

Moment Aktaran Kompozit İç Kolon-Kiriş Bağlantı Testleri ve Sayısal Model Çalışmaları

COMPOSITE BEAM-COLUMN CONNECTION TESTS AND NUMERICAL MODELLING

ABSTRACT:

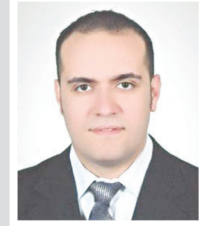
Post-earthquake observations revealed that the performance of the beam-column connections in precast concrete structures widely influence the overall seismic response. Composite connections are widely used in the residential and industrial frame structures where the negative moment continuity is made through cast in place connection while the positive moment continuity is satisfied through welding. In this study, half scale specimens representing an inner beam-column connection were tested to failure under reversed cyclic loading. Stiffness and ductility of test specimens were investigated with respect to the variables of the experimental research. It was observed that the strain development in the flexural longitudinal and transverse reinforcement plays an important role in the overall behavior of the connection. Hence, the detailing in the transverse reinforcement and the unbounded length for the flexural reinforcement were selected as the test variables and results of the study is evaluated accordingly. Beside the experimental research, all specimens were modeled by the program OpenSees to predict the connection behavior. The effect of unbounded length in flexural reinforcement, and buckling of the reinforcement were incorporated in the analytical study.

ÖZET

Prefabrik yapılarda kolon-kiriş bağlantılarının, yapının sismik performansı için nitelendirici bir unsur olduğu geçmiş depremlerde yapılan saha gözlemlerinde belirlenmiştir. Ülkemizde gerek sanayi yapılarında, gerekse çok katlı prefabrik yapı uygulamalarında kompozit (ıslak-kaynaklı) kolon-kiriş bağlantıları yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kompozit, 1/2 ölçekli, üç adet kolon-kiriş bağlantı numunesi tersinir-tekrarlı yükler altında deneysel olarak incelenmiş olup rijitlik ve süneklik bakımından karşılaştırılmıştır. İlk iki numunedeki (P1 ve P2) deney parametreleri, donatı-plaka kaynak katsayısıdır. P1 ve P2 numunelerinde plakaya kaynaklı kiriş boyuna donatısındaki birim deformasyonların numune davranışında etkili olduğu belirlenmiştir. Bu gözlemler ışığında enine donatı oranı ve aderans bozulma boyu dikkate alınan P3 numunesi üretilerek test edilmiştir. Yapı elemanlarının sismik etkiler altındaki tepkilerinin analitik olarak tahmin edilmesi, deneysel çalışmaların ana bileşenlerinden biridir. Bu sebeple prefabrik bağlantı numunelerinden P2 numunesi için kurulan lif (fiber) esaslı model ile deneysel çalışmadaki çevrimsel davranışı OpenSees yazılımı kullanılarak benzeştirilmiştir. Lif esaslı modelde, plakaya kaynaklı boyuna donatılarda burkulma ve donatı kopması göz önüne alınmaktadır.

1. GİRİŞ

Avrupa'da ekonomik ve sosyal gelişmelere bağlı olarak endüstriyel gelişimin II. Dünya Savaşı sonrasında hız-



Sadık Can GİRGİN
Dr. Müh.

Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. 2005-2007 yılları arasında endüstriyel yapı inşaatlarında saha mühendisi olarak görev yaptı. 2008 yılında DEÜ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında "Yapısal olmayan (ikincil) sistemlerin dinamik analizi" yüksek lisans tez çalışmasını tamamladı. 2012 yılında YÖK bursu ile ABD'de Kaliforniya Üniversitesi-Berkeley'de 8 ay süre ile misafir araştırmacı olarak bulundu. 2014 yılı Mayıs ayında "Moment aktaran prefabrik betonarme kompozit iç kolon-kiriş bağlantılarının iyileştirilmesi" doktora tez çalışması ile doktora çalışmalarını tamamladı. 2007 yılından bu yana DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.

lanması ile birlikte endüstriyel yapıların önemli bir kısmı prefabrik betonarme olarak inşa edilmiştir (Şenel ve Palancı, 2013). Ülkemizde de endüstriyel yapıların önemli bölümünü prefabrik yapılar oluşturmaktadır. Tek katlı endüstriyel yapıların yanı sıra ülkemizde çok katlı prefabrik yapılar da artan konut ve ofis ihtiyacına göre uygulanmaya başlamıştır (Ertaş ve diğ., 2006).

Prefabrik kolon ve kiriş elemanların yapıda kesiştiği düğüm noktaları birleşim; birleşim ve komşuluğundaki elemanların ara yüzlerinden oluşan



Serap KAHRAMAN
Prof. Dr.

Prof. Dr. Serap Kahraman, lisans eğitimi- ni Orta Doğu Teknik Üniversitesi, yüksek lisans ve doktora eğitimi Dokuz Eylül Üniversitesi'nde tamamladı. Akademik çalışmalarını Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde sürdürmektedir.

Mukavemet, ileri yapı statîği, sonlu elemanlar yöntemi, plak teorisi derslerini vermekte, deneysel yapı mekaniği, deprem riski, deprem hasarlarının azaltılması, betonarme yapıların deprem performanslarının iyileştirilmesi, kullanıcı dostu güçlendirme yöntemleri, yapı sağlığının gözlenmesi, mühendislik eğitimi üzerine çalışmaktadır.

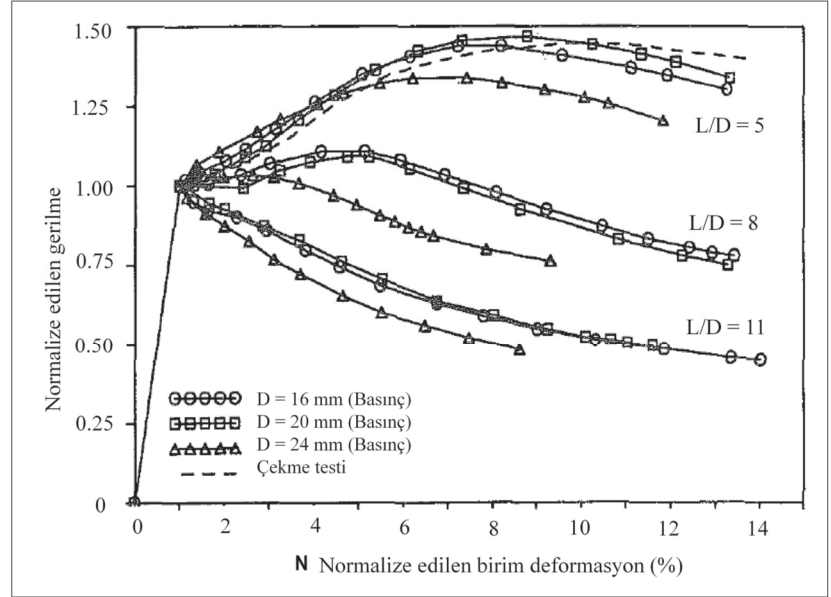
bölge *bağlantı* olarak tanımlanmaktadır (ACI 550.2R, 2013). Moment aktarabilen bağlantılar, düzlem-içi momentleri yapı elemanları arasında transfer edebilmek, yapının yanal rijitliğini ve dayanımını arttırmak için teşkil edilmektedir. Bu bağlantılar, kaynak, bulon ya da ard-germe elemanlarının kullanıldığı *kuru bağlantılar*, monolitik yapı davranışına benzer *ıslak (benzeştirilmiş) bağlantılar* (ACI 550.2R, 2013) ve *kompozit (ıslak-kaynaklı) bağlantılar* olmak üzere üç ana sınıfa ayrılabilir. Kompozit bağlantıda kiriş alt boyuna donatıları kiriş uç alt plakasına kaynaklı olup, bu plaka da kolondaki kısa konsola kaynaklanmaktadır. Birleşim bölgesinde kiriş üstünde ve kolonda birleşim üstünde boşluk bırakılmakta ve kiriş süreklilik donatılarının bu boşluktan yerleşimi yapılmaktadır. Döşeme elemanların yerleşimi ile ta-

mamlayıcı beton dökümü yapılarak üretim tamamlanmaktadır. Kompozit bağlantılar ülkemizdeki çok katlı prefabrik yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Kompozit bağlantılar kullanılarak oluşturulmuş dış kolon-kiriş birleşimleri üzerine yürütülmüş önceki deneysel çalışmalarda, numune kapasitesindeki ani azalmalara donatıların kaynaklanması sırasında mekanik özelliklerdeki olası kayıpların neden olabileceği belirlenmiştir (Ertaş ve diğ., 2006; Karadoğan ve diğ., 2012). Kaynaklama işleminin donatıların mekanik özelliklerine etkilerinin araştırıldığı bir diğer çalışmada ise donatıda ulaşılan maksimum

birim deformasyonun belirgin bir şekilde azaldığı ve karbon içeriğindeki artışın kaynaklanabilirliği olumsuz yönde etkilediği belirlenmiştir (Rodriguez ve Rodriguez, 2006).

Yapı elemanlarının sismik etkiler altındaki tepkilerinin analitik yöntemlerle tahmin edilmesi deneysel çalışmaların ana hedeflerinden biridir. Kullanılan analitik modellerin de yapı elemanları ya da alt sistemlerinin testler sırasında gösterdikleri davranışı rijitlik azalması, dayanım azalması, enerji tüketimi, çevrim sıkışması vb. açısından uygun yaklaşıklıkta temsil edebilmesi gerekmektedir.



Şekil 1. Monotonik testler sonucu normalize edilen gerilme-birim deformasyon ilişkileri (Monti ve Nuti, 1992).

Tablo 1. Deney numunelerinin özellikleri ve deney parametreleri.

Numune	α	L_k (mm)	a/d	ρ_w (%)	s_r/ϕ_L	L_{ab}	C (%)	C_{eq} (%)
P1	2,0	450	3,0	0,52	5,55	-	0,31	0,491
P2	1,2	300	3,15	0,52	5,55	-	0,196	0,348
P3	1,2	300	3,15	1,0	4,2	10 ϕ_L	0,19	0,348



Şekil 2. Prefabrik iç kolon-kiriş bağlantı numunelerinin montaj aşaması.

Çalışma kapsamında, ülkemizdeki prefabrik yapılarda yaygın olarak kullanılan kompozit iç kolon-kiriş bağlantı türlerinin deneysel olarak incelenmesi ve baskın hasar modlarının belirlenerek iyileştirme önerilerinin sunulması amaçlanmıştır. Ayrıca yayılı plastisite yaklaşımına dayalı lif (fiber) esaslı sayısal modeller kurularak numune davranışlarının benzeştirilmesi ve prefabrik yapıların doğrusal olmayan analizlerinde kullanılabilir bu modellerin model parametrelerinin tespit edilmesi de hedeflenmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1 Deney Numuneleri

Sunulan çalışmada, ülkemizde çoğunlukla tercih edilen kompozit bağlantıları barındıran iç kolon-kiriş birleşim numuneleri üzerine yürütülmüş ve kapsamı daha geniş bir test programındaki üç adet prefabrik numunenin deney sonuçları ve bir numune için analitik model sonucu irdelenmiştir. Deney numuneleri, deprem yükleri altında

çerçeve sistem içerisindeki kolon ve kiriş elemanların yaklaşık orta bölgelerinde oluşan moment sıfır noktaları arasında kalan iç birleşim bölgelerini temsil edecek şekilde oluşturulmuştur. İç kolon-kiriş birleşim numuneleri laboratuvar imkânları dikkate alınarak 1/2 ölçekli olarak hazırlanmış ve yer değiştirme kontrollü tersinir-tekrarlı yükler altında test edilmiştir.

P1 ve P2 numuneleri için ana değişken, Deprem Yönetmeliğinde (2007) kaynaklı bağlantılar için belirtilen *kaynak katsayısı* (α) olarak dikkate alınmıştır. Deneysel çalışmada bağlantı numuneleri için TS 708 (2010)'a göre karbon oranı ve karbon eşdeğeri sınırlandırılan B420 C donatı sınıfının kullanılması öngörülmüştür. Bağlantı numunesi testlerinin gerçekleştirilmesinden sonra kiriş alt boyuna donatılarından alınan örnekler üzerinde spektrometrik analizler yaptırılmıştır. Bu analizlerde P1 numunesindeki boyuna donatının karbon oranının, P2 numunesindeki boyuna donatıya göre yüksek olduğu



İbrahim Serkan MISIR
Dr. Müh.

İnşaat Mühendisliği eğitimini 1995-1999 yılları arasında Dokuz Eylül Üniversitesi'nde tamamladı. 2004 yılına kadar Kocaeli depreminde hasar gören binaların hasar tespit ve güçlendirme projelerinin hazırlanması işlerinde ve ayrıca çelik bina inşaatlarının saha mühendisliği görevlerinde bulundu. 2004 yılında DEÜ Yapı Yüksek Lisans Programı'nı tamamladı. "Betonarme Yapıların Deprem Davranışının İyileştirilmesinde Çimento Şerbeti Emdirilmiş Lifli Beton (SIFCON) Kullanımı" adlı tez ile 2011 yılında DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nden "Doktor Mühendis" unvanı aldı. DEÜ Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nın kurucu öğretim elemanlarından olup görev aldığı deneysel projeler sırasında quasi-statik deney sistemleri ve küçük-orta ölçekli sarsma tablaları kurulmuştur. 2004 yılından beri DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Uzman kadrosunda görevli olup halihazırda doktora sonrası araştırmaları için TUBİTAK burslusu olarak Virginia Tech-ABD'de bulunmaktadır.

belirlenmiştir. P3 numunesi ise P1 ve P2 numunelerinde belirlenen hasar gözlemleri ışığında oluşturularak test edilmiştir (Girgin, 2014).

Ardgermeli birleşimlerde yumuşak donatıların düşük görelî kat ötelenme seviyelerinde kopmasını engellemek için aderans bozulma boyu bırakılması uygulanan bir yöntemdir (Ertaş, 2005; Atalay, 2010). Cheok ve diğ. (1994), aderans bozulma boyunun gerekenden kısa bırakılması halinde birleşim bölgesinin sağlaması gereken görelî kat ötelenme oranlarına ulaşmadan donatıların kopabileceğini, belirlenen

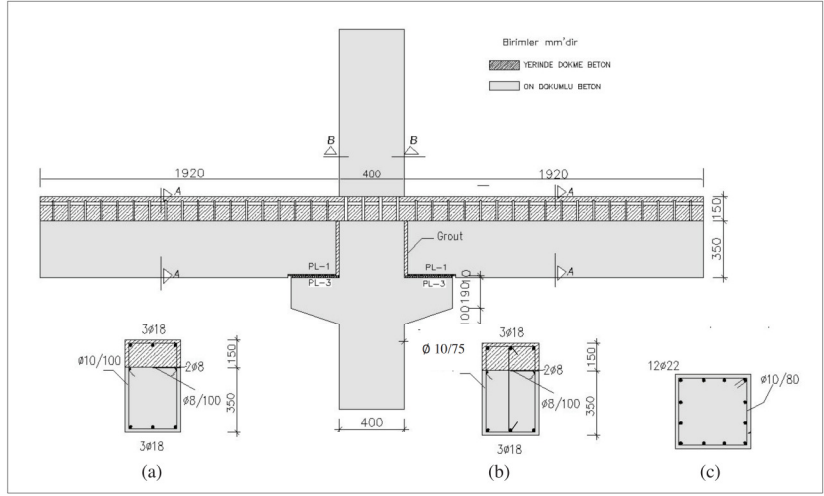


Özgür ÖZÇELİK
Doç. Dr.

1999 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi'nden İnşaat Mühendisi, 2002 yılında aynı üniversiteden Yüksek Mühendis ünvanı aldı. Aynı yıl University of California, San Diego'da doktora çalışmalarına başladı. 2008 yılında bu üniversiteden doktor ünvanını alarak mezun oldu. Dokuz Eylül Üniversitesi'nde, Aralık 2009 - Ocak 2014 tarihleri arasında yardımcı doçent, Ocak 2014'ten beri de doçent olarak akademik çalışmalarını sürdürmektedir.

Araştırma alanları: deneysel yapı dinamiği, yapı dinamiği, deprem mühendisliği, mühendislik yapılarının sistem tanımlaması, yapı sağlığının izlenmesi (structural health monitoring), operasyonel modal analiz, istatistiksel ve adaptive sinyal işleme, sonlu eleman yöntemleri, zemin-temel-yapı etkileşimi, deprem simülatorü (sarsma tablası) dinamiği, doğrusal olmayan yapı-sarsma tablası dinamik etkileşimi, deprem simülatorü modellenmesi, dizaynı ve kontrolü, büyük ölçekli sarsma tablası testleri şeklindedir.

boyun gerekenden uzun olması durumunda ise donatıların akmayacağını ve enerji tüketme kapasitesinde belirgin bir azalmanın oluşacağını belirtmiştir. Prefabrik Bağlantılarda Tasarım Rehberi'ne (ACI 550.2R, 2013) göre, aderans bozulma boyunun (L_{ab}) 100-200 mm veya kiriş boyuna donatı çapına (ϕ_L) bağlı olarak, $4\phi_L - 8\phi_L$ aralığında değerler alabileceği belirtilmektedir. P3 numunesinde de donatı-plaka kaynağının bittiği noktadan itibaren aderans bozulma boyu yaklaşık uygulanarak birim deformasyonların azaltılması amaçlanmış, aderans bozulma boyu $10\phi_L$ olarak alınmıştır.



Şekil 3. Prefabrik iç kolon-kiriş bağlantı numunelerinin boyutları (a) P1 ve P2 numuneleri kirişi, (b) P3 numunesi kirişi, (c) Kolon boyutları.



Şekil 4. P3 numunesinde donatı-plaka kaynağının bitiminden itibaren aderans bozulma boyunun bırakılması.

Kompozit kolon-kiriş bağlantıları üzerine önceki deneysel çalışmalarda, kiriş plakasına kaynaklı boyuna donatının kopma birim deformasyonuna ulaşmadan tersinir yükler altında burkulduğu gözlenmiştir. Donatılarda elastik olmayan burkulma etkileri Şekil 1'de görüldüğü gibi monotonik (Monti ve Nuti, 1992) ve çevrimsel yük etkileri altında (Restrepo, 2006) incelenmiştir. Çalışmalarda iki ucu ankastre mesnetli donatı boyu/çapı (L/D) oranı arttıkça burkulma etkilerinin belirgin hale geldiği gözlenmiştir.

P3 numunesinde boyuna donatı burkulma boyunun azaltılabilmesi için

etriye sıklaştırması yapılmış, ayrıca kiriş orta boyuna donatısının mesnet koşulları çiroz kullanılarak geliştirilmiştir. Tablo 1'de deney numunelerinde göz önüne alınan kaynak katsayısı (α), kısa konsol boyu (L_r) kesme açıklığı/faydalı yükseklik (a/d), kiriş enine donatı oranı (ρ_w), etriye aralığı/boyuna donatı çapı (s_r/ϕ_L), aderans bozulma boyu (L_{ab}) ve karbon yüzdesi (C) ile karbon eşdeğeri (C_{eq}) değerleri verilmiştir.

Prefabrik kiriş elemanlar için 40 MPa, kolon elemanlar içinse 45 MPa ortalama silindirik beton basınç dayanımı belirlenmiştir. Prefabrik numuneler D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda monte edilmiştir (Şekil 2). Montaj aşamasında:

- Kirişler kısa konsola mesnetlenerek kirişteki plaka kısa konsol üstündeki plakaya kaynaklanmış,
- Kuvvetlerin birleşime aktarılabilmesi için kolon-kiriş birleşim arayüzündeki boşluk rötresiz harç ile kapatılmış,
- Kiriş ve birleşim üzerindeki kısım kalıba alınarak tamamlayıcı (top-

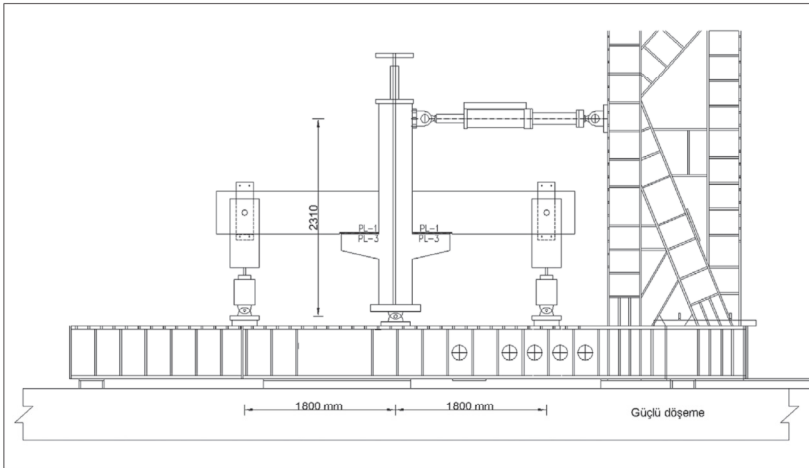
ping) beton dökümü yapılmıştır. Tamamlayıcı beton ortalama basınç dayanımları silindirik numune dayanımına çevrilerek 35 MPa olarak bulunmuştur.

Bağlantı numunelerinin kolon ve kiriş en kesitleri Şekil 3'de, P3 numunesinde bırakılan aderans bozulma boyunu gösteren resim ise Şekil 4'de verilmektedir.

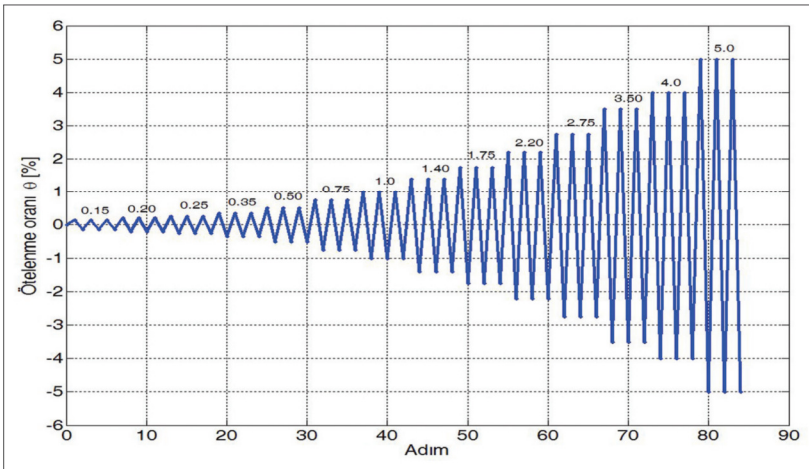
2.2 Deneysel Kurulum

Prefabrik kolon-kiriş bağlantı numunelerinin testleri D.E.Ü. Yapı Mühendisliği Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir.

Deney numuneleri, Şekil 5'de görülen ve *Moment Çerçevesinin Yapısal Testleri için Kabul Kriterleri*'ne (ACI 374.1.05) uygun şekilde oluşturulan deney düzeneği üzerine yerleştirilerek test edilmiştir. Kolon altında yer alan metal plaka yükleme doğrultusunda mafsallı olup, güçlü çelik çerçeveye bağlanmıştır. Kiriş elemanların serbest uçları, uygulanan tepe yükü doğrultusunda serbestliği bulunan pandül ayaklar üzerine mesnetlenmiştir. Kolon elemana, deney süresince aksel yük kapasitesinin % 10'u düzeyindeki basınç yükü uygulanmıştır.



Şekil 5. Deney numunesinin sistem içerisindeki konumu.



Şekil 6. Yükleme profili (Ertaş, 2005).



Şevket ÖZDEN
Doç. Dr.

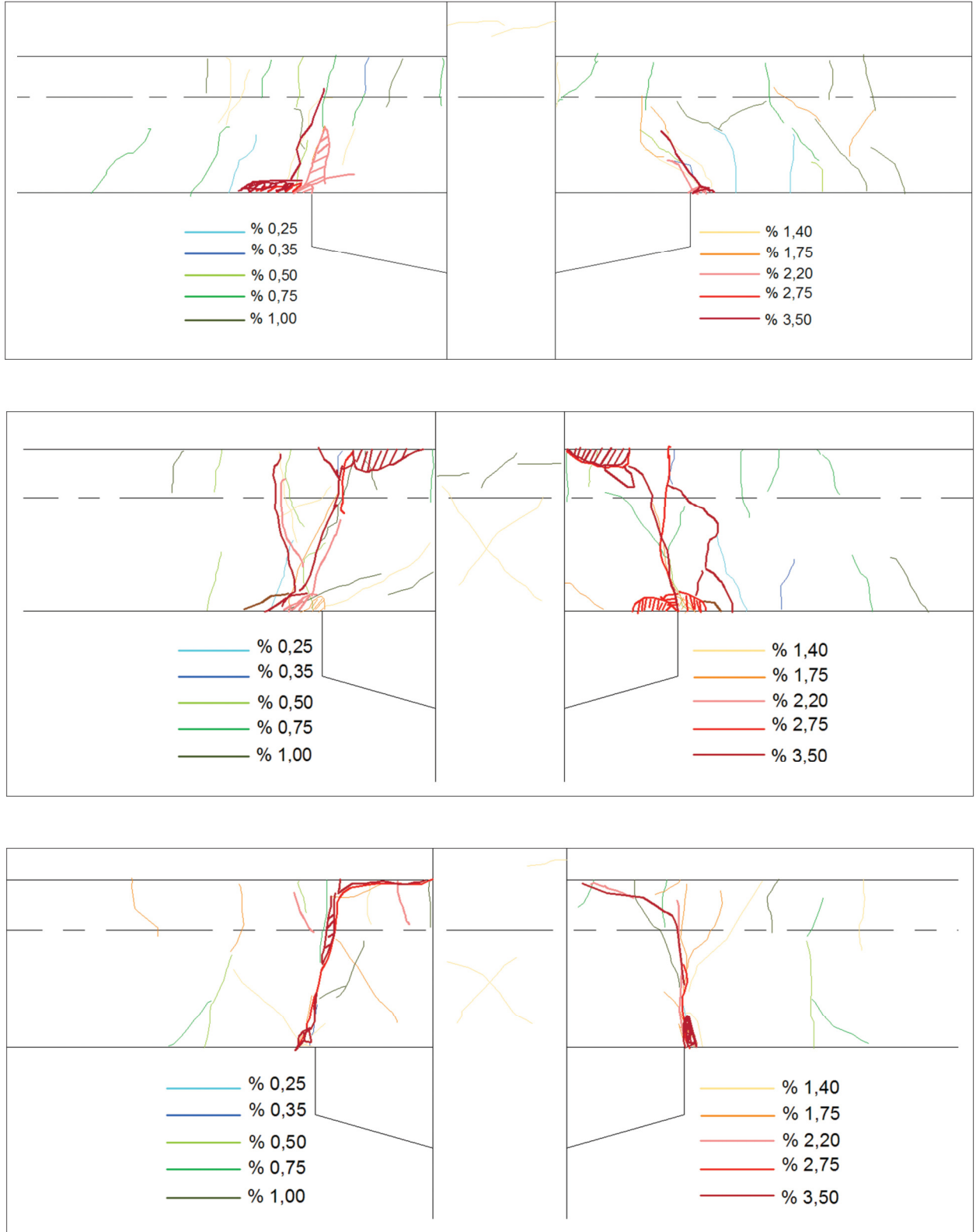
Doç. Dr. Şevket Özden 1989 yılında Boğaziçi Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun olduktan sonra Kanada-Toronto Üniversitesinde Yüksek Lisans ve Boğaziçi Üniversitesinde Doktora yapmıştır. Makedonya-Üsküp Deprem Enstitüsünde Deprem Mühendisliği alanında eğitim almıştır.

Doktorasını tamamladıktan sonra kısa bir süre Boğaziçi Üniversitesinde çalışmış, 1999 Kocaeli depreminden hemen sonra ise 15 yıl boyunca çalışacağı Kocaeli Üniversitesi kadrosuna katılmıştır.

Birçok araştırma projesinde yer alan ve "Prefabrike Yapılar", "Betonarme Yapı Güçlendirmesinde Karbon Elyaf Kullanımı" ve "Tarihi Yapıların Onarım ve Güçlendirilmesi" alanlarında çalışan Şevket Özden 2013 yılından buyana OKAN Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde çalışmaktadır. Şevket Özden Türkiye Prefabrik Birliği Teknik Danışmanıdır.

Kolon - kiriş bağlantı numunelerinde, yer değiştirmeler kolon tepe ucuna tersinir-tekrarlı üçer adet tam çevrim olarak, ACI 374.1.05'e uygun, ötelenme oranları cinsinden uygulanmıştır (Şekil 6). Deneylerin, numunelerin elastik ötesi davranışlarının ortaya konabilmesi amacı ile % 5 görel kat ötelenme oranına kadar sürdürülmesi hedeflenmiştir.

Deney süresince birleşim bölgesinde gelişecek deformasyonların izlenebilmesi amacıyla 12 adet yer değiştirme ölçer ve kiriş uçlarına birer adet, kolon üst ucuna ise 2 adet ipli ölçer yerleş-



Şekil 7. Deney süresince numunelerde gelişen hasar dağılımı (a) P1 numunesi, (b) P2 numunesi ve (c) P3 numunesi.

tirilmiştir. Birleşim paneline birleşimde gelişebilecek kayma deformasyonlarının belirlenebilmesi amacı ile 2 adet yerdeğiştirme ölçer yerleştirilmiştir.

3. DENEY SONUÇLARI

3.1 Gözlenen Hasar

Deney süresince numunelerde gelişen hasarın dağılımı Şekil 7'de verilmiştir. P1 numunesinde hasar kısa konsol bitiminden itibaren kiriş alt kısmında yoğunlaşmıştır. K1 kirişinde % 2,2 ötelenme oranında kısa konsol bitiminden itibaren kabuk betonunda dökülme ve bağlantının üst kısmında kirişte kesme çatlakları belirginleşmiştir. Ayrıca kiriş alt donatısında burkulma gözlenmiş, K2 kirişinin alt boyuna donatıları % 2,2 ötelenme oranının ikinci çevri-

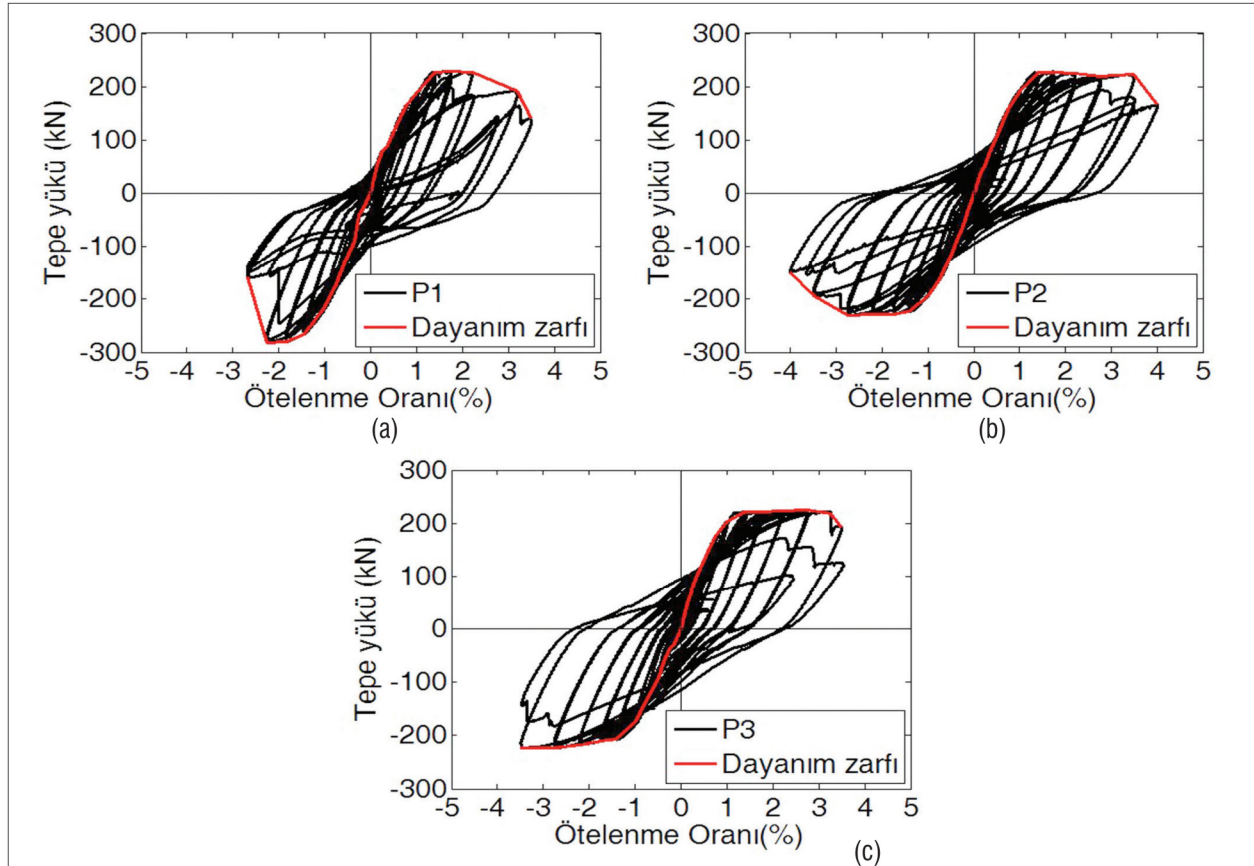
minde kopma birim deformasyonuna ulaşarak plaka kaynağının sınırından kopmuştur. P1 numunesinde test itme yönünde % 3,5 ötelenme oranına, çekme yönünde % 2,75 ötelenme oranına kadar sürdürülmüştür.

P2 numunesinde kolon-kiriş birleşimindeki ilk diyagonal çatlaklar % 1,4 ötelenme oranında oluşmuştur. K1 kirişinde % 2,75 ötelenme oranında kısa konsol bitiminden itibaren kabuk betonunda dökülme ve bağlantının üst kısmında kirişte kesme çatlakları belirginleşmiştir. Ayrıca kiriş alt donatısında burkulma gözlenmiş, K2 kirişinin alt boyuna donatıları % 3,5 ötelenme oranının ilk çevriminde, kopma birim deformasyonuna ulaşarak plaka kaynağının sınırından kopmuştur.

P3 numunesinde ise kolon-kiriş birleşiminde kılcal diyagonal çatlaklar % 1,4 ötelenme oranında oluşmuş, % 2,2 ötelenme oranında K2 kirişinde kısa konsol üstünde kabuk betonunda ezilme meydana gelmiş ve % 2,75 ötelenme oranında K1 kirişi üstünde tamamlayıcı betonda ezilmeler gelişmiştir. Kaynaklı bağlantının üst kısmında kabuk betonundaki dökülme sargı etkisindeki artış ile önlenmiştir. K1 kirişinde % 3,5 ötelenme oranında kiriş alt donatısı kopma birim deformasyonuna ulaşmıştır.

3.2 Tepe yükü-tepe ötelenme oranı

P1 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 8.a'da verilmiştir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme



Şekil 8. Kolon-kiriş bağlantı numunelerinin tepe yükü - tepe ötelenme oranı grafikleri (a) P1 numunesi, (b) P2 numunesi, (c) P3 numunesi.

oranında ulaşılmış, kiriş alt boyuna donatılarının kaynaklandıkları plakadan kopması, çekme yönündeki dayanımda % 40 azalmaya sebep olmuştur. P2 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği Şekil 8b’de görülmektedir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmış, % 3,5 ötelenme oranında kiriş alt boyuna donatılarının kaynaklandıkları plakadan kopması çekme yönündeki dayanımda yine % 40 oranında azalmaya sebep olmuştur. P3 numunesinin tepe yükü-tepe ötelenme oranı grafiği ise Şekil 8c’de verilmiştir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma % 2,2 ötelenme oranında ulaşılmış, % 3,5 ötelenme oranının ikinci çevrimine kadar dayanımda azalma gözlenmemiş, kiriş alt boyuna donatısının kopması ile çevrim içi dayanım azalması yaklaşık % 35 olarak gerçekleşmiştir.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Dayanım

Deprem Yönetmeliği (2007) gibi ulusal yönetmeliğimizde ve ACI 318 (2005) gibi uluslararası yönetmeliklerde kullanılması önerilecek yeni betonarme birleşim bölgesi çözümlerinin deneysel olarak incelenmesi gerektiği belirtilmektedir. ACI 374.1.05 (2005) “Moment çerçevelerinin yapısal testleri için kabul kriterleri” dokümanı bu amaçla kullanılabilir niteliktedir. ACI 374.1.05’te test edilecek birleşim bölgesi alt sistemlerinin sağlaması beklenen ötelenme oranı limitleri güçlü yer ivmeleri ve yapısal özelliklerdeki belirsizlikler göz önüne alınarak belirlenmiştir. Buna göre testler, birleşim bölgelerinin elastik ötesi davranışlarını karakterize edebilmek için kademeli artan bir şekilde en az % 3,5 görece ötelenme oranına kadar devam ettiril-

Tablo 2. Numune dayanımlarının ACI 374.1.05’e göre değerlendirilmesi.

Numune	Yüklemeye yönü	Maksimum tepe yükü QM (kN)	0.75 QM (kN)	Q3.5 (kN)
P1	İtme	231,6	173,7	140,3
	Çekme	287,8	215,9 -	
P2	İtme	231,2	173,4	168
	Çekme	235,8	176,9	154,5
P3	İtme	225,7	169,3	125,7
	Çekme	228,2	171,1	173,2

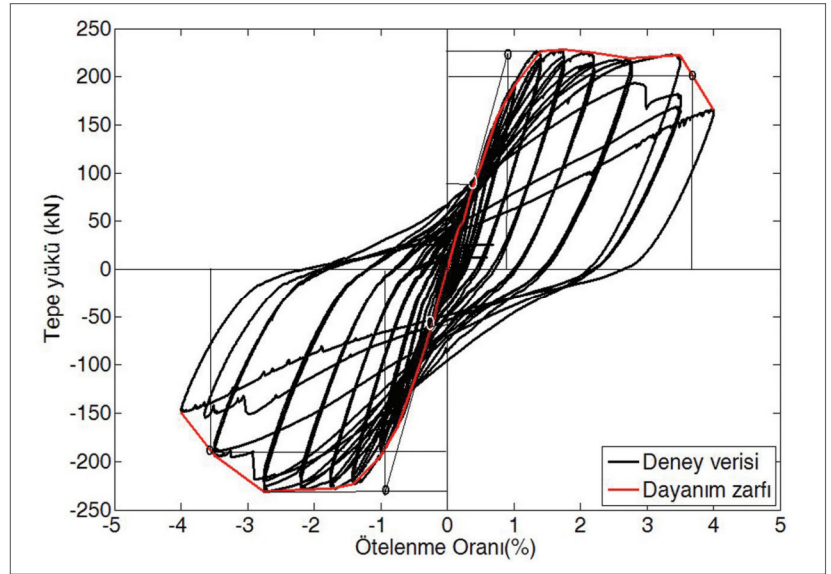
melidir (ACI 374.1.05, 2005). Moment çerçevelerinin yapısal testlerindeki kabul kriterlerine göre, birleşim bölgesi deney elemanı dayanım bakımından “herbir yüklemeye yönünde, % 3,5 görece ötelenme oranının üçüncü çevrimindeki yük değeri aynı yönde ulaşılan maksimum tepe yükünün % 25’inden az olmamalıdır” koşulunu sağlamalıdır.

Tablo 2’de numunelerin % 3,5 ötelenme oranının son çevriminde ulaştıkları tepe yükü ($Q_{3,5}$) verilmektedir. P1 numunesinin testleri, % 3,5 ötelenme oranının ilk çevriminin sonuna kadar

gerçekleştirildiğinden çekme yönündeki tepe yükü değeri bulunmamaktadır. P2 numunesinde de her iki yüklemeye doğrultusu için bu koşul sağlanamamıştır. P3 numunesinde ise, % 3,5 ötelenme oranının 2. çevriminde itme yönünde dayanımda belirgin bir azalma olduğundan bu koşul sağlanamamıştır.

4.2 Yerdeğiştirme Sünekliği

Yerdeğiştirme sünekliği, yapı elemanında ya da sisteminde başlangıçtaki akma dayanımında önemli bir azalma olmadan yapabileceği en büyük şekil değiştirmenin akma şekil değiştirme-



Şekil 9. Deney numunelerinin etkili süneklik (μ_{eff}) değerlerinin belirlenmesi.

Tablo 3. Numunelerin ortalama yerdeğiştirme sünekliği.

Numune	Yükleme yönü	Q_M (kN)	$\Theta_{y,eff}$ (%)	Θ_U (%)	μ_{eff}	μ_{ort}
P1	İtme	231,6	0,86	3,3	3,79	3,12
	Çekme	287,8	1,0	2,5	2,45	
P2	İtme	231,2	0,9	3,69	4,3	4,2
	Çekme	235,8	0,9	3,7	4,1	
P3	İtme	225,7	0,68	3,5	5,1	4,3
	Çekme	228,2	1,0	3,5	3,5	

sine oranı olarak tanımlanmaktadır. Numunede etkili yerdeğiştirme sünekliğinin (μ_{eff}) elde edilebilmesi için tepe yükü ve tepe ötelenme oranı değerlerinin belirlenmesi gereklidir. Buna göre deney verisinde her ötelenme oranının ilk çevrimine karşı gelen tepe yükü değerleri birleştirilerek dayanım zarf eğrisi elde edilmiştir. Dayanım zarf eğrisinde, maksimum tepe yükünün (Q_M) % 40'ına karşı gelen tepe yükünün yatay eksenindeki izdüşümünden etkili akma ötelenme oranı ($\Theta_{y,eff}$), maksimum tepe yükünün (Q_M) % 80'ine karşı gelen tepe yükü değerinin yatay eksenindeki izdüşümü ile de maksimum ötelenme oranı (Θ_U) elde edilmiştir (Şekil 9) (FEMA P-795, 2011). Numunelerin *Bileşen Eşdeğerliği Yöntemi*'ne göre (FEMA P-795) hesaplanan etkili yer değiştirme süneklikleri (μ_{eff}), Tablo 3'de verilmiştir.

Buna göre ortalama yerdeğiştirme süneklikleri (μ_{ort}), göz önüne alındığında, revize edilen P3 numunesi P1 numunesi ile kıyaslandığında, aderans bozulmasının süneklik açısından artış sağladığı görülmektedir.

5. LIF (FIBER) ESASLI SAYISAL MODEL

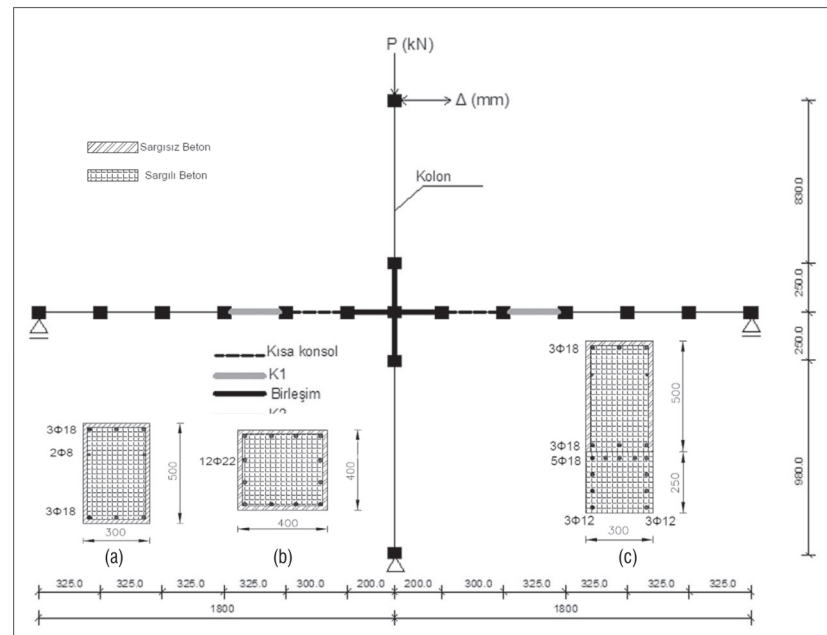
Çalışmada deney numunesinin tersinir-tekrarlı yükler altındaki davranışının benzeştirilmesi amacı ile yayılı plasti-

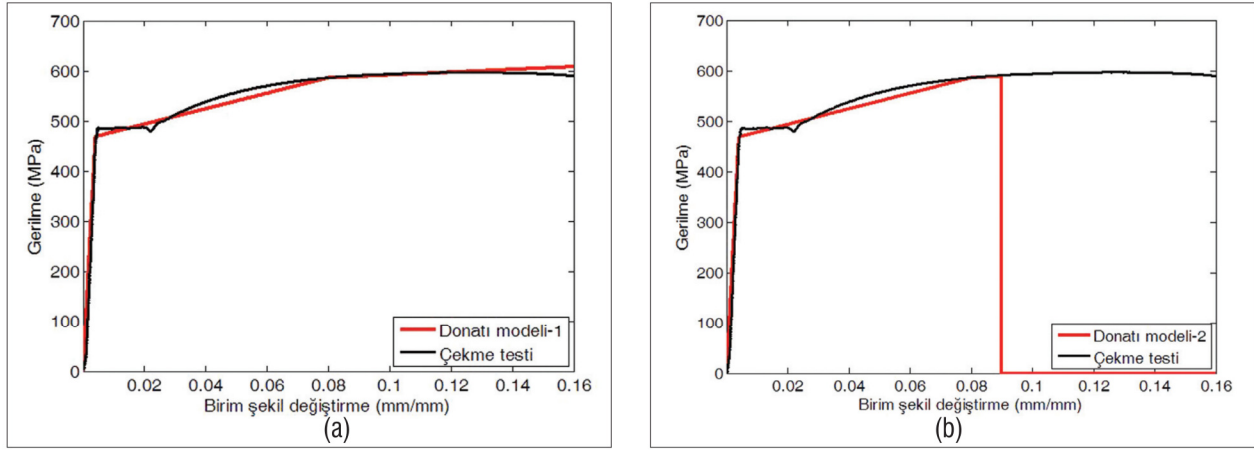
site yaklaşımına dayalı *lif (fiber) esaslı model* kullanılmıştır. Analizlerde OpenSees yapısal simülasyon programı kullanılmıştır. OpenSees, Pacific Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (PEER) tarafından yapı ve geoteknik alanında araştırmacıların yararlanabileceği ve katkıda bulunabileceği uygulama ve araştırma simülasyon yazılımı olarak geliştirilmiştir (McKenna ve diğ., 2000).

Lif esaslı modeller, ilk olarak 1970'li yıllarda geliştirilmeye başlanmıştır. Lif

esaslı model, betonarme yapılarda iki boyut kiriş elemanında enkesitin sıra halinde katmanlara ya da üç boyutlu kiriş elemanlarda liflere ayrıştırılmasına dayalıdır (Ranzo ve Petrangeli, 1998). Kolon-kiriş elemanlarda davranışın benzeştirilmesi için histeretik başka bir modelin kullanılması gerekmemektedir. Eleman uzunluğu boyunca integrasyon noktalarının tanımlı olduğu dilimler arasında, malzemedeki gerilmelerin sabit olduğu varsayılır (Priestley ve diğ., 2007). Bununla beraber, lif esaslı modelde kesme etkileri dikkate alınmamaktadır. Kesme-eğilme etkileşimine maruz narinliği az betonarme kolon ve perde elemanlarda kayma deformasyonları ihmal edilebilir düzeyde değildir (Ceresa ve diğ., 2009).

P2 deney numunesi için lif esaslı model kurularak deneysel çalışmada elde edilen tepe yükü - tepe ötelenme oranı ilişkileri kıyaslanmıştır. Şekil 10'da hesap modeli verilen numunede kolon ve kiriş elemanlar *kuvvet-esaslı kolon-kiriş elemanı* olarak tanımlanmıştır.

**Şekil 10.** Lif esaslı model; (a) kiriş, (b) kolon, (c) kısa konsol en kesiti.



Şekil 11. (a) Donatı çekme testlerine göre kalibre edilen Donatı modeli-1, ve (b) plakaya kaynaklı donatı için tanımlanan Donatı modeli-2

Kolon ve kiriş elemanlarda iki adet integrasyon noktası tanımlanmıştır.

Şekil 10a'daki lif esaslı hesap modelinde, donatı çeliği için OpenSees'de yer alan tek eksenli *histeretik malzeme modeli* kullanılmıştır. Priestley (2000) çalışmasında, burkulma ve düşük çevrimli yorulma etkilerinin azaltılabilmesi için boyuna donatıda gelişecek maksimum birim deformasyonun (ϵ_{sm}) kopma birim deformasyonuna (ϵ_{su}) bağlı olarak,

$$\epsilon_{sm} = 0.6 \epsilon_{su} \quad (1)$$

denklemleri ile sınırlandırılması gerektiği-

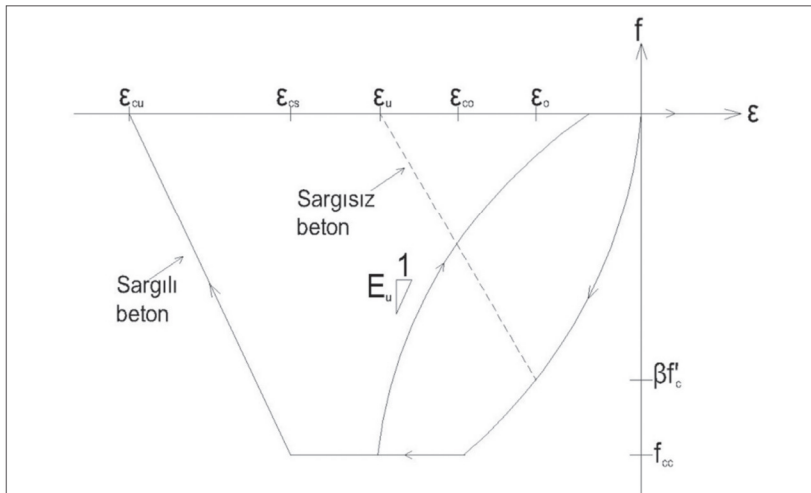
ni önermiştir. Bu öneri dikkate alınarak kirişin boyuna donatı çeliği için kullanılan modelin çekme yönü için iki farklı donatı parametresi tanımlanmıştır. *Donatı modeli-1*, kiriş üst boyuna donatısının tanımlanması için kullanılmış ve çekme testlerine göre kalibre edilmiştir (Şekil 11a). *Donatı modeli-2* plakaya kaynaklı alt boyuna donatılar için tanımlanmış ve maksimum birim şekil değiştirme (ϵ_{sm}), (1) no'lu denkleme göre 0,09 olarak alınmıştır (Şekil 11b).

Donatı burkulması etkilerinin modellenmesi için donatılar basınç yönünde, Şekil 1'de verilen ve Monti ve Nuti

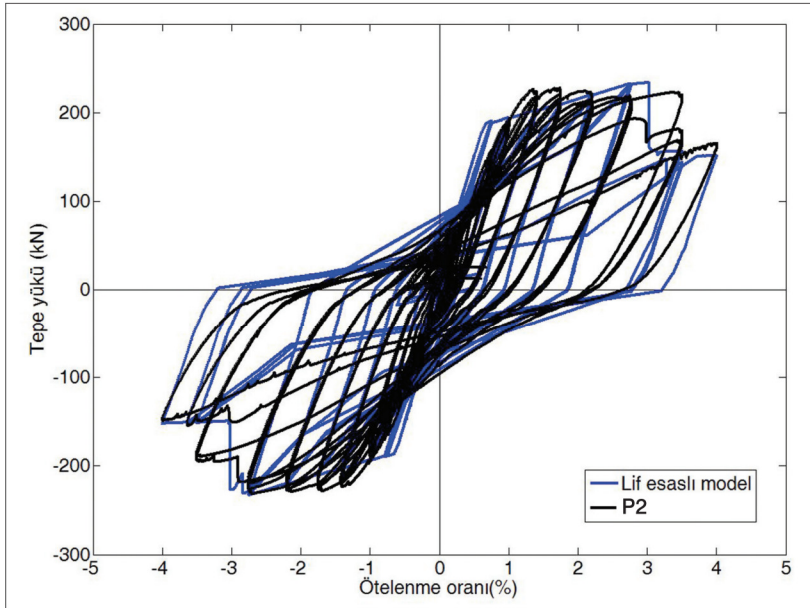
(1992) çalışmasındaki monotonik basınç testi sonuçlarına göre kalibre edilmiştir. Şekil 10'da K1 ve K2 olmak üzere iki adet kiriş enkesiti verilmektedir. K1 kiriş enkesitinde, alt boyuna donatılar için *Donatı modeli-2* kullanılmıştır.

Lif esaslı modelde kolon ve kiriş elemanlardaki beton malzeme modeli Fujii beton modeli olup (Hoshikuma ve diğ., 1997) buna göre sargısız betondaki gerilme beton basınç dayanımına (f_c') ulaştıktan sonra doğrusal olarak azalarak $\epsilon_u = \% 0,4$ birim şekil değiştirmesinde sıfıra ulaşmaktadır. Sargılı betonda maksimum beton gerilmesi (f_{cc}), ϵ_{cc} birim şekil değiştirmesinde oluşmaktadır ve ϵ_{cs} birim şekil değiştirmesinde betonda yumuşama başlamaktadır. Sargılı betonun gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi sargısız betondaki davranışa benzer şekilde f_c' gerilmesine kadar benzerdir. Mander ve diğ. (1988) çalışmasında verilen ifadelerle bağlı olarak kirişte sargılı beton için $\epsilon_{cc} = \% 0,3$; $\epsilon_{cu} = \% 1,1$ ve $f_{cc} = 49,7$ MPa olarak hesaplanmıştır (Şekil 12).

Şekil 13'de P2 numunesi ile lif esaslı modelin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırması verilmiştir. P2



Şekil 12. Beton malzeme modeli için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkileri



Şekil 13. P2 numunesi deney verisi ile lif esaslı modelin tepe yükü-tepe ötelenme oranının karşılaştırılması.

numunesinin testi sırasında, % 3,5 ötelenme oranına ulaşıldığında plakaya kaynaklı boyuna donatılar kopma birim deformasyonuna ulaşmıştır. Lif esaslı modelde de her iki yönde bu ötelenme oranı sonrasında çevrim içi dayanım azalmasının sağlandığı görülmektedir. Ayrıca model deneysel çalışmada gözlenen dayanım ve rijitlik azalmasını yansıtabilmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, ülkemizdeki çok katlı prefabrik yapılarda yaygın kullanım alanı bulan kompozit (ıslak-kaynaklı) moment aktarabilen kolon-kiriş birleşimlerini temsil eden numuneler deneysel olarak incelenmiş, prefabrik ve monolitik numunelerin dayanım, rijitlik ve enerji tüketimi bakımından karşılaştırmalı değerlendirmesi yapılmıştır. Prefabrik numunelerin tersinir-tekerrürlü yükler altındaki davranışının benzeştirilebilmesi ve prefabrik yapılarda uygulanabilmesi açısından sayısal modeller kurulmuştur.

- Kolon-kiriş bağlantı numunelerinde kiriş alt boyuna donatısı-kiriş plakası arası kaynak hesaplarında Deprem Yönetmeliği (2007)'nde verilen *kaynak katsayısı* (α) test değişkeni olarak alınmıştır. Bununla birlikte kaynak katsayısı 1,2 ve 2,0 olarak alınan P1 ve P2 numunelerinde, ileri ötelenme oranlarındaki davranışın temel olarak kiriş alt boyuna donatısında gelişen birim deformasyonlardaki artışa bağlı olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, kaynaklı bağlantı hesaplarında, yalnızca kuvvet esaslı yöntemlerle hesap yerine donatı birim deformasyonları sınırlandırılarak şekil değiştirme esaslı yöntemlerin de kullanılması uygun olacaktır.
- Deneysel çalışmada birleşim bölgesi numuneleri için karbon oranı ve karbon eşdeğeri sınırlandırılan B420 C donatı sınıfının kullanılması öngörülmüştür. P1 numunesinde diğer numunelere göre kiriş boyu-

na donatılarındaki karbon oranının yüksek olması bu donatıların kaynaklanabilirliğini etkilemiş ve kaynaklama sırasında mekanik özellikleri bozulan donatının % 2,2 tepe ötelenme oranında kopmasına neden olmuştur. Kompozit kolon-kiriş bağlantılarında, karbon oranı ve karbon eşdeğeri sınırlandırılan donatıların kullanılması uygun olabilir.

- P1 ve P2 kolon-kiriş bağlantı testleri göz önüne alınarak P3 numunesi oluşturulmuştur. Bu numunede donatılarda gelişen burkulma etkilerini önlemek için kiriş etriye aralıkları azaltılmış ve orta boyuna donatılar çirozlar ile mesnetlenmiştir. P3 numunesinde, donatının çelik kılıf içerisinde bırakılarak aderans bozulması yaklaşımı uygulanması ile donatıda birim deformasyonlar azaltılmıştır. Aderans bozulma boyu, boyuna donatı çapının 10 katı ($10\phi_L$) olarak alınmıştır. Ancak P3 numunesinde donatılar % 3,5 ötelenme oranının 2. çevriminde kaynaklandıkları plakadan koptuğu için aderans bozulma boyunun artırılması gereklidir.
- Bağlantı numunelerinin testler sırasında gösterdikleri çevrimsel davranışlarının benzeştirilmesi için yayılı plastisite yaklaşımına dayalı sayısal model çalışmaları yapılmıştır. Yayılı plastisite yaklaşımına dayalı kurulan lif esaslı modelde, kaynaklı donatılar için birim deformasyonların sınırlandırıldığı ve burkulma etkilerini dikkate alan bir donatı modeli önerilerek analizlerde kullanılmıştır. Modelin, deney verilerini rijitlik ve dayanım azalması bakımından yansıttığı belirlenmiştir. Öte yanda, yalnız eğilme etkilerinin dikkate alındığı lif esaslı modellerde, gelecekteki

çalışmalarda kesme etkilerinin de dâhil edilerek sayısal model çalışmalarının geliştirilmesi gereklidir.

- Literatürde monotonik ve çevrimsel yüklere maruz donatı numunelerinde gerçekleştirilen testlerde L/D (donatı boyu/donatı çapı) arttıkça burkulma etkilerinin belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Bu deneysel çalışmalarda donatı numunelerinin iki ucunun dönmesi engellenmiştir. Çalışma kapsamında kompozit kolon-kiriş bağlantılarında gerçekleştirilen testlerde ise, donatının plakaya kaynaklandığı bölge yakınında etriyelerin akma birim deformasyonuna ulaşması ile donatıların mesnetlenme koşulları farklılık göstermiş ve burkulma boylarında artış meydana gelmiştir. Deprem yönetmeliği (2007)'de süneklik düzeyi yüksek kirişler için Madde 3.4.4'de sınırlama bölgesindeki etriye aralığı en küçük boyuna donatı çapına bağlı ($s_k \leq 8\phi_L$) olarak verilmiştir. Bu koşulun kompozit (ıslak-kaynaklı) bağlantıları bulunan prefabrik birleşim bölgelerindeki kirişler için "en küçük boyuna donatı çapının 4 katını ve 75 mm'yi aşmayacaktır" şeklinde düzenlenmesi uygun olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Prefabrik Birliği tarafından maddi ve teknik yönden desteklenmiştir. Ayrıca, DEÜ BAP Şube Müdürlüğü'nün 2012.KB.FEN.019 numaralı proje desteği ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmamıza verdikleri değerli katkı ve önerileri için İnş. Yük. Müh. Hakan Ataköy'e ve İnş. Müh. Günkut Barka'ya çok teşekkür ederiz. Çalışmaya verdikleri destekten dolayı Prof. Dr. Türkay Baran'a, Araş. Gör. Umut Yücel'e, İnş. Yük. Müh. Erol Ar'a ve İnş. Müh. Halis Koçbulut'a teşekkür ederiz.

kürlerimizi sunarız. Projede özveri ile çalışan öğrencilerimiz Özgür Girgin, Karip Ortakçı, Zehra Kurt, Filiz Vargün, Muhammed Demirkıran ve Mehmet Erdal'a teşekkür ederiz. Numunelerin hazırlanmasında verdikleri destekler için Dere Prefabrik A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

KAYNAKÇA

- American Concrete Institute (2005). ACI 318.05 *Building code requirements for structural concrete and commentary*, American Concrete Institute. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute (2005). ACI 374.1.05 *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*. Michigan, U.S.A.
- American Concrete Institute. (2013). ACI 550.2R-13 *Design guide for connections in precast jointed systems*. Michigan, U.S.A.
- Bayındırlık ve İskan Bakanlığı. (2007). *Deprem bölgelerinde yapılacak binalar hakkında yönetmelik*. 26454 Sayılı Resmi Gazete, Ankara.
- Ceresa, P., Petrini, L., Pinho, R. ve Sousa, R. (2009). A fibre flexure-shear model for seismic analysis of RC-framed structures. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 38, 565-586.
- Cheok, G. S., ve Stone, W. C. (1994). Performance of 1/3 scale model precast concrete beam column connection subjected to cyclic inelastic loads. Report No. 4. Report No. NISTIR 5436, Building and Fire Research Laboratory, NIST, Gaithersburg, MD, 59.
- Ertuş, O. (2005). *Ductile beam-column connections in precast concrete moment resisting frames*. Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- Ertuş, O., Özden, Ş. ve Özturan, T. (2006). *Prefabrik yapılarda moment aktarabilen sünek kolon - kiriş birleşimleri*, Araştırma Raporu. Türkiye Prefabrik Birliği.
- Girgin, S. C. (2014). *Moment aktaran prefabrik betonarme kompozit iç kolon-kiriş bağlantılarının iyileştirilmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K., ve Taylor, A. W. (1997). Stress - strain model for confined reinforced concrete in bridge piers, *Journal of Structural Engineering*, 123(5), 624-633.

Karadoğan, F., Yüksel ve E., ve Bal, İ. E. (2012). SAFECAST Araştırma Projesinin bir parçası olarak iki tip prefabrik dış kolon - kiriş birleşim bölgesi. *Beton Prefabrikasyon*, 102,7-61.

McKenna, F., Fenves, G. L., ve Scott, M. H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation*, Berkeley, CA., University of California. <<http://opensees.berkeley.edu>>.

Monti, G., ve Nuti, C. (1992). Nonlinear behaviour of reinforcing bars including buckling. *Journal of Structural Engineering*, 118 (12), 3268-3284.

Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. ve Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures* (1st ed.). Italy: IUSS Press.

Priestley, M.J.N. (2000). Performance based seismic design. *Proc. 12 World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zeland, paper No 2831.

Ranzo, G., ve Petrangeli M. (1998). A fibre finite beam element with section shear modelling for seismic analysis of RC structures. *Journal of Earthquake Engineering* 2, 443-473.

Restrepo, J. I. (2006). Lectures notes to the course "Seismic design of reinforced concrete buildings", ROSE School, Pavia, Italy.

Rodriguez, M. E., ve Rodriguez, A. (2006). Welding of rebars in reinforced concrete structures in seismic zones of Mexico must be avoided, *Revista de Ingenieria Sismica, Sociedad Mexicana de Ingenieria Sismica*, 75, 69-95

Senel, S., ve Palanci, M. (2013). Structural aspects and seismic performance of 1-story precast buildings in Turkey. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27 (4),437-449.

TS 708 (2010). *Çelik- betonarme için donatı çeliği*.