

# Üstte Islak-Altta Kaynaklı Bağlantıların Kafes Kiriş Analojisi İle Modellenmesi

## NUMERICAL MODELING OF EMULATIVE-WELDED BEAM-COLUMN CONNECTIONS WITH NONLINEAR TRUSS ANALOGY

### ABSTRACT

*Emulative-welded beam-column connections have been applied extensively in precast concrete industry in Turkey for decades. Beam bottom longitudinal rebars are welded to beam plate while top longitudinal rebars are placed at the formed gap in the joint panel in this type of connections. Experimental studies revealed that unbonding of welded longitudinal reinforcing bars in a sleeve over a length of precast beam could reduce the strain demands. This study presents a numerical model including nonlinear cyclic truss model for emulative-welded beam-column connections. Nonlinear steel and concrete truss elements are used to represent steel reinforcement and concrete areas in the vertical, horizontal and diagonal directions. Nonlinear beam-column elements are used to model beam and columns. Lateral load-drift ratio relations for the measured and computed cyclic responses of a precast connection are compared. Initial stiffness, energy dissipation and deformations are evaluated for numerical model.*

### ÖZET

Prefabrik yapılarda üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantıları yaygın olarak uygulanmaktadır. Bağlantılarda kiriş alt boyuna donatıları kiriş alt plakasına kaynaklanmakta; kiriş üst

boyuna donatılarının kolon içinde birleşim panelinde oluşturulan boşluktan sürekliliği sağlanmaktadır. Aderans bozulması yaklaşımı ile kaynaklı kiriş alt boyuna donatılarında birim deformasyon taleplerinin azaltılabileceği gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda belirlenmiştir. Bu çalışmada üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantıları için doğrusal olmayan kafes kiriş analojisini esas alan sayısal model kurulmuştur. Kafes kiriş modelinde yatay, düşey ve diyagonal doğrultulardaki donatı ve beton için doğrusal olmayan kafes çubuklar kullanılmıştır. Birleşim bölgesi dışındaki kolon ve kirişlerde ise lif esaslı kolon- kiriş elemanları tanımlanmıştır. Deneysel çalışma ile sayısal modelde elde edilen tepe yükü- ötelenme oranı ilişkileri karşılaştırılmıştır. Sayısal modelde hesaplanan başlangıç rijitliği, enerji tüketimi ve deformasyonlar değerlendirilmiştir.

### 1. GİRİŞ

Kolon-kiriş birleşim bölgelerinin, prefabrik yapıların sismik performansını belirleyen en önemli etmen olduğu önceki çalışmalarda ve depremler sonrası saha gözlem raporlarında vurgulanmıştır. Prefabrik betonarme yapılarda bağlantıların geliştirilmesi ve monolitik sistem davranışına eşdeğerliğini belirlemek üzere yapılan araştırmalar güncelliğini korumaktadır.

Prefabrik yapı endüstrisinde yaygın bir uygulama alanı bulan üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantılarının çevrimsel davranışlarının belirlenmesi ve iyileştirilmesi için deneysel çalışmalar



**Dr. Müh. Sadık Can GİRGIN**

*Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. 2008 yılında DEÜ İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında "Yapısal olmayan (ikincil) sistemlerin dinamik analizi" yüksek lisans tez çalışmasını tamamladı. 2012 yılında ABD'de California Üniversitesi-Berkeley'de 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. Doktora sonrası çalışmalarını TÜBİTAK bursu ile ABD'de Virginia Politeknik ve Eyalet Üniversitesi'nde 2016 yılında tamamladı. 2007 yılından bu yana DEÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.*

gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarda kiriş alt boyuna donatısı-kiriş alt plakasına yakın bölgede birim deformasyonların artış gösterdiği vurgulanmıştır [1,2]. Üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantılarında; kiriş alt plakasına kaynaklı boyuna donatıda aderans bozulması yaklaşımı uygulanarak, birim



**Prof. Dr. Serap KAHRAMAN**

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

*Mukavemet, ileri yapı statikliği, 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.*

deformasyonların azaltılması ve donatı burkulması önenebilmiştir [2].

Yapısal sistemlerin değerlendirilmesinde uygulanacak analitik yöntemlerin yapıda gelişebilecek hasar modları ile rijitlik, enerji tüketimi ve dayanım karakteristiklerini yansıtabilmesi gereklidir [3]. Aderans bozulması yaklaşımı uygulanan betonarme kesitlerde, Euler-Bernoulli hipotezi ve uygunluk koşulları geçerli olmayıp, buna uygun analitik yöntemler seçilmelidir [4]. Betonarme yapıların sayısal benzeştirilmesinde uygulanan modelleme yaklaşımları; yığılı plastisite, yayılı plastisite, makro modeller ve kafes sistem modelleri olmak üzere dört ana başlıkta toplanabilir.

Yığılı plastisite modelleri kolon ve kiriş eleman uçlarında eğilme ve kesme yaylarının belirli bir çevrimsel kurala uygun tanımlanması ile oluşturulmaktadır. Pampanin v.d. (2001) çalışmasında, aderanssız boyuna donatı bulunan ard-germeli kolon-kiriş bağlantılarında kesit dönmesi esaslı ve taraflı eksen derinliğine bağlı iteratif bir analitik yöntem önermiştir [5].

Yayıllı plastisite yaklaşımı yalnızca eğilme etkilerini dikkate almakta ve betonarme kesitler tek eksenli beton ya da donatı çeliği malzeme modelleri tanımlanan liflere ayrılmaktadır [6]. Jeong v.d. (2008), ard-germeli köprü kolonları için lif-esaslı analitik model önermiştir ve aderans bozulma boyu içerisinde boyuna donatılardaki birim deformasyonların sabit olduğunu varsaymıştır [7]. Trono v.d. (2013), ard-germeli kolon testlerinin sayısal model çalışmalarında, aderans bozulma boyu bulunan donatıları kafes çubuklarla, lif esaslı kesite rijit bağlı olarak tanımlamıştır [8].

Kafes kiriş analogisi betonarme elemanlarda kesme etkilerinin modellenmesi amacı ile geliştirilmiştir. To v.d. (2009) monolitik iç kolon-kiriş birleşimlerinin kafes sistem modelleri ile çevrimsel yükleme etkileri altında analizlerini gerçekleştirmiştir [9]. Betonarme perdelerin çevrimsel davranışının sayısal benzeştirilmesinde Lu ve Panagiotou (2014) tarafından sonlu eleman boyut etkilerini dikkate alan kafes sistem modeli geliştirilmiştir [10]. Moharrami v.d. (2015) kesme etkilerine karşı yetersiz kolonlarda agrega kenetlenmesinin kesmeye katkısını dikkate alan kafes sistem modeli önermiştir [11]. Bowers (2014) çalışmasında, sünekliliği yetersiz betonarme çerçevelerde kolon-kiriş birleşim bölgelerinde kafes sistem modelini; birleşim bölgesi dışındaki kolon

ve kiriş elemanlarda ise yayılı plastisite yaklaşımını uygulamıştır [12].

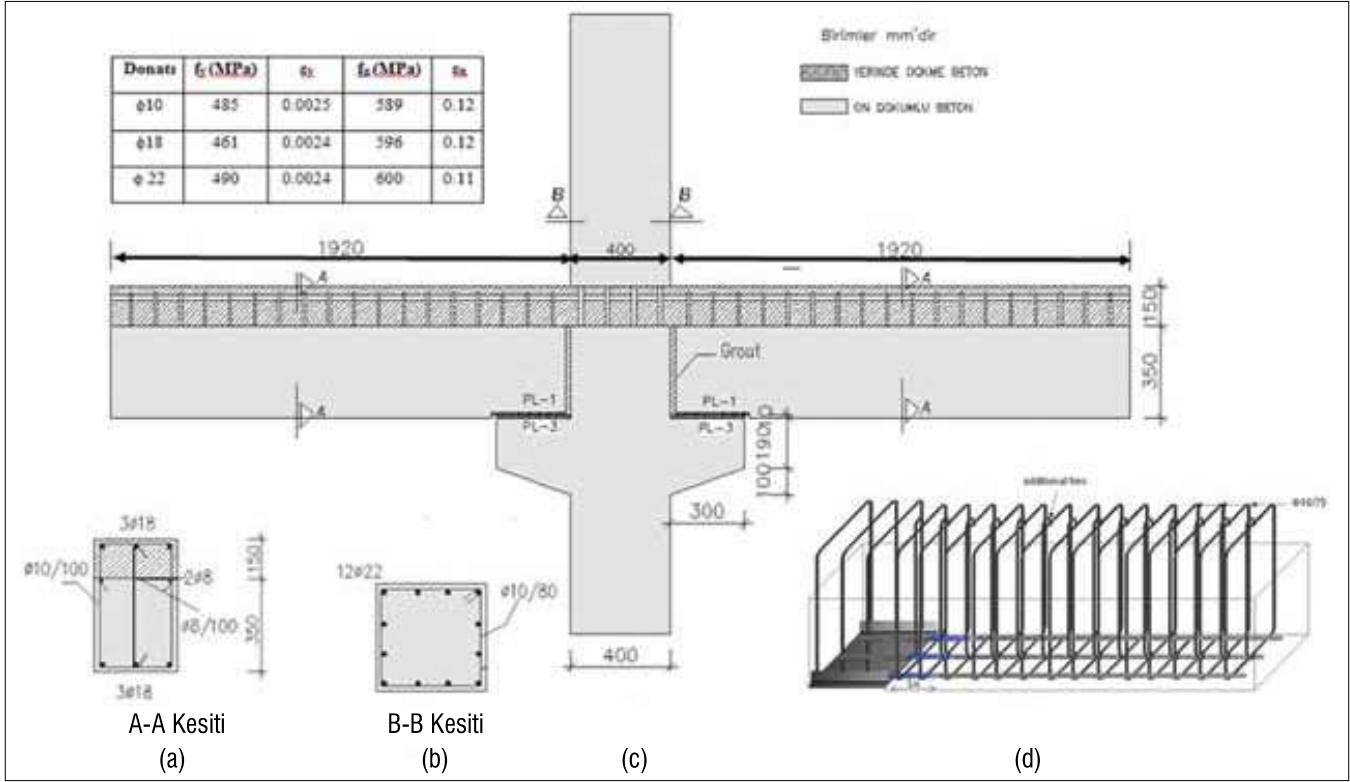
Çalışma kapsamında, üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantı testlerinin sayısal benzeşimi için doğrusal olmayan kafes sistem yaklaşımı uygulanarak sayısal model çalışmaları sunulmuştur. Deneysel çalışma ile sayısal model, yatay yük- ötelenme oranı ilişkileri ve enerji tüketimlerine göre karşılaştırılmıştır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMA

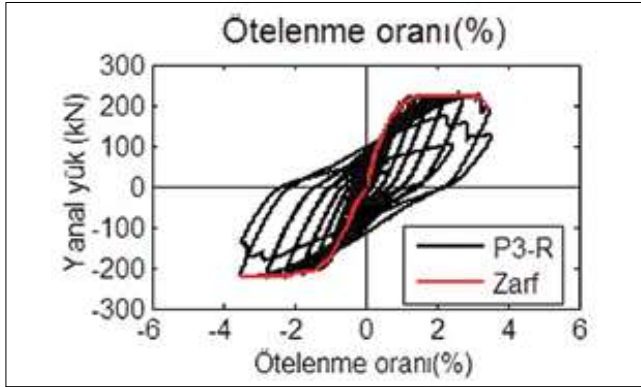
Üstte ıslak-altta kaynaklı kolon-kiriş bağlantılarının çevrimsel davranışının iyileştirilmesi kapsamında yapılan deneysel çalışmada incelenen bağlantı numunesi detayları ve test sonuçları özetlenmiştir [13]. P3-R kolon-kiriş bağlantı numunesi boyutları ve donatı detayları Şekil 1'de verilmektedir.

Kiriş alt boyuna donatısının plaka ile kaynaklandığı bölgede aderans bozulması çelik kılıf kullanılarak uygulanmıştır (Şekil 1d).

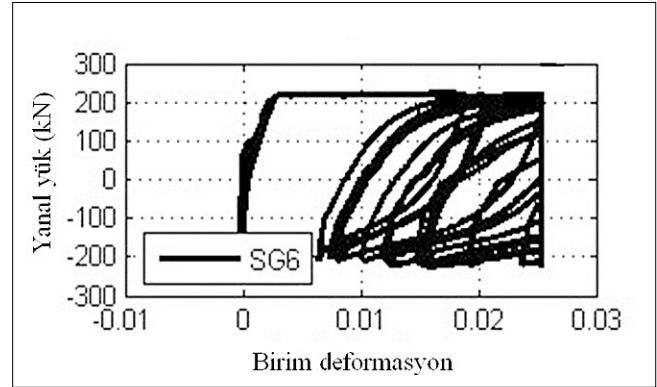
Deneyler numunelerin elastik ötesi davranışlarının geniş bir bölgede ortaya konabilmesi için % 5 görelî kat ötelenmesine kadar sürdürülmüştür. P3-R numunesinde ilk eğilme kesme çatlakları %0.35 ve %1 ötelenme oranlarında gözlenmiştir. Birleşimdeki ilk diyagonal çatlaklar %1.4 ötelenme oranında gelişmiştir. İtme ve çekme yönlerinde maksimum dayanıma %2.2 ötelenme oranında ulaşılmış, %3.5 ötelenme oranının ikinci çevrimine kadar dayanımda azalma gözlenmemiştir. P3-R numunesinde donatı burkulması engellenebilmiştir (Şekil 2a). Kiriş alt plakasına kaynaklı boyuna donatılarda gelişen birim deformasyonların yatay yüke bağlı değişimi Şekil 2b'de verilmiştir. Aderans bozulması ile boyuna donatılarda birim deformasyon talepleri azaltılmıştır.



Şekil 1. P3-R kolon-kiriş bağlantısı (a) Kiriş ve (b) Kolon en kesitleri, (c) Birleşim bölgesi, (d) Aderans bozulması uygulanması [13].



(a)



(b)

Şekil 2. (a) P3-R numunesi yatay yük-ötelenme oranı ilişkisi,

(b) Kiriş alt boyuna donatısı birim deformasyonlarının değişimi

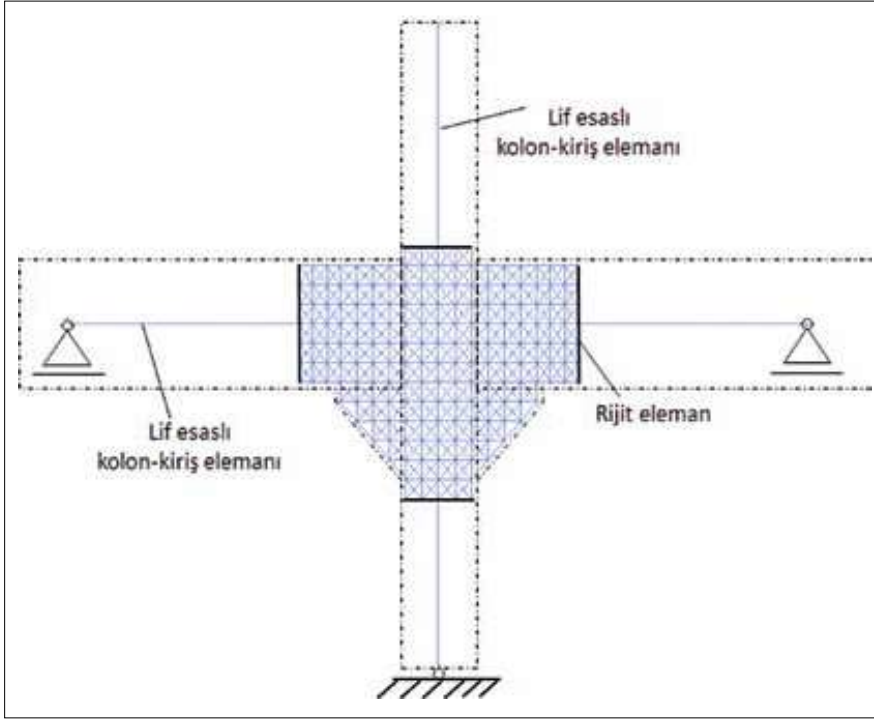
### 3. SAYISAL MODEL

Sayısal model çalışmaları, yapı ve deprem mühendisliğinde kullanılan OpenSees sonlu elemanlar yazılımı ile gerçekleştirilmiştir [14]. Üstte ıslak altta kaynaklı prefabrik kolon-kiriş bağlantıları için oluşturulan sayısal modelde, hem doğrusal olmayan kafes kiriş modelleme yaklaşımı, hem de yayılı plastisite yaklaşımı esas alınmıştır. Ka-

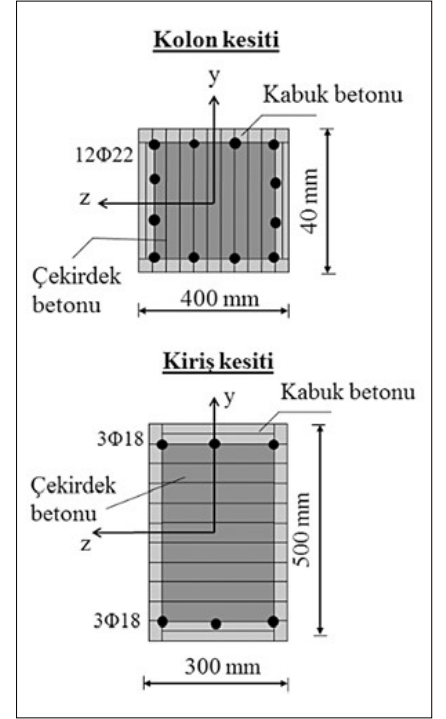
fes kiriş modelleme yaklaşımı kolonda birleşimde, aderans bozulmasının bulunduğu kiriş uzunluğu içinde ve kısa konsolda uygulanmıştır. Birleşim bölgesi dışında bulunan kolon ve kiriş elemanlar ise doğrusal olmayan lif esaslı kolon-kiriş elemanı ile tanımlanmıştır. Kolon ve kirişler, rijit elemanlarla kafes sisteme bağlantısı sağlanmıştır (Şekil 3a).

Yayıllı plastisite yaklaşımında kuvvet esaslı formülasyonda eleman boyunca her kesitte kuvvet ara değer fonksiyonu için denge sağlandığından yer-değiştirme esaslı formülasyona göre daha avantajlıdır [15]. Kolon ve kirişler bir kuvvet esaslı doğrusal olmayan eleman ve iki integrasyon noktası ile tanımlanmıştır (Şekil 3b).

Kafes kiriş modelinde, doğrusal ol-



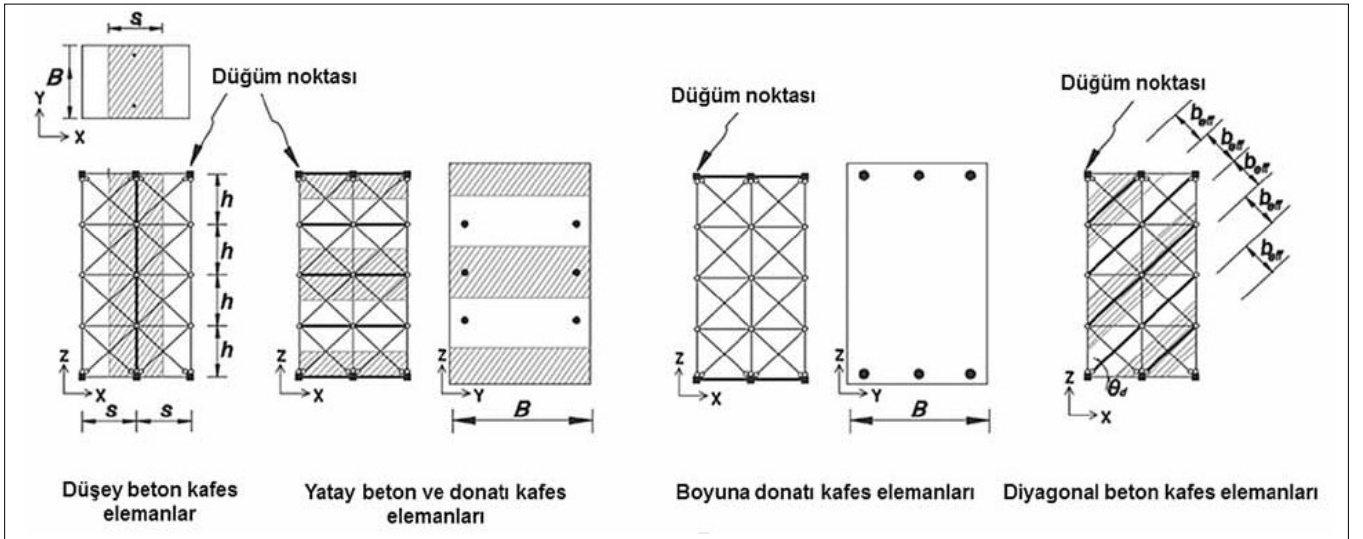
(a)



(b)

Şekil 3. (a) Prefabrik kolon-kiriş bağlantıları için kurulan sayısal model,

(b) Lif esaslı kolon ve kiriş eleman kesitleri



Şekil 4. Kafes kiriş modelindeki beton ve donatı çeliği için etkili alanlar

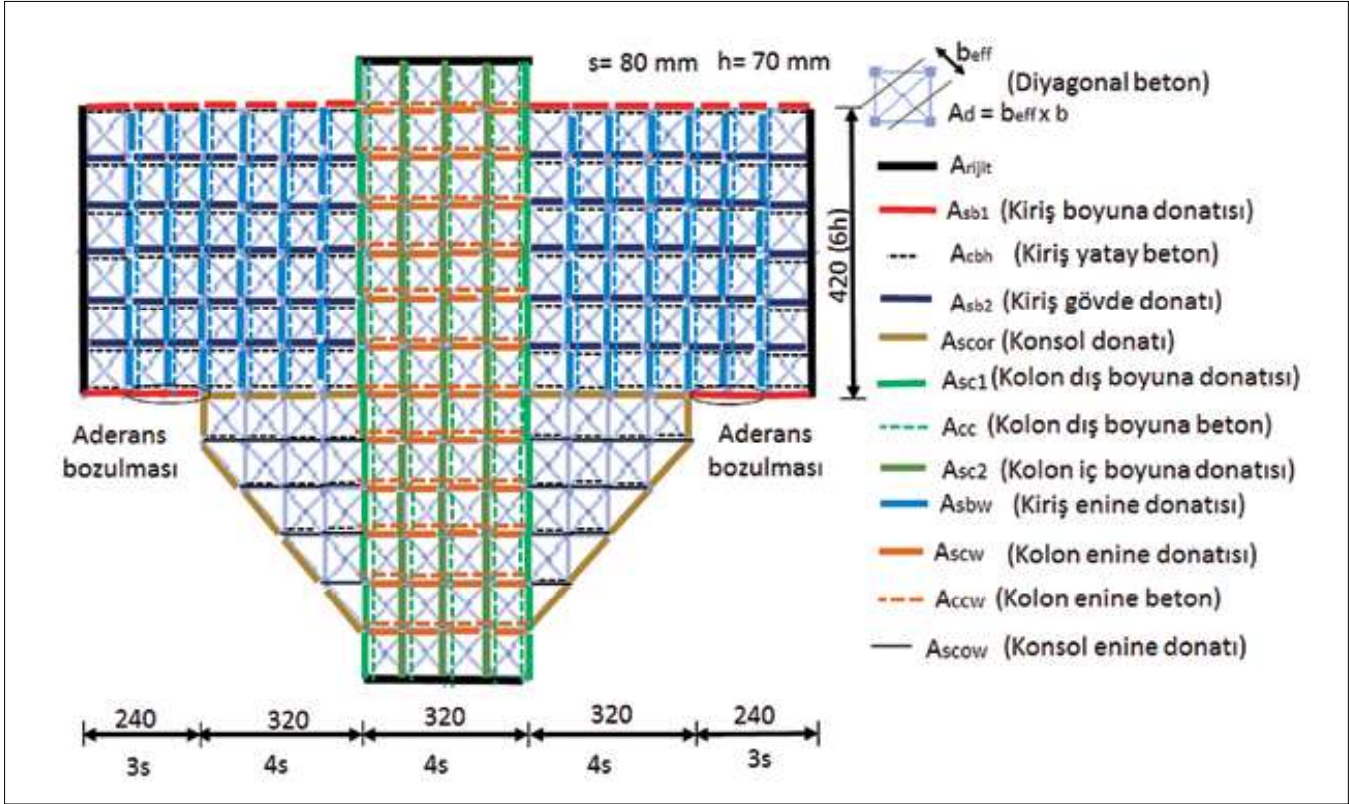
mayan kafes elemanlar düşey ve yatay doğrultulardaki donatı ve beton ile diyagonal doğrultudaki betonu temsil etmektedir. Diyagonal doğrultudaki beton kafes elemanlarda basınç doğrultusunda çift eksenli etkileri dikkate alan beton malzeme modeli kullanılır.

Yatay ve düşeydeki beton kafes elemanlarda ise beton malzeme modeli çekme güçlenmesini dikkate almaktadır [10].

Şekil 4'de düşey, yatay ve diyagonal kafes sistem elemanlarının etkili alanları bir kiriş en kesiti için gösterilmiştir.

Buna göre  $s$  düşey elemanlar arası uzunluğu,  $h$  yatay elemanlar arası uzunluğu göstermektedir.

Prefabrik kolon-kiriş bağlantısının (Şekil 1) birleşim bölgesi içinde kafes kiriş modeli, kolon ve kirişlerde boyuna ve enine donatıların yerleşimine göre



Şekil 5. Kafes kiriş modeli ve çubuk elemanları

Tablo 1. Kafes kiriş modelinde çubuk eleman alanları (mm<sup>2</sup>)

$A_{sb1}$	$A_{cbh}$	$A_{sb2}$	$A_{scov}$	$A_{sc1}$	$A_{cc}$	$A_{sc2}$	$A_{sbw}$	$A_{cbw}$	$A_{scw}$	$A_{ccw}$	$A_{scow}$
763.4	21000	39.3	1270	1520.5	32000	760.3	235.6	24000	157.1	28000	226.2

belirlenmiştir. Kafes sistemi oluşturan çubuk elemanlar Şekil 5'de verilmektedir ve diyagonal elemanların yatayla yaptığı açı ( $\theta_d$ ) 41°'dir. Kiriş gövdesindeki yatay donatılar gövde donatı alanlarının çubuk sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. Aderans bozulması uygulanan kiriş alt boyuna donatıları uzunluk boyunca bir adet kafes çubuk ile tanımlanmıştır. Kafes sistem elemanlarının alanları Tablo 1'de verilmektedir.

#### 4. MALZEME MODELLERİ

Kolon-kiriş bağlantısı sayısal modellerinde kullanılan ve Lu ve Panagiotou (2014) [10] tarafından geliştirilen beton gerilme-birim deformasyon

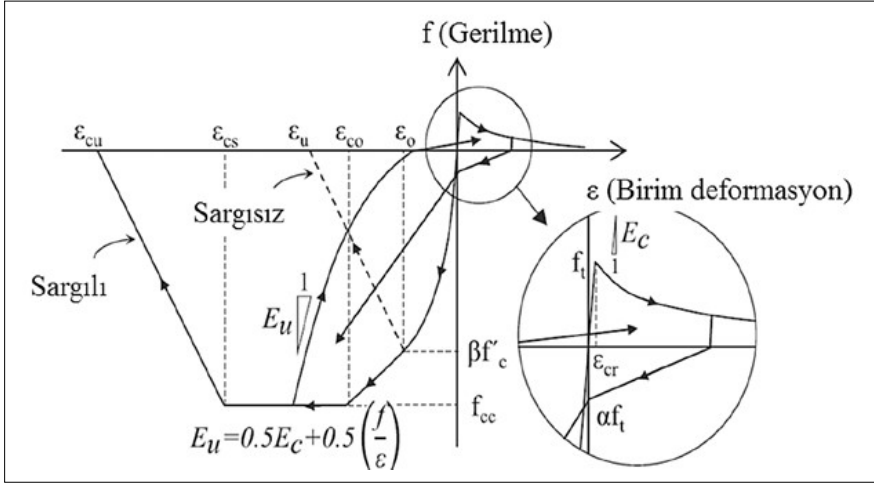
ilişkileri Şekil 6a'da verilmektedir. Sargısız beton basınç dayanımı ( $f'_c = 42$  MPa),  $\epsilon_o = \% 0.2$  birim deformasyonuna karşılık gelmektedir. Beton başlangıç elastisite modülü,  $E_c = 5000 \sqrt{f'_c}$  (MPa) ile hesaplanmıştır. Basınç bölgesinde ulaşılan basınç dayanımı sonrasında azalan kısımda  $\epsilon_u$  değeri Lu ve Panagiotou (2014) tarafından verilen yöntemle göre belirlenmiştir [10]. Sargılı betonun basınç dayanımı ve en büyük birim şekildeğiştirilmesi Mander beton modeline göre hesaplanmıştır [17].

Yatay ve düşeydeki beton kafes elemanlarının çekme dayanımı,  $f'_t = 0.33 \sqrt{f'_c}$  (MPa) olarak alınmıştır. Çekme dayanımına ulaştıktan sonraki azalma,

Stevens (1991) tarafından verilen çekme güçlenmesi denkleminde göre belirlenmiştir [16]. Diyagonal beton kafes elemanlarda ise çekme dayanımı dik-kate alınmıştır.

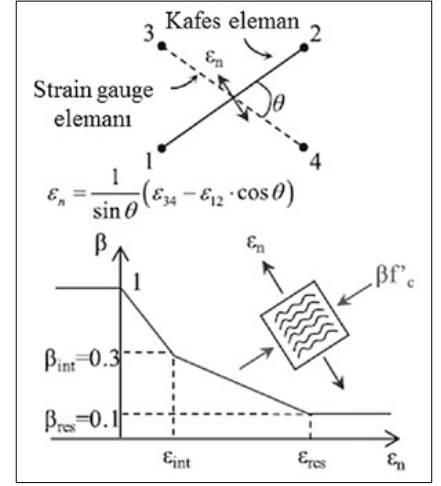
Diyagonal beton kafes elemanlarda beton basıncının enine doğrultudaki çekme birim deformasyonlarına bağlı değişimi Vecchio ve Collins (1986) çalışmasındaki deneysel gözlemlere göre dikkate alınmıştır [18]. Analizin her adımında diyagonal kafes elemanlardaki basınç gerilmeleri enine doğrultudaki çekmeye bağlı olarak azaltma katsayısı ile çarpılmıştır (Şekil 6b).

Kolon ve kirişteki enine ve boyuna donatılarda Kunnath v.d. (2009) [19]



(a)

Şekil 6. (a) Beton malzeme modelleri için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri,



(b)

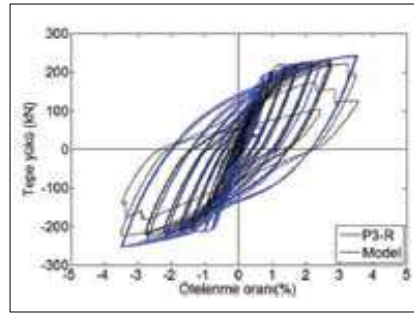
(b) Enine birim deformasyon ve  $\beta$  katsayısı değişiminin hesaplanması [11]

tarafından önerilen donatı malzeme modeli tanımlanmıştır. OpenSees'de beton malzeme modeli Concretewbeta donatı malzeme modeli ise ReinforcingSteel olarak yer almaktadır.

## 5. ANALİZ SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

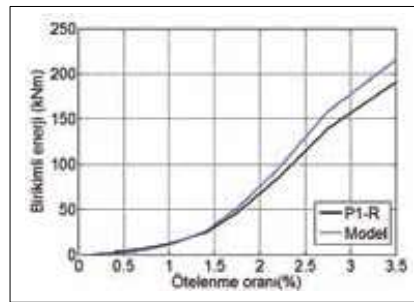
P3-R kolon-kiriş bağlantısı için deneysel çalışmada elde edilen ve sayısal modelde hesaplanan tepe yükü- yerdeğiştirme grafikleri Şekil 8'de verilmiştir. Sayısal model %3.5 ötelenme oranının 2. çevrimine kadar deneysel çalışmada elde edilen dayanıma yakın değerdedir. Sayısal modelde başlangıç rijitliği 20.1 kN/mm, deneysel çalışmadaki başlangıç rijitliği ise 13.4 kN/mm olarak hesaplanmıştır.

Yapısal elemanlarda tüketilen birikimli enerji, her bir ötelenme oranına karşılık gelen çevrimsel döngü içerisinde kalan alanın toplamına eşittir. Deneysel çalışmada elde edilen birikimli tüketilen enerji ile sayısal modelde hesaplanan değerler Şekil 9'da karşılaştırılmıştır. Buna göre %2 ötelenme oranından sonra sayısal modeldeki enerji tüketimi, deneysel çalışmada elde edilene göre %15 oranında artış göstermiştir.



Şekil 8. P3-R bağlantısı için deneysel çalışma ile sayısal modelin tepe yükü- yerdeğiştirme grafikleri

Aderans bozulması yaklaşımı uygulanan kiriş alt boyuna donatıları için hesaplanan birim deformasyonlar %2.4 değerine ulaşmıştır. Tepe yükü- kiriş boyuna donatısı birim deformasyon-

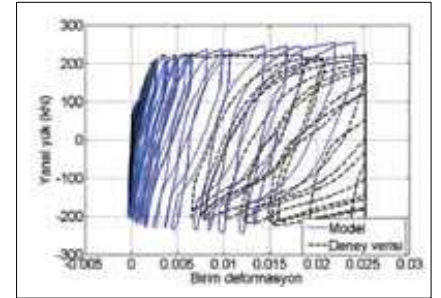


Şekil 9. Tüketilen birikimli enerjinin sayısal model ve deneysel çalışma ile kıyaslanması

larının değişimi Şekil 10'da verilmektedir.

## 6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında, aderans bozulması yaklaşımı uygulanan üstte ıslak-altta kaynaklı moment aktarabilen



Şekil 10. Kiriş boyuna donatısı birim deformasyonlarının tepe yüküne bağlı değişimi

kolon-kiriş bağlantıları için kafes kiriş analojisi ile sayısal model çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Sayısal modelde, kiriş üst boyuna donatılarının birleşim içerisindeki aderans sınırlaması (bond slip) etkileri göz önüne alınmamıştır. Bu sebeple hesaplanan başlangıç rijitliği, deneysel çalışmada elde edilen başlangıç rijitliğinin 1.5 katı olarak hesaplanmıştır. Sayısal model ile deneyde elde edilen tepe yükü-ötelenme

oranı, birikimli enerji tüketimleri ve donatı birim deformasyonları kıyaslanmıştır. Sayısal model, üstte ıslak-altta kaynaklı prefabrik kolon-kiriş bağlantılarının çevrimsel davranışını temsil edebilmektedir.

### TEŞEKKÜR

Deneysel çalışma Türkiye Prefabrik Birliği tarafından maddi ve teknik yönden desteklenmiştir. Çalışmamıza verdikleri değerli katkı ve önerileri için Prof. Dr. Şevket ÖZDEN'e, İnş. Yük. Müh. Hakan ATAKÖY'e ve İnş. Müh. Günkut BARKA'ya çok teşekkür ederiz. Deneysel çalışmaya verdikleri desteklerinden dolayı Doç. Dr. İbrahim SERKAN MISIR'a, Prof. Dr. Türkay BARAN'a ve Doç. Dr. Özgür ÖZÇELİK'e teşekkürlerimizi sunarız.

### KAYNAKLAR

- 1 Yüksel, E., Karadoğan, H. F., Bal, İ. E., İlki, A., Bal, A., and Inci, P. (2015). Seismic behavior of two exterior beam-column connections made of normal-strength concrete developed for precast construction. *Engineering Structures*, 99 (157-172).
- 2 Girgin, S. C. (2014). Moment aktaran prefabrik betonarme kompozit iç kolon-kiriş bağlantılarının iyileştirilmesi. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- 3 Ibarra, L. F., Medina, R. A., and Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1489-1511.
- 4 Jnaid, F. and Aboutaha, R.S. (2014). Residual flexural strength of reinforced concrete beams with unbonded reinforcement. *ACI Structural Journal*, 111(6), 1419-1430.
- 5 Pampanin, S., Priestley, M. J. and Sritharan, S. (2001). Analytical modeling of the seismic behaviour of precast concrete frames designed with ductile connections. *Journal of Earthquake Engineering*, 5 (3), 239-367, 2001.
- 6 Priestley, M.J.N., Calvi, G.M. and Kowalsky, M.J. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures* (1st ed.). Italy: IUSS Press.
- 7 Jeong, H., Sakai, J., and Mahin, S. (2008). Shaking table tests and numerical investigation of self-centering reinforced concrete bridge columns. PEER Report.
- 8 Trono, W., Jen, G., Ostertag, C.P. and Panagiotou, M. (2013). Tested and modeled seismic response of a rocking, post-tensioned HyFRC bridge column, Seventh National Seismic Conference on Bridges and Highways, Oakland, USA.
- 9 To, N., Sritharan, S., and Ingham, J. (2009). Strut-and-tie nonlinear cyclic analysis of concrete frames. *J. Struct. Eng.*, 135:10(1259), 1259-1268.
- 10 Lu, Y. and Panagiotou, M. (2014). Three-dimensional cyclic beam-truss model for non-planar reinforced concrete walls, *Journal of Structural Engineering*, 140(3).
- 11 Moharrami M., Koutromanos I., Panagiotou M., Girgin S.C. (2015). Analysis of shear-dominated RC columns using the nonlinear truss analogy, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 44(5), 677-694.
- 12 Bowers, J.T. (2014). Nonlinear cyclic truss model for beam-column joints of non-ductile RC frames. M.Sc. thesis, Virginia Polytechnic and State University.
- 13 Girgin, S.C., Kahraman, S., Mısır, İ.S. (2015). Prefabrik kompozit kolon-kiriş bağlantılarının sismik performansının deneysel araştırılması, 3. Türkiye Deprem ve Sismoloji Konferansı bildirileri, İzmir.
- 14 McKenna, F., Fenves, G. L., Scott, M. H., and Jeremic, B. (2015). Open system for earthquake engineering simulation. <http://opensees.berkeley.edu>.
- 15 Kostic, S. M., and Filippou, F.C. (2012). Section discretization of fiber beam-column elements for cyclic inelastic response. *Journal of Structural Engineering*; 138 (5): 592-601.
- 16 Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., Collins, M. P., and Will, T. G. (1991). Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis, *ACI Structural Journal*, 99 (10), 2109-2122.
- 17 Mander, J.B., Priestley, M.J.N., ve Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete, *Journal of Structural Division (ASCE)*, 114 (8), 1804-1826.
- 18 Vecchio, F. G. and Collins, M.P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *Journal of the American Concrete Institute*, 83(2), 219-231.
- 19 Kunnath, S., Heo, Y., and Mohle, J. (2009). Nonlinear Uniaxial Material Model for Reinforcing Steel Bars. *J. Struct. Eng.*, 135:4(335), 335-343.