Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 21(6), 203-212, 2015

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

ZAYIFLATILMIŞ UÇ KESİTLERİ KARBON LİFLİ POLİMER ELEMANLARLA GÜÇLENDİRİLMİŞ ÇELİK TÜP ÇAPRAZLARIN HİSTERETİK DAVRANIŞI

HYSTERETIC BEHAVIOR OF TUBULAR STEEL BRACES HAVING CARBON FIBER REINFORCED POLYMER REINFORCEMENT AROUND END NET SECTIONS

Cem HAYDAROĞLU[1], Oğuz Cem ÇELİK[2]*

[1]Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
cem.haydaroglu@hotmail.com
[2]Yapı ve Deprem Mühendisliği Çalışma Grubu, Mimarlık Fakültesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
celikoguz@itu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 09.06.2014, Kabul Tarihi/Accepted: 10.12.2014
doi: 10.5505/pajes.2014.96729
* Yazışılan yazar/Corresponding author
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Çelik tüp çaprazların deprem etkilerine karşı karbon lifli polimer (CFRP) elemanlarla güçlendirilmesi deneysel olarak incelenmiştir. Zayıflatılmış uç kesitten olası kopmanın geciktirilmesi için bu bölgelerin CFRP elemanlarla (plaka ve kumaş) güçlendirilmesi önerilmiştir. Zayıflatılmış kesitte güçlendirmenin etkinliğini incelemek için üç adet kompakt kesitli, gerçeğe yakın ölçekli numune AISC yönetmeliklerine uygun olarak tasarlanmış ve kopmaya ulaşıncaya kadar yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenmişlerdir. Referans numuneyle karşılaştırıldıklarında, beklendiği üzere, güçlendirilmiş numunelerin daha dolu histeretik eğrilere sahip olduğu görülmüştür. Zayıflatılmış uç bölgenin yan yüzlerine önce CFRP plaka sonrasında da kumaş ile sarılmasıyla numunenin kümülatif enerji tüketiminde artış ve kopma ömründe uzama görülmüştür. Güçlendirme, kopma anında en çok %82.5 oranında daha fazla enerjinin tüketilmesine katkıda bulunmuş, kopma ömürlerinde ise en çok %59 oranında artış görülmüştür. Süneklikteki artışa karşın son çevrimlerde kopma başlangıcı nedeniyle dayanım ve rijitlikte önemli denilebilecek azalmalar elde edilmiştir. Çapraz rijitliklerindeki değişim en fazla %10 civarında olduğundan önerilen yöntem çaprazlı çelik sistemlerin deprem etkilerine karşı güçlendirme uygulamaları için uygundur. FEMA 356'ya göre tanımlanan eksenel plastik mafsallı çaprazlara yapılan itme (pushover) analizi sonucunda FEMA'nın basınç bölgesinde gerçek davranışı yansıtmadığı, çekme bölgesinde ise uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Çelik tüp çaprazlar, İnelastik burkulma, Kopma ömrü, CFRP, Zayıflatılmış kesit, Güçlendirme

Abstract

This study presents an experimental investigation into the seismic retrofit of tubular steel braces using carbon fiber reinforced polymer (CFRP) members. CFRP retrofitting of net sections for compact tubes are proposed for delaying potential local net section failure. A total of almost full-scale three (TB-1, TB-2, and TB-3) compact steel tubular specimens were designed per AISC specifications, constructed, and cyclically tested to fracture. Retrofitted braces, when compared to the reference specimen, developed fuller hysteretic curves. Increase in cumulative hysteretic energy dissipation and the elongation in fracture life in the specimen retrofitted with CFRP plates and CFRP sheet wraps at net sections are observed during testing. This resulted in a maximum of 82.5% more dissipated energy for compact tube specimens. Also, this retrofit provided a longer experimental fracture life (maximum 59% more). Due to fracture initiation during the last cycles, significant reductions in strength and stiffness have been obtained. No significant change (maximum 10%) in the brace stiffness was observed, which could be desirable in seismic retrofit applications. Pushover analysis per FEMA 356 for the bare specimen shows that FEMA does not represent actual brace behavior in the compression side although pushover and experimental results are in good agreement in the tension side.

Keywords: Steel tube braces, Inelastic buckling, Fracture life, CFRP, Net section, Retrofit

1 Giriş

Çelik çaprazlı çelik çerçeveler (merkezi ya da dış merkezli) yatay deprem yüklerinin karşılanmasında önemli rol oynamaktadırlar. Bu tür çerçevelerin davranışları her bir çaprazın histeretik davranışına büyük ölçüde bağlı olup büyük depremler sırasında sistemdeki çaprazlar büyük eksenel uzama ve kısalmalar (ya da çekme ve basınç gerilmeleri) etkisinde kalmaktadır [1]-[3]. Çelik çaprazlar simetrik olmayan ve özellikle elastik olmayan bölgede karmaşık histeretik davranışa sahiptir. Tüp enkesitli çaprazlar ise yüksek dayanımları, rijitlikleri ve yüksek kapasite/ağırlık oranlarına sahip olmalarından dolayı çok tercih edilmektedir. Merkezi çelik çaprazlı çerçevelerin tüp enkesitli çaprazları yatay yükler altında oluşan tekrarlı eksenel çekme ve basınç kuvvetleri etkisinde kaldıklarında en çok uç ve orta bölgeler zorlanmaktadır [4]-[6]. Bu bölgeler gerçekte plastik mafsal oluşması beklenen bölgelerdir. Çapraz ve bayrak levhası birleşimlerinde oval uç detayının kullanılması zayıflatılmış kesitin çapraz davranışını etkilemesine neden olur [7]. Bunun yanında, özellikle yerel olarak kompakt olmayan kesitlerden üretilen çaprazlarda orta bölgede tekrarlı yükleme altında yerel burkulma beklenmektedir. Uygun olarak tasarlanmamış ya da üretim hataları içeren zayıflatılmış uç kesitlerde ya da yerel burkulmadan dolayı orta bölgede erkenden oluşan kopmalar, çelik çerçeve sistemlerinde ani rijitlik/dayanım azalmasına ve bunun bir sonucu olarak da yapısal sistemde istenmeyen yumuşak/zayıf kat düzensizliğinin meydana gelmesine yol açabilir.

Tüp kesitli çaprazların histeretik davranışlarının iyileştirilmesi ve zayıflatılmış uç kesitlerde oluşabilecek olası erken

kopmaların geciktirilmesi ya da engellenmesi için bazı geleneksel ve kompozit malzemelerle yerel güçlendirme yöntemleri uygulanabilmektedir [4]-[7]. Kompozit malzemeler (örneğin karbon lifli CFRP ya da cam lifli GFRP) ile yapılan güçlendirmeleri içeren çalışmalarda, kritik bölgeler bu çalışmada açıklanana benzer biçimde korunmuştur. Bunlardan en yaygını, mevcut çapraz elemanın zayıflatılmış uç kesitlerinin sağ ve soluna olmak üzere toplam iki adet çelik levhanın kaynaklanmasıdır. Mevcut çapraz elemana yapılacak olan kaynaklarda, ön ısıtma ve kontrollü soğutmadan oluşan kaynak prosesi uygulanmadığı takdirde kaynak bölgesinin etrafında ısıl işlemden etkilenmiş (Heat Affected Zone-HAZ) bölge olarak isimlendirilen oldukça gevrek bölgeler oluşmakta ve bu durum deprem etkilerine karşı güçlendirmeler gibi sünekliğin önemli olduğu durumlarda yapısal davranış açısından uygun olmamaktadır.

CFRP ya da GFRP diğer malzemelerle karşılaştırıldıklarında kesit kapasitelerinin arttırılmasında etkili olmalarına karşın çelik elemanlar üzerinde sınırlı uygulamalara sahiptir. Bunun yanı sıra, CFRP ve GFRP betonarme ve yığma yapıların deprem etkilerine karşı güçlendirmelerinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu çalışmada, çelik elemanlarla iyileştirmeye alternatif olarak, yüksek dayanımlı kompozit malzemelerden CFRP elemanlarla (kumaş ve plaka) çaprazların zayıflatılmış uç kesitlerinde yerel güçlendirmeler yapılarak histeretik davranışın iyileştirilmesi ve olası erken kopmaların geciktirilmesi ya da engellenmesi ilk kez önerilmiş ve bu yöntemin geçerliliği deneylerle kanıtlanmıştır. Buna göre, Türkiye'de en çok kullanılan malzeme kalitesinde, üç adet gerçeğe yakın ölçekli numune İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) yön değiştiren tekrarlı yükler altında denenmişlerdir. Yükleme protokolü olarak ATC-24 [8] kullanılmıştır. Tüm numuneler AISC (LRFD [9] ve Seismic Provisions [10]) yönetmeliklerine göre tasarlanmıştır.

Bu çalışma CFRP elemanlarla güçlendirilmiş çelik tüp çaprazların doğrusal olmayan histeretik davranışlarının deneysel olarak incelenmesinden elde edilen bulguları içermektedir. Elde edilen dayanım, rijitlik, en büyük yerdeğiştirme süneklikleri, tüketilen kümülatif enerji miktarları ve kopma ömürleri karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, aynı süneklik seviyesinde CFRP elemanlarla bölgesel olarak güçlendirilmiş numunelerde kümülatif tüketilen enerji miktarında ve kopma ömürlerinde belirgin miktarda artış olduğunu göstermiştir.

2 Konuya İlişkin Önceki Çalışmalar

Bu bölümde çelik elemanların ileri kompozit elemanlarla güçlendirilmesiyle ilgili başlıca çalışmalar özetlenmiştir.

Zhao ve diğ. [11] yaptıkları derleme çalışmasında ileri kompozit malzemelerle güçlendirmedeki en önemli bileşen olan epoksinin çelik yüzeye olan yapışma dayanımını dinamik yükleme ve zorlu çevresel koşulların bileşik etkisinde incelemiştir. Yorulma etkisinde yüksek rijitlikli CFRP'lerin çelik yüzeye yapışma dayanımında azalma olmazken normal rijitlikteki CFRP'lerde yapışma dayanımı %20~30 oranında, büyük deformasyonlu çevrimsel yüklemede ise %15 oranında azalmaktadır. Bu çalışma kapsamında kullanılan MBrace Saturant epoksi ile yapılan deneylerde ise sıcaklık +20 ˚C'den -40 ˚C'ye düştüğünde yapışma dayanımında yaklaşık %40 azalma olduğu gözlenmiştir.

Mevcut çelik yapıların FRP ile güçlendirilmesi araştırmalarından yararlanarak kapsamlı bir derleme çalışması Teng ve diğ. [12] tarafından ortaya konulmuştur. Bu çalışmada ele alınan konular çelik eleman yüzey hazırlığı, uygun epoksi malzemesinin seçimi, FRP ve çelik yüzey arasında yapışma dayanımı ve bunun modellenmesi, çelik kirişlerin eğilmeye karşı güçlendirilmesi, çelik yapıların yorulmaya karşı güçlendirilmesi, ince cidarlı çelik yapıların yerel burkulmaya karşı güçlendirilmesi, tüp ve beton dolgulu tüp kesitlerin FRP ile sarılarak güçlendirilmesidir. İçe doğru burkulması beton dolguyla engellenen çelik tüplerde dışa doğru yerel burkulma FRP'nin sargı etkisiyle engellenerek, numunelerin eksenel basınç taşıma kapasiteleri belirgin şekilde artmıştır.

El-Tawil ve diğ. [13] gerçek boyutlarda U profil tipi çelik eğilme elemanlarını yön değiştiren tekrarlı yüklemeler altında denemişlerdir. Numunelerden bazılarının plastik mafsal bölgeleri CFRP ile sarılmıştır. Plastik mafsal bölgesine uygulanan CFRP sargı akmanın yayıldığı plastik mafsal bölgesinin genişlemesini sağlamanın yanında, yerel burkulma oluşumunu yavaşlatmış ve yanal burulmalı burkulmanın oluşumunu geciktirmiştir.

Beş adet uzun ve kısa WT kesitlerinden oluşan numuneler Harries ve diğ. [14] tarafından eksenel basınç altında denenmişlerdir. Bu deneysel çalışmada bir kontrol numunesi olup diğerleri değişik kat sayılarında CFRP ya da GFRP şeritlerle güçlendirilmişlerdir. Kesit stabilitesinin arttırılmasından dolayı, kompozit elemanlarla güçlendirme sonucunda numunelerin kritik yükleri artmış, tekrarlı yükler etkisinde kararlı bir histeretik davranış elde edilmiş ve plastikleşmenin başlık bölgelerine oluşması sağlanmıştır.

Shaat ve Fam [15] yerel narinlikleri (b/t) (profilin enkesit genişliğinin/yüksekliğinin et kalınlığına oranı) aynı global narinlikleri (KL/r) (burkulma boyunun atalet yarıçapına oranı) farklı on sekiz numuneyi denemişlerdir. Güçlendirme için CFRP lamine elemanlar kullanılmıştır. Numunelerin KL/r oranlarına bağlı olarak eksenel dayanımda %6 ila %71 arasında, eksenel rijitlikte ise %10 ila %17 arasında artış belirlenmiştir. CFRP lamine elemanların etkisi büyük oranda numunenin KL/r oranına bağlıdır.

Bambach ve Elchalakani [16] CFRP katmanlarıyla sarılarak güçlendirilmiş 150 mm ile 300 mm arasında değişen boylarda dört değişik tüp kesiti eksenel basınç yükü altında denemiştir. Deneylerde tüp kesitli numunelerin cidarları katlanıp göçene kadar yüksek basınç uygulanmıştır. Deneylerin sonucunda numunelerin CFRP kumaş ile güçlendirme tipine bağlı olarak basınç taşıma kapasitelerinin değişik oranlarda arttığı görülmüştür. Bu güçlendirme yönteminin farklı mühendislik alanlarında kullanılabilen tüp kesitlerin büyük şekildeğiştirmelere karşı dayanımlarının arttırılması için kullanılması önerilmiştir.

Shaat ve Fam [17] KL/r oranı 68 olan beş adet çelik kare tüp kesiti denemiştir. Bu deneysel çalışmada bir numune kontrol numunesi olup diğerleri farklı katman sayılarında ve lif yönelimi tek doğrultuda olan CFRP ile güçlendirilmiştir. Güçlendirilmiş dört numunede %13 ile %23 arasında daha fazla eksenel yük taşıma kapasitesi elde edilmiştir.

FRP ile sarılmış boru kesitli numuneler Teng ve Hu [18] tarafından eksenel basınç etkisinde denenmiştir. Deneyler, FRP sargının boru kesitli profiller için etkili bir güçlendirme yöntemi olduğunu göstermiştir. Bu yöntem ince cidarlı

silindirik numunelerin tabana yakın bölgelerinde fil ayağı göçme modunun oluşumunu engellemektedir. Bugüne kadar çelik çaprazlar üzerinde yapılan çalışmalarda, ulaşılabildiği kadarıyla, CFRP kullanımının bu çalışmada ele alınış biçimiyle örtüşen bir araştırmaya rastlanmamıştır.

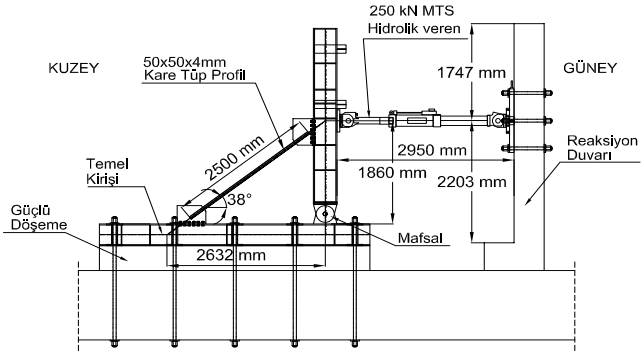
3 Deneysel Çalışma

Deneysel çalışmada kullanılan deney düzeneğinin tasarımı, numunelerin seçimi ve üretimi, kullanılan malzemelerin özellikleri ve deney gözlemleri hakkında bilgiler verilecektir.

3.1 Deney Düzeneği

Bu ve bundan sonraki deneysel çalışmalarda değişik boy, kesit ve uç birleşimlerindeki çaprazların deneylerinde kullanılmak üzere, özellikle Japonya'da kullanılan L tipi çok amaçlı bir deney düzeneği özel olarak tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 1, Şekil 2). Deney düzeneği S275JR kalitesindeki HE400A profillerden, deney sırasında elastik kalacak şekilde güvenlik katsayısı 2.00 alınarak boyutlandırılmış ve detaylandırılmıştır.

Yüklemeler, 250kN itme-çekme ve ±300 mm yerdeğiştirme kapasiteli, bilgisayar kontrollü MTS hidrolik verenle yapılmıştır. Düzlem dışına doğru olası yerdeğiştirmelerin engellenmesi için deney düzeneği S275JR kalitesinde, HE200A profillerden üretilmiş payandalarla düşeyde iki noktadan desteklenmiştir. Payandaların destek noktaları düzlem içi harekete olanak verecek ve düzlem dışı yerdeğiştirmeleri engelleyecek biçimde kayıcı sistem olarak tasarlanmıştır.



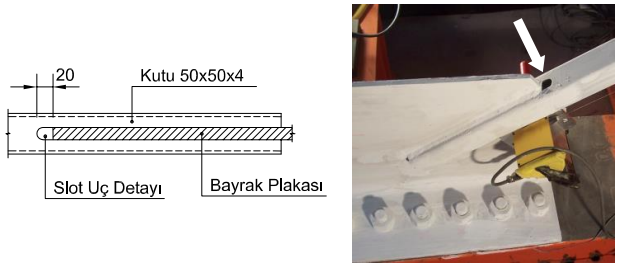
Şekil 1: Deney düzeneğinin genel görünüşü.



Şekil 2: Deney düzeneği ve ölçüm sisteminin görünüşü.

3.2 Numuneler

Türkiye'de oldukça fazla kullanılan S235JR kalitesindeki Kutu 50x50x4 ($b/t = 9.50$, $KL/r = 54$) profillerden üç numune (TB-1, TB-2 ve TB-3) üretilmiştir. Numunelerin zayıflatılmış kesit bölgelerinin incelenmesi için kompakt kesit özellikleri seçilmiştir. Numuneler AISC-LRFD [9] ve Seismic Provisions [10] yönetmeliklerine göre ve eksenel yük kapasiteleri hidrolik verenin 250kN'luk kapasitesini aşmayacak güvenlikle tasarlanmışlardır. Sünek davranışın sağlanabilmesi ve hasarın belirli bir bölgede oluşup sınırlandırılabilmesi için numunelerin çapraz-bayrak levhası birleşim bölgelerinde Şekil 3'te görülen 20 mm boşluk ile zayıflatılmış bölge oluşturulmuştur.

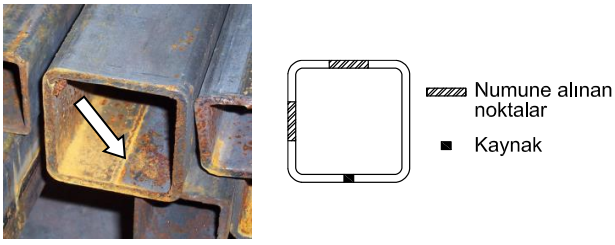


(a) (b)

Şekil 3: (a): Zayıflatılmış uç detayının şematik gösterimi, (b): Numuneden zayıflatılmış uç detayı görünüşü.

Numunelerin bayrak levhalarıyla birleşimlerinde güvenlik katsayısı yine 2.00 alınarak tasarlanan köşe kaynaklar kullanılmıştır. Köşe kaynaklar, TS 5618 EN 440 [19] standardına uygun Askaynak SG2 kaynak teli ve Lincoln Electric Powertec 500S kaynak makinesi kullanılarak gaz altı kaynak yöntemiyle laboratuvarda gerçekleştirilmiştir. Kaynaklarda kullanılan SG2 kaynak telinin çekme dayanımı 550N/mm²'dir.

Tüm numunelerden, ASTM A370-08a [20] standardına göre kupon numuneleri alınmış olup numunelere çekme testleri uygulanmıştır. Çekme testleri İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Tüp kesitler, çelik levhaların soğukta bükülerek kaynaklanmasıyla üretilmekte ve bundan dolayı kesitlerin bir kenarlarında kaynak çizgisi bulunmaktadır (Şekil 4a). Numuneler, Şekil 4b'de görüldüğü gibi kaynak çizgisi bulunmayan iki komşu kenardan alınmıştır.



(a) (b)

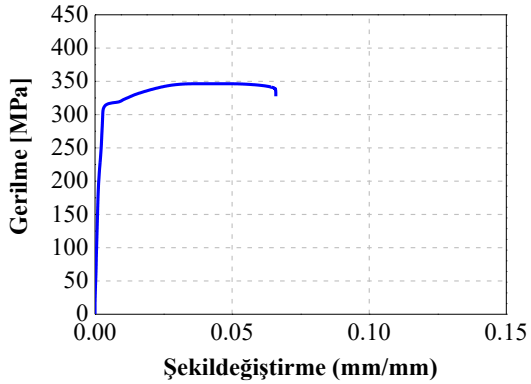
Şekil 4: (a): Tüp kesitlerdeki kaynak çizgisi, (b): Çekme numunesi alınan noktaların şematik gösterimi.

Çekme deneylerinden elde edilen ortalama akma gerilmesi 314N/mm²'dir. Numuneler belirgin akma sahanlığı göstermeyip, çelik malzemenin akma gerilmesi, başlangıç rijitliği %0.2 değerinde kalıcı plastik deformasyona kaydırılarak hesaplanmıştır.

Şekil 5'te numunelere ilişkin örnek gerilme-şekildeğiştirme eğrisi görülmektedir. Elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılarak SAP2000 [21] programı yardımıyla FEMA-356 [22]'de verilen eksenel plastik mafsal özelliklerine göre itme (push-over) analizleri yapılarak numunelere ilişkin yük-yer değiştirme eğrisi elde edilmiştir.

CFRP güçlendirme elemanı olarak MBrace plaka (laminate) LM10/1.4 ve MBrace kumaş (fiber) C1-23 kullanılmış olup

CFRP malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Plaka CFRP'nin çelik numune yüzeyine yapıştırılmasında çelik yüzeye yapışma dayanımı minimum 3N/mm² olan iki bileşenli ve macun kıvamında olan MBrace Laminate Adesivo epoksi, kumaş CFRP'de ise yapışma dayanımı minimum 3N/mm² olan sıvı MBrace Saturant Adesivo epoksi kullanılmıştır.



Şekil 5: Numunelere ilişkin örnek gerilme-şekildeğiştirme eğrisi.

Tablo 1: CFRP malzeme özellikleri [23].

Özellikler	MBrace Laminate LM 10/1.4	MBrace Fiber C1-23
Elastisite Modülü (N/mm²)	165000	240000
Kopma Dayanımı (N/mm²)	2500	3200
Maksimum Uzama (%)	1.5	1.55
Kalınlık S (mm)	1.4	0.117
Genişlik L (mm)	100	300
Alan(mm²)	140	-

Numuneler üzerinde CFRP yapıştırılan bölgelerde zımpara kağıdı ve spiral ile yüzey hazırlığı yapılmıştır. Yüzey hazırlığı epoksiyle temas eden yüzeyin kir ve pastan temizlenmesi yanında macun kıvamındaki epoksi kullanılacak bölgelerde yüzeye tutunmanın arttırılması amacıyla yüzeyin pürüzlendirilmesini kapsamaktadır. Şekil 6'da spiral ile yapılan yüzey hazırlığı ve CFRP plaka yapıştırılması görülmektedir. Tüp elemanın belirli aralıklarla yalnızca sargılarla güçlendirildiği başka bir uygulama [24]'te verilmiştir.



(a) (b)

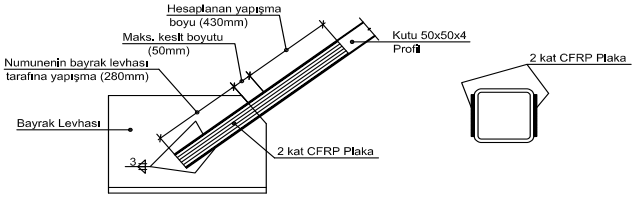
Şekil 6: (a): Yüzey hazırlığı, (b): CFRP plaka yapıştırılması.

Numunelerin tamamı deney süresince oluşabilecek plastikleşme bölgelerinin kolaylıkla tespit edilebilmesi için deney öncesinde beyaza boyanmış ve deney süresince de bu boyanın döküldüğü plastikleşme bölgeleri dikkatlice gözlemlenmiştir.

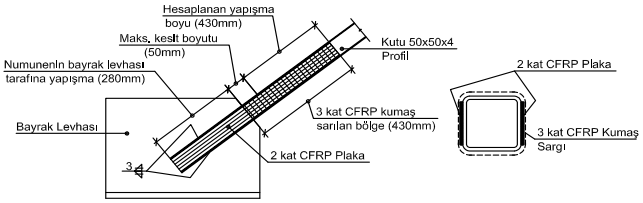
3.2.1 Numunelere Güçlendirmenin Uygulanması

Zayıflatılmış enkesitlere uygulanan CFRP plaka boyu hesaplanırken, kesit kaybından dolayı profil kapasitesindeki azalma belirlenmiş ve bu değer güvenlik katsayısı olarak seçilen 2.00 ile arttırılarak tasarım kuvveti hesaplanmıştır.

CFRP plakalar kutu kesitlerin zayıflatılmış kenarlarına komşu kenarlarının düz bölümlerine yapıştırılmıştır. CFRP plaka enkesiti tasarım kuvvetine göre kontrol edilmiştir. Epoksi yapışma boyu belirlenirken ise epoksi yapışma dayanımı dikkate alınarak her numune için tasarım kuvvetini karşılayacak yapışma boyu hesaplanmıştır. Numunenin bayrak levhasından sonraki bölümünde belirlenen bu yapışma, zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşabilecek plastikleşme ve aderans kaybı dikkate alınarak, kesit boyutu (w = 50 mm) eklenerek uygulanmıştır. Zayıflatılmış kesitin numune tarafında ise ne kadar mesafe varsa o boyda CFRP plaka yapıştırılmıştır. TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin tipik güçlendirme detayları sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 7: TB-2 numunesi tipik güçlendirme detayı.



Şekil 8: TB-3 numunesi tipik güçlendirme detayı.

3.3 Ölçüm Düzeneği

Deneyler sırasında düzeneğin genel, numunenin ise yerel performansını belirlemek amacıyla bir ölçüm düzeneği kurulmuştur.

Deneylerde TML'nin çelik yüzeylerde akma sonrası ölçüm yapabilen YFLA-10-3L tipindeki şekildeğiştirme ölçerleri kullanılmıştır. Her numune üzerinde, numune boyunun ¼'ü, ½'si ve ¾'ünde olmak üzere üç noktadan ve numunenin dört yüzünden şekildeğiştirme ölçümü yapılmıştır. Ayrıca, deney süresince düzeneğin elastik bölgede kaldığını ispatlamak için düzenekteki kolon ve kiriş üzerinden ölçümler alınmıştır.

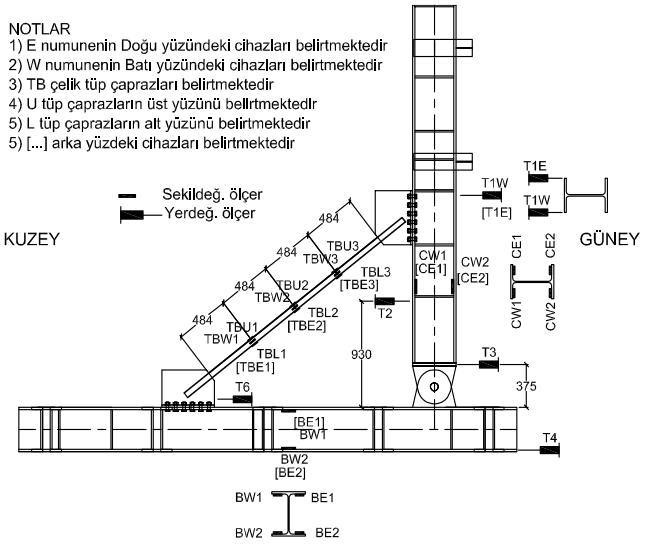
Deneyler sırasında TML yerdeğiştirme ölçerleri kullanılmıştır. 300 mm ve 200 mm kapasiteli birer yerdeğiştirme ölçer yarı stroklu (±150 mm ve ±100 mm) olarak hidrolik veren seviyesinde tepe yerdeğiştirmesini ölçmek için kullanılmıştır.

Numunenin tam ortasında düzlem dışı yerdeğiştirmeyi ölçmek için yine 300 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçer yarı stroklu (±150 mm) olarak kullanılmıştır. Ayrıca, deney süresince 100 mm, 10 mm ve 5 mm kapasiteli yerdeğiştirme ölçerler deney düzeneğinin çalışmasının kontrolü için kullanılmıştır. Numunelere ilişkin ölçüm düzeneği Şekil 9'da görülmektedir.

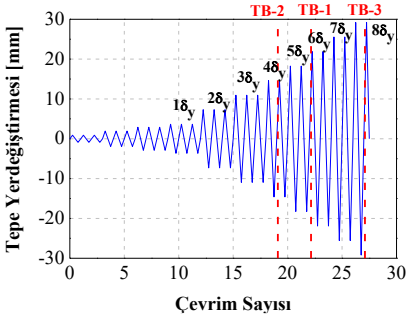
3.4 Yükleme Protokolü

Numuneler, çelik elemanların yerdeğiştirme esaslı

deneylerinde sıkça tercih edilen ATC-24 [8]'e göre yön değiştiren tekrarlı yatay yerdeğiştirme çevrimleri etkisinde denenmişlerdir. ATC-24 [8] deney programında yükleme protokolü yerdeğiştirmenin belirli adımlarla artmasıyla oluşan çok adımlı bir protokoldür. Çaprazların eksenlerindeki boy değişimiyle yakından ilişkili olan tepe yatay yerdeğiştirmesi kontrol parametresi olarak alınmıştır. Çekme deneylerinden elde edilen gerçek malzeme özellikleri kullanılarak yapılan itme (pushover) analizleri sonucunda, numunelere ilişkin yatay yerdeğiştirme çevrimlerinin belirlenebilmesi için, akma yerdeğiştirmeleri tahmin edilmiştir. Elde edilen deneysel verilerin aynı düzeyde karşılaştırılabilmesi için yalın numuneye uygulanan yerdeğiştirme çevrimi güçlendirilmiş numunelere de uygulanmıştır. Şekil 10'da numuneler için kullanılan yatay yerdeğiştirme çevrimleri görülmekte olup her numunenin göçme yerdeğiştirme seviyesi kesikli çizgilerle belirtilmiştir.



Şekil 9: şekildeğiştirme ve düzlem içi yerdeğiştirme ölçerlerin yerleşimi.

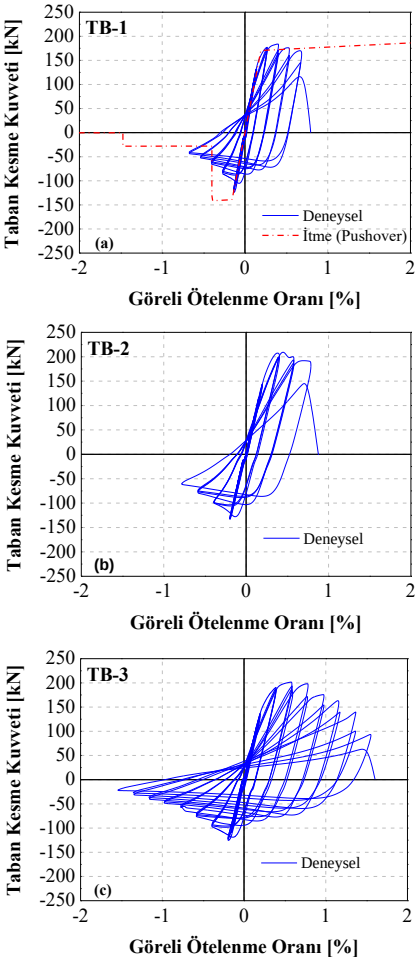


Şekil 10: Numunelere ilişkin yatay tepe yerdeğiştirme çevrimleri.

3.5 Deney Gözlemleri

TB-1, TB-2 ve TB-3 için deneysel taban kesme kuvveti-göreli ötelenme oranı histeretik eğrileri ve TB-1 numunesine ilişkin çakıştırılmış itme analizi eğrisi Şekil 11'de gösterilmiştir.

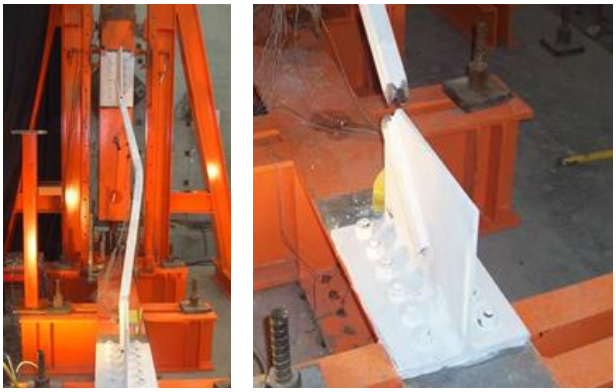
Deneysel çalışmanın referans numunesi olan TB-1'e (yalın numune) tüm numunelerde olduğu gibi ilk olarak çekme uygulanarak deneye başlanmıştır. Basınç etkisinde -3.65 mm ($-1\delta_y$, %0.20 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde taban kesme kuvveti-yatay yerdeğiştirme eğrisinde yataylaşma olduğu tespit edilerek bu seviyede numunenin aktığı varsayılmıştır. $\pm2\delta_y$ (±7.3 mm yerdeğiştirme, %0.39 göreli ötelenme oranı) seviyesi yerdeğiştirmesinde çekme etkisinde numune üzerinde ~+2200 μstrain şekildeğiştirme ölçülmüş ve basınç etkisinden sonra numune yerdeğiştirmenin sıfır olduğu noktadan geçerken kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirmeler gözle görülür hale gelmiştir. $\pm3\delta_y$ (±10.95 mm yerdeğiştirme, %0.59 göreli ötelenme) yatay yerdeğiştirme seviyesinde alt uç zayıflatılmış kesit çevresinde beyaz boyada gözle görülür dökülmeler belirlenmiş ve bu bölgede aşırı şekildeğiştirmeler başlamıştır.



Şekil 11: (a): TB-1, (b): TB-2, (c): TB-3 numunelerine ilişkin deneysel histeretik eğriler.

TB-1 numunesine uygulanan $\pm4\delta_y$ (±14.60 mm yerdeğiştirme, %0.78 göreli ötelenme) yatay yerdeğiştirmesi seviyesinde alt zayıflatılmış kesit civarındaki akmaya ek olarak üst uç zayıflatılmış kesit bölgesinde de çekme etkisinde akma ve boya dökülmesi gözlenmiş, tekrarlı yüklerden oluşan plastik şekildeğiştirmeler numunenin uç bölgelerindeki zayıflatılmış kesit civarında toplanmıştır. Numuneye iki kez uygulanan $\pm5\delta_y$ (±18.25 mm yerdeğiştirme, %0.98 göreli ötelenme) yerdeğiştirmesi seviyesinde çekme etkisinde alt uç kesitinde belirgin uzama görülmüş ve bu bölgede oluşan boğum aşırı artmıştır. $\pm6\delta_y$ (±21.9 mm yerdeğiştirme, %1.18 göreli ötelenme) yatay yerdeğiştirmesi seviyesinde alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinde oluşan boğumda artış görülmüştür. Sonuç olarak, $\mu = 6$ yerdeğiştirme sünekliğinde köşelerden başlamak üzere alttan üste doğru yırtılma görülmesiyle numune alt zayıflatılmış kesit bölgesinden kopmuştur. Deney sırasında

ulaşılan en büyük çekme ve basınç kapasiteleri sırasıyla 179kN ve 121kN olup numunenin burkulmuş ve kopma sonrası hasar durumları Şekil 12'de gösterilmiştir.



(a) (b)

Şekil 12: TB-1 numunesinin; (a): $-6\delta_y$'de burkulması, (b): Alt uç kesitten kopma.

TB-2 numunesi (zayıflatılmış uç kesitleri yalnızca 2 kat CFRP plaka ile güçlendirilmiş numune) elastik bölgede benzer histeretik davranışa sahiptir. ±3.65 mm ($\pm1\delta_y$, %0.20 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde yatay yük-yatay yerdeğiştirme eğrisinde doğrusal olmayan davranışın başladığı ve basınç etkisinde numunenin aktığı görülmüştür. $\pm2\delta_y$ (±7.3 mm yerdeğiştirme, %0.39 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesine kadar CFRP plakalar yük aktarmış olmasına karşın bu seviyeden sonra aderansın çözülmesiyle çelik yüzeyden ayrılmalar başlamıştır. Çekme etkisinde alt uç güçlendirilmiş bölgesinde numunenin batı yüzündeki CFRP plaka yüksek sesle çelik yüzeyden kısmen ayrılmış olup numuneye yalnızca zayıflatılmış kesitin bayrak levhası tarafından bağlı kalmıştır.

Sonraki $\pm3\delta_y$ (10.95 mm yerdeğiştirme, %0.59 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde ise çekmede üst uç batı yüzdeki ve alt uç doğu yüzündeki CFRP plakalar, zayıflatılmış bölgelerin numune tarafından, epoksi ile çelik temas yüzeyinden ayrılmıştır. Çelik yüzeyinden ayrılan CFRP plakaların dayanıma etkisinin ortadan kalkması sonucunda aynı yük çevrimi içerisinde pik yatay yerdeğiştirmeye ulaşılana kadar yatay yükte azalma görülmüştür.

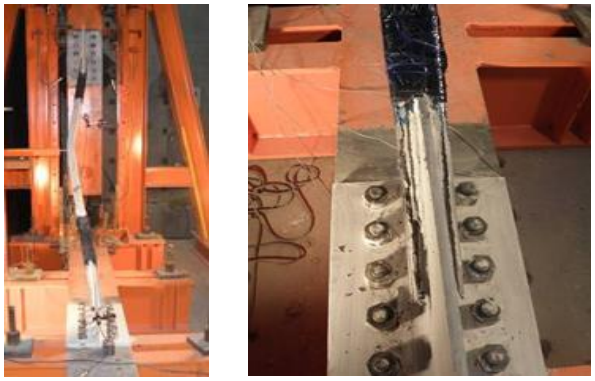
Numunede $\pm4\delta_y$ (±14.6 mm yerdeğiştirme, %0.78 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde alt uç zayıflatılmış kesit bölgesinde, çekme etkisinde oluşan uzama sonrasında basınç etkisiyle bu bölgede yerel burkulma oluşmuş, ikinci çevrimde çekme etkisinde numune alt zayıflatılmış kesit bölgesinden, $\mu = 4$ yerdeğiştirme sünekliğinde, kopmuştur. Deney süresince ulaşılan en büyük çekme ve basınç kapasiteleri sırasıyla 207kN ve 134kN'dur. Basınç etkisinde burkulma ve çekme etkisinde akmadan sonra CFRP plakaların dayanımı %15 civarında arttırdığı görülmüştür. TB-2 numunesinin burkulmuş durumu ve kopma sonrası hasar seviyesi Şekil 13'te görülmektedir.

TB-3 numunesi (zayıflatılmış uç kesitlerinde 2 kat CFRP plaka ve aderans kaybını geciktirmek için 3 kat CFRP sargılı numune) $8\delta_y$ seviyesine kadar çok iyi denebilecek bir histeretik davranış göstermiştir. $\pm1\delta_y$ (±3.65 mm, %0.20 göreli ötelenme oranı) yerdeğiştirme seviyesindeki basınç etkisinde doğrusal olmayan davranış gözlenmiştir. Sonraki ±7.30 mm ($\pm2\delta_y$, %0.40 göreli ötelenme oranı) yerdeğiştirme adımında basınç etkisinden sonraki çevrimdeki çekme etkisinde numune üzerinde kalıcı düzlem dışı yerdeğiştirmeler tespit edilmiştir. $\pm3\delta_y$ (±10.95 mm yerdeğiştirme, %0.60 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde üst uç zayıflatılmış kesitin doğu yüzündeki CFRP plaka bayrak levhası tarafından, epoksinin aderans dayanımını kaybetmesiyle çelik yüzeyden ayrılmıştır. Numunenin $-3\delta_y$ seviyesinde burkulması Şekil 14a'da görülmektedir.



(a) (b)

Şekil 13: TB-2 numunesinin, (a): $-4\delta_y$'de burkulması ve CFRP plakanın çelik yüzeyden ayrılması, (b): Alt uç kesitten kopma.



(a) (b)

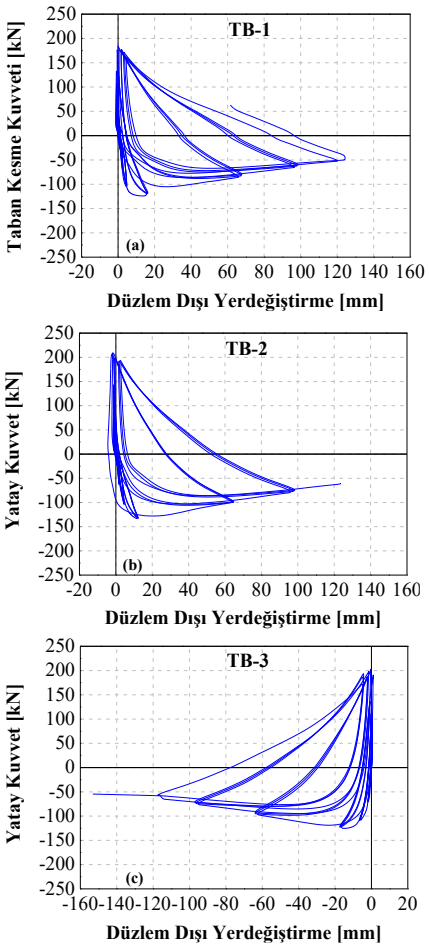
Şekil 14: TB-3 numunesinin, (a): $-3\delta_y$'de burkulması, (b): CFRP plakalarının alt uçta çelik yüzeyden ayrılması.

$\pm4\delta_y$ (±14.60 mm, %0.78 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde alt zayıflatılmış kesitteki CFRP plakalar önce batı yüzündeki sonra da doğu yüzündeki olmak üzere art arda bayrak levhası ile aderanslarını kaybetmiş olup bu durum Şekil 14b'de görülmektedir. $\pm5\delta_y$ (±18.25 mm, %1.0 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde orta bölgenin köşelerinde boya dökülmeleri görülmüştür. $\pm6\delta_y$ (±21.90 mm, %1.20 göreli ötelenme oranı) yatay yerdeğiştirme seviyesinde yüksek sesler duyulmasına karşın CFRP sargılarda herhangi bir aderans kaybı görülmemiştir. $\pm7\delta_y$ (±25.55 mm, %1.40 göreli ötelenme oranı) seviyesinde, basınç etkisinde hem düzlem içi hem de düzlem dışı yerdeğiştirme tespit edilmiştir; diğer bir deyişle, çapraz iki eksen etrafında inelastik bir burkulma davranışı göstermiştir. Son yerdeğiştirme seviyesi olan $\pm8\delta_y$ (±29.20 mm, %1.60 göreli ötelenme oranı) yerdeğiştirme seviyesinde numune üst zayıflatılmış kesit bölgesinden kopmuş ve deney süresince numunenin orta bölgesinde yerel burkulma görülmemiştir. Ulaşılan en büyük çekme ve basınç kuvvetleri sırasıyla 203kN ve 126kN'dur. CFRP kumaş sargı CFRP plakaların aderanslarını kaybetmesini etkili

bir biçimde geciktirmiş, yüksek süneklik seviyesine ulaşılmasına yardımcı olmuştur.

Bayrak levhaları yüksek güvenlik katsayıları kullanılarak elastik davranacak biçimde tasarlanmıştır; deneyler sırasında beyaz boya ile boyanan bayrak levhalarında inelastik davranışın bir göstergesi olan herhangi bir boya dökülmesi vb. sorunla karşılaşılmamıştır.

Çaprazlı çelik çerçevelerde düzlem içi yerdeğiştirmeler kadar çaprazların düzlem dışı yerdeğiştirmeleri de önemlidir. TB-1, TB-2 ve TB-3 numunelerine ilişkin düzlem dışı yerdeğiştirmeler yarı kapasiteli (±150 mm) olarak yerleştirilen yerdeğiştirme ölçer ile ölçülmüş olup düzlem dışı yerdeğiştirme miktarı yerdeğiştirme ölçerin kapasitesine ulaştığında, cihazın zarar görmemesi için, deneyden çıkartılmıştır. Taban kesme kuvveti-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrileri Şekil 15'te görülmektedir. Ölçülen en büyük düzlem dışı yerdeğiştirmeler temiz çapraz boyu cinsinden TB-1, TB-2 ve TB-3'de sırasıyla %6.42L, %6.39L ve %7.91L'dir. Çaprazların kopma öncesindeki basınç yüklemesindeki düzlem dışı yerdeğiştirmelerinin bu değerlerden daha büyük olduğu açıktır.



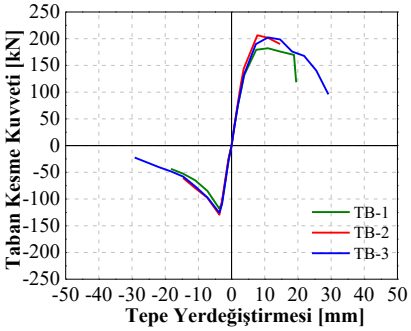
Şekil 15: (a): TB-1, (b): TB-2, (c): TB-3 numunelerine ilişkin taban kesme kuvveti-düzlem dışı yerdeğiştirme eğrileri.

4 Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

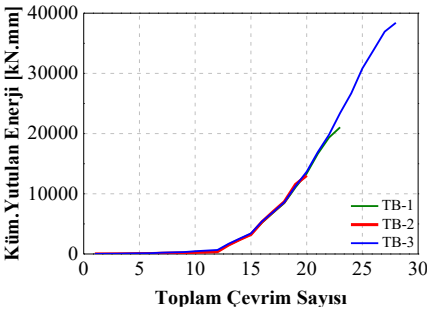
4.1 Enerji Tüketme Kapasitesi ve Zarf Eğrileri

Numunelerin histeretik davranışlarından her yükleme adımındaki ilk çevrim değerleri dikkate alınarak elde edilen zarf eğrileri ve kümülatif enerji tüketme kapasiteleri sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir.

Numunelere ilişkin kümülatif enerji tüketme kapasiteleri histeretik eğriler altında kalan toplam alanın hesaplanmasıyla elde edilmektedir. Zarf eğrileri dayanım ve rijitlikte belirgin artışlar olmadığını gösterdiğinden önerilen yöntemin güçlendirme amaçları için uygun olduğu söylenebilir. Numunelerden zayıflatılmış uç kesitleri 2 kat CFRP plaka ve 3 kat CFRP kumaş sargı ile güçlendirilen (TB-3) numunesi sünekliğin artmasıyla en yüksek (%82.5 daha fazla) enerji tüketme kapasitesine sahiptir. $4\delta_y$ süneklik seviyesinde, beklenildiği gibi, TB-3 ve TB-2 aynı enerji yutma kapasitelerine sahiptirler. TB-1 numunesi kopmadan önce TB-2'ye göre daha yüksek süneklik seviyesine ulaşmasına karşın, TB-1 numunesi TB-3 ve TB-2 numunelerine göre %1.7~4.3 oranlarında daha az enerji tüketmiştir. Bu durum CFRP plakaların erken aderanslarını kaybetmelerine ve yüksek gerilme ve şekildeğiştirmelerin zayıflatılmış uç kesit çevresine yığılmasına bağlanabilir. Buna karşın, zayıflatılmış uç kesit çevresindeki CFRP sargının enerji tüketme kapasitesini belirgin oranda arttırdığı görülmektedir.



Şekil 16: Numunelere ilişkin taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirmesi (zarf) eğrileri.



Şekil 17: Numunelere ilişkin kümülatif enerji tüketme eğrisi.

4.2 Deneysel Etkili Boy Katsayıları ve Kopma Ömrü

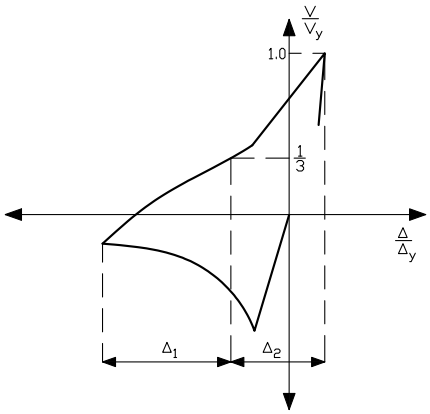
Numunelerin etkili boy katsayıları [2]'de açıklandığı yolla ve numune uzunluğunca ölçülen şekildeğiştirmelerden yararlanılarak elde edilen moment diyagramları ile hesaplanmıştır. Deneysel moment değerlerinin sıfırdan geçtiği noktalar arasındaki uzunluğun numunenin tam boyuna oranından etkili boy katsayıları elde edilmiştir. Numunelere ilişkin olarak hesaplanan etkili boy katsayıları Tablo 2'de özetlenmiştir. Numunelerin uç birleşimleri ideal mafsal ile ankastre arasında davranış sergilediğinden deneysel burkulma boyu (etkili boy) katsayılarının (K), beklendiği üzere, 0.5 ile 1.0 arasında olduğu görülmektedir.

Numunelerin kopma ömürleri (Δ_f) Lee ve Goel [25] tarafından önerilen yönteme göre deneysel histeretik eğrilerinden her bir

yükleme adımındaki çevrimlerin tümü kullanılarak elde edilmiştir. Bu yöntemin başlıca adımlar aşağıda özetlenmiştir:

- Deneysel histeretik eğri akma dayanımı ve akma yerdeğiştirmesiyle normalize edilir (V/V_y ve Δ/Δ_y),
- Histeretik eğrinin çekme bölgesi Δ_1 ve Δ_2 olmak üzere iki bölgeye ayrılmıştır. Δ_1 yükün basınçtan çekmeye döndüğü noktadan akma dayanımının 1/3'ü noktasına kadar olan eksenel uzamadır. Δ_2 ise akma dayanımının 1/3'ü olan noktadan yükün boşaltma noktasına kadar olan uzama miktarıdır, Δ_1 ve Δ_2 tanımları Şekil 18'de verilmiştir,
- Deneysel kopma ömrü Denklem (1) kullanılarak hesaplanır:

$$\Delta_{f,deneysel} = \sum(0.1\Delta_1 + \Delta_2) \quad (1)$$



Şekil 18: Δ_1 ve Δ_2 tanımları (Lee ve Goel [25]'den uyarlanmıştır) [26].

Hesaplanan deneysel kopma ömürleri Tablo 2'de verilmiştir.

TB-3 numunesi TB-1 (yalın numune) numunesine göre %59 daha uzun bir kopma ömrüne sahiptir. TB-2 numunesi CFRP plakaların erken aderanslarını kaybetmeleriyle gerilme ve şekildeğiştirmelerin zayıflatılmış kesit bölgesinde yoğunlaşması sonucunda oluşan kopma sonucunda TB-1 numunesinden %40 daha az kopma ömrüne sahiptir. Deneysel burkulma boyu katsayıları TB-1 ve TB-2 için aynı olup TB-3 numunesinde yaklaşık %20 oranında daha kısa etkili burkulma boyu hesaplanmıştır.

Tablo 2: Numunelerin deneysel burkulma boyu katsayıları ve deneysel kopma ömürleri.

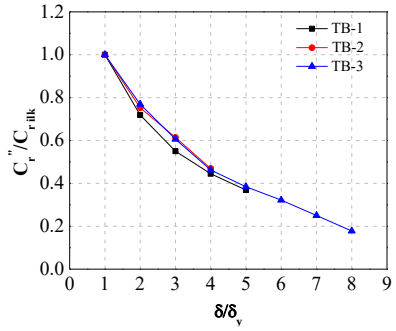
Numune	Deneysel Burkulma Boyu Katsayısı (K)	K_i/K_{max}	Deneysel Kopma Δ_f (mm)	$\frac{(\Delta_f)_i}{(\Delta_f)_{max}}$
TB-1	0.86	1.00	46.59	1.00
TB-2	0.86	1.00	27.94	0.60
TB-3	0.69	0.81	74.03	1.59

4.3 Basınç Kapasitesindeki Değişim

Çelik tüp çaprazların yön değiştiren tekrarlı eksenel yükler etkisinde basınç kapasitelerindeki azalmanın da incelenmesi uygun görülmüştür. Her yükleme adımının ilk çevrimindeki maksimum basınç kuvvetlerinin ($C_r^{"}$) ilk burkulma yüküne ($C_{r\,ilk}$) oranları hesaplanmış böylece boyutsuz dayanım azalması Şekil 19'da verilmiştir. Şekilden burkulma yükünün artan yerdeğiştirmelerle birlikte beklendiği üzere hızla azaldığı görülmektedir.

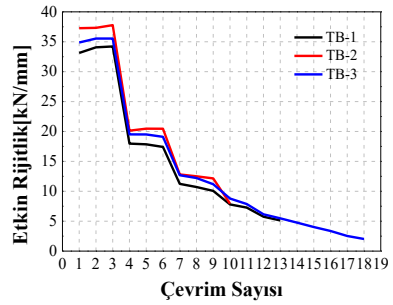
4.4 Etkin Rijitlik Değişimi

Çaprazlı çelik çerçevelerde büyük yerdeğiştirmeler altında rijitlikteki değişim çerçevenin davranışını önemli ölçüde etkilemektedir.



Şekil 19: Boyutsuz basınç kuvvetinin çevrimlerle değişimi.

Bu çalışmada elastik ötesi adımlarda her bir çevrimde ulaşılan maksimum çekme ve maksimum basınç dayanımları arasındaki eğim esas alınarak hesaplanan etkin (efektif) rijitlik değerlerinin çevrim sayısına göre değişimi Şekil 20'de verilmiştir. Bu eğrilerden, etkin rijitliğin $1\delta_y$'den sonra hızlıca azaldığı, numuneler arasında özellikle göçmeden önceki yerdeğiştirmelerde çok fazla fark olmadığı, diğer bir deyişle önerilen güçlendirmenin rijitliği ihmal edilecek bir düzeyde değiştirdiği görülmektedir. Bu durum özellikle güçlendirme çalışmaları için tercih edilen bir durumdur. Buna karşın TB-3 numunesindeki gerek dayanım azalması gerekse rijitlik azalması (kopmanın geciktirilmesine karşın) dikkat çekicidir.



Şekil 20: Etkin rijitliğin çevrim sayısına göre değişimi.

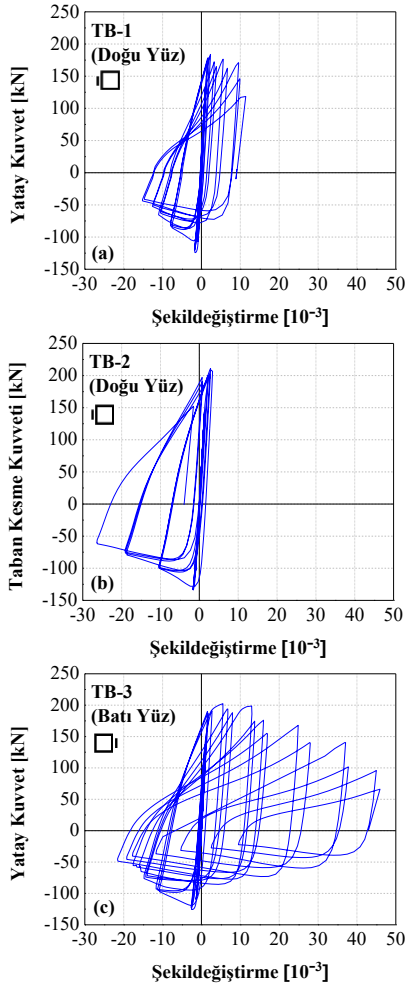
4.5 Şekildeğiştirmelerin Değerlendirilmesi

şekildeğiştirme geçmişi/histeretik eğrileri çaprazların kritik kesitlerinin davranışı hakkında çok önemli bilgi vermektedir. Özellikle, depremler sırasında aşırı şekildeğiştirme yapan çelik tüp kesitlerde olası yerel burkulma ve sonrasındaki kopma başlangıcı ile en sonunda kopma davranışı bu eğrilerden kolayca izlenebilmektedir [2].

Numunelerin orta bölgelerindeki taban kesme kuvveti-şekildeğiştirme histeretik eğrileri Şekil 21'de gösterilmiştir. Uçta CFRP plaka ve kumaş ile güçlendirilen TB-3 numunesinin orta kesitindeki histeretik davranışındaki iyileşme sonucu sünekliğindeki ve enerji tüketme kapasitesindeki artış belirgin şekilde görülmektedir. Basınç ve çekme şekildeğiştirmeleri sırasıyla 0.022 ve 0.045 değerlerine ulaşmıştır.

TB-2 numunesinde aderans kaybı yüzünden CFRP'lerin çelik yüzeyden erken ayrılmasına karşın deneylerdeki en yüksek basınç kuvvetine (134kN) ulaşıldığından dolayı yalın TB-1

numunesine göre %74 daha fazla, TB-3 numunesine göre ise %42 oranında daha fazla basınç şekildeğiştirmesi elde edilmiştir. Çekme şekildeğiştirmeleri TB-1 numunesiyle karşılaştırıldığında, TB-3 numunesinde %402 oranında daha fazla olmasına karşın CFRP'lerdeki erken aderans kaybı sonrasındaki kopmanın da erken oluşmasından dolayı TB-2 numunesinde %70 oranında daha azdır. Bütün bu değerler çelik tüp çaprazlarda CFRP ile güçlendirmenin kritik kesitlerdeki şekildeğiştirme dağılımını önemli ölçüde değiştirdiğini göstermektedir; bu değişiklik çoğu zaman olumlu yönde gelişmektedir.



Şekil 21: (a): TB-1, (b): TB-2, (c): TB-3 numunelerinin orta bölgelerindeki taban kesme kuvveti-şekildeğiştirme eğrileri.

5 Sonuçlar

Çelik tüp çaprazların daha sünek davranmasının sağlanması ve daha uzun kopma ömrüne sahip olabilmeleri için plastikleşme beklenen zayıflatılmış uç kesitlerinin CFRP elemanlarla güçlendirilmesi önerilmiştir. Üç adet gerçeğe yakın boyutlardaki çelik tüp çaprazlar üzerinde yapılan bu deneysel çalışmadan elde edilen ana sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Çelik tüp çaprazların zayıflatılmış kesitlerinde oluşabilecek erken kopmalar sünek detaylandırma sonucunda engellenebilir,
- Kompakt kesitli çaprazlarda eksenel dayanımı ve rijitliği arttırmadan, çelik plaka kaynaklanmasına alternatif olarak, CFRP plaka ve kumaş kullanılabilir. Bu elemanlar sünekliği de iyileştirmektedir. Uygulanması çelik levha kaynaklama işlemine göre daha kolay olup ısıl etkiler de olmadığından çeliğin özellikleri değişmemektedir,
- TB-1, TB-2 ve TB-3 ($b/t = 9.50$, $KL/r = 54$) numuneleri sırasıyla $6\delta_y$, $4\delta_y$ ve $8\delta_y$ yerdeğiştirme değerlerinde göçmüştür,
- Tüp çaprazın iki zayıflatılmış uç kesitinin CFRP plaka ve sargıyla güçlendirilmesinden dolayı oluşan ek rijitlik etkili burkulma boyunun %20 oranında kısalmasını sağlamıştır,
- Çaprazların plastik mafsal oluşumu beklenen bölgelerinin CFRP elemanlarla güçlendirilmesi ile (özellikle TB-3'te) önemli miktarda histeretik enerji tüketilmektedir. Bunun yanında güçlendirilmiş numuneler daha uzun (en çok %59 oranında) kopma ömrüne sahiptir,
- Numunelerin orta bölgelerinde, basınç etkisinde kalan yüzlerindeki çekme şekildeğiştirmelerinde en çok %402 (TB-3'de) artış görülmüş, bu artış CFRP kumaş sargı ile güçlendirilen numunede sünekliğin artmasıyla en yüksek (%82.5 daha fazla) enerji tüketimini de sağlamıştır,
- CFRP ile yerel güçlendirme sonucunda çaprazların eksenel dayanım ve rijitliğinin önemli miktarda artmaması, önerilen yöntemin çaprazlı çelik çerçevelerin depreme karşı sünekliklerinin iyileştirilmesi için uygun ve uygulaması basit bir yol olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte güçlendirilmiş numunenin enerji tüketimindeki artış ve kopmadaki gecikmenin yanında süneklikteki artış sırasında (son çevrimlerde) dayanım ve rijitlikteki kopma başlangıcı nedeniyle ortaya çıkan azalma göz ardı edilmemelidir,
- FEMA 356'ya göre tanımlanan eksenel plastik mafsallı çaprazlara yapılan itme (pushover) analizi sonucunda FEMA'nın basınç bölgesinde gerçek davranışı yansıtmadığı, çekme bölgesinde ise uyumlu sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

6 Teşekkür

Bu çalışma, İTÜ İnşaat Fakültesi Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarında (STEEL) İTÜ-BAP 32860 araştırma projesinin sağladığı olanaklarla ve malzeme-işçilik konularında destek sağlayan Tabosan, Borusan Mannesmann, BASF YKS, Çimtaş ve As Civata'nın katkılarıyla gerçekleştirilmiştir. İlgili kuruluşlara ve İTÜ Yapı ve Deprem Mühendisliği Laboratuvarı çalışanlarına değerli katkılarından dolayı teşekkür ederiz. Tüm sonuçlar, öneriler yazarların sorumluluğunda olup destek veren kuruluşları bağlamamaktadır.

7 Kaynaklar

[1] Celik OC, Berman JW, Bruneau M. "Cyclic Testing of Braces Laterally Restrained by Steel Studs". *Journal of Structural Engineering*, 131(7), 1114-1124, 2005.

[2] Celik OC, Berman JW, Bruneau M. "Cyclic Testing of Braces Laterally Restrained by Steel Studs to Enhance Performance during Earthquakes". Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, New York, USA, Technical Report, MCEER-04-0003, 2004.

[3] Tremblay R. "Inelastic Seismic Response of Steel Bracing Members". *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8), 665-701, 2002.

[4] Han S, Kim WT, Foutch DA. "Seismic Behavior of HSS Bracing Members according to Width-Thickness Ratio under Symmetric Cyclic Loading". *Journal of Structural Engineering*, 133(2), 264-273, 2007.

[5] Sabelli R, Roeder CW, Hajjar JF. "Seismic Design of Steel Special Concentrically Braced Frame Systems". NEHRP, Gaithersburg, USA, Seismic Design Technical Brief ,8, 2013.
[6] Haydaroglu C, Turker A, Taskin K, Celik OC. "Improving Hysteretic Behavior of Tubular Steel Braces Using Advanced Composites". *6th International Conference on Thin Walled Structures - Recent Research Advances and Trends*, Timisoara, Romania, 5-7 September 2011.
[7] Haydaroglu C, Turker A, Taskin K, Celik OC. "Cyclic Testing of Tubular Steel Braces with CFRP Reinforced Net Sections". *4th International Conference on Steel & Composite Structures*, Sydney, Australia, 21-23 July, 2010.
[8] Applied Technology Council. "Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures". Applied Technology Council, California, USA, ATC-24, 1992.
[9] American Institute of Steel Construction. "Specification for Structural Steel Buildings". American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA, ANSI/AISC 360-05, 2005.
[10] American Institute of Steel Construction. "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings". American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, USA, ANSI/AISC 341-05, 2005.
[11] Zhao XL, Bai Y, Al-Mahaidi R, Rizkalla S. "Effect of Dynamic Loading and Environmental Conditions on the Bond between CFRP and Steel: State-of-the-Art Review". *Journal of Composites for Construction*, 18(3), A4013005.1-A4013005.11, 2014.
[12] Teng JG, Yu T, Fernando D. "Strengthening of Steel Structures with Fiber-Reinforced Polymer Composites". *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 131-143, 2012.
[13] El-Tawil S, Ekiz E, Goel S, Chao S. "Retraining Local and Global Buckling Behavior of Steel Plastic Hinges Using CFRP". *Journal of Constructional Steel Research*, 67(3), 261-269, 2011.
[14] Harries KA, Peck AJ, Abraham EJ. "Enhancing Stability of Structural Steel Sections Using FRP". *Thin-Walled Structures*, 47(10), 1092-1101, 2009.
[15] Shaat A, Fam AZ. "Slender Steel Columns Strengthening Using High-Modulus CFRP Plates for Buckling Controls". *Journal of Composites for Construction*, 13(1), 2-12, 2009.
[16] Bambach MR, Elchalakani M. "Plastic Mechanism Analysis of Steel SHS Strengthened with CFRP under Large Axial Deformation". *Thin-Walled Structures*, 45(2), 159-170, 2007.
[17] Shaat A, Fam AZ. "Axial Loading Test on Short and Long Hollow Structural Steel Columns Retrofitted Using Carbon Fibre Reinforced Polymers". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(4), 458-470, 2006.
[18] Teng JG, Hu YM. "Behaviour of FRP-Jacketed Circular Steel Tubes and Cylindrical Shells under Axial Compression". *Construction and Building Materials*, 21(4), 827-838, 2007.
[19] Türk Standartları Enstitüsü. "Kaynak Sarf Malzemeleri-Alaşımsız ve İnce Taneli Çeliklerin Koruyucu Gaz Metal Ark Kaynağı İçin Tel Elektrotlar ve Yığılmış Kaynaklar-Sınıflandırma". Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, TS 5618 EN 440, 2002.
[20] American Society for Testing and Materials. "Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products". American Society for Testing and Materials, Pennsylvania, USA, ASTM A370-08a, 2008.
[21] Computers and Structures Inc. SAP2000, Structural Analysis and Design Software. Berkeley, California, USA, 2000.
[22] Federal Emergency Management Agency. "Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings", Federal Emergency Management Agency, Washington, USA, FEMA-356, 2000.
[23] BASF YKS. "Lifli Polimer (FRP) Güçlendirme Sistemleri". İstanbul, Türkiye, 2008.
[24] Sundarraja MC, Sriram P, Prabhu GG. "Strengthening of Hollow Square Sections under Compression Using FRP Composites". *Advances in Materials Science and Engineering*, (2014), 1-19, 2014.
[25] Lee S, Goel SC. "Seismic Behavior of Hollow and Concrete-Filled Square Tubular Bracing Members". Department of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, Report No. UMEE 87-11, 1987.
[26] Lee K, Bruneau M. "Review of Energy Dissipation of Compression Members in Concentrically Braced Frames". Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, New York, USA, Technical Report MCEER-02-0005, 2002.