

FRETLİ KOLONLARLA İLGİLİ DENEYSEL BİR ÇALIŞMA

Mehmet Baran* ve **Sarp Dinçer****

* Kırıkkale Üniversitesi İnş. Müh. Böl., 71450, Kırıkkale

** Teknik Destek Grubu, Çankaya, Ankara.

mbaran@kku.edu.tr, dincer@teknikdestekgrubu.com.tr

(Geliş/Received: 29.04.2010 ; Kabul/Accepted: 05.01.2011)

ÖZET

Bu çalışmada, bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki fretli kolonların en az sargı donatısı gereksinimi incelenmiştir. Çalışmanın amacı Ersoy ve Özcebe [1] tarafından önerilen denklemi deneysel olarak test etmek ve sonuçları irdelemek olduğundan oniki adet fretli kolon numuneleri bileşik eğilme ve eksenel yük altında test edilmiştir [2, 3]. Altı deney elemanı Türk [4] ve Amerikan Beton Enstitüsü'nün Yönetmeliklerinde [5] yer alan iki denklemden birine göre hazırlanırken diğer altı deney elemanı da önerilen denkleme göre hazırlanmıştır. Bu çalışmadaki deney elemanlarının değişken parametreleri fret hacimsel oranı (yönetmelik ve önerilen denklemlere göre hesaplanan), toplam beton alanının çekirdek beton alanına oranı ve fretin akma dayanımıdır. Yönetmelikte verilen ve eksenel yüklenmiş kolon davranışını esas alan denklemlere göre hazırlanan kolon numunelerinin deney sonuçları önerilen bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolon davranışını esas alan denkleme göre hazırlanmış kolon numunelerinin deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sargılı Beton, Süneklik, Moment-Eğrilik, Fret Hacimsel Oranı.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON SPIRAL COLUMNS

ABSTRACT

In this study, minimum confinement reinforcement requirement of spiral columns under combined bending and axial load was investigated. Since the object of this study was to test the equation proposed by Ersoy and Özcebe [1] experimentally and to report the results comprehensively, twelve spiral column specimens were tested under combined bending and axial load [2, 3]. Six specimens were designed according to one of the equations used in the Turkish [4] and ACI (American Concrete Institute) codes [5] and the other six specimens were designed according to the proposed equation. The variable parameters used in this study were the volumetric ratio of spiral steel (calculated by the code and the proposed equation), the ratio of the gross concrete area to the confined core area and the yield strength of the spiral steel. Test results of the columns designed according to the current Code equations, based on the axially loaded column behavior, are compared with the test results of the columns designed according to the proposed equation, based on the eccentrically loaded column behavior.

Keywords: Confined Concrete, Ductility, Moment-Curvature, Volumetric Ratio of Spiral Steel.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Sargılı betonun mekaniği ile ilgili kuramsal ve deneysel çalışmaların başlangıcı 1900'lere kadar uzanmaktadır. O zamandan bugüne, sargılı beton mekaniğine yüzlerce araştırmacının büyük katkıları olmuştur. Öte yandan, bazı konularda hala tartışılmaya açık ve sonuçlandırılmayı beklemektedirler.

Betonarme kolonlarda sargı donatısı olarak dairesel etriye, dikdörtgensel etriye, kanca ve dairesel fret

kullanımı sıkça karşılaşılan durumlardır. Sargı donatısı betonarme kolonda kesme donatısı olarak kullanılır, çekirdek betonu sargılayarak sünekliğinde ve dayanımında artış sağlar ve de ileri eğrilik safhalarında boyuna donatının burkulmasını engeller. Tipik yapılarda, dikdörtgen kolonların yapımı, dairesel kolonlardan daha kolay olduğundan, dikdörtgensel etriye kullanımı yaygındır. Fakat, fretli kolonların sismik ve rüzgar yükleri altındaki davranışları, onları köprü ayağı olarak inşa edilmelerinde vazgeçilmez yapmaktadır.

Normal ve yüksek dayanımlı fretli kolonlarla ilgili yaptıkları çalışmalarda Dash ve Ahmad [6], beton basınç dayanımı, kolon boyuna donatısı bulunması, dairesel kesitin çapı, sargı donatısı miktarı ve yükleme hızı gibi birçok değişkeni kapsayan bir gerilme-birim deformasyon modeli önermişlerdir. Priestley, Park ve Potangaroa [7], yüksek eksenel yük seviyelerinde, kolonun sargılanmış uzunluğunun artırılması gerektiğini bildirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre, fret hacimsel oranını veren Kaliforniya Yapı Mühendisleri Birliği / Amerikan Beton Enstitüsü denklemleri düşük eksenel yük seviyelerinde fazla, eksenel yük seviyesi $0,5f_{ck}A_{ck}$ seviyesinden yüksek değerler içinse biraz yetersiz sonuçlar vermektedir. Yeni Zelanda yönetmeliğinde yer alan ve en az fret hacim oranını veren denklemlerde, kolon eksenel yük seviyesi hesaba katılmaktadır. Martinez, Nilson ve Slate [8], hafif betonlu kolonların fret donatısının, normal kolonlarınkine göre %60 daha az etkili olduğu sonucuna varmışlardır. Yazarlara göre, eğer fret hacimsel oranı, kabuk betonun çatlayıp dökülmesinden dolayı oluşan eksenel yük kapasitesindeki azalmanın, sargı etkisinden dolayı oluşan eksenel yük kapasitesindeki artışa eşitlenmesi ilkesi ile hesaplanırsa, hafif betonlu kolonlardaki fret hacimsel oranının normal betonlu kolonlardaki oranın 2,7 katı olması gerekmektedir. Cusson ve Paultre [9] yüksek dayanımlı kolonların gerilme-birim deformasyon eğrilerindeki tepe ve kırılma noktalarına denk gelen deformasyon değerlerinin fret hacimsel oranı ile orantılı olarak arttığını, fakat bu değerlerin düşük dayanımlı kolon değerlerine göre çok düşük mertebelerde olduklarını belirtmişlerdir. Yazarlar ayrıca, Amerikan Beton Enstitüsü Yönetmeliğinde yer alan fretli kolon hacimsel oranını hesaplayan denklemlerin hafif betonlu kolonlara uygulanmaması gerektiğini savunmuşlardır. Ahmad ve Shah [10] çalışmalarında, hafif betonlu kolonlardaki sargı donatısının dayanım ve sargılama açısından normal betonlu kolonlardakine göre daha az etkili olmaktadır. Mander, Priestley ve Park [11], yüksek dayanımlı sargı donatısındaki muhtemel erken kırılma ve bu sebeple sargı etkisindeki azalmanın mevcut sünekliliğin düşmesine yol açabileceğine dikkat çekmişlerdir. Zahn, Park ve Priestley [12] çalışmalarında hacmi yönetmeliğe göre hesaplanan, düşük dayanımlı sargı donatısı yerine yüksek dayanımlı donatı kullanıldığında betonun maksimum deformasyon değerindeki düşüşe dikkat çekmişlerdir. Bu davranışın da yüksek dayanımdan ötürü azalmış fret miktarının, çekirdek betondaki deformasyon enerjisini daha az emdiğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Sheikh ve Toklucu [13] çalışmalarında, betonda maksimum gerilme olduğu anda spiral donatısının aktığı sonucuna ulaşmışlardır. Cusson ve Paultre [14] etriye donatısının akma dayanımındaki artışın yeterli miktarda dayanım ve sertlikle sadece yeterli şekilde sargılanmış kolonlarda sonuçlandığı noktasına dikkat çekmişlerdir.

Samra, Nidal ve Madi [15] Amerikan Beton Enstitüsü yönetmeliğinde yer alan fret hacimsel oranını hesaplayan denkleme, eksantriklik/kolon çapı

oranının fonksiyonu olan değişkene bağlı bir katsayı eklemeyi önermişlerdir. Fretli kolonlar için, yönetmelikteki denklemden elde edilen sonuç bu katsayı ile çarpılmaktadır. Yazarlar ayrıca, mevcut yönetmelik denklemlerinden elde edilen sargı donatısı miktarının, yüksek eksantrisite değerleri için düşük, eksenel yüklü kolonlar içinse yüksek kalmakta olduğunu rapor etmişlerdir. Özkaya [16] kesitlerin eğilme ve eksenel yük altındaki davranışları esas alınarak minimum fret oranını veren denklemler elde etmiştir. Normal dayanımlı betonlar için minimum fret oranını veren bir adet regresyon ve bir adet basitleştirilmiş denklem önermiştir. Yüksek dayanımlı betonlarda, 95 MPa beton dayanımına kadar geçerli olan farklı bir regresyon denklemi de önermiştir.

Yürürlükte olan yönetmeliklerde [4, 5] minimum fret oranını veren denklem, eksenel basınç altındaki kolonun ikinci tepe noktasındaki dayanımın birinci tepe noktasındaki dayanıma eşit olmasına dayanmaktadır. Bu çalışmada, kesitlerin eğilme ve eksenel yük altındaki davranışları esas alınarak türetilen [1] minimum fret oranını veren tek bir denklemin geçerliliği sınanmaktadır. Yürürlükte olan yönetmeliklerdeki denklemler eksenel yüklü kolon davranışından türetildikleri için, bu denklemlerden birine göre tasarlanan fretli kolonların bileşik eğilme ve eksenel yük altında ne kadar sünek bir davranış gösterecekleri yoruma açık olmaktadır. Eksenel yüklü kolonların kırılma tarzları bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonlardan tamamen farklıdır. Önerilen denklem türetilirken, bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonun kabuk betonunun bir kısmında ezilme ve dağılma meydana geleceği hesaba katılmıştır. Çalışmada ayrıca, süneklik ölçüsünün eksenel yük-deformasyon ilişkisi ile değil de moment-eğrilik ilişkisi ile bağıntılı olduğuna dikkat çekilmektedir.

Bilindiği üzere sargı donatısı sargılama etkisiyle kolonun hem kapasitesini hem de sünekliliğini artırır. Eksenel yükler altında Poisson etkisiyle kolonun çekirdek betonunda oluşan yanal deformasyon sargı donatısının sargılama etkisiyle sınırlanır ve bu sayede kolonun hem kapasitesi hem de sünekliliği artar. Fretli kolonlarda, Poisson etkisiyle oluşan yanal deformasyonu sınırlayan yanal basınç radyal yönde düzenli dağıldığından, çözüm için "ince cidarlı silindirik analogisi" kullanılabilir.

Yönetmeliklerde [4,5] fretli kolonlar için fret hacimsel oranını veren denklem aşağıdaki gibidir;

$$\rho_s = 0,45 \frac{f_{ck}}{f_{ywk}} \left(\frac{A_c}{A_{ck}} - 1 \right) \quad (1)$$

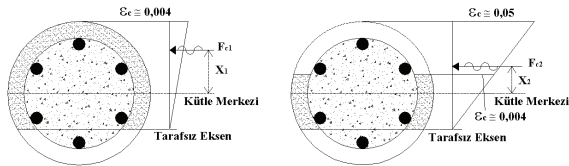
Bu denklemde (A_c/A_{ck}) oranı 1'e ulaştığında, hacim oranı sıfıra yaklaşır ki, bu da denklemin fiziksel olayı açıklamaktan uzak olması anlamına gelir. Mesela, A_c/A_{ck} oranı 1,0 olduğunda, Denklem 1 kabullenilemeyecek bir sonuç olan $\rho_s=0$ ile sonuçlanmaktadır. Bu sebeple yönetmeliklerde, ρ_s 'e bir alt sınır getiren ikinci bir denklem sunulmaktadır:

$$\rho_s = 0,12 \frac{f_{ck}}{f_{yw}} \quad (2)$$

Denklem 2, eksenel yüklü kolon elemanlarıyla yapılan deneyleri esas alan deneysel bir denklemdir. Yönetmeliklerdeki hacimsel fret oranının (Denklem 1 veya Denklem 2) daha yüksek verildiği denklemin kullanılması gerekmektedir:

Bileşik Eğilme ve eksenel yük altındaki kolonlarda hacimsel fret oranı için kabuk betonunda yerel çatlama ve ezilme göz önünde tutulması bütün kabuğun belli bir deformasyonda çatlayıp ezildiği durumdan daha gerçekçidir. Bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki fretli kolonun davranışı eksenel yüklü olandan tamamen farklıdır. Eksenel yüklü kolon için, tüm kabuk betonu aynı zamanda belli bir deformasyonda çatlar ve ezilir. Bununla birlikte, kabuk betonundaki çatlama ve ezilme eksantrik yüklü kolonlarda tarafsız eksenin üzerindeki katmanla sınırlanmıştır ve bu ezilme kolonun moment kapasitesinde önemsenecek derecede azalmalara sebep olur. Bu tip bir kapasite kaybını eksenel yüklü kolon davranışına bağdaştırmak doğru olmayacaktır.

Şekil 1’de, bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki fretli kolonun kabuk betonunun çatlayıp ezilmeden hemen önceki ve aynı kolonun kabuk betonunda yerel çatlama, ezilme ve dökülmelerin olduğu ileri safhası gösterilmektedir.



Şekil 1. Bileşik Eğilme ve Eksenel Yük Altındaki Fretli Kolon Kesiti (Erken ve İleri Safhalar) (Spiral Column under Combined Bending and Axial Load (Early and Later Stages))

Eksenel yüklü fretli kolonlarda ilk safhalardaki kapasiteyi sonraki safhalardakine eşitleme prensibi bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonlar için de kullanılabilir. Fakat, bu sefer kolonların moment kapasitelerinin baz alınması gerekmektedir. Gerçekleştirilen kuramsal çalışmalar [1] sonucunda bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki fretli kolonların hacimsel fret oranını veren iki denklem yerine Denklem 3 önerilmiştir;

$$\rho_s = 0,425 \frac{f_{ck}}{f_{yw}} \left[1,25 \left(\frac{A_c}{A_{ck}} \right)^{0,5} - 1 \right] \quad (3)$$

Bu denklem tüm A_c/A_{ck} değerleri için kullanılabilir. Çalışmada [1], önerilen bu tek denklemin daha tutarlı sonuçlar vereceği, ve daha fazla süneklik sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmanın deneysel kısmında oniki adet fretli kolon bileşik eğilme ve eksenel yük altında, yönetmelik denklemleri ve önerilen denklemin yeterliliklerini görmek amacıyla test edilmiştir. Deney elemanları üzerine uygulanan eksenel yük seviyesi yaklaşık Türk Deprem Yönetmeliğinde [4] izin verilen en yüksek miktar kadar olmuştur (i.e. $N \approx 0,5A_c f_{ck}$). Deney parametreleri tüm beton alanının çekirdek beton alanına oranı, A_c/A_{ck} ve sargı donatısının akma dayanımı, f_{yw} ’dır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

2.1. Deney Elemanları (Test Specimens)

Deney elemanlarının yükseklikleri 1000 mm’dir. Deney elemanının ortasındaki 400 mm test bölgesi olarak kabul edilmiş ve bütün deformasyon ölçümleri bu bölgede yapılmıştır. Deney elemanlarında test bölgesinin çapı 200 mm’dir.

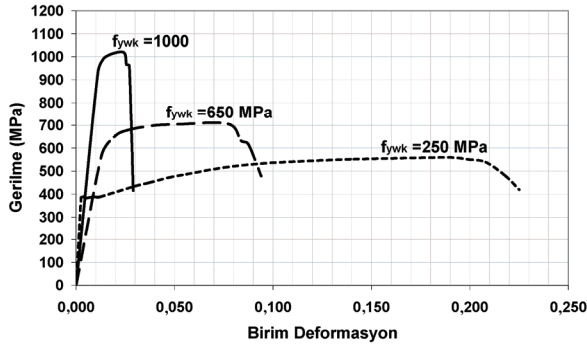
Deney elemanları altı adet deney çiftinden oluşmaktadır. Her biri, karşılaştırma yapabilmek amacıyla birisi yönetmeliklerdeki mevcut denkleme göre, diğeri de önerilen denkleme göre fret donatısı hazırlanmış çiftlerden oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın plan ve organizasyonu Tablo 1’de sunulmaktadır.

Tablo 1. Deneysel çalışmanın plan ve organizasyonu (Planning of the Experimental Program)

ÇİFT	Eleman	Tasarım	A_c/A_{ck}	f_{yw} (MPa)	Fret Çapı (mm)
I	SC1	Denklem 2	1,10	250	4,0
	SC2	Denklem 3			
II	SC3	Denklem 1	1,29	250	4,0
	SC4	Denklem 3			
III	SC5	Denklem 2	1,10	650	4,0
	SC6	Denklem 3			
IV	SC7	Denklem 1	1,29	650	4,0
	SC8	Denklem 3			
V	SC9	Denklem 2	1,10	1000	2,5
	SC10	Denklem 3			
VI	SC11	Denklem 1	1,29	1000	2,5
	SC12	Denklem 3			

2.2. Malzeme (Materials)

Deney elemanlarının beton basınç dayanımları 20 MPa olarak hedeflenmiş, fret hacimsel oranları hedef dayanım değeri üzerinden hesaplanmıştır. Fret donatısı olarak üç farklı donatı tipi kullanılmıştır. Fret olarak kullanılan donatıların gerilme-birim deformasyon grafikleri Şekil 2’de verilmektedir. Bütün kolonlarda boyuna donatının yerleşimi ve oranı aynı tutulmuş ve aynı boyuna donatıdan kullanılmıştır. Deney elemanlarının tasarım detayları ve özellikleri Tablo 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Fret Donatılarının Gerilme-Birim Deformasyon Grafikleri (Stress-Strain Diagrams of Reinforcing Steels used as Spiral Reinforcement)

2.3. Deneysel Düzen (Test Set-up)

Deneysel ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarında, çelik çerçeve altında gerçekleştirilmiştir. Eğilme etkisini deney elemanına uygulayabilmek için laboratuvarında özel bir düzenek imal edilmiştir. İki adet üstte iki adet altta olmak üzere toplam dört adet U200 çelik profil deney elemanının alt ve üst başlıklarına 24 mm'lik çelik bulonlarla sabitlenmiştir. Deney elemanının üzerine eğilme yükü, çelik profiller, plakalar, öngerilme halatı ve hidrolik kriko ile uygulanmıştır. Eğilme etkisini uygulamak için imal edilen düzenek ve deney düzeneği Şekil 3'de gösterilmiştir.

Eğilme etkisindeki deney elemanlarının yanal ötelenmeleri elemanların çekme tarafına yerleştirilen üç adet LVDT ile, eğilme yönünde basınç ve çekme yüzlerindeki doğrusal deformasyonlarda iki adet elektronik komparatörle ölçülmüştür. Deney elemanlarının ortalama eğrilik değerleri, her iki komparatörün zıt yüzlerde, 400 mm uzunluğundaki orta test bölgesinde ölçtükları doğrusal deformasyonların mutlak değerlerinin birbirine eklenip elde edilen değerin, komparatörlerin eğilme yönündeki birbirlerinden olan uzaklık değerine (300 mm) bölünmesiyle elde edilmiştir.

Deney elemanları bileşik eğilme ve eksenel yük altında test edildikleri için yük uygulamaları iki adet hidrolik kriko ile yapılmıştır. Hidrolik krikolardan birisi deney elemanın üzerine sabit eksenel yükü uygularken diğeri de eğilme etkisi için yükü uygulamıştır. Bu sebeple, yük ölçümleri iki adet yükölçer ile gerçekleştirilmiştir. LVDT, yükölçerler ve elektronik komparatörlerin yerleştirilmesi Şekil 4'de gösterilmiştir. Elektronik olarak yapılan tüm ölçümler bilgisayarda depolanmış ve deneyin gelişimi monitördeki moment-eğrilik grafiği izlenerek yönlendirilmiştir.

Deney esnasında eleman üzerine uygulanan toplam yük sabit tutulmaya çalışılmışsa da eğilme etkisini verecek yükün önce artan sonra da azalan olması

yüzünden, bu mümkün olmamıştır. Toplam yükün büyük bölümünü oluşturan eksenel yük deney esnasında sabit tutulmuştur. Toplam yükteki değişim deney verilerinin analizi esnasında göz önünde bulundurulmuştur.

3. DENEY SONUÇLARI (TEST RESULTS)

3.1. Genel (General)

Deney elemanları bileşik eğilme ve eksenel yük altında test edilmişler ve moment-eğrilik ilişkileri deney verileri kullanılarak oluşturulmuştur. Deneylerin hepsinde, kolon test bölgelerinde çekme çatlakları gözlemlenmiştir. Maksimum eksenel yük seviyelerine ulaşılmadan hemen önce kabuk betonda dökülme gözlemlenmiştir. A_c/A_{ck} oranının büyük olduğu kolonlarda, kabuk betonun çatlaması daha belirgin şekilde gerçekleşmiştir. Maksimum eksenel yük seviyesine ulaşılmasıyla birlikte aynı anda bu yük seviyesinde azalma kolon eğriliğinde sürekli bir artma ile birlikte gerçekleşmiştir. Genellikle, fret donatısı akma değeri 1000 MPa olan kolonların deneyleri yaklaşık 0,25 rad/m eğrilik değerlerine kadar, akma değeri 650 MPa olan kolonların deneyleri yaklaşık 0,30 rad/m ve akma değeri 250 MPa olan kolonların deneyleri ise yaklaşık 0,35 rad/m değerlerine kadar yapılmıştır. Eğer fret donatısı kopmadan deneylerde bu eğrilik değerlerine ulaşıldıysa, deney düzeneğindeki cihazların zarar görmemesi açısından test durdurulmuştur. Deney sonlarına doğru fret donatısının kopması durumu en çok fret akma dayanımı 1000 MPa olan donatıyla sarılmış elemanlarda görülmüş olup, SC9, SC10 ve SC11 elemanlarının fretlerinde kopma olmuştur. Deneyin sonlarına doğru kolon boyuna donatılarında burkulma gözlemlenmiştir. Deney verilerinin işlenmesinden sonra ikinci derece moment değerlerinin toplam moment değerlerinde kayda değer bir paya sahip olduğu görülmüştür.

Elemanların deney esnasında taşıdıkları toplam moment değerleri bulunurken ikinci derece momentler de hesaba katılmışlardır. Fretli kolon test bölgesi içinde yer alan ve en fazla zorlanıp çatlamasının olduğu kesitteki yanal ötelenme, LVDT okumaları arasında lineer interpolasyon yapılarak bulunan yanal ötelenme değerine eşit kabul edilmiş ve deney analizlerinde ikinci derece momentin moment kolu uzunluğu olarak alınmıştır. Belirtilmesi gereken bir önemli noktada, tüm elemanlar için çatlamasının olduğu kesitin, test bölgesinin üst yarısında olduğudur. LVDT okumalarının analizinden sonra bu olayın ikinci derece moment değerlerinden kaynaklandığı görülmüştür. Elemanların kesit merkezinden ötelenmesi test bölgesinin üst yarısında daha fazla olmuş, böylece maksimum moment tüm elemanlar için üst yarıda oluşmuştur.

Deney elemanı SC10'un deney sonrası önden ve yandan görüntüleri ve fret donatısındaki kopma Şekil 5'de gösterilmiştir.

Deneysel momentler aşağıda formül kullanılarak hesaplanmıştır;

$$\text{Toplam Moment} = N \times \delta + P \times (e + \delta) \quad (4)$$

Eleman eğrilik değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır;

$$K = \frac{|\varepsilon_{EK1}| + |\varepsilon_{EK2}|}{d} \quad (5)$$

3.2. Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of Test Results)

Deney elemanlarının bileşik eğilme ve eksenel yük altında sünekliklerinin ölçülmesi karşılaştırmanın temel konusudur. Önerilen denklem (Denklem 3) bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonun moment kapasitesinde çok az hatta hiç azalma olmaması prensibine dayanmaktadır.

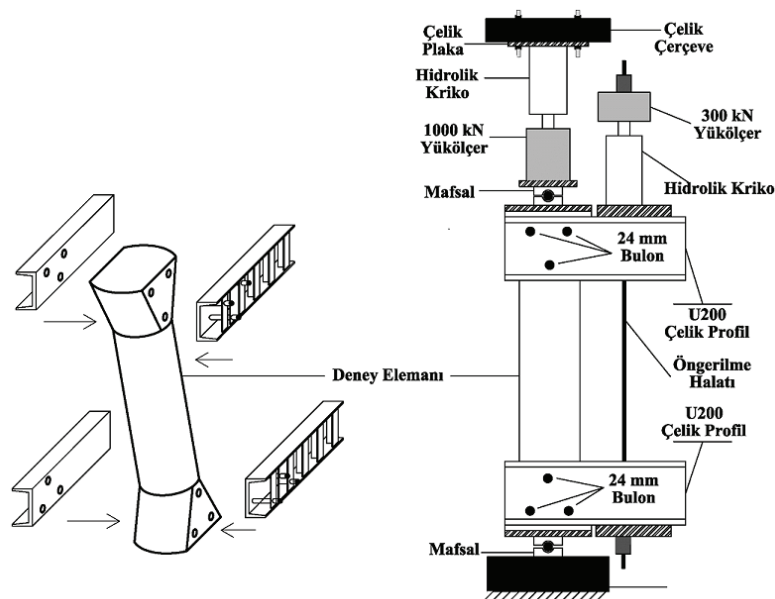
Bileşik eğilme ve eksenel yük altındaki kolonların sünekliklerinin karşılaştırılabilmesi için değişik kriterler belirlenebilir. İki temel karşılaştırma;

- Daha önceden belirlenmiş bir eğrilik değerinde moment değerleri karşılaştırılması,

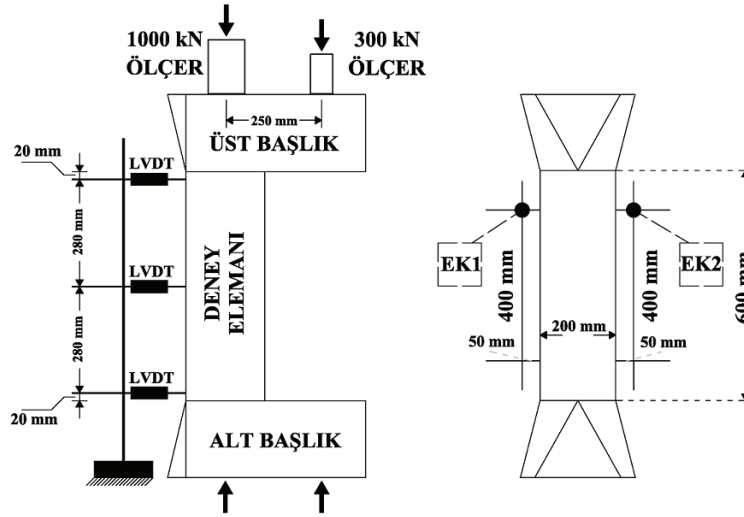
Tablo 2. Deney elemanlarının* özellikleri (Properties of the Test Specimens*)

Kolon	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9	SC10	SC11	SC12
$A_c/A_{c,ck}$	1,10	1,10	1,29	1,29	1,10	1,10	1,29	1,29	1,10	1,10	1,29	1,29
D_g (mm)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
D (mm)	191	191	176	176	191	191	176	176	191	191	176	176
ρ_s 'in hesaplandığı denklem	2	3	1	3	2	3	1	3	2	3	1	3
ρ_s (%) [$\times 10^{-3}$]	9,1	13,2	10,0	14,1	3,8	4,2	4,1	5,6	2,5	2,7	2,7	3,6
Boyuna donatı çapı (mm)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Sargı donatısı çapı (mm)	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	2,5	2,5	2,5	2,5
Sargı donatısı gen. (s) (mm)	29	20	29	20	70	63	70	51	42	38	41	31
f_c (Hedeflenen) (MPa)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
f_{ck} (MPa)	22,1	26,0	23,3	27,0	23,8	25,3	21,9	25,2	24,2	25,0	22,9	24,4
f_y (MPa)	410	410	410	410	386	386	386	386	386	386	386	386
f_{su} (MPa)	574	574	574	574	560	560	560	560	560	560	560	560
f_{yw} (MPa)	250	250	250	250	650	650	650	650	1000	1000	1000	1000

(*)Boyuna donatı olarak altı adet $\phi 10$ çubuk kullanılmıştır.



Şekil 3. Deney düzeneği (Test Set-up)



Şekil 4. LVDT, Yükölçerlerin ve Elektronik komparatörlerin yerleşimi (Location of LVDTs, Load Cells and Dial Gauges)



Şekil 5. SC10 Kolonunun Deney Sonrası Görüntüleri ve Fret Donatısındaki Kopma (Specimen SC10 after the Test and Rupture of Spiral Reinforcement)

- Daha önceden belirlenmiş bir moment taşıma kapasitesindeki eğrilik değerleri karşılaştırılması şeklinde yapılabilir.

Fakat, her iki karşılaştırma şekli de bu çalışmanın kapsamını tam ifade edemeyebilir. Bu sebepten dolayı, her iki maddedeki karşılaştırma şeklinde de elemanların moment-eğrilik davranışları bir bütün olarak dikkate alınacaktır.

Birinci yöntem için, kolon sünekliği karşılaştırma indisi aşağıdaki denklemdeki gibi tanımlanabilir:

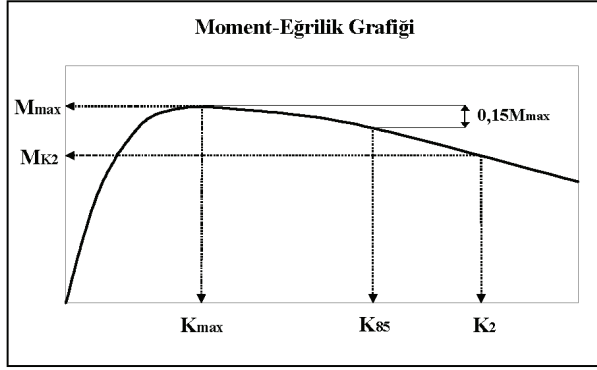
$$\mu = \frac{M_{K2}}{M_{\max}} \quad (6)$$

Bu tanım gereği μ , fretli kolonun önceden belirlenmiş iki ayrı eğrilik değerlerindeki moment taşıma kapasitelerinin oranını vermekte ve değerinin 1,0 olması kolonun moment kapasitesinde hiçbir azalma olmaması anlamına gelmektedir. Tepe noktasından sonraki kısımların eğimlerinin karşılaştırılması

esasına dayanan süneklik karşılaştırılması yöntemi Şekil 6'da gösterilmektedir. Burada M_{\max} kolonun moment taşıma kapasitesini, K_{\max} bu moment değerinde kolonun eğrilik değerini vermektedir. K_2 ise tanım gereği K_{\max} 'in belirli bir katsayı ile çarpılmış halidir. Deney elemanlarının moment-eğrilik davranışları bir bütün olarak değerlendirilmiş, daha gevrek kırılan akma dayanımı daha yüksek ve uzama değerleri daha düşük özellikli sargı kullanılmış kolonların deneylerde ulaşabildikleri maksimum eğrilik değerleri daha düşük olduğundan bu katsayının, akma dayanımı 1000 MPa olan sargı için 2,5, 250 ve 650 MPa olan demirler için sırasıyla 3,0 ve 2.7 alınmasına karar verilmiştir. Tüm deney elemanları için bu yöntemin sonuçları Tablo 3'de özetlenmektedir.

İkinci yöntem için, kolon sünekliği karşılaştırma indisi aşağıdaki şekilde tanımlanabilir:

$$\mu_K = \frac{K_{85}}{K_{\max}} \quad (7)$$



Şekil 6. Temsili moment-eğrilik grafiği (Representative Moment-Curvature Diagram)

Bu tanım gereği μ_K , fretli kolonun maksimum moment taşıma kapasitesinin %85'i değerindeki kapasiteye denk gelen tepe noktası sonrası eğrilik değerinin, maksimum moment taşıma kapasitesine denk gelen eğrilik değerine oranını vermektedir. Tepe noktasından sonraki kısımdaki önceden belirlenmiş eğriliklerin karşılaştırılması esasına dayanan yöntem Şekil 6'da gösterilmekte, bu yöntem için de sonuçlar Tablo 3'de özetlenmektedir.

Önerilen denkleme göre hazırlanan deney elemanlarının süneklikleri ile yönetmelik denklemlerine göre hazırlanan elemanların sünekliklerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla üçüncü bir yöntem için yük-deplasman indisi aşağıdaki denklemden tanımlanabilir:

$$\mu_\delta = \frac{\delta_{85}}{\delta_{\max}} \quad (8)$$

Bu tanım gereği μ_δ , fretli kolonun maksimum moment taşıma kapasitesinin %85'i değerindeki kapasiteye denk gelen tepe noktası sonrası yanal deplasman değerinin, maksimum moment taşıma kapasitesine denk gelen yanal deplasman değerine oranını vermektedir. Bu yöntem tepe noktasından sonraki kısımdaki önceden belirlenmiş yanal deplasmanların karşılaştırılması esasına dayanmaktadır.

Bütün deney elemanlarının beton basınç dayanımı deneylerin gerçekleştirildiği günlerde hedeflenen değeri (20 MPa) aşmıştır. Kolonların fret hacimsel oranı hedeflenen beton basınç dayanımına (20 MPa) göre hesaplanmış olduğundan kolonlarda daha fazla sargı donatısı olması gerekmektedir. Bu durum Tablo 4'de özetlenmektedir. Çiftlerin fret hacimsel oranındaki sapma değerleri incelendiğinde, önerilen denkleme (Denklemler 3) göre tasarlanan kolonların gerekli fret hacimsel oranındaki sapmalar, yönetmelik denklemlerine göre tasarlanan kolonlardaki sapmalardan daha yüksektir. Bu durumda, önerilen denkleme göre tasarlanan kolonlarda gerektiğinden daha az sargı donatısı sağlanmış olması kolonlarının güvenli tarafta kalması ve önerilen denklemin

yeterliliği anlamına gelmektedir. Ayrıca, yönetmelik denklemlerine göre hazırlanan elemanların moment taşıma kapasitelerindeki belirgin azalma, elemanlara uygulanan toplam eksenel yüke de belirgin oranda yansımış, bu durum süneklik karşılaştırma indislerine olumlu yansımıştır.

Kolon çiftlerinin deneysel moment-eğrilik karşılaştırmaları Şekil 7'de verilmektedir. Verilen karşılaştırma grafikleri ve Tablo 3'de verilen kolon süneklik karşılaştırma indisleri μ , μ_K ve μ_δ 'nin değerleri incelendiğinde, kolonların sünekliklerindeki iyileşme açıkça görülmektedir.

Yönetmelik denklemleri (Denklemler 1 veya 2) ve önerilen denkleme (Denklemler 3) göre hesaplanan fret hacimsel oranlarının karşılaştırması matematiksel olarak Tablo 5'de, grafiksel olarak da Şekil 8'de verilmektedir. Bu tablodaki değerlerden de görülebileceği üzere, önerilen denkleme (Denklemler 3), A_c/A_{ck} oranları 1,06 ile 1,50 değişen fretli kolonlar için daha yüksek, bu oranların dışındakiler içinse daha düşük fret hacimsel oranı hesaplanmaktadır.

4. KURAMSAL VE DENEYSEL SONUÇLARIN KARŞILAŞTIRILMASI (COMPARISON OF ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDIES)

Bu bölümde deney elemanlarının deneysel moment-eğrilik grafikleri kuramsal çalışmalardan elde edilenlerle karşılaştırılmışlardır. Kuramsal çalışmalar için bir bilgisayar yazılımı [2,3] hazırlanmıştır. Sargılı beton davranışında Razvi ve Saatçioğlu [17] gerilme-birim deformasyon modeli kullanılmıştır. Hesaplamalarda betonun çekme dayanımı hesaba katılmıştır. Sargılı beton modeli parabolik olarak yükselen tepe noktası öncesi bölüm, lineer olarak azalan tepe noktası sonrası bölüm ve sabit bir gerilme değerinde kalan üçüncü bölümden oluşmaktadır. Tepe noktasındaki gerilme değeri ve buna karşılık gelen birim deformasyon değeri için yanal sargılama etkisi baz olarak alınmıştır. Sargılama basıncı dahil kuvvetlerin dengelenmesi ve kesitin özelliklerinden hesaplanmıştır. Yazılımda kullanılan beton gerilme-birim deformasyon grafiği Şekil 9'da, kuramsal çalışmalardan elde edilen moment-eğrilik grafiklerinin deneysel grafiklerle karşılaştırılması da Şekil 10'da verilmiştir. Hazırlanan bilgisayar yazılımı [2, 3] ile deney elemanlarının moment-eğrilik grafikleri kuramsal olarak elde edilmiştir. Tüm deney elemanlarının deneysel ve kuramsal moment-eğrilik grafikleri Şekil 10'da karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma grafikleri incelendiğinde, kuramsal çalışmalarla deney elemanlarının başlangıç rijitlikleri ve maksimum moment taşıma kapasiteleri oldukça tatmin edici bir şekilde ($\pm \approx 10\%$), elemanların tepe sonrası davranışları ve rijitlik profilleri (süneklikleri) ise genel olarak yeterli bir yaklaşıklıkla tahmin edilmiştir.

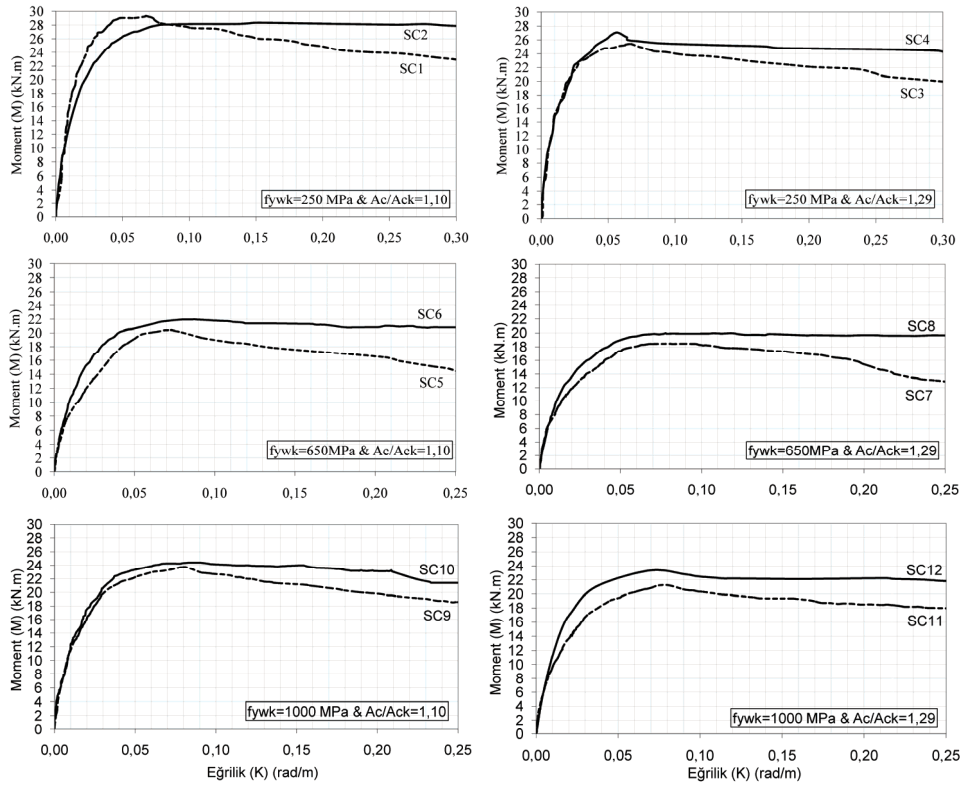
5. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF TEST RESULTS)

Oniki adet fretli kolonun bileşik eğilme ve eksenel yük altında gerçekleştirilen deneylerine göre;

- Bu çalışmada gerçekleştirilmiş fretli kolon deney sonuçlarına göre, değişik akma dayanımlarına sahip fretli dairesel kolon numuneleri yönetmelikteki denklemlere göre değil de önerilen denkleme (Denklemler 3) göre hazırlandıklarında daha sünek bir davranış sergilemişlerdir.

Tablo 3. Deneysel elemanların süneklik karşılaştırmaları (Ductility Calculations for the Test Specimens)

Çift	Eleman	$\frac{A_c}{A_{ck}}$	f_{ywk} (MPa)	M_{max} (kN.m)	K_{max} (rad/m)	K_2 (rad/m)	M_{k2} (kN.m)	$0.85M_{max}$ (kN.m)	K_{k2} (rad/m)	$K_{ultimate}$ (rad/m)	δ_{max} (m)	δ_{85} (m)	μ	μ_k	μ_8
I	SC1	1,10	250	29,2	0,068	0,204	24,7	24,8	0,201	0,318	0,0131	0,0202	0,85	3,0	1,5
	SC2	1,10	250	28,1	0,102	0,306	28,0	23,9	>0,300	0,367	0,0156	>0,0250	1,00	>3,0	>1,6
II	SC3	1,29	250	25,4	0,067	0,201	22,0	21,6	0,245	0,354	0,0119	0,0293	0,87	3,7	2,5
	SC4	1,29	250	27,1	0,057	0,171	25,0	23,0	>0,300	0,302	0,0101	>0,0250	0,92	>5,3	>2,5
III	SC5	1,10	650	20,4	0,073	0,197	16,2	17,3	0,150	0,316	0,0109	0,0177	0,79	2,1	1,6
	SC6	1,10	650	22,0	0,088	0,238	20,8	18,7	>0,250	0,251	0,0126	>0,0350	0,95	>2,8	>2,8
IV	SC7	1,29	650	18,5	0,081	0,219	14,0	15,7	0,197	0,301	0,0098	0,0227	0,76	2,4	2,3
	SC8	1,29	650	20,0	0,078	0,211	19,6	17,0	>0,320	0,320	0,0099	>0,0350	0,98	>4,1	>3,5
V	SC9	1,10	1000	23,1	0,080	0,200	19,2	19,6	0,183	0,265	0,0097	0,0241	0,83	2,3	2,5
	SC10	1,10	1000	23,8	0,084	0,210	22,6	20,2	>0,259	0,260	0,0099	>0,0270	0,95	>3,1	>2,7
VI	SC11	1,29	1000	21,2	0,075	0,188	18,6	18,0	0,243	0,251	0,0099	0,0279	0,88	3,2	2,8
	SC12	1,29	1000	23,3	0,069	0,172	22,2	19,8	>0,268	0,269	0,0103	>0,0330	0,95	>3,9	>3,2



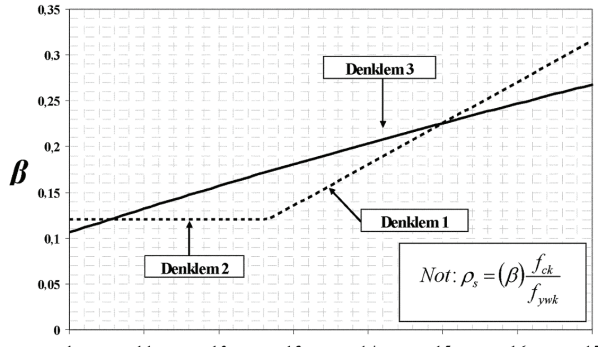
Şekil 7. Deneysel moment-eğrilik grafikleri karşılaştırmaları (Comparison of Experimental Moment-Curvature Diagrams of Test Specimens)

Tablo 4. Beton basınç dayanımındaki sapmanın etkileri (Effect of Variations in Target Concrete Strength)

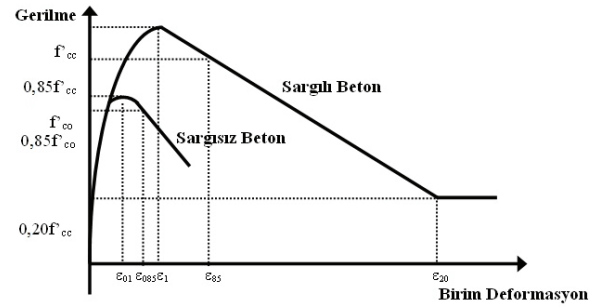
Deney Elemanı	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7	SC8	SC9	SC10	SC11	SC12
Hedef f_{ck} (MPa)	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
Gerçek f_{ck} (MPa)	22,1	26,0	23,3	27,0	23,8	25,3	21,9	25,2	24,2	25,0	22,9	24,4
Gerekli ρ_s (Gerçek f_{ck} 'ye göre) [$\times 10^{-3}$]	10,3	13,3	11,9	18,8	4,4	5,2	4,4	6,9	2,9	3,3	3,1	4,4
Sağlanan ρ_s [$\times 10^{-3}$]	9,1	13,2	10,0	14,1	3,8	4,2	4,1	5,6	2,5	2,7	2,7	3,6
Gerekli ρ_s 'ten sapma (%)	-11,7	-0,8	-16,0	-25,0	-14,5	-19,4	-7,0	-19,1	-16,0	-18,4	-12,4	-18,0
Gerekli Maksimum Eksenel Yük (kN)	349	408	365	424	374	397	344	396	380	393	360	383
Deneydeki Mak. Toplam Eksenel Yük (kN)	347	380	343	381	321	391	321	368	366	354	344	356
Eksenel Yükteki Sapma (%)	-0,6	-6,9	-6,0	-10,1	-14,2	-1,5	-6,7	-7,1	-3,7	-9,9	-4,4	-7,0

Tablo 5. Denklemlerce hesaplanan fret hacimsel oranlarının karşılaştırılması (Comparison of ρ_s Values Calculated according to Equations 1, 2 and 3)

A_c/A_{ck}	ρ_s Yönetmelik (1-2) $\alpha(f_{ck}/f_{ywk})$	ρ_s Önerilen (3) $\alpha(f_{ck}/f_{ywk})$	$\frac{\rho_s(3)}{\rho_s(1,2)}$	A_c/A_{ck}	ρ_s Yönetmelik (1-2) $\alpha(f_{ck}/f_{ywk})$	ρ_s Önerilen (3) $\alpha(f_{ck}/f_{ywk})$	$\frac{\rho_s(3)}{\rho_s(1,2)}$
1,00	0,120	0,106	0,89	1,40	0,180	0,204	1,13
1,05	0,120	0,119	0,99	1,45	0,203	0,215	1,06
1,10	0,120	0,132	1,10	1,50	0,225	0,226	1,00
1,15	0,120	0,145	1,21	1,55	0,248	0,236	0,96
1,20	0,120	0,157	1,31	1,60	0,270	0,247	0,91
1,25	0,120	0,169	1,41	1,65	0,293	0,257	0,88
1,30	0,135	0,181	1,34	1,70	0,315	0,268	0,85
1,35	0,158	0,192	1,22	1,75	0,338	0,278	0,82

**Şekil 8.** Denklemlerce hesaplanan fret hacimsel oranlarının grafiksel karşılaştırılması (Graphical Comparison of ρ_s Values Calculated according to Equations 1, 2 and 3)

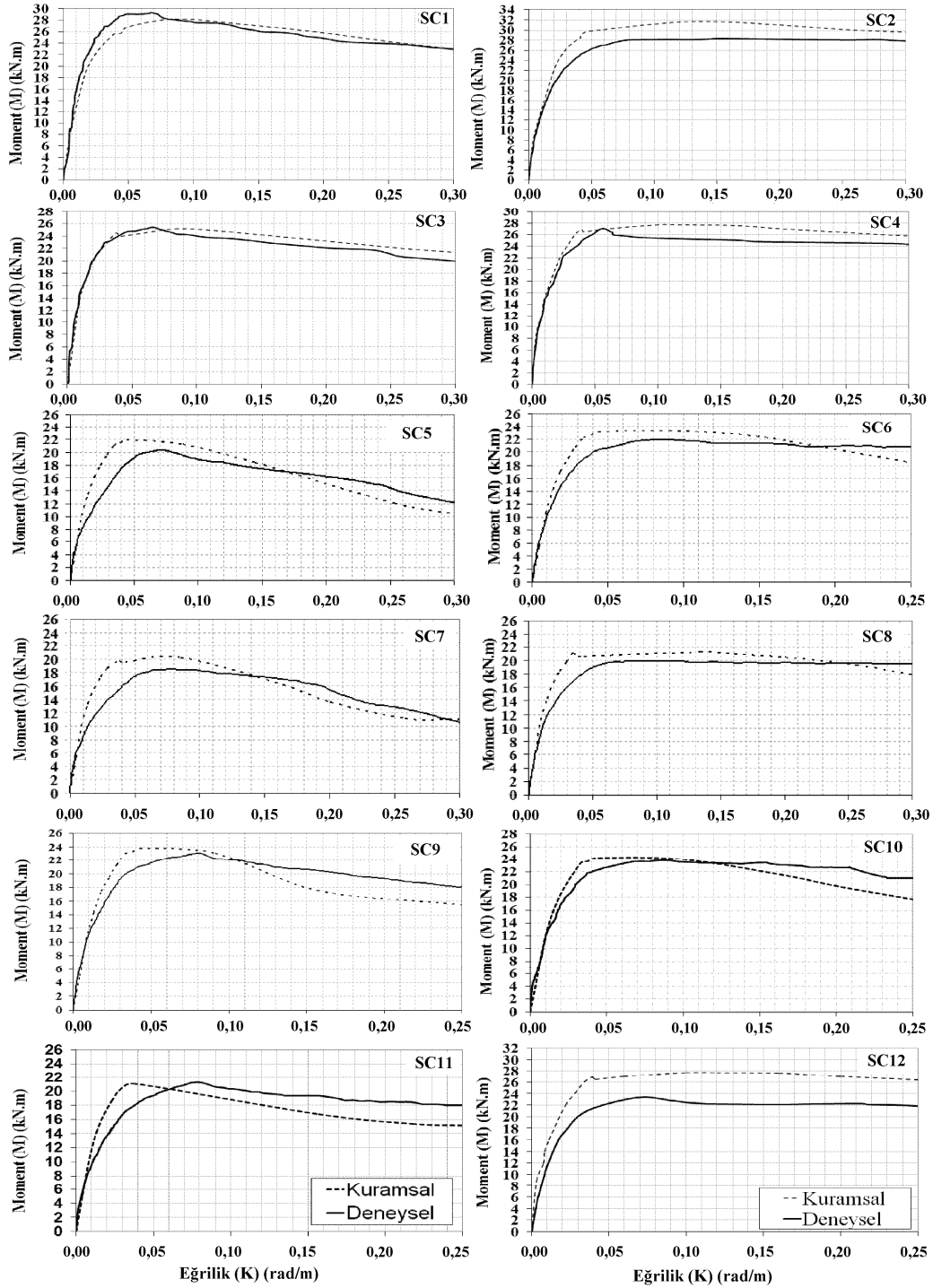
- Fret miktarı, fret aralığı fretli kolonların sünekliğini etkilemektedir. Fretli kolonlarda sünek bir davranış elde edebilmek için, fret aralığı ile ilgili limitler olmalıdır. Çünkü fret aralığı azaldığında süneklik artmaktadır.
- Deneylerde kullanılan fretin çekme testlerinde ulaşabildiği maksimum uzama değeri azaldığında deney elemanının ulaşabildiği maksimum eğrilik de azalmaktadır. Fretin uzama özelliği deney elemanının davranışını etkilemektedir.
- Deneylerin ileri safhalarında, deney elemanlarının kabuk betonlarında yerel çatlama, ezilme ve dökülmeler olmuştur. Bu durum, önerilen denklemin (Denklem 3) türetilmesinde başlangıç noktasıdır.
- Yönetmelik ve önerilen (Denklem 3) denkleme göre, fretin akma dayanımı yükseldikçe

**Şekil 9.** Beton gerilme-birim deformasyon eğrisi (Razvi-Saatçioğlu) (Concrete stress-strain curve (Razvi-Saatcioglu Model))

- kullanılması gereken fret hacimsel oranı azalmaktadır. Yüksek dayanımlı fretin yüksek dayanımlı betonla kullanılması gerekmektedir.
- Yönetmeliklerde verilen iki denklemin yerine verilecek tek bir denklemle fret hacimsel oranının hesaplanması daha pratik olacaktır.

Gerçekleştirilen kuramsal çalışmaların sonuçlarıyla deneysel çalışmaların sonuçlarının karşılaştırılmasından;

- Hazırlanan yazılımla yapılan çalışmalardan elde edilen kuramsal moment-eğrilik grafikleri ile deneysel çalışmalardan elde edilen grafiklerin birbirlerine uyumlu olduğu,
- Sargılı beton davranışını Razvi ve Saatçioğlu gerilme-birim deformasyon eğrisinin başarıyla modelleyebildiği gözlemlenmiştir.



Şekil 10. Kuramsal ve deneysel moment-eğrilik grafiklerinin karşılaştırılması (Comparison of analytical and experimental moment-curvature diagrams)

6. SONUÇ (CONCLUSION)

Oniki adet fretli kolon, bileşik eğilme ve eksenel yük altında test edilmişlerdir. Önerilen denkleme (Denklem 3) göre hazırlanan kolonlar, yönetmeliklerde verilen iki denklemden birine göre hazırlanan kolonlardan daha sünek davranmışlardır. Yapılacak daha fazla kuramsal ve deneysel çalışmalardan sonra önerilen denklemdeki (Denklem

3) katsayıların kalibre edilmesiyle birlikte yeni denklem, yönetmeliklerde verilen denklemlerin yerine kullanılabilir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Desteklerinden dolayı Sn. Prof. Dr. Uğur Ersoy ve Sn. Prof. Dr. Güney Özcebe'ye sonsuz teşekkürler.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

A_c	: Fretli kolon kesitinin toplam beton alanı
A_{ck}	: Fretli kolonun çekirdek beton alanı
D	: Fretli kolonun çekirdek betonunun çapı
D_g	: Fretli kolon kesitinin çapı
e	: Eğilme etkisi verecek yükün kolon kesit merkezinden uzaklığı
f_{ck}	: Betonun karakteristik silindirik basınç dayanımı
f_{su}	: Kolon boyuna donatısının karakteristik alma dayanımı
f_{yw}	: Enine donatının (fret) karakteristik akma dayanımı
F_{c1}	: Erken yükleme safhalarında betondaki basınç kuvvetlerinin bileşkesi
F_{c2}	: İleri yükleme safhalarında betondaki basınç kuvvetlerinin bileşkesi
K_2	: Önceden belirlenmiş eğrilik değeri (K_{max} değerinin 2.5, 2.7 veya 3.0 katı)
K_{85}	: Kolonun maksimum moment taşıma kapasitesinin %85'i değerindeki kapasiteye denk gelen tepe noktası sonrası eğrilik değeri
K_{max}	: Kolonun maksimum moment taşıma kapasitesindeki eğrilik değeri
$K_{ultimate}$: Deneysel esnasında kolonun ulaştığı en yüksek eğrilik değeri
M_{K2}	: Kolonun önceden belirlenmiş K_2 eğrilik değerindeki moment taşıma kapasitesi
M_{max}	: Kolonun maksimum moment taşıma değeri
P	: Eğilme etkisini verecek yük
N	: Kolon üstüne uygulanan aksel yük
N_d	: Kolon üstüne uygulanan toplam yük
X_1	: F_{c1} yükünün moment kolu (kesit kütle merkezinden)
X_2	: F_{c2} yükünün moment kolu (kesit kütle merkezinden)
δ	: Çatlamanın olduğu kesitin yanıl ötelenmesi (lineer enterpolasyonla)
ϵ_c	: Betonun ezilmeye en yakın lifindeki deformasyon değeri
ρ_s	: Fret hacimsel oranı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ersoy, U. ve Özcebe G., "Confinement Effect in Spiral Columns – A Discussion," **Fourth National Conference on Earthquake Engineering, Turkish National Society of Earthquake Engineering**, Ankara, Eylül 1997.
2. Baran, M., **An Experimental Investigation on the Minimum Confinement Reinforcement Requirement of Spiral Columns (in English)**, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara, 1999.
3. Dinçer, S., **A Study on the Minimum Confinement in Spiral Columns**, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara, 1999.
4. Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (318R-02)," American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2002.
6. El Dash, K.M. ve Ahmad, S.H., "A Model for Stress-Strain Relationship of Spirally Confined Normal and High-Strength Concrete Columns," **Magazine of Concrete Research**, Cilt 47, No 171, 177-184, Haziran 1995.
7. Priestley, M.J.N., Park, R. ve Potangaroa, R.T., "Ductility of Spirally-Confined Concrete Columns," **Journal of the Structural Division**, ASCE, 181- 202, Ocak 1981.
8. Martinez, S., Nilson, A. ve Slate, F. "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns," **ACI Journal**, 431-442, Eylül-Ekim 1984.
9. Cusson, D. ve Paultre, P., "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete," **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Cilt 121, No 3, 468-477, 1995.
10. Ahmad, S.H. ve Shah, S.P., "Stress-Strain Curves of Concrete Confined by Spiral Reinforcement," **ACI Journal**, 484-490, Kasım-Aralık 1982.
11. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. ve Park, R., "Observed Stress-Strain Behaviour of Confined Concrete," **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Cilt 114, No 8, 1827-1849, 1988.
12. Zahn, F.A., Park, R. ve Priestley, M.J.N., "The Use of Grade 380 Steel for Transverse Confining Reinforcement in Columns," **Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering**, Cilt 20, No 2, 99-115, Haziran 1987.
13. Sheikh, S.A. ve Toklucu, M.T., "Reinforced Concrete Columns Confined by Circular Spirals and Hoops," **ACI Structural Journal**, 542-552, Eylül-Ekim 1993.
14. Cusson, D. ve Paultre, P., "Stress-Strain Model for Confined High-Strength Concrete," **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Cilt 121, No 3, 468-477, 1995.
15. Samra, R., Nidal, D. A. A. ve Madi, U.R., "Transverse Steel Content in Spiral Concrete Columns Subjected To Eccentric Loading," **ACI Structural Journal**, 1-7, Temmuz-Ağustos 1996.
16. Özkaya, C., **An Analytical Study on Minimum Confinement in Spiral Columns**, Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Müh. Bölümü, ODTÜ, Ankara, 2005.
17. Saatcioglu, M. ve Razvi, S. R., "Strength and Ductility of Confined Concrete," **Journal of Structural Engineering**, ASCE, Cilt 118, No 6, 1590-1607, 1992.

