

Çelik Plakaların Kalıcı Onarımında GFRP Yerleşim Düzeninin Etkisi

^{*1}Emine Aydın ve ²Muharrem Aktaş

^{*1} Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye

² Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Türkiye

Özet

Deprem ve yangın gibi afetler sonucunda göçmeyen ancak hasar gören çelik yapı elemanlarının hızlı bir şekilde onarılacak geçici de olsa hizmete sunulması acil yardımların yerlerine ulaştırılması konusunda büyük önem arz etmektedir. Yerel burkulma hasarı gözlenen çelik yapı elemanlarının ısıtılma işlemiyle geçici onarımlarının ardından GFRP (cam fiber takviyeli polimer) plakalar yapıştırılarak kalıcı onarım elde edilebilir. Bu çalışmada, GFRP plakaların yerleşim düzenlerinin yapılan onarımı nasıl etkilediğini incelemek üzere ikişer numuneden oluşan iki grup oluşturulmuştur. Aynı zamanda, ABAQUS sonlu eleman programı kullanılarak deneysel veriler için geçerli model oluşturulmuştur. Deney sonuçları ile nümerik model sonuçları karşılaştırılmış ve yeterli yakınlık elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yerleşim düzeni, onarım, GFRP (cam fiber takviyeli polimer), sonlu eleman modeli, ısıtılma işlemi

Effect of GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers) layout on the permanent repair of steel plates

Abstract

Applying heat treatment to steel construction elements especially at the time of disasters such as earthquake and fire, are accepted as temporary repairs and it is essential for delivering emergency team to the site. A permanent repair can be achieved for locally buckled steel members once heat-treated and pressed for temporary repair. Two set of test group consisting three specimens are constructed to investigate the effect of GFRP layout on the structural repair. Also Abaqus finite element software is used to model the experiments. Both numerical and test results are found to be close.

Keywords: Layout, repair, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymers), finite element model, heat treatment

1. Giriş

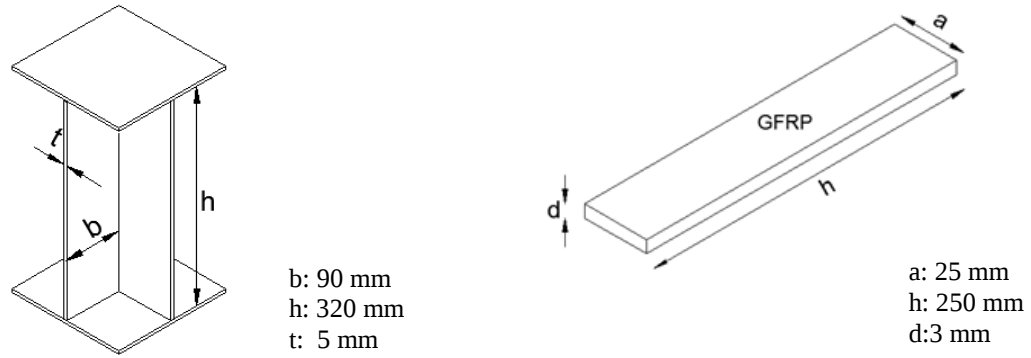
Artan servis yükleri ve zamanla oluşan hasarlardan dolayı, çelik yapılarda onarıma ihtiyaç duyulmaktadır. Bu onarım için uygulanan klasik yöntem genellikle hasar gören elemanı yenisi ile değiştirmektir. Ancak literatüre bakıldığında lokal hasar gören çelik elemanların önce ısıtılma işlemi uygulanarak yumuşatılması ve ardından sıkıştırma işlemi ile düzeltilerek hasar görmemiş geometrisini alabileceği belirtilmektedir. Bu yöntem sonucunda çelik elemanların yük taşıma kapasitelerinde çok önemli bir azalma olmadığı ancak burkulma modlarının değiştiği, kalıcı gerilmeler ve sertlikteki değişiklikler nedeniyle burkulma yükü altındaki davranışının değiştiği ifade edilmiştir [1-3].

Çelik kesitlerde yerel burkulmaların oluşmasını engellemek amacıyla FRP (fiber takviyeli polimer) kullanılarak malzeme rijitlikleri artırılabilir. Ayrıca yapılan araştırmalarda, FRP eklenmesiyle çelik elemanın stabilitesinde ve yük taşıma kapasitesinde artış sağlanabileceği gösterilmiştir [4-9].

Bu çalışmada, hasar gören çelik plakaların ısıtılma işlemi ile düzeltildikten sonra, dayanım ve rijitliği artırmak amacı ile yapıştırılan GFRP (cam fiber takviyeli polimer) plakalar yapıştırılmıştır. GFRP için iki farklı yerleşim düzeni uygulanarak bu yerleşim düzeninin dayanım ve rijitlikteki etkileri incelenmiştir. Ayrıca deney sonuçları sonlu eleman modeli oluşturularak doğrulanmıştır.

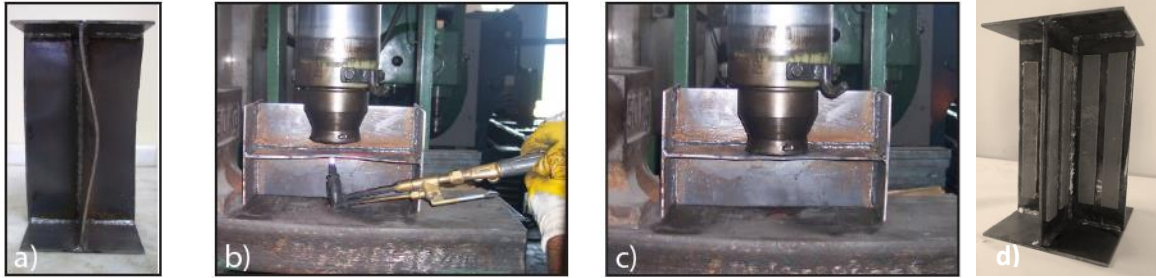
2. Malzeme ve Metod

Çelik elemanların kesitleri birden fazla plakanın birleşiminden oluşmaktadır. Örneğin bir I-profilü üç adet farklı sınır koşulları olan plakalardan oluşmaktadır. Dolayısıyla bir plağın davranışını bilmek kesitin davranışı hakkında da bilgi verir. Bu nedenle deneylerde kararlı burkulma hali elde edebilmek amacı ile dört adet çelik plaka sürekli kaynakla artı şeklinde birleştirilmiştir. Oluşturulan artı kesit, yükün homojen yayılmasını sağlamak amacı ile alt ve üst yüzeylerinden rijit plakalarla desteklenmiştir. Çelik kesite ait boyutlar Şekil 1’de verilmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılacak GFRP boyutları yine Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. Deneylerde kullanılan çelik ve GFRP boyutları

Hazırlanan çelik numunelere eksenel basınç yükü uygulanarak lokal burkulmalar meydana gelmesi sağlanmıştır (Şekil 2a). Bu şekilde hazırlanan plakalara daha sonra ısıtma işlemi uygulanarak yumuşatılmış ve hemen ardından presleme işlemi uygulanarak numunelerin eski şeklini alması sağlanmıştır (Şekil 2b-c). Isıtma işlemi uygulanmış elemanlara son aşamada, çelik yüzeyleri kir, yağ ve pastan fırça ile arındırılarak, üretici firmanın belirttiği oranlarda yapıştırıcı hazırlanmış ve yine üretici firmanın belirttiği iki günlük kuruma süreci beklendikten sonra tekrar eksenel basınç altında deneyler yapılmıştır (Şekil 2d).



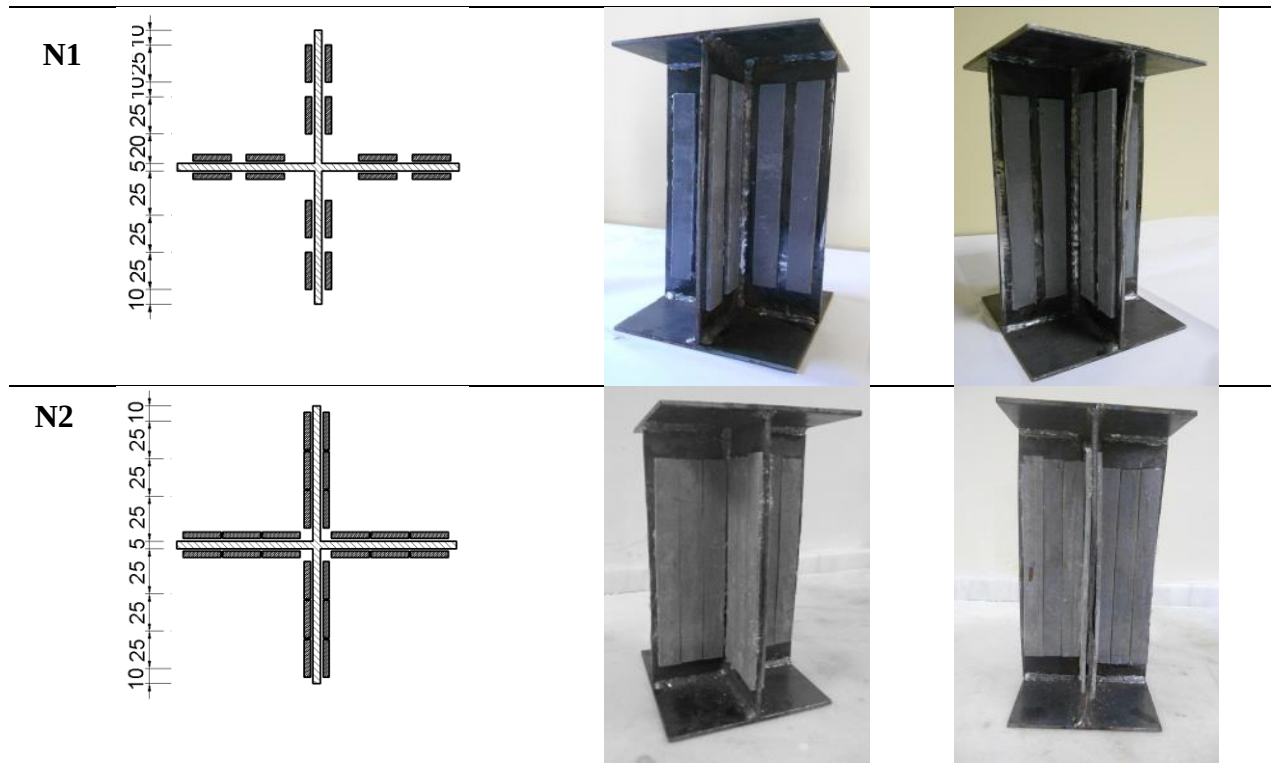
Şekil 2. Deney numunelerinin hazırlanma aşamaları

Yapılan ısıtma-presleme işlemi öncesi ve sonrasına ait çelik plakalardan alınan numunelerden ASTM (ASTM A370-10 2010) standardına göre boyutlandırılan üçer adet numuneye eksenel çekme deneyi yapılmıştır. Isıtma-presleme işlemi uygulanan numunenin akma dayanımında % 10' luk düşüş meydana geldiği görülmüştür. Bu durumda çeliğin dayanımının azaldığı ve yapılan bu onarım şeklinin geçici olacağı görülmüştür. Aynı şekilde GFRP plakalar için yine üç adet numune ASTM D 3039 M-08 standartlara uygun olarak hazırlanmış ve çekme deneyine tabi tutulmuştur. Yapıştırıcının mekanik özellikleri ise üretici firmadan alınmıştır. Sonuç olarak üç malzemeye ait mekanik özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Deney malzemelerinin mekanik özellikleri

	Referans Çelik	Isıl Çelik	GFRP	Yapıştırıcı
Elastisite Modülü (GPa)	210	210	29.3	1.9
Akma Dayanımı (MPa)	350	315	--	--
Çekme Dayanımı (MPa)	--	--	520	--
Yoğunluk (gr/cm ³)	--	--	--	1.13

Farklı yerleşim düzenine sahip GFRP levhaları, çelik üzerine yapıştırılarak oluşturulan elemanlarla iki farklı deney grubu oluşturulmuştur. Her bir deney grubundan ikişer adet numune hazırlanmıştır. Deney numunelerinde herhangi bir işlem uygulanmamış numunelere *referans*, ısıt ve presleme işlemi uygulanan numunelere *ısıt*, GFRP yerleşim düzenlerine göre N1 ve N2 isimleri verilmiştir. Numunelere ait boyut ve görünüşler Şekil 3'te gösterilmektedir.



Şekil 3. Deney numunelerin yerleşim düzeni ve deney önce ve sonrası görüntüleri

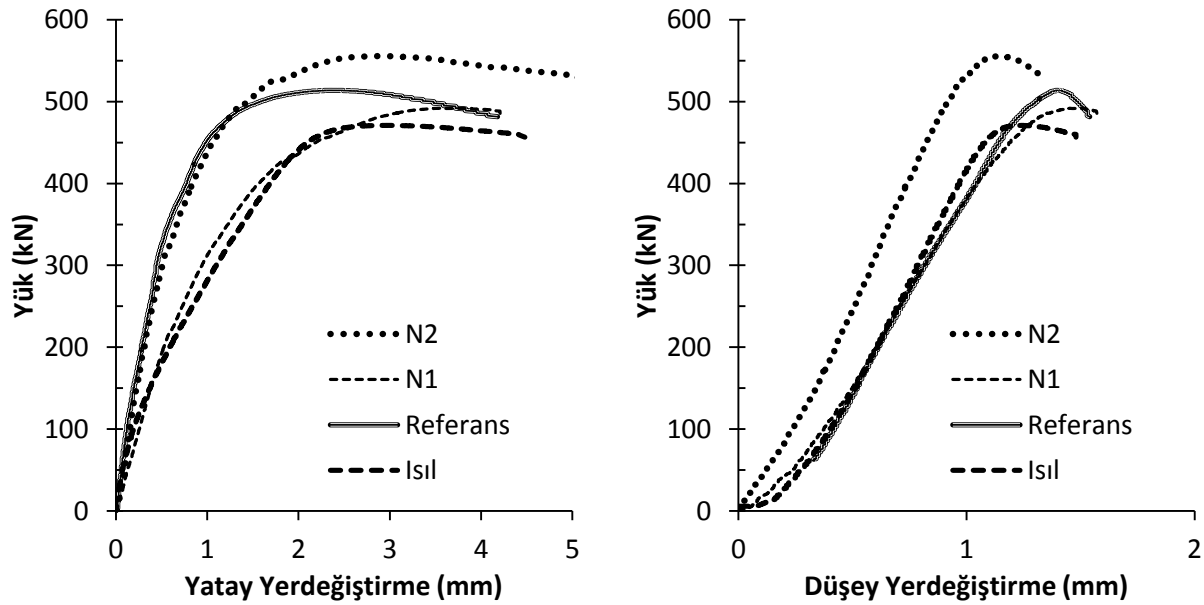
Deneylerde eksenel basınç verebilmek için 3000 kN kapasiteli test cihazı kullanılmıştır. Cihazda 3 kN/sn yükleme hızı otomatik olarak verilmiştir. Bu cihaza saniyede 8 veri kaydedebilen datalogger cihazı bağlanmıştır. Deney numunesinden yer değiştirme ölçüm cihazları ile düşey ve yatay deplasmanlar ölçülmüştür. Düşey deplasmanda alt mesnet ve yatay deplasmanda ise yükseklik doğrultusunda orta nokta referans alınmıştır. Her iki yer değiştirme ölçüm cihazları datalogger cihazına bağlanmıştır. Bu sayede yük ve deplasmanlar datalogger cihazına bağlanan bilgisayara aktarılmıştır. Deney düzeneğine ait görüntü Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Deney düzeneği

3. Deney Sonuçları

Farklı yerleşim düzeninin etkilerini görebilmek amacı ile oluşturulan N1 ve N2 deney gruplarına ait elde edilen deneysel sonuç grafiği Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Isıl işlem görmüş rijitleştirilmiş çelik plakaların GFRP ile onarım grafikleri

Grafikler incelendiğinde her bir gruba ait maksimum yük taşıma kapasitesi ve ısıtıl elemana göre hazırlanan %'lik artış değerleri en yüksek değerden en küçük değere doğru sıralanmış ve Tablo 2'de gösterilmiştir. Ayrıca tabloda bütün GFRP yerleşimleri için hazırlanan ikişer adet deney numunelerinin de dayanımları ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 2. Isıl işlem görmüş GFRP ile onarılan rijitleştirilmiş plakalara ait dayanım değerleri

GFRP Yerleşimi	Numune1 (kN)	Numune2 (kN)	Ortalama Yük (kN)	% artış (Isıla göre)	% artış (Referansa göre)
N2	566.20	545.04	555.62	18	8
N1	502.35	491.11	496.73	5	-3
Referans	---	---	513.71	--	---
Isıl	---	---	470.92	---	---

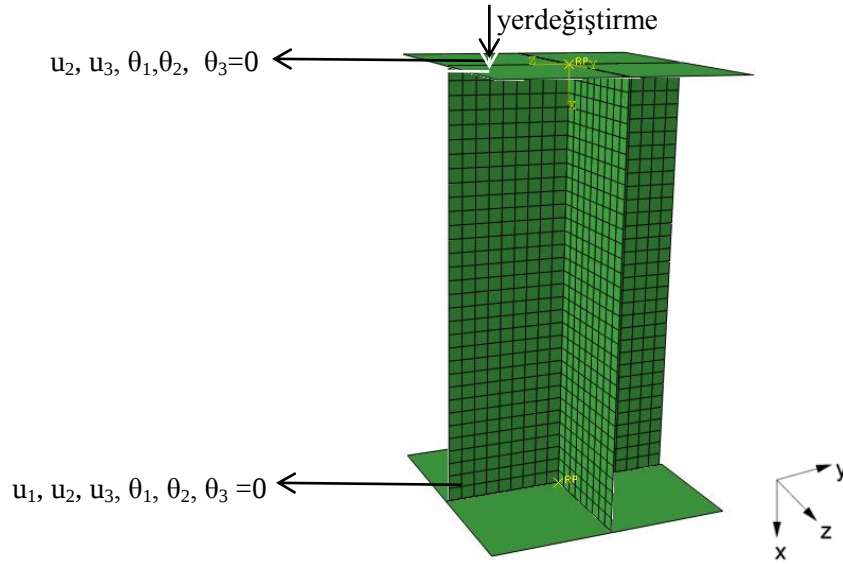
Çelik plakanın tamamının GFRP ile kaplanması etkisini araştırmak üzere oluşturulan N1 yerleşimine bakıldığında bu kompozisyonun referans numuneye erişemediği, fakat ısıl elemanın yük taşıma kapasitesini artırdığı görülmektedir. N2 numunesi ise daha az GFRP yüzeyine sahip olmasına rağmen referans numunenin dayanımını geçmiştir. Bu durumda epoksi yüzeyinin etkisi görülmektedir. Bu durum daha fazla epoksi yüzeyine sahip elemanın daha fazla yayılan kırılma çizgisi hattına sahip olmasının sonucudur. Yan yana fazla sayıda GFRP eleman yapıştırmanın çelik plakaların dayanımını artıracak sonucuna varılmaması gerektiği görülmüştür.

3. Sonlu Eleman Modeli

Yapı elemanlarının davranışlarını incelerken deneysel metotlar en doğru yaklaşım yöntemidir. Ancak deney parametrelerinin artması ile gereken deney sayılarının artacak olması hem ekonomik açıdan hem de zaman açısından sakıncalar doğurmaktadır. Bu sorun doğrusal olmayan sonlu eleman programları kullanılarak giderilebilir. Ancak bu programlarda üretilen modeller deneysel bir veri ile gerçekleştirildikten sonra gerek statik gerekse dinamik yükler altında parametrik çalışmalarda kullanılmalıdır. İnce cidarlı çelik yapı elemanlarının sonlu eleman modellemesinde doğrusal olmayan geometrik analiz yapılması gerçek davranışının yakalanması açısından önemlidir.

Çözüm ağı: Sonlu Eleman Modelinde (SEM) çelikve GFRP elemanlarda S4R kabuk eleman, yapıştırıcı için 3 boyutlu cohesive COH3D8 eleman tipi kullanılmıştır. S4R elemanı, 4 düğüm noktalı, çift eğrilikli, indirgenmiş integrasyonlu bir eleman olup her düğüm noktasında altı serbestlik derecesi vardır. S4R elemanı sonlu şekil değiştirmeyi ele aldığından büyük şekil değiştirme analizleri için de uygundur[10]. Modelde çözüm ağı olarak 5,10 ve 15 boyutları denenmiştir. Çözüm ağı hassasiyetinin çok önemli olmadığı kanaatine varılarak bilgisayarın çözüm hızıda düşünülerek M10 seçilerek çalışmaya devam edilmiştir.

Sınır koşulları ve yük uygulanması: Deneyelemanısının sınır koşulu olarak alt başlıktan ankastre ($u_1, u_2, u_3, \theta_1, \theta_2, \theta_3 = 0$), üst başlıkta ise x doğrultusunda yer değiştirmesi (u_1) ve y ekseninde dönmesi (θ_2) serbest diğerleri de ($u_2, u_3, \theta_1, \theta_3 = 0$) tutulu olarak mesnetlenmiştir. SEM’de modele üst başlıktan X yönü doğrultusunda ağırlık merkezine gelen yer değiştirmelerilerek yüklenmiştir (Şekil6).



Şekil 6.Çelikplakaya uygulanan sınır koşulu ve yerdeğiştirme uygulaması.

Malzeme modeli: Malzeme modelinde çelik, ideal elasto-plastik malzeme davranışıyla tanımlanmıştır. Deneylerde GFRP plakalarda herhangi bir hasar oluşmamaktadır. Bu nedenle sonlu eleman modelinde kullanılan GFRP elemanlar lineer elastik malzeme olarak modellenmiştir. Deney sonuçlarına bakıldığında GFRP'nin çelik yüzeyden sıyrıldığı görülmüştür. Yani GFRP liflerinin kopmadan arayüzde bulunan yapışkanın yenildiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla sonlu elemanlar modelinde kullanılan yapıştırıcı malzeme modeli, GFRP ile çelik plakaların birlikte çalışmasını sağlayacak ve gerilmeleri aktaracak şekilde traction-separation modeli tercih edilmiştir. Traction-separation modellemesinde, başlangıç kısmında lineer elastik davranış mevcuttur ve bu davranış elastik rijitlik matrisi ile tanımlanır.

Geometrik kusur: Non-lineer geometrik analizde denge denklemleri deforme olmuş geometri referans alınarak oluşturulur. Deplasmanlar, hesaplanabilmelerine rağmen, yapı statik teorisi hareket ve denge denklemleri yazılırken ihmal edilirler. Özellikle burkulma sonrası davranışın takip edilebilmesi, ikinci mertebe etkilerinden dolayı oluşan kuvvetlerin hesaplanması için denge denklemlerinin deforme olmuş geometriye göre yazılmaları gerekmektedir. İnce cidarlı geometrilerinden dolayı çelik profiller yerel ve global burkulmaya açık yapı elemanlarıdır. Özellikle yerel burkulmaların etkilerinin izlenebilmesi için non-lineer geometrik analiz yapılmalıdır. Bundan dolayı sonlu eleman modellerine gerçekteki gibi burkulmasına yardımcı olmak amacıyla başlangıçta ilkel kusurlar eklenmelidir. Aslında bu ilkel kusurların eklenmesi gerçekte hiçbir elemanın kusursuz olmadığı gerçeği ile de örtüşmektedir. İlkel kusurların sonlu eleman modeline entegre edilmesinde iki yöntem önerilir.

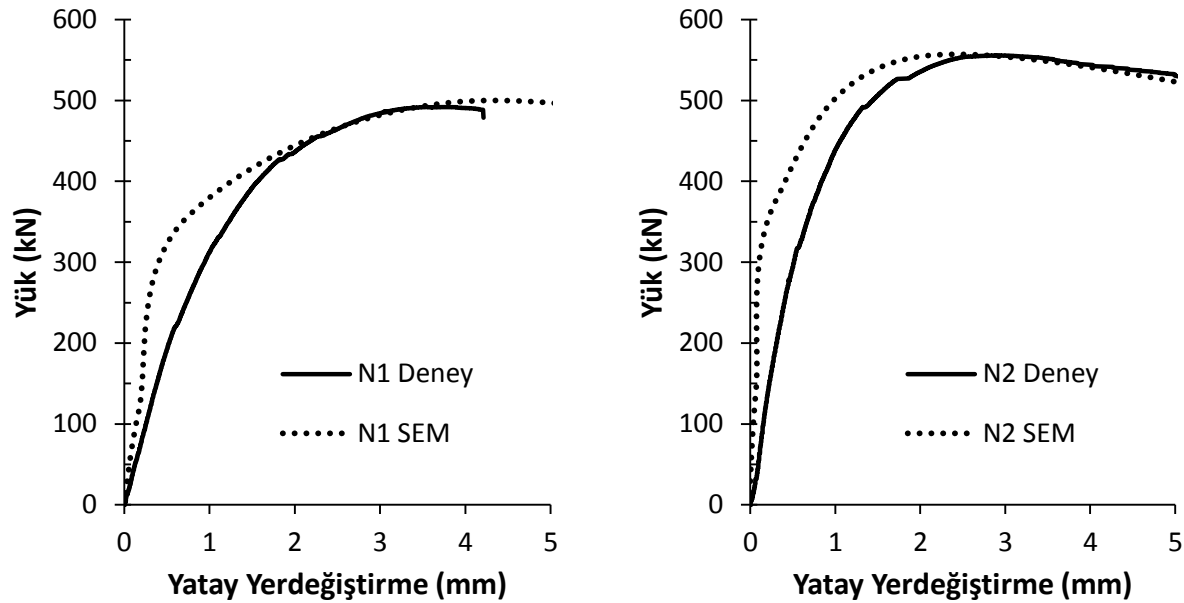
1. Yöntem: Var olan kusurun sinüs dalgası formülasyonu ile idealize edilmesi, [11]
2. Yöntem: Kusursuz sistemin lineer burkulma analizi yapılarak birinci burkulma modunun ölçeklendirilerek kusurlu sistemmiş gibi kabul edilmesi, [12]

Bu çalışmada ikinci yöntem kullanılarak geometrik kusurların değişiminin etkisi incelenecektir. Sonlu eleman analizi iki aşamada yürütülmüştür. Birinci aşamada Yapı elemanı önce kusursuz bir

şekilde modellenmiştir ve lineer burkulma analizi yaptırılarak burkulma modları elde edilmiştir. Elde edilen burkulma modlarının en küçüğü bir sayı ile ölçeklendirilerek kusurlu sistemin geometrisiymiş gibi sayısal modele aktarılmıştır. İkinci aşamada ise explicitanaliz yapılmıştır. Analiz bu kusurlu çözüm ağı üzerinden yürütülür. Bu çalışmada en küçük mod yerine ilk üç mod üst üste süperpoze edilerek kusurlu çözüm ağı elde edilmiştir. Yapılan çalışmada, N1 için L/225 ve N2 için L/600 kusur oranları kullanılmıştır.

4. Deney ve Sonlu Eleman Modelinin karşılaştırılması

N1 ve N2 deney gruplarına ait deney ve sonlu eleman modelinden elde edilen grafikler Şekil 7’de sunulmuştur. Grafiklere bakıldığında her iki deney grubu için yeterli yakınlıkta sonuçlar elde edildiği görülmektedir.



Şekil 7. Deney ve sonlu eleman modellerinin karşılaştırılması

5. Sonuçlar

Deneyisel çalışmada hasar görmüş bir çelik elemana ısıtıl işlem uygulandığında dayanım ve rijitliğinde azalma olduğu görülmüştür. Bu azalma çelik yüzeyine yapıştırılan GFRP plakalar ile giderilebilir. Ancak yapıştırılan GFRP’nin yerleşim düzeni önemlidir. Deney sonuçlarında bakıldığında geniş bir yüzeyde devam ettirilen yapıştırma şeklinin epoksi çatlağının ilerlemesi nedeni ile iyi bir sonuç vermediği, GFRP plakaların aralıklı olarak yapıştırılması ile daha yüksek dayanım ve rijitlik değerlerinin elde edildiği gözlenmiştir.

6. Kaynaklar

- [1] Hirohata, M., Kim, Y.C., Kawazu, H., Safety evaluation of cruciform columns corrected by heating, *Trans. JWRI* 33 (1), 53-58, 2004.
- [2] Hirohata, M., Kim, Y.C., Dominant factors deciding compressive behavior of cruciform column projection panel corrected by heating, *Steel Structures* 7, 193-199, 2007.
- [3] Hirohata, M., Kim, Y.C., Generality verification for factors dominating mechanical behavior under compressive loads of steel structural members corrected by heating/pressing, *Steel Structures* 8, 83-90, 2008.
- [4] Rizkalla, S., Dawood, m., Schnerch, D. (2008), "Development of a carbon fiber reinforced polymers system for strengthening steel structures", *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 39(2), 388-397.
- [5] Harries, K.A., Peck, A.J., Abraham, E.J. (2008), "Enhancing stability of structural steel sections using FRP, *Thin-Walled Structures*, 47 (10), 1092-1101.
- [6] Güven, C. A. (2009), "Experimental study on improving local buckling behavior of steel plates strengthened with glass fiber reinforced polymers", MS Dissertation, Izmir Institute of Technology, Izmir.
- [7] Shaat, A., Fam, A. (2006), "Axial loading tests on short and long hollow structural steel columns retrofitted using carbon fiber reinforced polymers", *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(4), 458-470.
- [8] Teng, J.B., Hu, Y.M. (2007), "Behaviour of FRP-jacketed circular steel tubes and cylindrical shells under axial compression", *Construction and Building Materials*, 21(4), 827-838.
- [9] Sayed-Ahmed, E.Y. (2004), "Strengthening of thin-walled steel I-section beams using CFRP strips", *Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, Calgary, July.
- [10] Bayraktar, A., Türker, T., Altunışık, A.C., Sevim, B., Düzlem Kafes Taşıyıcı Sistemlerin Operasyonel Modal Analizi, İMO 6. Oturum, ss:273-280.
- [11] Aktas, M., (2004), *Minor Axis Flexure And Combined Loading Response Of I-Shaped Steel Members*, Pittsburgh Üniversitesi, Doktora tezi, University Of Pittsburgh School Of Engineering.
- [12] Thomas, S. ve Earls, C. J., (2003a), *Cross Sectional Compactness and Bracing Requirements for HPS483W Girders*, *J struct. Eng., ASCE*, 129 (12), ss:1569-1583.