İMO Teknik Dergi, 2015 7265-7278, Yazı 443

Betonarme Kesitlerin Eğilme Rijitliği

Nahit KUMBASAR[1]

ÖZ

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik Bölüm 7 de tanımlanan çatlamış kesit eğilme rijitliği ve performansa dayalı çözüm için yapılacak itme analizinin başlangıcında kullanılacak rijitlik değeri, betonarme kesitlerin göçme öncesi rijitliğinin olabildiğince gerçeğe yakın belirlenebilmesi konusuna önem kazandırmıştır. Bu çalışmada betonarme kesitlerin değişik gerilme evrelerindeki davranışları gözönüne alınarak, kesit rijitliğini etkileyen özellikler yeniden incelenmiş, bulunan rijitliklerle elde edilen yerdeğiştirmelerin deneysel verilerle karşılaştırılması yapılmış, elde edilen sonuçlara dayanan bazı önerilerde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Kesit rijitliği, betonarme kesit, itme analizi, deprem yönetmeliği, doğrusal olmayan çözümleme.

ABSTRACT

Bending stiffness of reinforced concrete sections.

Bending stiffness of cracked reinforced concrete sections defined by Turkish Earthquake Code Section 7 and bending stiffness to be used at the beginnig of push-over analysis, increased the importance of a realistic determination of bending stiffness before collapse. In this study for considering behaviour of reinforced concrete sections under various stress phases, the factors effecting rigidity are revisited. Deflections obtained by using these bending rigidities compared with the published results obtained in various laboratory tests. Some proposals are made depending on the resuls of this work.

Keywords: Stiffness, concrete section, push-over analysis, earthquake code, nonlinear analysis.

1. GİRİŞ

Betonarme kesitlerin eğilme rijitliği, büyük ölçüde, çatlamamış bölümün kesitin tümüne oranla büyüklüğüne, başka bir deyişle boyutsuz tarafsız eksen değerine bağlıdır. Donatının eğilme rijitliğine etkisi, kendi eylemsizlik momenti yanında, daha çok tarafsız eksen

Not: Bu yazı
- Yayın Kurulu'na 11.12.2014 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2015 gününe kadar tartışmaya açıktır.

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Bölümü, (Emekli), İstanbul - kumbasarn@itu.edu.tr

mesafesine etkisi ile belirir. Bu açıdan, donatı oranının eğilme rijitliğine etkisi araştırılmaya değer görünmektedir.

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Mevcut Binaların Değerlendirilmesi ve Güçlendirilmesi ile ilgili 7.ci bölümde, kesit eğilme rijitlikleri için aşağıdaki sınırları vermektedir:

(a) *Kirişlerde:* $(EI)_e = 0.40\ (EI)_o$

(b) *Kolon ve perdelerde,* $N_D / (A_c f_{cm}) \leq 0.10$ *olması durumunda:* $(EI)_e = 0.40\ (EI)_o$

$N_D / (A_c f_{cm}) \geq 0.40$ *olması durumunda:.* $(EI)_e = 0.80\ (EI)_o$

ASCE [1] mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesi ile ilgili olarak eksenel kuvvet oranları için yukarıda verilen *0.40* ve *0.80* değerlerini *0.30* ve *0.70* olarak verir. Yapılması düşünülen revizyonda, deprem yönetmeliğimiz için de ayni değerlerin önerildiği öğrenilmiştir.

Doğrusal elastik olmayan hesap yönteminde çatlamış kesit eğilme rijitliği, kesitin akma moment dayanımının akma eğriliği değerine bölünmesiyle elde edilir. Burada, deprem yönetmeliğimizde doğrusal hesap için verilen ve donatı etkisini göz ardı eden bağıntılarda eksenel kuvvetin etki alanı ve düzeyi ile donatı oranının etkisi irdelenecektir.

Betonarme kesitlerin etkin eğilme rijitliği ile ilgili yayınlardan [2] de Berry vd. nin köprü kolonları için önerdikleri eğilme rijitliği, elemen narinliğine, eksenel yük oranına ve donatı oranına bağlı olarak verilmiştir. [3] te Elwood vd., deneysel çalışmaların sonuçlarını değerlendirerek, FEMA da, eksenel yük oranının 0.30 dan küçük olması durumunda verilen 0.50 katsayısının 0.20 olarak kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. [4] te Tran vd. kolon başlangıç eğilme rijitliğini etkileyen faktörlerden, narinlik ve eksenel basıcının eğilme rijitliğini artırdığın, boyuna ve enine donatı oranı ile beton ve çelik dayanımının etkisinin ihmal edilecek düzeyde olduğunu ifade etmişlerdir. [5] te Canbay vd. enine donatının davranışı önemli ölçüde etkilediğini açıklamışlardır. [6] da Shanfigh vd. nin, hafif betonla üretilmiş kirişlerle, değişik donatı oranı ile yaptıkları deney sonuçlarını gösteren diyagramlarda, başlangıç rijitliğinin artan donatı oranı ile arttığı görülmektedir. [10] da Ashour yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde donatı oranı ve beton dayanımının kesit eğilme rijitliğine etkisini incelemiştir. Güner, Toronto Üniversitesinde yaptığı doktora çalışmasında[9], betonarme taşıyıcı sistemlerin, dönüşümlü yükler etkisindeki doğrusal olmayan davranışlarını modellemek amacı ile, hem eğilme hem kesme göçmesini kapsayan bir yöntem vermiştir. Bu amaçla sistem, elemen eksenleri doğrultusunda yeterli sayıda parçaya ayrıldığı gibi, kesit yüksekliği doğrultusunda da 20~40 kadar lif tanımlayarak bölümlenmektedir.

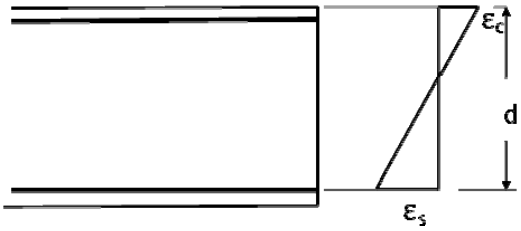
Betonarme kesitlerin davranışını içeren deneysel çalışmalarda betonun göçme sınırına kadar olan gerilme-şekil değiştirme ilişkisi parabole yakın bir eğri olarak verilir. Betonarme kesitlerin davranışını teorik olarak modelleme amacı ile yapılan çalışmalarda da bu ilişki genellikle bir parabol olarak alınmaktadır [7], [8], [9]. Betonun doğrusal olmayan bu davranışı, başlangıçtan göçme sınırına kadar olan kesit zoru-yerdeğiştirme ilişkisinin de doğrusal olmaması sonucunu verecektir. Doğrusal olmayan bu davranış basit kiriş deneyleri için olan ve Şekil 6 da verilen deney sonuçlarında da görülebilir, bununla birlikte doğrusal kabul edildiğinde de, bu doğrunun eğiminin bağlı olduğu etkenlerin yeterince gerçeğe yakın

olarak belirlenmesi gerekir. Bu çalışmada, kesit hesabında, göçme durumuna kadar olan davranış için yapılan kabullere uygun olarak elde edilen kesit dönmesinden yararlanarak, göçme sınırına kadar değişken olan bir rijitlik tanımlanmış ve ilgili yayınlarda deneysel olarak elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri ile karşılaştırılmıştır.

2. YÖNTEM

Şekil 1 den görüleceği gibi, betonarme bir kesitin dönmesi, betonun ve çeliğin şekil değiştirmeleri cinsinden

$$\frac{M}{EI} = \frac{\varepsilon_c - \varepsilon_s}{d} \tag{1}$$

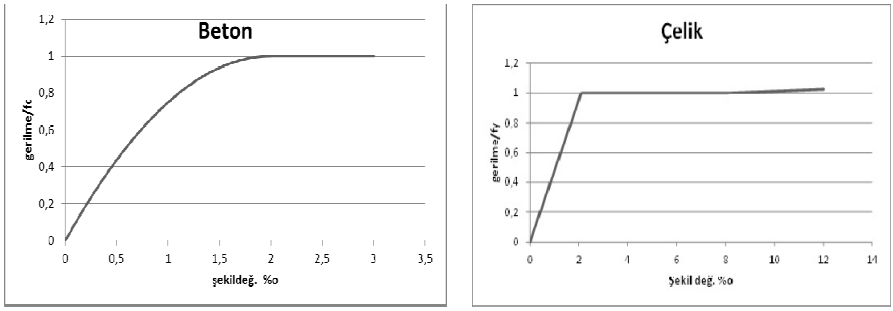


Şekil 1. Betonarme bir kesitte dönme ve birim uzamalar

olarak yazılabilir. Buradan, kesite etki eden eğilme momenti altında şekil değiştirmeler biliniyorsa eğilme rijitliğinin elde edilebileceği görülür. Bernoulli-Navier hipotezi geçerli varsayıldığı sürece bu bağıntı doğrusal olmayan gerilme durumları için de geçerlidir.

$$EI = \frac{M \times d}{\varepsilon_c - \varepsilon_s} \tag{2}$$

Öte yandan, taşıma gücü kesit hesaplarında beton için kabul edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı *Şekil 2* de görüldüğü gibidir. ε_c nin küçük değerleri için kabul edilen parabolün bitiş noktası beton türüne bağlı olmakla birlikte 0.002 yaygın olarak kullanılan sınırdır. Bu çalışmada kullanılan kesit hesabı yapan bilgisayar programlarında beton için *Şekil 2* deki parabol+yatay doğrudan oluşan bağıntı, çelik için Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelikte verilen elastoplastik malzemenin, akma ve pekleşme sınırlarına uygun bağıntı kullanılmaktadır. Pekleşme bölgesinde yönetmelikte tanımlanan parabolün başlangıç eğimine (~ 0.007) sahip bir doğru alınmıştır.



Şekil 2. Betonda ve çelikte gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi

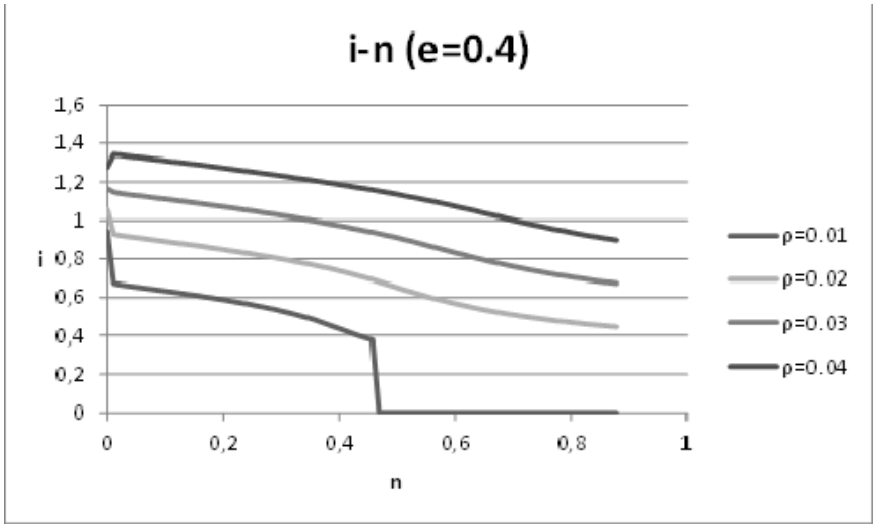
Dikdörtgen kesitler için düzenlenen bir bilgisayar programı, verilen (M,N) kesit zorları, kesit ve malzeme özelliklerini kullanıp, enkesit üzerinde yazılan iki denge denklemini ardışık yaklaşım yöntemi ile çözerek, ε_c ve ε_s şekil değiştirmelerini hesaplar.

Beton için alınan *Şekil 2* deki ilişki, çok küçük dışmerkezlik değerlerinde, kesitin tümüne yakın bölümünde sabit gerilme oluşması nedeni ile yakınsamayı önlediğinden, *e<0.10* dışmerkezlik oranı için sabit kalan bir değer kullanılmıştır. Böylece (2) bağıntısı kullanılarak, her aşamadaki etkin eğilme rijitliği hesaplanır.

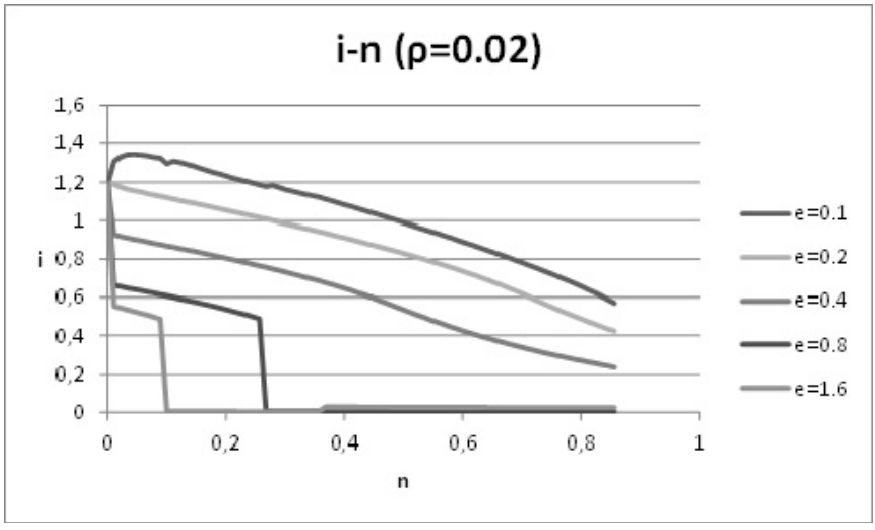
Sözü edilen bilgisayar programı ile, kesit eğilme rijitliğini etkileyen etkenler sayısal olarak incelenecek, daha sonra deneysel verilerle karşılaştırılacaktır. Bu amaçla *0.30m×0.50m* boyutlu kesitle elde edilen eşdeğer rijitliğin brüt kesit rijitliğine oranı, *i,* değişik durumlar için elde edilerek *Şekil 3~5* te verilmiştir. *Şekil 3~5* te hesaplamalar *C30* betonu için yapılmıştır.

Şekil 3 te, donatı oranı *0.01, 0.02, 0.03, 0.04* ve *e=0.4* dışmerkezlik oranı için $i = \dfrac{EI_e}{EI_0}$ boyutsuz kesit rijitliği değerinin *n* le değişimi elde edilerek çizilmiştir. Yatay eksen boyutsuz *n* değerlerini, düşey eksen boyutsuz *i* değerlerini göstermektedir. Eğrilerin artan *n* ile doğrusal olarak azalması, ileride açıklanacağı gibi, *e* nin küçük dışmerkezliğe yakın bir değer olmasından kaynaklanmaktadır. Bu diyagramlar, donatı oranı arttıkça kesit eğilme rijitliğinin, belirgin biçimde arttığını göstermektedir. Donatı oranı *0.01* için olan en alttaki eğride *n=0.45* ten sonra donatı akma sınırına ulaştığı için rijitlik sıfıra yakındır.

Şekil 4 te verilen *i-n* ilişkisi dışmerkezlik *e=0.1, 0.2, 0.4, 0.8* ve *1.6* olarak sabit tutulup eksenel yük artırılarak elde edilmiştir. Apsisler ekseninde boyutsuz *n*, ordinatlar ekseninde boyutsuz *i* büyüklükleri vardır. Bu şekilde de *0.8* ve *1.6* dışmerkezliklerine karşı gelen eğriler, donatının aktığı noktadan sonra sıfıra yakın değerler almaktadır. *e=1.6* eğrisinde n=0.35 ten sonra donatıda pekleşme etkisi göze çarpar. Burada da dışmerkezlik



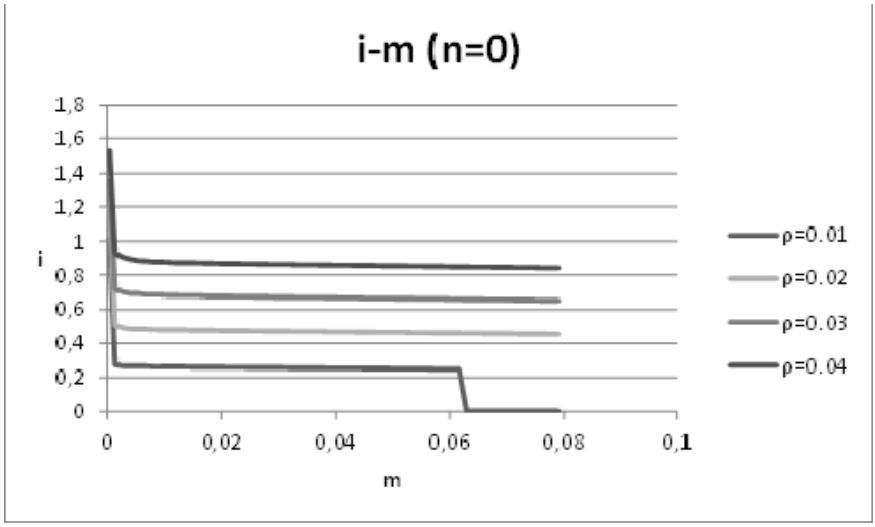
Şekil 3. Artan n değerleri için $i = \dfrac{EI_e}{EI_0}$ *değişimi*



Şekil 4. Artan n değerleri için $i = \dfrac{EI_e}{EI_0}$ *değişimi*

değerindeki değişimin rijitliği önemli ölçüde etkilediği görülmektedir. Benzer durum *Şekil 5* te basit eğilme ve değişik donatı oranları için elde edilmiştir. Yatay eksende boyutsuz *m*, düşey eksende boyutsuz *i* vardır. Farklı eğrileri belirten parametre donatı oranıdır. Eksenel

kuvvetin bulunmadığı bu durum için de çekme ve basınç donatıları eşit alınmıştır. Toplam donatı oranı *0.01~0.04* arasında değişirken boyutsuz *i* değeri önemli ölçüde etkilenmektedir. Başlangıçta çatlamamış kesite karşı gelen büyük değerlerden sonra, boyutsuz eğilme rijitliği *i* artan momentle, hemen hemen değişmemektedir.



Şekil 5. Artan m değerleri için $i = \dfrac{EI_e}{EI_0}$ *değişimi*

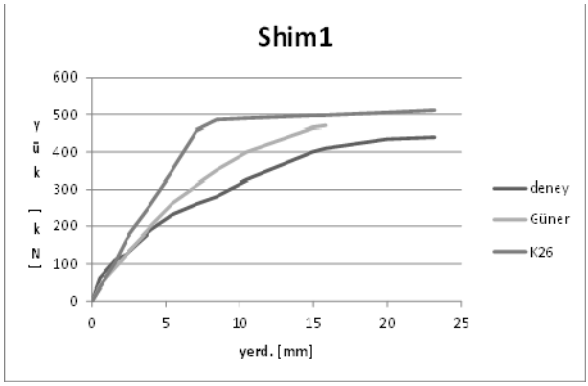
Teorik olarak elde edilen ve yönetmeliklerde verilenlerle tam örtüşmeyen bu sonuçların uygulama ile ne ölçüde uyumlu oluğunu görmek üzere, Kaynaklar'da belirtilen yayınlarda yayınlanmış olan deneysel çalışmalara ait yük-yerdağiştirme ilişkileri, burada açıklanan yöntemle elde edilmiş rijitliklerle çözülerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. K26 bilgisayar programı yükü istenen sayıda kademeli olarak uygulayıp her evrede yerdeğiştirme ve iç kuvvetleri hesaplar. Rijitlikler, her kademede, yukarıda belirtilen programla hesaplanıp sistem çözümlenir, böylece doğrusal olmayan problem, küçük aralıklar için, doğrusallaştırılmış olmaktadır. *Şekil 6-11*de verilen diyagramlarda böylece elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi, deneysel sonuçlarla karşılaştırıldığı gibi, bir fikir edinmek üzere, [9] da elde edilen sonuçlar da işaretlenmiştir. Çok daha geniş amaç ve kapsamı olan bu doktora tezinde Güner, taşıyıcı sistemlerin dönüşümlü yükler etkisindeki davranışlarını, kesme göçmesini de modelleyerek, kesitleri yükseklik boyunca 40 kadar şeride bölerek incelemiştir. Bu nedenle buradaki sonuçların [9] da verilenlere yakın düşmesi, kesme göçmesi sözkonusu olmayan örneklerin seçilmesi nedeni iledir.

Ayrıntıları [8] ve [9] da verilen B1, B2 ve B3 Shim kirişleri ayni *229mm×552mm* enkesite sahiptir. B1 ve B2 de *2M30+2M25*(çift sıra), B3 te *3M30+2M25*(üç sıra) donatı vardır. *M30 ve M25*, yaklaşık *Φ30* ve *Φ25* e karşı gelen *700* ve *500mm*^{2} enkesit alanlı donatılardır. Sözü edilen bilgisayar programı tek sıra donatı için hazırlanmış olduğundan, burada ikinci

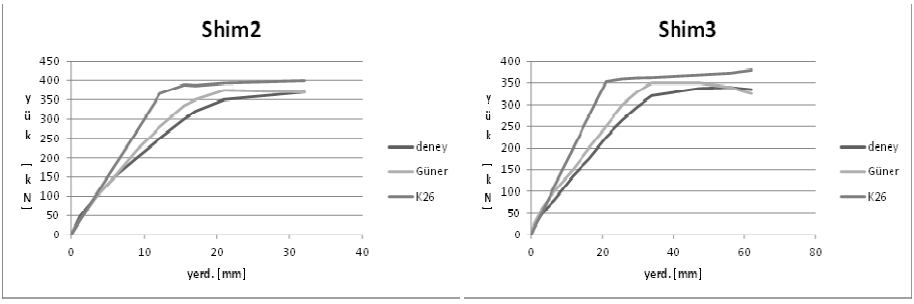
ve üçüncü sırada olan donatılar kesit üst kenarına olan uzaklıkla orantılı olarak tek sıra donatıya dönüştürülmüştür. Basit mesnetli kiriş olarak deney yapılan bu kirişlerde B1 in açıklığı *3.66m*, B2 nin *4.57m,* B3 ün ise *6.40m* dir. Donatı akma sınırı *440MPa*, beton dayanımı B1,B2 ve B3 te sırası ile, *22.6MPa*, *25.9MPa* ve *43.5MPa* dır. Kiriş, statik hesapta, açıklık boyunca farklılaşan eğilme rijitliğini yansıtabilmek amacı ile, 12 eşit parçaya bölünerek modellenmiştir. *Şekil 6b~ Şekil 6d* den, kullanılan yöntemin deneyle uyumlu olduğu, göçme durumuna kadar değişken olan rijitliklerin oldukça iyi temsil edildiği görülmektedir. *B1* kirşinde deney sonuçları ile uyumun *B2* ve *B3* kadar iyi olmaması, açıklığın küçük olması nedeni ile kesme kuvveti etkisinin belirginleşmesi ve burada uygulanan yöntemin kesme etkisini gözönüne almaması ile yorumlanmıştır.



Şekil 6a. Shim kirişleri yük durumu



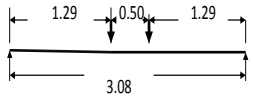
Şekil 6b. Shim kirişi B1 için yerdeğiştirme-yük ilişkisi



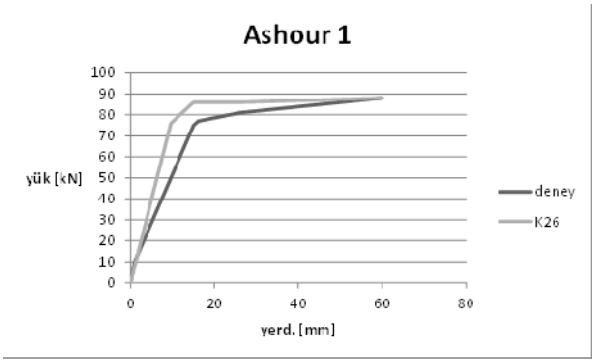
Şekil 6c,6d. Shim kirişi B2 ve B3 için yerdeğiştirme-yük ilişkisi

Yüksek dayanımlı betonarme kirişlerle yapılan deneylerin sunulduğu [10] da verilen çok sayıda kirişten tipik üç kiriş alınarak buradaki yöntemle elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri karşlaştırılmıştır. Deneye tabi tutulan kirişlerin hepsi *0.20×025m* kesitli ve *0.035m* paspayına sahiptir. Açıklığı ve yükleme durumu *Şekil 7a* da verilen kirişlerde beton dayanımı *102.4MPa,* çelik akma sınırı f_y*=530MPa* dır. BH2 de *2 Φ18,* BH3 de *3 Φ18* BH4 de *4 Φ18* çekme donatısı vardır. Yükleme *Şekil 7a* da görüldüğü gibi kiriş ortasında *0.50m*

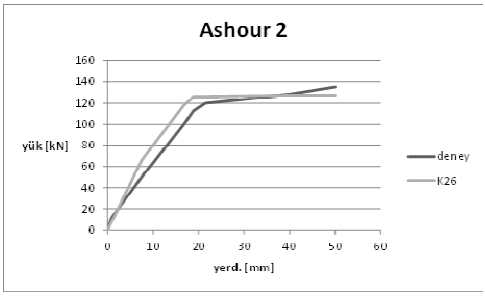
aralıklı çift yük şeklindedir. Deneyde elde edilen ve , [10] da yayınlanmış olan yerdeğiştirme yük ilişkileri, burada açıklanan yöntemle elde edilenlerle karşılaştırmak üzere *Şekil 7b~d* de verilmiştir. Kiriş boyunca değişen momente uygun kesit rijitliği belirleyebilmek üzere, statik hesaplar için, kiriş 14 eşit bölüme ayrılmıştır. Burada da deney sonuçları ile oldukça iyi bir uyum görülmektedir.

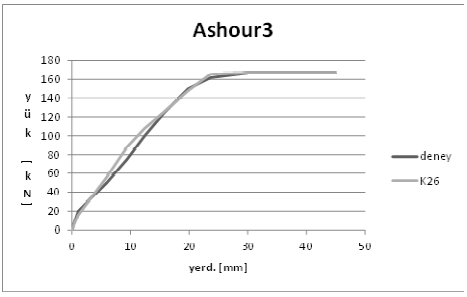


Şekil 7a. Ashour kirişleri yük durumu



Şekil 7b. Ashour kirişi BH1 için yd-yük ilişkisi

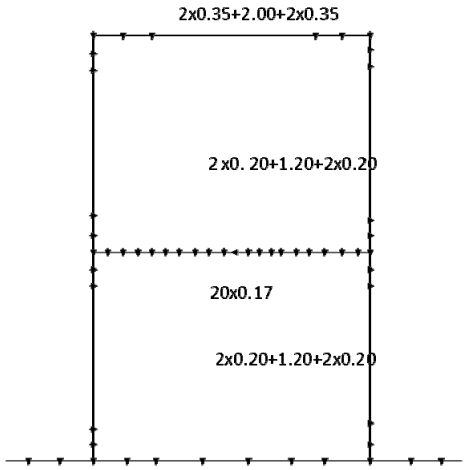




Şekil 7c,7d. Ashour kirişi BH2 ve BH3te yerdeğiştirme-yük ilişkisi

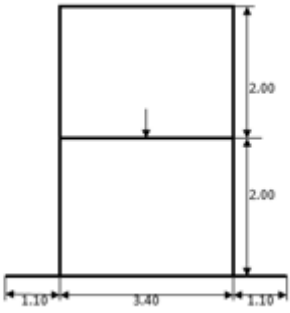
Ayrıntılı açıklaması [7] ve [9] da verilen Balopoulou çerçeve deneyinde tek aşıklıklı iki katlı bir çerçevenin birinci kat kirişi açıklık ortasında etki eden tekil düşey yük etkisinde deneysel olarak incelenmiştir. Bütün kesitler *0.30×040m* boyutundadır. Çerçeve laboratuvarda *5.60× 8.00×0.40m* boyutlu betonarme bir tabana monte edilmiştir. Kolonlarda ve birinci kat kirişi mesnedinde her iki yüzde $4\times300mm^2$ *(4No.20),* birinci kat kirişi açıklığında altta $4\times300mm^2$ *(4No.20),* üstte $2\times300\ mm^2$, ikinci kat kirişinde her iki yüzde $3\times300mm^2$donatı vardır. Beton dayanımı $f_c^{'}=29MPa$, elastiklik modülü $E_c=22400MPa$, çelik akma sınırı $f_y=419MPa$ olarak verilmiştir. Statik çözümleme, yukarıda sözü edilen betonarme tabanla birlikte bölümlere ayrılarak yapılmıştır. Kolonlar mesnet bölgelerinde zorlanacağından mesnetlerde iki kısa bölüm oluşturulmuş, yükün etkidiği birinci kat kirişi, hem açıklığında hem de mesnedinde zorlandığından *Şekil 8* de görüldüğü gibi daha sık

bölümlenmiştir. Böylece her bölümde iç kuvvet ve donatıya bağlı olarak farklı rijitlik tanımlanabilmektedir.

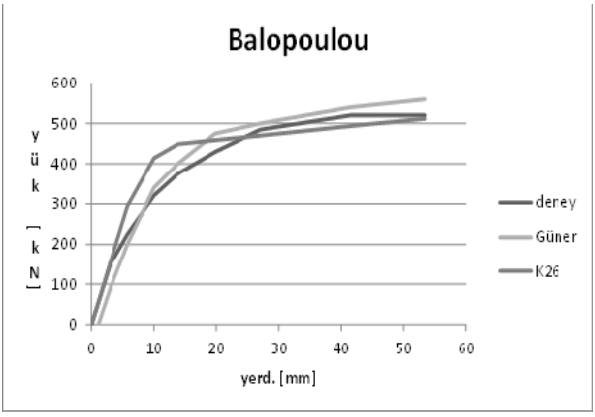


Şekil 8. Balopoulou çerçevesi statik çözümde bölümleme

Bu çalışmada elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi, *Şekil 9b* de, deney sonuçları ile ve [9] da sayısal olarak elde edilenlerle karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar deneyde elde edilenlere oldukça yakındır. Göçme, düzenlenen donatı durumu nedeni ile, yüklenen birinci kat kirişinin mesnet ve açıklığının plastikleşmesi ile meydana gelmektedir. Kiriş mesnedinde ve açıklığında plastikleşme bu çalışmada yakın yük değerlerinde oluşurken [7] ve [9] da farklı yük değerlerinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Bu çerçeve için de uygulanan yöntemin iyi bir yaklaşım olduğu görülmektedir.

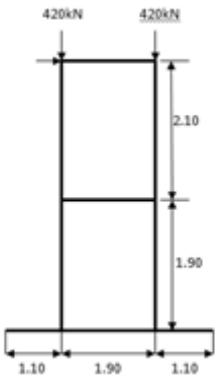


Şekil 9a. Balopoulou çerçevesi

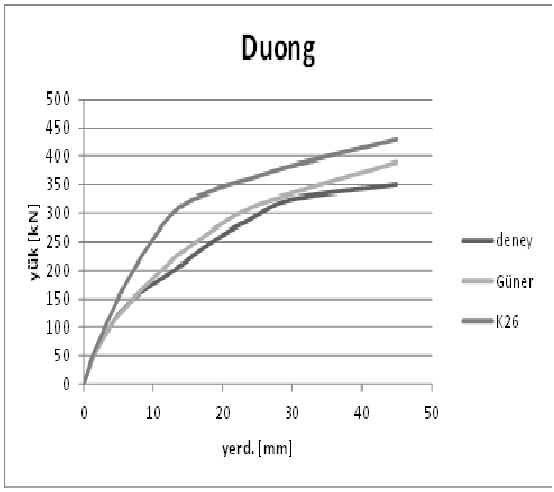


Şekil 9b. Balopoulou çerçevesi için yerdeğiştirme-yük ilişkisi

Benzer şekilde [9] da çözümlenerek deney sonuçları ile karşılaştırılmlş olan ve yine iki katlı tek gözlü olan Duong çerçevesinde yükleme yatay doğrultuda ve üst kat kirişindedir. Kolonlarda eksenel basınç sağlamak üzere üst kat köşelerinde *420* şer *kN* düşey yük uygulanmıştır. Bu katın yatay yerdeğiştirmesi-yatay yük ilişkisi *Şekil 10b* de verilmiştir. Enkesit boyutları yine *0.30×040m*, kiriş ve kolonlarda her iki yüzde *4×300mm*^{2} *(4No.20)* donatı, ikinci kat kolonu üst uç iç yüzüne ve birinci kat kolonu alt uçta her iki yüzde ikinci sırada *4×300mm*^{2} *(4No.20)* ek donatı vardır. Statik çözümleme için çerçeve yine bölümlere ayrılmış, zorlanma uçlarda olacağından kolonlar *2×0.20+1.10(1,30)+2×0.20m,* kirişler de *2×0.20+1.10+ 2×0.20m* şeklinde bölümlenmiştir. Çerçeve açıklığının küçük olması nedeni ile statik hesaplarda kolon ekseni-kolon kenarı arasında, [9] da da yapıldığı gibi, rijit eleman tanımlanmıştır. Çerçevenin şeması *Şekil 10a* da, elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi *Şekil 10b* de deney sonuçları ve [9] da elde edilenlerle karşılaştırılarak verilmiştir. Bu çerçeve için de yaklaşımın oldukça iyi olduğu görülmektedir.

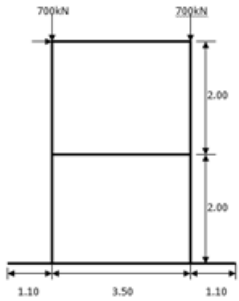


Şekil 10a. Duong çerçevesi

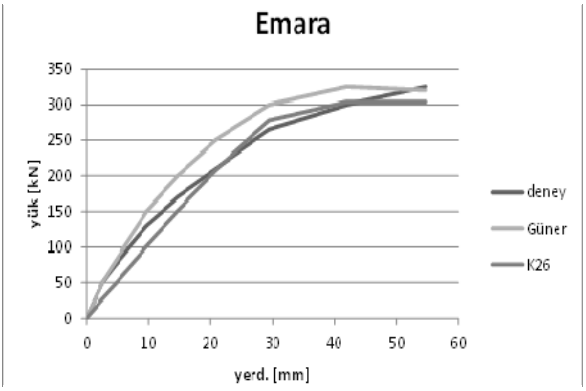


Şekil 10b. Duong çerçevesi için yerdeğiştirme-yük ilişkisi

Yine Güner tarafından çözümlenerek [9] da deney sonuçları ile karşılaştırılmlş olan ve iki katlı tek gözlü olan Emara çerçevesinde de yükleme yatay doğrultuda ve üst kat kirişindedir. Kolonlarda eksenel basınç sağlamak üzere üst kat köşelerinde *700er kN* düşey yük uygulanmıştır. Bu katın yatay yerdeğiştirmesi-yatay yük ilişkisi *Şekil 11b* de verilmiştir. Enkesit boyutları yine *0.30×040m*, donatılar kiriş ve kolonlarda her iki yüzde *4 ×300mm*^{2} *(4No.20)* olarak belirtilmiştir. Statik çözümleme için çerçeve yine bölümlere ayrılmış, zorlama uçlarda olacağından, kolonlar *2×0.20+1.20+2×0.20m*, kirişler de *2×0.35+2.10+2×0.35m* şeklinde bölümlenmiştir. Çerçevenin şeması *Şekil 11a* da, elde edilen yük-yerdeğiştirme ilişkisi *Şekil 11b* de deney sonuçları ve [9] da elde edilenlerle karşılaştırılarak verilmiştir. Bu çerçeve için de yaklaşımın iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 11a. Emara çerçevesi

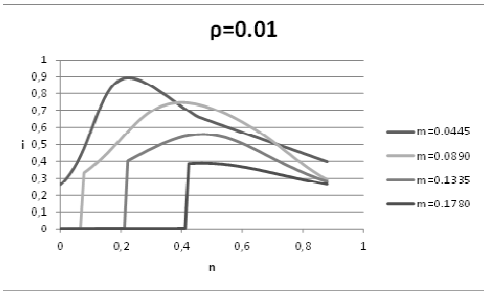


Şekil 11b. Emara çerçevesi için yerdeğiştirme-yük ilişkisi

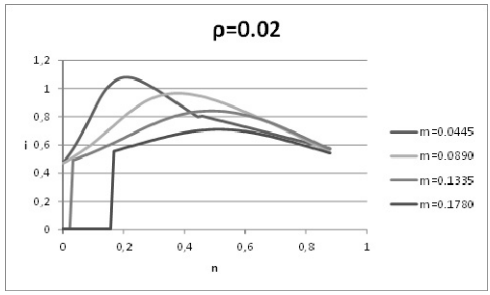
6. SONUÇLAR

Betonarme kesitlerin eğilme rijitliğini olabildiğince gerçekçi biçimde tanımlayabilmek, performansa dayalı çözümün deprem davranışının belirlenmesinde önemli bir yöntem olarak ortaya çıkması nedeni ile, daha çok dikkate değer duruma gelmiştir. Eğilme rijitliği, yapının güvenliği açısından, burkulma hesaplarında da doğruya yakın tanımlanması gereken bir büyüklüktür. TS500 burkulma için brüt kesit eylemsizlik momentinin 0.20 si ile donatı kesitinin dönüştürülmüş eylemsizlik momentini önerirken, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik kolonlar için, eksenel kuvvete bağlı bir ifade vermektedir. Doğrusal olmayan hesaplamalarda genellikle göçme momentinin bu durumdaki eğriliğe oranı doğrusal kabul edilen bölüm için başlangıç rijitliği olarak alınmaktadır. Bu konuda yapılmış deneysel çalışmalar [2], [3] eksenel kuvvetin olduğu kadar donatı miktarının da kesit rijitliğini etkilediğini göstermiştir. Ayrıca *Şekil 6b,10b ve 11b* de görüldüğü gibi başlangıç rijitliğini göçme durumuna kadar sabit almak da deneysel sonuçlara uymamaktadır.

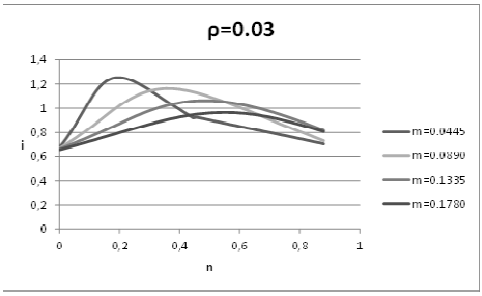
Bu çalışmada, betonarme kesitin kesit hesabında malzeme ile ilgili yapılan kabullere dayanarak geliştirilen teorik yöntemin değişik eksenel yük ve donatı oranı düzeylerinde, deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmektedir. Bu uyumdan yola çıkarak, donatı miktarı ve eksenel basıncın eğilme rijitliğine etkisi değerlendirilebilir.



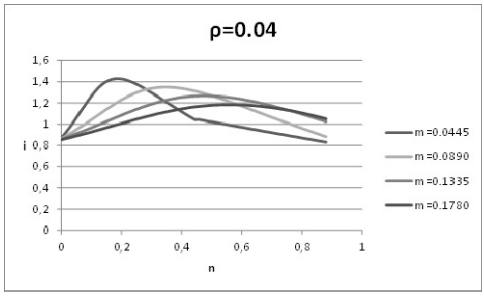
Şekil 12a. 0.01donatı oranı için i-n değişimi



Şekil 12b. 0.02donatı oranı için i-n değişimi



Şekil 12c. 0.03donatı oranı için i-n değişimi



Şekil 12d. 0.04donatı oranı için i-n değişimi

Yukarıda belirtilen kabullere dayanarak düzenlenen ve deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülen bilgisayar programı kullanılarak, *Şekil 12* de artan *n* değerleri ile rijitliğin değişimi *0.01~0.04* donatı oranı ve *0.0445~0.1780* boyutsuz moment değerleri için elde edilmiştir. *Şekil 12a* ve *12b* de başlangıçta görülen kesikli eğriler, küçük *n* değerlerinde donatının akması nedeni ile rijitliğin sıfıra yakın olmasından kaynaklanır. Bu şekillerde artan *n* değeri ile boyutsuz eğilme rijitliği *i* değerinin belli bölgelere kadar artıp sonra azalmaya başladığı görülüyor. Eğrilerin tepe noktaları küçük dışmerkezlik sınırındadır. Bu azalma, artan eksenel basınçla büyüyen basınç gerilmesi nedeni ile, elastiklik modülünün azalması ve χ dönmesinin momentten daha hızlı artması ile açıklanabilir.

Şekil 12 de elde edilen sonuçlara dayanarak, kesit eğilme rijitliğinin donatı oranı ve boyutsuz eksenel kuvvete bağlı değişimi için bir öneri yapılabilir. İlke olarak, donatı oranı büyüdükçe artan, küçük dışmerkezlik sınırına kadar eksenel yükle artan, daha sonra, dışmerkezlik azaldıkça, eksenel yükle azalan bir bağıntı elde edilmelidir. Yukarıda elde edilen eğrilerin esasını oluşturan bilgisayar çıktıları kullanarak ve enküçük kareler yöntemi ile katsayıları belirlenecek bir ifade bulunmaya çalışılmış, elde edilen sonuçların, uygulamada mühendise kolaylık sağlayacak nitelikte ve karmaşık olmaması amaçlanmıştır.

Basit eğilme durumunda

$$i = 0.08 + 20\rho \tag{3}$$

bağıntısı, *Şekil 5* te verilen eğilme rijitliği-donatı oranı ilişkisini oldukça iyi ifade edebilmektedir. Bileşik eğilme durumu için *Şekil 12* de verilen eğrilerin yükselen ve alçalan bölümleri, yaklaşık olarak, iki doğru ile ifade edilebilirler. Eğrilerin tepe noktası *e=0.20* dışmerkezlik oranına karşı gelmektedir. Bu nedenle diyagramların sol tarafına karşı gelen *e>0.20* için

$$i = 0.10 + 17.2\rho + \frac{0.142 + 1.11\rho - 0.16n}{e} \tag{4}$$

doğrusal bağıntısı elde edilmiştir. Hemen görülebileceği gibi bu bağıntı dışmerkezliğin büyük olduğu durumları kapsar. Küçük dışmerkezlik durumuna ve diyagramların sağ tarafına karşı gelen *e<0.20* için ise

$$i = 0.774 + (5.82\rho - 1.85n)(1 + 13e) \quad (5)$$

bağıntısı bulunmuştur. Daha yaklaşık fakat basit bir ifade için

$$i = 0.774 + 15.9\rho - 0.565n \quad (6)$$

bağıntısı verilebilir. Eğrisel bir ilişkinin doğrularla gösterilmesi yeni bir yaklaşıklık nedeni olmakla birlikte sadelik için kaçınılmaz görünmektedir.

Eşdeğer eğilme rijitliği için elde edilen (3), (4) ve (5,6) bağıntıları beton ve çeliğin gerilme-şekil değiştirme özelliklerine dayanarak sayısal bir yöntemle elde edilmiştir. Geçerli yönetmeliklerle tam uyuşmayan bu bağıntılar bu alanda daha çok deneysel çalışma yapılması gerektiğine işaret olarak değerlendirilmiştir. Bağıntılardaki her parametrenin etkisini belirlemek üzere yapılacak deneysel çalışmalarla bu bağıntıların iyileştirilmesi umularak, güncel uygulamada hesaba katılmayan donatı oranı ve dışmerkezlik oranı etkisini belirten bir öneri sunulmuş bulunmaktadır.

Semboller

d : Betonarme kesit faydalı yüksekliği

E_c : Beton elastiklik modülü

E_e : Etkin beton elastiklik modülü

e : Dışmerkezlik oranı (M/(N.d))

I : Eylemsizlik momenti

$I_{brüt}$: Brüt kesit eylemsizlik momenti

i : $EI/EI_{brüt}$, eğilme rijitliği azaltma katsayısı

M : Eğilme momenti

m : Boyutsuz eğilme momenti $(M/(f_{ck}bd^2))$

N : Eksenel kuvvet

n : Boyutsuz eksenel kuvvet $(N/(f_{ck}bd))$

ε_c : Betonda birim kısalma

ε_s : Çelikte birim uzama

Kaynaklar

[1] ASCE 41 (2007). Seismic Rehabilitation of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA.

[2] Berry, M.P., Eberhard, M.O., Performance Modeling Strategies for Modern Reinforced Concrete Bridge Column, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Peer 2007/7, Berkeley, CA.

[3] Elwood, K., Eberhard, M.O., Effective Stiffness of Reinforced Concrete Columns, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Research Digest No.2006-1, Berkeley, CA.

[4] Tran, C.T.N., Li, B., Initial Stiffness of Cocrete Columns with Moderate Aspect Ratios, Advences in Structural Engineering, 15(2) 265-276, 2012

[5] Canbay, R., Özcebe, G., Ersoy, U., High Strength Concrete Columns under Eccentric Load, Journal of Structural Engineering, ASCE July 2006, 1052-1060.

[6] Shanfigh, P., Hassanpour M., Razavi, S.V., Kobrael, An Investigation of the Flexural Behaviour of Reinforced Lightweight Concrete Beams, Int. J. Of Physical Sciences v. 6(10), 2414-2421, May 2011.

[7] Vecchio, F.J., Balopoulou, S., On the Nonlinear Behaviour of Reinforced Concrete Frames, Canad. J. Civil Eng., v. 17,698-704, 1990.

[8] Vecchio, F.J., Shim, W., Experimental and Analytical Reexamination of Classic Concrete Beam Tests, Journal of Structural Engineering, ASCE March 2004, 460-469.

[9] Güner, S., Performance Assesment of Shear Critical Reinforced Concrete Plane Frames, Ph.D. Thesis, Graduate Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2008.

[10] Ashour, S.A., Effect of Compressive Strength and Tensile Reinforcement Ratio on Flexural Behavior of High Strength Concrete Beams, Engineering Structures 22, 413-423, 2000.

TEKNİK NOT