıdır. Zsarnóczay ve diğ. (2011) Amerika patentli altı adet BÖÇ'ün yön değiştiren tekrarlı yükleme deneylerini gerçekleştirmişlerdir. Önceki yapılan kuramsal çalışmalarda dinamik yükleme koşulları altında Bauschinger etkisi, lineer olmayan inelastik şekildeğiştirmeye bağlı pekleşme,

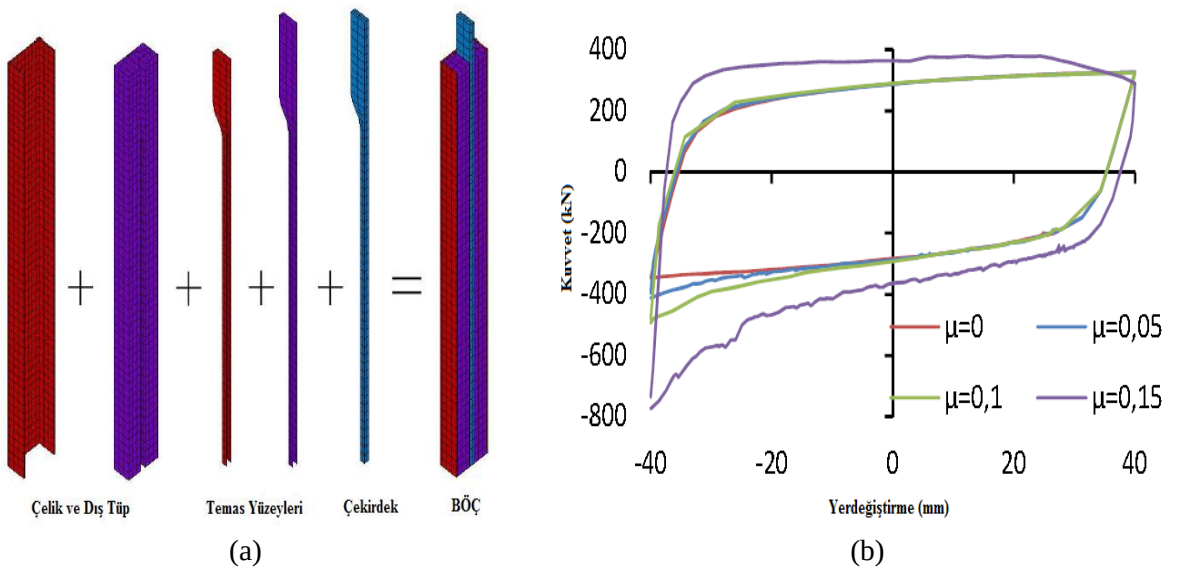
histeretik pekleşme, çekme ve basınç yüklemesi altında oluşan pekleşme asimetrikliği, monotonik yükleme eğrilerinin yeterli yaklaşımla modellenemediği bildirilmiştir. Çalışmada OPENSEES (2006) programı kullanılmıştır. Üç farklı inelastik malzemenin (nonlinear kinematik pekleşme malzeme modeli, bilineer izotropik pekleşme malzeme modeli, multilineer malzeme modeli) paralel birleştirilmesi ile BÖÇ malzeme modeli oluşturulmuştur. Diyagonal BÖÇ'ün ana çerçeveye birleşimi mafsallı olarak tanımlanmıştır. Nonlinear akma bölgesi dışında kalan bölgeler elastik ve bayrak plakasına birleşimi rijit uç birleşimli olarak modellenmiştir (Şekil 6.3a). Çalışmada elde edilen deneysel ve kuramsal sonuçların karşılaştırması Şekil 6.3b'de verilmektedir; yapılan varsayımlar altında oldukça iyi bir uyum olduğu görülmektedir.



Şekil 6.3 : (a) Basit çubuk elemanlar ve kompleks malzeme ile oluşturulan BÖÇ'ün OPENSEES modeli. (b) Deneysel ve histeretik eğrilerin karşılaştırması (Zsarnóczay, 2012).

Budaházy (2012) BÖÇ'ün modellenmesinde pekleşme, histeretik yükler altında malzemenin nonlinearliliğin tanımlanması, nonlinear burkulma, sürtünmesiz yüzey oluşturma tekniklerinin ileri modelleme teknikleri ile yapılabileceği üzerinde durmuştur. ANSYS programında, Chaboche (2008) malzeme modeli (kinematik pekleşme malzeme modeli + multilineer izotropik pekleşme modeli) ile çeliğin tekrarlı yükler altındaki davranışı katı (solid) elemanlarla modellenmiştir. Çalışmada BÖÇ'lerin akma sonrası histeretik pekleşme özelliklerinin davranışa olan etkisi de açıklanmıştır. Budaházy (2012) tarafından PRESCOM olarak adlandırılan ve Chaboche multilineer izotropik pekleşme malzeme modeli ile birleştirilen malzeme

modeliyle çelik malzemenin Bauschinger etkisi modellenenmektedir. Monotonik davranış ve histeretik davranışın tanımlanmasından başka, programda bu iki davranış arasındaki süreksizlikleri düzenleyen bir geçiş fonksiyonu da eklenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile modellenen BÖÇ’lerde kuadratik mesh işlemi uygulanmıştır. Analiz süresini azaltmayı ve çözüme yakınsamayı geliştirmek için $\frac{1}{2}$ model üzerinde çalışılmıştır (Şekil 6.4a). Çekirdek mesh işleminde 10mm~40mm, dolgu malzemesinde 20mm~40mm ve dış tüpte 25mm eleman boyutu kullanılmıştır. Çalışmada kabul edilenin aksine eleman boyutunun büyük tutulmasının davranış üzerinde etkisi olmadığı bildirilmiştir. Ancak, yakınsama problemi bakımından mesh eleman boyutunun büyük olması fayda sağlasa da özellikle BÖÇ’lerde akmanın geliştiği akma bölgesinde mesh’in artırılması davranışın net şekilde elde edilmesinde önemlidir. Deneysel çalışmalarda altı numune β basınç dayanım düzeltme katsayısı 1.15~1.38 arasında değişim göstermiş, kuramsal çalışmada bu değişim tanımlanmıştır (Zsarnóczay ve Dunai, 2011). Sürtünme katsayısı μ için 0~0.15 arasında değişik değerler tanımlanarak deneysel davranışa yakınsayan iyileştirmeler araştırılmıştır (Şekil 6.4b). Akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte oluşan artık gerilmeler basınç etkisinde akma bölgesi uçlarında kesit daralmasına sebep olurken, aynı zamanda kesit daralması bu noktalarda hava boşluğunu da azaltmakta ve sürtünmenin etkisiyle basınç dayanımını arttırmaktadır. Deney sonrası yapılan kesit açılımlarında bütün çekirdek kopmalarının bu geçiş noktasından olduğu görülmüştür.



Şekil 6.4 : (a) BÖÇ modeli. (b) Sürtünme katsayısı değişiminin etkisi (Budaházy, 2012).

Bu doktora tezi kapsamında üretilen BÖÇ'lerin kuramsal modellenmesinde yukarıdaki çalışmalarda yer alan yöntem ve yaklaşımlar dikkate alınmıştır.

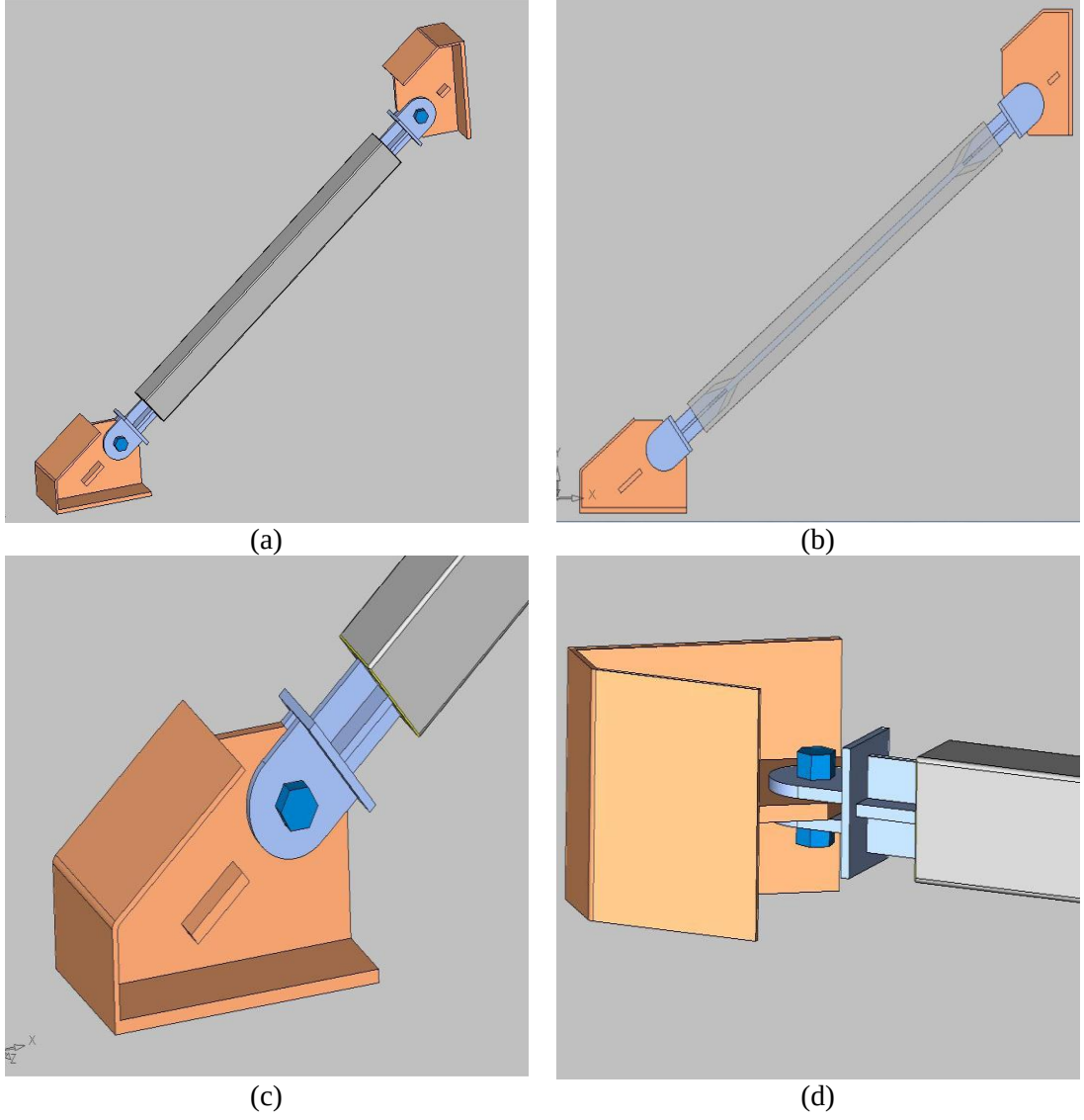
6.2. Parametreler ve Modelleme İçin Yapılan Varsayımlar

6.2.1. ANSYS-Workbench model formu

ANSYS-Workbench çok parçalı birleşimleri katı (solid) elemanlarla, kabuk (shell) elemanlarla ya da shell-solid elemanlarla modellenmesine izin vermektedir. Kuramsal bölümde BÖÇ'lerin ilgili deney düzeneği ile birlikte modellenmesi problemi ANSYS-Workbench v12.0.1 (2009) programında tanımlanırken, öncelikle denenen 4 BÖÇ'ün deneysel ortam koşulları ile bire bir uyumlu katı modelleri CimatronE v10 (2012) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Sistemin model*iges uzantılı dosyası ANSYS-Workbench programına aktarılmıştır.

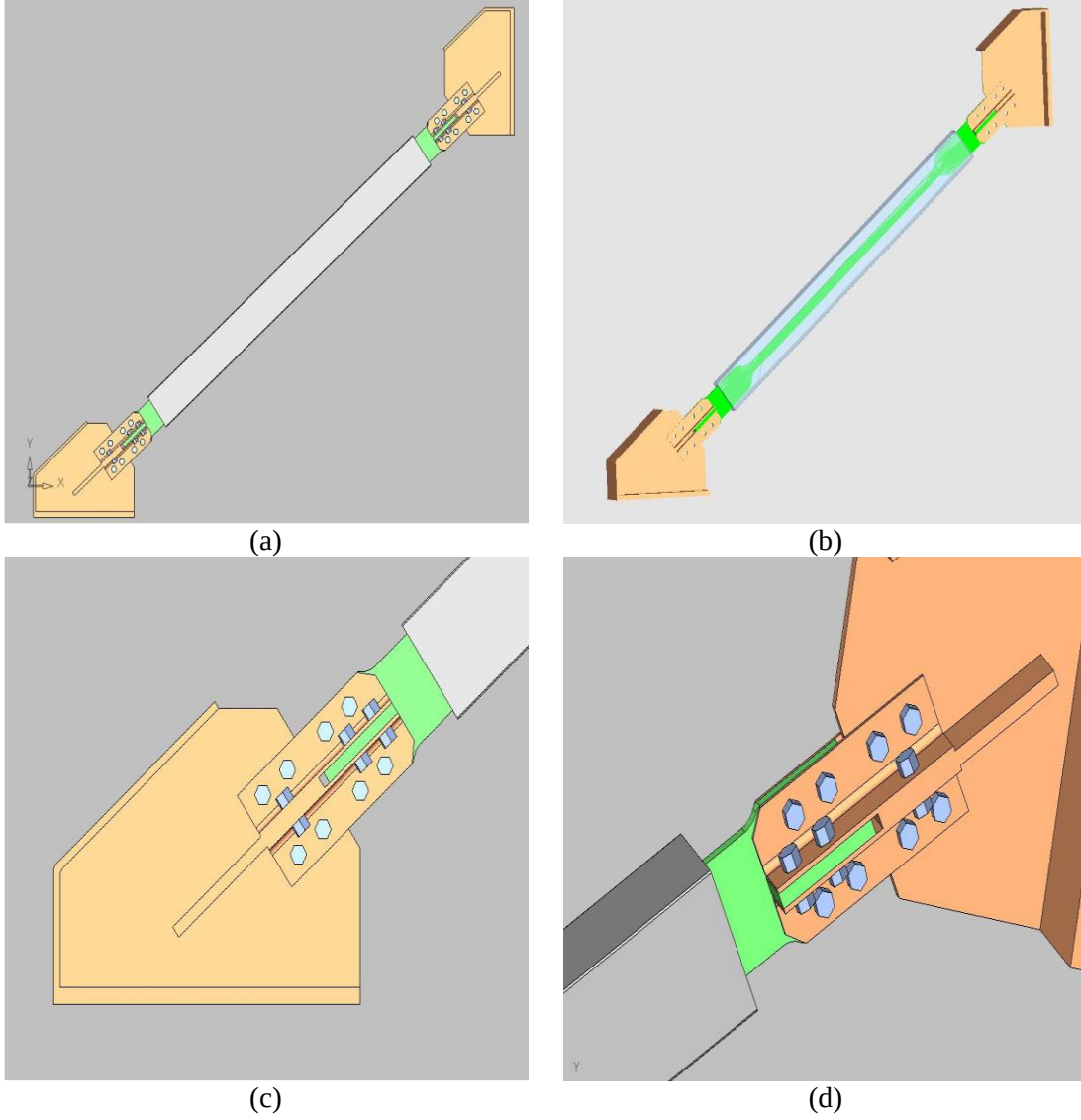
Üç boyutlu makine kalıp tasarım programı olan CimatronE v10 ile BÖÇ'lerin iç ve dış boşlukları, sürtünmesiz yüzey durumları, dış tüp ve dolgu malzemesi ilişkisi, çekirdek ve burkulmayı önleyen ortam ilişkisi, kaynaklı birleşimler, birleşim bölgesi-bayrak plakası bulonlu birleşimi, bulon delikleri, bulonların gerçek durumu ile aynı şekilde üç boyutlu katı modelleri oluşturulmuş, ANYSY-Workbench programına aktarılmıştır.

Şekil 6.5'de BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri için oluşturulan ve ANSYS-Workbench programına aktarılan katı modelin genel görünüşü (Şekil 6.5a,b), alt ve üst uç görünüşleri (Şekil 6.5c,d) verilmektedir.



Şekil 6.5 : BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri: (a) Katı modelin genel görünüşü. (b) Çekirdeğin görünüşü. (c) Alt uç genel görünüşü. (d) Üst uç önden görünüşü.

Şekil 6.6’da ise BRB-AC2 numunesi için oluşturulan ve ANSYS-Workbench programına aktarılan katı modelin genel görünüşü (Şekil 6.6a,b), alt ve üst uç görünüşleri (Şekil 6.6c,d) verilmektedir; bütün modellerde gerçeğe yakın sonuçlara ulaşabilmek için olabildiğince BÖÇ tasarımına göre tüm bileşenler dikkate alınmıştır.



Şekil 6.6 : BRB-AC2 numunesi: (a) Katı modelin genel görünüşü. (b) Çekirdeğin görünüşü. (c) Alt uç genel görünüşü. (d) Üst uç önden görünüşü.

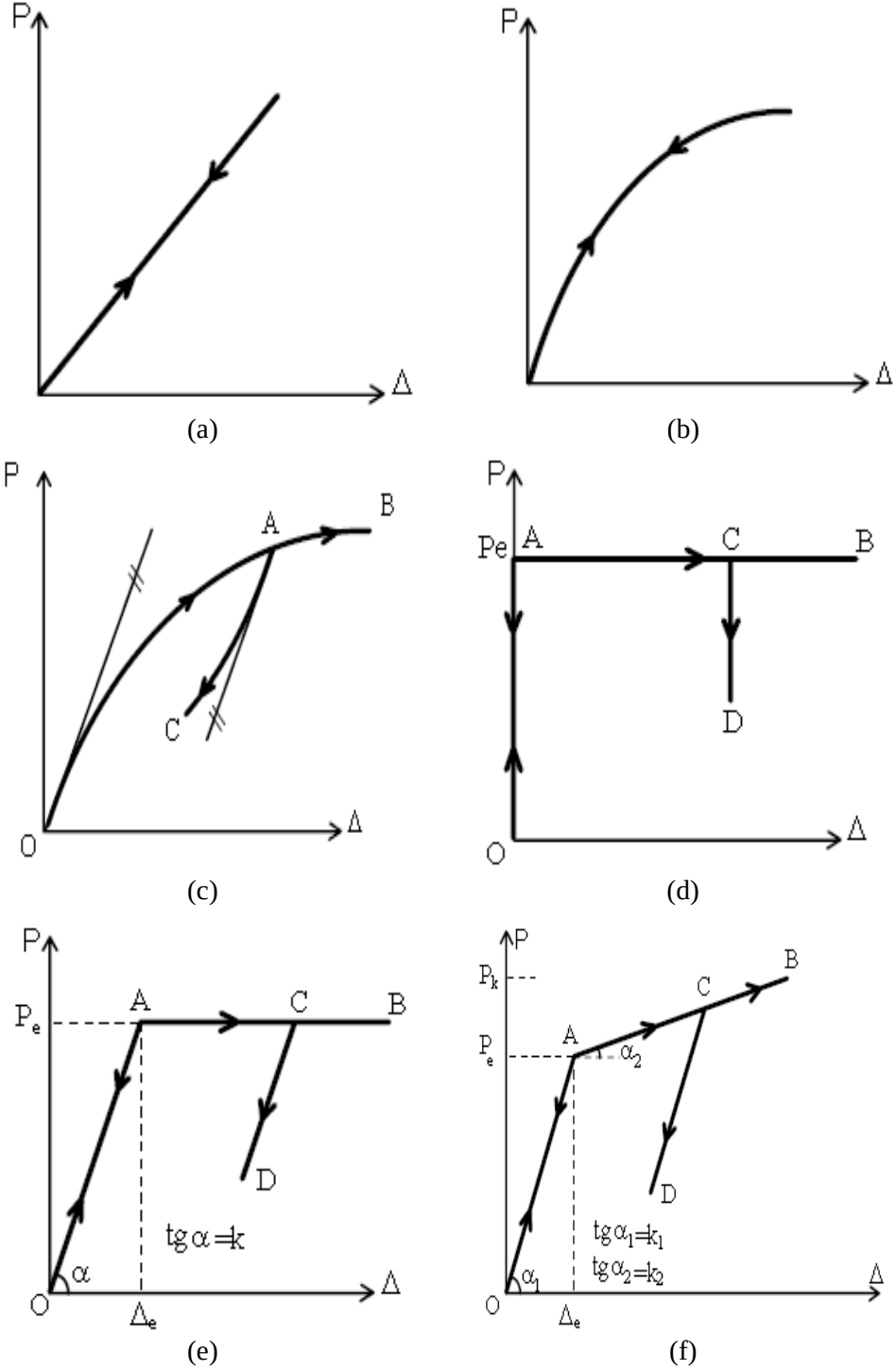
Histeretik davranışa esas olan elemanların olabildiğince hassas bir biçimde modellenmesi kuramsal çalışmada BÖÇ davranışının net bir şekilde elde edilmesi bakımından önemlidir. Bu nedenle, bu çalışmada da olabildiğince çekirdek akma bölgesinin inelastik akma yerdeğiştirmesi davranışını çekme ve basınçta benzer/yakın ve deney sonuçlarıyla uyum içinde olmasını sağlayacak elemanların modellenmesi öne plana çıkartılmış, gereksiz kontak sayısı azaltılarak analiz süresinin problemin yakınsadığı en son noktaya kadar sürdürülmesi için modellemeye basitleştirmelere gidilmiştir. Örneğin, çekirdek alın plakası ve mafsallı plakaları kaynaklı birleşimleri CimatronE v10’da birleştirilerek (merge) tek parça şeklinde olduğu varsayılmıştır. Benzer biçimde, bayrak plakası, kenar ve gövde rijitlik plakaları ile bulon ve somunun da bir bütün olduğu düşünülmüştür. Kaynak

bölgeleri sonlu elemanlar modelinde gösterilmemiştir. Böylece tek bir parça şeklinde modellenerek temas sayısı azaltılmıştır.

6.2.2. Malzeme modeli

Deneyssel çalışmalarda yükleme ve boşaltma eğrilerinin izledikleri yola göre kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin kuramsal yolla tanımlanabilmesi için bazı varsayımlar ve ideal malzemeler tanımlanmıştır.

- Lineer-elastik malzeme modeli: Yükleme ve boşaltma eğrileri aynı doğru üzerinde olup malzeme elastiktir. Kuvvet-yerdeğiştirme eğrisi lineerdir. Bu nedenle lineer-elastik malzeme modeli olarak adlandırılır (Şekil 6.7a).
- Lineer olmayan elastik malzeme modeli: Yükleme ve boşaltma eğrileri aynı doğru üzerinde olup malzemenin kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi nonlineerdir (Şekil 6.7b).
- Elasto-plastik (elastik-plastik) malzeme modeli: Yükleme ve boşaltma eğrileri çakışmayan, ancak boşaltma eğrinin başlangıç rijitliği yükleme eğrisine paralel olan malzeme modelidir (Şekil 6.7c).
- Rijit inelastik/plastik malzeme modeli: Elastik şekildeğiştirmelerin olmadığı malzemede boşaltma eğrisi yükün P_e değerini aşmadığı durumda yükleme eğrisi ile aynı olup aşılması durumunda OA doğrusuna paralel bir yol izlemektedir (Şekil 6.7d).
- İdeal elasto-plastik malzeme modeli: Yükleme eğrisinin iki doğru parçasından meydana geldiği varsayılmaktadır. Doğru elastik P_e kuvvet değerine ulaştıktan sonra yerdeğiştirme eksenine paralel devam eder. Boşaltma eğrisi elastik yerdeğiştirme Δ_e sınırına kadar yükleme eğrisi ile aynı yolu izler. Bu değeri aştıktan sonra OA doğrusuna paralel bir yol izler (Şekil 6.7e).
- Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme modeli: İdeal elasto plastik malzeme modeline göre kuvvetin P_e değerini aştıktan sonra pekleşme ile arttığı hesap modelidir (Şekil 6.7f).



Şekil 6.7 : (a) Lineer elastik malzeme modeli. (b) Lineer olmayan elastik malzeme modeli. (c) Elasto-plastik malzeme modeli. (d) Rijit inelastik/plastik malzeme modeli. (e) İdeal elasto-plastik malzeme modeli. (f) Pekleşen ideal elasto-plastik malzeme modeli.

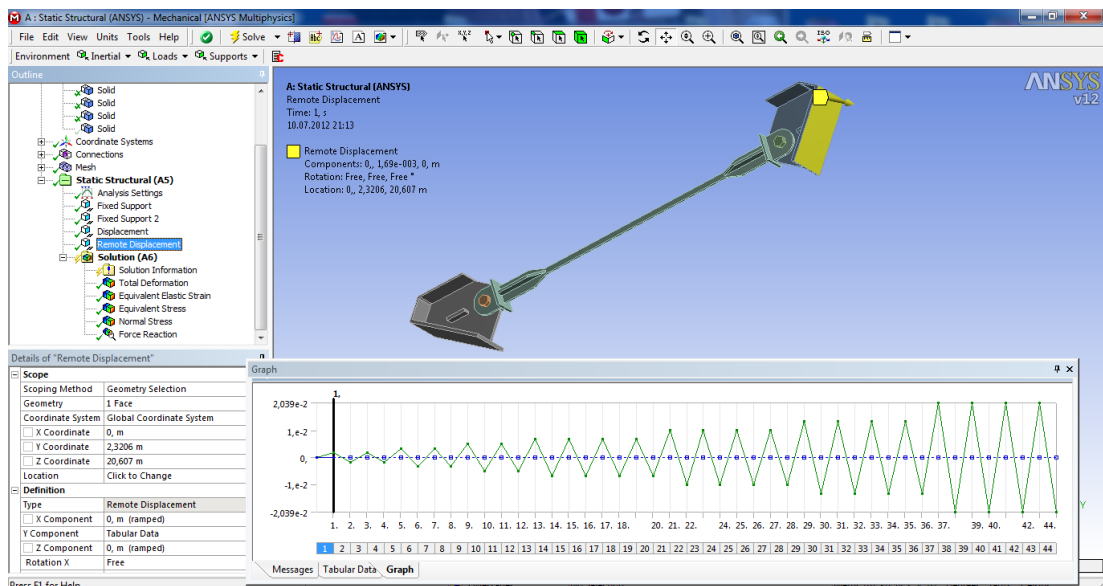
Kuramsal çalışmalarda lineer olmayan malzeme davranışının dikkate alınmasının elde edilecek sonuçların doğru ve deney sonuçlarına yakınsaklığı üzerine etkisi büyüktür. Bu çalışmada malzeme özellikleri kupon deneyleri sonuçlarına ve von Mises (Sabit şekildeğiştirme durumu) akma koşulu kullanılarak tanımlanmıştır.

Böylece çelik ve alüminyum alaşımlı malzeme karakteristiklerinin davranış üzerine olan etkisi ve enerji yutma kapasiteleri kuramsal olarak da incelenmiştir. Malzeme özellikleri Pascal cinsinden girilmektedir.

6.2.3. Uç sınır şartları (Serbestlik Dereceleri) ve yükleme biçimi

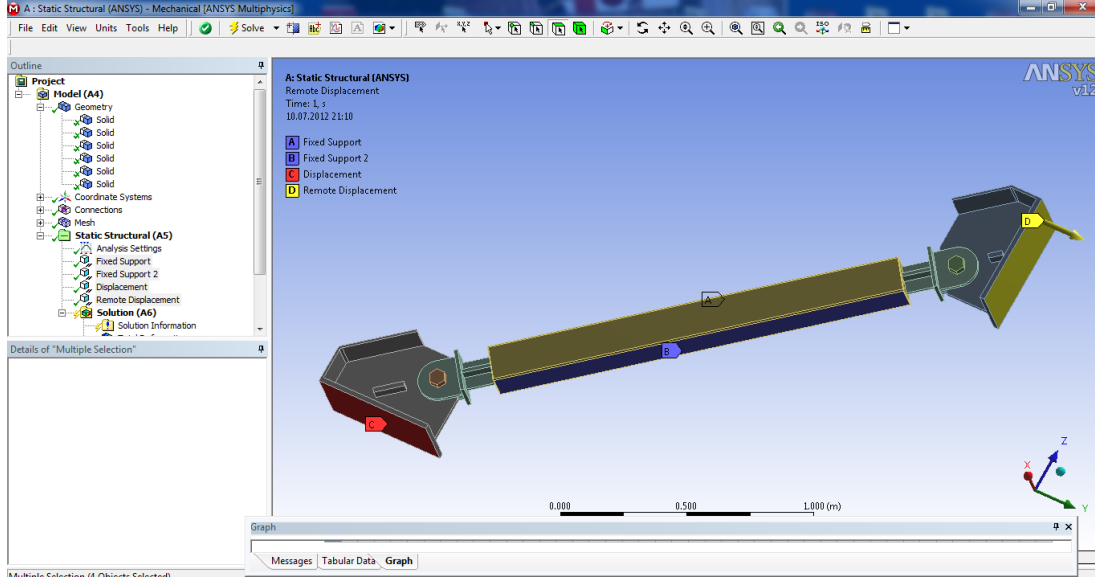
Modellemede, deneysel çalışmayla benzer şekilde, akmadan önce ve akmadan sonra yerdeğiştirme kontrollü çevrimler uygulanmıştır. Numunelere uygulanan yükleme protokolü Bölüm 4'te Şekil 4.1'de verilmiş olup numunelerin eksenel boy değişimleri ile ilişkili olan tepe yatay yerdeğiştirmesinin kontrol parametresi olarak alındığı bu bölümde açıklanmıştır. Tepe noktasında verilen yerdeğiştirme doğrultusunun oluşturduğu düzlem dışında yatayda yerdeğiştirmeye izin verilmemiştir. Bir başka deyişle, kolonun düzlem dışı hareketlere karşı, yüksekliği boyunca desteklendiği, destek noktalarında ise kayıcı elemanlar kullanıldığından olası yük aktarımının da engellendiği düşünülmüştür; gerçekte deneyler sırasında kullanılan çelik payandalarının ve temas noktalarının amacı da budur.

Bölüm 4'de açıklandığı üzere deney düzeneğinin numunelerin tümsel histeretik davranışına yatay yük ve rijitlik olarak bir katkısı bulunmamaktadır. Deney numuneleri deney düzeneğine actuator ile herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirilmiştir. Modellemede yerdeğiştirme pikleri deney düzeneği temel kirişi üst kotu ile actuator arasındaki 1860mm uzunluğa gelen merkez noktaya noktasal olarak uygulandığı varsayılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8 : Yerdeğiştirme oluşturan yükleme doğrultusu ve yerdeğiştirme pikleri.

Bayrak plakalarının alt uçtaki yerdeğiştirmeleri tutulurken, dönmeye karşı serbest bırakılmıştır. Üst uça çaprazın aksenal akmasına izin veren yerdeğiştirme serbest bırakılmış, diğerk doğrultulardaki yerdeğiştirmeler tutulmuş ve dönmelere izin verilmiştir; deneyler sırasında gözlenen davranışlar bu varsayımları doğrulamıştır. Burkulmayı önleyen ortam alt ve üst yüzeylerinden yerdeğiştirme ve dönmelere karşı tutulmuştur (Takeuchi ve diğ., 2010) (Şekil 6.9).

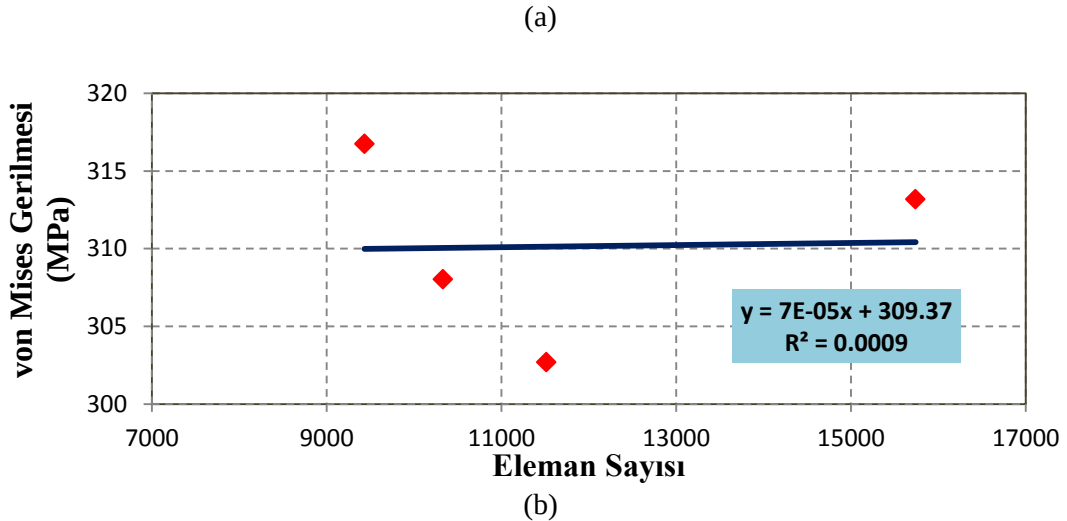
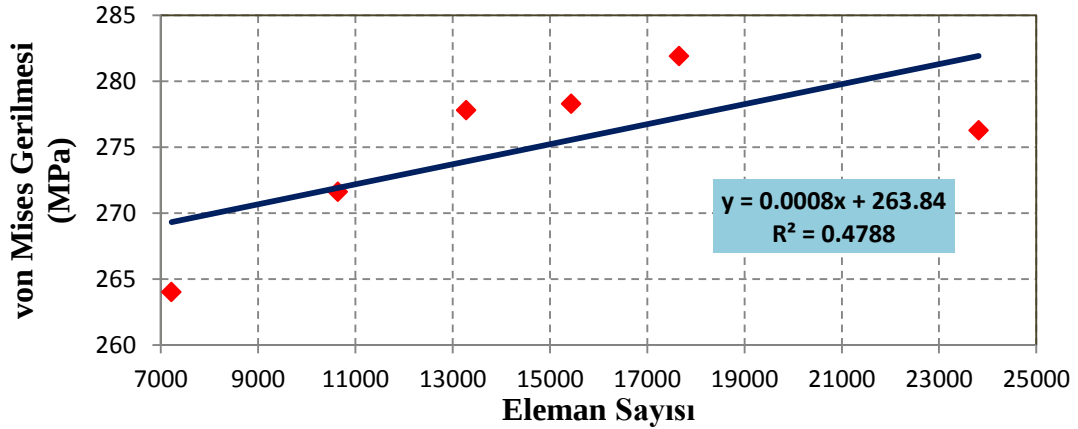


Şekil 6.9 : Tanımlanan uç mesnet ve burkulmayı önleyen ortam sınır şartları.

6.2.4. Sonlu elemanlara bölme işlemi (MESH işlemi)

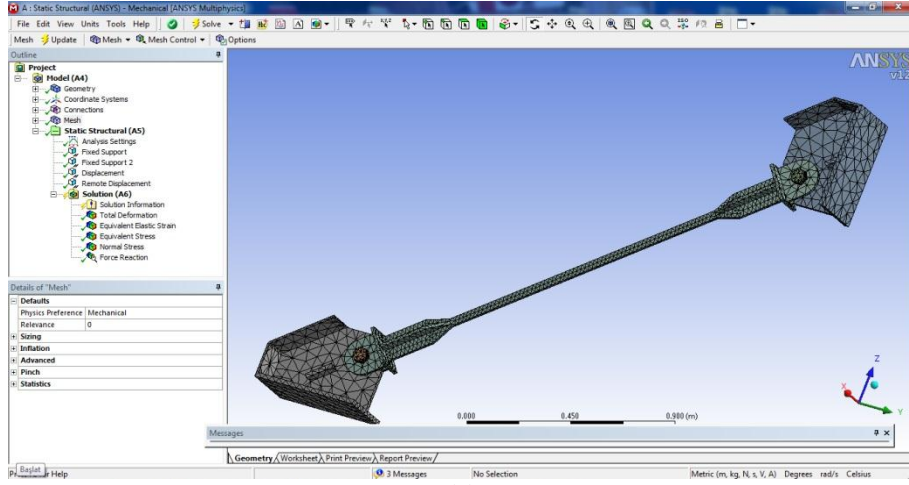
Çalışmada mesh işlemi yapılırken gerilmenin yoğun olduğu yerlerde eleman sayısı orantılı olarak arttırılmıştır. Bunun nedeni, mesh işlemindeki düğüm sayısı ne kadar çok olursa, elemanlar da o kadar düzenli olmakta ve eleman içindeki gerilmeler, yerdeğiştirmeleri tanımlamanın doğruluğuda o kadar fazla olmaktadır. Mesh işleminde eleman boyutu ayarı da çok önemlidir; eleman boyutu bir elemanın bir kenarının alabileceği maksimum değerdir. Bu boyutun küçük seçilmesi durumunda daha fazla sonlu elemana bölünmesi modelin çözümündeki hassasiyeti arttırırken çözüme yakınsamayı uzatır ya da bilgisayar işlem kapasitesi aşılabılır. Bu çalışmada histeretik davranışın beklendiği çekirdek akma bölgesinde mesh sayısı arttırılmış ve böylece gerilme sonuçlarının belirli bir noktaya yakınsadığı gözlenmiştir. Çekirdek akma bölgesindeki gerilme ve şekildeğiştirmelerin dağılımlarının daha hassas bir biçimde incelenmesi sağlanmıştır. Kritik bölgedeki (çekirdek akma bölgesi) gerilme dağılımının mesh (eleman) sayısına bağlı değişimi araştırılmıştır. Gerilme

aralıklarının değişimlerine bakılarak en optimum sayı eleman sayısı olarak alınmıştır. Şekil 6.10a'da BRB-AC1 numunesinde akma gerilmelerinin eleman sayısına bağlı değişimi verilmektedir. Özellikle malzeme nonlinearliği dikkate alındığında akma üst limiti olarak deneyde elde edilen ilk akma değerinin üzerindeki von Mises gerilme değerlerine yakınsama çalışması yapılmıştır. Burada alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde optimum eleman sayısının 15440~23814 arasında değiştiği görülmektedir. Analizlerde bilgisayar kapasitesi de gözetilerek eleman sayısı BRB-AC1 için 15440, BRB-AC2 için 23814 olarak alınmıştır. Bu farklılık BRB-AC2 numunesindeki bulon sayısı ve bulon deliklerindeki kontak elemanlarının fazlalığından kaynaklanmaktadır. Şekil 6.10b'de BRB-SC1'in optimum eleman sayısının 9432~15739 arasında değiştiği görülmektedir. Eleman sayısı BRB-SC1 için 10330, BRB-SC2 için 14608 alınmıştır.

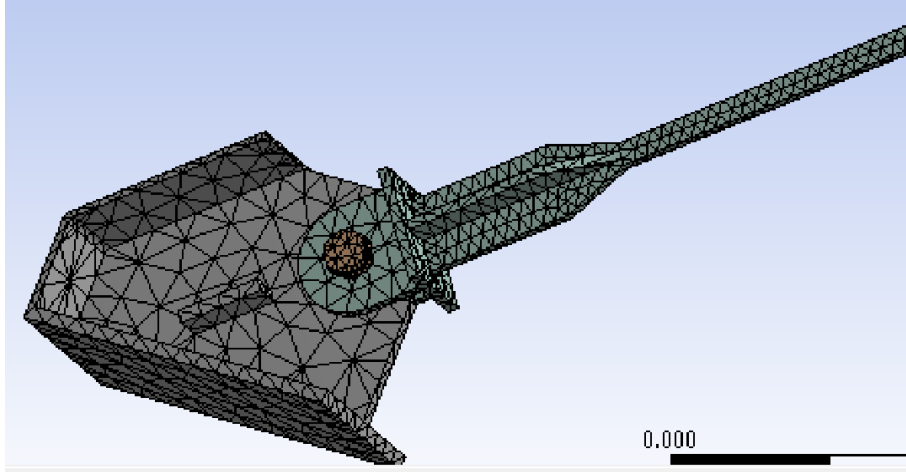


Şekil 6.10: (a) BRB-AC1 numunesi deney akma gerilmesini verecek optimum eleman Sayısı. (b) BRB-SC1 numunesi deney akma gerilmesini verecek optimum eleman sayısı.

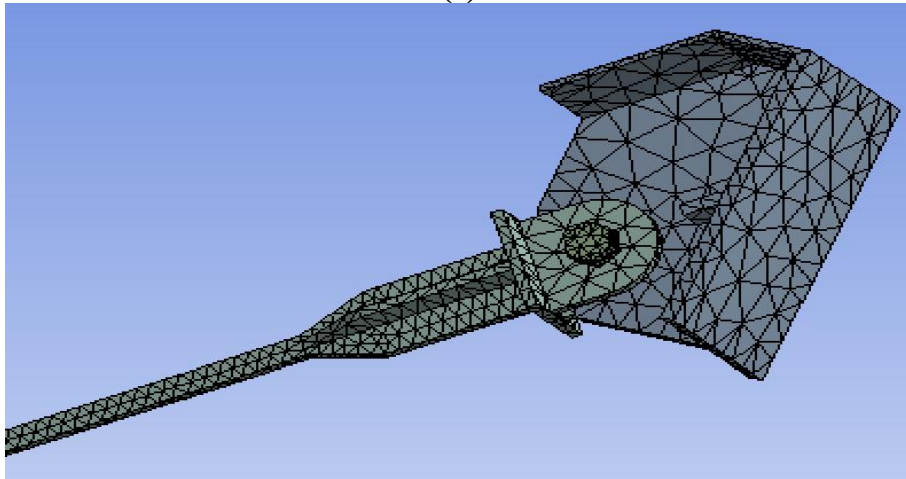
BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numunelerinin kuramsal modellerine ilişkin genel sonlu eleman dağılımı ve tetra-hedral hassas eleman ağı kullanılan bölgelerdeki mesh işlemi Şekil 6.11’de verilmiştir.



(a)



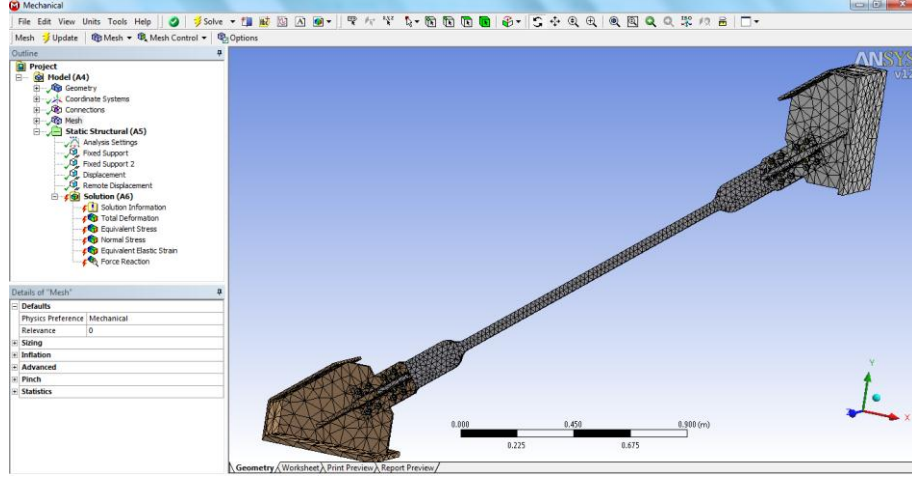
(b)



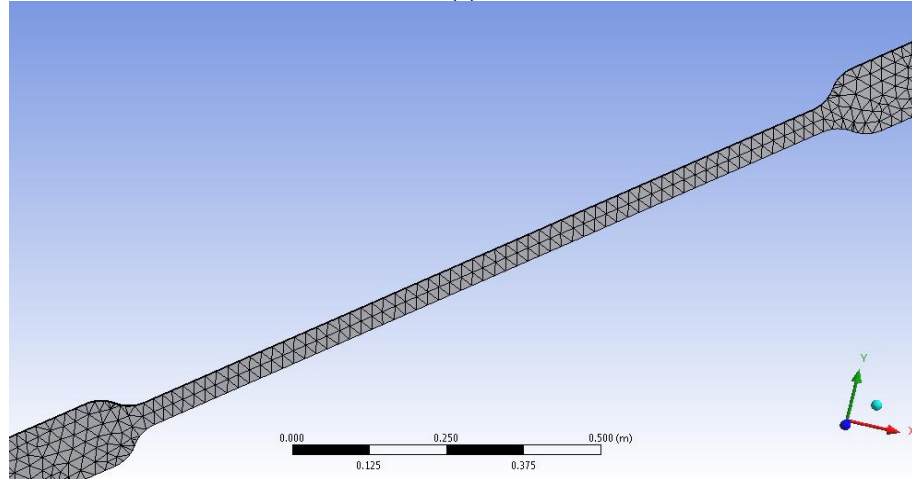
(c)

Şekil 6.11 : BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri (a) Hassas ağırlara bölünmüş genel görünüşü. (b) Alt uç mesh işlemi yakın görünüşü. (c) Üst uç mesh işlemi yakın görünüşü.

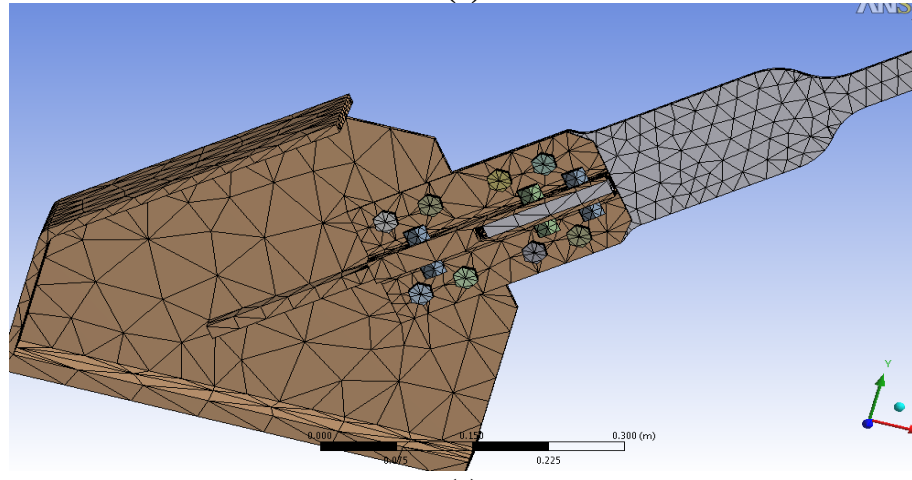
BRB-AC2 numunesinin kuramsal modellemelerine ilişkin genel sonlu eleman dağılımı ve Tetra-hedral hassas eleman ağı kullanılan bölgelerdeki mesh işlemi Şekil 6.12’de verilmektedir.



(a)

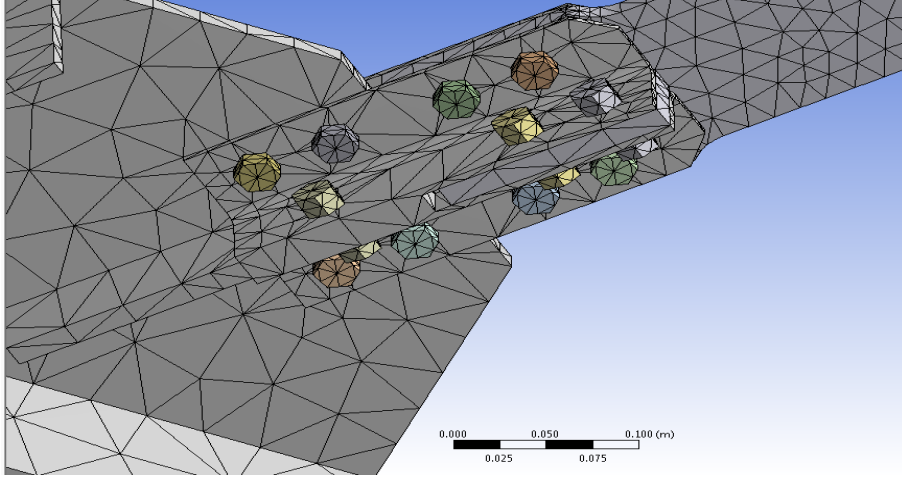


(b)

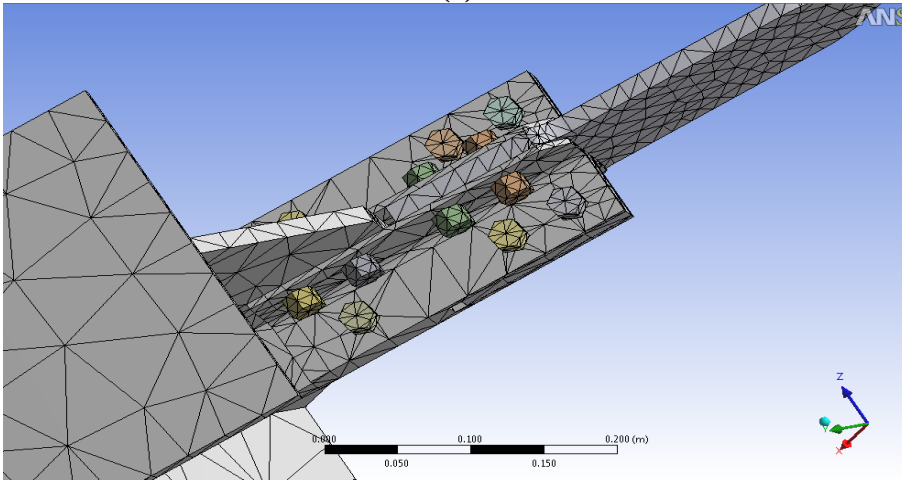


(c)

Şekil 6.12 : BRB-AC2 numunesi (a) Hassas ağırlara bölünmüş genel görünüşü. (b) Akma bölgesi mesh işlemi yakın görünüşü. (c) Alt uç mesh işlemi genel görünüşü.



(d)



(e)

Şekil 6.12 (devam) : (d) Alt uç mesh işlemi yakın görünüş. (e) Alt uç üstten yakın görünüş.

6.2.5. Temas yüzeyleri

Temas yüzeyleri malzeme ara yüzyelerindeki ilişkiyi tanımlamak amacıyla kullanılmakta ve sonlu eleman ağı (mesh) düğüm noktalarını birbirine bağlayarak yük aktarımını sağlamaktadırlar. Bu çalışmada temas elemanları kullanılarak oluşturulan temas yüzeyleri şu şekildedir (Rahai ve diğ., 2009):

- Çekirdek ile burkulmayı önleyen ortam arasına nonlineer sürtünmeli (frictional) temas tanımlanmıştır. Sürtünme katsayısı olarak ara yüzey elemanı olan TEFLON bantların dinamik sürtünme katsayısı esas alınarak, ortalama $\mu=0.02\sim0.04$ değerleri tanımlanmış, yapılan kapsamlı bir araştırma ile optimum değerler alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde 0.04, çelik BÖÇ'lerde 0.03 olduğu görülmüştür. Sürtünmesiz yüzey malzemesinin olduğu yüzey

boyunca tanımlanan sürtünmeli temas rijitliğinin her bir iterasyonda yükleme protokolüne uygun olarak program kontrollü olarak değişimi sağlanmıştır.

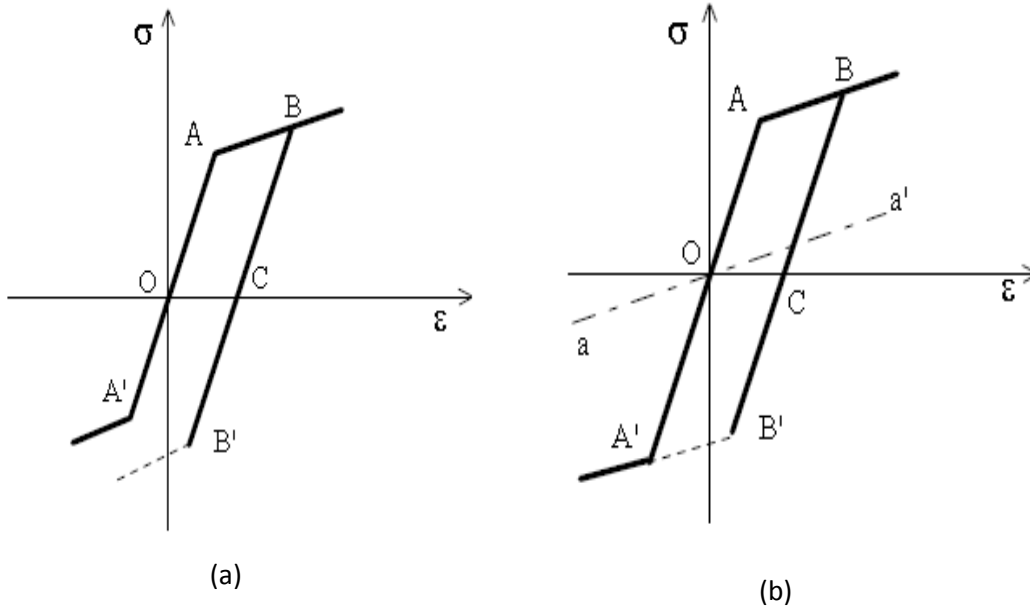
- Yük aktarımının sürekli olduğu varsayılarak bulon ve bulon delikleri arasına bonded contact tanımlanmıştır.
- Dış tüp ile dolgu malzemesi arasına da aderanslı temas (bonded contact) tanımlanmıştır. Dış tüp ile dolgu malzemesinin serbestlik dereceleri aynı olduğundan sürtünme katsayı tanımlanmasına gerek olmadığı düşünülmüştür.

6.2.6. İnelastik bölgenin tanımlanması

Monotonik bir yüklemede, yükleme sürekli olup yük boşaltılamamaktadır. Yön değiştiren tekrarlı yükler altında yükleme ve boşaltma ardışık olarak gerçekleştirilmektedir. Tekrarlı yön değiştiren yüklemeler altında kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisinin tanımlandığı malzeme modellerinden en çok kullanılanları izotropik pekleşme malzeme modeli ve kinematik pekleşme malzeme modelidir (Şekil 6.13a,b).

İzotropik pekleşmede tekrarlı yön değiştiren yüklemeler altında çekme ve basınç akma gerilmelerinin aynı olduğu varsayılmıştır. İzotropik pekleşme malzeme modelinde tekrarlı yüklemeler altında Baushinger etkisi (Malzeme kristal yapısı ve kusurları) terkedilmektedir.

Kinematik pekleşme modelinde elastik aralığın değişmediği varsayıldığından kinematik pekleşme kuralı olan Baushinger etkisi dikkate alınmaktadır. Monotonik yüklemeden farklı olarak histeretik yüklemelerde malzemenin kristal yapısındaki kaymalar arttığından, Baushinger etkisi erken gelişmekte ve akma platosu giderek artan bir hızla gözden kaybolmaktadır (Youngjiu ve diğ., 2011).



Şekil 6.13: (a) İzotropik pekleşmeyi gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi.
(b) Kinematik pekleşmeyi gösteren malzemenin σ - ϵ ilişkisi.

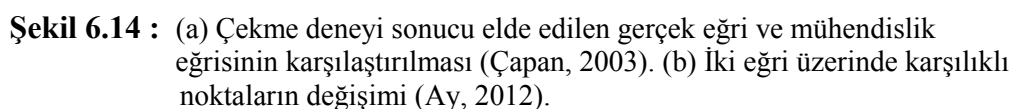
ANSYS-Workbench'te kupon deneylerinden elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılmıştır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ numuneleri BRB-AC1 ve BRB-AC2'de iki doğrulu kuvvet yerdeğiştirme ilişkisi kullanılarak kupon deneylerinden elde edilen akma gerilmesi ve akma sonrası teğet rijitliği inelastik bölgenin eğri ile tanımlanması ile modellemeye eklenmiştir (*Bilinear Isotropic Hardening Malzeme Modeli*). Bunun nedeni alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde pekleşmenin fazla olmamasından dolayı başlangıç rijitliği ve akma sonrası teğet rijitliği kullanılarak tanımlanabilmesinin yeterli olduğunun görülmesidir.

BRB-SC1, BRB-SC2 çelik BÖÇ numunelerinde pekleşme görel olarak daha fazla olduğundan kupon deney sonuçları ve pushover deney sonuçlarına bağlı olarak elde edilen “çok doğrulu izotropik pekleşme malzeme modeli” kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar “çok doğrulu kinematik pekleşme malzeme modeli” ile karşılaştırılmış izotropik pekleşme malzeme modelinin deney sonuçları ile daha uyumlu olduğu görülmüştür.

6.3. Metallerde pekleşme ve pekleşme üsteli kavramı ile sonuca yakınsama

Soğuk şekil verme, kristalli bir malzeme olan çelikte, kopma olmadan büyük inelastik şekildeğiştirmeler meydana gelmesidir (Malzeme lifleri uzar ve dislokasyon artar). Soğuk işlemler malzemelerin pekleşmesine ve gevrekleşmesine yol açarlar. Soğuk şekil vermenin temelinde pekleşmenin meydana gelmesi yatmaktadır.

Sanayide pekleşme üsteli, metal ve alaşımların şekillendirilme kuvvetinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylece gerekli motor kapasitesi elde edilmekte ve buna uygun makine seçimi yapılmaktadır. Pekleşme inelastik bölgede homojen şekildeğıştirmelerin olduğu noktada oluşmaktadır. Gerçek eğri, kupon deneylerinden elde edilen mühendislik eğrisinden faydalanılarak çıkartılır ve pekleşme katsayısının (pekleşme üsteli) bulunması için gereklidir. Bu katsayı, malzemenin pekleşmesiyle ilgili bir malzeme özelliğidir ve inelastik şekildeğıştirme sırasındaki pekleşme kapasitesini gösterir. Gerçek eğri, mühendislik eğrisi gibi bir maksimumdan geçmemektedir. Her seviyede oluşan birim şekildeğıştirmelerin toplanabilir durumu ile ifade edilmektedir. Mühendislik eğrisi malzemenin başlangıç kesit özellikleri dikkate alınarak hesaplanırken, gerçek eğri gerçek kesit ve gerçek şekildeğıştirme özelliklerini dikkate almaktadır (Şekil 6.14a) (Çapan, 2003). Şekil 6.14b’de mühendislik eğrinde akma gerilmesi ve maksimum gerilme arasındaki değerlerin gerçek eğri üzerinde karşılık geldiği noktalar verilmiştir (Ay, 2012).

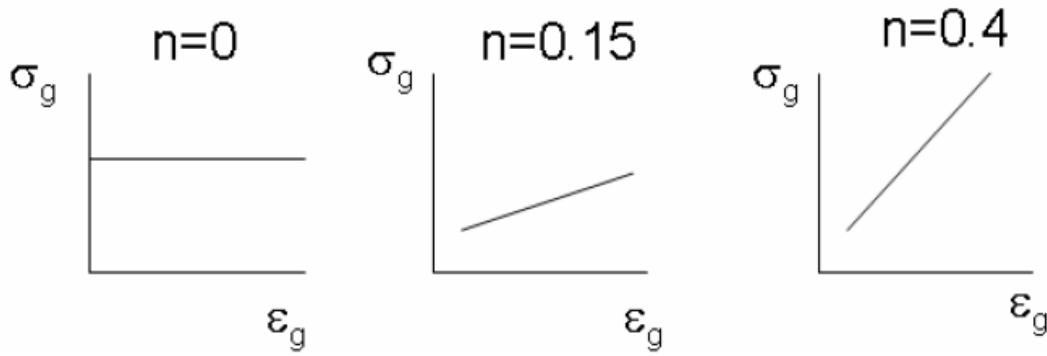


Herhangi bir metal malzemenin gerçek gerilme ve şekildeğiştirme eğrisinde pekleşme, pekleşme hızı ile ifade edilir. Pekleşme hızı σ_g gerçek gerilme ve ε_g şekil değiştirme eğrisinin eğimidir. Şekildeğiştirme esnasında gerçekleşen pekleşme miktarı ise herhangi iki şekildeğiştirmeye karşı gelen gerilmeler arasındaki farktır.

Gerçek değerlerle çizilen gerilme – birim şekildeğişimi ($\sigma_g - \varepsilon_g$) eğrisine akma eğrisi (flow curve) adı verilir. Metallerin akma eğrileri HOLLoman bağıntısı (6.1) ile ifade edilmiştir (Holloman, 1945).

$$\sigma_g = K \varepsilon_g^n \quad (6.1)$$

Burada σ_g gerçek gerilme, K dayanım katsayısı olup artışı malzeme dayanımı ile doğru orantılıdır ve birimi gerilme birimi ile aynıdır. Gerçek birim şekildeğişimini 1 yapan gerilme değeri de dayanım katsayısı olarak adlandırılır. n pekleşme üsteli (strain hardening exponent) olup metalik malzemelerde $0 < n < 0.4$ arasında değişmekte ve birimsizdir (Şekil 6.15).



Şekil 6.15 : Pekleşme üstelinin değişimi ile gerçek gerilme-gerçek şekildeğiştirme eğrisinin değişimi arasındaki ilişki.

Kupon deneyinde σ_{max} maksimum çekme dayanımı noktasında ε_g gerçek birim şekildeğiştirme değeri n pekleşme katsayısına eşittir ($\varepsilon_g = n$). $\sigma_{müh}$ mühendislik gerilmesi ve $\varepsilon_{müh}$ mühendislik birim şekildeğiştirmesi sırasıyla

$$\sigma_{müh} = \frac{F}{A_0} \quad (6.2a)$$

$$\varepsilon_{müh} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_k - l_0}{l_0} = \frac{l_k}{l_0} - 1 \quad (6.2b)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Burada F çekme kuvveti, l_0 ilk ölçü uzunluğu, l_k numunenin kopmadan sonraki boyudur. Gerçek gerilme σ_g ve gerçek birim şekildeğiştirme ε_g sırasıyla

$$\sigma_g = \frac{F}{A_k} \quad (6.3a)$$

$$\epsilon_g = \ln\left(\frac{l_k}{l_0}\right) \quad (6.3b)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Burada A_k hesaplanan son kesit alanıdır. Çekme numunesi ölçü boyu arasındaki hacmin sabit kaldığı ($V=A_0l_0=A_kl_k$) varsayılarak mühendislik gerilme- birim şekildeğiştirme ile gerçek gerilme- birim şekildeğiştirme arasındaki ilişki sırasıyla

$$\sigma_g = \sigma_{müh}(\epsilon_{müh} + 1) \quad (6.4a)$$

$$\epsilon_g = \ln(\epsilon_{müh} + 1) \quad (6.4b)$$

bağıntılarıyla hesaplanmaktadır. Bu durumda $\epsilon_g < \epsilon_{müh}$ olduğu anlaşılmaktadır. Kesit daralması ψ Bölüm 2’de verildiği üzere

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \quad (6.5)$$

bağıntısı ile hesaplanmaktadır. Yine hacim sabitliği ilkesi kullanılarak ϵ_g ve $\epsilon_{müh}$ ile ψ sırasıyla

$$\epsilon_g = \ln\left(\frac{1}{1 - \psi}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A_k}\right) \quad (6.6a)$$

$$\epsilon_{müh} = \frac{\psi}{1 - \psi} \quad (6.6b)$$

bağıntıları ile ilişkilendirilebilmektedir. Numunelerin deney sonrası hesaplanan σ_g gerçek gerilme değerleri (6.4a) ve K dayanım katsayıları (6.1) Çizelge 6.1’de verilmektedir. Burada e değeri 2.7182 alınmıştır.

Çizelge 6.1 : BÖÇ numunelerinin hesaplanan σ_g gerçek gerilme değerleri K dayanım katsayıları.

Numuneler	$\sigma_{\max}^E$ (MPa)	A_0 (mm ²)	A_k (mm ²)	$\epsilon_g = n = \ln(A_0/A_k)$ (%)	$\sigma_g = \sigma_{müh}(\epsilon_{müh} + 1)$ (MPa)	$K = \sigma_g^E / e^n$ (MPa)
BRB-AC1	309.64	525	463.54	12.45	348.19	307.43
BRB-AC2	368.02	600	502.52	17.73	433.27	362.88
BRB-SC1	653.54	480	410.96	15.53	755.03	646.43
BRB-SC2	750.00	300	265.28	12.30	842.25	744.77

Soğuk şekildeğişiminde en etkin şekildeğiştirme mekanizması kaymadır. Kristal yapı içerisinde, dislokasyonların kayması ile inelastik şekildeğişimi gerçekleşir. Kayma ile hareket eden dislokasyonlar yeni dislokasyonlar oluşmasına sebep olurlar.

Böylece artan dislokasyon yoğunluğu oluşan diğer dislokasyonlar tarafından engellenmeye başlanır. Sonuçta dislokasyonların hareketlerini sürdürebilmeleri için gereken gerilme değeri artışının fazla olması, beklenildiği şekliyle pekleşmenin oldukça fazla olduğu çelik BÖÇ'lerin gerçek gerilme değerlerinin fazla olmasının nedenini açıklamaktadır.

6.4. ANSYS-Workbench Çözüm ve Sonuçlar

Burada kuramsal çalışma sonucu elde edilen davranış iki doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi ile çevrimler oluşturulduktan sonra deney datasına göre düzenlemeler yapılmıştır. Ana histeretik eğri benzeştirme bağıntıları Black ve diğ. (2002) tarafından önerilen model ile yapılmıştır. Bölüm 4 Şekil 4.6'da verilen iki doğrulu kuvvet yerdeğiştirme ilişkisini oluşturan eşitlikler aşağıda verilmiştir.

F_{max} çekme ve basınç yüklemelerinde ulaşılan maksimum kuvvet; u_{max} çekme ve basınç yüklemelerinde ulaşılan maksimum yerdeğiştirme ve u_y akma yerdeğiştirmesi cinsinden (6.7) bağıntısı ile ve u_y ve Δu_y yerdeğiştirme değişim miktarına göre (6.8) bağıntısı ile hesaplanmaktadır. K_0 başlangıç rijitliği, K_1 akma sonrası rijitlik, α rijitlik oranını göstermektedir.

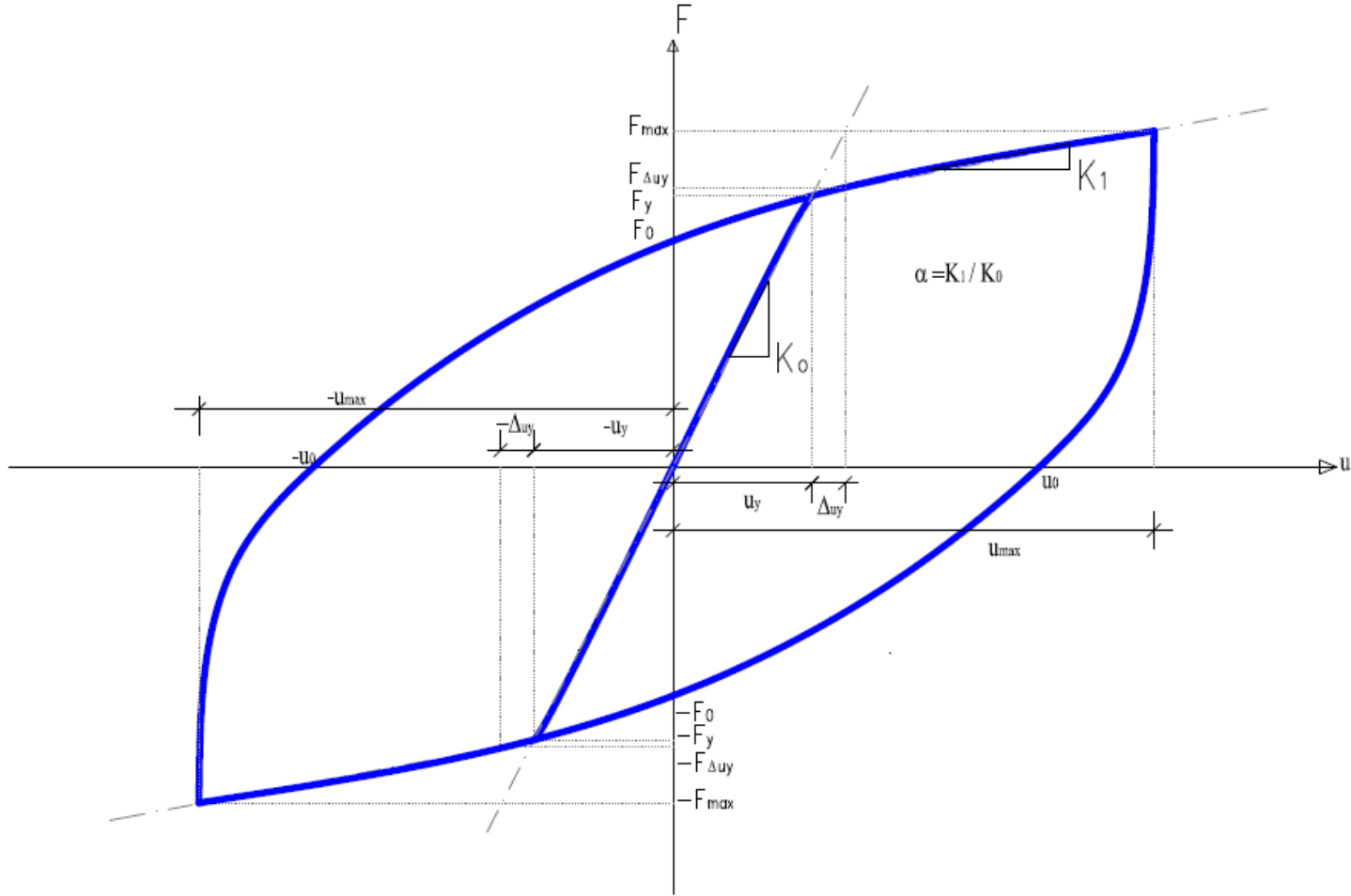
$$F_{max} = K_0 u_y + K_1 (u_{max} - u_y) \quad (6.7)$$

$$F_{max} = K_0 (u_y + \Delta u_y) \quad (6.8)$$

(6.7) ve (6.8) bağıntıları eşitlenirse

$$\Delta u_y = \frac{K_1}{K_0} (u_{max} - u_y) \quad (6.9)$$

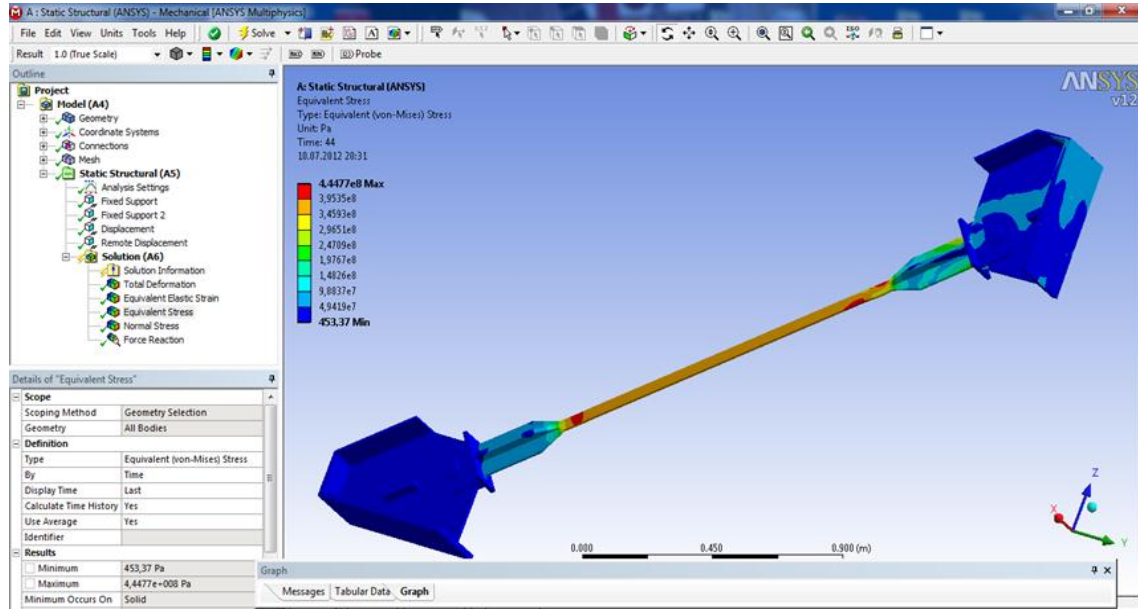
(6.9) bağıntısı elde edilmektedir. Şekil 6.16'da maksimum kuvvet-yerdeğiştirme (istenirse moment-dönme) için ana histeretik eğrinin genel görünüşü verilmektedir. Burada F_y çekme/basınç akma kuvveti, $F_{\Delta u_y}$ numunede Δu_y yerdeğiştirme farkı oluştuğunda oluşan kuvvettir. Histeretik davranışta yükleme boşaltma kolunun başlangıç rijitliğine paralel olduğu varsayılmıştır. İki doğrulu kuvvet-yerdeğiştirme ilişkisi üzerinde tanımlanırken deneysel olarak elde edilen pekleşme özellikleri ve rijitlik oranları dikkate alınmıştır. Başka bir deyişle, α rijitlik oranları, K_0 başlangıç rijitlikleri ve K_1 akma sonrası rijitlikleri çekme ve basınç durumu dikkate alınarak deney sonuçlarına göre tanımlanmıştır.



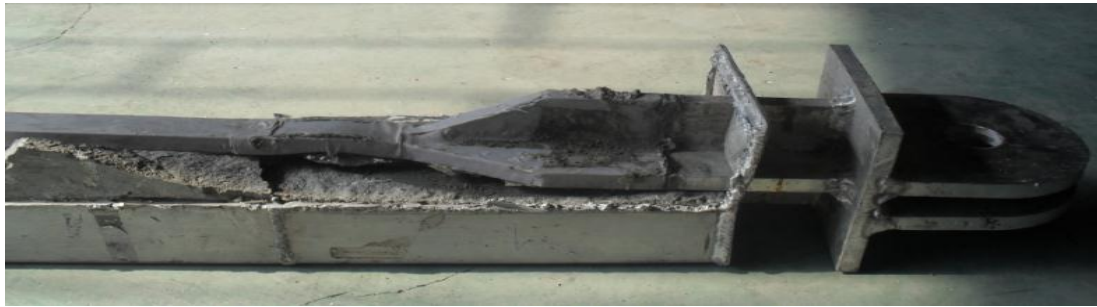
Şekil 6.16 : Ana histeretik eğri kuvvet-yerdeğiştirme genel görünümü.

Analizlerin çözüm süresi Intel®Core™ I5 işlemcili bir laptop'ta ortalama 8~15 saat arasında tamamlanabilmektedir. En uzun analizler alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler içinde BRB-AC2, çelik BÖÇ'ler içinde BRB-SC2 numunesinde gerçekleştirilmiştir.

Şekil 6.17a'da BRB-AC1 numunesinin kuramsal analizi sonucu son adımda oluşan iç gerilmelerden akma gerilmesinin akma bölgesindeki dağılımı verilmektedir. Numunede kopma akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte alüminyum kaynaklamadan dolayı zayıflayan boyun bölgesinden gerçekleşmiştir (Şekil 6.17b).



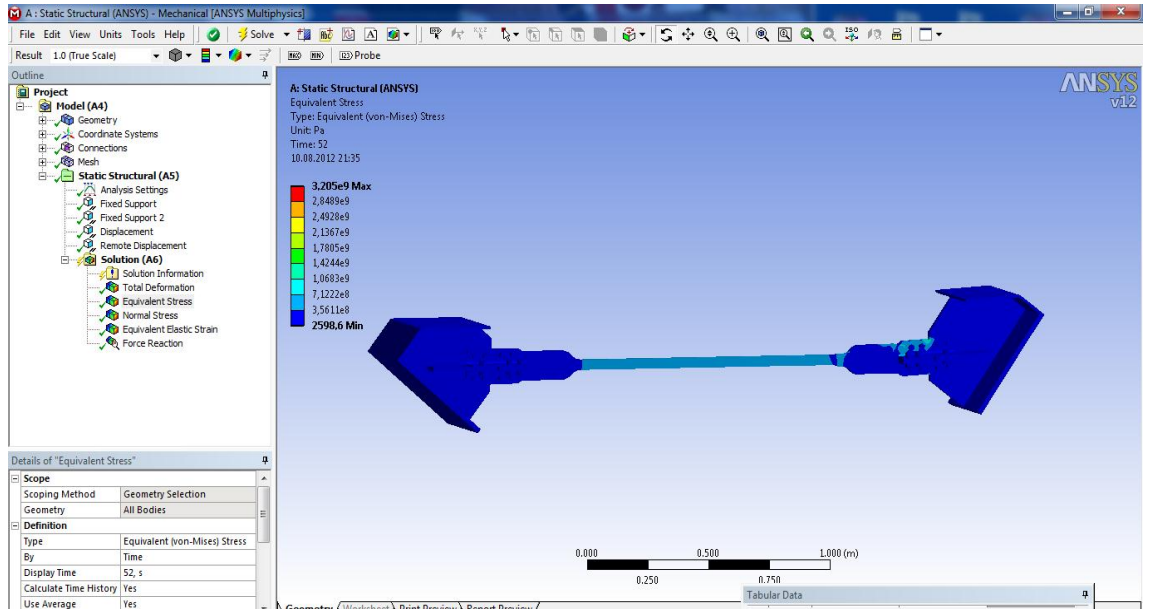
(a)



(b)

Şekil 6.17: (a) BRB-AC1 numunesi analiz sonucunda von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-AC1 numunesinde gözlenen boyun bölgesi burkulma dalgası.

Şekil 6.18a'da BRB-AC2 numunesinin kuramsal analizi sonucu son adımda oluşan iç gerilmelerden akma gerilmesinin akma bölgesindeki dağılımı verilmektedir. Numunede kopma tasarlandığı ve beklendiği şekliyle akma bölgesinden gerçekleşmiştir (Şekil 6.18b).



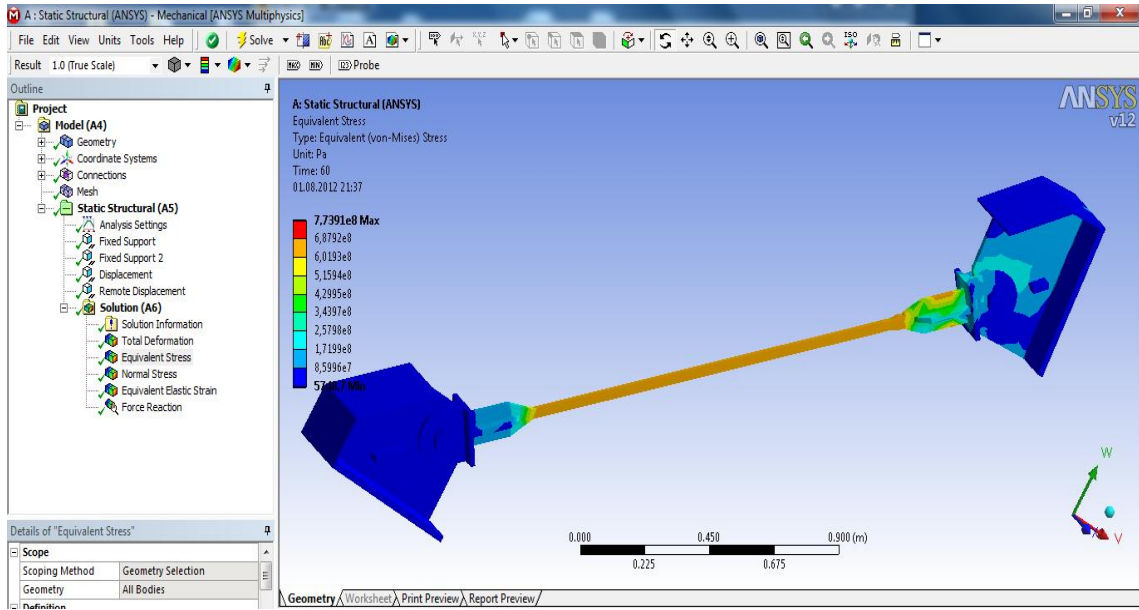
(a)



(b)

Şekil 6.18: (a) BRB-AC2 numunesi analiz sonucunda von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-AC1 numunesinde gözlenen burkulma dalgaları.

Şekil 6.19a'da BRB-SC1 numunesinin kuramsal analizi sonucu son adımda oluşan iç gerilmelerden akma gerilmesinin akma bölgesindeki dağılımı verilmektedir. Numunede kopma tasarlandığı ve beklendiği şekliyle akma bölgesinden orta noktasından gerçekleşmiştir (Şekil 6.19b).



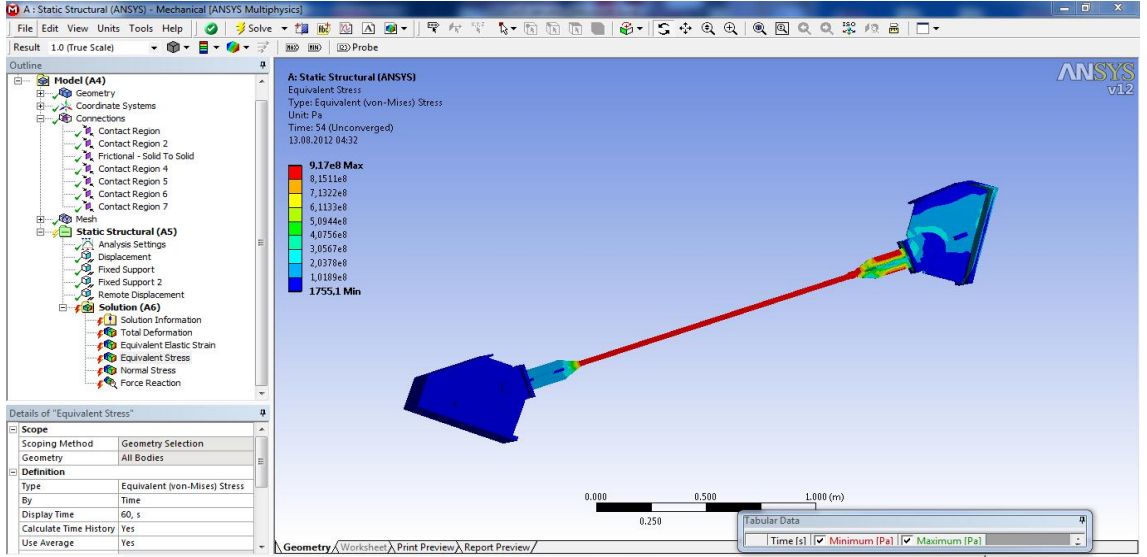
(a)



(b)

Şekil 6.19: (a) BRB-SC1 numunesi analiz sonucunda akma bölgesi von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-SC1 numunesinde akma bölgesinin kopma genel görünüşü.

Şekil 6.20a’da BRB-SC2 numunesinin kuramsal analizi sonucu son adımda oluşan iç gerilmelerden akma gerilmesinin akma bölgesindeki dağılımı verilmektedir. Numunede kopma tasarlandığı ve beklendiği şekliyle akma bölgesinden orta noktaya yakın bir noktadan gerçekleşmiştir (Şekil 6.20b).



(a)



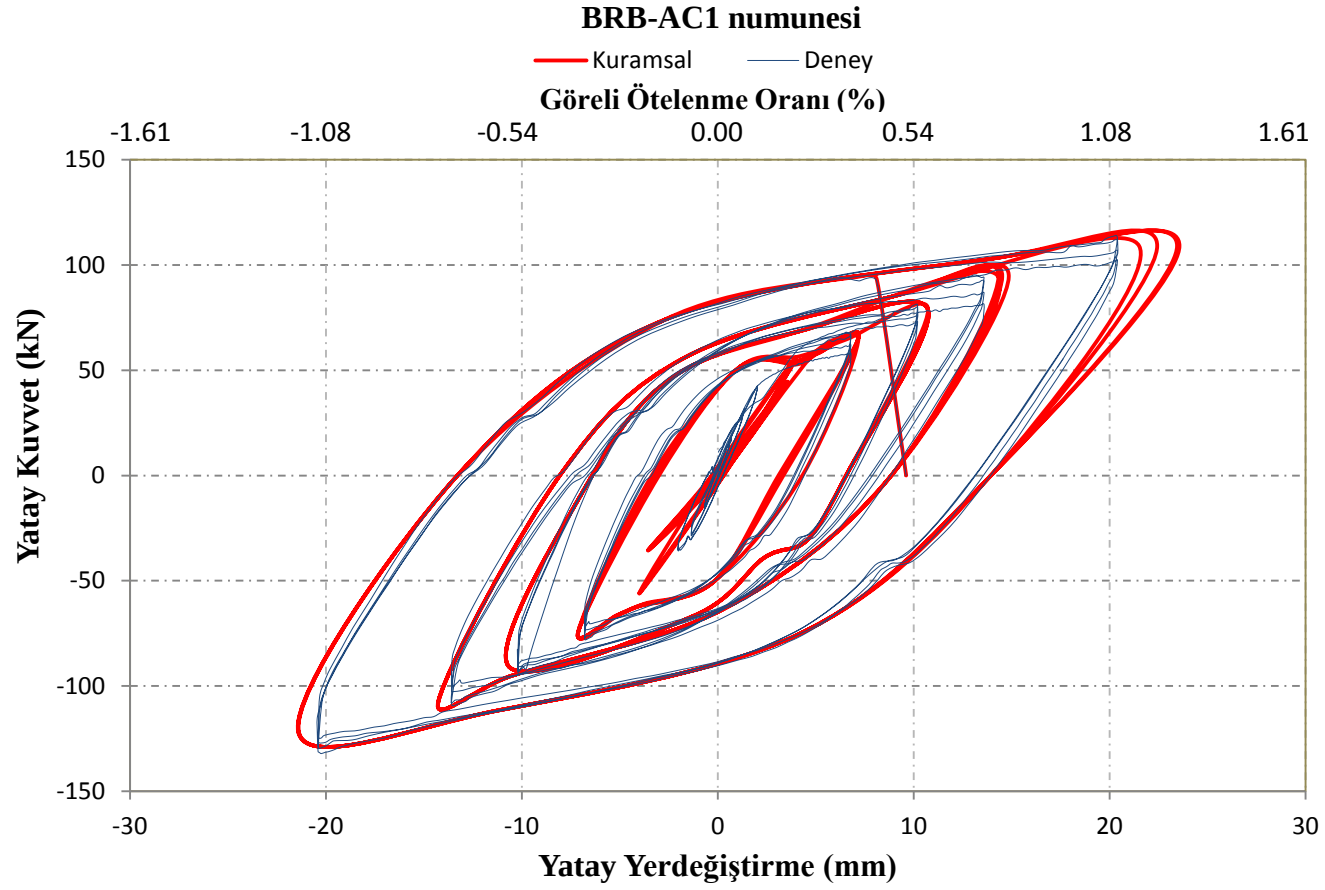
(b)

Şekil 6.20: (a) BRB-SC2 numunesi analiz sonucunda akma bölgesi von Mises akma gerilmesi dağılımı. (b) Deney sonrası yapılan kesit açılımında BRB-SC2 numunesinde akma bölgesinin kopma genel görünüşü.

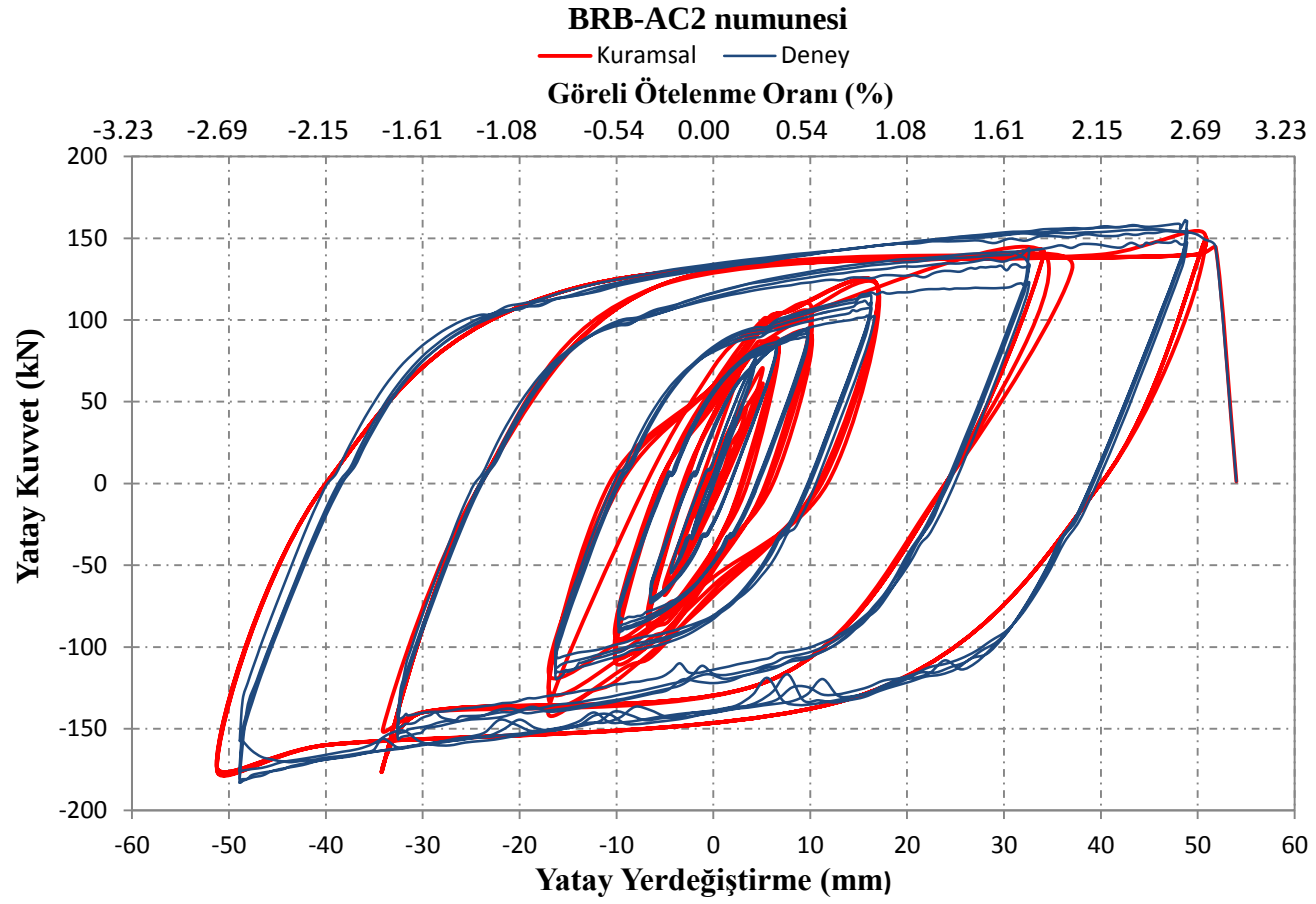
Üst uç güçlendirme bölgesinde küçük de olsa aşırı zorlanmış bölgeler görülmüştür (Şekil 6.19a ve Şekil 6.20a). Bunlar birleşimin ideal olarak mafsallı olamamasından kaynaklanmaktadır. Bu gerilmeler varolan eğilme rijitliği nedeniyle düzlem içi ya da dışı eğilme momentlerinin yol açtığı gerilmelerdir.

6.5. DeneySEL ve Kuramsal Histeretik Eğrilerin Karşılaştırılması

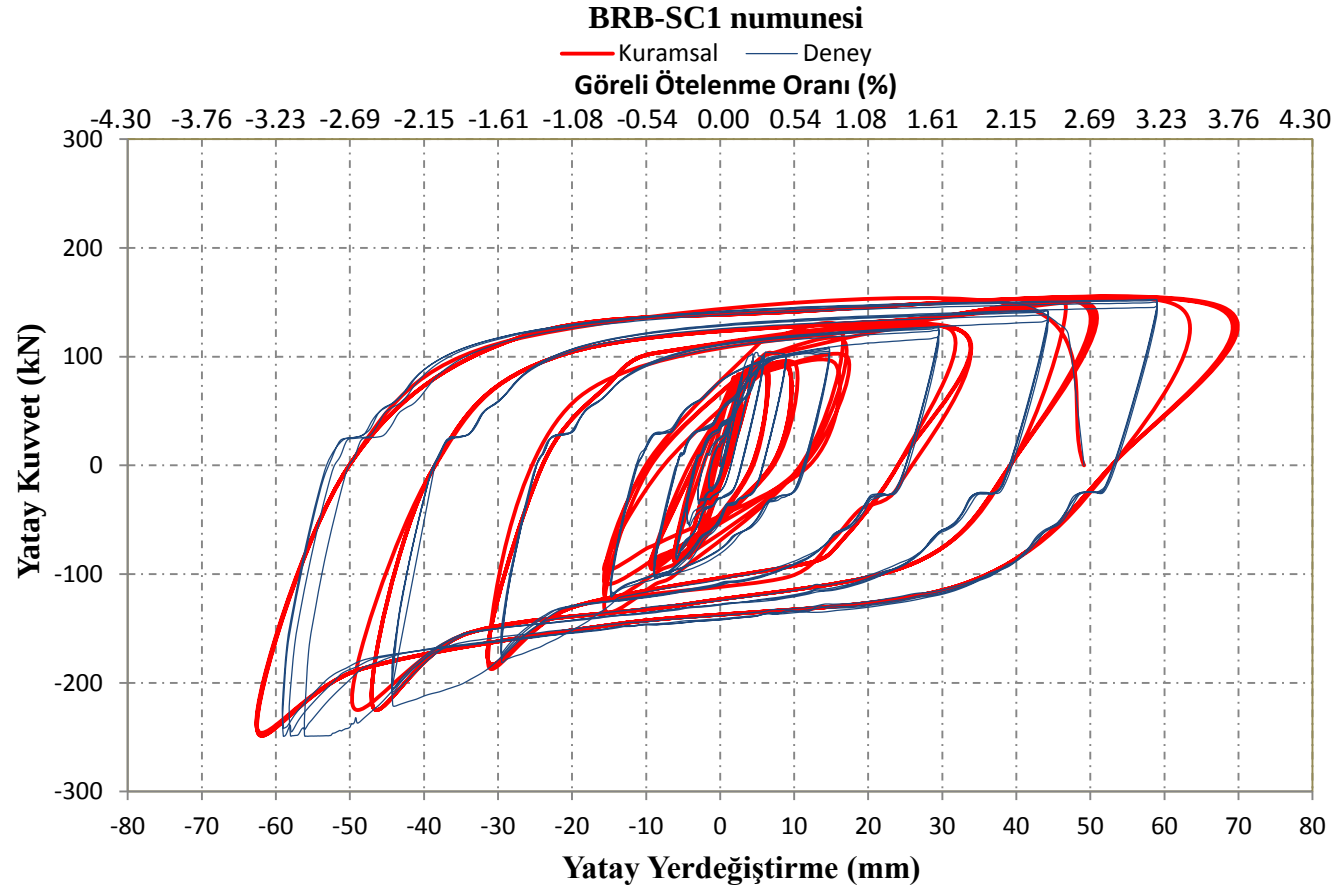
Bu çalışmada ANSYS-Workbench v12.0.1 (2009) programı kullanılarak sonlu eleman yöntemiyle pekleşmenin de dikkate alındığı gerçeğe yakın, deney sonuçlarıyla uyumlu, dengeli ve kararlı histeretik davranış eğrileri elde edilmiştir. Malzeme doğrusal olmayan davranışı von Mises akma koşulu kullanılarak tanımlanmıştır. Şekil 6.21’de BRB-AC1 numunesi, Şekil 6.22’de BRB-AC2 numunesi, Şekil 6.23’de BRB-SC1 numunesi ve Şekil 6.24’de BRB-SC2 numunesinin kuramsal yatay yük-yatay yerdeğiştirme ilişkisi deney sonuçları ile karşılaştırmalı olarak verilmektedir. Yapılan varsayımlar altında deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerin birbirlerine yeterince yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde pekleşmenin az olması nedeniyle sayısal hesap sonuçlarının deneysel hesap sonuçlarına yakınsaması çelik BÖÇ’lere göre daha hızlı gerçekleşmiştir. Ayrıca pekleşmenin az olması alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerde inelastik bölgenin, başlangıç rijitliği ve akma sonrası teğet rijitliğinin kullanılarak tanımlanabilmesi için yeterli olmuştur. Kuramsal modellemede alüminyum alaşımlı BÖÇ’lerin basınç yüklemelerinde çekme yüklemelerine göre daha yakın ve simetrik sonuçlar elde edilmiştir. Çelik BÖÇ’lerde basınç piklerine gidilirken oluşan sivri uçlar çekirdek ile dolgu malzemesi arasındaki sürtünmenin artması ve dolgu malzemesinin yük taşımaya başlaması ile oluşmaktadır. BÖÇ’lerde çok sık rastlanan bu davranışın kuramsal olarak modellenmesinde sürtünme katsayına $\mu=0.02\sim0.04$ arasında değişik değerler tanımlanarak deneysel basınç davranışına en yakın iyileştirmeler araştırılmıştır. Numunelerin akma sonrası deneysel ve kuramsal histeretik eğri yakınlığı akma öncesine göre daha fazladır. Çizelge 6.2’de her numunenin deneysel en son çevrim ve göreceli ötelenme oranında kuramsal E_h kümülatif histeretik enerji yutma miktarları deneysel olarak elde edilen kümülatif histeretik enerji yutma miktarlarıyla karşılaştırılmış, o çevrime ilişkin çekme ve basınç kuvvet piklerinin deneysel/kuramsal oranları verilmiştir.



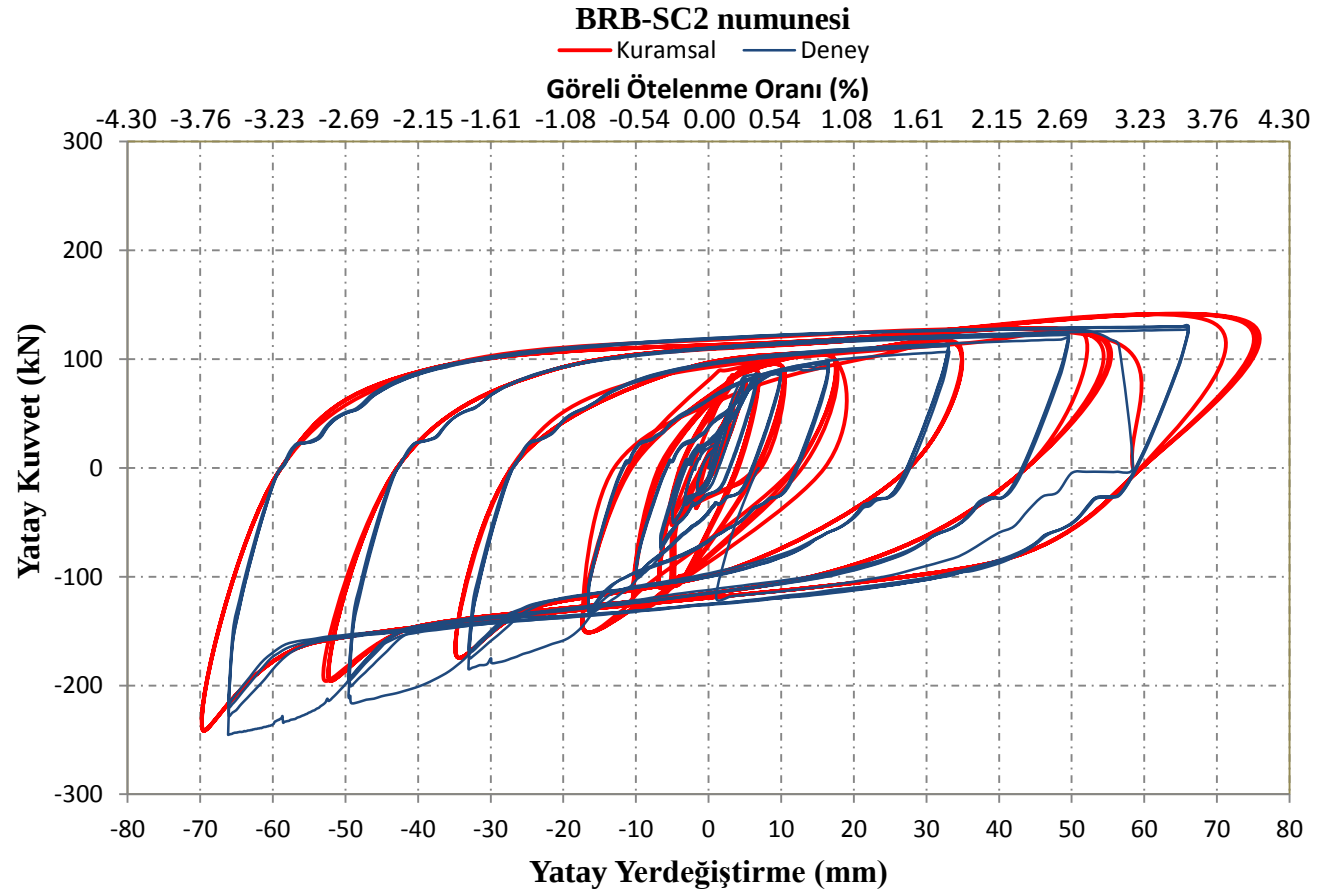
Şekil 6.21 : BRB-AC1 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırması.



Şekil 6.22 : BRB-AC2 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırması.



Şekil 6.23 : BRB-BRB-SC1 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırması.



Şekil 6.24 : BRB-BRB-SC2 numunesi kuramsal ve deney sonuçlarının karşılaştırması.

Çizelge 6.2 : Numunelerin kuramsal ve deneysel E_h kümülatif histeretik enerji yutma miktarlarının, T_{max} çekme ve P_{max} basınç piklerinin karşılaştırılması.

Numuneler	Çevrim	Görelî ötelenme oranı (%)	E_h^D (kN.mm)	E_h^K (kN.mm)	T_{max}^D (kN)	P_{max}^D (kN)	T_{max}^K (kN)	P_{max}^K (kN)	T_{max}^D/T_{max}^K	P_{max}^D/P_{max}^K
BRB-AC1	22	1.10	39,443.33	41,415.50	108.97	-127.95	109.08	-121.62	0.99	1.05
BRB-AC2	26	2.63	137,301.40	142,305.10	153.25	-174.00	150.11	-174.67	1.02	0.99
BRB-SC1	30	3.17	248,507.90	240,374.60	149.63	-247.38	145.50	-238.60	1.03	1.04
BRB-SC2	30	3.55	247,763.50	240,310.90	127.50	-225.00	134.55	-240.13	0.95	0.94

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Genel

Bu bölümde önceki bölümlerde sunulan deneysel ve kuramsal çalışmaların özeti verilmektedir. Elde edilen sonuçların yakınsaklığı ve farklılıkları, olası nedenleri ile birlikte tartışılmıştır. Bu sonuçlardan faydalanarak hazırlanacak analiz ve deney çalışmalarında tasarımcı tarafından dikkat edilmesi gereken konular, takip edilmesi önerilen boyutlandırma prensipleri ve birleşim önerileri vurgulanmıştır.

Çalışmanın ana amacı burkulması önlenmiş çaprazlı (BÖÇ) çelik çerçeve sistemlerinin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki elastik olmayan davranışını deneysel ağırlıklı ve kuramsal olarak incelenmesidir. Deneysel bölümde, aynı akma dayanımlı, basit uç detayına sahip, 5'i çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 3'ü alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum dış tüp malzemeden üretilen 1/1 ölçekli 8 adet BÖÇ'ün, tekrarlı, yön değiştiren statik yükler altındaki davranışı incelenmiştir.

Birinci grup BÖÇ serisi "Ön Çalışmalar" başlığı altında Ek A'da değerlendirilmiş olup 3'ü çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 1'i alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüpten üretilen toplam 4 adet BÖÇ'ten oluşmaktadır.

Tez çalışması bütününde, ikinci grup BÖÇ serisi olarak üretilen 2'si çelik çekirdek ve çelik dış tüp, 2'si alüminyum alaşımlı çekirdek ve alüminyum alaşımlı dış tüpten oluşan toplam 4 adet BÖÇ'ün tekrarlı ve yön değiştiren yükler altındaki histeretik davranışını deneysel ve kuramsal olarak incelenmesi esas alınmıştır.

Yapılan kapsamlı literatür araştırmasında sünek çaprazın üretim kolaylığı ve tekrarlı yükler altındaki davranışının daha iyi tahmin edilebilmesi için olabildiğince az bileşenli, basit elemanlar olarak ve basit uç detaylarıyla üretilmesinin benimsendiği görülmüştür. Ayrıca BÖÇ'lerin histeretik davranışını etkileyen başlıca parametrelere göre tasarım detayları geliştirilmiştir. Bu doğrultuda tasarlanan yeni BÖÇ'ler basit uç birleşim detaylarına sahip olmakla birlikte kullanılan alüminyum alaşımlı malzemenin çelik malzemeye göre olası verimliliğinin/üstünlüğünün irdelenmesi,

malzeme özelliklerinin davranışa etkisinin gözlemlenmesi doktora tezinin amacını amaçlanmıştır.

BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri A5083-H111 alüminyum alaşımlı malzemeden çekirdeği olan BÖÇ'lerdir. BRB-AC1 numunesinin kesit alanı 525mm^2 , BRB-AC2 numunesinin kesit alanı 600mm^2 'dir. BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri sırasıyla S235JR normal ve S355JR yüksek akma dayanımlı çelik malzemesinden çekirdeği olan BÖÇ'lerdir. BRB-SC1 numunesinin kesit alanı 480mm^2 , BRB-SC2 numunesinin kesit alanı 300mm^2 'dir. Kupon deneyleri sonucu numunelerin elde edilen akma dayanımları BRB-AC1 için 182MPa, BRB-AC2 için 177MPa, BRB-SC1 için 257MPa, BRB-SC2 için 373MPa'dır. BRB-AC1 ve BRB-AC2 numuneleri için A6060-T66 alüminyum alaşımında, $150*150*4$ kare tüp kesitli ve akma dayanımı 200MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri için S355JR çelik malzemesinden, $140*140*5$ kare tüp kesitli ve akma dayanımı 345MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak TEFLON bant, kauçuklu gres yağ ve hava kabarcıklı naylon kullanılırken, dolgu malzemesi olarak KÖSTER-VGM5 yüksek dayanımlı tamir harcı seçilmiştir. Akma bölgesi uzunluğu olarak toplam çapraz uzunluğunun %73'ünü geçmemesine dikkat edilmiştir.

Toplam uzunluğu 2275mm olan numuneler eksenel normal kuvveti S355JR çelik kalitesindeki bayrak levhalarına sürtünme tipi yüksek dayanımlı bulonlarla aktarmaktadır. Bayrak plakalarına birleşimlerde BRB-AC1, BRB-SC1 ve BRB-SC2 numuneleri için M40, BRB-AC2 numunesi için M16 bulonlar, ASTM A490-09a standartına uygun 10.9 kalitesinde yüksek dayanımlı bulonlar olarak özel olarak bu çalışma için üretilmiştir. Bayrak plakaları kolon-kiriş başlıklarına M24 (10.9) bulonlarıyla birleştirilmiştir.

Deneyisel çalışmada İ.T.Ü. Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı'nda maksimum 250kN çekme ve itme kapasiteli, toplam $\pm 300\text{mm}$ yerdeğiştirme uygulayabilen hidrolik veren ile numunelere çekme ve basınç kuvvetleri, akmadan önce ve sonra yerdeğiştirme kontrollü çevrimler uygulanmıştır. Deney numuneleri, HEA400 profilinden üretilen deney düzeneğine hidrolik verenle herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde ve yatayla yaklaşık 38° açı yapacak şekilde yerleştirilmiş, hidrolik verenden gelen yük, çaprazın eksenel doğrultusunun kolonla kesiştiği noktaya uygulanmıştır. Deney düzeneği, sistemin tümsel davranışına yatay

yük ve rijitlik olarak katkısı olmayan, birbirine mafsallı birleşimli, L şeklindeki bir kolon-kiriş taşıyıcı sistemden oluşmaktadır.

Her numunenin deneyinde 12 adeti yerdeğiştirme ölçer, 20 adeti şekildeğiştirme ölçer olmak üzere toplam 32 cihazdan kanal okuması yapılmıştır. Çerçeve ve numunelere yerleştirilen şekildeğiştirme ve yerdeğiştirme ölçerler yardımıyla davranışın olabildiğince doğru biçimde izlenebilmesi sağlanmıştır.

Numunelerin yön değiştiren tekrarlı yüklemeler altındaki statik yükleme deneyi, AISC-341 (2010)'te BÖÇ'ler için verilen standart yükleme protokolü kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın sayısal/kuramsal bölümünde numunelerin öngörülen süneklik kapasiteleri, dayanım, akma ve göçme limit durumlarını kapsayan çekme ve basınçta davranış tahminleri SAP2000 v14 (Computers and Structures Inc., 2009) yapılmıştır. Deneyde standart yükleme protokolü tamamlandıktan sonra numuneler kopuncaya kadar deneye devam edilmiştir. Numunelerin çekirdek akma bölgesi plastik mafsallı özellikleri FEMA356'da (2000, p. 196) çekme etkisindeki çelik çaprazlar için verilen basitleştirilmiş parametre ve yerdeğiştirme katsayılarına göre modellenmiştir. Sayısal incelemede BÖÇ'lerin maksimum basınç kapasitesinin maksimum çekme kapasitesine oranı $\beta=1.15$, maksimum çekme dayanımının akma dayanımına oranı $\omega=1.45$, çelik numuneler için maksimum süneklik oranı $\mu_{\max}=10$, alüminyum alaşımlı numuneler için $\mu_{\max}=7.5$ olarak seçilmiştir. Alüminyum alaşım çekirdekli numunelerin akmadaki birim şekildeğiştirme oranı $0.8\varepsilon_y^{0.2}$ olarak alınmıştır.

7.2 Sonuçlar

Çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin histeretik davranışlarının deneysel ve sayısal bulgularından elde edilen başlıca sonuç ve gözlemler aşağıda sıralanmıştır:

- BRB-AC1 numunesi için maksimum çekme kuvveti +108.97kN, maksimum basınç kuvveti -127.95kN, maksimum yerdeğiştirme $\pm 20.39\text{mm}$ (± 1.10 görelî ötelenme oranı) olarak, BRB-AC2 numunesi için maksimum çekme kuvveti +153.25kN, maksimum basınç kuvveti -174.00kN, maksimum yerdeğiştirme $\pm 48.90\text{mm}$ (± 2.63 görelî ötelenme oranı) olarak, BRB-SC1 numunesi için maksimum çekme kuvveti +149.63kN, maksimum basınç kuvveti -247.38kN, maksimum yerdeğiştirme $\pm 59.00\text{mm}$ (± 3.17 görelî

ötelenme oranı) olarak, BRB-SC2 numunesi için maksimum çekme kuvveti +127.50kN, maksimum basınç kuvveti -225.00kN, maksimum yerdeğiştirme $\pm 66.10\text{mm}$ ($\pm 3.55\%$ görelî ötelenme oranı) olarak elde edilmiştir. Numuneler arasında en yüksek çekme kuvveti ortalama +153.25kN ile BRB-AC2 numunesine, en yüksek basınç kuvveti ise -247.38kN ile BRB-SC1 numunesine aittir.

- Her bir numuneye ilişkin deneylerden, yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirmeye göre histeretik eğriler elde edilerek farklı tasarım özelliklerine sahip BÖÇ'lerin enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Buna göre çelik BÖÇ'ler grubunda enerji yutma BRBSC1/BRB-SC2 oranı 1.02'dir. Alüminyum alaşımlı BÖÇ grubunda enerji yutma BRB-AC2/BRB-AC1 oranı 3.48'dir. Bunun nedeni, BRB-AC1 numunesinde alüminyum kaynaktan ileri gelen dayanım azalması ile erken hasarın oluşmasıdır. Tüm numuneler içinde en fazla enerji sönümleyen numune BRB-SC1 numunesidir. Alüminyum alaşımlı çaprazların tasarımında geliştirilen ve alüminyum kaynağından gelen çekme çarpılması ve dayanımı azaltan olumsuz koşulların ortadan kaldırıldığı bulonlu birleşim (BRB-AC2) işçilik ve üretim açısından kolaylık getirmiş ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin performansını arttırmıştır.
- Numunelerin eksenel çekme ve basınç taşıma kapasiteleri ve bu değerlerin yükleme geçmişine (load-history) bağlı olarak değişimleri ve kopma ömürleri (yerdeğiştirme kapasiteleri bakımından) elde edilerek karşılaştırılmıştır. Çaprazların çekme ve basınçta benzer dayanımlar göstererek, burkulmadan, stabil, kendini tekrarlayan, olabildiğince dolu histeretik eğrilerin elde edilmesi projenin en önemli başarı ölçütü olarak gerçekleştirilmiştir; elde edilen histeretik eğriler BÖÇ'lerde beklenen türden eğrilerdir.
- Deneylerde, her çevrimdeki kuvvet büyüklükleri ilk çevrimden sonra az miktarda azalarak stabil duruma gelmiştir. Bunun nedeni çekirdek ile burkulmayı önleyen ortam arasındaki ayrılmaların giderek artmasıdır.
- BRB-AC1 numunesi dışında tüm numuneler standart yükleme protokolünü başarıyla tamamlamışlardır. Tüm numuneler içinde en yüksek β basınç dayanımı düzeltme katsayısı BRB-SC2 numunesinden 1.76 olarak elde edilmiştir. En yüksek ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ise BRB-AC2 numunesinden 1.81 olarak elde edilmiştir. Malzeme özelliklerinden

gelen bu katsayılar da β katsayısını arttıran faktörlerin çekirdek merkezleştirme ve sürtünmesiz yüzey oluşturma kusur ve eksiklikleri, iç boşluk verme şekli olduğu anlaşılmıştır. Deneylerde alüminyum alaşımlı numunelerde $\beta \leq 1.3$ olması koşulu sağlanmıştır. Bu kriter simetrik histeretik davranış elde edilmesini garantilemektedir. Çekme ve basınç dayanımı düzeltme faktörleri, malzeme dayanım faktörü ve pekleşme değerleri bulunarak ön boyutlandırmada varsayılan değerlerle karşılaştırıldığında başarılı sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

- η kümülatif inelastik yerdeğiştirmeler alüminyum alaşımlı numunelerde $100\Delta_{by}$, çelik numunelerde $172\Delta_{by}$ 'nin üzerinde elde edilmiştir. Çalışmada verilen tipik özellikteki deneylerde kümülatif inelastik yerdeğiştirmenin en az $200\Delta_{by}$ olması zorunluluğu bulunmamaktadır.
- BÖÇ'lerin göçme mekanizması genellikle daha büyük genlikli yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikine giderken gerçekleşmiştir. BRB-AC1 numunesi dışında diğer numuneler tahmin edilen maksimum yerdeğiştirme sınırına ulaşmışlardır.
- Numunelerin etkili sönüm oranının çevrim sayısı ile değişimi ve göreceli ötelenme oranları ile değişimi karşılaştırmalı olarak verilmiştir.
- Çelik BÖÇ'lerin elde edilen histeretik eğrilerinde çekme piklerinde yatay bir köşe oluşurken, $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ ve $\pm 10\Delta_{by}^E$ seviyesinde basınç piklerine gidilirken sivri uçlar oluşmuştur. BÖÇ'ler de çok sık rastlanan bu davranışın nedeni çekirdek ile dolgu malzemesi arasındaki sürtünmenin artması ve dolgu malzemesinin yük taşımaya başlamasıdır. Bu durum istenmeyen ve enerji yutma miktarını göreceli olarak azaltan bir davranıştır.
- BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılan kanallara strain gauge yerleştirilmiştir. Bu uygulama bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla BÖÇ teknolojisi için yeni bir uygulama olmuştur. BÖÇ'lerin deneyde akma yerdeğiştirmesinin net bir şekilde belirlenmesi hedefi bu yöntemle gerçekleştirilmiştir. BRB-AC1, BRB-AC2 ve BRB-SC2 numunesinin akma yerdeğiştirmesi grafik ekranla eş zamanlı olarak net bir şekilde belirlenmiştir. BRB-SC1 numunesi akma yerdeğiştirmesi $\pm \Delta_{by}^E$ seviyesinin ilk çekme pikine giderken BRBKN okumalarında anlamsız okuma sıçramaları gözlemlendiğinden grafik ekran takibi

ile akma yerdeğiştirmesi belirlenmiştir. Deney sonrası yapılan kesit açılımlarında bu problemin nedeni anlaşılımtır: BRBKN şekildeğiştirme leri çekirdek akma bölgesinin orta merkez noktasına yerleştirildiğinden ve inelastik şekildeğiştirmeler bu noktada yoğunlaştığından BRBKN’de erken hasar oluşmuştur. Benzer bir durum bu yöntemin n araştırma safhasında yapılan kanallı çekme numunelerinde de karşılaşılmıştır.

- elik ve alimünyum alaşımlı B numunelerine ilişkin deneysel davranışların doğrulanması yn değiştiren tekrarlı yükler altında üç boyutlu modellenmesi yapılmıştır. Numunelerin nonlinear malzeme ve geometri etkinlerini etkin şekilde inceleyebilmek için ANSYS-Workbench v12.0.1 programı kullanılmıştır. Deneysel ortam koşulları ile bire bir uyumlu katı modelleri CimatronE v10 kullanılarak oluşturulmuştur. Alüminyum alaşımlı ve elik B numunelerindeki pekleşme farklılığı pekleşme üsteli kavramı ile analizlere yansıtılmış, numunelerin deney sonrası yapılan kesit açılımlarından en son kesit alanı hesaplanarak gerçek gerilme değerleri bulunmuştur.
- elik B’lerin ANSYS- Workbench kuramsal analiziyle elde edilen st uç güçlendirme bölgesinde görülen von Mises gerilme dağılımlarında küçük zorlanma bölgeleri gözlenmiştir. Bu zorlanma bölgelerinin yüksek pekleşme etkisiyle artan gerilme yığılmalarının oluşturduğu bölgeler olduğu sonucuna varılmıştır.
- Kuramsal bölümde yapılan varsayımlar altında deneysel ve kuramsal histeretik eğrilerin birbirlerine yeterince yakın olduğu sonucuna varılmıştır. Alüminyum alaşımlı B’lerde pekleşmenin az olması nedeniyle sonuca yakınsama elik B’lere göre daha hızlı gerçekleşmiştir. Pekleşmenin az olması alüminyum alaşımlı B’lerde inelastik bölgenin, başlangıç rijitliği ve akma sonrası teğet rijitliğinin kullanılarak tanımlanabilmesi için yeterli olmuştur.
- Numunelerin deneysel ve statik itme (Pushover) analizi çalışmalarıyla elde edilen histeretik eğrilerin monotik davranışla elde edilen eğrilere benzer ve yakın olduğu grlmştir. Başlangıç rijitlikleri açısından tahmin/deney başarı

oranı alüminyum ve çelik numuneler dikkate alındığında %90~%99 aralığındadır.

- Deneyler sonrasında numunelerin kaynaklı ve bulonlu birleşimlerinde, bayrak plakalarında ve deney düzeneğinin genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Bayrak plakaları, kolon ve kiriş şekil değiştirme okumaları deney düzeneğinin deney boyunca elastik kaldığını göstermektedir. Bayrak plakalarının elastik davranışı, akmanın yalnızca çekirdek akma bölgesi uzunluğu boyunca oluştuğunu, çekirdek güçlendirme bölgesi ve birleşim bölgesinin elastik kaldığını göstermektedir.
- Çekirdek dış tüp ve alın plakası arasında bırakılan uzunluğun yeterliliği deneylerde kanıtlanmıştır. BÖÇ deneylerinde görülen dış tüpün alın plakasına dayanarak basınç dayanımını artırması olumsuzluğu hiçbir deneyde gözlenmemiştir.
- Çelik numunelerin histeretik eğrilerinde işaret değişirken gözlenen yatay sıçramaların birleşim bölgesinde bulon deliklerine verilen 1mm üretim toleransı nedeniyle olduğu düşünülmektedir. Alüminyum alaşımlı numunelerde tolerans sınırı 0.5mm'ye düşürüldüğünde histeretik eğrilerde yatay sıçramalar gözlenmemiştir.
- Numunelerde akma bölgesinden çekme bölgesine geçişte yapılan haçvari kesiti oluşturan berkitme plakalarının kaynak uç noktası çelik numunelerde kesitin genişlediği noktaya çekilmiştir. BRB-AC1 numunesinde berkitme plakalarına yapılan alüminyum kaynak bu bölgedeki dayanımı %60 azaltmış ve bu noktada erken göçmeye neden olmuştur. Bu olumsuz durum BRB-AC2 numunesinde kaynaklı üretimin kullanılmadığı farklı bir uç tasarımı ile düzeltilmiştir. Gerek çelik, gerekse alüminyum alaşımlı numunelerde akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte oluşturulan haçvari kesite ilişkin kaynaklı üretimde, kaynak köşelerinin dönülmesi kesitin en dar olduğu yerden çekirdeğin kopmasına neden olmaktadır. Bu sonuç BÖÇ üretiminde dikkate alınarak yeniden güçlendirme bölgesi tasarlanarak plastik mafsallık oluşumu akma bölgesi orta noktasına taşınmıştır.
- Sürtünmesiz yüzey oluşturulurken kullanılan kauçuklu gress yağı yardımıyla BÖÇ'ler için bilinen en önemli belirsizlik olan metal çekirdeğin korozyona korunmasında sağlanmıştır. Üretilen alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin sağladığı

en büyük üstünlük ise korozyon dayanımının mükemmel olmasıdır. Sektörde patentli olarak satılan BÖÇ üreticilerinin karşılaştığı en büyük sorun olan bu durum, çaprazın kullanım ömrünü azaltan ve davranışını olumsuz yönde etkileyen önemli bir ayrıntıdır. Sektörün talebi olan korozyon dayanımı yüksek korunan BÖÇ üretimi çalışma kapsamında alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerle gerçekleştirilmiştir.

- BÖÇ'lerin düzlem dışı hareketini sınırlamak için özel olarak tasarlanan bayrak levhaların etkinliği yapılan deneylerde kanıtlanmıştır. Numunelerin güçlendirme ve birleşim bölgesi elastik kalarak akma uzamasının yalnızca akma bölgesinde oluşması sağlanmıştır.
- Uluslararası düzeyde burada kullanılan tipik özellikleriyle, bilindiği kadarıyla ilk defa geliştirilmiş olan alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin üstünlüğü/verimliliği irdelenmiştir. Az da olsa yapıya getireceği hafiflik, üretim kolaylığı, boya geresinimi duyulmaması, sürtünmesizliğe olan katkısı ile çelik BÖÇ'lere üstünlük/verimlilik gösterdiği kanıtlanmıştır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde, dayanım ve rijitlik açısından çelik BÖÇ'lere göre simetrik ve olabildiğince elasto-plastik davranışa daha yakın histeretik eğriler elde edilebildiği görülmüştür.
- Çalışmada üretilen BÖÇ'ler içerdeki detaylar gereği ilk defa uygulanan önceki çalışmalara göre yeni ve farklı yönleri bulunmaktadır. Ayrıca, yeni projelerin üretilmesine temel oluşturabilme potansiyeline sahiptir. Elde edilen sonuçlar bu konuda çalışacak araştırmacılar için mevcut veritabanına bir ek veri sağlayacaktır. Amerika ve Japonya'da bulunan çeşitli firmaların patentinde üretilen BÖÇ'lere alternatif, farklı özelliklerdeki bir BÖÇ üretilmesi ve denenmesi de gerçekleştirilmiştir.

7.3 Sonraki Çalışmalar İçin Öneriler

Tasarlanan ve üretilen çelik ve alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin çekme yüklemesinde çekirdeğin akma bölgesi uzunluğunca akarak, basınç yüklemesinde çekirdeğin burkulmadan akmasına izin verilerek histeretik enerji sönümünü arttırdığı kanıtlanmıştır. Burada sunulan deneysel ve kuramsal çalışmalar deprem yükü altında BÖÇ'lü çelik çerçeve sistemlerinin elastik olmayan çevrimsel davranışını daha net anlaşılmasını sağlamıştır.

Burkulması önlenmiş çelik ve alüminyum alaşımlı çaprazlı çelik çerçeve sistemleri üzerine yapılan deneysel ve kuramsal çalışmalarda elde edilen veriler ve ilgili konuda araştırmacıların vardığı sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde dikkate alınması gereken noktalar aşağıda sıralanmıştır:

- Numunelerde akma bölgesinden çekme bölgesine geçişte yapılan haçvari kesiti oluşturan berkitme plakalarının kaynak uç noktası çelik numunelerde kesitin genişlediği noktada bitmeli ve köşeler kesinlikle dönülmemelidir.
- Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte oluşturulan haçvari kesitin kaynaklı oluşturulması yerine, besleme plakaları ile bulonlu birleşim yapılarak oluşturulması önerilir.
- Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerde akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte yapılan enkesit artışı ve boyun bölgesi boyutlandırmasında plastik mafsallık oluşum noktası olabildiğince orta noktaya ötelenmelidir. Aksi durumda, numune çekme doğrultusunda en zayıf olduğu bu kritik noktadan kopacaktır.
- BRB-AC2 numunesi için boyun bölgesinde gerilme yığılmalarını önleyen özel bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu özel geçiş detayının geliştirilmesi önerilir.
- Alüminyumun ekstrüzyon yöntemi ile kolay şekil verilebilme özelliğinden yararlanılarak kaynaksız, yekpare çekirdeklerin üretimi önerilir.
- Çelik BÖÇ'lerin berkitme plakalarını yekpare kesite birleştiren kaynak dikişleri ile çekirdeği alın plakasına, alın plakasını mafsallık plakasına birleştiren kaynak dikişleri bitirildikten ve röntgen muayenesi gerçekleştirildikten sonra sürtünmesiz yüzey oluşturulmalıdır.

- Her numune için merkezlendirme sehpaı üretilmeli, 0.2mm'lik sac tırnaklar ile merkezlendirme hata payı sıfırlanmalıdır.
- Dolgu malzemesinin dökümü sırasında, dış tüp alt kısımda harç şerbetinin sızmasına engel olmak için oluşturulan bariyer sonrasında sökümü ve temizliğı kolay olan bir malzemeden seçilmelidir.

Bu araştırma kapsamında her ne kadar bir genel tahmin yaklaşım modeli oluşturulmuşsa da, deneysel çalışmada süre ve bütçe sınırları nedeniyle metal malzeme, sürtünmesiz yüzey malzemesi, boyun bölgesi tasarımı, iç boşluk oluşturma yöntemi, kaynaklı üretim sırası gibi tasarım değişkenlerinin denenmesi ve davranışların bu değişkenlerle birlikte incelenmesi bundan sonra yapılacak çalışmalar arasında yer alabilir.

KAYNAKLAR

- ABAQUS** (2006). Version 6.6 Documentation. Simulia.
- AISC 341-10** (2010). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. *ANSI/AISC 341, American Institute of Steel Construction, Inc.*, Chicago.
- AISC-LRFD 360-10** (2010). Specification for Structural Steel Buildings. *ANSI/AISC 360, American Institute of Steel Construction, Inc.*, Chicago.
- Aniello M. D., Corte, G., Mazzolani, F. M.** (2006). Seismic upgrading of RC buildings by buckling restrained braces: Experimental results vs numerical modelling. *STESSA 2006-Mazzolani&Wada (eds)*, 2006 Taylor&Francis Group, London, ISBN 0-415-40824-5.
- ANSYS** (2002). Release 6.1. Elements reference. Published by ANSYS Incorporated.
- ANSYS** (2009). ANSYS Workbench 2.0 Framework Version 12.0.1. ANSYS Inc., Canonsburg, Pennsylvania, USA.
- ASCE 7** (2005). Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. *SEI/ASCE 7-05*, Reston, VA 2005.
- ASTM A370-08a**, (2008). Standart test methods and definitions for mechanical testing of steel products. *ASTM International*, 100 Barr-Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959.
- ASTM E8/E8M-09**, (2009). Standart test methods for tension testing of metallic materials. *ASTM International*, 100 Barr-Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959.
- ASTM A490-09a**. (2009). Standart specification for high-strength steel bolts, Classes 10.9 and 10.9.2, for structural steel joints. *ASTM International*, 100 Barr-Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959.
- Astaneh-Asl, A., Goel, S. C., Hanson, R. D.** (1981). Behavior of steel diyagonal bracing. *Proceeding, ASCE Conference*, St Luis, Preprint 81-522.
- Astaneh-Asl, A.** (1998). Seismic behavior and design of gusset plates. *Steel Tips, Structural Steel Educational Council Technical Information and Product Service*, December.
- Ay, İ.** (2012). İmalat yöntemleri II. Ders notları. Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü.
- Black, C., Makris, N., Aiken, I.** (2002). Component testing, stability analysis and characterization of buckling restrained unbonded braces. *PEER report 2002/08, Berkeley: Pacific Earthquake Engineering Research Center Report*, University of California, Berkeley.

- Berman, J. W. ve Bruneau, M.** (2009). Cyclic testing of a buckling restrained braced frame with unconstrained gusset connections. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, December, Vol.135, No.12, pp.1499-1510.
- Bordea, S. ve Dubina, D.** (2009). Retrofitting/upgrading of reinforced concrete elements with buckling restrained bracing elements. Proc. of the 11th WSEAS International Conference on Sustainability in Science Engineering, Timisoara, Romania, May 27-29.
- Bordea, S. ve Dubina, D.** (2010). Numerical and experimental evaluation of q factors for RC MRF strengthened of steel BRB. *Urban Habitat Construction under Catastrophic Events (Proceedings)-Mazzolani (Ed)*, 2010 Taylor&Francis Group, London, ISBN 978-0-415-60685-1.
- Budaházy, V.** (2012). Modelling of the hysteretic behaviour of buckling restrained braces. *Conference of Junior Researchers in Civil Engineering*, 19-20 June, Budapest, Hungary.
- Celik, O. C., Berman, J.W., Bruneau, M.** (2004). Cyclic testing of braces laterally restrained by steel studs to enhance performance during earthquakes. Technical Report, MCEER-04-003, March, 250 pages, Buffalo, NY, USA.
- Celik, O. C. ve Bruneau, M.** (2009). Seismic behavior of bidirectional-resistant ductile end diaphragms with buckling restrained braces in straight steel bridges. *Engineering Structures Journal*, Vol.31, Issue 2, February, pp. 380-393.
- Celik, O. C. ve Bruneau, M.** (2010a). Skewed slab-on-girder steel bridge superstructures with bidirectional ductile end diaphragms. *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol.16, No.2, March, pp. 207-218.
- CEN: EN 15129.** (2010). Anti-Seismic Devices. European Committee for Standardization (CEN); 2010.
- Celik, O. C. ve Bruneau, M.** (2010b). Bidirectional-resistant ductile end diaphragms for straight steel bridges. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering Conference: Reaching Beyond Borders*, July 25-29, Toronto, Canada (CD- ROM).
- Chen, C. C., Chen, S. Y., Liaw, J.J.** (2001). Application of low yield strength steel on controlled plastification ductile concentrically braced frames. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.28(5), pp. 823-836.
- Chopra, A. K.** (2001). *Dynamics of Structures. Theory and Applications of Earthquake Engineering*, 2nd Edition, Prentice-Hall, Chapter 3, Response to harmonic and periodic excitations.
- CimatronE (2012).** Version 10. Cimatron Group. Cimatron Regional Distributor: TEKYAZ Teknolojik Yazılımlar ve Makine Tic. A.Ş., Büyükdere, İstanbul.
- Çapan, L.** (2003). *Metallere plastik şekil verme*. Çağlayan Kitabevi.

- Dasgupta, P., Goel, Montesinos, G. P., Tsai, K. C.** (2004). Performance-based seismic design and behaviour of a composite buckling restrained braced frame. *Proc. of the 13th World Conference on Earth Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, pp.497.
- De Matteis, G., Mazzolani, F. M., Panico, S.** (2003). Pure aluminum shear panels as passive control system for seismic protection of steel moment resisting frames. *Proc. of the 4th International Conference STESSA 2003*, Mazzolani F.M. Editor, A.A.Naples, Rotterdam, Balkema, 9-12 June, pp. 609-614.
- De Matteis, G., Panico, S., Mazzolani, F. M.** (2006). Experimental study on pure aluminium shear panel with different stiffener types. *STESSA 2006-Mazzolani&Wada*, 2006 Taylor&Francis Group, London, ISBN 0-415-40824-5.
- De Matteis, G., Panico, S., Mazzolani, F.M.** (2008). Experimental tests on pure aluminium shear panels with welded stiffeners. *Engineering Structures*, ISSN 0141-0296, printed by Krips b.v., Meppel, The Netherlands, Elsevier, Volume 30, Issue 6, June, pp.1734-1744, DOI: 10.1016/j.engstruct.2007.11.015.
- Dindar, A. A.** (2009). Energy-Based Earthquake Response Analysis and Design of Reinforced Concrete SDOF Columns, Ph.D. Thesis, Bogazici University, Istanbul.
- Deulkar W. N., Modhera, C. D., Patil, H. S.** (2010). Buckling restrained braces for vibration control of buildings structure. *Civil Engineering*, Vol.4, Issue: September, pp. 363-372.
- Dutta, A. ve Hamburger, R. O.** (2010). Case study of a 40-storey buckling restrained brace frame building located in Los Angeles. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 19, pp. 77-93.
- EN 15129.** (2010). Anti-seismic devices. European Committee for Standardization (CEN/TC 340).
- Faella, C., Mazzolani, F.M., Piluso, V., Rizzano, G.** (2000). Local buckling of aluminum members: testing and classification. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 126, No. 3, pp. 353-360, March, 2000.
- FEMA-356.** (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Prepared by SAC Joint Venture for the Federal Emergency Management Agency*, Washington, DC.
- GEV-ATB,** (2009). Alüminyum ve alüminyum alaşımları, *Gedik Eğitim Vakfı*, Ders Notu, No:2.23.
- Gheidi, A., Mirtaheri, M., Zandi, A. P., Alanjari, P.** (2009). Effect of filler material on local and global behaviour of buckling-restrained braces. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 10.1002/tal.555.
- Haydaroglu, C., Turker, A., Taskin, K., Celik, O. C.** (2010). Cyclic testing of tubular steel braces with CFRP reinforced net sections. *4th International Conference on Steel&Composite Structures*, July 21-23, Sydney, Australia (CD-ROM).

- Haydaroglu, C., Taskin, K., Celik, O. C.** (2011). Ductility enhancement of round HSS braces using CFRP sheet wraps. *EUROSTEEL 2011*, August 31-September 2, 2011, Budapest, Hungary.
- Higgins, C. ve Newell, J.** (2004). Confined steel brace for earthquake resistant design. *AISC Engineering Journal*, Fourth Quarter 2004, 41(4): pp.203-206.
- Holloman, J. H.** (1945). Trans. Metall. Soc. AIME. Vol. 162, pp. 268-90.
- Iwata, M., Kato, T. and Wada, A.** (2000). Buckling-restrained braces as hysteretic dampers. *Proc. STESSA 2000*, Quebec, PQ, pp. 33-38.
- Karataş Ç. ve Çelik O. C.** (2009). Burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeve sistemlerinin incelenmesi. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Gaziantep Şubesi, 3. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 8-9-10 Ekim, 2009 Gaziantep, Türkiye.
- Karataş Ç. ve Çelik O. C.** (2011). Çekirdeği alüminyum alaşımlı burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) tasarımı ve üretimi. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 4. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 8-9-10 Ekim, 2011 İstanbul, Türkiye.
- Karataş Ç. ve Çelik O. C.** (2012). Çelik ve alüminyum alaşım çekirdekli burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) histeretik davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. Teknik Rapor, No.110M779, TÜBİTAK MAG, Ankara, Türkiye.
- Kim, J. ve Choi, H.** (2004a). Behavior and design of structures with buckling-restrained braces. *Engineering Structures*, Vol. 26, Issue 6, pp. 693-706.
- Kim, J. ve Choi, H.** (2004b). Energy-based seismic design of structures with buckling-restrained braces. *Steel and Composite Structures*, Vol.4, No.6, pp. 437-452.
- Kimura, K., Yoshioka, K., Takeda, T., Fukuya, Z., Takemoto, K.** (1976). Tests on braces encased by mortar in-filled steel tubes. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, Architectural Institute of Japan (AIJ), pp. 1041-2.
- Kissell, J. R. ve Ferry, R. L.** (2002). *Aluminum Structures*. JOHN WILEY&SONS, INC, Second Edition, New York, ISBN 0-471-01965-8.
- Lemaitre, J. ve Chaboche, J. L.** (1990). *Mechanics of solid materials*. Cambridge University Press.
- Lin, M. L., Tsai, K., Hsiao, P., Tsai, C.** (2005). Compressive behaviour of buckling-restrained brace gusset connections. *Proceedings of the First International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, AESE 2005, July 19-21, Nagoya, Japan.
- Lin, M. L., Tsai, C. Y., ve Tsai, K. C.** (2006) Bi-directional substructure pseudo dynamic tests of a full-scale two story BRBF. Part 2: "Compressive Behavior of Gusset Plates", *100th Anniversary Earthquake Conference*, San Francisco, CA.

- Lopez, W. A. ve Sabelli, R.** (2004a). Seismic design of steel buckling-restrained braced frames. *Steel Tips, Structural Steel Education Council Technical Information & Product Service*, July.
- Lopez, W. A., Gwine, D., Lauck, T., Saunders, M.** (2004b). Structural design and experimental verification of a buckling-restrained braced frame system. *Engineering Journal*, 41(4): 177-186.
- Marmara Üniv., Teknik Eğitim Fak., Polimer Eğitimi Bölümü** (2009). Kişisel görüşme.
- Meritt, S., Uang, C. M., Benzoni, G.** (2003). Subassemblage testing of Star Seismic buckling restrained braces, Technical Report No. TR-2003/04, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- Mochizuki, S., Murata Y. Andou, N., and Takahashi, S.** (1979). Experimental study on buckling of unbonded braces under centrally applied loads. *Parts 1 and 2. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, Architectural Institute of Japan, pp 1623-6.
- Nakamura, H., Maeda, Y., Takeuchi, T., Nakata, Y., Sasaki, T., Iwata, M., Wada, A.** (2000). Fatigue properties of practical-scale unbonded braces. Nippon Steel Technical Report, No:82, July.
- Newell, J., Uang, C. M., Benzoni, G.** (2006). Subassemblage testing of CoreBrace buckling restrained braces. *Structural Research Project, Report No. TR-06701*, Department of Structural Engineering, University of California, San Diego.
- OPENSEES** (2006). *UC Regents, The Open System for Earthquake Engineering Simulation, Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California, Berkeley, CA.
- Rahai, A. R., Alinia, M. M., Salehi, S. M. F.** (2009). Cyclic performance of buckling restrained composite braces composed of selected materials. *International Journal of Civil Engineering*, Vol.7, No.1, March 2009.
- Rai, D. C.** (2002). Inelastic cyclic buckling of aluminum shear panels. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.128, No. 11, Nov. 1, pp. 1233-1237.
- Rai, D. C. ve Jain, S.** (2006). Inelastic buckling criteria for aluminum shear panels as energy dissipation devices. *STESSA 2006-Mazzolani&Wada*, London, ISBN 0-415-40824-5.
- Palazzo, G., Lopez-Almansa, F., Cahis, X., Crisafulli, F.** (2009). A low-tech dissipative buckling restrained brace. Design, analysis, production and testing. *Engineering Structures*, 31, 2152-2161 doi: 10.1016/j.engstruct.2009.03.015.
- Prasad, B.** (1992). Experimental investigation of sleeved column. *Proc. 33 rd AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, Dallas, TX.
- Sabelli, R. ve Lopez, W.** (2004). Design of buckling-restrained braced frames. *Modern Steel Construction*, 44 (3): 67-73.

- SAP2000 v14. (2009).** Structural Analysis Program. *Computers and Structures Inc.*
- Structural Welding Code-Steel (2008).** ANSI/AWS D1.1/D1.1M:2008. *American Welding Society*, Miami.
- Structural Welding Code-Aluminum (2008).** ANSI/AWS D1.2/D1.2M:2008. *American Welding Society*, Miami.
- Takeda, T. ve Kimura, K. (1979).** Experimental study on precast concrete shear walls-Part 6. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, Architectural Institute of Japan (AIJ); pp. 1677-8.
- Takeuchi, T., Hajjar, J. F., Matsui, R., Nishimoto, K., Aiken, I. D. (2010).** Local buckling restrained condition for core plates in buckling restrained braces. *Journal of Construction Steel Research* 66(2010), pp.139-149.
- Thornton, W. A. (1984).** Bracing connections for heavy construction, *Engineering Journal of AISC*, Vol.21, No.3, pp.139-148.
- Tremblay, R., Degrange, G., Blouin, J. (1999).** Seismic rehabilitation of a four-story building with a stiffened bracing system. *Proc. 8th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, pp. 549-554.
- TS-EN ISO 4136 (2011).** Metalik malzemeler-kaynaklar üzerinde tahribatlı deneyler-enine çekme deneyi, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Tsai, K. C. ve Lai, J. W. (2002).** A study of buckling restrained seismic braced frame. *Structural Engineering*, 17(2) 3–32.
- Tsai, K. C., Lin, M. L., Weng, Y. T., Lin, B. Z., Wang, K. J., Lai, J. W. ve Cheng, W. C. (2006).** Substructure pseudo dynamic performance of a full-scale steel buckling restrained braced frame. *STESSA 2006-Mazzolani&Wada*, 2006 Taylor&Francis Group, London, ISBN 0-415-40824-5.
- Uang C. M., Yu Q. S., Gilton C. S. (2000).** Effects of loading history on cyclic performance of steel RBS moment connections. *Proceedings of the 12th WCEE*, Upper Hutt, New Zealand, 2000.
- Usami, T., Ge, H., Luo, X. Q. (2009)** Experimental and analytical study on high-performance buckling restrained brace dampers for bridge engineering. *3rd International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering*, October 15-16, 2009, San Francisco.
- Usami, T., Wang, C. L., Funayama, J. (2012).** Developing high-performance aluminum alloy buckling restrained braces on series of low-cycle fatigue tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 41, Issue 4, pp. 643-661, April.
- Vargas, R. E. ve Bruneau, M. (2006).** Experimental investigation of the structural fuse concept. Technical Report MCEER-06-0005, March, Buffalo, NY, USA.
- Vargas, R. E. ve Bruneau, M. (2008).** Experimental validation of the structural fuse concept. *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China.

- Vargas, R. E. ve Bruneau, M.** (2009a). Experimental response of buildings designed with metallic structural fuses.II. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, April 2009/395, Vol.135, No.4, pp. 394-403.
- Vargas, R. E. ve Bruneau, M.** (2009b). Analytical response and design of buldings with metallic structural fuses.I. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, April 2009/387, Vol.135, No. 4, pp. 386-393.
- Wakabayashi, M., Nakamura, T., Katagihara, A., Morisono, T. ve Yokoyama, H.** (1973). Experimental study of elasto-plastic behavior of braces enclosed by precast concrete wall panels under horizontal cyclic loading. *Summaries of Technical Papers of Annual Meeting*, Architectural Institute of Japan (AIJ), pp. 1041-4.
- Watanabe, A., Hitomi, Y., Yaeki, E., Wada, A. and Fujimoto, M.** (1988). Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube. *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo-Kyoto, Japan, Vol.4, pp. 719-724.
- Whitmore, R. E.** (1952). Experimental investigation of stresses in gusset plates. bulletin No.16, *Engineering Experiment Station*, University of Tennessee.
- Wigle, V. R. Ve Fahnestock, L. A.** (2008). Finite element parametric studies of buckling-restrained braced frame connections, *The 14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, 2008, Beijing, China.
- Wigle, V. R. ve Fahnestock, L. A.** (2010). Buckling-restrained braced frame connection performance. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 66, Issue 1 January, pp. 65-74.
- Xie, Q.** (2005). State of the art of buckling-restrained braces in Asia. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(6): pp.727-748.
- Youngjiu, S., Meng, W., Yuanqing, W.** (2011). Experimental and constitutivemodel study of structural steel under cyclic loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, pp. 1185-1197.
- Zhou, F., Young, B.** (2009) Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests, *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 2009, Vol.47, pp. 1272-1280.
- Zhu, J. H. ve Young, B.** (2006). Tests and design of aluminum alloy compression members. *Journal Structural Engineering*. Vol.132, No. 7, July 1.
- Zsarnóczay, Á., Dunai, L.** (2011) Type testing of buckling restrained braces According to EN 15129-EWC800. Technical Report, Budapest University of Technology and Economics Department of Structural Engineering, March, 2011.
- Zsarnóczay, Á.** (2012). Influence of plastic mechanism development on the seismic performance of buckling restrained braced frames case study. *Conference of Researchers in Civil Engineering*, 19-20 June, Budapest, Hungary.
- Url-1** <<http://www.starseismic.eu>>, alındığı tarih: 11.05.2012.

EKLER

Ana metin içinde atıf yapılan ekler bölümler halinde düzenlenerek ve kendi içlerinde alt kısımlara ayrılarak aşağıda verilmiştir.

EK A: ÖN ÇALIŞMALAR

EK B: Numunelerin kupon deneyleri sonucu elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

EK C: Dış tüp şekildeğiştirme ölçerlerinin histeretik eğrileri

EK C1: BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri

EK C2: BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri

EK C3: BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri

EK C4: BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri

EK D: Çelik ve alüminyum numunelerin kaynaklı imalatına ilişkin kalite kontrol formları Cd-Rom içerisinde verilmiştir.

EK D1: Çelik numunelerin kaynaklı imalatının WPS ve PQR raporları

EK D2: Alüminyum numunelerin kaynaklı imalatının WPS raporu

EK D3: Alüminyum numunelerin kaynaklı imalatının radyografik kontrol raporu, ultrasonik test raporu ve sıvı penetrant test raporu

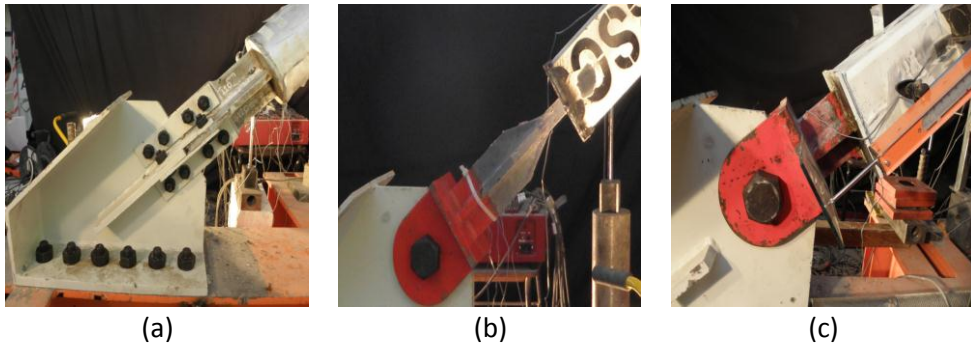
EK D4: A5183 alüminyum kaynak teli sertifikası

EK E: KÖSTER VGM5 yüksek dayanımlı tamir harcı basınç dayanım raporu

EK A ÖN ÇALIŞMALAR

A.1.1 Genel

Ön çalışmalar kapsamında tasarlanan, üretilen ve denenен numunelerin çekirdek elemanlarının geometrik bilgileri, Çizelge A.1’de, dış tüp geometrik bilgileri Çizelge A.2’de verilmektedir. Numunelerde öncelikli olarak olası her türlü uç detayı incelenmiştir (Şekil A.1). İç ve dış boşluk oluşturulması ve sürtünmesiz yüzey işlevinin artırılmasına yönelik farklı teknikler kullanılmıştır. Çelik numunelerde haçvari güçlendirme bölgesinin oluşturulmasında, berkitme levhalarının çekirdek üzerinde doğru yere kaynaklanarak kümülatif enerji sönümleme miktarının arttırılmasına yönelik incelemelerde bulunulmuştur. BRB-AC2-0 numunesinde akma dayanımı farklı alüminyum alaşımli çekirdekli ve çoklu bulonlu birleşim bölgesi olan BÖÇ üretimi gerçekleştirilmiş, boru enkesitli dış tüp kullanılmıştır. BRB-SC3-0 numunesinde çekirdek güçlendirme bölgesi burkulmayı önleyen ortam dışında bırakılarak, çekirdek akma bölgesindeki sürtünmesiz yüzeyin oluşturulmasına yönelik sonraki tasarımlara önemli yönlendirmeleri olan bilgiler edinilmiştir. Bu bölüm kapsamında üretilen toplam 4 adet BÖÇ, sonrasında tasarlanan ve tez çalışmasına esas olan 4 yeni BÖÇ’ün, üretim kolaylığına, işlevselliğine, enerji sönümleme kapasitelerinin arttırılmasına, çekme ve basınç pikleri arasındaki farkın azaltılmasına yönelik teknolojik bilgi edinimlerine alt yapı oluşturmuştur.



Şekil A.1 : Ön çalışmalar kapsamında tasarlanan ve denenен farklı uç tasarımları: (a) Çoklu bulonlu BÖÇ (BRB-AC2-0). (b) Tek bulonlu ve güçlendirme bölgesi serbest bırakılmış BÖÇ (BRB-SC3-0). (c) Tek bulonlu ve güçlendirme bölgesi burkulmayı önleyen ortamla sınırlandırılmış BÖÇ (BRB-SC1-0 ve BRB-SC2-0).

Çizelge A.1 : Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerin çekirdek geometrik özellikleri.

Numuneler	Toplam Çapraz Uzunluğu L (mm)	Burkulma Boyu (Mafsaldan Mafsala) $KL=L_1$ (mm)	Çekirdek Elemanı		
			Enkesit Boyutları $t \times b_{ysc}$ (mm)	Malzeme Kalitesi	Elastisite Modülü E (GPa)
BRB-SC1-0	2275	2110	PL-16 x 30	S235JR (Fe360)	195
BRB-SC2-0	2275	2110	PL-12 x 25	S355JR (Fe510)	204
BRB-SC3-0	2275	2110	PL-16 x 30	S235JR (Fe360)	195
BRB-AC2-0	2275	1991	PL-15 x 25	A6061-T6	71

Çizelge A.1 (devam) : Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerin çekirdek geometrik özellikleri.

Numuneler	Çekirdek Elemanı												
	Birleşim Bölgesi (Mafsallı)					Birleşim Bölgesi (Bulonlu)		Güçlendirme Bölgesi		Akma Bölgesi			Net Enkesit Alanı A_{sc} (mm ²)
	Alın Plakası Kalınlığı t_{ep} (mm)	Mafsallık Plakası Uzunluğu L_{kp} (mm)	Mafsallık Plakası Kenar Uzunluğu $b_{con}/2$ (mm)	Birleşim Bölgesi Uzunluğu L_{con} (mm)	Birleşim Bölgesi Genişliği b_{con} (mm)	Birleşim Bölgesi Uzunluğu L_{con} (mm)	b_{con} (mm)	L_{tr} (mm)	b_{tr} (mm)	L_{ysc} (mm)	b_{ysc} (mm)	t (mm)	
BRB-SC1-0	16	86	83	185	165	-	-	249	100	1410	30	16	480
BRB-SC2-0	15	86	83	184	165	-	-	264	98	1380	25	12	300
BRB-SC3-0	16	86	83	185	165	-	-	249	100	1270	30	16	480
BRB-AC2-0	-	-	-	-	-	138	137	267	115	1180	25	15	375

Çizelge A.2 : Ön çalışmalar kapsamındaki numunelerin dış tüp geometrik özellikleri.

Numuneler	Dış Tüp							Güvenlik
	Enkesit Boyutları B x D x T (mm)	Malzeme Kalitesi	DeneySEL Akma Gerilmesi $F_{ytüp}$ (N/mm ²)	Uzunluk $L_{tüp}$ (mm)	Atalet Momenti $I_{tüp}$ (mm ⁴)	Euler Burkulma Yükü $P_e = \pi^2 EI_{tüp} / (KL)^2$ (KN)	P_e / P_{ysc}	$P_e / P_{ysc} > 1.5$
BRB-SC1-0	□-140 x 140 x 5	S355JR (Fe510)	345	1768	8212500	3546.5	30.9	✓
BRB-SC2-0	□-140 x 140 x 5	S355JR (Fe510)	345	1738	8212500	3710.2	32.1	✓
BRB-SC1-0	□-140 x 140 x 5	S355JR (Fe510)	345	1768	8212500	3546.5	30.9	✓
BRB-AC2-0	φ -152 x 2.8	A6060-T66	160	1516	3653000	645	6	✓

Ön çalışmalar kapsamında denenen 4 numunenin özellikleri aşağıda verilmiştir:

- BRB-SC1-0 numunesi: Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak tek kat 0.2mm kalınlığında Teflon bant uygulanmıştır. Normal akma dayanımlı S235JR çelik çekirdekli ve S355JR kalitesinde dış tüplü numunenin akma bölgesi 1410mm'dir.
- BRB-SC2-0 numunesi: Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak burkulmayı önleyen ortam boyunca 3 kat 0.5mm kalınlığında Teflon bant ve üzerine kauçuklu gres yağı uygulanmıştır. S355JR kalitesinde çelik çekirdekli ve S355JR kalitesinde çelik dış tüplü olarak tasarlanan numunenin akma bölgesi uzunluğu 1380mm, akma bölgesi dikdörtgen en kesiti 12mm*25mm'dir.
- BRB-SC3-0 numunesi: BRB-SC1-0 numunesi ile aynı malzeme ve kesit özelliklerine sahip numunenin güçlendirme haçvari kesiti burkulmayı önleyen ortam dışında bırakılarak farklı bir uç tasarımı denenmiştir. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak 2 kat halinde 0.5mm kalınlığında Teflon bant uygulanmıştır. Akma bölgesi 1270mm'dir.
- BRB-AC2-0 numunesi: Çoklu bulonlu uç birleşimli numunenin A6061-T6 alüminyumlu alaşımlı çekirdekli, $\phi 152 \times 2.8$ boru enkesitli ve A6060-T66 alüminyum alaşımlı dış tüplü tasarlanıp denenmiştir. Akma bölgesi uzunluğu 1180mm'dir. Numunenin sürtünmesiz yüzeyi 3 kat 1mm kalınlığında Teflon bant üzerine kauçuklu gres yağı uygulanarak oluşturulmuştur.

A.1.2 DeneySEL Yöntem ve Gözlemler

A.1.2.1 BRB-SC1-0 numunesi

BRB-SC1-0 numunesinin deneySEL etiketi TURKBRACE-BRBSC1'dir. Numune öncelikle güney yönünde yüklenecek çekme etkisinde bırakılmıştır. BRB-SC1-0 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/2 \Delta_{by}^E$ deki (%0.16 görelî ötelenme oranı BRBKN +721 μ) yatay yerdeğiştirmesi ± 2.96 mm olan 2 çevrimde, $\pm 1/1.66 \Delta_{by}^E$ deki (%0.19 görelî ötelenme oranı, BRBKN +900 μ) yatay yerdeğiştirmesi ± 3.55 mm olan 2 çevrimde, $\pm 1/1.11 \Delta_{by}^E$ deki (%0.28 görelî ötelenme oranı, BRBKN +1160 μ) yatay yerdeğiştirmesi ± 5.32 mm olan 2 çevrimde elastik olarak davranmıştır.

Numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen $\pm\Delta_{by}^P$ akma yerdeğiştirmesi +5.41mm (%0.29 görelı ötelenme oranı)'dır. Deneyde numune çekme yüklemesinde $\pm\Delta_{by}^E$ için +5.91mm yerdeğiştirmesinde (%0.32 görelı ötelenme oranı) akma gözlenmiştir. Akma yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikinde BRBKN +1533 μ , T5 düzlem dışı yerdeğiştirme +0.15mm'dir. İlk basınç pikinde BRBKN'nin -1156 μ , T5'in -0.12mm olduğu gözlenmiştir. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde maksimum çekme kuvveti +98.62kN, maksimum basınç kuvveti ise -165.90kN'dur.

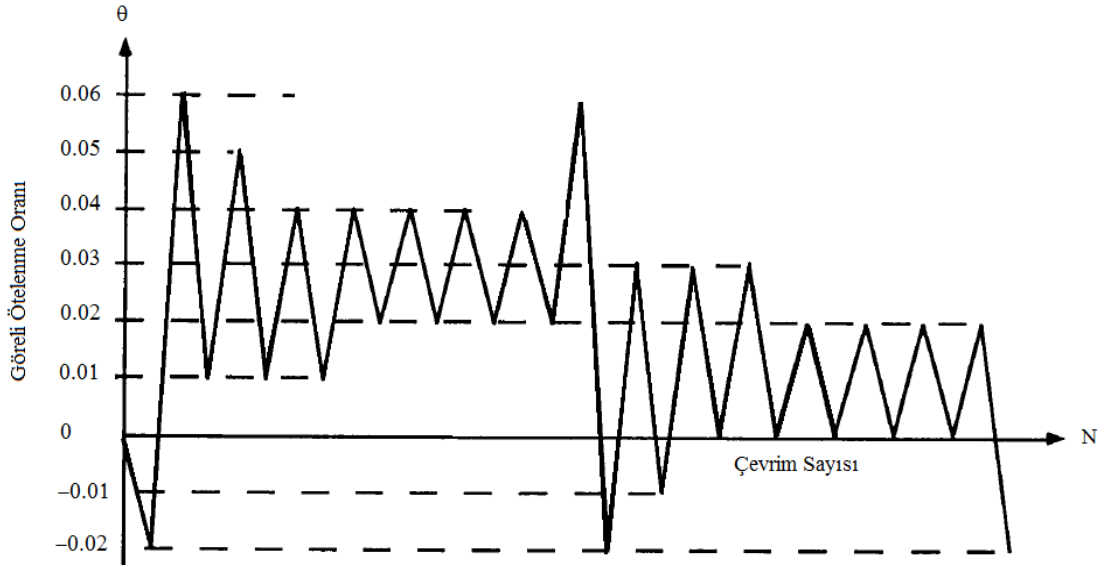
$\pm 1.5\Delta_{by}^E$ (± 8.87 mm yerdeğiştirme, %0.48 görelı ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +99.30kN, maksimum basınç kuvveti -212.00kN'dur.

$\pm 2.5\Delta_{by}^E$ (± 14.78 mm yerdeğiştirme, %0.79 görelı ötelenme oranı) seviyesinin ilk çekme pikinde maksimum kuvvet +102.50kN, BRBKN +4000 μ , basınç pikinde ise maksimum kuvvet -248.00kN'dur. Bu seviyenin ikinci çekme pikinde actuator kapasitenin basınç yüklemelerinde aşılacağı tahmin edilerek yükleme protokolü yeniden düzenlenmiştir. Düşük çevrimli yorulma yükleme protokolüne (*Low Cycle Fatigue*) göre öncelikle numunenin $\pm 2.03\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve ± 12.00 mm yatay yerdeğiştirmede (%0.65 görelı ötelenme oranı) η kümülatif plastik yerdeğiştirmesinin toplamda $200\Delta_{by}$ olmasını sağlayacak çevrim sayısı bulunmuştur. Sonuçta 96 çevrimin gerekli olduğu hesaplanmıştır.

± 12.00 mm yatay yerdeğiştirmede ($\pm 2.03\Delta_{by}^E$) çekme kuvvetlerinin +103.20kN~+112.30kN arasında olduğu ve basınç kuvvetlerinin -220.00kN~-248.00kN arasında değiştiği gözlenmiştir. BRBKN değerler ise çekme yüklemelerinde +4200 μ ~+5405 μ , basınç yüklemelerinde -1250 μ ~-1400 μ aralığında değiştiği gözlenmiştir. $\pm 2.03\Delta_{by}^E$ seviyesinin toplam 96 çevrimden oluşan yüklemesinin 20. çekme yüklemesinde BRBKN okuması yapılamamıştır. β basınç dayanımı düzeltme katsayısının 2.12~2.28 arasında, ω çekme dayanımı düzeltme katsayısının 0.81~0.89 arasında değiştiği gözlenmiştir. 96 çevrimin sonunda elde edilen η kümülatif plastik yerdeğiştirme $201.76\Delta_{by}$ 'dir. Numunede düşük çevrimli yorulma yükleme protokolü sonunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

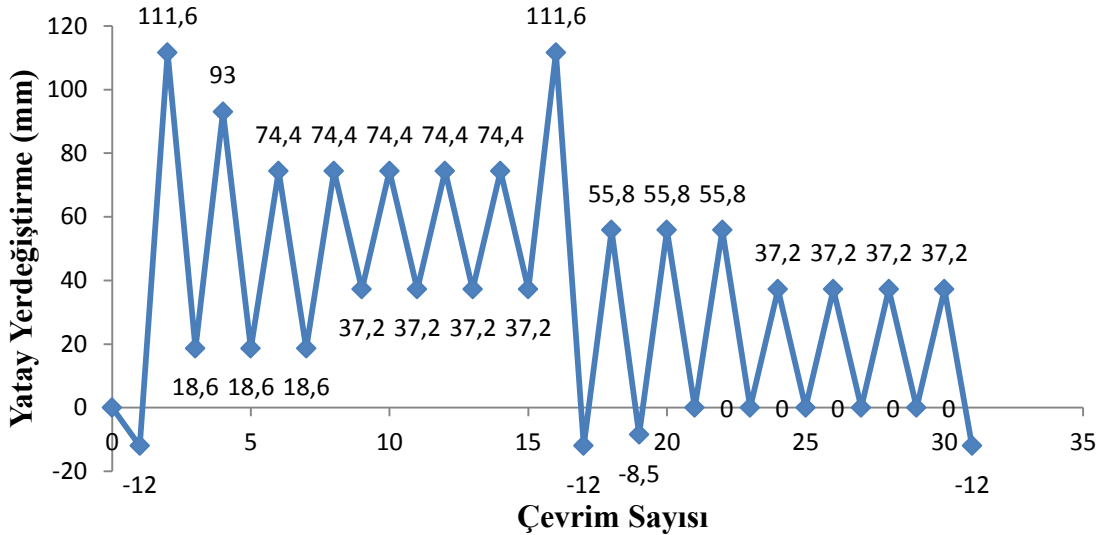
BRB-SC1-0 numunesine yakın fay (near-fault) etkisini dikkate alan yükleme protokolü uygulanmıştır (Uang ve diğ., 2000). şekil A.2'de verilen görelı ötelenme

oranlarına karşı gelen yerdeğiştirme değerleri hesaplanarak BRB-SC1-0 numunesi için yakın fay yükleme protokolü oluşturulmuştur (şekil A.3). Görelî telenme oranlarından yerdeğiştirmelere geçişte deney düzeneği kiriş st kotundan actuator merkez noktası arasındaki 1860mm’lik uzunluk alınmıştır.



şekil A.2 : Yakın fay yükleme protokolü (Uang ve diğ., 2000).

BRB-SC1-0 numunesi yakın fay yükleme protokolü

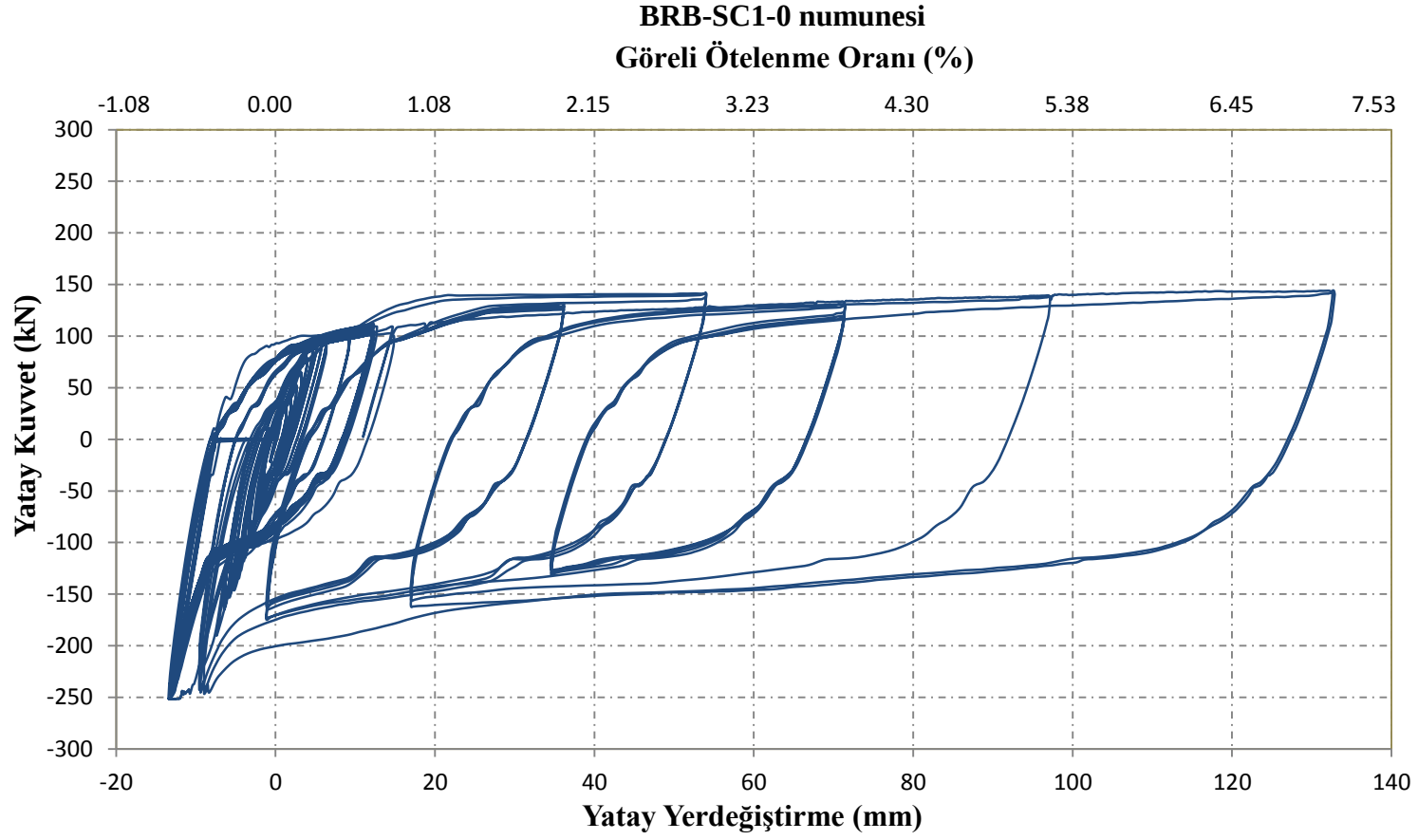


şekil A.3 : BRB-SC1-0 numunesi yakın fay yükleme protokolü.

Yakın fay yükleme protokolünde ilk olarak -%0.65 grel öteleme oranına karşı gelen yatay yerdeğiştirme değeri -12.00mm ile basınç yükleme yapılmıştır. +%6 grel öteleme oranı olan +111.60mm ile BRB-SC1-0 numunesine en büyük çekme yükleme uygulanmıştır. +%1 grel öteleme oranında ve +18.80mm yatay

yerdeğiştirmede çekme deplasmanının şiddeti düşürölmüştür. +%5 görelö öteleme oranında +93.00mm yatay yerdeğiştirmede çekme yapıldıktan sonra tekrar +%1 görelö ötelenme oranına gidilmiştir. +%4 görelö öteleme oranında +74.40mm yatay yerdeğiştirmede çekme yapıldıktan sonra devam eden 4 çevrimde çekmede +%4 görelö öteleme oranına (74.40mm yatay yerdeğiştirme), çekme deplasmanının şiddeti düşürölerek +%2 görelö ötelenme oranına (+37.20mm yatay yerdeğiştirme) gidilmiştir. +%6 görelö ötelenme oranı olan +111.60mm çekme yükleme yapıldıktan sonra -%0.65 görelö öteleme oranında ve -12.00mm yatay yerdeğiştirmede basınç pikine gidilmiştir. +%3 görelö ötelenme oranında ve +55.80mm yatay yerdeğiştirmede çekme pikinden sonra -%0.46 görelö ötelenme oranında -8.50mm yatay yerdeğiştirmede basınç piki uygulanmıştır. Sonraki çevrimde +%3 görelö öteleme oranında çekme pikine gidilmiş yerdeğiştirme sıfırlanmıştır. Aynı çevrimden bir kez daha yapılarak +%2 görelö ötelenme oranı +37.20mm yatay yerdeğiştirme çekme pikine gidilmiştir. Bu şekilde 4 çevrim yapıldıktan sonra yakın fay yükleme protokolü -%0.65 görelö öteleme oranında -12.00mm yatay yerdeğiştirme yapılarak sonlandırılmıştır. BRB-SC1-0 numunesinde, birleşimlerinde ve deney düzeneğinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Yakın fay yükleme protokolü sonunda BRB-SC1-0 numunesinin η kümölatif plastik yerdeğiştirme toplamda $381.56\Delta_{by}$ 'dir.

Uygulanan yükleme protokollerini geçen numunede kopma gerçekteşmemiştir. BRB-SC1-0 numunesinin deneysel yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrişi şekil A.4'de verilmektedir. BRB-SC1-0 numunesinin deney fotoğrafları şekil A.5'de verilmektedir. Çaprazda basınç yüklemelerinde herhangi bir burkulma gözlenmemiştir. Birleşimde bulunan bulon ve kaynaklarda herhangi bir sorunla karşılaşılmamıştır.



Şekil A.4 : BRB-SC1-0 numunesi histeretik eğrisi.



(a)



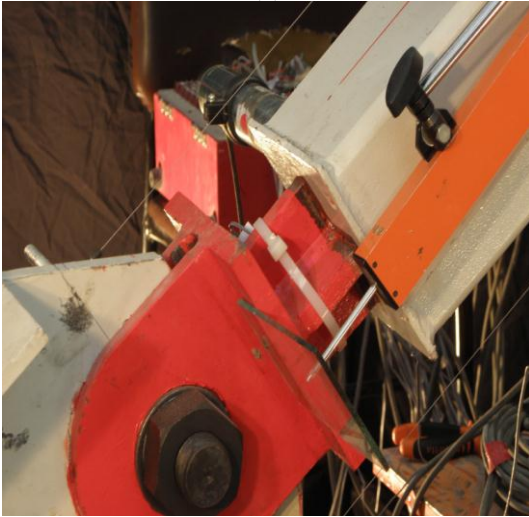
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

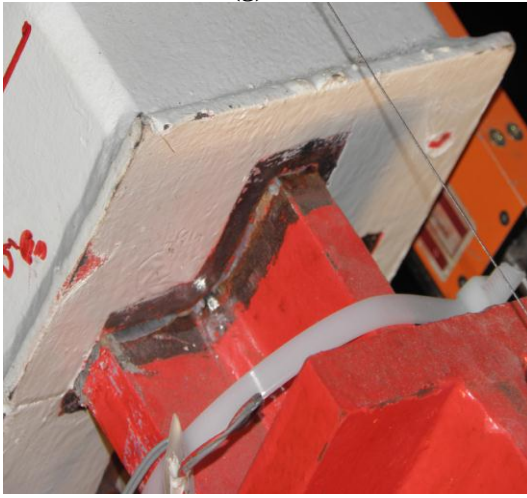
Şekil A.5 : BRB-SC1-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $-1/2\Delta_{by}^E$ 'de alt birleşim elastik davranış. (c) $+1/2\Delta_{by}^E$ 'de üst birleşimin elastik davranış. (d) $-1/1.66\Delta_{by}^E$ 'de düzlem dışı durum. (e) $+1/11\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+5.32\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede (%0.28 görelî ötelenme oranı) alt uç eksenel açılımı. (f) $+1/11\Delta_{by}^E$ seviyesinde alt uç elastik davranış.



(g)



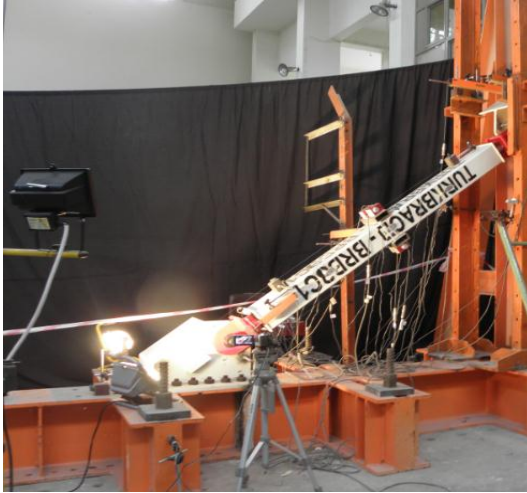
(h)



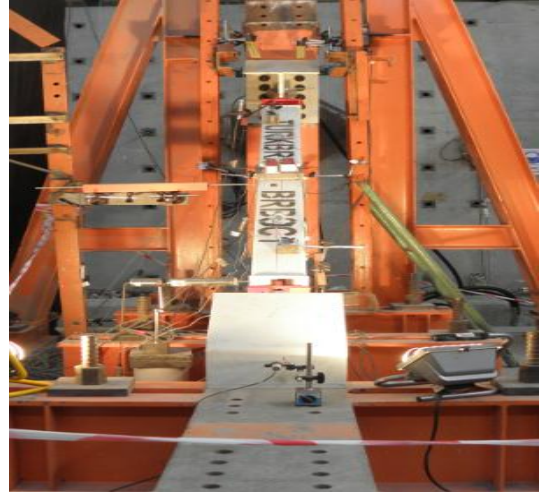
(i)



(i)



(j)

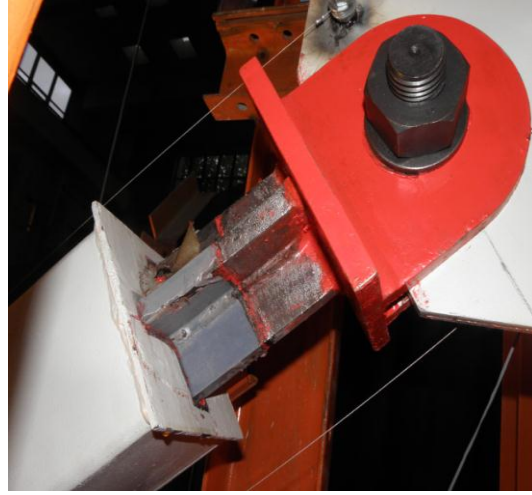


(k)

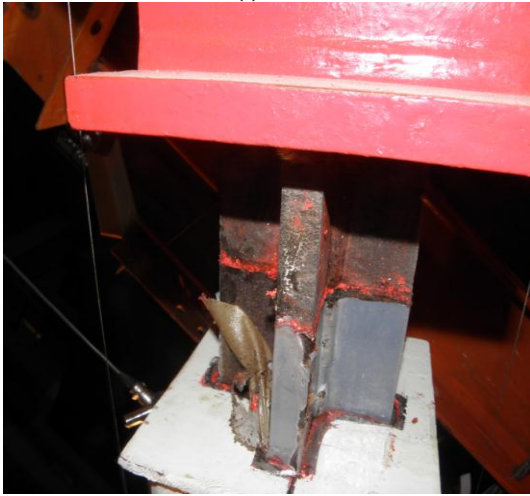
Şekil A.5 (devam) : (g) $+\Delta_{by}^E$ seviyesindeki +5.91mm (%0.32 görelî ötelenme oranı) yatay akma yerdeğıştirmesi. (h) $-\Delta_{by}^E$ de numunenin genel görünüşü. (i) Düşük çevrimli yükleme protokolü 40. çevrimde ve +12.00mm (%0.65 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt birleşim. (i) 40. çevrimde üst birleşim. (j) Düşük çevrimli yükleme protokolünde 96. çevrim ($201.76\Delta_{by}$) sonunda genel görünüş. (k) 96. çevrim sonunda düzlem dışı durum.



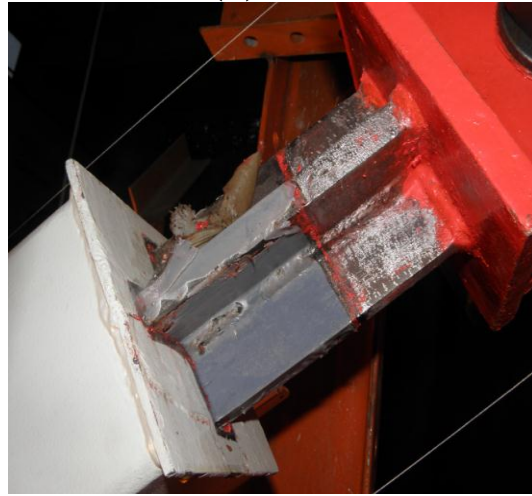
(l)



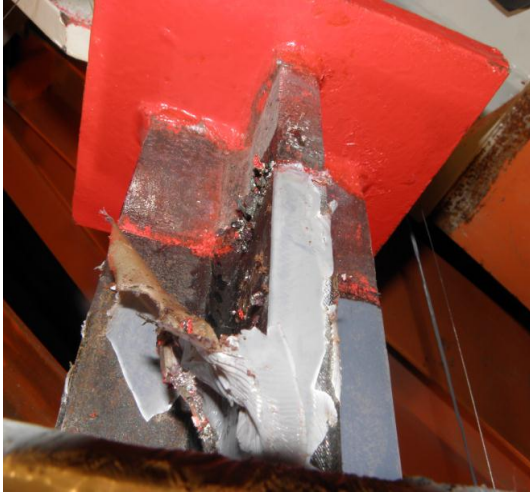
(m)



(n)



(o)



(ö)

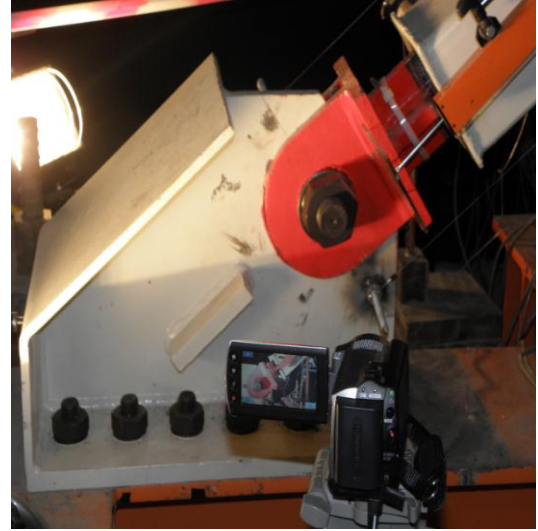


(p)

Şekil A.5 (devam) : (l) +%3 görelî ötelenme oranı ve +55.80mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel yerdeğiştirme. (m) +%4 görelî ötelenme oranında ve +74.40mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (n) +%6 görelî ötelenme oranı ve +111.60mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (o) +%6 görelî öteleme oranında üst uç yakın görünüş. (ö) +%6 görelî ötelenme oranında üst uçta Teflon sıyrılması. (p) %6 görelî ötelenme oranında üst uç düzlem dışı durum.



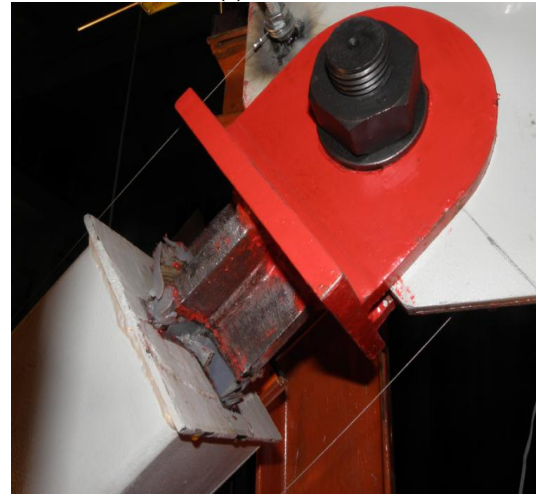
(r)



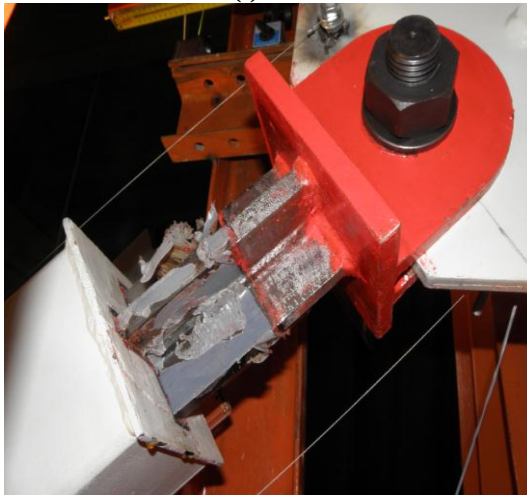
(s)



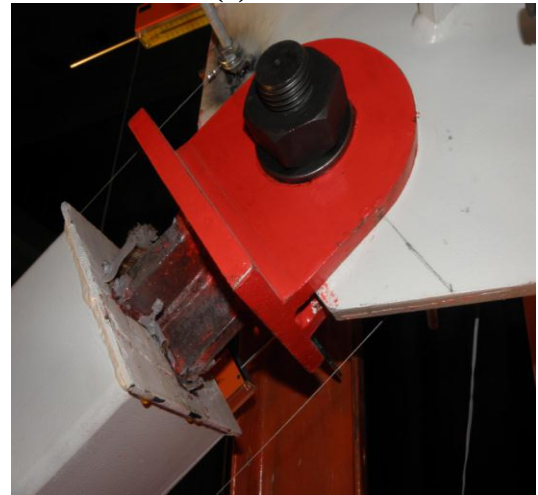
(t)



(u)



(ü)



(v)

Şekil A.5 (devam) : (t) +%6 görelî ötelenme oranında üst uç birleşim stabilitesi. (u) +%6 görelî ötelenme oranında alt uç birleşim stabilitesi. (ü) +%5 görelî ötelenme oranında ve +93.00mm yatay yerdeğıştirmede üst uç eksenel açılması. (v) +%1 görelî öteleme oranında ve +18.60mm yatay yerdeğıştirmede üst uç eksenel kapanması. (y) +%6 görelî ötelenme oranında üst uçta Teflon sıyrılması. (z) -%2 görelî ötelenme oranında ve -12.00mm yatay yerdeğıştirmede üst uç eksenel kapanması.

BRB-SC1-0 numunesinin deney sonrası kaynak dikişlerinde ve bulonlu birleşimlerinde herhangi bir hasar oluşmamıştır. Deney sonrası numunenin birleşim durumunu gösteren fotoğraflar Şekil A.6’da gösterilmektedir.



Şekil A:6 : (a) Alt uç birleşim bulonlu birleşim durumu. (b) Üst uç kaynaklı birleşim durumu. (c) Üst uçta oluşan teflon hasarı. (d) Alt uç düzlem dışı durum. (e) Numunenin deney sonrası düzlem dışı durumu. (f) Deney ekibi (sol baştan): Araş.Gör. Cem Demir, Araş. Gör. Çiğdem Karataş, Prof.Dr.Oğuz Cem Çelik, İnş. Müh. Seçkin Çetinkaya.

A.1.2.2BRB-SC2-0 numunesi

BRB-SC2-0 numunesinin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBSC2'dir. Numune ilk olarak güney doğrultuda yüklenerek çekme etkisinde bırakılmıştır. BRB-SC2-0 numunesinin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.7'de verilmektedir.

BRB-SC2-0 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ 'ündeki (%0.095 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi ± 1.77 mm olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ 'ündeki (%0.19 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi ± 3.53 mm olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ 'ündeki (%0.28 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi ± 5.30 mm olan 2 çevrimde elastik davranmıştır. Elastik bölgede ilk çevrimde çekme yüklemesi altında BRBKN +700 μ , basınç etkisinde -660 μ , ikinci elastik çevrimde çekme yüklemesinde +1150 μ , basınç yüklemesinde -1300 μ , üçüncü elastik çevrimde çekme etkisinde +1900 μ , basınç etkisinde -2000 μ değeri okunmuştur.

BRB-SC2-0'ın statik itme analizi ile tahmin edilen çekme $\pm \Delta_{by}^P$ akma yerdeğiştirmesi ± 6.62 mm (%0.36 görelî ötelenme oranı)'dır. Numunede çekme yüklemesinde $\pm \Delta_{by}^E$ için +6.98mm yerdeğiştirmesinde (%0.38 görelî ötelenme oranı) akma gerçekleşmiştir. Metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekildeğiştirme ölçerinden ilk çekme pikinde +2170 μ , basınç pikinde -4800 μ birim şekildeğiştirme okuması yapılmıştır. Akma yüklemesinin 2. çekme pikinde BRBKN +3350 μ , ikinci basınç pikinde -5700 μ değeri okunmuştur. Bu değerler kupon deneylerinde elde edilen akma yerdeğiştirmesi birim şekildeğiştirme değerlerine yakındır. Akma yerdeğiştirmesinde, bayrak levhalarında, birleşimlerde, çaprazın genel durumunda herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. $\pm \Delta_{by}^E$ seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +93.00kN, maksimum basınç kuvveti -105.00kN'dur. Bu seviyede T5 düzlem dışı yerdeğiştirmenin -0.02mm~-0.32mm arasında değıştiğı gözlenmiştir.

$\pm 1.5 \Delta_{by}^E$ (± 10.47 mm yerdeğiştirme, %0.56 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +91.00kN, maksimum basınç kuvveti -106.00kN'dur. Bu seviyede BRBKN çekme piklerinde 3400 μ ~4300 μ arasında, basınç piklerinde ise -6000 μ ~-6300 μ arasında değerler okunmuştur.

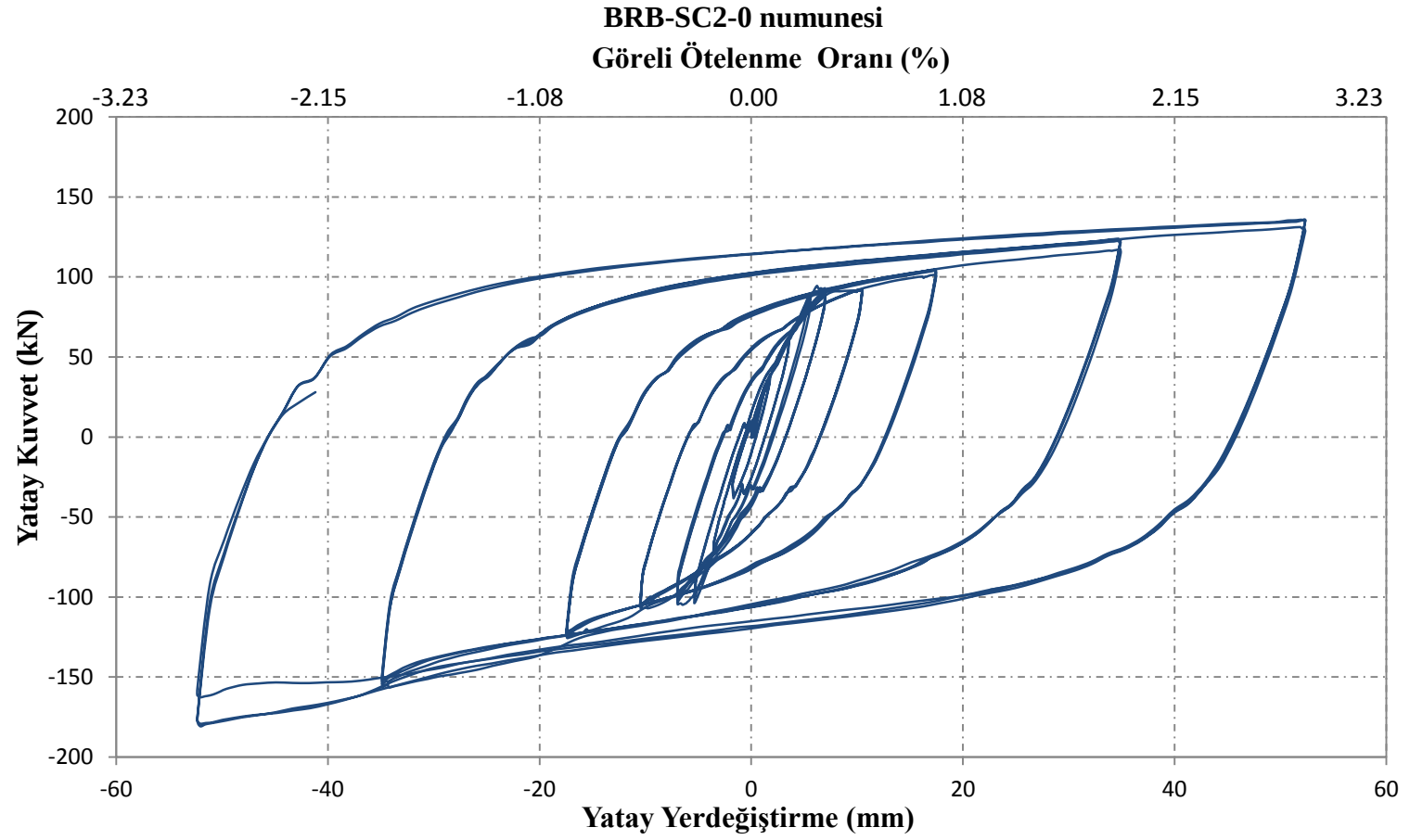
$\pm 2.5 \Delta_{by}^E$ (± 17.45 mm yerdeğiştirme, %0.94 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +103.40kN, maksimum basınç kuvveti

-123.00kN'dur. BRBKN $\pm 2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinin ilk çekme pikine giderken +99.57kN kuvvetine karşı gelen +6881 μ 'de hasarlanmıştır. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.15~1.23 arasındadır. T5 düzlem dışı yerdeğiştirme bu seviyenin son çekme pikinde -0.42mm olarak not edilmiştir. Bu seviyede bayrak levhalarında, birleşimlerde ve çaprazın genel stabilitesinde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

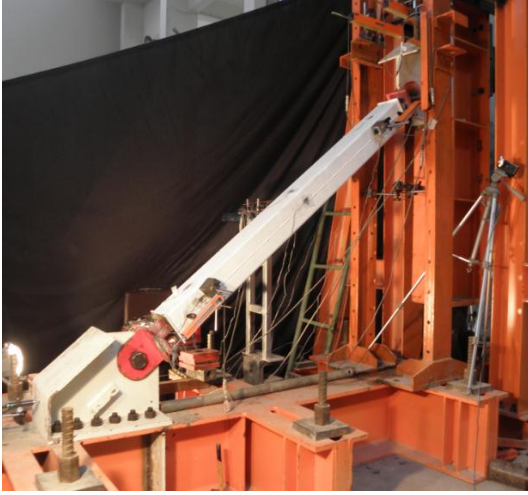
$\pm 5\Delta_{by}^E$ (± 34.90 mm yerdeğiştirme, %1.88 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +123.00kN, maksimum basınç kuvveti -154.00kN'dir. Bu seviyede β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.22~1.32 arasındadır. T5 düzlem dışı yerdeğiştirmesi seviyenin 2. çekme pikinde -0.44mm olarak ölçülmüştür.

$\pm 7.5\Delta_{by}^E$ (± 52.35 mm yerdeğiştirme, %2.82 görelî ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +135.50kN, maksimum basınç kuvveti -176.70kN'dur. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.17~1.37 arasındadır. Numune $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ ve %2.82 görelî öteleme oranı seviyesinde 4. ve son çekme pikine giderken -41.18mm yerdeğiştirme ve +28.03kN'da çekirdekten kopmuştur. Kopma sonrasında yapılan incelemelerde bayrak plakalarında, birleşim elemanlarında herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir.

Deneyisel çalışma sonucunda BRB-SC2-0 için maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %28 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Deneyisel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.47, β basınç dayanım düzeltme katsayısı 1.28'dir. Bu değerler kupon deneylerinden ve pushover analizi ile elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında β basınç dayanım düzeltme katsayısı deneylerde β_E/β_P oranı 1.11'dir. Şekil A8'de BRB-SC2-0 numunesinin deney fotoğrafları verilmektedir.



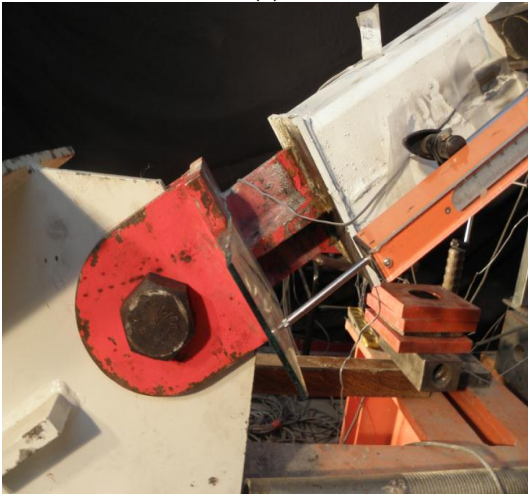
Şekil A.7 : BRB-SC2-0 numunesi histeretik eğrisi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

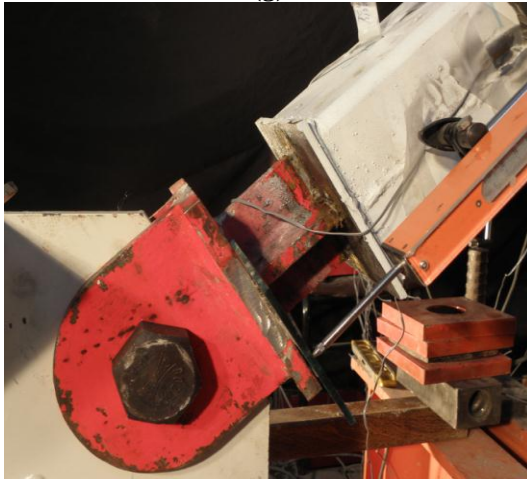
Şekil A.8 : BRB-SC2-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $-1/4\Delta_{by}^E$ de 1.77mm (%0.10 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt birleşim düzlem dışı elastik davranış. (c) $+3/4\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve 5.30mm (%0.28 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç elastik davranış. (d) $-3/4\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve 5.30mm yatay yerdeğıştirmede üst uç elastik davranış. (e) $+\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+6.98\text{mm}$ (%0.38 görelî ötelenme oranı) yatay akma yerdeğıştirmesinde eksenel alt uç açılımı. (f) $+\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+6.98\text{mm}$ yatay akma yerdeğıştirmesinde eksenel üst uç açılımı.



(g)



(h)



(i)



(j)

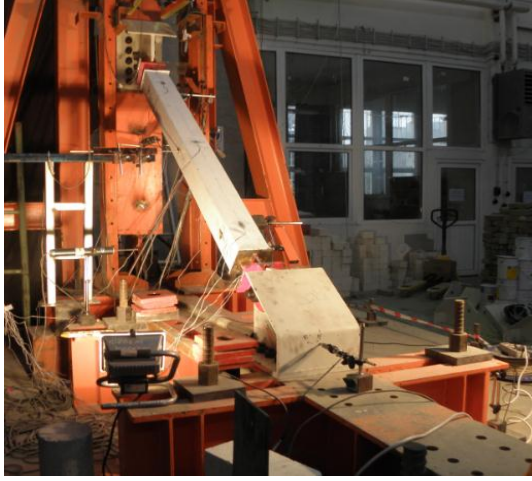


(k)



(l)

Şekil A.8 (devam) : (g) $-\Delta_{by}^E$ seviyesindeki -6.98mm ($\%0.38$ görelî ötelenme oranı) yatay basınç yüklemesinde alt uç eksenel kapanması. (h) $-\Delta_{by}^E$ de -6.98mm yatay basınç yüklemesinde üst uç eksenel kapanması. (i) $+1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve $+10.47\text{mm}$ ($\%0.56$ görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel çekme yerdeğiştirmesi. (j) $+1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+10.47\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel çekme yerdeğiştirmesi. (k) $-1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve -10.47mm yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel kapanması. (l) $-1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve -10.47mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel kapanması.



(m)



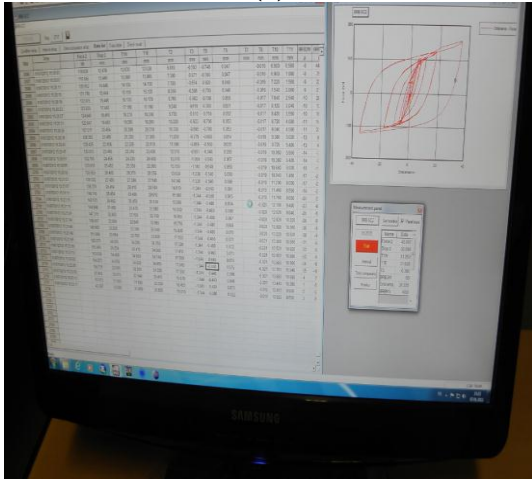
(n)



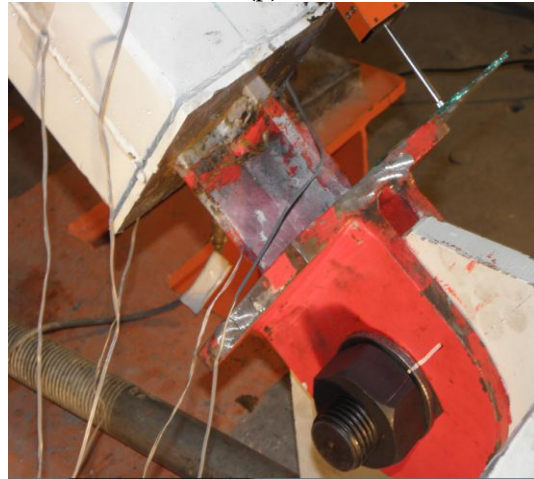
(o)



(p)



(r)



(s)

Şekil A.8 (devam) : (m) $-2.5\Delta_{by}^E$ seviyesindeki $+17.45\text{mm}$ (%0.94 görelî ötelenme oranı) genel görünüş. (n) $+2.5\Delta_{by}^E$ de $+17.45\text{mm}$ yatay çekme yüklemesinde üst uç eksenel yerdeğıştirmesi. (o) $-2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve -17.45mm yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel basınç yerdeğıştirmesi. (p) $-2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde -17.45mm yatay yerdeğıştirmede üst uç eksenel basınç yerdeğıştirmesi. (r) $\pm 2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde sistem odası Visual Log bilgisayar programı deney kaydı. (s) $\pm 5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve $+34.90\text{mm}$ (%1.88 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede alt uç eksenel yerdeğıştirmesi.



(u)



(v)



(y)



(z)

Şekil A.8 (devam) : (u) $+7.5\Delta_{by}^E$ seviyesindeki $+52.35\text{mm}$ (%2.81 görelî ötelenme oranı) yatay çekme yüklemede üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (v) $-7.5\Delta_{by}^E$ de -52.35mm yatay basınç yüklemede üst uç eksenel yerdeğiştirmesi. (y) $\pm 7.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve $+52.35\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede alt uç eksenel çekme yerdeğiştirmesi. (z) Deney sonrası BRB-SC2-0 numunesi genel durum.

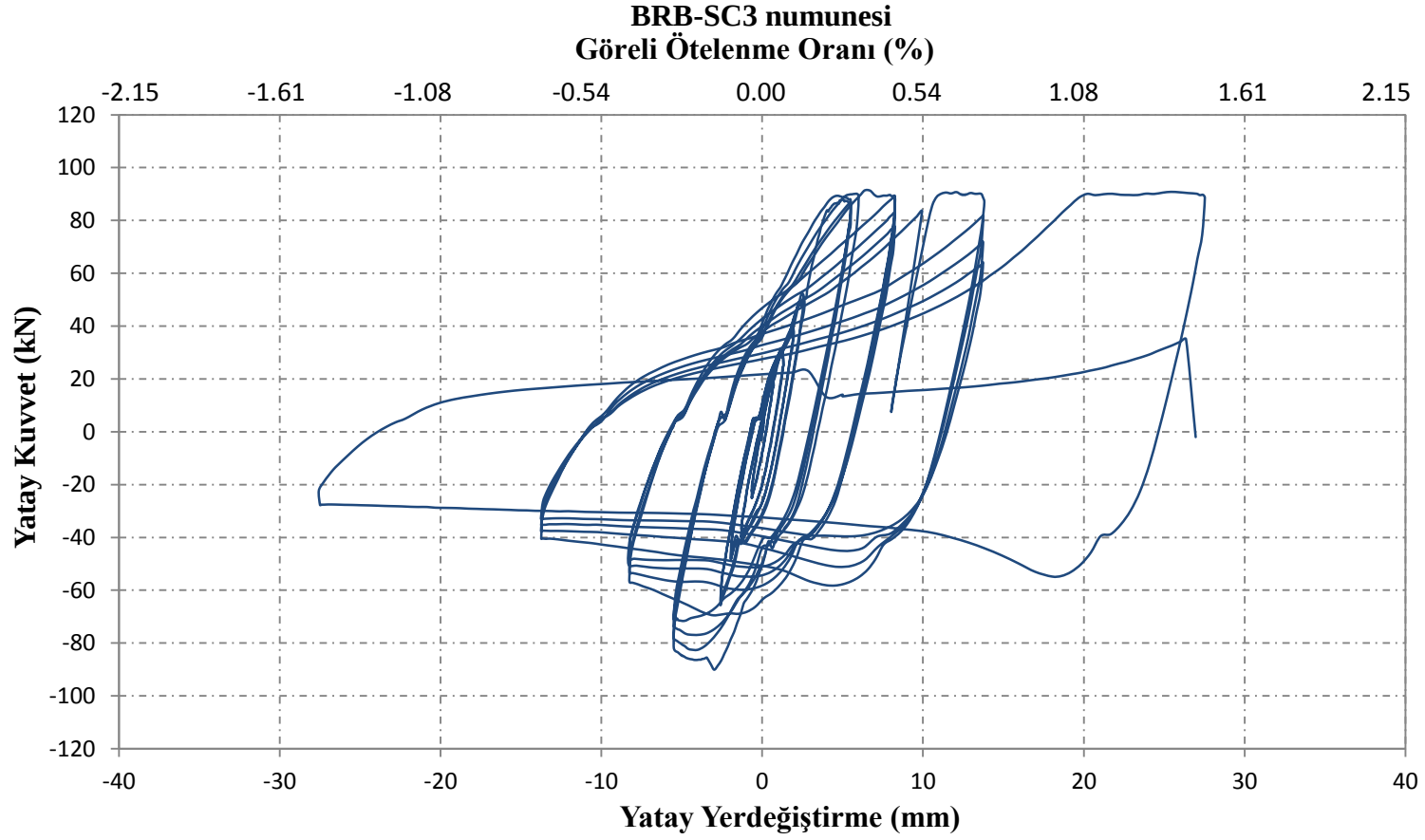
BRB-SC2-0 numunesinin deney sonrası kaynak dikişlerinde ve bulonlu birleşimlerinde bir hasar oluşmamıştır.

A.1.2.3 BRB-SC3-0 numunesi

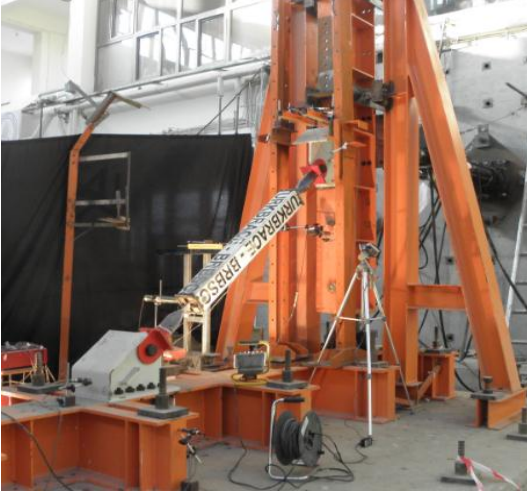
BRB-SC3-0 numunesinin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBSC3'dür. BRB-SC3-0 numunesinin deneysel yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.9'da verilmektedir. Numune güney yönünde çekme etkisinde bırakılarak deneye başlanmıştır. $\pm 1/8.46\Delta_{by}^E$ deki (%0.03 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 0.65\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 1/4.26\Delta_{by}^E$ deki (%0.07 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.29\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 1/2.13\Delta_{by}^E$ deki (%0.14 görelî ötelenme oranı, BRBKN -691 μ) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 2.58\text{mm}$ olan 2 çevrimde elastik davranmıştır. BRB-SC3-0 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen $\pm \Delta_{by}^P$

akma yerdeğiştirmesi +5.41mm (%0.29 görelı ötelenme oranı)'dır. Numunede çekme yüklemede $\pm\Delta_{by}^E$ için +5.50mm yerdeğiştirmede (%0.30 görelı ötelenme oranı) akma gözlenmiştir. Akma yerdeğiştirme seviyesinin ilk çekme pikinde BRBKN +1119 μ , ilk basınç pikinde BRBKN -950 μ 'dır. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde maksimum çekme kuvveti +88.06kN, maksimum basınç kuvveti -81.00kN'dur. $\pm1.5\Delta_{by}^E$ (±8.25 mm yerdeğiştirme, %0.44 görelı ötelenme oranı) seviyesinde elde edilen maksimum çekme kuvveti +89.20kN, maksimum basınç kuvveti -56.00kN'dur. Aynı seviyede ilk çekme pikinde BRBKN +1162 μ , T5 düzlem dışı +16.40, ilk basınç pikinde BRBKN -1068 μ , T5 düzlem dışı -18.10mm'dir. Çekme piklerinden elde edilen kuvvetler basınç piklerinden yüksektir. Bu seviyenin 4. son basınç pikinde T5 düzlem dışı yerdeğiştirme -20.00mm'dir; bu değer numunenin önemli ölçüde düzlem dışına doğru hareket ettiğini göstermektedir. Bu hareket burkulma şeklinde değil, uçtaki serbest çekirdek bölgesinin düzlem dışı eğilmesi ve tüm çaprazı düzlem dışına ötelemesi şeklindeyir. $\pm2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinin ilk çekme pikinde (±13.75 mm yerdeğiştirmede, %0.74 görelı ötelenme oranı) maksimum kuvvet +87.00kN, maksimum basınç kuvveti -41.00kN'dir. Seviyenin ilk çekme pikinde T5 düzlem dışının 27.50mm'ye ulaştığı gözlenmiştir.

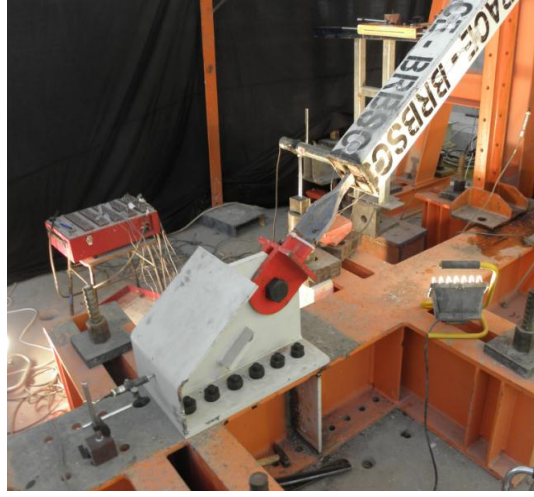
$\pm5\Delta_{by}^E$ seviyesinde (±27.50 mm yerdeğiştirmede %1.48 görelı ötelenme oranı) belirlenen ilk çekme pikine ilişkin kuvvet +88.89kN, ilk basınç pikindeki kuvvet -27.50kN'dur. Numune yatay kuvvet- yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisinde ani çekme kuvveti +18.00kN olarak belirlenmiştir. Numune $\pm5\Delta_{by}^E$ seviyesinde 2. basınç pikine giderken üst uçtan kopmuş ve deney sona ermiştir. Bu numuneden beklenen performansın elde edilemediği şekil A.9'dan açıkça görölmektedir. Çaprazda çekirdeğin rijitleştirilmiş bölgeye geçişinde serbest bırakılan bölümü tüm davranışı olumsuz yönde yönlendirmiştir. Elastik çevrimlerde çekme ve basınç pikleri birbirine yakın değerler almasına karşın inelastik çevrimlere girdikçe bu serbest uç bölümlerinde çekirdek kesitinın zayıf eksenı etrafında eğilmeler oluşmuş ve böylece basınç kuvvetlerinde düşüşler yaşanmıştır; ikinci mertebe etkilerinin artması ile BÖÇ davranışı klasik çapraz davranışına yakın bir duruma gelmiştir. Yinede burkulması önlenmemiş bir çaprazla karşılaştırıldığında önemli miktarlara ulaşan histeretik enerji elde edilmiştir. Bu durum, görelı olarak daha dolu olan histeretik eğriden de anlaşılmaktadır. BRB-SC3-0 numunesinin deney fotoğrafları şekil A.10'da verilmektedir.



Şekil A.9 : BRB-SC3-0 numunesi histeretik eğrisi.



(a)



(b)



(c)



(d)

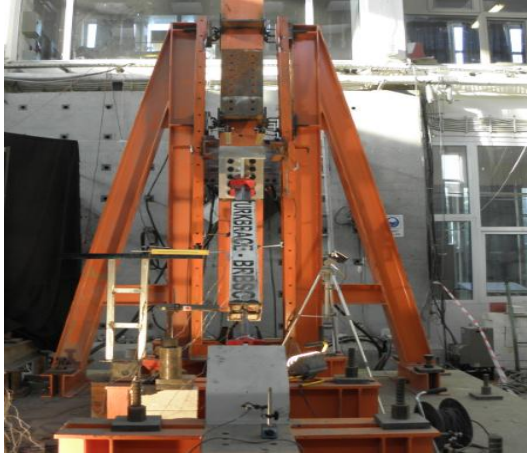


(e)



(f)

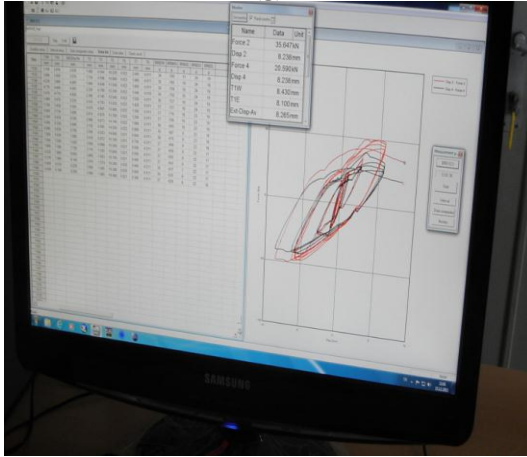
Şekil A.10 : BRB-SC3-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $\pm 1/8.46\Delta_{by}^E$ 'de alt birleşim elastik davranış. (c) $+1/4.26\Delta_{by}^E$ 'de üst birleşim elastik davranış. (d) $-1/4.26\Delta_{by}^E$ 'de üst birleşim önden görünüş. (e) T5 orta nokta düzlem dışı LVDT yerleşimi ve T7 dış tüp alt nokta düzlem dışı LVDT yerleşimi. (f) Alt uç BRBKN strain-gauge'nin çekirdekten çıktığı nokta.



(g)



(h)



(i)



(j)

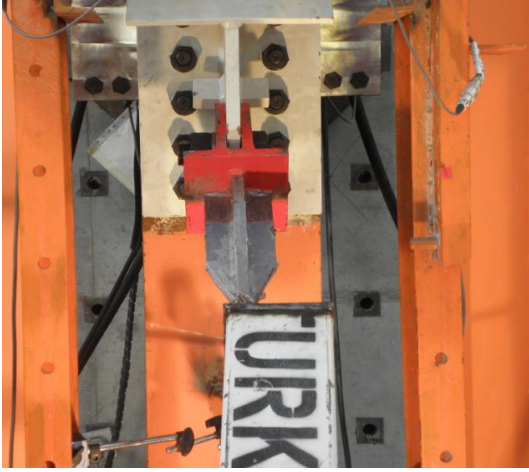


(k)

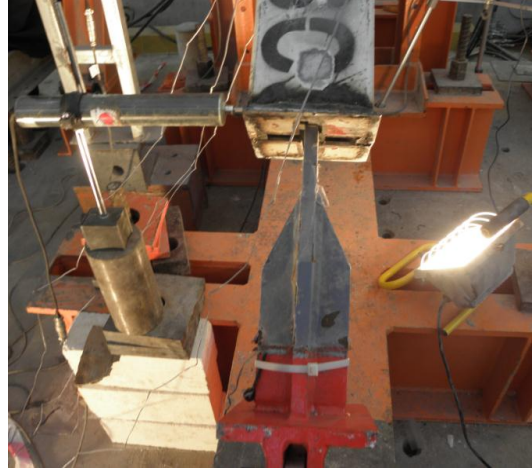


(l)

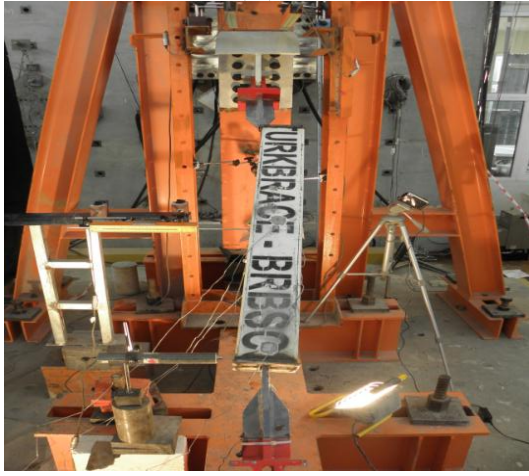
Şekil A.10 (devam) : (g) $+\Delta_{by}^E$ seviyesindeki $\pm 5.50\text{mm}$ (%0.30 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede düzlem dışı durum. (h) $+\Delta_{by}^E$ seviyesinde $+5.50\text{mm}$ yatay yerdeğıştirmede üst uç görünüşü. (i) $\pm 1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde sistem odası Visual Log bilgisayar programı deney kaydı. (j) $-1.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde -8.25mm (%0.44 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede üst uçta oluşan burkulma. (k) $-2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde 1. basınç pikinde ve -13.75mm (%0.74 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğıştirmede üst uçta oluşan burkulmanın devam etmesi. (l) $-2.5\Delta_{by}^E$ seviyesinde 4. basınç pikinde ve -13.75mm yatay yerdeğıştirmede üst uçta oluşan burkulmanın artması.



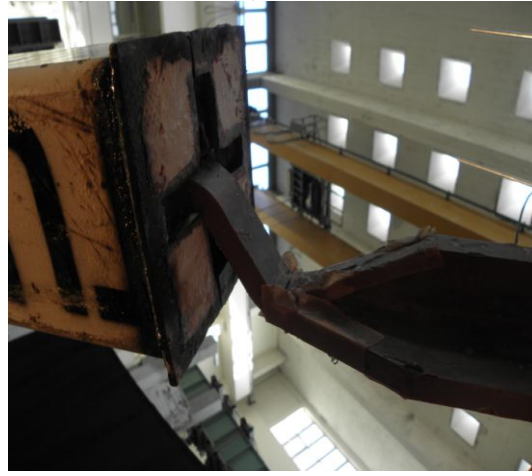
(m)



(n)



(o)



(p)

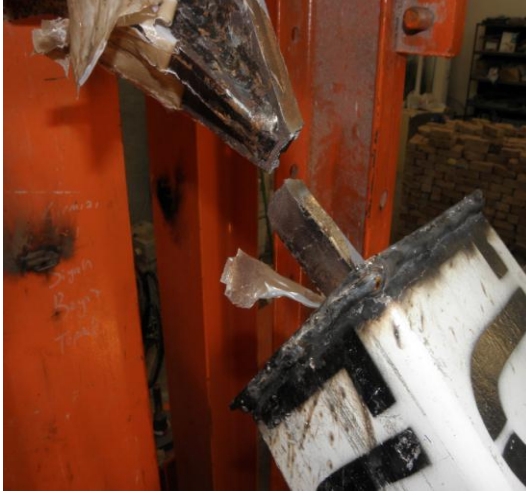


(r)

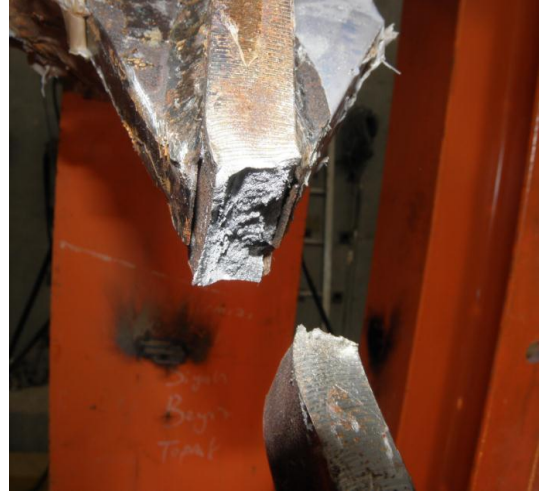


(s)

Şekil A.10 (devam) : (m) $+5\Delta_{by}^E$ seviyesindeki $+27.50\text{mm}$ (%1.48 görel ötelenme oranı) yüklemesinde numunenin düzlem dışı durumu. (n) $+5\Delta_{by}^E$ de $+27.50\text{mm}$ yatay çekme yüklemesinde alt uç eksenel yerdeğiştirmesi. (o) $-5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve -27.50mm yatay yerdeğiştirmede numunenin düzlem dışı durumu. (p) $-5\Delta_{by}^E$ seviyesinde -27.50mm yatay yerdeğiştirmede üst uç eksenel basınç yerdeğiştirmesi ve burkulmuş çekirdek enkesiti. (r) Çekirdek akma-güçlendirme geçiş noktasında yerel burkulmanın görünüşü. (s) $-5\Delta_{by}^E$ seviyesinde ve -27.50mm yatay basınç yerdeğiştirmesinde yerel burkulmadan dolayı oluşan kesit yırtılması.



(t)



(u)



(ü)



(v)



(y)



(z)

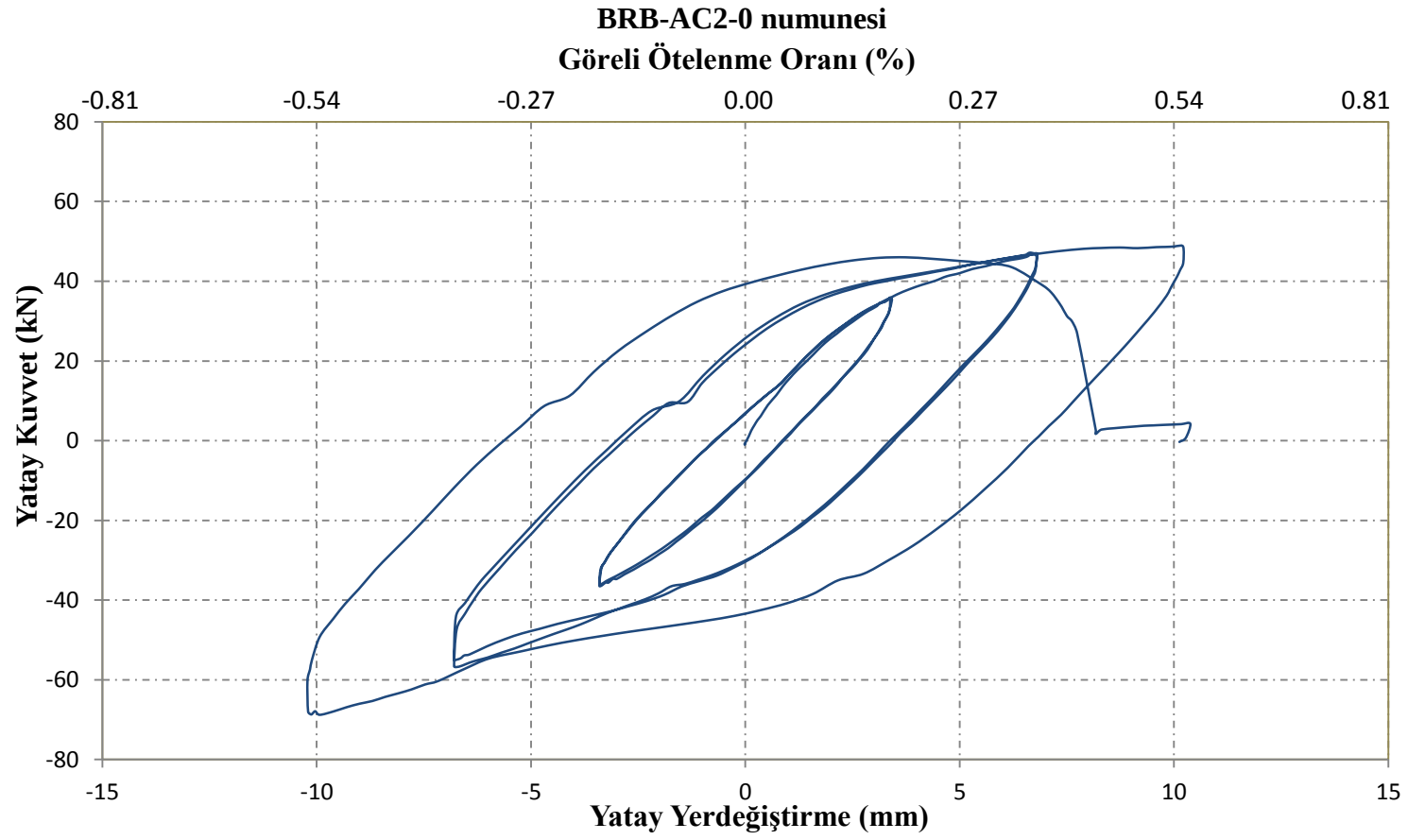
Şekil A.10 (devam) : (t) $\pm 5\Delta_{by}^E$ seviyesindeki $\pm 27.50\text{mm}$ yüklemesinin 2. basınç pikine gidilirken üst çekirdek akma-güçlendirme noktasında kopma. (u) Çekirdek kopması yakın görünüş. (ü) Çekirdekteki kopmanın önden görünüşü. (v) Deney sonrası alt uç genel durumu. (y) Çekirdek üst uçtan kopması durumunda numuneye bağlanan emniyet kemeri. (z) BRB-SC3-0 numunesi deney sonrası yerinde incelemelerin yapılması.

A.1.2.4BRB-AC2-0 numunesi

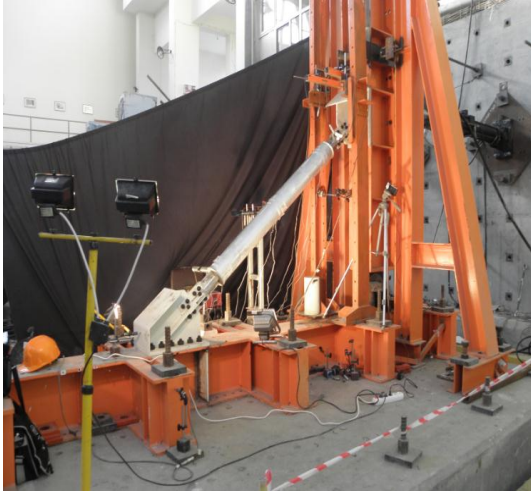
BRB-AC2-0 numunesinin deneysel etiketi TURKBRACE-BRBAC2'dir ve deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.11'de verilmektedir.

BRB-AC2-0 numunesi tahmin edilen akma yerdeğiştirmesinin $\pm 1/4$ 'ündeki (%0.09 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 1.72\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 2/4$ 'ündeki (%0.18 görelî ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirmesi $\pm 3.44\text{mm}$ olan 2 çevrimde, $\pm 3/4$ 'ündeki yatay yerdeğiştirmesi 5.16mm (%0.28 görelî ötelenme oranı) olan 2 çevrimde elastik davranmıştır.

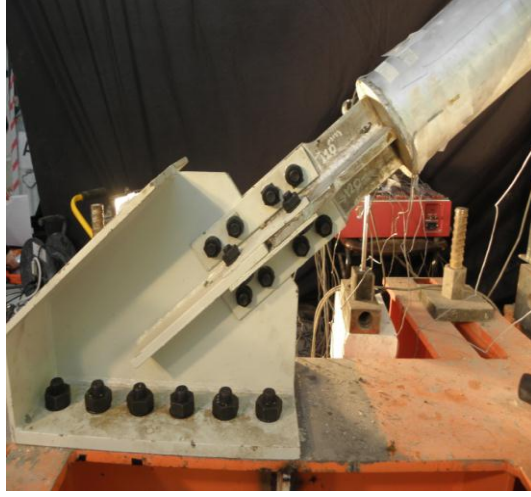
Yapılan çekme deneylerinde BRB-AC2-0 numunesi BRBKN değeri akmada 4469μ olarak belirlenmiştir. $\pm \Delta_{by}^P$ için statik itme analizi ile tahmin edilen akma yerdeğiştirmesi $\pm 10.32\text{mm}$ (%0.55 görelî ötelenme oranı)'dır. Deneyde yatay akma yerdeğiştirmesinin $\pm 10.15\text{mm}$ (%0.55 görelî ötelenme oranı) olduğu gözlenmiştir. Akma yerdeğiştirmesinin 2. çekme pikine gidilirken numune kopmuştur. Deney sonrası numunenin açılmasından sonra erken hasarının nedeni olarak kaynak dikişlerinin yapılma biçimleri görölmüştür. Numunenin üst çekirdek akma-güçlendirme bölgesi geçişte, haçvari kesiti oluşturan berkitme plakalarının çekirdeğe birleşiminde kullanılan alüminyum kaynak köşelerinin dönüldüğu yerde kopma olduğu gözlenmiştir; tasarımın bu şekilde olmamasına karşın bu durum bir uygulama eksii olarak açıklanabilir. Gerçekte bu tür bir dayanım azalması kaynaklı malzeme deneylerinde de görölmüştür (Bölüm 2). Numunenin diğer bölümlerinde herhangi bir sorun bulunmamaktadır. Burkulması önlenmiş bir çaprazdan beklenenler bu yerdeğiştirme düzeyine kadar elde edilmiştir. BRB-AC2-0 numunesinin deney fotoğrafları Şekil A.12'de verilmektedir.



şekil A.11 : BRB-AC2-0 numunesi histeretik eğrisi.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

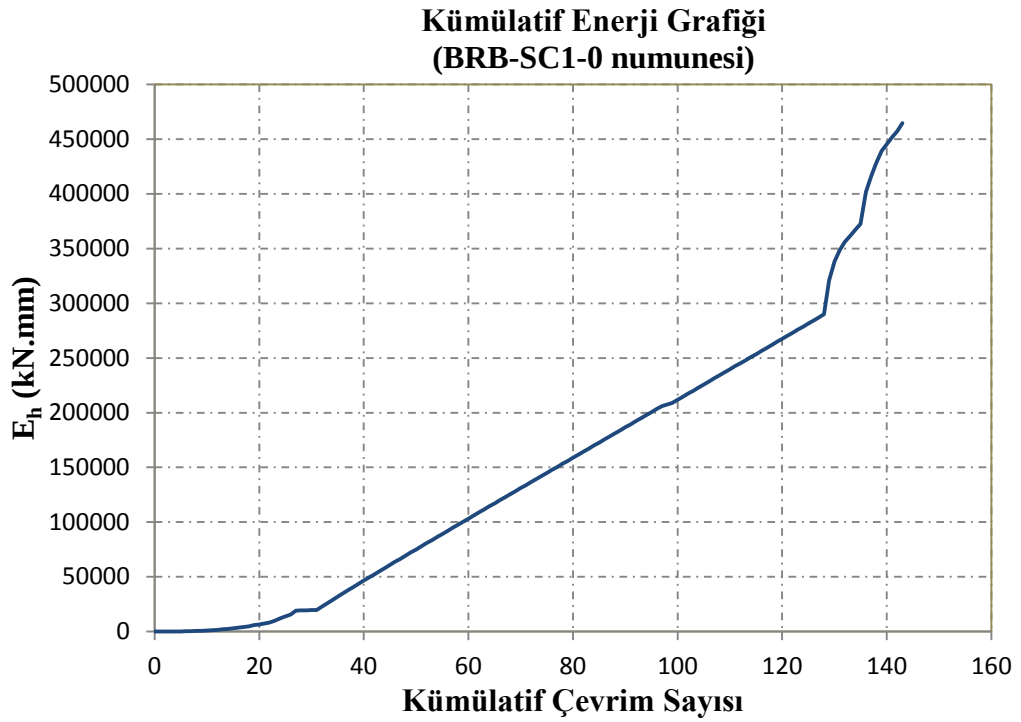
Şekil A.12 : BRB-AC2-0 numunesi deney fotoğrafları: (a) Genel görünüş. (b) $+1/4\Delta_{by}^E$ de ve $+1.72\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede alt birleşim elastik davranış. (c) $+2/4\Delta_{by}^E$ de ve $+3.44\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede üst birleşim elastik davranış. (d) $+3/4\Delta_{by}^E$ de ve $+5.16\text{mm}$ yatay yerdeğiştirmede düzlem dışı durum. (e) BRBKN çekirdekten çıkış noktası. (f) T5 dış tüp orta nokta düzlem dışı LVDT, T7 dış tüp alt nokta düzlem dışı LVDT.

A.1.3 Ön Çalışmalara İlişkin Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

A.1.3.1 BRB-SC1-0 numunesi

A.1.3.1.1 Histeretik eğri

Deneylerden elde edilen yatay kuvvet-yatay yerdeğiştirme histeretik eğrisinin kapsadığı alan numunenin sönümlendiği enerji miktarını vermektedir. Kümülatif enerji hesabı, yapının deprem verimliliğini anlamada en etkin ölçüm sistemidir. BRB-SC1-0 numunesi, E_h kümülatif enerji sönümünün, kümülatif çevrim sayısı ile değişimini gösterir eğri Şekil A.13’de verilmektedir.



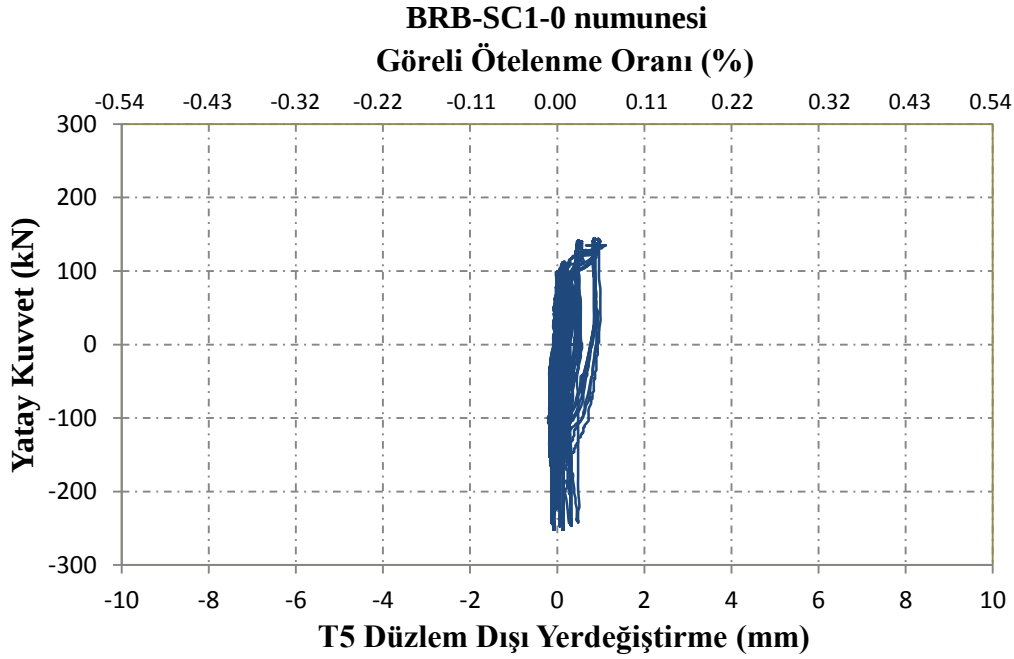
Şekil A.13 : BRB-SC1-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.

BRB-SC1-0 numunesi kümülatif 143 çevrim sonunda 464508.50kN.mm kümülatif enerji sönümlemiştir.

A.1.3.1.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

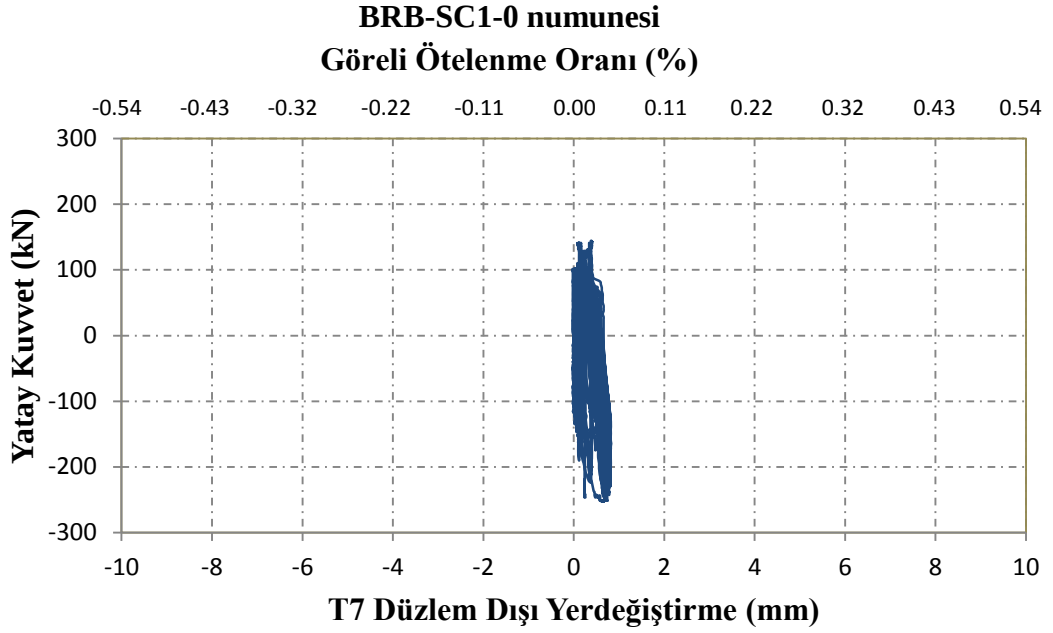
BRB-SC1-0 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 ve T7 yerdeğiştirme ölçerlerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.14’de yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.15’de yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta beklenildiği gibi basınç

yüklemesinde gözlenmektedir. BRB-SC1-0 numunesi düşük çevrimli yorulma dayanımında düzlem dışı yerdeğiştirme ölçerlerden alınan pikler +0.12mm~-0.02mm arasında değişmektedir. Yatay fay yükleme protokolünde alınan düzlem dışı yerdeğiştirme pikleri -0.18mm~+0.96mm arasında değişmektedir.



Şekil A.14 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

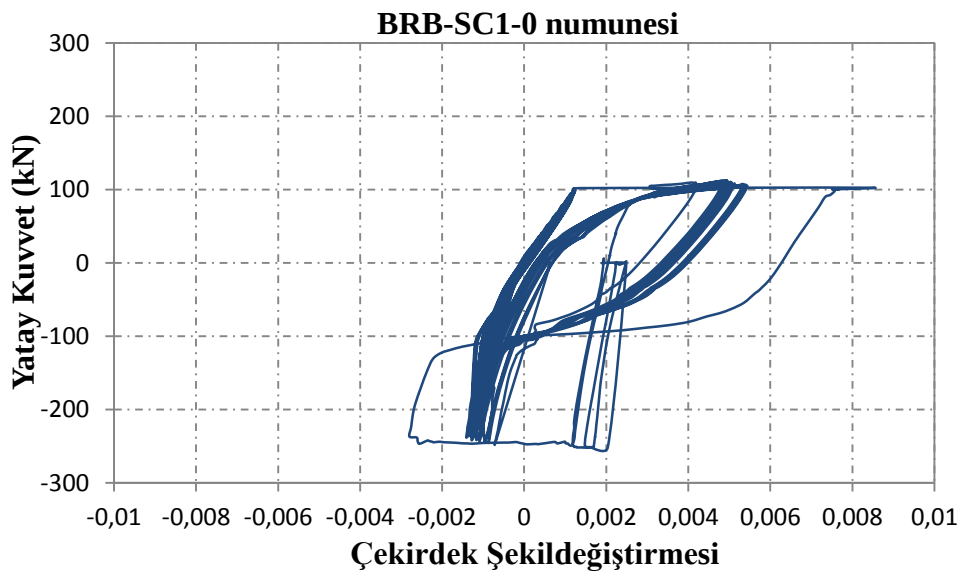
BRB-SC1-0 numunesi dış tüp alt kottan 50mm içeriye yerleştirilen T7 yerdeğiştirme ölçerinin yük hücresinden alınan okumalarla oluşturulan yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.15'te verilmektedir. Bu eğri çaprazın burkulmayı önleyen ortama geçişte oluşan düzlem dışı yerdeğiştirmesi hakkında bilgi vermektedir. Her iki eğri birlikte düşünöldüğünde çaprazın düzlem dışı burkulmasının yeterince önlendiği sonucu ortaya çıkmaktadır.



Şekil A.15 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

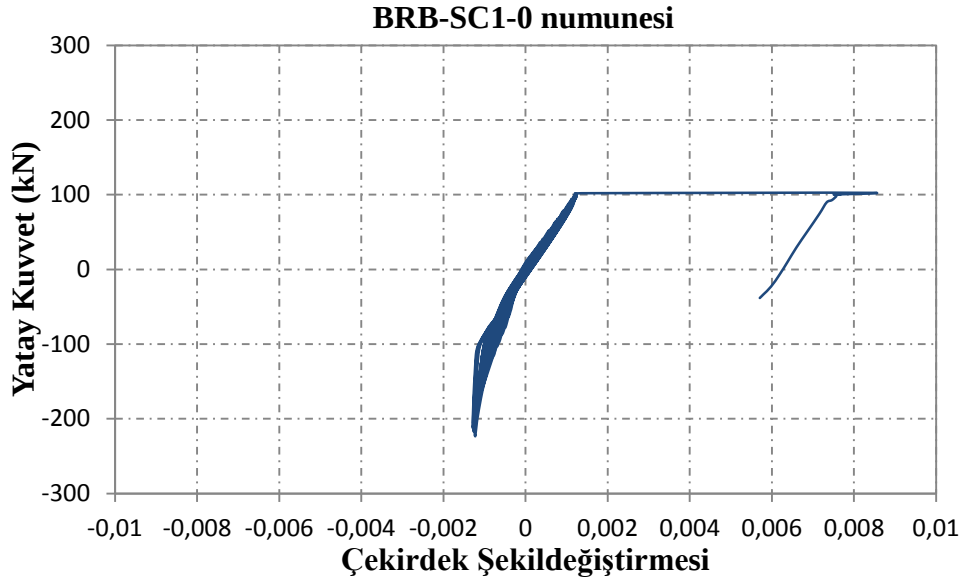
A.1.3.1.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildegıştırme histeretik eğrisi

Metal yüzeye yerleştirilen şekildegıştırme ölçer BRBKN'den alınan birim şekildegıştırme okumalarının yatay kuvvetle değişimi Şekil A.16'da verilmektedir. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinin 4. ve son çekme pikine giderken BRBKN hasar görerek okuma alınmamıştır. Strain-gauge datasında ki bu düzensizlikler strain-gauge'in zaman zaman etkinliğini kazandığı/kaybettiği şeklinde yorumlanabilir.



Şekil A.16 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildegıştırme histeretik eğrisi.

Şekil A.16’da akma noktası net olmadığından veri nokta sayısı azaltılarak grafik Şekil A.17’de yeniden verilmiştir.

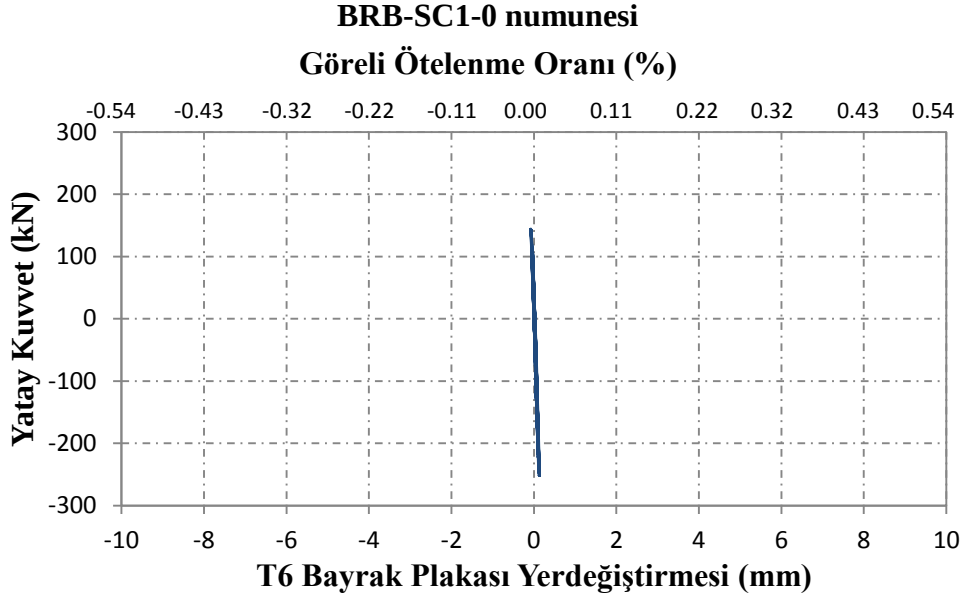


Şekil A.17 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.

$\pm \Delta_{by}^E$ seviyesinde çekme yüklemede akmanın tam başladığı noktada kuvvet +98.62kN’de BRBKN +1533 μ , basınç yüklemede -165.90kN’de -1156 μ okuması yapılmıştır.

A.1.3.1.4Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC1-0 numunesinin deney sırasında bayrak levhasının yerdeğiştirmesi T6 yerdeğiştirmeden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.18’de yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Bayrak levhasının tamamen elastik kaldığı ve neredeyse hiç yerdeğiştirme yapmadığı görülmektedir.

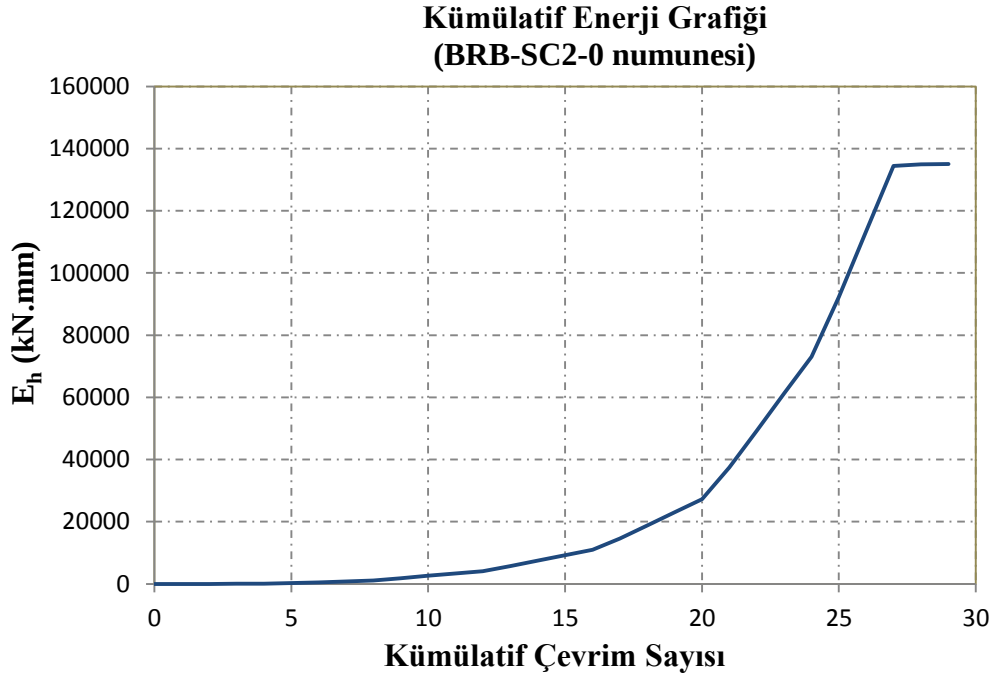


Şekil A.18 : BRB-SC1-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak levhası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

A.1.3.2 BRB-SC2-0 numunesi

A.1.3.2.1 Histeretik eğri

BRB-SC2-0 numunesi, E_h kümülatif enerji sönümünün kümülatif çevrim sayısı ile değişimini gösterir eğri Şekil A.19’da verilmektedir.

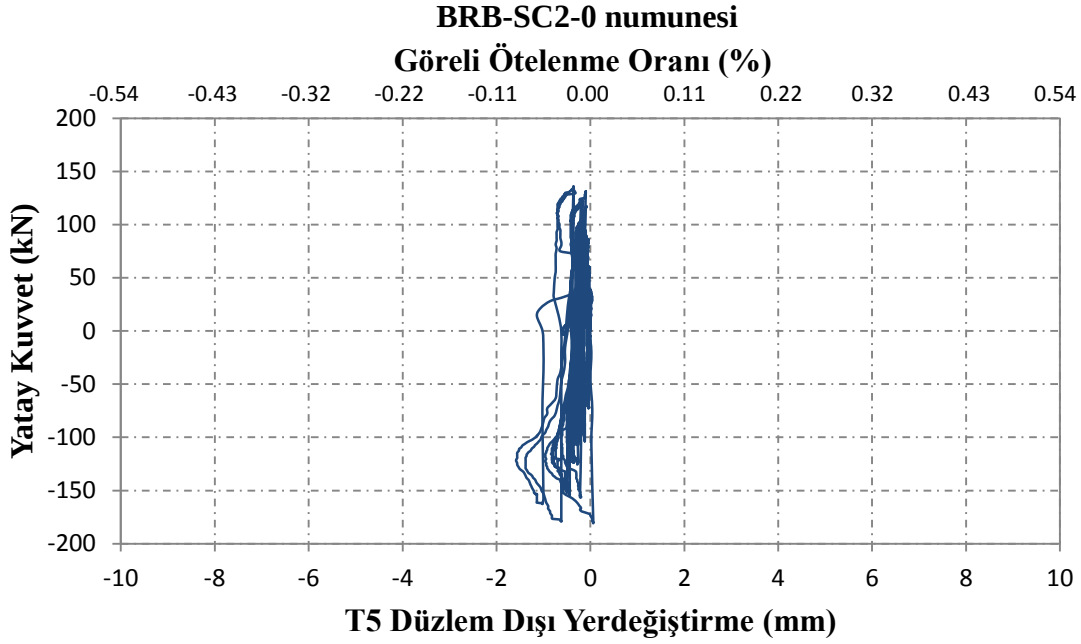


Şekil A.19 : BRB-SC2-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.

BRB-SC2-0 numunesi 29 çevrim sonunda 135064.80kN.mm kümülatif enerji sönümlenmiştir.

A.1.3.2.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC2-0 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.20’de yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir.

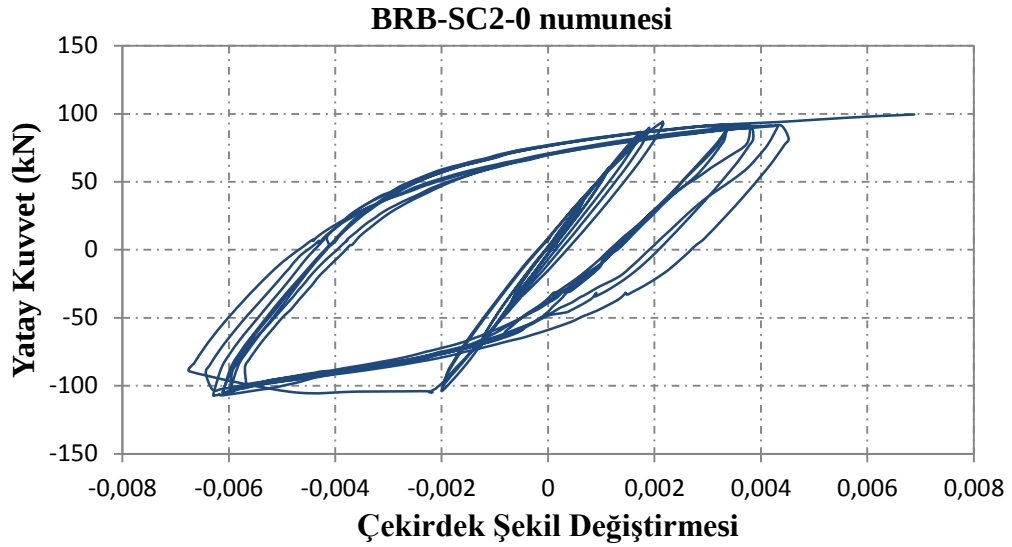


Şekil A.20 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

BRB-SC2-0 numunesi düzlem dışı yerdeğiştirme ölçerlerden alınan pikler - 0.02mm~-1.58mm arasında değişmektedir. Bu numunenin de burkulması önlenmiş çaprazlardan beklenen performansı gösterdiği söylenebilir.

A.1.3.2.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekil değiştirmesi histeretik eğrisi

BRB-SC2-0 numunesi çekirdek metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN strain-gauge’ten alınan birim şekildeğiştirmelerin yatay kuvvet etkisindeki değişimi Şekil A.21’de verilmektedir.



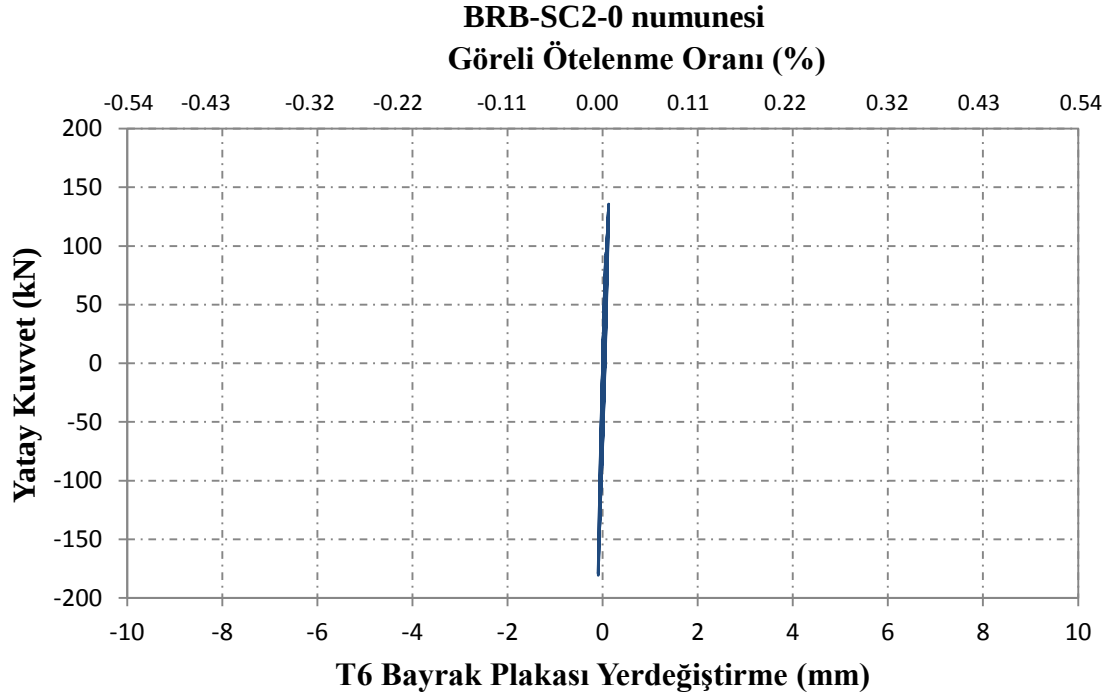
Şekil A.21 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekil değişirmesi histeretik eğrisi.

$\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinde BRBKN şekil değişirme ölçerinden ilk çekme pikinde $+2170\mu$, basınç pikinde -4800μ birim şekil değişirme okuması yapılmıştır. BRBKN $\pm 2.5\Delta_{by}^E$ seviyenin ilk çekme pikine giderken $+99.57\text{kN}$ kuvvetine karşı gelen $+6881\mu$ 'de hasar görmüştür. Şekil A.21'den akma düzeyi rahatlıkla belirlenebilmektedir.

A.1.3.2.4 Yatay kuvvet-bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC2-0 numunesinin deney sırasında bayrak levhasının yerdeğiştirmesi T6 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.22'de yatay kuvvet-T6 bayrak levhası yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir.

Burada da bayrak levhası tamamen elastik kaldığı ve neredeyse hiç yatay yerdeğiştirme yapmadığı görülmektedir.

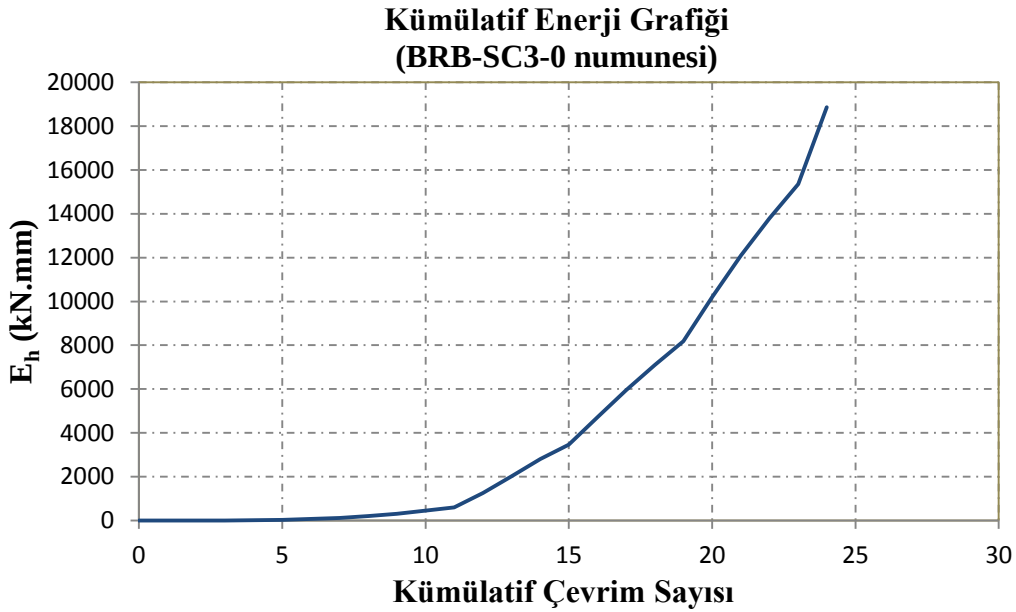


Şekil A.22 : BRB-SC2-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

A.1.3.3 BRB-SC3-0 numunesi

A.1.3.3.1 Histeretik eğri

BRB-SC1-0 numunesi, E_h kümülatif enerji sönümünün, kümülatif çevrim sayısıyla değişimini gösterir eğri Şekil A.23’de verilmektedir.



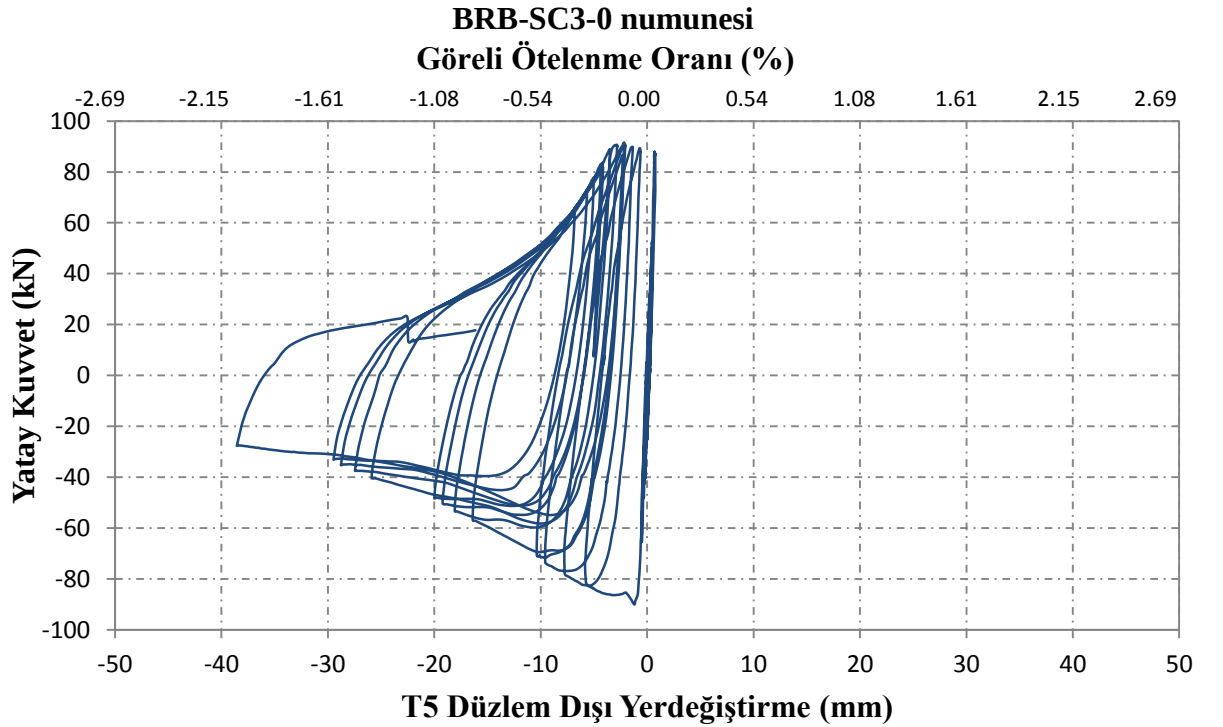
Şekil A.23 : BRB-SC3-0 numunesi kümülatif enerji grafiği.

BRB-SC3-0 numunesi kümülatif 24 çevrim sonunda 18862.91kN.mm kümülatif enerji sönmülemiştir.

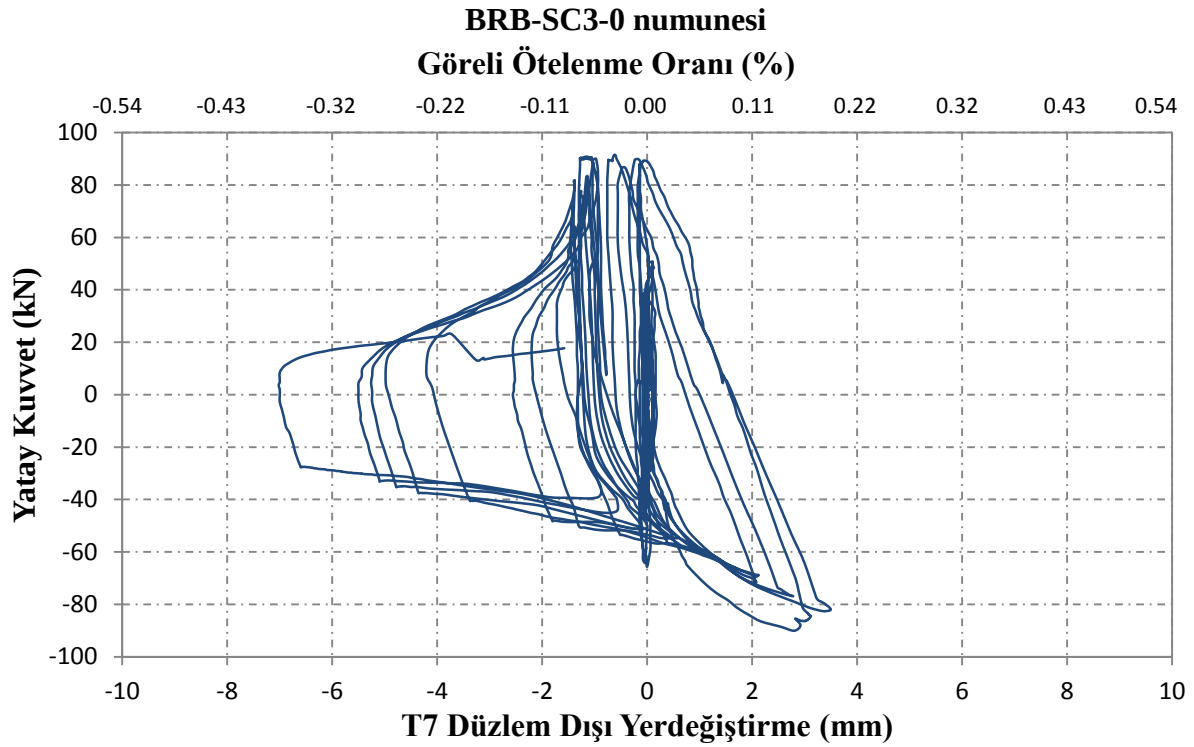
A.1.3.3.2 Yatay kuvvet-düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC3-0 numunesinin düzlem dışı yerdeğiştirmesi T5 ve T7 yerdeğiştirme ölçerlerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.24’de yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi Şekil A.25’de yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Çaprazın düzlem dışı yerdeğiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta beklenildiği gibi basınç yüklemesinde gözlenmektedir.

BRB-SC3-0 T5 düzlem dışı yerdeğiştirme ölçerinden alınan pikler -37.48mm~+0.66mm arasında iken, T7 düzlem dışı yerdeğiştirme ölçerindeki çekme ve basınç yüklemelerindeki pikler -7.00mm~+3.34mm arasındadır. Daha önce açıklanan nedenlerle bu davranış da klasik, burkulan çaprazların düzlem dışı burkulma davranış eğrilerine çok benzemektedir.



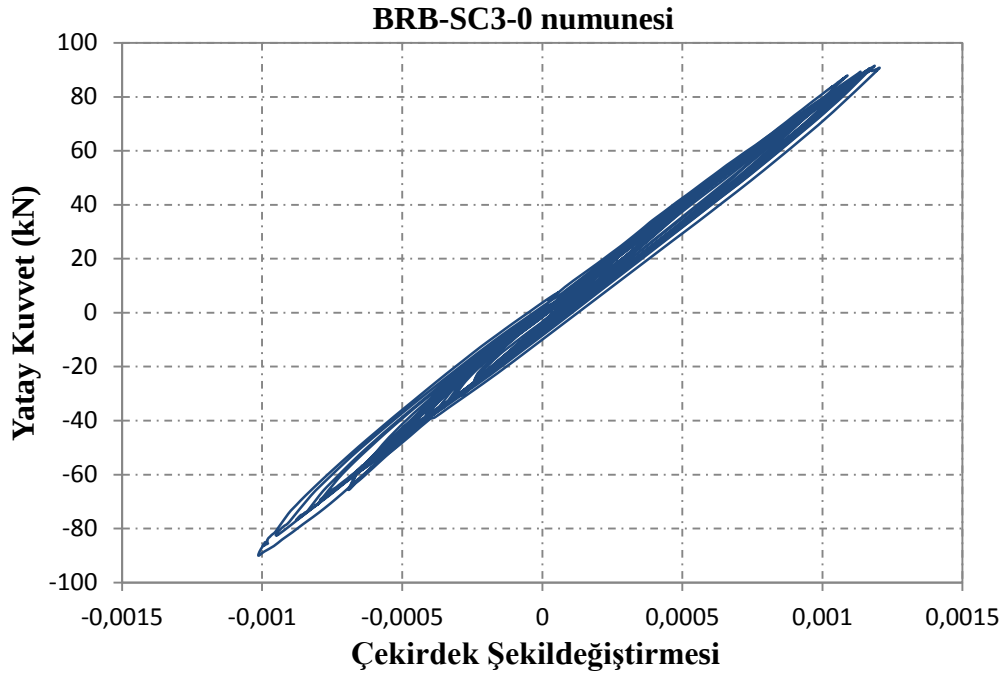
Şekil A.24 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.



Şekil A.25 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T7 düzlem dışı yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

A.1.3.3.3 Yatay kuvvet-çekirdek şekildegıştirmesi histeretik eğrisi

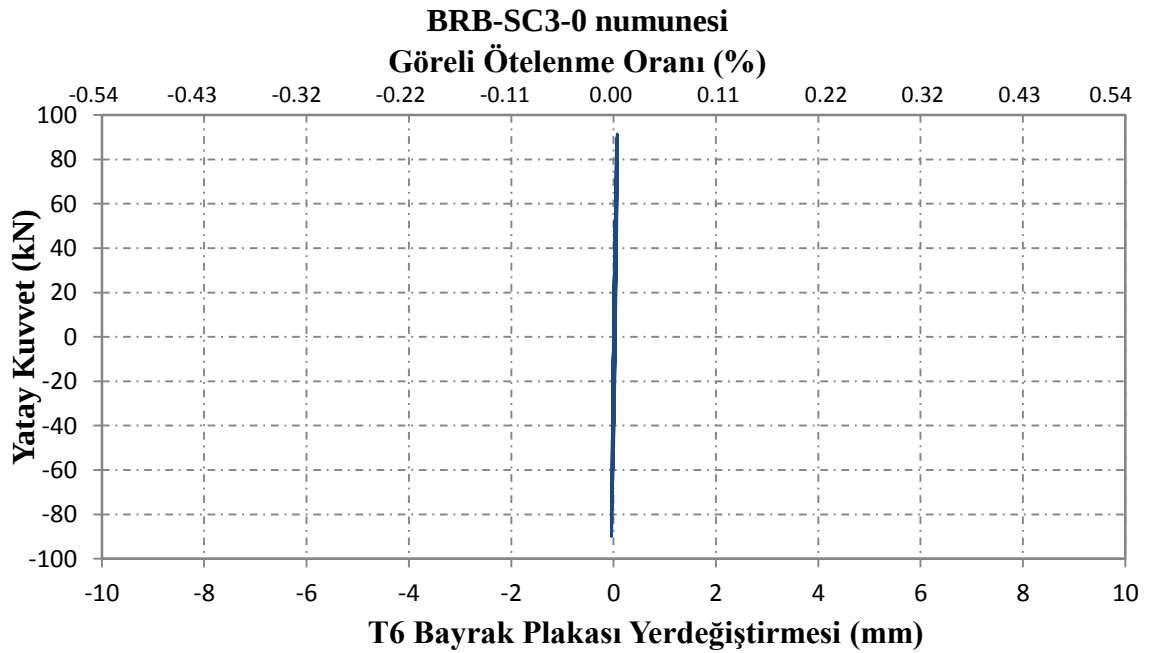
Metal yüzeye yerleştirilen şekildegıştirme ölçeri BRBKN'den alınan birim şekildegıştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi Şekil A.26'da verilmektedir. $\pm\Delta_{by}^E$ seviyesinin ilk çekme pikinde kuvvet +88.06kN'ye karşı gelen BRBKN +1100 μ , ilk basınç pikinde -81.00kN'ye karşı gelen BRBKN -950 μ 'dur. Histeretik eğriden de görüldüğü üzere burkulması önlenmiş bölümde şekildegıştirmeler elastik bölgede kalmakta olduğundan akma değerine ulaşamamıştır. İn elastik şekildegıştirmeler burkulmanın önlenmemiş uç bölümlerinde yığılmış şekildegıştirmeler ve göçme/kopma bu bölgede gelişmiştir.



Şekil A.26 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirmesi histeretik eğrisi.

A.1.3.3.4 Yatay kuvvet-bayrak levhası yerdeğiştirme histeretik eğrisi

BRB-SC3-0 numunesinin deney sırasında bayrak levhasının yerdeğiştirmesi T6 yerdeğiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiştir. Şekil A.27’de yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi verilmektedir. Pratik olarak herhangi bir yerdeğiştirmenin olmadığından söz edilebilir.



Şekil A.27 : BRB-SC3-0 numunesi yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yerdeğiştirme histeretik eğrisi.

A.1.3.4BRB-AC2-0 numunesi

BRB-AC2-0 numunesi deneysel çalışmada akma yerdeğiştirmesi ilk çekme pikine giderken çekirdek akma-güçlendirme geçiş bölgesinde ITAB'tan erken bir yerdeğiştirme düzeyinde kopmuştur. Alüminyum kaynak dönüşleri bu bölgenin dayanımını azaltmıştır. Bu nedenle BRB-AC2-0 numunesine ilişkin diğerk eğrilerin verilmesi anlamlı bulunmamıştır.

A.1.4 Ön Çalışmalara İlişkin Değerkendirmeler

Ön çalışmalar kapsamında olası her türlü uç tasarımı, iç boşluk, dış boşluk, dış tüp enkesit şekli, sürtünmesiz yüzey oluşturma teknikleri bakımından incelemelerde bulunulmuş, istenilen kararlı, dolu, dengeli histeretik eğrilerin elde edilebilmesine yönelik BÖÇ'ü oluşturan bileşenlerde optimizasyon yapılmıştır. Sonuçta, tasarlanan, üretilen ve deneneni BRB-SC1-0, BRB-SC2-0, BRB-SC3-0 ve BRBAC2-0 numunelerinden edinilen bilgi birikimine ve yönlendirmelere göre BRB-SC1, BRB-SC2, BRBAC1 ve BRB-AC2 ana numunelerinin tasarımı ve üretimi gerçekteştirilmiştir.

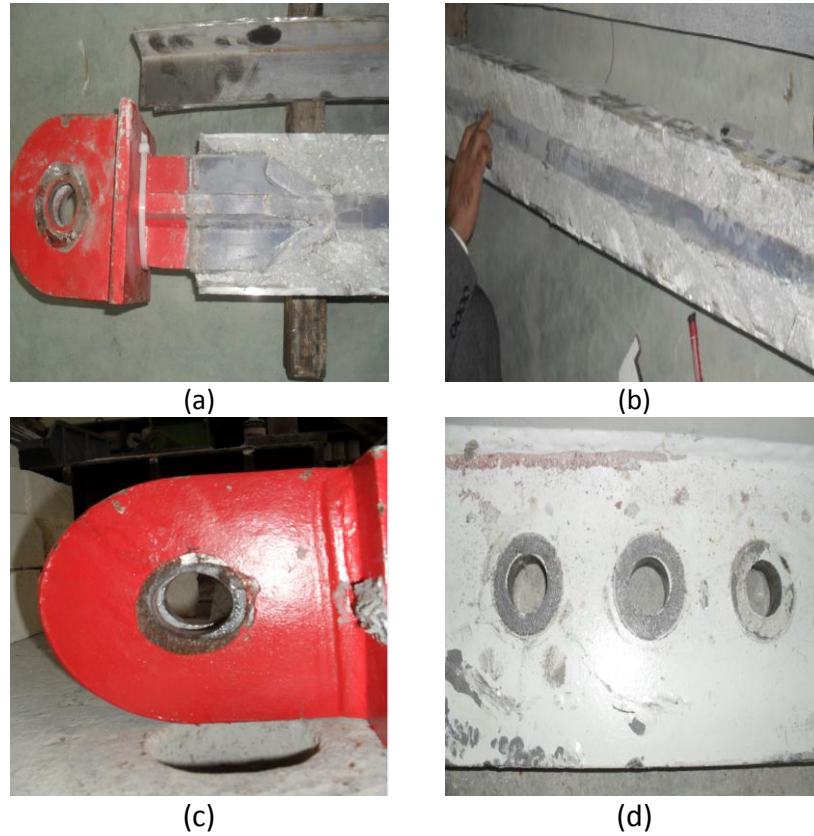
A.1.4.1Kesit açılımları

Her numune deneyden sonra yarı boyu kesitinde açılarak, gözlem ve incelemelerde bulunulmuştur. Kuramsal olarak tahmin edilen davranışla, deneysel davranışın uyum/uyumsuzluk durumu, deneysel gözlemlerin nedenleri yapılan kesit açılımları ile anlaşılmıştır. Ön çalışmalar kapsamında edinilen bilgi birikimi ve yönlendirmeler doğrultusunda yeni BÖÇ'lerin tasarımı, üretimi ve denenmesi gerçekteştirilmiş olup genel olarak gözlemler ve bulgular aşağıda sıralanmıştır:

- BRB-SC1-0 numunesi düşük çevrimli yükleme protokolü ve yakın fay yükleme protokolünü tamamladıktan sonra çekirdek kopması gerçekteşmeden kesit açılmıştır. Yapılan incelemelerde numunede oluşturulan iç boşluk ve sürtünmesiz yüzey kalınlığının arttırılması gerektiğı anlaşılmıştır. İstavroz kesitin dolgu malzemesinde oluşturduğı basınç izlerinden edinilen bilgilerle davranış daha iyi anlaşılmış ve iç boşluğun nasıl oluşturulacağına karar verilmiştir. Kesit açılım fotoğrafları şekil A.28'de verilmektedir.
- BRB-SC2-0 numunesinin yapılan kesit açılımlarında deney montaj düzeninde üst uç bölgesi çekirdek akma- güçlendirme geçiş noktasından koptuğı

görülmüştür. Bu numune ile daralan kesit geçişinde istavroz kesiti oluşturan berkitme plakalarının kaynak pozisyonu anlaşılmıştır. Kesit açılım fotoğrafları Şekil A.29’da verilmektedir.

- BRB-SC3-0 numunesi BÖÇ üretimini kolaylaştırmak için yapılan bir alternatif tasarımıdır. Numunede yalnızca akma bölgesinde oluşturulan sürtünmesiz yüzey tekniği hakkında önemli bilgiler edinilmiştir. Kesit açılım fotoğrafları Şekil A.30’da verilmektedir.
- BRB-AC2-0 numunesi alüminyum alaşımı farklı olan bir BÖÇ’tür. Isıl işlemlerle sertleştirilmiş A6061-T6 alüminyum alaşımında kaynaklı üretimle geliştirilen numunede yapılan kesit açılımlarında, göçmenin/akmanın akma yerdeğiştirmesi seviyesine gelmeden, çekirdekte akma bölgesi-güçlendirme bölgesi geçişinde meydana geldiği görülmüştür. Alüminyum kaynak üretimindeki hatalar anlaşılmış, çekirdek kesit geçişlerindeki iç boşluğun nasıl oluşturulacağı belirlenmiştir. Kesit açılımları Şekil A.31’de verilmektedir.



Şekil A.28 : (a) BRB-SC1-0 numunesi haçvari kesit görünüşü. (b) Akma bölgesi görünüşü, mafsal plakası ve bulon deliği. (c) Bayrak plakası bulon delikleri.



(a)



(b)



(c)



(d)

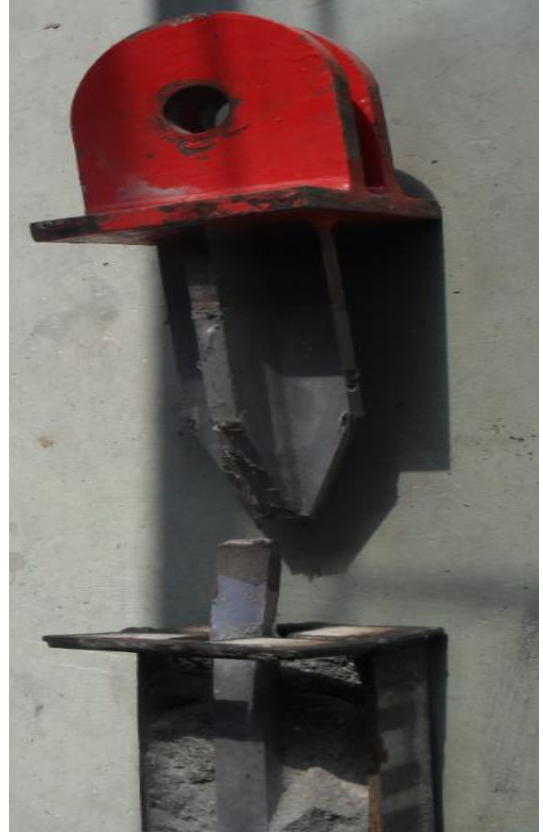


(e)

Şekil A.29 : (a) BRB-SC2-0 numunenin kesit açılımından sonra genel görünüşü. (b) BRB-SC2-0 numunesi çekirdek kesitinin koptuğu üst uç. (b) Akma bölgesi uçta oluşan yerel burkulmalar. (c) Mafsal plakası ve plastik mafsal noktası. (d) Akma bölgesi görünüşü.



(a)



(b)



(c)

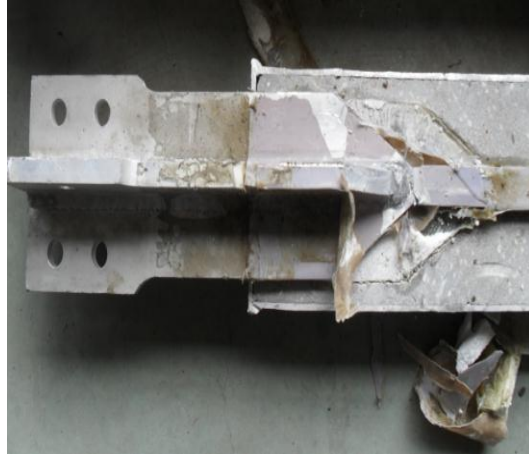


(d)

Şekil A.30 : (a) BRB-SC3-0 numunesi çekirdek alt uç. (b) Üst uç berkitme plakalarının kaynak dönüş notasının kesitin daraldığı noktada oluşturduğu kopma. (c) Akma bölgesi yakın görünüş. (d) Numunenin genel görünüşü.



(a)



(b)



(c)



(d)



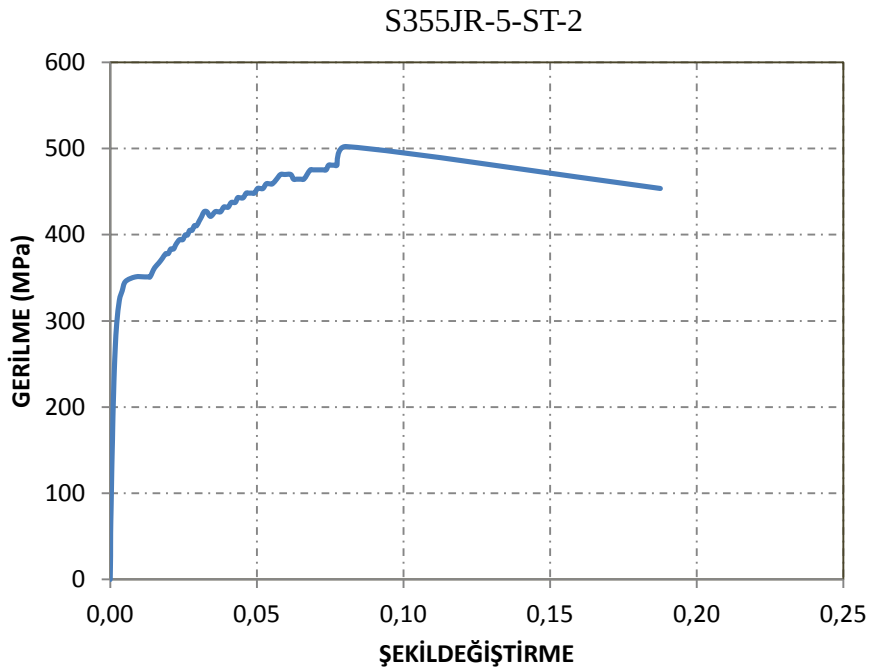
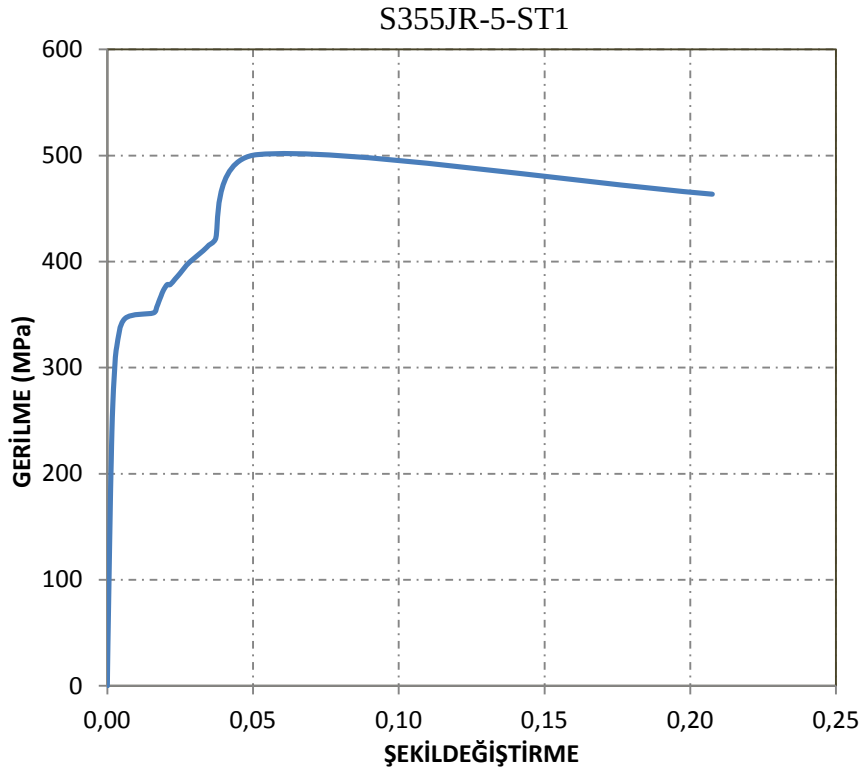
(e)

Şekil A.31 : (a)BRB-AC2-0 numunesi çekirdek ITAB'ta kopma. (b) Üst uç güçlendirme ve birleşim bölgelerinin görünümü. (c) Alüminyum kaynaklama hatası: uç nokta köşelerinin dönülmesi ile bölge dayanımının azalması. (d) Kopma bölgesi yakın görünüş. (e) Numunenin genel görünüşü.

EK B

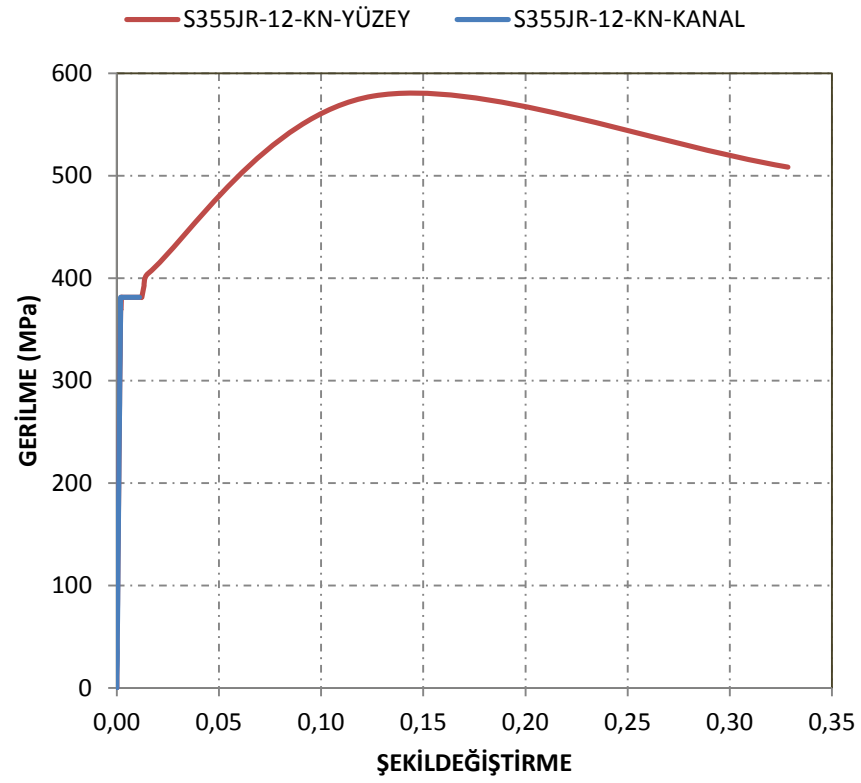
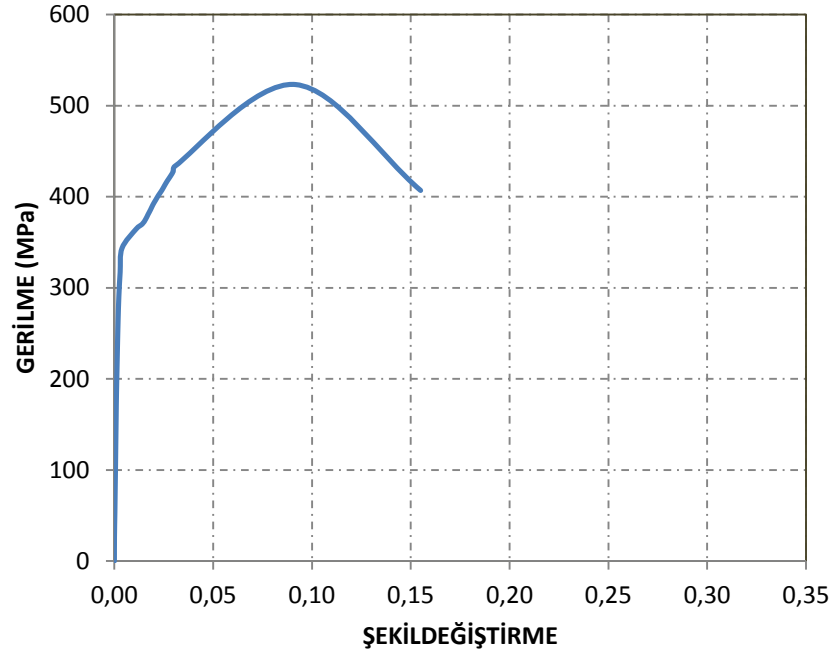
Tüm malzeme numuneleri için elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri aşağıda verilmiştir. Çelik çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri için EK B1, alüminyum çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri için EK B2 alt bölümleri oluşturulmuştur.

EK B1: Çelik çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

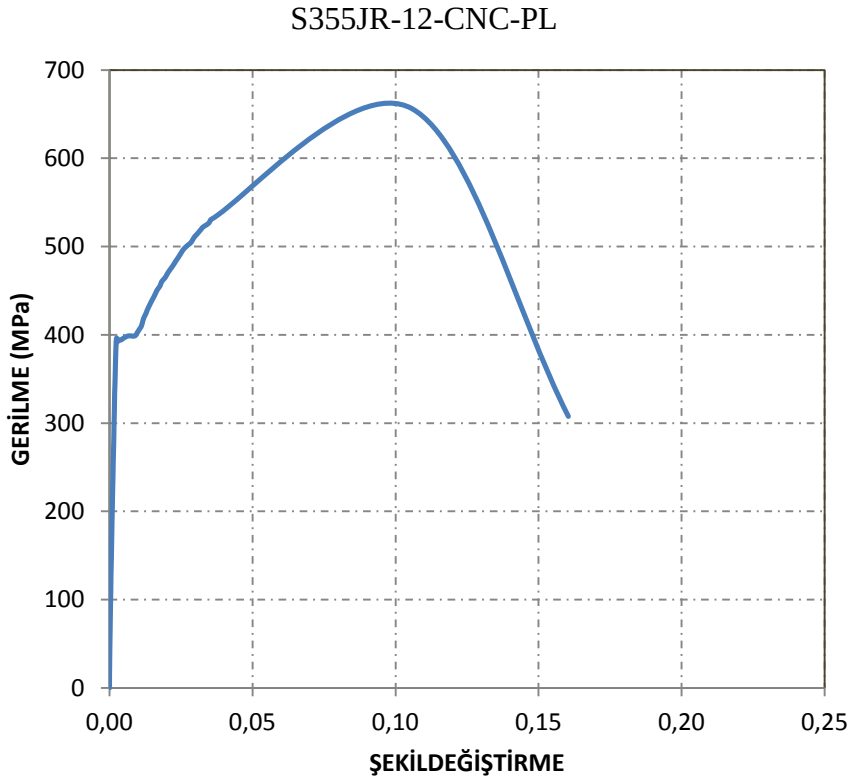
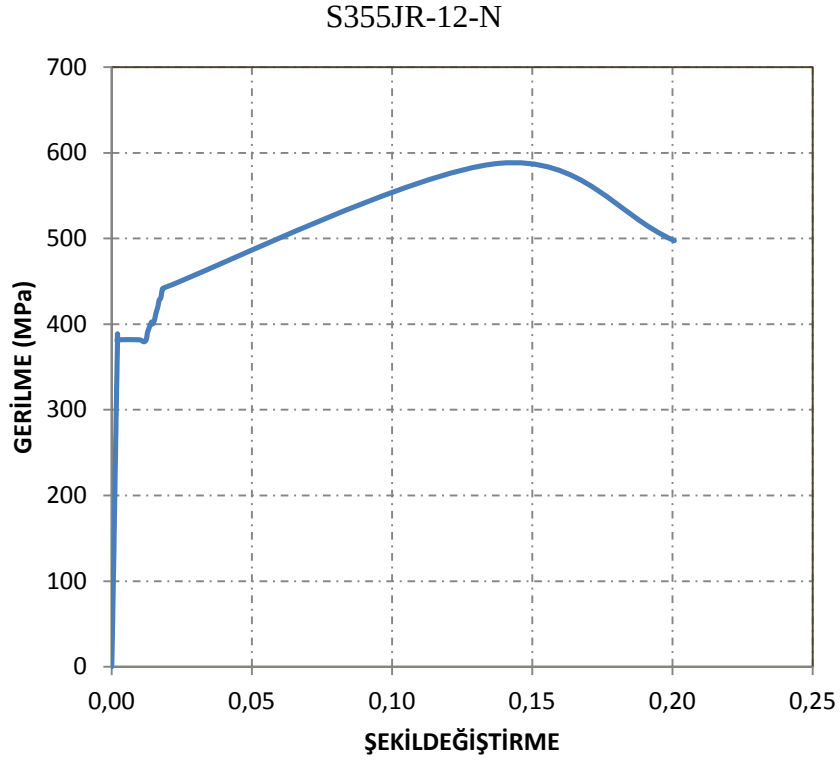


Şekil B.1 : Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

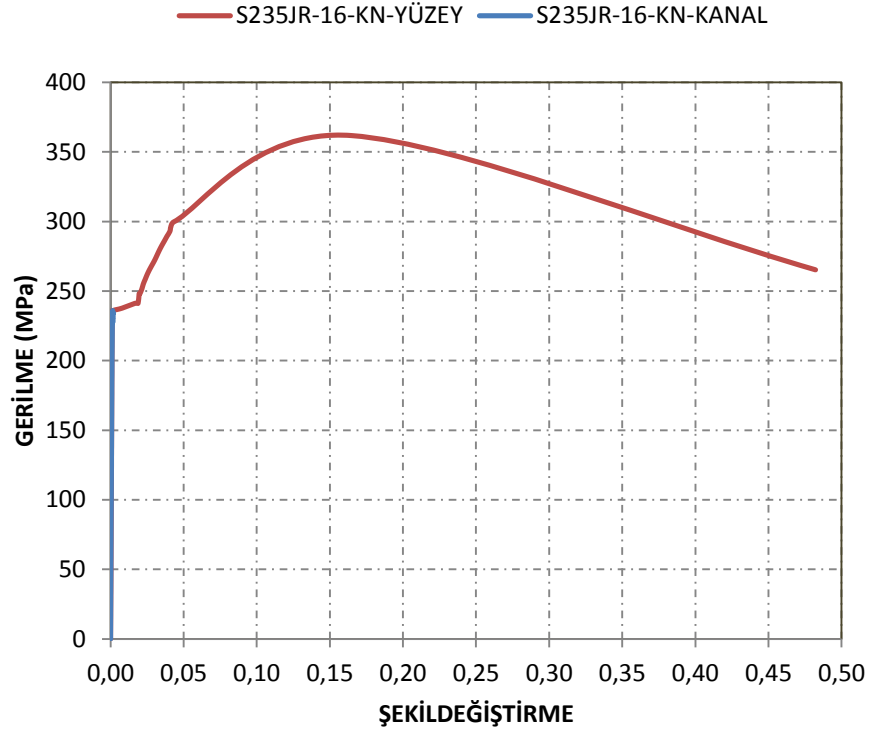
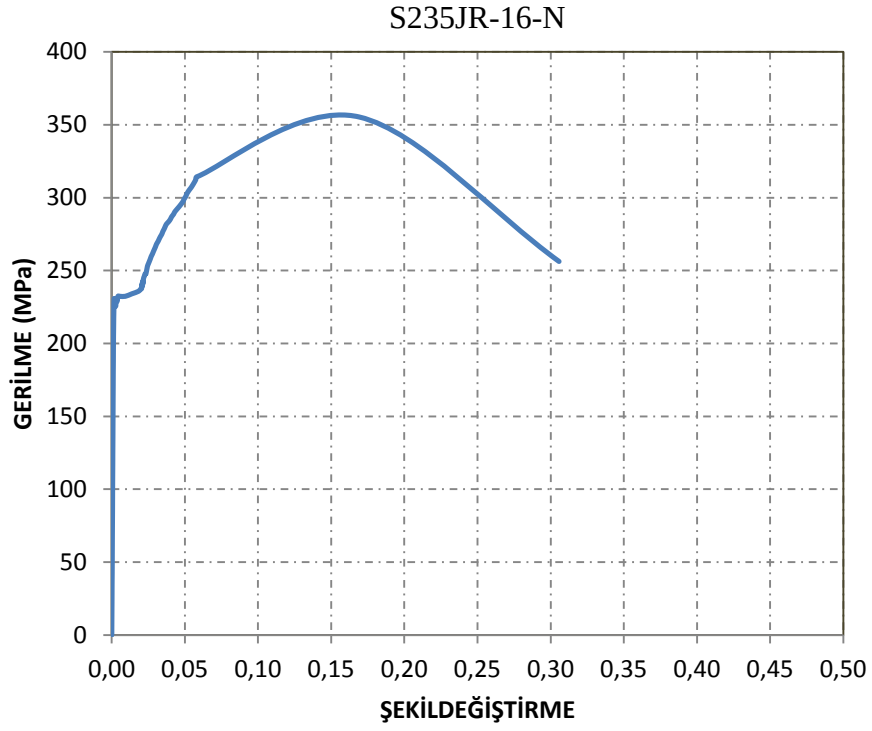
S355JR-5-ST-CNC-PL



Şekil B.1 (devam): Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

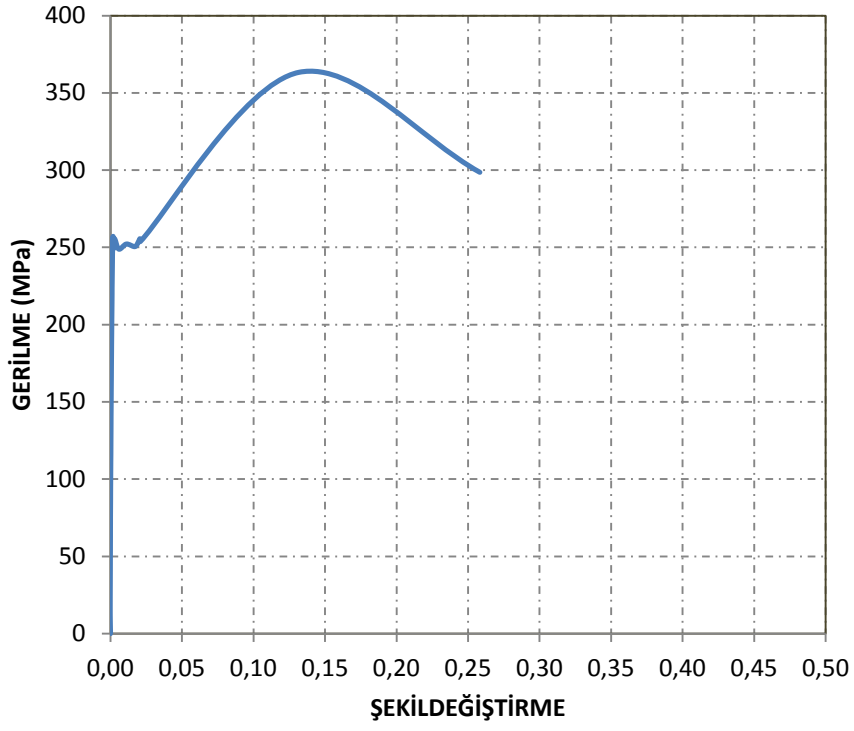


Şekil B.1 (devam): Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.



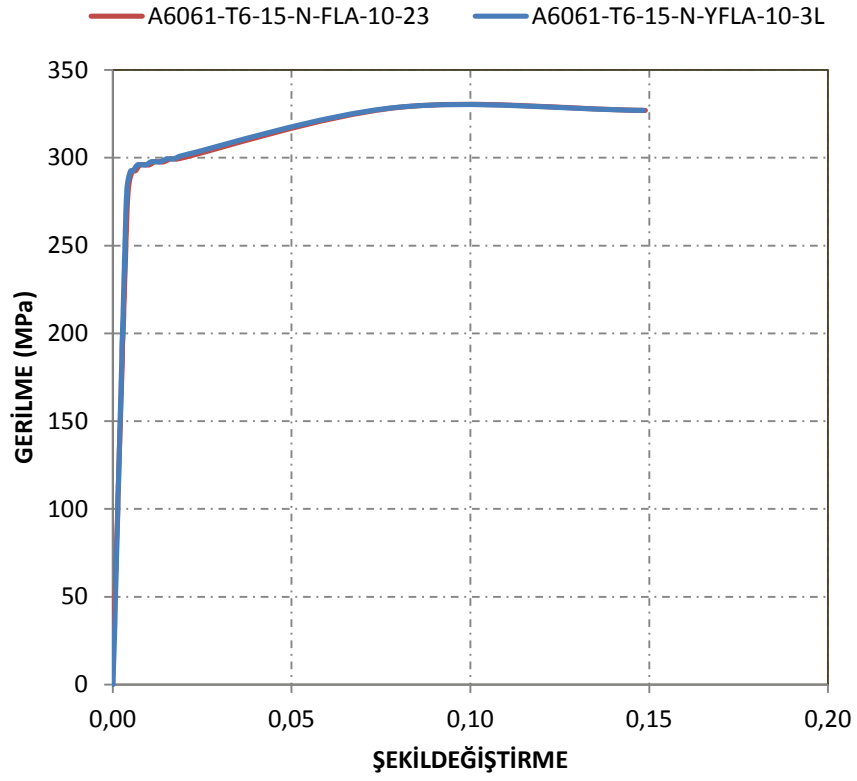
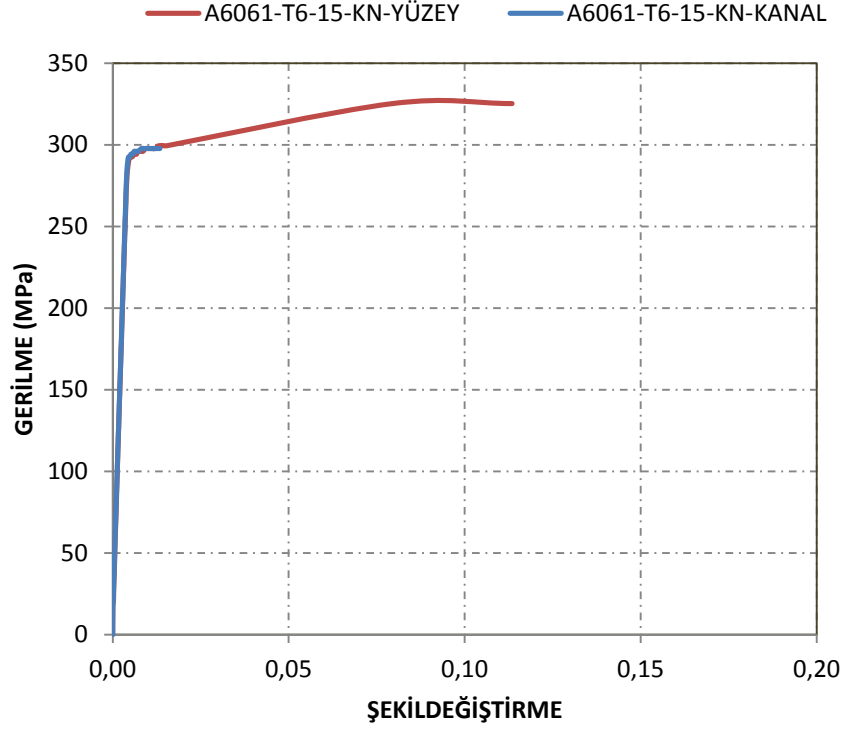
Şekil B.1 (devam): Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

S235JR-16-CNC-PL



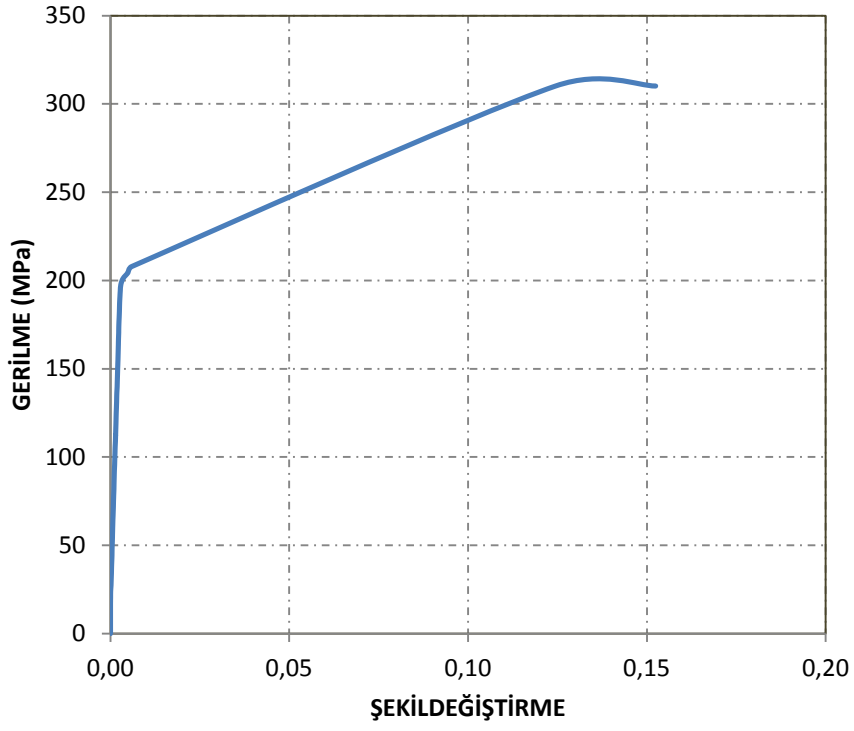
Şekil B.1 (devam): Çelik çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

EK B2: Alüminyum çekme deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrileri

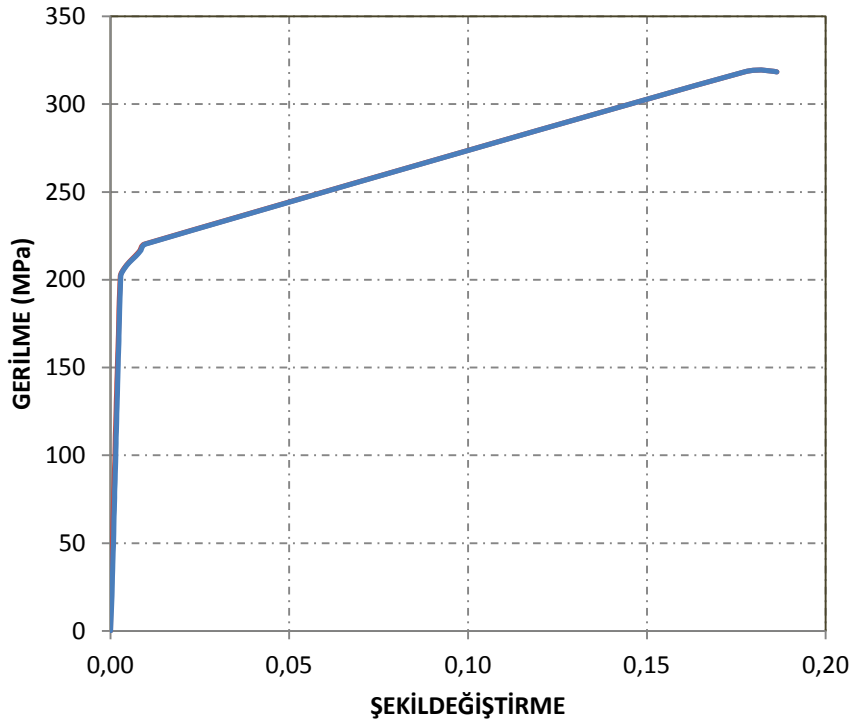


Şekil B.2 : Alüminyum çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

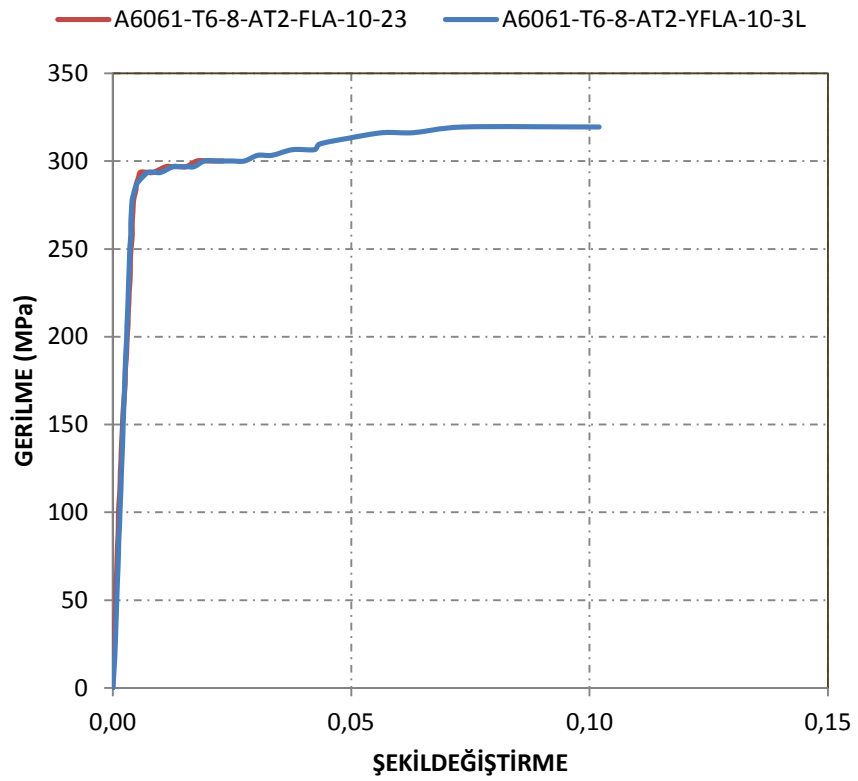
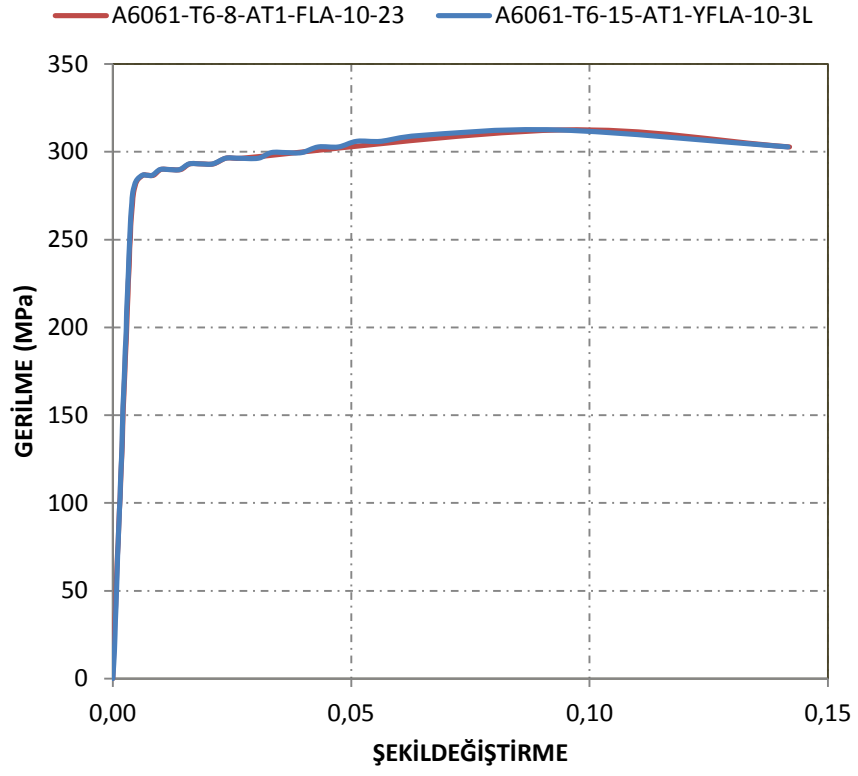
A5083-H111-15-KN-YÜZEY



— A5083-H111-15-N-YFLA-10-3L — A5083-H111-15-N-FLA-10-23



Şekil B.2 (devam): Alüminyum çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

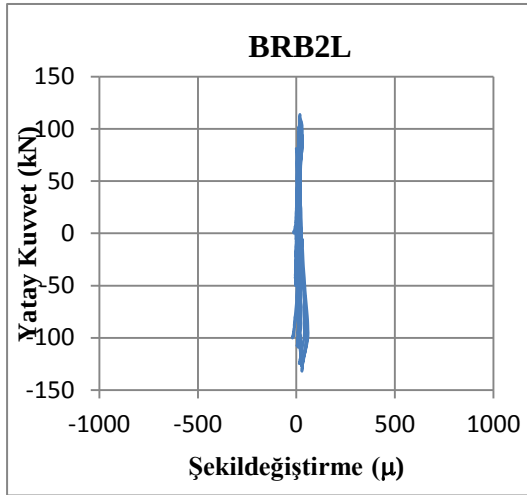
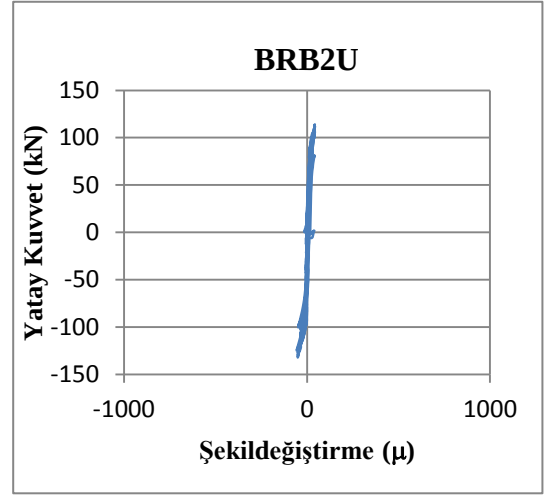
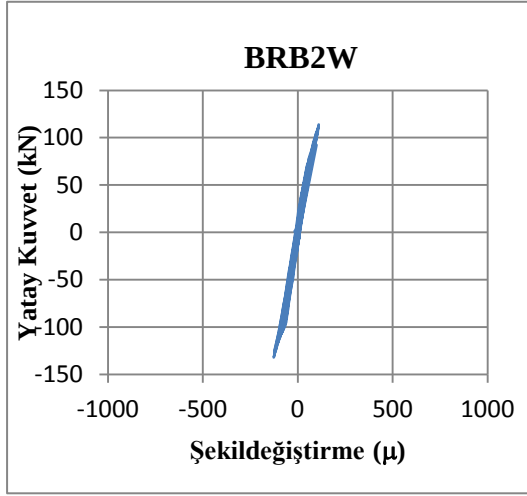


Şekil B.2 (devam): Alüminyum çekme numunelerine ilişkin gerilme-şekildeğiştirme eğrileri.

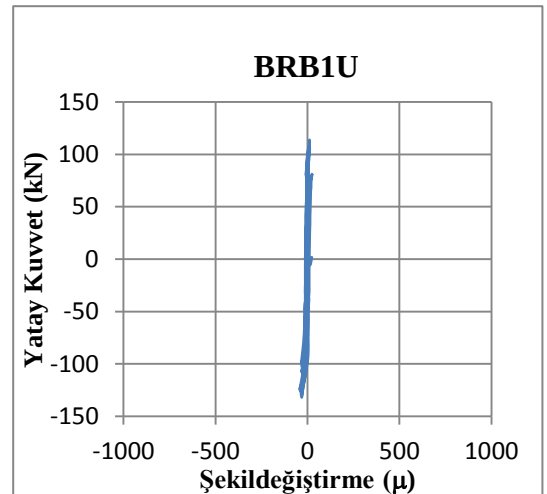
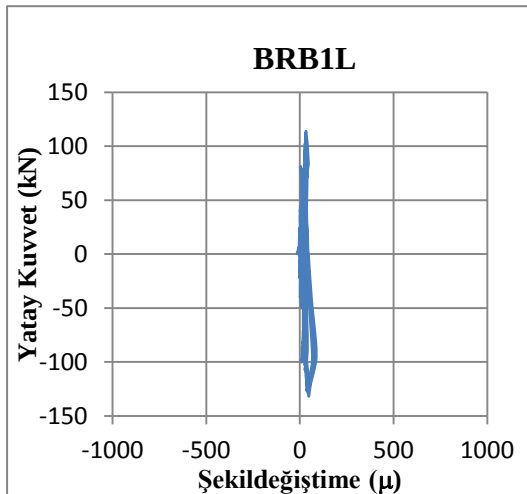
EK C

Tüm numuneler için elde edilen yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri aşağıda verilemektedir. BRB1U, BRB1L, BRB1W, BRB1E dış tüp alt uç dört yüz şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kanal verilerini, BRB2U, BRB2L, BRB2W, BRB2E dış tüp orta dört yüz şekildeğiştirme ölçerlerinde alınan kanal verilerini, BRB3U, BRB3L, BRB3W, BRB3E dış tüp üst uç dört yüz şekildeğiştirme ölçerlerinden alınan kanal verilerini göstermektedirler. BRB2E okumaları bazı numunelerde alınmamıştır; bu doğrultuda yerdeğiştirme ölçerle düzlem dışı yerdeğiştirmeler kontrol edilmiştir. BRB-AC1 numunesi için EK C1, BRB-AC2 numunesi için EK C2, BRB-SC1 numunesi için EK C3, BRB-SC2 numunesi için EK C4 alt bölümleri oluşturulmuştur. Histeretik eğrilerde görüldüğü gibi bütün numunelerde dış tüpte oluşan şekildeğiştirmeler elastik bölgede kalmıştır.

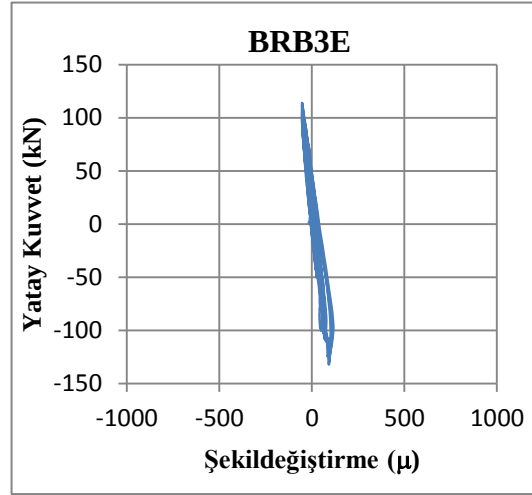
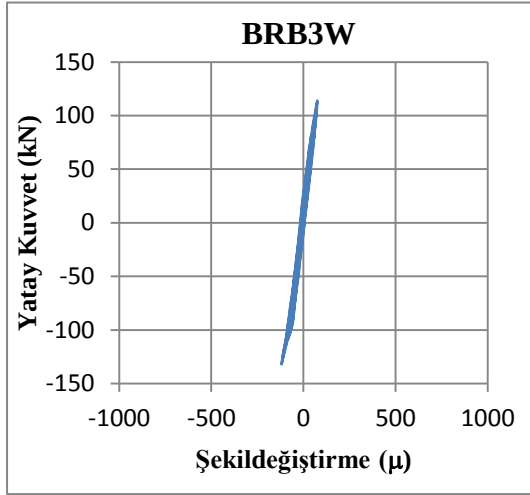
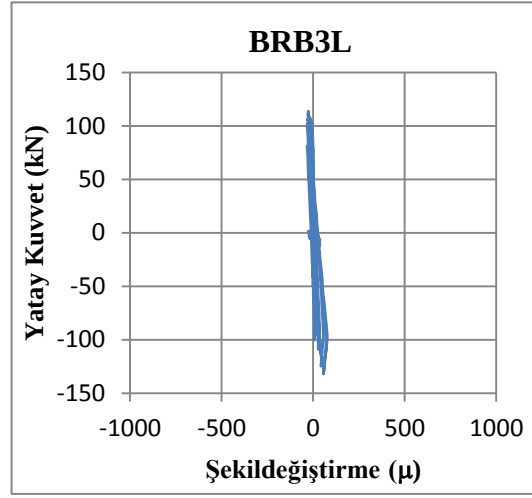
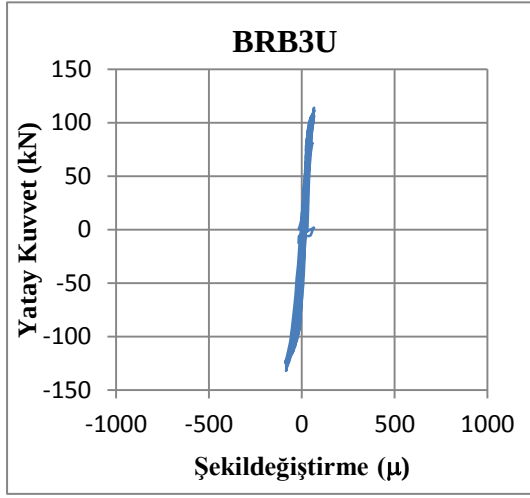
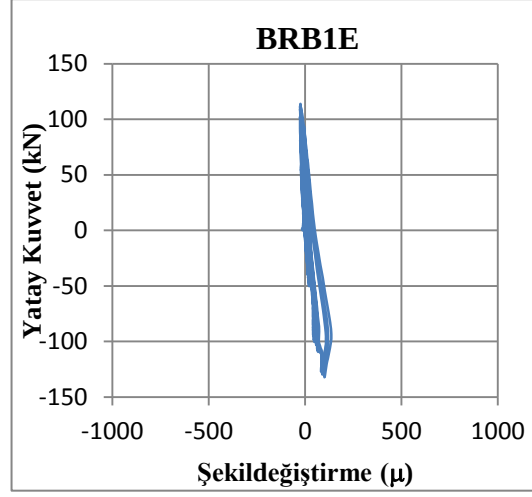
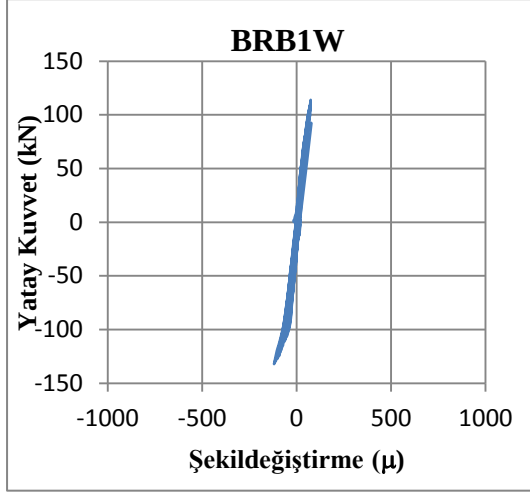
EK C1: BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri aşağıda verilmektedir.



BRB2E Kanal Verisi Yok!

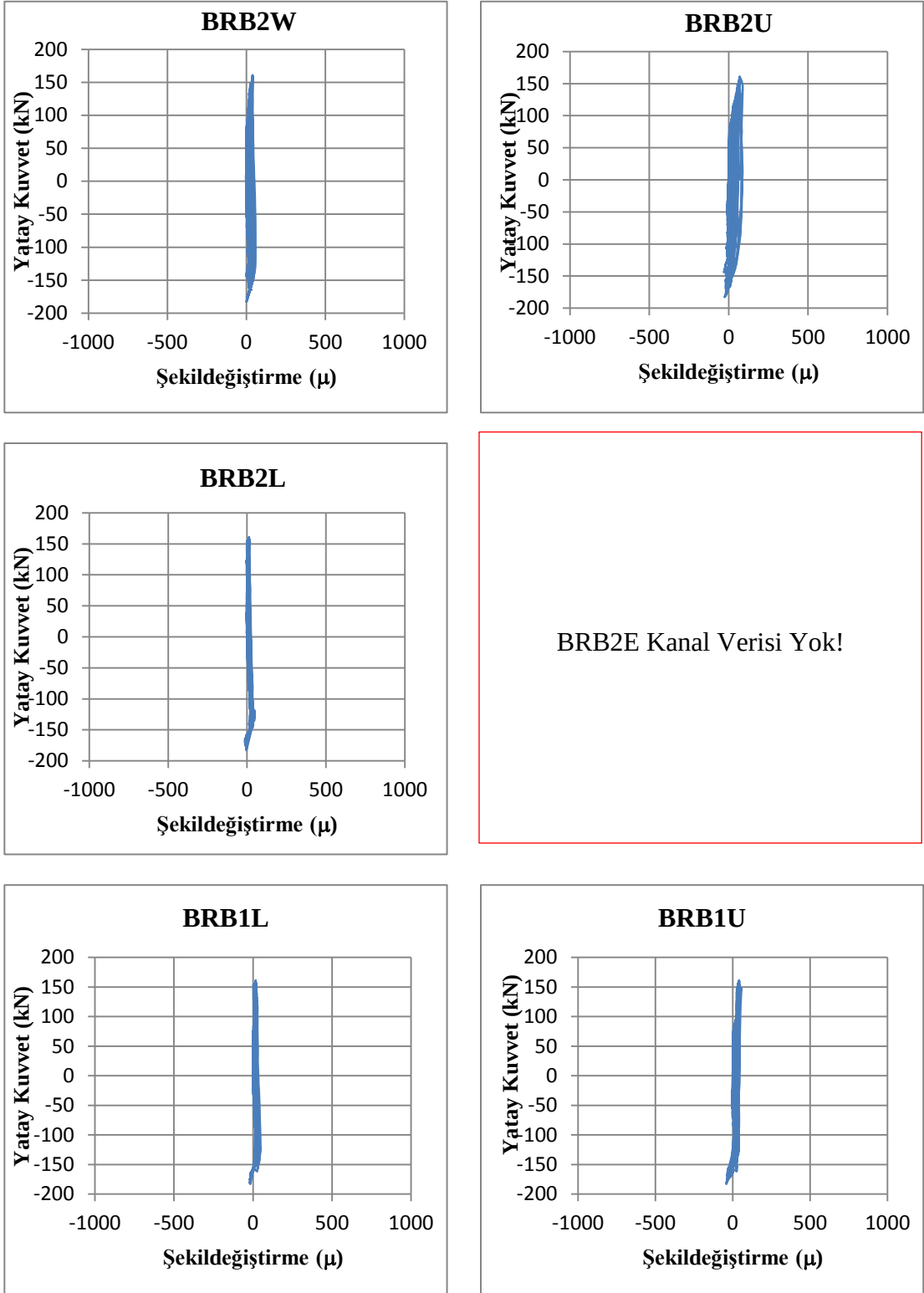


Şekil C.1 : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

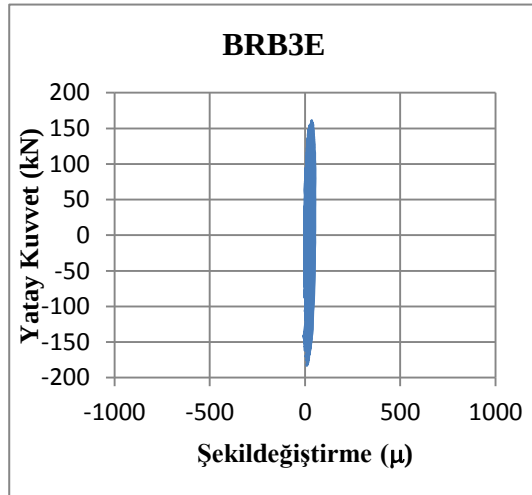
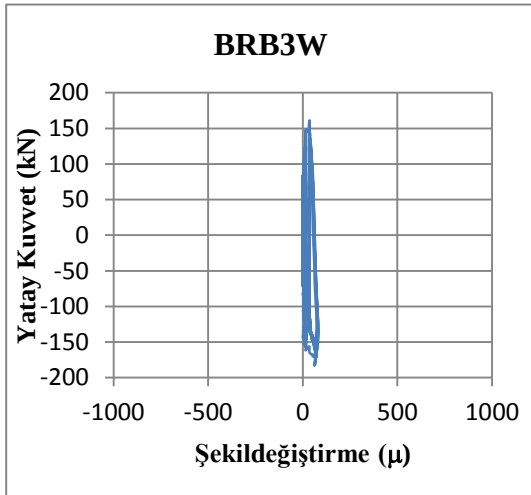
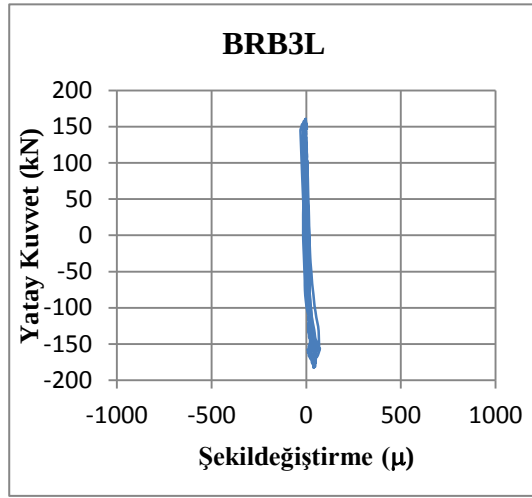
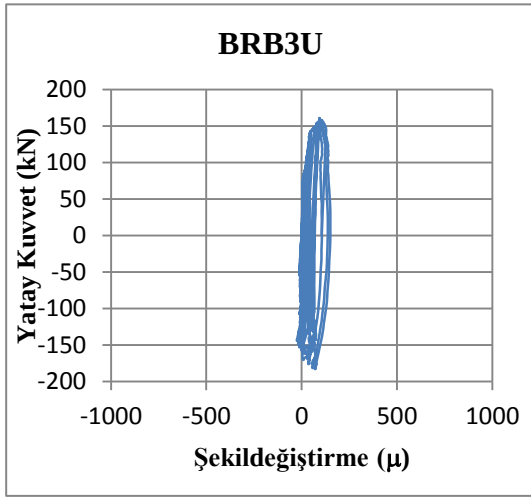
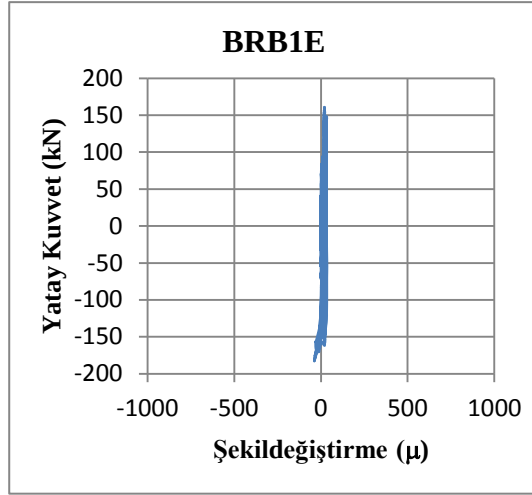
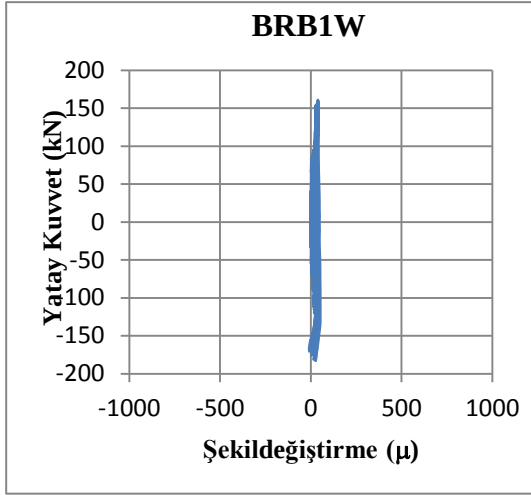


Şekil C.1 (devam) : BRB-AC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

EK C2: BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-dış t p  ekilde i tirme histeretik e rileri a a ıda verilmektedir.

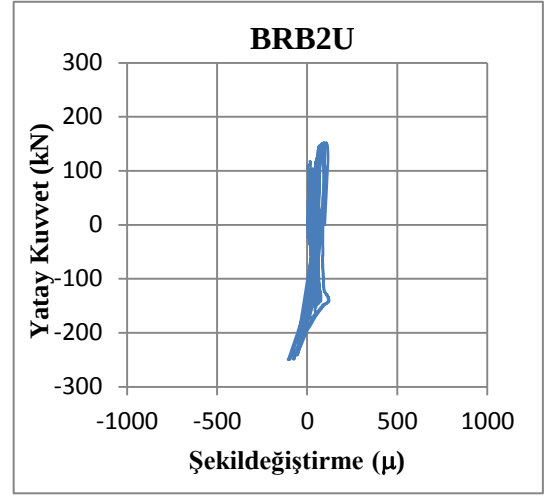
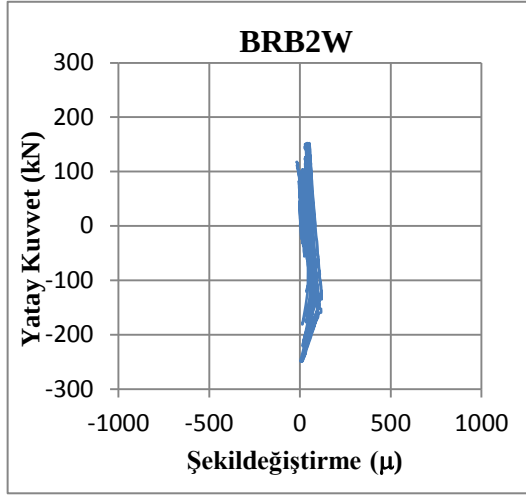


Şekil C.2 : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-dış t p  ekilde i tirme histeretik eğrileri.

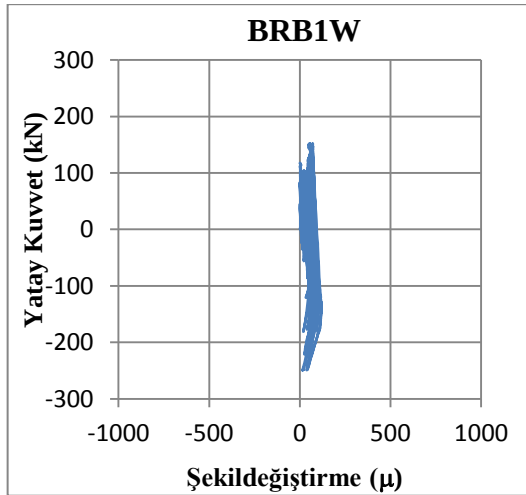
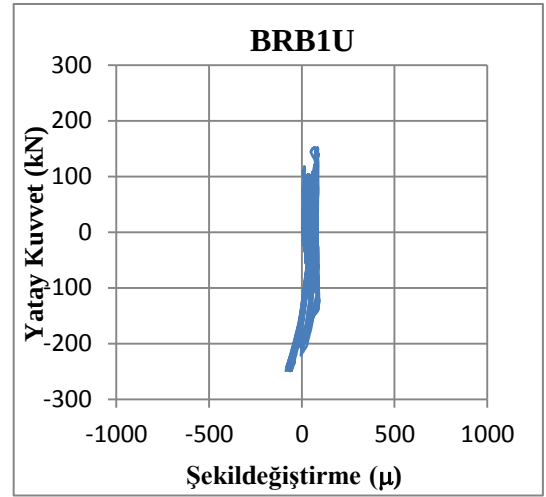


Şekil C.2 (devam) : BRB-AC2 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

EK C3: BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri aşağıda verilmektedir.

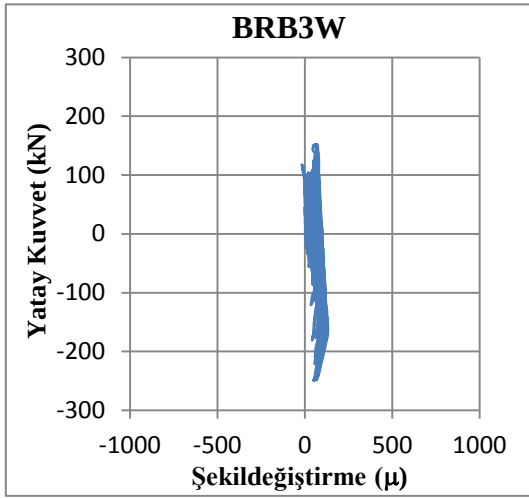
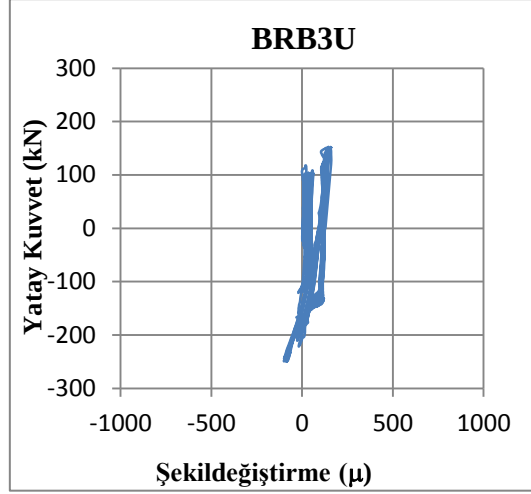
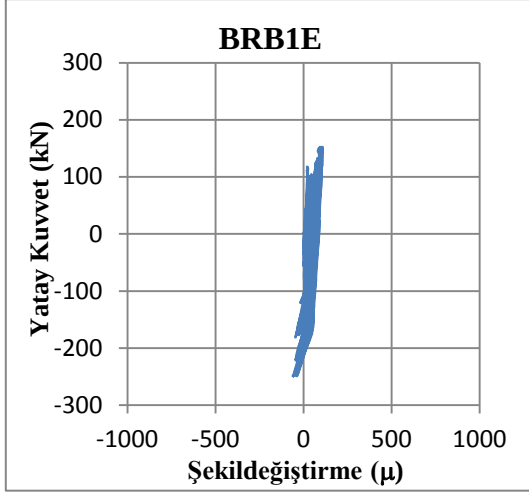


BRB2L Kanal Verisi Yok!



BRB1L Kanal Verisi Yok!

Şekil C.3 : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.



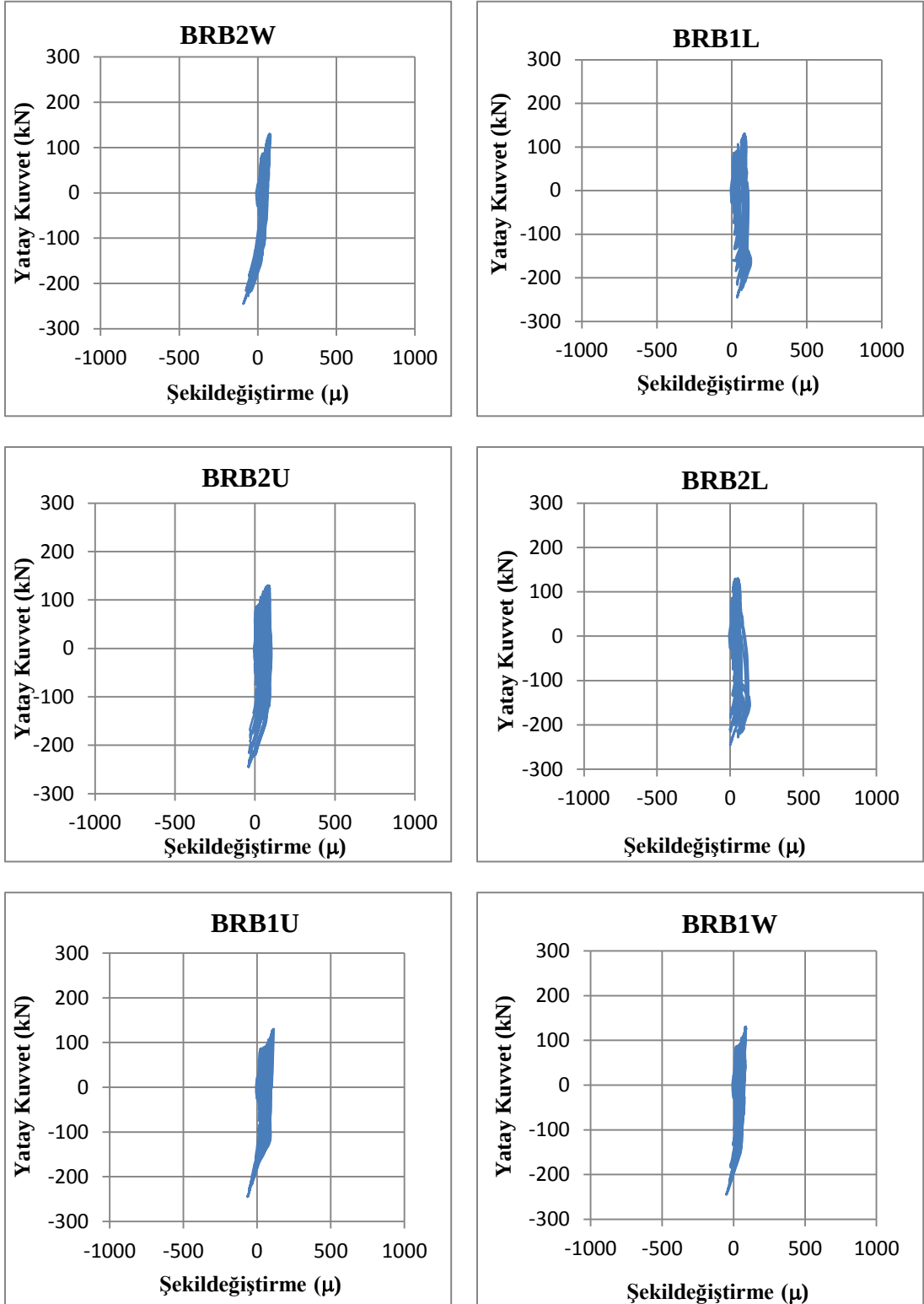
BRB2E Kanal Verisi Yok!

BRB3L Kanal Verisi Yok!

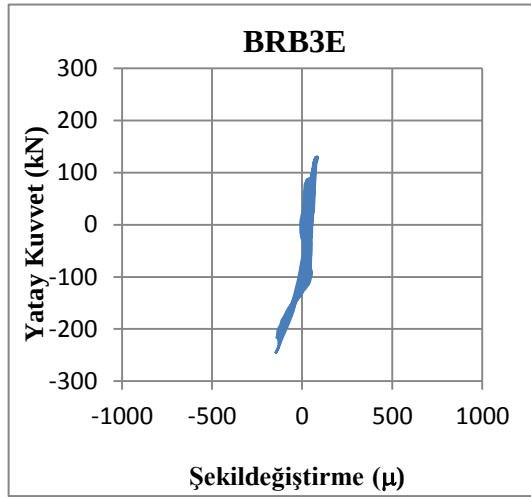
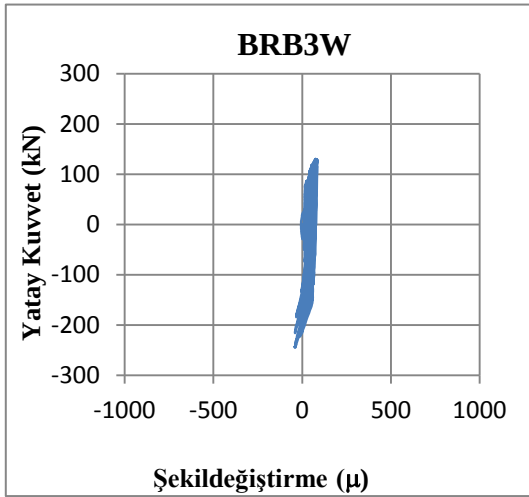
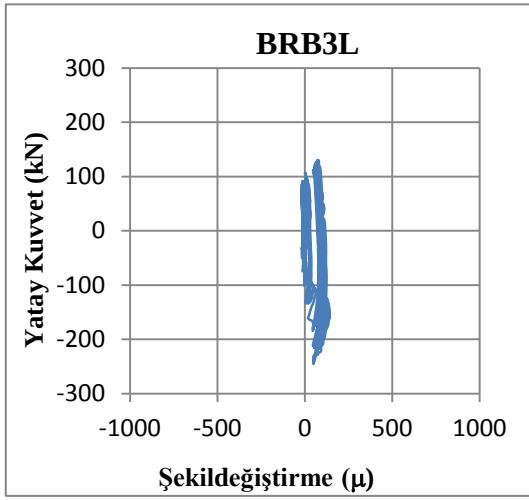
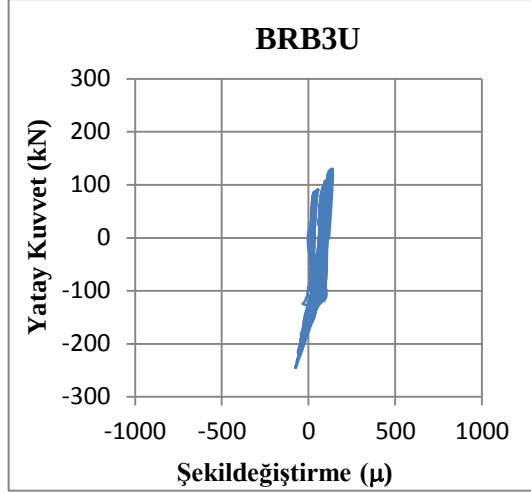
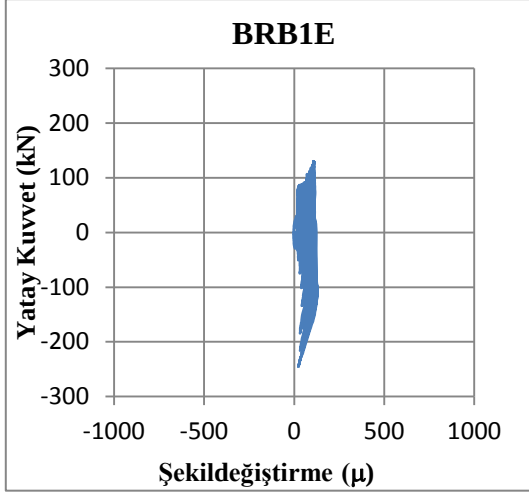
BRB3E Kanal Verisi Yok!

Şekil C.3 (devam) : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

EK C4: BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-dış t p  ekilde i tirme histeretik eğrileri aşağıda verilmektedir.



Şekil C.4 : BRB-SC2 numunesi yatay kuvvet-dış t p  ekilde i tirme histeretik eğrileri.



Şekil C.4 (devam) : BRB-SC1 numunesi yatay kuvvet-dış tüp şekildeğiştirme histeretik eğrileri.

EK D

Çelik ve alüminyum numunelerin kaynaklı üretimine ilişkin kalite kontrol formları Cd-Rom halinde tezin eki olarak sunulmuştur. Cd-Rom arka karton kapağın iç kısmına yapılan cep içine yerleştirilmiştir. Numunelerin üretimi sırasında kalite denetimi ile kaynakların uygunluğu kontrol edilmiştir. Kaynak kontrolleri öncelikle gözle yapılmış daha sonra ultrason ve penetrasyon testleri ile tüm kaynak dikişlerinin kontrolü yapılmıştır. Son kontrolden onay alınarak BÖÇ'ler laboratuvara getirilmiştir.

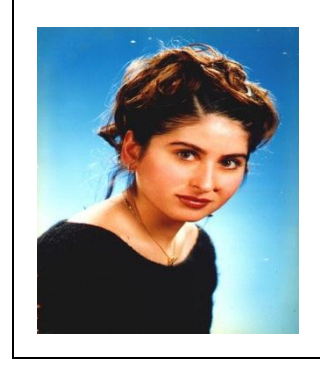
EK E: KÖSTER-VGM5 yüksek mukavemetli tamir harcı basınç dayanım raporu

 SANTAYINSAAT TAHHÜT VE TİCARET A.Ş. e-mail : sinta@sinta.com.tr - web : www.sinta.com.tr	 TSE KALİTE BELGELİ LİSTE NO : 2011 / 02	
İTÜ 110M779 no'lu Tübitak Projesinin Burkulması Önlenmiş Çaprazlarında kullanılan KÖSTER-VGM5 dolgu malzemesinin 7 ve 28 günlük beton basınç dayanımı aşağıda verilmiştir.		
Saygılarımla. Mecit GÜNDÜR Hazır Beton İşl. Müd. 		
<u>Numune Tarihi</u>	<u>7 günlük basınç dayanımı</u>	<u>28 günlük basınç dayanımı</u>
23.07.2011	61,38 mpa	71,16 mpa
23.07.2011	57,88 mpa	66,50 mpa
23.07.2011	55,07 mpa	63,02 mpa

İNŞAAT-PREFABRİK VE TRAVERS ÜRETİM-ÇELİK KONSTRÜKSİYON-HAZIR BETON ÜRETİM-AGREGA ÜRETİM	İNŞAAT-PREFABRİK VE TRAVERS ÜRETİM-ÇELİK KONSTRÜKSİYON-HAZIR BETON ÜRETİM-AGREGA ÜRETİM	İNŞAAT-PREFABRİK VE TRAVERS ÜRETİM-ÇELİK KONSTRÜKSİYON-HAZIR BETON ÜRETİM-AGREGA ÜRETİM	İNŞAAT-PREFABRİK VE TRAVERS ÜRETİM-ÇELİK KONSTRÜKSİYON-HAZIR BETON ÜRETİM-AGREGA ÜRETİM
GENEL MÜDÜRLÜK	PREFABRİK VE TRAVERS ÜRETİM TESİSLERİ	HAZIR BETON ÜRETİM TESİSLERİ	AGREGA ÜRETİM TESİSLERİ
Organize Sanayi Bölgesi Giriş Cad. No:8 16159 BURSA Tel.: (0 224) 243 62 40 (pbx) Fax: (0 224) 243 62 42	Organize Sanayi Bölgesi Lacivert Cad. No:19 BURSA Tel.: (0 224) 242 89 71 Fax: (0 224) 242 89 72	Mudanya Cad. Üzeri Geçit Köyü 16150 BURSA Tel.: (0 224) 244 96 51 - 52 Fax: (0 224) 244 96 36	Yörükçenicesi Köyü Mudanya / BURSA Tel.&Fax: (0 224) 559 82 55

Şekil E.1 : KÖSTER-VGM5 yüksek dayanımlı tamir harcı basınç dayanım raporu.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Çiğdem (Avcı) KARATAŞ
Doğum Yeri ve Tarihi: İstanbul – 12.06.1978
E-Posta: cigdem.karatas@hotmail.com
Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 1998
Yüksek Lisans: İstanbul Teknik Üniversitesi, 2001

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

KURUM/KURULUŞ	ŞEHİR	BÖLÜM/BİRİM	GÖREV	GÖREV DÖNEMİ
Namık Kemal Üniversitesi	Çorlu/TEKİRDAĞ	İnşaat Mühendisliği	Araştırma Görevlisi-33/a	2006-
Trakya Üniversitesi	Çorlu/TEKİRDAĞ	İnşaat Mühendisliği	Araştırma Görevlisi-33/a	2002-2006
İBB Ulaşım Koordinasyon Müdürlüğü & JICA (Japan International Cooperation Agency) Komisyonu	Fatih/İSTANBUL	AKOM-Deprem Mühendisliği İstanbul Mikrobölge Planlama Projesi	JICA Eş Uzmanı	2001-2002
Erdemli Proje	Nişantaşı/İSTANBUL	İnşaat Mühendisliği	Çelik Yapılar Hesap Mühendisi	2000-2001
Ticaret Sigorta A.Ş.	Nişantaşı/İSTANBUL	Risk Mühendisliği	Risk Uzmanı	1998-2000

Proje Deneyimi:

PROJE ADI	KURUM	BÜTÇE	TARİH	GÖREV	PROJE TÜRÜ
Burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeve sistemlerinin sayısal ve deneysel olarak incelenmesi	İstanbul Teknik Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü/BAP BİRİMİ	12.000TL	16/03/2010 - 16/09/2012	Araştırmacı	BAP
Çelik ve alüminyum çekirdekli burkulması önlenmiş çaprazların histeretik davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi	TÜBİTAK-1002	25.000TL	01/01/2011 - 01/01/2012	Bursiyer	TÜBİTAK

Yayın ve Patent Listesi:

- Karataş Ç. (2007). Çok katlı yapılarda kompozit tasarımın, çelik tasarımına göre sağlayacağı avantajlar üzerine bir çalışma. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Şubesi, 2. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 10-11 Mayıs, 2007 Eskişehir, Türkiye.
- Avcı Ç. (2005). Çok katlı bir yapının çelik ve kompozit çözümlerinin karşılaştırılması. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Ankara Şubesi, 1. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 21-22 Nisan, 2005 Ankara, Türkiye.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- Karataş Ç. ve Çelik O. C. (2012). Çelik ve alüminyum çekirdekli burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) histeretik davranışlarının deneysel ve sayısal olarak incelenmesi. *Teknik Rapor*, No.110M779, TÜBİTAK MAG, Ankara, Türkiye.
- Karataş Ç. ve Çelik O. C. (2011). Çekirdeği alüminyum alaşımlı burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) tasarımı ve üretimi. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, 4. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 8-9-10 Ekim, 2011 İstanbul, Türkiye.
- Karataş Ç. ve Çelik O. C. (2009). Burkulması önlenmiş çaprazlı çelik çerçeve sistemlerinin incelenmesi. *Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Gaziantep Şubesi, 3. Çelik Yapılar Sempozyumu*, 8-9-10 Ekim, 2009 Gaziantep, Türkiye.