

Alüminyum alaşımlı çekirdekli burkulması önlenmiş çaprazların (BÖÇ) tasarımı üretimi ve yön değiştiren tekrarlı yükler etkisindeki davranışı

Design, fabrication, and cyclic behavior of aluminum alloy core buckling restrained braces (BRBs)

Çiğdem AVCI KARATAŞ^{1*}, Oğuz Cem ÇELİK²

¹Ulaştırma Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Yalova Üniversitesi Yalova, Türkiye.
cigdem.karatas@yalova.edu.tr

²Yapı ve Deprem Mühendisliği Birimi, Mimarlık Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
celikoguz@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 06.05.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 05.08.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.58751
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan çelik malzemeye alternatif farklı bir çekirdek malzemesi olan alüminyumun kullanılma olanakları araştırılmıştır. Buradaki tipik özellikleri ile ilk defa üretilen ve denenmiş alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin, çelik BÖÇ'lere göre olası davranış verimliliğinin/üstünlüğünün irdelenmesine yönelik çalışmalardan elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Tasarımı yapılan BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan alüminyum alaşım malzemelerinin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme numunesi, öngörülen standartlara göre ve çekirdek boyutlarına yakın boyutlarda hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır. Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar BÖÇ'ün tasarımında ve üretiminde kullanılacak malzemenin seçimine yönelik önemli bilgiler içermektedir. Ayrıca, BÖÇ'lerin çekirdekleri üzerinden şekildeğiştirme ölçümlerinin yapılabilmesi için bir strain-gauge yerleştirme düzeni önerilmiş ve denenmiştir. Deneysel yöntemle incelenen BRB-AC1 ve BRB-AC3 numunelerinin üretiminde A5083-H111 alüminyum alaşımlı malzemenin tercih edilme nedenleri kapsamlı şekilde verilmiştir. Alüminyum BÖÇ'lerin üretimi, uygulanan kaynak prosedürü, çevrimsel yüklemeye deneyi, veri toplama sistemi ile ilgili elde edilen sonuçlar da bu çalışma kapsamındadır. Numunelerin kuvvet-yerdeğiştirme histeretik eğrileri, çekme ve basınç taşıma kapasiteleri, (E_h) enerji yutma miktarları, (η) kümülatif inelastik yerdeğiştirmeleri ve (ξ_{effb}) etkili sönüm oranları karşılaştırılmıştır. Simetriğe yakın histeretik eğri elde edilmesini garantileyen β basınç dayanımı düzeltme katsayısının deneylerde $\beta < 1.3$ olması koşulu sağlanmıştır. Uç birleşimi kaynaklı olarak düzenlenen BÖÇ'ün (BRB-AC3) davranış özelliklerinin kaynaklı uç birleşimi olana (BRB-AC1) göre çok daha üstün olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar kelimeler: Alüminyum alaşım, Burkulması önlenmiş çapraz, Histeretik davranış

Abstract

Potential use of aluminum alloy core material as an alternative to steel in BRBs was investigated. Effectiveness/superiority of such braces that are designed, produced, and tested for the first time in this work, over the available types of BRBs is evaluated. Numerous tensile test specimens (coupons) were prepared in prototype samples according to the prescribed standards. Material test results contain valuable information for choosing the materials to be used in designing and fabricating the BRBs. A strain-gauge placement configuration was also suggested and tested in order to correctly measure the axial strains in the yielding portions of BRB cores. The reasons of why A5083-H111 aluminum alloy materials were preferred in the fabrication of BRB-AC1 and BRB-AC3 specimens were given in detail. Fabrication steps of aluminum alloy BRBs, welding procedures followed, assumed cyclic loading test protocol, instrumentation and data acquisition system used in the tests were described in the scope of this study. Experimentally obtained force-displacement hysteretic curves, tension and compression capacities, dissipated cumulative energies (E_h), cumulative inelastic displacements (η), and effective damping ratios (ξ_{effb}) were calculated and compared. The requirement indicating that tests must involve the highest compression adjustment factor ($\beta < 1.3$), ensuring the symmetrical hysteretic curves, was fulfilled. It is concluded that aluminum alloy BRBs (BRB-AC3) with weld-free end connections have superior behavioral values when compared to aluminum alloy BRBs with welded end connections (BRB-AC1).

Keywords: Aluminum alloy, Buckling restrained brace, Hysteretic behavior

1 Giriş

Klasik çelik çaprazlar, çelik ve betonarme binalarda deprem ve rüzgârdan kaynaklanan etkilere karşı bir önlem olarak tasarlanmaktadır. Genelde narin elemanlardan oluşturulan çaprazlar basınç kuvveti altında burkularak büyük şekil değiştirme yapmaktadır. Bu tür elemanlarda herhangi bir nedenle meydana gelmesi olası taşıma gücü kaybı, çerçeve ötelemesinin istenmeyen düzeylere ulaşmasına neden olmaktadır. Son depremler, binalarda kararlı enerji yutulmasının ve kat ötelemelerinin kabul edilebilir düzeylerde tutulabilmesinin son derece önemli olduğunu göstermiştir [1]. Burkulması önlenmiş çaprazlar (BÖÇ), Japonya ve ABD'de özellikle binalarda uygulamaları olan bir tür mekanik

sönümleyicilerdir. Klasik çaprazların aksine BÖÇ basınç etkisinde burkulmamakta, çekme ve basınçta akarak büyük boyuna şekil değiştirmeler yapmakta ve böylece deprem enerjisini yutmaktadırlar. BÖÇ'lü çerçeveler mevcut çelik ya da betonarme binaların rijitlik dayanım ve sünekliklerinin artırılması için güçlendirme amacıyla, yeni binalarda ise etkin enerji yutma elemanı olarak kullanılabilirlerdir. BÖÇ'lerin çekme ve basınçta yaklaşık simetrik davranış göstermesi, rijitlik ve dayanım kaybı göstermeden aynı zamanda dolu ve stabil histeretik eğrilerin elde edilmesi ve bir deprem sonrasında değiştirilebilmesi özelliği kullanım alanını genişletmiştir. Bu özellik diğer alternatif sistemlere göre BÖÇ'lere önemli üstünlükler getirmektedir.

Sektörde Amerika ve Japonya'da bulunan çeşitli firmaların patentinde satılan çelik BÖÇ üreticilerinin karşılaştığı en büyük sorun olan korozyon dayanımı çaprazın kullanım ömrünü azaltan ve zamanla davranışı olumsuz yönde etkileyen önemli bir ayrıntıdır. Bu çalışmadaki motivasyon, BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan çelik malzemeye alternatif farklı bir çekirdek malzemesi olan alüminyumun kullanılma olanaklarının araştırılmasıdır. Çelik BÖÇ'lerde oluşan çekme ve basınç dayanımı arasındaki %15~20'lere ulaşan farkın, üretilen alüminyum BÖÇ'lerde azaltılması hedeflenmiştir. Alüminyumun elastisite modülü çeliğe göre daha düşüktür. BÖÇ'lü çelik çerçevenin birinci olarak elastik titreşim periyodu benzer özellikli alüminyum çaprazlı sistemin periyoduna göre daha kısa olacağından sistem üzerine etkileyen deprem yükünün daha fazla olması beklenebilir.

Alüminyum, çeliğe göre hafif, yumuşak, düşük sıcaklıklarda bile ani darbelerle gösterdiği dayanımı yüksek, estetik ve kolay şekil verilebilme (ekstrüzyon vb.) ile yüksek korozyon dayanım özelliklerine sahiptir. Yoğunluğu çeliğin ve bakırın 1/3'ü kadar olup yüksek dayanım/ağırlık oranı alüminyumun diğer önemli bir üstünlüğüdür. Örneğin, 6xxx serisi yumuşak ekstrüzyonlu alaşımlar magnezyum ve silisyum içerikte olup yapı sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapısal alanda alüminyum ve alüminyum alaşımlarının kullanımına yönelik çalışmalar bulunmaktadır. De Matteis ve diğ. [2] rüzgâr yüklerine karşı binalarda pasif koruma aracı olarak alüminyumun kullanılmasına yönelik çalışmalarda bulunmuşlardır. Yine De Matteis ve diğ. [3] A1050 ve A5154 alüminyum alaşımlarının kullanıldığı ve kalınlığı 5 mm olan ince levhalardan oluşan perdelerin yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki verimliliğini deneysel olarak araştırmışlardır. Yatay yüklere karşı yüksek rijitlik sağlayan levhalar, basınç etkisinde burkulup, çekme etkisinde akarak sünek davranış göstermişlerdir. Alüminyum levha perdelerde özellikle A1050 düşük akma dayanımlı (≈ 20 MPa) alüminyum kullanarak enerji yutma kapasitesinin arttığı gözlemlenmiştir. Rai ve Jain [4] 6063-O ve 1100-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 probleminde daha az etkilenmektedirler. Çalışmada $t = 4.5, 6.5$ ve 7.6 mm kalınlığında, $h = 152.4$ mm yükseklik ve $b = 100$ mm genişliğinde 19 deney numunesi hazırlanarak, hidrolik veren kapasitesi 500 kN, yerdeğiştirme kapasitesi $\delta = \pm 125$ mm olan bir yükleme düzeneğinde yön değiştiren tekrarlı yükler altında davranışları gözlenmiştir. Alüminyum kare ve dikdörtgen kesitli tüp kolonların basınç etkisindeki davranışları Zhu ve Young [5] tarafından incelenmiştir. 29 adet kolon alüminyum bayrak levhalarına her iki ucundan tungsten kaynak metodu (TIG) ile enine doğrultuda kaynaklanmıştır. Kolonlarda tümsel burkulma, yerel burkulma biçimleri karşılaştırılmıştır. Kaynak yönteminin ısı tarafından etkilenen (Heat Affected Zone-HAZ) bölgelerde yumuşamadan dolayı kesitte kopmalar görülmüştür. Deneylerden elde edilen sonuçlar standartlarda verilen değerlerle karşılaştırılmıştır. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarda HAZ'da ana metal dayanımının en az yarı yarıya azaldığı görülmüştür. Zhou ve Young [6] beton dolgululu dairesel kutu kesitli alüminyum kolonların deneysel davranışını incelemişlerdir. 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 240 MPa'dır. Tüp kesitlerin çap/kalınlık (D/t) oranları (yerel narinlikleri) 9.7~59 arasında değişmekte olan toplam 42 kolon tasarlanmıştır. Eksenel basınç kuvveti altındaki kolonların eksenel kısalması, birim şekil değiştirmesi ve göçme modları araştırılmıştır. Dairesel kesitli tüplerin beton çekirdeği sargılamasının kare tüp kesitlere göre daha iyi olduğu görülmüştür; bu, dairedaki çap/kalınlık oranlarının (D/t) kare tüp kesitlere göre daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Bu şekilde yırtılmanın daha az geliştiği gözlemlenmiştir.

Alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler üretimi ve deneysel üretimi üzerine sınırlı çalışmalar vardır. Usami ve diğ. [7] özellikle köprü mühendisliği bakımından alüminyum alaşımlı BÖÇ kullanımının getireceği üstünlüklere ilişkin bilgi vermişlerdir. 18 numuneden oluşan az çevrimli/düşük devirli yorulma deneylerinde alüminyum alaşımlı numunelerden kararlı histeretik eğriler elde edilmiştir. A5083-0 alüminyum alaşımlı, kaynaklı BÖÇ'lerin HAZ noktasındaki (akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte kaynakların yapıldığı bölüm) dayanım azalması sonucu oluşan çekirdek kopmaları sonrasında farklı tipte kaynaklı A6061-T6 alüminyum alaşımlıdan çekirdeği olan BÖÇ'lerden hedeflenen kümülatif inelastik yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilen 10 adet alüminyum alaşımlı BÖÇ'ün az çevrimli yorulma deneyleri Wang ve diğ. [8] tarafından gerçekleştirilmiştir. Az sayıda olan çalışmalar alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin üretimi ve tekrarlı yükler altındaki davranışlarının daha net tahmin edilebilmesi bakımından eksikliklerin olduğunu göstermiş, var olan teknolojiyi geliştirme bakımından deneysel içeriği üstün nitelikli farklı tiplerde alüminyum alaşımlı BÖÇ üretimi ve denenmesi bu çalışmanın ana amacını oluşturmuştur.

Çelik BÖÇ'lere alternatif, farklılığı olan, aynı akma dayanımlı, basit uç detayına sahip, gerçeğe yakın ölçekli 2 adet alüminyum alaşımlı BÖÇ numunesi geliştirilmiş ve İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenmişlerdir [9]. Çelik çekirdekli BÖÇ malzemesine alternatif olarak yukarıda açıklanan alüminyum alaşım malzeme alternatifleri dikkate alınarak bu çalışma için uygun görülen alüminyum alaşım serisinden soğuk şekillendirilmiş A5083-H111 ve ısı işlem görmüş A6061-T6 kullanılmıştır. Alüminyum dış tüpler istenilen boyutlarda ekstrüzyon yöntemiyle A6060-T66 alaşımlıdan üretilmiştir. Bilindiği kadarı ile alüminyum malzemenin BÖÇ'lerin dış tüp ve çekirdek malzemesi olarak kullanılma ilk kez burada ele alınmaktadır. BÖÇ'leri oluşturan alüminyum alaşım malzemelerinin mekanik çekme deneyleri ve üretiminde uygulanan kaynak yöntemi de açıklanmıştır. Denenen BÖÇ'lerin deney sonuçlarının değerlendirilmesi yapılarak, elde edilen yatay kuvvet-yatay yer değiştirme histeretik davranış eğrileri, histeretik enerji grafikleri, yatay kuvvet-düzlem dışı yer değiştirme histeretik eğrileri, yatay kuvvet-çekirdek şekil değiştirme histeretik eğrileri, yatay kuvvet-bayrak plakası yer değiştirme histeretik eğrileri verilmiştir. BÖÇ'lerin etkili sönüm oranları hesaplanarak karşılaştırılmıştır.

2 Malzeme deneyleri

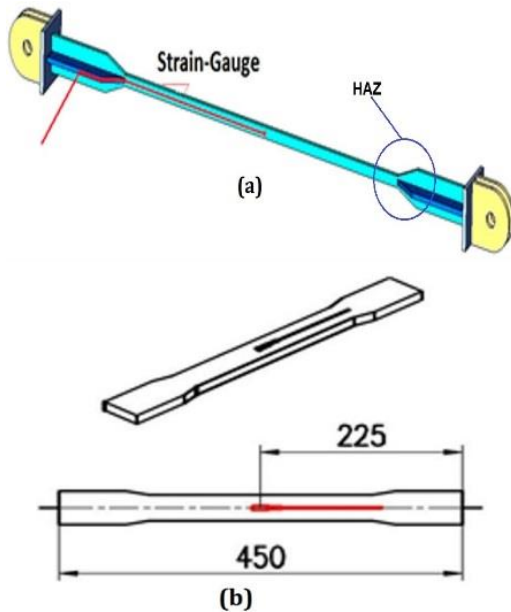
Bu bölümde alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan alüminyum malzemelerine ilişkin çekme (kupon) deneyleri kapsamlı olarak verilmiştir.

2.1 Çekme deneyi hazırlıkları

Tasarımı yapılan BÖÇ'lerin üretiminde kullanılan alüminyum alaşım malzemelerin mekanik özelliklerini tam olarak belirleyebilmek için çok sayıda çekme numunesi öngörülen standartlara göre ve çekirdek ölçülerine yakın boyutlarda hazırlanarak çekme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmada malzeme özelliklerinin belirlenmesinde ASTM E8/E8M-09 [10] standartlarına göre alüminyum alaşımlı plakalardan toplam 8 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri İTÜ İnşaat Fakültesi, Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Şekil değiştirmelerin ölçülmesinde akma sonrası şekil değiştirmeleri ölçen çelik yüzeye uyumlu YFLA-10-3L, alüminyum yüzeye uyumlu FLA-10-23 tipindeki şekil değiştirme ölçerler (strain-gauge) kullanılmıştır. Bu şekil değiştirme ölçerler yaprak tipi olup özellikle uygulama kolaylığı, devreden yüksek akım geçmesi, kesit alanının yüzey alanına oranı daha büyük olması ile tel şekil değiştirme ölçerlere göre üstünlük sağlamaktadırlar. Deneylerde alüminyum alaşımlı çekme numuneleri için her iki tip strain-gauge kullanılarak elde edilen sonuçlar arasında bir karşılaştırma da yapılmıştır. Akma sonrası şekil değiştirmeleri de okuyabilen YFLA-10-3L'nin alüminyum alaşımlı BÖÇ'ler için kullanılmasının daha uygun olduğu anlaşılmıştır.

BÖÇ'lerin çekirdek üzerinden şekil değiştirme ölçümlerinin yapılması için metal yüzeyine açılan kanallara strain-gauge yerleştirilmiştir (Şekil 1a). Bu uygulama, bilindiği ve ulaşıldığı kadarıyla, BÖÇ teknolojisi için yeni bir ölçüm uygulaması olmuştur. Yapılan bu uygulamanın başarısını ölçmek için önceden hazırlanan her çekirdek çekme numunesine kullanılan strain-gauge ölçülerine uygun şekilde $\phi 2\text{ mm}$ 'lik parmak freze kullanılarak kanallar açılmıştır (Şekil 1b).



Şekil 1: (a): BÖÇ'ün çekirdek metal yüzeyine açılan kanalın genel görünüşü, (b): Çekme numunelerine açılan kanalların genel görünüşü.

Açılan kanallar içine önce bir tabaka yapıştırıcı ile strain-gauge'lerin yerleri sabitlenmiştir. Sonrasında mevcut kanal boşlukları epoksi esashi, çift bileşenli metal dolgu malzemesi ile doldurularak kapatılmış ve kurumması için bir gün beklenilmiştir. Strain-gauge yük hücresinin üzeri monotonik

hareketi sırasında zarar görmemesi için özel bir bantla kapatılmıştır. Kanal açılan numunelerin çekme deneyleri sonucunda, BÖÇ'ün çekirdek gerilme-şekil değiştirme davranışını tam olarak anlayabilmek için uygulanan kanala strain-gauge yerleştirme işleminin başarılı olduğu görülmüştür. Üretilen çaprazlara strain-gauge'ler sürtünmesiz yüzey malzemesinden önce yerleştirilmiştir.

2.2 Çekme deneyleri

Çekme deneyinde çekme numunelerine sürekli artan çekme kuvveti uygulanarak kopma anına kadar uygulanan kuvvet ve numunede meydana gelen uzama kaydedilmektedir. Kanallı çekme deneyi parçalarında akmanın başladığı noktaya kadar okumalar alınmış sonrasında şekil değiştirme ölçerler hasar görmüştür. Belirgin akma sahanlığı göstermeyen alüminyum malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirgin akma özelliği göstermediğinden akma sınırı "kalıcı şekil değiştirme" (%0.2 Yöntemi) yöntemiyle hesaplanmaktadır. $F_{yc}^{0.2}$ akma gerilmesi %0.2 değerindeki kalıcı plastik şekil değiştirmenin ϵ eksenindeki karşılığı olan $\epsilon_y^{0.2}$ noktasından başlayarak malzeme çekme deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrusal bölüme paralel giden doğrunun eğriyi kesiği nokta olarak tanımlanmaktadır. Alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin elastik bölgedeki eksenel yer değiştirmesi hesaplanırken, $F_{yc}^{0.2}$ akma gerilmesi yerine F_{yc}^0 akma gerilmesi kullanılmıştır. F_{yc}^0 akma gerilmesi A5083-H111 alüminyum alaşımı için $\epsilon^0 = 0.8\epsilon_y^{0.2}$ noktasından başlayarak gerilme-şekil değiştirme eğrisinin başlangıçta sahip olduğu doğrunun eğriyi kestiği noktadır. A6061-T6 alüminyum alaşımı için $\epsilon^0 = 0.9\epsilon_y^{0.2}$ olarak alınması önerilmektedir [7]. Kabul edilen yaklaşımın etkinliği buradaki deney sonuçlarıyla da kanıtlanmıştır.

2.3 Alüminyum kaynaklı çekme numunesi ve çekme deneyinin yapılması

Tasarımı yapılan BÖÇ'lerin uç birleşimlerinde mevcut alüminyum alın kaynaklı birleşimin çekme ve kopma mukavemetini belirlemek için enine çekme numuneleri hazırlanmıştır. Alın kaynaklı birleşimden enine olarak alınan deney parçasına kopana kadar artan bir çekme yükü sürekli olarak uygulanmıştır. Kaynaklı çekme deney numunesi, kaynak eksenini deney numunesinin paralel uzunluğunun ortasında kalacak şekilde, kaynaklı birleştirme yerinden alınmıştır. Elde edilen sonuçlar kaynak parametrelerinin birleşebilirliğine ve mekanik özelliklere etkisini göstermektedir. Alüminyum alaşımlı plakalardan $450 \times 170\text{ mm}$ boyutlarında 2 adet plaka çıkartılmıştır. Plakalar önce ortadan ikiye kesilmiş, sonra kök yüzeyli ve altlık pasolu tek V alın kaynağı ağız açılmış ve MIG (Metal Inert Gas) kaynak yöntemi ile kaynaklanmıştır. Kaynak ağız kenarlarının düzgün ve gönyesinde olmasına dikkat edilmiştir. Kalınlığa göre kök derinliği $1.5\sim 6\text{ mm}$, kök aralığı $0.8\sim 1.5\text{ mm}$ olarak tercih edilmektedir. Deney numunelerinin kaynak işlemleri $20\text{ }^\circ\text{C}$ '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 1 mm 'lik plaka yerleştirilmiş ve kaynak ağız açılan yüzeyler birbirine temas edecek şekilde plakalar karşılıklı olarak dikkatlice sabitlenmiştir. Aynı kalınlıkta uç uca kaynak edilen iki parça aynı hızda olmaması durumunda çentik etkisi oluşmaktadır. Kaynak işleminde deney numuneleri kaynaktan önce yaklaşık $50\text{ }^\circ\text{C}\sim 200\text{ }^\circ\text{C}$ 'de bir ön tavlama yapılarak kaynak

işlemine başlanılmıştır. Koruyucu gaz olarak Argon gazı kullanılmıştır. Kaynaklı çekme numuneleri AWS D1.2/D1.2M'ye göre verilen biçim ve boyutlara uygun olacak şekilde hazırlanmıştır [11]. 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. 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 bunun yeterli dayanımı sağladığı görülmüştür.

Kullanılan kaynak teli ana metal ile aynı kimyasal analize sahip bir kaynak telidir. 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. Soğuk deformasyon uygulanarak dayanımı artırılmış A5083-H111 alüminyumunu kaynak yapılırken kaynak dikişinin etrafındaki bölgeye yerel olarak yaşlandırma işlemi uygulanmış ve malzeme 0-temperleme haline dönmüştür. Bu durumda esas metalin dayanımına yakın kaynak dayanımı elde edilebilmektedir. A6061-T6'nın yapılan röntgen kontrolleri sonrasında kaynağa bulunan boşlukların nedenleri hakkında araştırma yapılmıştır. Öncelikle her pasodan sonra curuf temizliğinin iyi yapılmadığı ve 1.2 mm çapındaki 5183 kaynak telinin A6061-T6 için yeterli kaynak dayanımını 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 taneler arası çatlak oluşumu azalmaktadır. Kaynak merkezine yakın noktalarda kaynak öncesi dayanımının önemli bir bölümünü yeniden kazanılabilmektedir. Kaynak merkezinden uzaklaştıkça fazlaşan aşırı yaşlanma bölgeleri ana metal/kaynak metalinden daha zayıf bölgeler oluşturmaktadır. Kaynak dikişinden sonra metale ısıtılma işlemi uygulanmazsa kaynak dikişine yakın bölgelerin dayanımı ana metalin dayanımına göre %30~40 daha düşük olmaktadır.

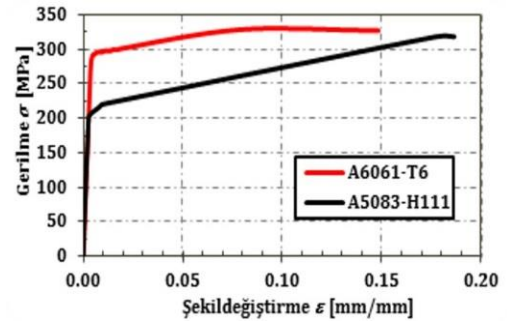
Bu nedenle A6061-T6 kaynaklı çekme numunesinin kaynak dayanımı yeterli görülmemeye bu seriden üretilecek BÖÇ'ün yerine A5083-H111 alaşım serisinden kaynaklı imalatın olmadığı yeni bir uç bağlantısı tasarımı geliştirilmiştir. Böyle bir tasarım, farklı bir uç bağlantısının da denenmesine olanak sağladığından ayrıca tercih edilmiştir. 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 HAZ'dan başlayarak kaynak dikişinin hemen yanında olduğu saptanmıştır. En yüksek çekme dayanımı ana malzemeden elde edilmiştir. A6061-T6 kaynaklı çekme numuneleri kaynak noktasından kopmuştur.

2.4 Malzeme deneyi sonuçları

Malzeme deneylerinden elde edilen sonuçlar BÖÇ'ün tasarımında ve üretiminde kullanılan malzemenin seçimine yönelik önemli bilgiler içermektedir. A5083-H111 ve A6061-T6 alüminyum alaşımlı malzemelerin mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Üretilen 2 adet alüminyum alaşımlı BÖÇ'ün (BRB-AC1 ve BRB-AC3) çekirdeği A5083-H111 alüminyum alaşımından üretilmiştir. Karşılaştırmalı gerilme-şekildeğiştirme eğrileri Şekil 2'de verilmektedir. En yüksek dayanımın A6061-T6'ya, en sünek davranışın A5083-H111'e ait olduğu gözlemlenmiştir. Dış tüplerin malzeme deneyleri üretici firma tarafından yapılmıştır. Burada; ϵ_y , ϵ_u , F_{yc} , F_u , E sırasıyla akma şekil değiştirme oranı, üniform uzama oranı, akma gerilmesi, çekme gerilmesi ve elastisite modülünü göstermektedir.

Tablo 1: Malzemelerin mekanik özellikleri.

Özellikler	A5083-H111 (BRB-AC1)	A5083-H111 (BRB-AC3)	A6061-T6
$\epsilon_y^{0.2}$ (%)	0.29	0.27	0.49
ϵ^0 (%)	0.23	0.22	0.44
ϵ_u (%)	17.51	20.00	13.10
$F_{yc}^{0.2}$ (MPa)	182	177	292
F_{yc}^0 (MPa)	146	142	263
F_u (MPa)	314	318	327
E (MPa)	73	73	71

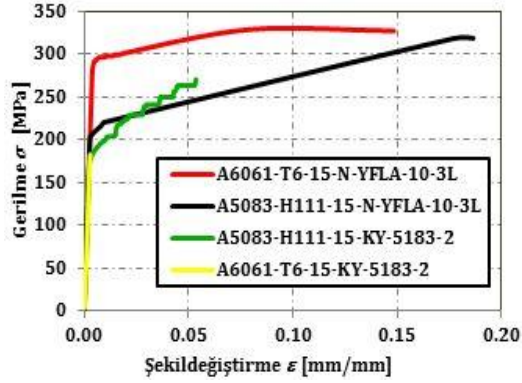


Şekil 2: Alüminyum alaşımlı malzemelerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Şekil 3'te esas metallerin ve kaynaklı çekme numunelerinin karşılaştırmalı eğrileri verilmektedir. Kaynaklı çekme numunelerinin kopma uzamaları ana metallerin kopma uzamalarının 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. Kaynaklı bağlantının HAZ bölgesinde dayanım artırıcı partiküllerin malzeme içinde daha kaba şekilde çökmesi ile bağlantının çekme dayanımı düşmektedir. Kaynaklı çekme deneyinden elde edilen sonuçlara göre alüminyum alaşımlı BÖÇ'lerin kaynak hesapları, güvenlik katsayısı 2 alınarak revize edilmiş ve son üretimler gerçekleştirilmiştir.

Kanal deney parçalarında kesitin diğer yüzüne yapıştırılan strain-gauge okumaları ile de karşılaştırmalı olarak grafikler elde edilmiştir. Kanal içine yerleştirilen strain-gauge okuması çelik malzemelerde akmanın başladığı ilk noktadan sonra, alüminyum alaşım malzemelerinde akma sonrası şekildeğiştirmelerin alınabildiği bir noktadan sonra hasar görmüştür. Ancak, bu uygulamanın BÖÇ'ün gerçek davranışını

anlamada amaca yeterli derecede etkinliği yapılan deneysel çalışmalarda kanıtlanmıştır.



Şekil 3: Esas metal ve kaynaklı çekme numunelerinin karşılaştırmalı gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

3 Alüminyum alaşımli BÖÇ'lerin tasarımı üretimi ve denemesi

3.1 Numunelerin tasarımı ve üretimi

Numuneler hidrolik verenin kapasitesini aşmayacak şekilde tasarlanmıştır. Numunelerin boyutlandırılmasında AISC 341-10 [12] ve AISC-LRFD [13] yönetmelikleri esas alınmıştır. BÖÇ'ün P_{yc} aksenal dayanımı,

$$P_{yc} = P_{max} = \beta\omega R_y F_{yc} A_c \quad (1)$$

olarak tahmin edilebilmektedir. Burada, P_{max} yön değiştiren tekrarlı yükler altında her bir çevrimdeki maksimum basınç kuvveti, β ve ω basınç ve çekme dayanımı düzeltme katsayıları, F_{yc} çekirdeğin malzeme deneyi yapılarak belirlenen gerçek akma dayanımı, A_c çekirdeğin net enkesit alanıdır. β basınçtaki aşırı dayanım ile açıklanır. ω pekleşme ile ilgili olup çekirdeğin akma dayanımının çekme dayanımına oranıdır. Çaprazda yön değiştiren tekrarlı yükler altında tümsel burkulma/kopma oluşmaması için aşağıdaki koşulların sağlanması gerekmektedir. Burada, T_{max} maksimum çekme kuvvetidir.

$$T_{max} \geq P_{yc} \quad (2)$$

$$P_{max} \geq P_{yc} \quad (3)$$

$$P_{max} < 1.3T_{max} \quad (4)$$

Uygulamada sıkça kullanılan dikdörtgen çekirdekli ve içi harçla dolgulu kare dış tüp şeklindeki BÖÇ'lerin tercih edilmesi parametre sayısını azaltmaktadır. Ayrıca, akma bölgesi uzunluğunu maksimum yapan ve daha az yatay yük ile daha çok aksenal kuvvet oluşmasına neden olan diyagonal çaprazlama kullanılmıştır. Numuneler P_{yc} aksenal akma dayanımları ve L (2275 mm) çapraz toplam uzunlukları aynı olacak şekilde tasarlanmıştır. Böyle bir seçim numunelerin enerji yutma kapasitelerini karşılaştırırken kolaylık sağlamıştır. Çapraz sistem uzunluğu 3339mm'dir. Tüm numunelerin çekirdek akma bölgesi dikdörtgen enkesitlidir. Çalışmada, maksimum akma bölgesi uzunluğu $L_{yc} \leq 0.6L$ olarak alınmıştır [9]. 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

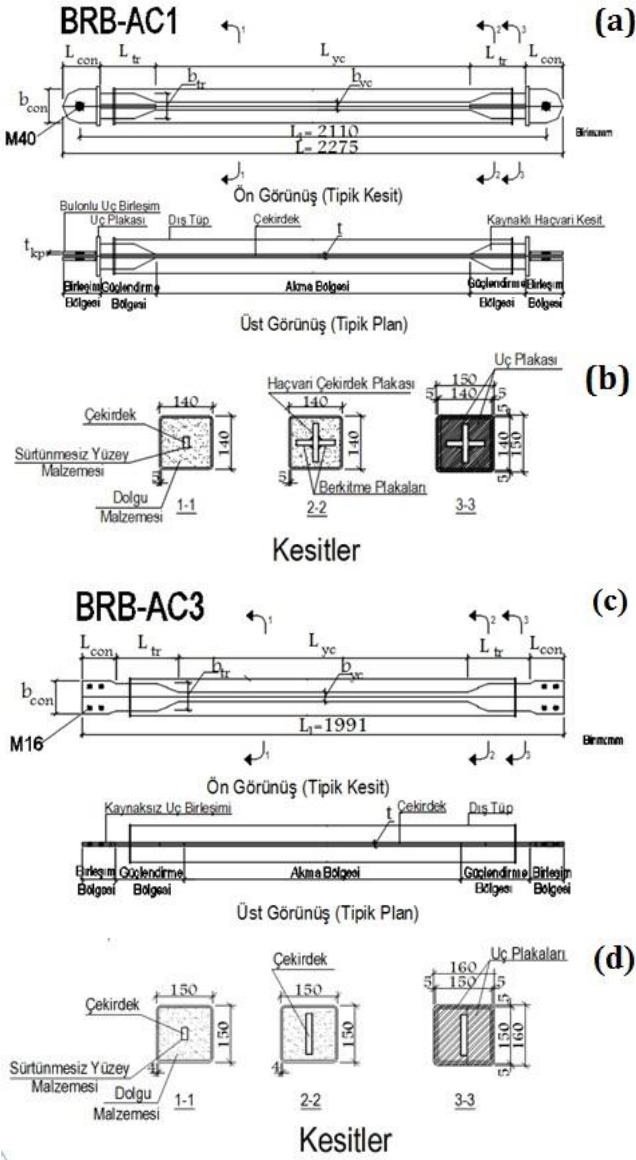
boyu katsayıları, uç mesnet koşullarının mafsallı-mafsallı varsayımı ile $K = 1$ olarak alınmıştır. KL etkin burkulma boyu için L_1 BÖÇ'lerin mafsal noktaları arasındaki uzunluk dikkate alınmıştır. Burkulmayı önleyen ortam (dolgu malzemesi+dış tüp) geometrik olarak her iki eksen etrafında eşit atalet momenti sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. BRB-AC1 A5083-H111 alüminyum alaşımli BÖÇ numunesinin güçlendirme bölgesi haç enkesitli olarak tasarlanmış olup kaynaklı olarak üretilmiştir (Şekil 4a). Ancak, yapılan ön deneysel çalışmada ve malzeme deneylerinde bu tip BÖÇ'de kopmanın erken çevrimsel seviyelerde, berkitme plakası ucundaki kaynak köşelerinin dönülmesi sonucu zayıflayan geçiş bölgesinden olduğu gözlemlenmiştir. Bu yüzden uç tasarımı ve çekirdek malzemesi değiştirilerek yine düşük akma dayanımlı A5083-H111 alüminyum alaşımından çekirdeği olan ve kaynaklı üretimin olmadığı BRB-AC3 BÖÇ numunesi tasarlanmıştır (Şekil 4b). Yeni tip BÖÇ için özgün sürtünmesiz yüzey ve iç boşluğu oluşturulmuş, özgün bayrak levhası tasarımı ile deney çerçevesinde birleşimi yapılarak, yatay çevrimsel yüklemeler altındaki davranışı incelenmiştir. BRB-AC3 BÖÇ'ün uç bağlantısında her iki ucta olmak üzere toplam 4 adet çelik korniyer profil kullanılmıştır. Numunelerin çekirdek elemanlarının geometrik özellikleri Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2: Numunelerin geometrik özellikleri.

Özellikler	BRB-AC1	BRB-AC3
L_{yc} (mm)	1278	1195
b_{yc} (mm)	35	40
t (mm)	15	15
L_{con} (MPa)	184	140
b_{con} (MPa)	165	137
L_{tr} (MPa)	315	258
b_{tr} (MPa)	115	115

Burada akma bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{yc} ve b_{yc} , güçlendirme bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{tr} ve b_{tr} , birleşim bölgesi uzunluğu ve genişliği L_{con} ve b_{con} ile gösterilmektedir. t numunelerin çekirdek kalınlığıdır. BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri için A6060-T66 alüminyum alaşımında, 150x150x4 kare tüp kesitli ve akma dayanımı 200MPa olan dış tüpler kullanılmıştır. Sürtünmesiz yüzey malzemesi olarak BRB-AC1 numunesinde politetrafloroetilen (PTFE) bant, kauçuklu gres yağı kullanılmıştır. BRB-AC3 numunesinde farklı olarak BRB-AC1 numunesi ile aynı sürtünmesiz yüzey son olarak hava kabarcıklı naylon ile sarılmıştır. Her iki numunede dolgu malzemesi olarak yüksek dayanımlı tamir harcı (Köster-VGM5, 28 günlük basınç dayanımı 64MPa) kullanılmıştır. Bayrak plakalarına birleşiminde 10.9 kalitesinde BRB-AC1 numunesi için M40, BRB-AC3 numunesi için M16 yüksek dayanımlı bulonlar kullanılmıştır.

Yapılan deneysel çalışma burada verilen tipik özellikleri ile ve bilindiği kadarıyla ilk kez uygulanmıştır. Alüminyum alaşım kullanılarak yüksek performanslı BÖÇ üretimi son zamanlarda sektörün de 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 diyafram elemanı olarak kullanılması da mümkündür. Sudaki pH değerinin 4~8 arasında olduğu denize yakın bölgelerde korozyon dayanımı açısından alüminyum alaşımli BÖÇ'lerin kullanımı önem kazanmaktadır [14].

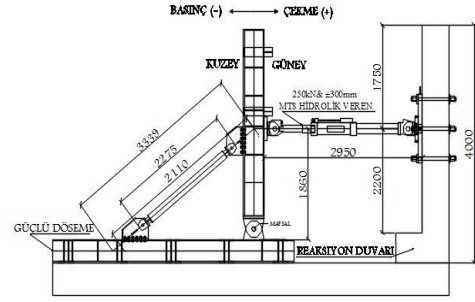


Şekil 4: (a,c): BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri plan görüşleri, (b,d): BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri kesit görüşleri.

Çelik ve alüminyumun birlikte olduğu deneysel çalışmalarda karşılaşılma olasılığı en büyük korozyon şekli "galvanik korozyon"dur. Birbiri ile temas halinde olan farklı türden metal ve alaşımların aynı korozif ortama bırakılması durumunda bu metallere daha reaktif olan korozyona maruz kalacaktır. Daha reaktif olan anodik malzemenin yüzey alanının mümkün olduğunca büyük olması gerekmektedir. Farklı metallerin elektriksel olarak birbirlerini izole etmeleri gereklidir [15]. Bu çalışmada alüminyum alaşım BÖÇ'lerin birleşiminde kullanılan çelik bulonlarla bu tür bir korozyon oluşturmaması için alüminyum bulon delikleri 1 kat epoksi esaslı boya ile boyanmıştır.

3.2 Deneysel düzeneği

Deneysel çalışma için özel bir yüklem çerçevesi kullanılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 5'te görülmektedir.

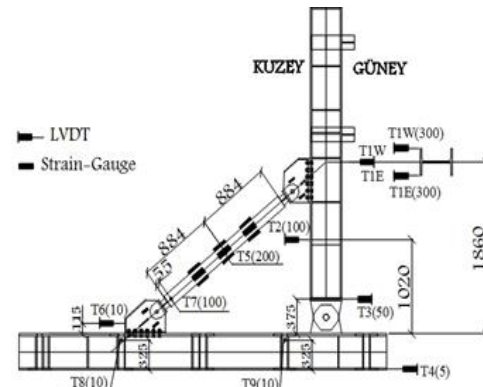


Şekil 5: Deneysel düzeneğin genel görünüşü.

Yüklem çerçevesi S275JR kalitesinde, HE400A çelik profillerden üretilmiş olup çelik temel kirişine mafsallı bağlı kolon ve bu kolonun düzlem dışı hareketini engelleyen çift taraflı çelik payandalardan oluşmaktadır. Payandalar deneysel düzeneği HE200A (S275JR kalitesinde) profillerden üretilmiştir. Deneysel düzeneğin önemli bir bölümü olan mafsallı, altta kirişe bağlanan alüminyum levhasına küt kaynakla kaynaklanmış iki adet 30 mm kalınlığında plakadan, üstte kolona bağlanan alüminyum levhasına küt kaynaklanmış bir adet 30 mm kalınlığında plakadan ve bu plakaları birbirine bağlayan E335 kalitesinde 70 mm çaplı pimden (mafsal) oluşmaktadır. Deneysel yüklemeler, 250 kN itme-çekme ve ± 300 mm yer değiştirme kapasiteli, bilgisayar kontrollü MTS hidrolik verimle (actuator) yapılmış olup bütün taşıyıcı bileşenler ve birleşimler güvenlik faktörü en az 2.00 alınarak tasarlanmıştır. Deneysel numuneleri deneysel düzeneğe hidrolik veren ile herhangi bir dışmerkezlik oluşmayacak şekilde yerleştirilmiştir; bu amaçla fotogrametrik cihazlardan da yararlanılmıştır. Çaprazların deneysel düzeneğe bağlantısı özel olarak tasarlanan bayrak plakaları ile yapılmış olup birleşimde 10.9 kalitesinde bulonlar kullanılmıştır. Deneysel düzeneğin sistemin tümsel davranışına (dayanım ve rijitlik) olarak herhangi bir katkısı olmadığı kanıtlanmıştır. Bayrak plakaları deneysel düzeneği kolon/kiriş başlıklarına M24 (10.9) yüksek dayanımlı bulonlarla birleştirilmiştir.

3.3 Ölçüm düzeneği ve veri toplama sistemi

Ölçüm aletlerinin yerleşimi çerçevenin ve BÖÇ'ün davranışını olabildiğince izlemek için tasarlanmıştır. Kolon, kiriş ve bayrak levhalarının elastik kalıp kalmadığı kritik noktalara yerleştirilen TML strain-gauge ve lineer yer değiştirme ölçerler (LVDT) ile kontrol edilmiştir. Numunelere ilişkin ölçüm düzeneği Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6: Şekil değiştirme ve düzlem içi yer değiştirme ölçerlerin yerleşimi.

Her deneyde en fazla 16 adet strain-gauge kullanılmıştır. Strain-gauge'lardan 2'si alt ve üst bayrak levhası doğu ve batı yüzeylerine monte edilerek deney düzeneğinin yüklemeler sırasında elastik kalıp kalmadığı kontrol edilmiştir. Ana çerçevenin elastik kalması BÖÇ'ün etkili çalışması bakımından önemlidir. Deneylerde her numunenin dış tüp temiz boyunun 1/4'üne ve bütün yüzeylere olmak üzere 12 adet strain-gauge yapılandırılmıştır.

300 mm kapasiteli 2 adet LVDT (T1E ve T1W) yarı stroklu (± 150 mm) olarak hidrolik veren seviyesinde tepe yerdeğiştirmesini ölçmek için kullanılmıştır. Numunenin tam ortasında düzlem dışı yerdeğiştirmeyi ölçmek için yine 300mm kapasiteli LVDT (T5) yarı stroklu (± 150 mm) olarak kullanılmıştır. Bayrak plakalarının deney boyunca elastik kalması, akmanın yalnızca çekirdek akma bölgesinde oluştuğunu, çekirdek güçlendirme ve birleşim bölgelerinin elastik davrandığını göstermektedir. Bu ölçüm için yatay kuvvet altında 10 mm kapasiteli LVDT (T6) yarı stroklu olarak kullanılmıştır. Ayrıca, deney süresince 100 mm, 10mm ve 5mm kapasiteli LVDT'ler deney düzeneğinin çalışmasını kontrolü amacıyla kullanılmıştır.

Deneyler sırasında elde edilen veriler için verileri çoğaltarak veri toplayıcı üzerinden kontrol odasına aktaran kanal çoğaltma kutusu (AWS-50C Switch Box) kullanılmıştır. 10 kanallı veri toplayıcı (TML-TDS 302 Data Logger) ve buna bağlı Visual LOG TDS-7130 programı ile elde edilen elektriksel bilgi grafik ve text dosyası olarak kaydedilmiştir.

3.4 Yükleme protokolü

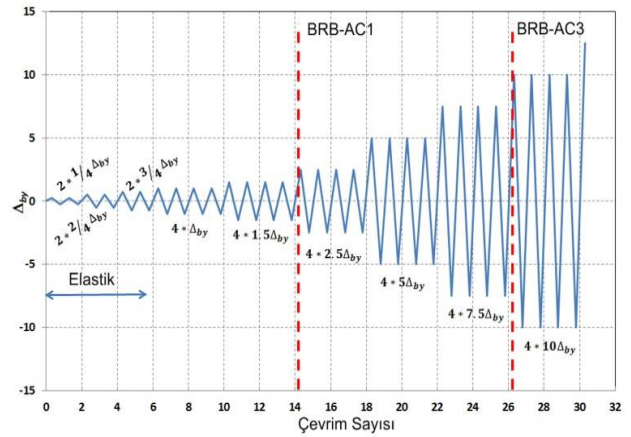
Deneyel çalışma için 2 çaprazın yön değiştiren tekrarlı yüklemeler altındaki statik yükleme deneyleri, AISC-341-10'da çelik çekirdekli BÖÇ'ler için verilen eksenel yüklemeler kriterlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Numunelerin eksenlerindeki boy değişimiyle yakından ilişkili olan tepe yatay yer değiştirmesi kontrol parametresi olarak alınmıştır. Kupon deneylerinden elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 [16] programı yardımıyla FEMA-356'da [17] verilen eksenel plastik mafsal özelliklerine göre itme (push-over) analizleri yapılarak numunelerin kuramsal kuvvet-yer değişime eğrileri elde edilmiştir.

AISC 341-10'da, BÖÇ'lü çerçevesi sistemin eksenel olmayan yüklemeler durumunda çaprazın tasarım kat ötelemesindeki şekildeğiştirme miktarı Δ_{bm} 'nin $5\Delta_{by}$ olarak alınabileceği önerilmektedir. Δ_{by} çaprazın ilk akma noktasındaki yerdeğiştirme miktarıdır. Ayrıca Δ_{bm} , kat yüksekliğinin %1'inden az olmamalıdır. Akmadan önceki elastik bölgede $2 * \Delta_{by}/4$, $2 * 2\Delta_{by}/4$, $2 * 3\Delta_{by}/4$ genlikli yerdeğiştirme çevrimleri uygulanmıştır. AISC 341-10 ilkelerine göre numunelere uygulanan $4 * 1\Delta_{by}$, $4 * 1.5\Delta_{by}$, $4 * 2.5\Delta_{by}$, $4 * 5\Delta_{by}$, $4 * 7.5\Delta_{by}$, $4 * 10\Delta_{by}$ yer değiştirmesi genlikli standart yüklemeler protokolü Şekil 7'de verilmekte olup her numunenin göçme yer değiştirmesi seviyesi kesikli çizgilerle belirtilmiştir. AISC 341-10 ilkelerine göre yüklemeler protokolü sonunda toplam plastik eksenel yer değiştirmesinin en az $200\Delta_{by}$ olması gerektiği belirtilmektedir. Bu koşul eksenel yüklemeler deneylerinde zorunlu olmakla birlikte bu çalışmada olduğu gibi yapılan çerçeve tipine benzer deneylerde zorunlu tutulmamaktadır [12].

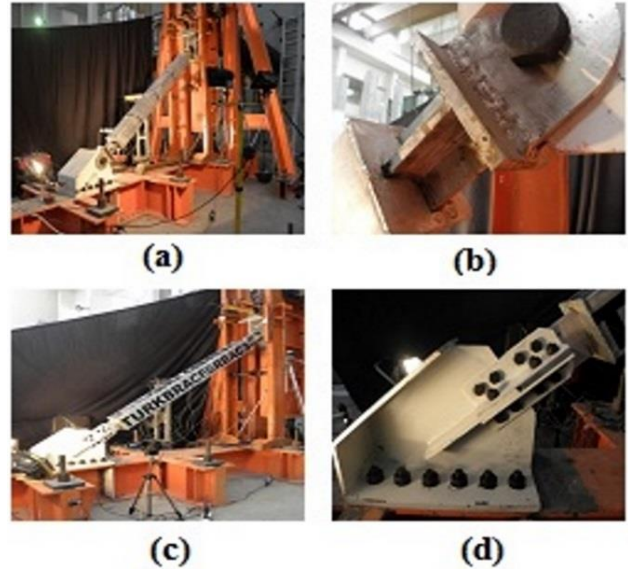
3.5 Deneyel gözlemler

Gerçek ölçülerde hazırlanan numunelerin çekme ve basınç yüklemeleri altındaki davranışları, yer değiştirmesi pikleri,

kuvvetler arasındaki oranlar eş zamanlı olarak not edilmiştir. İleriki bölümlerde verilen eğrilerde çekme bölgesi (+), basınç bölgesi (-) ile gösterilmiştir. Deney düzeneğine yerleştirilen numunelerin genel görünüşleri ve uç birleşim detayları BRB-AC1 için Şekil 8(a)-8(b) ve BRB-AC3 için Şekil 8(c)-8(d)'de verilmektedir. Deneylerde numuneler ilk olarak güney yönünde yüklenerek çekme etkisinde bırakılmışlardır. Çekme pik noktasına gelindikten sonra yük boşaltılarak ters yönde aynı pikin basıncına gidilmiştir ve yük boşaltılarak çevrim tamamlanmıştır. Deney başlangıcında kuramsal akma ve kuvvet değerlerine göre deney kontrol edilmiştir. Elastik çevrimlerden sonra kuvvet-yer değiştirmesi grafiğinde gözle görülür bir akmanın oluşması ile deneysel akma yer değiştirmesi ve akma kuvveti belirlenmiştir. Eş zamanlı olarak metal yüzeyine yerleştirilen şekil değiştirmesi ölçerinin kupon deneyi ile elde edilen akma birim şekil değiştirmesi değerinde olup olmadığı kontrol edilmiştir.



Şekil 7: Uygulanan yüklemeler protokolü.

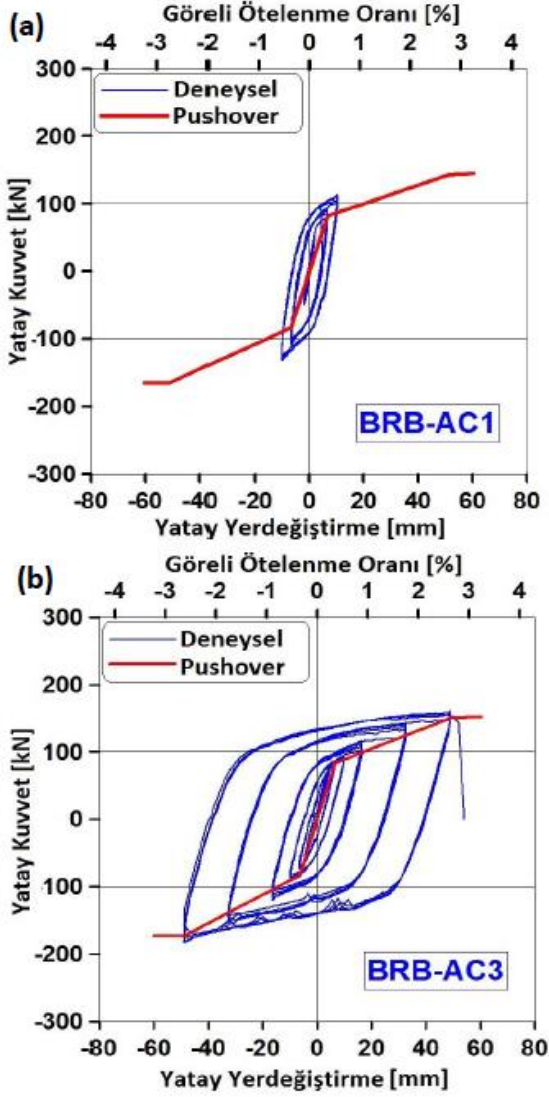


Şekil 8: (a, c): BRB-AC1 ve BRB-AC3 numunelerine ilişkin genel görünüş, (b, d): BRB-AC1 ve BRB-AC3'ün uç birleşim detayları.

İki kontrol parametresinden elde edilen sonuçların birbiriyle oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum, metal yüzeyinden akma yer değiştirmesi kontrolünün yapılması yönteminin etkinliğini kanıtlamakla birlikte yapılan kupon

deneyleriyle elde edilen malzeme özelliklerinin doğruluğunu da göstermektedir.

Numunelerin gerçek akma yer değiştirmesi belirlendikten sonra akma sonrası çevrimlerde, yükleme protokolü bulunan değere göre güncellenerek deneye devam edilmiştir. Numunelerin deneysel olarak elde edilen yatay kuvvet-yatay yer değiştirme histeretik eğrileri ve kuramsal olarak tahmin edilen itme eğrileri Şekil 9'da karşılaştırmalı olarak verilmektedir.



Şekil 9: (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3 numunelerine ilişkin deneysel histeretik eğrileri ve tahmin edilen itme eğrileri.

3.5.1 BRB-AC1 numunesi

BRB-AC1 numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme akma yer değiştirmesi $\pm 6.80\text{mm}$ (%0.37 görelî ötelenme oranı)'dır. Deneyde numunede çekme yüklemesinde $+\Delta_{by}$ için $+6.80\text{mm}$ yer değiştirmesinde akma gözlenmiştir. Akmada metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekil değiştirme ölçerinden çekmede $+2300\mu$, basınç etkisinde -3300μ birim şekil değiştirme (strain) okuması yapılmıştır. Bu okuma akma yer değiştirmesinin doğru belirlenmesindeki başarı oranını artırmıştır.

$\pm 1.5\Delta_{by}$ ($\pm 10.17\text{mm}$ yer değiştirme, %0.55 görelî ötelenme oranı) seviyesi yer değiştirmesinde BRBKN değeri okunamamıştır. Çapraz, $\pm 1.5\Delta_{by}$ seviyesindeki çevrimler tamamlandıktan sonra $\pm 2.5\Delta_{by}$ ve %0.91 görelî kat ötelenme oranı seviyesindeki ilk çekme pikine giderken $+93.99\text{kN}$ 'da kopmuştur.

Deneyel çalışma sonucunda BRB-AC1 alüminyum alaşımli BÖÇ'ün maksimum basınç kuvvetinin, maksimum çekme kuvvetinden ortalama %13 daha büyük olduğu belirlenmiştir. Deneyel ω çekme dayanımı düzeltme katsayısı 1.23, β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.13 olarak elde edilmiştir. Beklenenden erken göçen bu BÖÇ'ün performansı yeterli görülmüştür.

3.5.2 BRB-AC3 numunesi

BRB-AC3 alüminyum alaşımli BÖÇ numunesinin statik itme analizi ile tahmin edilen çekme akma yer değiştirmesi $\pm 6.54\text{mm}$ (%0.35 görelî ötelenme oranı)'dır. Numunede $+\Delta_{by}$ çekme yüklemesinde $+6.52\text{mm}$ yer değiştirmesinde akma gözlenmiştir. Metal yüzeyine yerleştirilen BRBKN şekil değiştirme ölçerinden $+2237\mu$ birim şekil değiştirme okuması alınmıştır; deneyde net bir şekilde akma yer değiştirmesi belirlenmiştir. $\pm 1.5\Delta_{by}$ ($\pm 9.78\text{mm}$ yer değiştirme, %0.53 görelî ötelenme oranı) seviyesi yer değiştirmesinde BRBKN'de çekme etkisinde $+3500\mu$, basınç etkisinde -3000μ değerleri okunmuştur. Bu seviyedeki 4. son çekme etkisinde $+3800\mu$, basınç etkisinde -2900μ birim şekil değiştirme 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 literatürde BÖÇ'lerin deneysel davranışlarına benzerdir. $\pm 2.5\Delta_{by}$ ($\pm 16.30\text{mm}$ yer değiştirme, %0.88 görelî ötelenme oranı) seviyesindeki çekme yer değiştirmesinde BRBKN hasar gördüğü için okuma alınamamıştır. Bu seviyede elde edilen maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+115.00\text{kN}$, -120.00kN 'dur. Bu seviyede β basınç dayanımı düzeltme katsayısı 1.04 olup birleşimlerde, bayrak plakalarında herhangi bir olumsuz gelişme gözlenmemiştir. $\pm 5\Delta_{by}$ ($\pm 32.60\text{mm}$ yer değiştirme ve %1.75 görelî ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla $+140.00\text{kN}$, 154.00kN olarak elde edilmiştir. β basınç dayanımı düzeltme katsayısı ortalama 1.14 civarındadır. $\pm 7.5\Delta_{by}$ ($\pm 48.90\text{mm}$ yer değiştirme, %2.63 görelî ötelenme oranı) seviyesinde maksimum çekme kuvveti $+160.00\text{kN}$, maksimum basınç kuvveti -183.00kN elde edilmiştir. $\pm 10\Delta_{by}$ ve %3.51 görelî ötelenme oranı seviyesindeki ilk çekme yer değiştirmesi pikine ulaşılmasından $+65.20\text{kN}$ 'de numune çekirdeğin kopması ile göçme durumuna ulaşmıştır.

4 Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Bu bölümde alüminyum alaşımli BÖÇ numunelerinin deneylerden elde edilen histeretik davranış özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.1 Histeretik davranışa ilişkin bulgular

Numunelerin deneylerde yön değiştiren tekrarlı yükler altında yer değiştirme genlikleri (Δ_{by}) ve yer değiştirmelere karşı gelen ortalama maksimum çekme (T_{max}) ve basınç kuvvetleri (P_{max}) ile standart yükleme protokolü sonucunda elde edilen ω çekme ve β basınç dayanımı düzeltme katsayıları BRB-AC1 için Tablo 3(a)'da BRB-AC3 için Tablo 3(b)'de özetlenmiştir.

Tablo 3a: BRB-AC1 numunesi çevrimsel yüklemesi yer değiştirme ve kuvvet pikleri.

Δ/Δ_{by}	Δ_{by} (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	ω	β
$4x1.0\Delta_{by}$	± 6.80	88.56	-104.32	1.00	1.18
$4x1.5\Delta_{by}$	± 10.17	108.51	-122.37	1.23	1.13

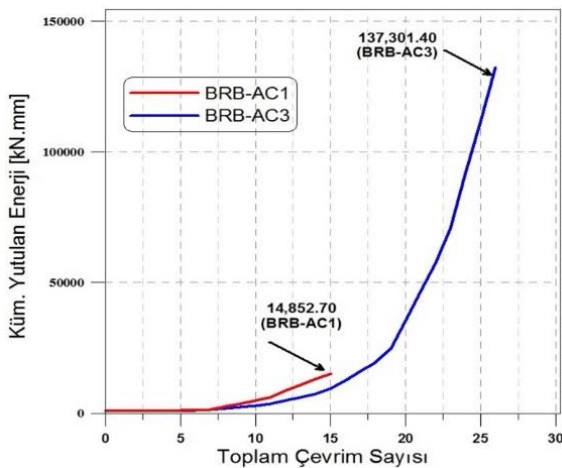
Tablo 3b: BRB-AC3 numunesi çevrimsel yüklemesi yer değiştirme ve kuvvet pikleri.

Δ/Δ_{by}	Δ_{by} (mm)	T_{max} (kN)	P_{max} (kN)	ω	β
$4x1.0\Delta_{by}$	± 6.52	84.50	-71.25	1.00	0.84
$4x1.5\Delta_{by}$	± 9.78	92.50	-87.50	1.09	0.95
$4x2.5\Delta_{by}$	± 16.30	108.75	-113.75	1.29	1.05
$4x5\Delta_{by}$	± 32.60	132.50	-149.25	1.57	1.13
$4x7.5\Delta_{by}$	± 48.90	153.25	-174.00	1.81	1.14

Akmadan sonraki her çevrimde basınç/çekme kuvveti oranı 1.3'den küçük olmalıdır. Basıncıdaki dayanım fazlalığı çekirdek ile burkulmayı önleyen ortam arasındaki sürtünmeden kaynaklanmaktadır. Deneylerde numunelerde maksimum basınç kuvvetinin maksimum çekme kuvvetine oranı olan basınç dayanımı düzeltme katsayısı $\beta < 1.3$ olması koşulu alüminyum malzemenin sürtünmesizliğe olan katkısı ile rahatlıkla sağlanmıştır.

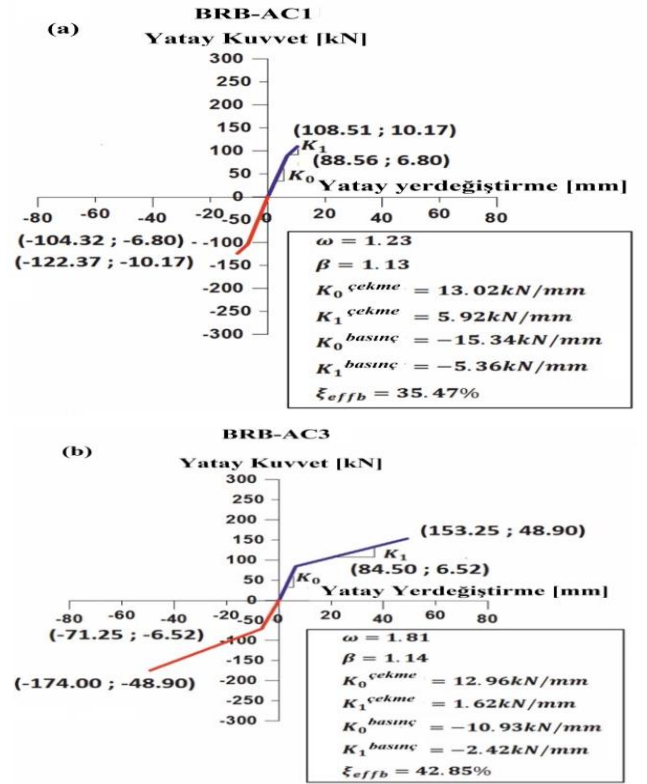
BRB-AC1 alüminyum alaşım BÖÇ numunesi çekirdek akma-güçlendirme geçiş noktalarındaki alüminyum kaynakların dayanımı %60 oranında azaltılması sonucu bu noktadan çekirdeğin erkenden kopması ile öngörülen yüklem protokolünü tamamlayamamıştır.

Numunelere ilişkin kümülatif enerji yutma kapasiteleri histeretik eğri altında kalan toplam alanın hesaplanmasıyla elde edilmekte olup Şekil 10'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 10: BRB-AC1 ve BRB-AC3 numunelerinin kümülatif histeretik enerji eğrileri.

Ayrıca, numunelerin davranışını gösteren önemli parametrelerle birlikte deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yer değiştirme eğrileri de elde edilmiş ve Şekil 11'de verilmiştir. Yön değiştiren tekrarlı yükler altında numunelerin sönümledikleri enerji miktarını ifade etmenin bir diğer yolu etkili sönüm oranının (ξ_{effb}) hesaplanmasıdır. Numunelerin enerji sönümlenme miktarları maksimum yer değiştirme sünekliliği ile orantılıdır.



Şekil 11: Numunelerin deneysel iki doğrulu yatay kuvvet-yatay yer değiştirme eğrileri, (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3.

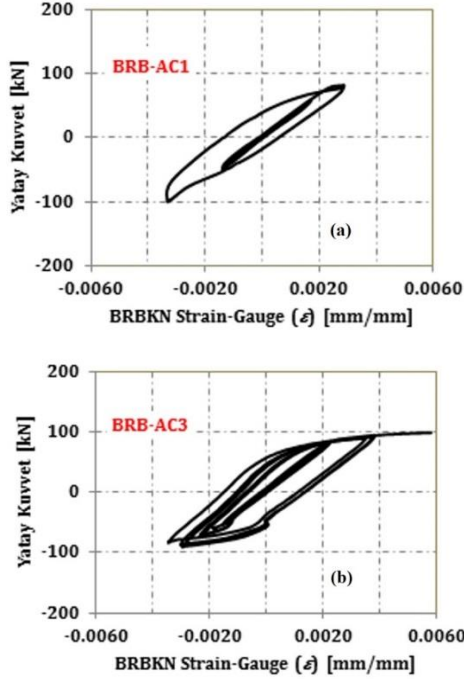
Numunelerin η kümülatif inelastik yer değiştirme, E_h enerji yutma miktarları, ξ_{effb} etkili sönüm oranları ve maksimum görelî ötelenme oranları hesaplanmış ve Tablo 4'te özetlenmiştir. Burada kümülatif inelastik yer değiştirme değerleri deney boyunca son çevrimlerden elde edilmiştir. Tüm çevrimler göz önünde bulundurulduğunda kümülatif inelastik yer değiştirme sırasıyla BRB-AC1 için $16\Delta_{by}$, BRB-AC3 için $672\Delta_{by}$ olarak elde edilmiştir. Enerji yutma miktarları karşılaştırıldığında BRB-AC3/BRB-AC1 oranı 9.24'tür. En yüksek etkili sönüm oranı BRB-AC3 numunesinden ve %42.85 olarak elde edilmiştir. BRB-AC1 numunesinin çekirdek akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçiş noktasındaki berkitme plakalarına yapılan alüminyum kaynak, bu noktada plastik mafsallı oluşumunu öngörülenden erken başlatmış, çaprazda göçme beklenenden daha erken gerçekleşmiştir. Bu nedenle, enerji sönümlenme oranları, aynı alüminyum alaşım malzemesine sahip BRB-AC3 numunesinde ulaşılan seviyelere ulaşamamıştır. Deney sırasında numunelerin kaynaklı birleşimlerde, bayrak plakasına olan bulonlu birleşimlerde herhangi bir olumsuzluk gözlenmemiştir. Bayrak plakalarının deney numunesine olan birleşim performansı da yeterli görülmüştür.

Tablo 4: η kümülatif inelastik yer değiştirme, E_h enerji yutma miktarları, ξ_{effb} etkili sönüm ve maks. görelî ötelenme oranları.

Numuneler	η	E_h (kN.mm)	ξ_{effb} (%)	Maks. görelî ötelenme oranı (%)
BRB-AC1	$4\Delta_{by}$	14,852.70	35.47	0.55
BRB-AC3	$100\Delta_{by}$	137,301.40	42.85	2.63

4.2 Çekirdek şekil değiştirmeleri ve düzlemsiz yer değiştirmelerin değerlendirilmesi

Alüminyum çekirdek içine yerleştirilen şekil değiştirme ölçer BRBKN'den alınan şekil değiştirme okumalarının yatay kuvvetle değişimi BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri için sırasıyla Şekil 12a ve Şekil 12b'de verilmektedir.



Şekil 12: Numunelerin yatay kuvvet-çekirdek şekildeğiştirme histeretik eğrileri, (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3.

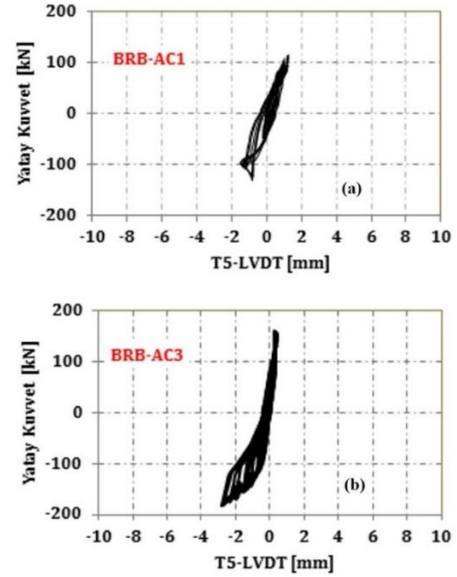
BRB-AC1 numunesinin $\pm\Delta_{by}$ seviyesinde BRBKN şekildeğiştirme ölçerinde yapılan okumalar çekme ve basınç etkisinde $+2300\mu$ ve -3300μ 'dirler. BRBKN aynı seviyenin 4. ve son çekme pikine giderken hasar görmüştür. BRB-AC1 numunesinin çekme deneylerinden elde edilen birim şekil değiştirmeler $\varepsilon_y^{0.2}$ değeri $+0.0029$, ε^0 değeri ise $+0.0023$ 'dür. BRB-AC3 numunesinin $\pm\Delta_{by}$ seviyesinin ilk çekme pikinde kuvvet $+83.75kN$ iken BRBKN değeri $+2237\mu$ 'dir. Aynı seviyenin ilk basınç pikinde kuvvet $-69.67kN$ 'de iken BRBKN değeri -2242μ 'dir.

Çekirdeğin çekme ve basınçta aynı akma şekil değiştirmesini yaptığı söylenebilir. $\pm 1.5\Delta_{by}$ seviyesinin son 4. çekme pikinde çekme bölgesinde $+94.41kN$ kuvvet değerinde, BRBKN $+3769\mu$, bu seviyenin son basınç pikinde kuvvet $-80.94kN$ 'de iken BRBKN -3382μ okuması yapılmıştır. $\pm 2.5\Delta_{by}$ seviyesinin ilk çekme pikinde, $+99.19kN$ 'de BRBKN hasar görmüş ve bu noktadan sonra okuma alınamamıştır.

Deneylerde kesin ve net bir şekilde akma yer değiştirmeleri belirlenmiştir. Böylece metal yüzeyinden akma yer değiştirmesinin belirlenmesi yöntemi ve hesap kabul yaklaşımlarının etkinliği deney sonuçlarıyla kanıtlanmıştır.

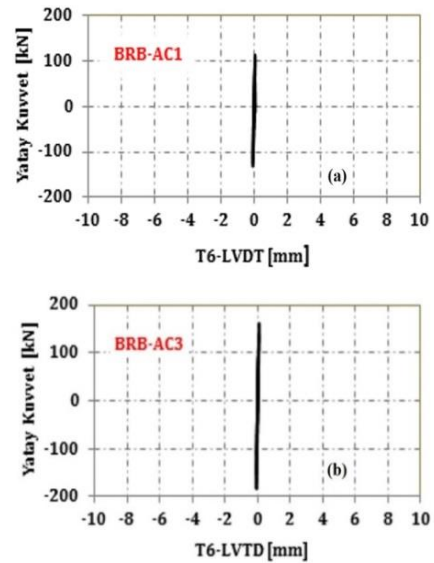
BÖÇ'lerin verimliliğinin kanıtlanmasında en önemli ölçütlerden biri çaprazın düzlem içi ya da dışı burkulmasıdır. Çaprazların dış tüp orta noktasının düzlem dışı yer değiştirmesi T5 yer değiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiş olup BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri yatay kuvvet-T5 düzlem dışı histeretik eğrileri sırasıyla Şekil 13a ve 13b'de verilmektedir. Çaprazların düzlem dışı yer

değiştirme artışları çoğunlukla akma sonrası çevrimsel davranışta gözlenmektedir. Ulaşılan yer değiştirme pikleri BRB-AC1 numunesi için $-1.48mm \sim +1.24mm$, BRB-AC3 numunesi için $-2.82mm \sim +0.44mm$ arasındadır.

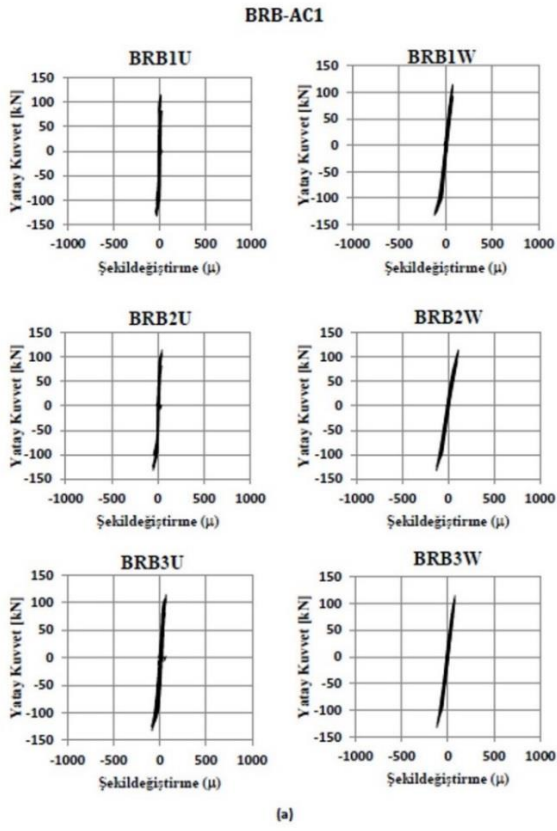


Şekil 13: (a): BRB-AC1 (b): BRB-AC3 numunelerinin yatay kuvvet-T5 düzlem dışı yer değiştirme histeretik eğrileri.

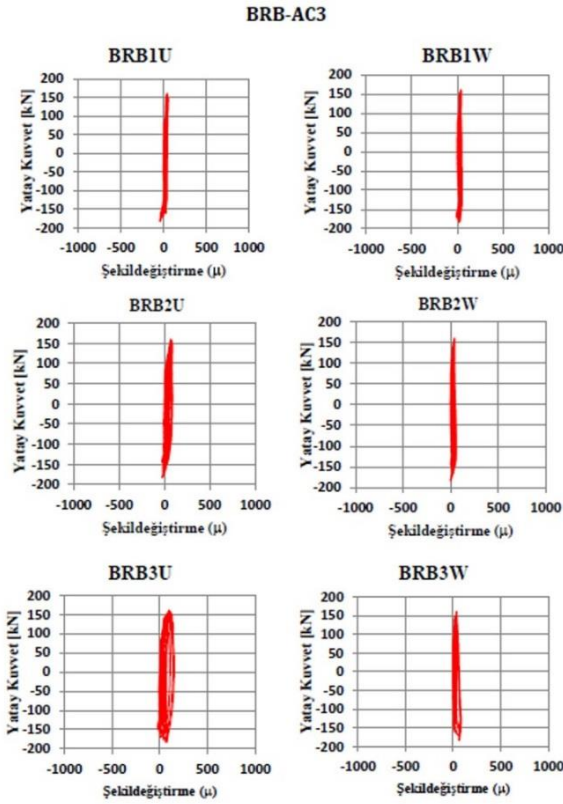
Deney sırasında bayrak plakalarının yer değiştirmesi T6 yer değiştirme ölçerinden alınan okumalarla belirlenmiş olup yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yer değiştirme histeretik eğrisi BRB-AC1 numunesi için Şekil 14a ve BRB-AC3 numunesi için Şekil 14b'de verilmektedir. BRB-AC1 ve BRB-AC3 numuneleri için elde edilen yatay kuvvet-dış tüp şekil değiştirmeleri sırasıyla Şekil 15a ve Şekil 15b'de verilmektedir. BRB1U, BRB1W dış tüp alt uç, BRB2U, BRB2W dış tüp orta, BRB3U, BRB3W dış tüp üst uç alt ve batı yönündeki yüzlerdeki şekil değiştirme ölçerlerinden alınan kanal verilerini göstermektedirler. Histeretik eğrilerde görüldüğü gibi bütün numunelerde dış tüpte oluşan şekil değiştirmeler tasarlandığı gibi elastik bölgede kalmıştır.



Şekil 14: (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3 numunelerinin yatay kuvvet-T6 bayrak plakası yer değiştirme histeretik eğrileri.



(a)



(b)

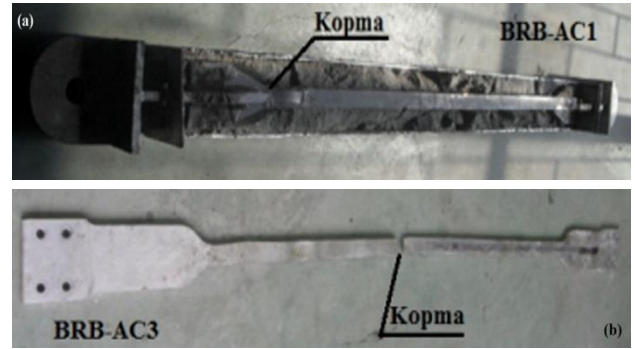
Şekil 15: Numunelerinin yatay kuvvet-dış tüp şekil değiştirme histeretik eğrileri, (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3.

5 Oluşan hasarın ve göçmenin belirlenmesi

Her iki numune deneyden sonra yarı boyu kesitinde açılarak, gözlem ve incelemelerde bulunulmuştur. Kesit açılım fotoğrafları BRB-AC1 numunesi için Şekil 16a'da, BRB-AC3 numunesi için Şekil 16b'de verilmektedir. 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, haçvari kesitte, berkitme plakaları-çekirdek kaynak noktasından kopmuştur. Kaynak noktası olan HAZ bölgesinde dayanım %60 oranında azalmaktadır; erken kopmanın ana nedeni budur. Bu numunenin genel davranışı beklenenin altında olmasına karşın, sonraki numunenin tasarımı için önemli bulguları olan bir ön deney niteliğindedir. Diğer taraftan, alüminyum BÖÇ'lerin tasarımında izlenecek adımlar bu numunedan elde edilmiştir,
- BRB-AC3 numunesi çekirdek orta noktasına çok yakın bir noktadan kopmuştur.

Numunelerde birleşim bölgesi ve güçlendirme bölgesi tasarlandığı gibi elastik davranmıştır. Numunelerde herhangi bir çatlak/yırtılma gözlenmemiştir. Bu, dolgu malzemesinin yük aktarmadığını da kanıtlamaktadır.



Şekil 16: Numunelerin kesit açılım fotoğrafları. (a): BRB-AC1, (b): BRB-AC3.

6 Sonuçlar

Türkiye'de tasarlanarak üretimi gerçekleştirilen farklı alüminyum alaşımlı çekirdekli ve dış tüplü iki adet gerçeğe yakın boyutlardaki BÖÇ'ün, yön değiştiren tekrarlı yükler altındaki histeretik davranışı deneysel olarak incelenmiştir. Özellikle tasarım aşamasına detaylı olarak değinilmiş, malzeme araştırması, malzeme deneyleri ve alüminyum kaynaklanabilirlik özellikleri kapsamlı biçimde açıklanmıştır. Bu deneysel çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Alüminyum alaşımından üretilen BÖÇ'lerin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki fark, çelik BÖÇ'lere göre daha az olduğu, böylece daha az sürtünme olduğu yapılan deneysel çalışmada gözlenmiştir. Bu özelliğinin bir sonucu olarak çelik BÖÇ'lere göre simetriğe ve iki doğrulu inelastik davranışa daha yakın histeretik eğriler elde edilmiştir,
- Üretilen BÖÇ'lerde herhangi bir tümsel burkulma sorunu 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 ve birleşim bölgelerinin elastik kaldığını göstermektedir,

- BRB-AC1 numunesi $\pm\%0.55$, BRB-AC3 numunesi ise $\pm\%2.63$ görelî ötelenme oranında geçmiştir,
- En yüksek β ve ω katsayıları BRB-AC3 numunesinde sırasıyla 1.14 ve 1.81 olarak elde edilmiştir. Her iki numunede de $\beta < 1.3$ koşulu sağlanmıştır,
- Deney boyunca son çevrimlerden elde edilen η kümülatif inelastik yerdeğiştirmeler en fazla BRB-AC3 numunesinde $100\Delta_{by}$ olarak elde edilmiştir. Tüm çevrimler göz önünde bulundurulduğunda ise kümülatif inelastik yer değiştirme sırasıyla BRB-AC1 için $16\Delta_{by}$, BRB-AC3 için $672\Delta_{by}$ olarak elde edilmiştir,
- Numunelerde elde edilen etkili sönüm oranlarının büyük değeri $\%42.85$ ile BRB-AC3 numunesine aittir,
- BRB-AC1 numunesinde akma bölgesinden güçlendirme bölgesine geçişte yapılan haçvari kesiti oluşturan berkitme plakalarına yapılan alüminyum kaynak bu bölgedeki (HAZ) dayanımı $\%60$ azaltmış ve geçiş noktasında erken göçmeye neden olmuştur. Bu olumsuz durum BRB-AC3 numunesinde kaynaklı üretimin kullanılmadığı farklı bir uç tasarımı ile düzeltilmiştir. Oluşturulan haçvari ilişkin kaynaklı üretimde, kaynak koşelerinin dönülmesi kesitin en dar olduğu yerden çekirdeğin kopmasına neden olmuştur. BRB-AC3 numunesinde tüm bu olumsuzluklar ortadan kaldırılmıştır. Deneysel sonuçlar, alüminyum alaşımli BÖÇ'lerin kümülatif enerji yutma kapasitelerinin ve kopma ömürlerinin kaynaklı tasarımıyla çok daha arttırılabileceğini göstermiştir,
- Çalışmada üretilen BÖÇ'ler içerdikleri detaylar gereği ilk defa uygulaması yapılmış yeni ve farklı yönleri olan BÖÇ'lerdir. Bu çalışma ileride yeni çalışmaların yapılmasına temel oluşturur potansiyeline sahiptir.

7 Teşekkür

Bu çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL), Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)-1002-110M776 ve İTÜ-BAP 33459 araştırma projelerinin sağladığı olanaklarla ve malzeme-işçilik konularında destek sağlayan ÇİMTAŞ, FİBERFLON, KÖSTER, As Civata'nın katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. İlgili kuruluşlara, İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği ve Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Yapı Laboratuvarları çalışanlarına değerli katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Tüm sonuçlar, öneriler yazarların sorumluluğunda olup destek veren kuruluşları bağlamamaktadır.

8 Kaynaklar

[1] Black C, Makris N, Aiken I. "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling Restrained Unbonded Braces". Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA, Report No. PEER 2002/08, 2002.

[2] De Matteis G, Mazzolani FM, Panico S. "Pure aluminum shear panels as passive control system for seismic protection of steel moment resisting frames". In *proceedings of the 4th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2003)-Mazzolani FM*. Editor, Balkema, Naples, Italy, 9-12 June 2003.

[3] De Matteis G, Panico S, Mazzolani FM. "Experimental study on pure aluminium shear panels with different stiffener types". In *proceedings of the 5th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2006)-Mazzolani&Wada*, Yokohama, Japan, 14-17 August 2006.

[4] Rai DC, Jain S. "Inelastic buckling criteria for aluminium shear panels as energy dissipation devices". In *proceedings of the 5th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas (STESSA 2006)-Mazzolani&Wada*, Yokohama, Japan, 14-17 August 2006.

[5] Zhu JH, Young B. "Tests and design of aluminum alloy compression members". *Journal Structural Engineering*. 132(7), 1096-1107, 2006.

[6] Zhou F, Young B. "Concrete-filled aluminum circular hollow section column tests". *Thin-Walled Structures*, Elsevier, 47(11), 1272-1280, 2009.

[7] Usami T, Wang CL, Funayama J. "Developing high-performance aluminum alloy buckling-restrained braces on series of low-cycle fatigue tests". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41(4), 643-661, 2012.

[8] Wang CL, Usami T, Funayama J, Imase F. "Low-cycle fatigue testing of extruded aluminium alloy buckling-restrained braces". *Engineering Structures*, 46, 294-301, 2013.

[9] Avcı-Karataş Ç. Çelik ve Alüminyum Alaşımli Çekirdekli Burkulması Önlenmiş Çaprazların (BÖÇ) Tasarımı, Üretimi ve Yön Değiştiren Tekrarlı Yükler Etkisindeki Davranışı. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2013.

[10] American Society for Testing and Materials (ASTM) International. "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials". West Conshohocken, PA, USA, Standard No. ASTM E8/E8M-09, 2009.

[11] American Welding Society (AWS). "Structural Welding Code-Aluminum". Miami, FL, USA, Standard No. ANSI/AWSD1.2/D1.2M:2008, 2008.

[12] American Institute of Steel Construction (AISC). "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings". Chicago, IL, USA, Standard No. AISC 341-10, 2010.

[13] American Institute of Steel Construction (AISC). "Specification for Structural Steel Buildings". Chicago, IL, USA, Standard No. AISC-LRFD 360-10, 2010.

[14] Celik OC, Bruneau M. "Skewed slab-on-girder steel bridge superstructures with bidirectional ductile end diaphragms". *Journal Bridge Engineering*, 16(2), 207-218, 2011.

[15] Kissell JR, Ferry RL. *Aluminum Structures*. 2nd ed. New York, USA, John Wiley & Sons, INC, 2002.

[16] SAP 2000 version 14. "CSI Analysis Reference Manual, Computer and Structures". Inc., Berkeley, CA, 2009.

[17] Federal Emergency Management Agency (FEMA). "Pre-standard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings". Washington, DC, USA, Standard No. FEMA 356, 2000.