

İki Eksenli Eğilme ve Eksenel Yüke Maruz Betonarme Kolonların Yük-Deplasman Eğrileri

Serkan TOKGÖZ*
Cengiz DÜNDAR**

ÖZ

Sunulan çalışmada, iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz betonarme kolonların yük-deplasman eğrilerinin belirlenmesi için teorik bir yöntem önerilmektedir. Önerilen yöntem çeşitli donatı düzenini içeren poligon şekilli geometriye sahip tüm kesitlere uygulanabilmektedir. Önerilen yöntemde malzemelerin doğrusal olmayan davranışları esas alınmaktadır. Bu nedenle betonda oluşan gerilmeleri hesaplamak için beton basınç bölgesi şeritlere bölünmektedir. Önerilen yöntem, iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında test edilen kare ve L-kesitli betonarme kolon numunelerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Kolon numunelerin deney parametreleri olan beton basınç dayanımı, donatı akma dayanımı, kesit özellikleri ve dışmerkezlilik kullanılarak hesaplanan teorik yük-deplasman eğrileri deneysel olarak elde edilen eğrilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar uyum içinde bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kolon, gerilme-şekil değiştirme, yük-deplasman eğrileri

ABSTRACT

Load-Deflection Curves of Reinforced Concrete Columns Subjected to Biaxial Bending and Axial Load

In the presented study, a theoretical method is proposed for the determination of the load-deflection curves of reinforced concrete columns subjected to biaxial bending and axial load. The proposed method can be applicable to the polygonal sections consisted of various reinforcing steel configurations. In the proposed procedure the nonlinear behaviour of the materials are considered. Therefore, the concrete compression zone is divided into segments for the computation of concrete stresses. The proposed procedure has been compared with the results of square and L-shaped reinforced concrete columns tested under biaxial bending and axial load. The theoretical load-deflection curves computed using test parameters of concrete compression strength, yield strength of steel, cross section properties and eccentricities of column specimens have been compared with the experimental curves and the results are found to be in good agreement.

Keywords: Reinforced concrete column, stress-strain, load-deflection curves

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 16.01.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2010 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin - stokgoz@mersin.edu.tr

** Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana - dundar@cu.edu.tr

1. GİRİŞ

Betonarme kolonlar yüksek katlı yapılarda, köprülerde vb. yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle bina köşelerinde yer alan betonarme kolonlar iki eksenli eğilme ve eksenel yük etkisine maruz kalırlar. Bu tür kolonlar kare veya dikdörtgen kesitli olabildiği gibi poligon kesitli olarak da tasarlanabilmektedir. Betonarme kolonların davranışının bilinmesi yapının gerçekçi bir şekilde analiz ve tasarımı için oldukça önemlidir [1-3]. İki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz betonarme kolonların davranışı geçmiş yıllardan günümüze kadar bir çok araştırmacı tarafından deneysel ve teorik olarak incelenmiştir. Furlong [4], dikdörtgen kesitli betonarme kolon numuneleri ile uçları dairesel kesitli betonarme kolon numunelerini iki eksenli eğilme ve eksenel basınç testine tabi tutmuş ve elde ettiği deneysel sonuçları önerdiği teorik yöntem ile karşılaştırmıştır. Hsu [5-7], iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz L-kesitli, kanal kesitli ve T-kesitli betonarme kolon elemanlarının taşıma gücü kapasitelerini ve yük altında meydana gelen deformasyon davranışlarını belirlemek üzere deneysel ve teorik çalışmalar sunmuştur. Rangan [8], tek eksenli eğilme ve eksenel yük altında dikdörtgen kesitli narin betonarme kolonların analizine yönelik, kalıcı yük etkisinden oluşan sünme deplasmanlarının da dikkate alındığı bir yöntem önermiştir. Bazant vd. [9], tek eksenli eğilme altında, narinlik etkisinin de dahil edildiği kolon etkileşim diyagramlarının hesabı için bir yöntem sunmuşlardır. Wang ve Hsu [10], iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında betonarme kısa ve narin kolonların yük-moment-eğrilik-deplasman ilişkilerini belirlemek amacı ile çeşitli geometrideki kesitler, yükseklik boyunca değişken kesitler ve çeşitli malzemeler içeren kesitler için bir nümerik analiz metodu önermişlerdir. Dündar ve Şahin [11,12], iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında gelişigüzel geometriye sahip kolonların analiz ve tasarımına yönelik bir yöntem sunmuşlar ve yönteme dayalı bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Ahmad ve Weerakon [13], iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında dikdörtgen kesitli betonarme narin kolonların davranışı ve taşıma gücü hesabı için doğrusal olmayan bir yöntem sunmuşlardır. Ersoy ve Özcebe [14], eğilme ve eksenel yük altındaki betonarme elemanların moment-eğrilik ilişkilerinin analitik olarak belirlenebilmesi için malzemelerin gerçek davranışını esas alan bir yöntem önererek yöntemi uygulayan bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Çalışmada, bilgisayar programı ile yapılan çözümler deneysel verilerle karşılaştırılmış ve program çıktılarının betonarme eleman davranışını başarılı bir şekilde yansıttığı gösterilmiştir. Rodriguez ve Ochoa [15], iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında gelişigüzel geometriye sahip betonarme kısa kolonların karşılıklı etki diyagramlarının hesabı ve kolonların analiz ve tasarımı için bir yöntem sunmuşlardır. Yalcin ve Saatcioglu [16], eksenel yük ve yanal yük etkisi altındaki betonarme kolonların elastik olmayan analizine yönelik bir yöntem sunmuşlar ve bir bilgisayar programı geliştirmişlerdir. Yöntemde beton sargı etkisi, boyuna donatının burkulması, yük-deplasman etkisinden oluşan ikinci mertebeye deformasyonları ve eğilmeden oluşan elastik olmayan deformasyon bileşenleri de dikkate alınmıştır. Hong [17], iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz gelişigüzel geometriye sahip betonarme narin kolonların taşıma gücü analizine yönelik bir yöntem önermiştir. Furlong vd. [18], betonarme kolonların analiz ve tasarımı için bir yöntem önererek, yöntemin geçerliliğini göstermek için literatürde mevcut deneysel çalışmalar analiz edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Canbay vd. [19], eksantrik yüklemeye maruz yüksek dayanımlı betonarme kolonların deneysel ve teorik olarak davranışını incelemişlerdir. Deney sonuçlarını, önerdikleri teorik yöntem ile analiz ederek karşılaştırmışlardır. Tokgoz [20] ve Dündar vd. [21], betonarme kolonların davranışını

inceleyen deneysel ve teorik bir çalışma sunmuşlardır. Deneysel çalışma kapsamında kare ve L-kesitli betonarme kolonlar hazırlanarak iki eksenli eğilme ve eksenel yük altında test edilmiş ve elde edilen taşıma gücü kapasiteleri, çeşitli gerilme dağılım modellerini esas alan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Majewski vd. [22], eksantrik yüke maruz betonarme kolonların analizi için temeli Sonlu Elemanlar Yöntemi'ne dayalı narinlik etkisinin de dahil edildiği bir yöntem önermişlerdir.

Sunulan çalışmanın amacı, iki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz betonarme kolonların davranışının ve yük-deplasman ilişkisinin deneysel ve teorik olarak belirlenmesidir. Çalışmada, malzemelerin doğrusal olmayan davranışını esas alan, ikinci mertebe momentlerinden oluşan narinlik etkisinin de dahil edildiği teorik bir yöntem önerilmiş ve yöntemi uygulayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında kare ve L-kesitli betonarme kolon numuneleri hazırlanarak iki eksenli eğilme ve kısa süreli eksenel yük altında test edilmiştir [20,21]. Kolon numunelerin testinden elde edilen veriler önerilen teorik yöntem ile analiz edilerek, kolonların deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri elde edilmiş ve sonuçlar grafik ortamda sunulmuştur. Analiz sonucunda bulunan değerlerin deneysel değerlerle uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

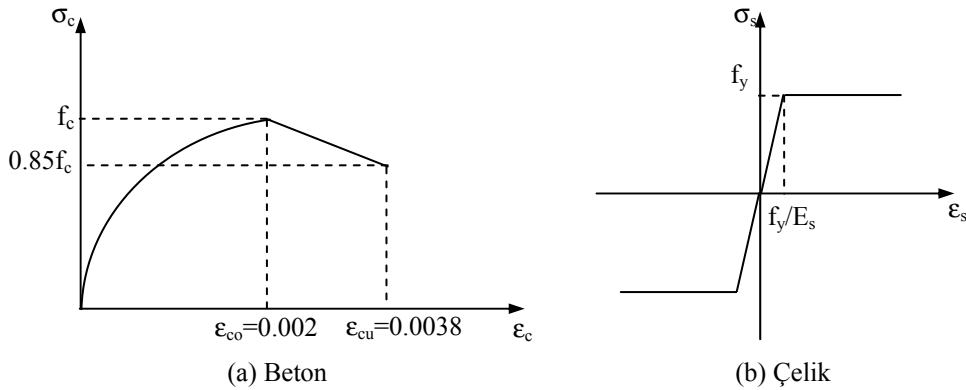
2. ANALİZ YÖNTEMİ

İki eksenli eğilme ve eksenel yüke maruz poligon kesitli betonarme kolonların davranışını tanımlayan ve kolonların yük-deplasman eğrilerinin elde edildiği bir yöntem sunulmaktadır. Yöntemde, malzemelerin (beton ve çelik) doğrusal olmayan davranışları esas alınmaktadır.

2.1. Temel Varsayımlar

1. Eğilmeden önce düzlem olan kesitler eğilmeden sonra da düzlem kalır (Bernoulli-Navier hipotezi).

2. Betonun gerilme-birim deformasyon ilişkisi parabol ve doğrusal olarak Şekil 1(a)'da tanımlanmaktadır (Hognestad vd. [23]).



Şekil 1. Beton ve çelik için gerilme-birim deformasyon ilişkisi

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^2 \right], \quad (0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co}) \quad (1)$$

$$\sigma_c = f_c \left[1 - 0.15 \left(\frac{\varepsilon_c - \varepsilon_{co}}{\varepsilon_{cu} - \varepsilon_{co}} \right) \right], \quad (\varepsilon_{co} < \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu}) \quad (2)$$

burada, ε_c , ε_{co} ve ε_{cu} sırasıyla betonda oluşan birim deformasyon, maksimum gerilmeye karşılık gelen birim deformasyon ve modelde izin verilen maksimum birim kısalmayı temsil etmektedir. σ_c herhangi bir noktadaki gerilme ve f_c beton basınç dayanımıdır.

3. Donatı için çekme ve basınçta elasto-plastik davranış kabul edilmektedir (Şekil 1 (b)). Donatıda oluşan gerilme;

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (3)$$

burada, E_s , ε_s ve f_y sırasıyla, çeliğin elastisite modülü, birim deformasyonu ve akma dayanımıdır.

4. Beton ve donatı arasında tam aderans vardır.
5. Betonun sünme ve büzülme etkisi ihmal edilmektedir.
6. Kesme deformasyonları ihmal edilmektedir.

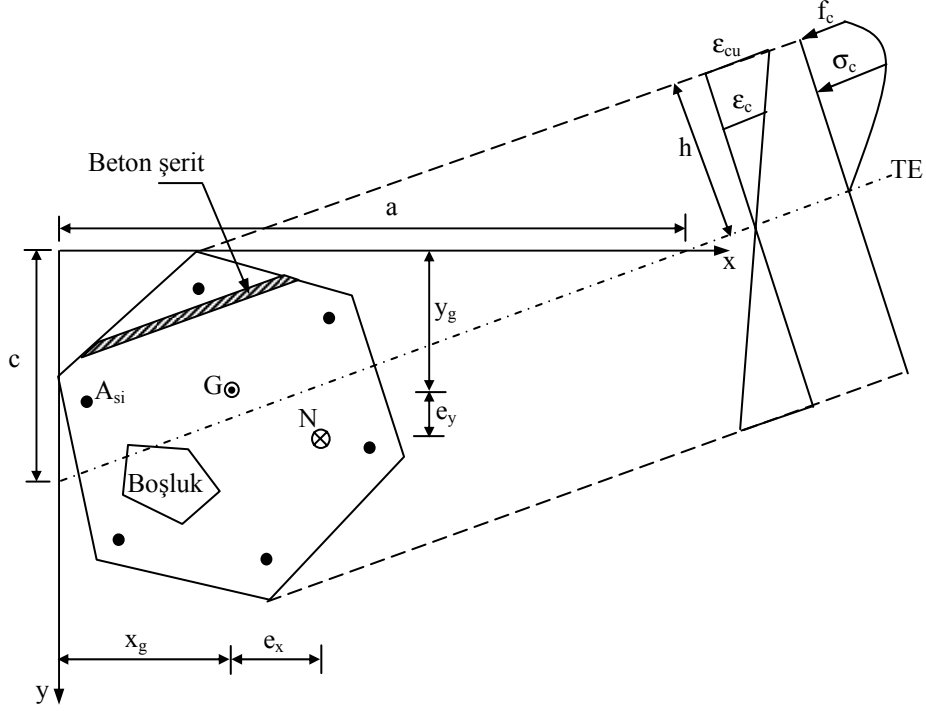
Bu çalışmada donatı çeliğinin pekleşmesi ihmal edilmiştir. Daha önce yapılan çalışmalarda, pekleşmenin ihmal edilmesinin eksenel yüklü, simetrik donatılı elemanlarda önemli bir hata getirmeyeceği görülmüştür ([9-13]).

2.2. Kesitte Oluşan Birim Deformasyon ve Gerilmelerin Hesabı

Dikdörtgen dışı geometriye sahip betonarme bir kesit x-y koordinat sisteminde Şekil 2'de gösterilmektedir. Kesite e_x ve e_y dışmerkezliği ile eksenel kuvvet (N) etki etmekte ve seçilen x-y eksen takımına göre poligon kesitin ağırlık merkezinin (G) koordinatları x_g ve y_g olarak tanımlanmaktadır.

Eğilmeden önce düzlem olan kesitlerin, eğilmeden sonra da düzlem kaldığı varsayımına göre kesitte oluşan birim deformasyon dağılımı en çok zorlanan noktada ε_{cu} olmak üzere, eğik oluşan tarafsız eksene göre doğrusal orantılı olarak gösterilmektedir. Tarafsız eksen konumu seçilen x-y eksen takımına göre (a) ve (c) gibi iki parametre ile tanımlanmakta ve birim deformasyon dağılımı, sözü edilen parametreler cinsinden ifade edilmektedir. Kesitin herhangi bir noktasındaki birim deformasyon değeri aşağıda verilen ifade ile hesaplanır:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{cu} \left[\left(\frac{y_i}{c} + \frac{x_i}{a} \right) - 1 \right] \quad (4)$$



Şekil 2. Poligonal geometriye sahip betonarme kesit ve gerilme dağılımı

Sunulan analiz yönteminde, beton için herhangi bir gerilme–birim deformasyon ilişkisi kullanmaya olanak sağlamak üzere, beton basınç bölgesi tarafsız eksen konumuna paralel olarak şeritlere ayrılmaktadır. Her bir şerit ağırlık merkezinde Denklem (4) ile hesaplanan birim deformasyon ile, beton için esas alınan gerilme–birim deformasyon ilişkisi kullanılarak analiz ve tasarımda yer alacak olan beton gerilmeleri hesaplanabilmektedir ([20,21,24]). Bu durumda, betonarme kolon kesiti, analiz ve tasarım denge denklemlerinin oluşturulabilmesi için poligon kesit ve beton şerit geometrik özellikleri (alan, ağırlık merkezi koordinatları) hesap edilir ([20]).

2.3. Eleman Denge Denklemleri

Betonarme kesite etki eden kuvvetler dikkate alındığında, oluşturulacak olan kuvvet (N) ve moment (M_x, M_y) denge denklemleri gerilmeler (σ) türünden aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$N = \int_A \sigma dA ; \quad M_x = \int_A \sigma y dA ; \quad M_y = \int_A \sigma x dA \quad (5)$$

İki Eksenli Eğilme ve Eksenel Yüke Maruz Betonarme Kolonların ...

Statik dengenin sağlanabilmesi için kesite etki eden dış kuvvetin ve eğilme momentlerinin, iç kuvvetlerden oluşan eksenel kuvvet ve momentlere eşit olması gerekir. Bu durumda eleman kuvvetleri toplam cinsinden ifade edilecek olursa, kuvvet ve moment denge denklemleri aşağıdaki gibi oluşur:

$$\sum_k^t \bar{A}_{ck} \sigma_{ck} - \frac{A_{st}}{m} \sum_i^m \sigma_{si} - N = 0 \quad (6)$$

$$\frac{A_{st}}{m} \sum_i^m (y_i - y_g) \sigma_{si} - \sum_k^t \bar{A}_{ck} \sigma_{ck} (\bar{y}_{ck} - y_g) - M_x = 0 \quad (7)$$

$$\frac{A_{st}}{m} \sum_i^m (x_i - x_g) \sigma_{si} - \sum_k^t \bar{A}_{ck} \sigma_{ck} (\bar{x}_{ck} - x_g) - M_y = 0 \quad (8)$$

burada, A_{st} , kesitteki toplam donatı alanını; m , toplam donatı sayısını σ_{ck} , beton basınç bölgesinin k 'nci şeritinin ağırlık merkezinde hesaplanan beton basınç gerilmesi; \bar{A}_{ck} ve $(\bar{x}_{ck}, \bar{y}_{ck})$, k 'nci şeritin alan ve ağırlık merkezinin koordinatlarını; t , beton basınç bölgesi şerit sayısını; σ_{si} , i 'nci donatının gerilmesini; x_i ve y_i , i 'nci donatının koordinatlarını göstermektedir.

Oluşturulan denge denklemlerinde (a , c , A_{st}) olmak üzere üç bilinmeyen vardır. Tasarım için elde edilen ve doğrusal olmayan denklem takımı geliştirilen bilgisayar programı yardımıyla Newton-Raphson metodu kullanılarak çözülmektedir [12]. Denklem (7,8) tarafsız eksen konumunu belirleyen parametreler (a,c) için çözümlenerek, Denklem (6)'da yerine konulduğunda kesit taşıma gücü kapasitesi (N_u) aşağıdaki ifade ile elde edilmektedir:

$$N_u = \sum_k^t \bar{A}_{ck} \sigma_{ck} - \frac{A_{st}}{m} \sum_i^m \sigma_{si} \quad (9)$$

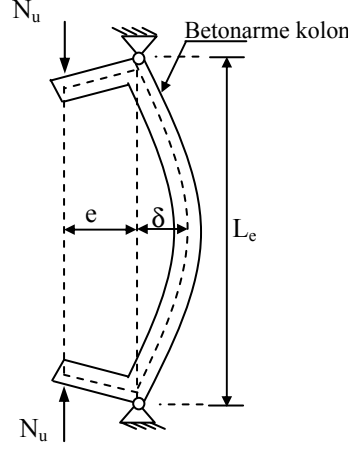
2.4. Yük-Deplasman Eğrileri

Betonarme kolonların yük-deplasman eğrilerinin teorik olarak belirlenmesi için temel stabilite analizi kullanılmaktadır [8,25]. İki ucu mafsallı betonarme kolon ve kolon etkili boyu (L_e) Şekil 3'de gösterilmektedir.

İki ucu mafsallı eğilmiş bir betonarme kolonun eğri denklemi Sinüs fonksiyonu ile tanımlanacak olursa;

$$u(x) = \delta \text{Sin} \left\{ \frac{\pi x}{L_e} \right\} \quad (10)$$

şeklinde ifade edilir.



Şekil 3. İki ucu mafsalı eğilmiş betonarme kolon

Denklem (10)'un iki kez türetilmesi ile betonarme kolonun orta noktasında oluşan eğrilik ifadesi aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\varphi = \frac{d^2u}{dx^2} = \frac{\pi^2}{L_e^2} \delta \text{Sin} \left\{ \frac{\pi x}{L_e} \right\} \quad (11)$$

Betonarme kolonlarda oluşan eğrilik ayrıca, birim deformasyon dağılımından aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\varphi_x = \frac{\varepsilon_c}{c} \quad ; \quad \varphi_y = \frac{\varepsilon_c}{a} \quad (12)$$

Betonarme kolonların orta bölgesinde her iki yönde oluşan deplasman, denklemlerde $x = y = \frac{L_e}{2}$ yazılmak suretiyle;

$$\delta_x = \varphi_x \frac{L_e^2}{\pi^2} \quad ; \quad \delta_y = \varphi_y \frac{L_e^2}{\pi^2} \quad (13)$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda betonarme kolonlara etki eden iki yönlü eğilme momenti aşağıda verildiği gibi ifade edilir:

$$M_x = N(e_y + \delta_y) \quad ; \quad M_y = N(e_x + \delta_x) \quad (14)$$

Kolonların analiz ve yük–deplasman eğrilerinin belirlenmesinde Denklem (14)'de ifade edilen momentler tasarım ve analiz için yazılan denge denklemlerini sağlarlar.

2.5. Analiz Adımları

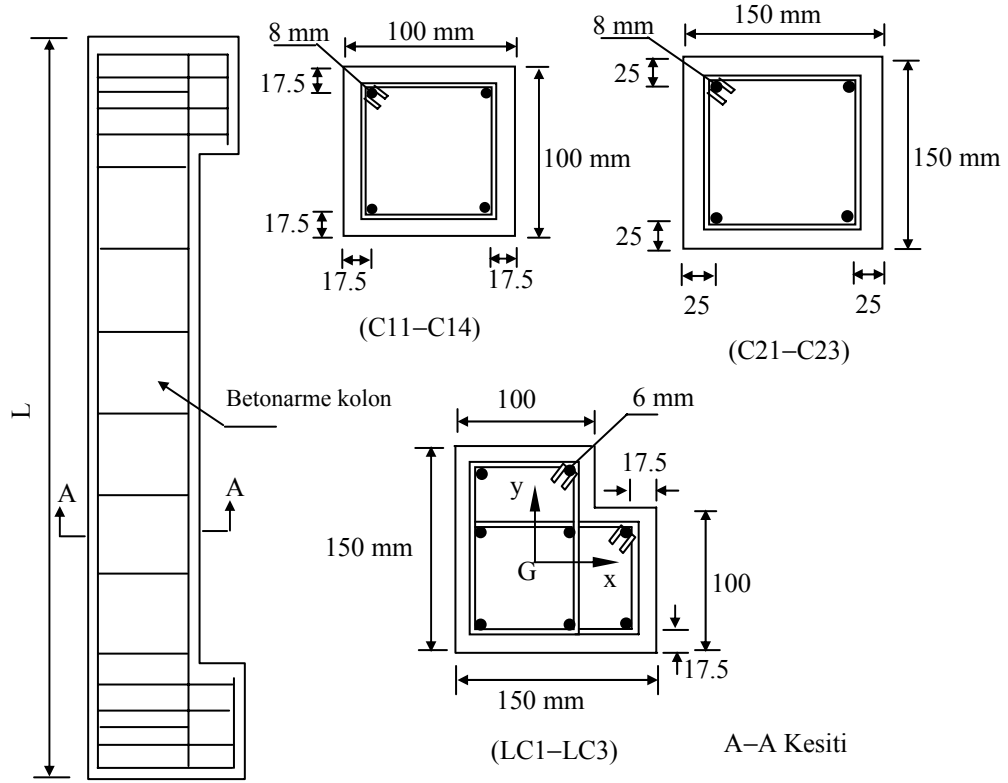
Betonarme kolonların yük–deplasman ilişkisinin belirlenmesinde izlenen analiz yöntemi adımları aşağıda ifade edildiği gibidir:

1. Her bir analiz için bir maksimum birim deformasyon değeri seçilir. İzin verilen maksimum birim deformasyon değeri 0.0002 ile 0.005 arasında kabul edilir.
2. Çözümde iterasyona başlangıç adımında tarafsız eksen konumunu tanımlayan parametreler (a,c) tahmin edilir.
3. Tarafsız eksen konumunun tanımlanması ile beton basınç bölgesi geometrik özellikleri hesaplanır. Malzemelerde oluşan birim deformasyon değerleri Denklem (4)'den ve karşılık gelen gerilmeler malzemeler için kabul edilen gerilme–birim deformasyon ilişkilerinden elde edilir ($\sigma=f(\epsilon)$).
4. Beton ve donatı kuvvetleri hesaplanır.
5. Denge denklemleri kontrol edilir. Denge denklemleri sağlanmıyorsa, denge denklemleri sağlanana kadar başlangıç değerleri değiştirilmek suretiyle analiz tekrarlanır.
6. Denge denklemleri sağlandığında, seçilen birim deformasyon değeri için yük (N) ve iki yöndeki deplasman değerleri (δ_x, δ_y) elde edilmiş olur.
7. Yeni bir birim deformasyon değeri seçilerek 2. adıma gidilir ve analiz işlemleri tekrarlanır. Böylece çok sayıda yük ve karşılık gelen deplasman değerleri hesaplanarak betonarme kolonlara ait yük–deplasman eğrileri elde edilir.

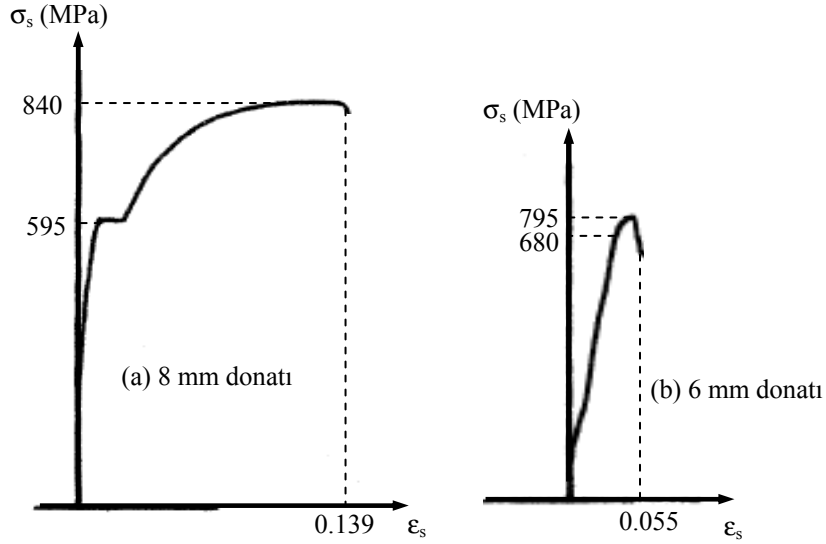
3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında, bir dizi kare ve L-kesitli betonarme kolon numuneleri hazırlanarak, kolonların davranışının araştırılması ve yük–deplasman ilişkilerinin elde edilmesi amacı ile iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altında iki ucu mafsallı olarak test edilmiştir ([20,21]). Test edilen kolonların deney düzeneği ve deneyde gözlenen davranışları Dunder vd. [21] tarafından yayımlanmıştır. Deneysel çalışmada test edilen, kare kesitli (C11–C14, C21–C23) ve L-kesitli (LC1–LC3) betonarme kolon numuneleri kesit özellikleri Şekil 4'de gösterilmektedir.

Test edilen kare kesitli betonarme kolon numuneler akma dayanımı 550 MPa olan 8 mm çapında nervürlü boyuna donatı ve akma dayanımı 630 MPa olan 6.5 mm çapında nervürlü etriye donatısı ile tasarlanmıştır. L-kesitli betonarme kolon numuneleri ise akma dayanımı 630 MPa olan 6 mm çapında nervürlü boyuna donatı ve etriye donatısı ile tasarlanmıştır (Şekil 4). Boyuna donatıların deneysel olarak elde edilen tipik gerilme–birim deformasyon grafikleri Şekil 5(a,b)'de verilmiştir. Deneysel olarak ölçülen boyuna donatı maksimum dayanım ve birim kopma uzama değerleri Çizelge 1'de sunulmuştur.



Şekil 4. Hazırlanan betonarme kolonların kesit özellikleri ([20,21])



Şekil 5(a,b). Boyuna donatı gerilme-birim deformasyon eğrileri

Çizelge 1. Boyuna donatı mekanik özellikleri

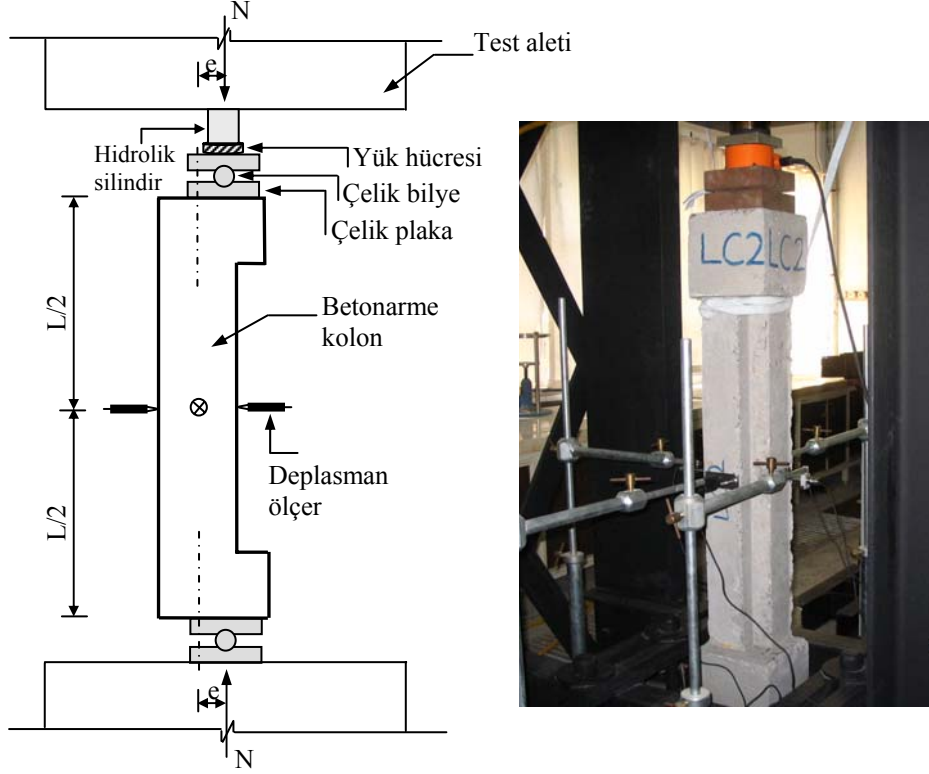
Donatı çapı (mm)	Maksimum dayanım (MPa)	Birim kopma uzaması (%)
8	840	14
6	795	5.5

Test edilen betonarme kolon numunelerin ortalama beton basınç dayanım değerleri, o kolona ait standart silindir numunelerin (150×300 mm) eksenel basınç altında testinden elde edilmiştir ([21]). Test edilen betonarme kolon numunelerin boyu (L), ortalama beton basınç değeri (f_c), uygulanan yükün dışmerkezlik değeri (e_x, e_y), e/h değeri ve etriye çap ve aralığı (ϕ/s) değerleri Çizelge 2’de sunulmuştur.

Çizelge 2. Betonarme kolon numune özellikleri

Kolon no.	L (mm)	f_c (MPa)	e_x (mm)	e_y (mm)	e/h	ϕ/s (mm/mm)
C11	1300	32.27	35	35	0.35	6.5/105
C12	1300	47.86	40	40	0.40	6.5/105
C13	1300	33.10	35	35	0.35	6.5/105
C14	1300	29.87	45	45	0.45	6.5/125
C21	1300	31.70	40	40	0.27	6.5/105
C22	1300	40.76	50	50	0.33	6.5/105
C23	1300	34.32	50	50	0.33	6.5/105
LC1	1300	35.12	36.25	36.25	0.24	2-6/100
LC2	1300	32.77	41.25	41.25	0.28	2-6/110
LC3	1300	44.88	46.25	46.25	0.31	2-6/130

Test aletine düşey konumda yerleştirilen betonarme kolon numunelerin testinde, elemanların dış merkezliği sabit tutulmuş ve eksenel yük sıfırdan başlayıp aşamalı olarak göçme oluşuncaya kadar belirli hızda (1 kN/sn) artırılarak uygulanmıştır. Uygulanan eksenel yük ve yüke karşılık gelen deplasmanlar zamana bağlı olarak elektronik data toplama sistemi ile bilgisayara kaydedilmiştir. Data toplama sistemi yük ölçer, deplasman ölçer, data toplayıcı ve bilgisayardan oluşmuştur. Betonarme kolonların testinde kullanılan yük ölçer, hidrolik silindir ile çelik plaka arasına yerleştirilmiştir. Kolon numunelerde oluşan yanal deplasmanlar, kolonun orta bölgesine yerleştirilen dört adet deplasman ölçerler ile iki yönde elde edilmiştir. Deney elemanın rijit cisim olarak ötelenmesi ölçülmemiş ve ihmal edilmiştir. Betonarme kolon deney düzeneği şematik olarak Şekil 6’da görülmektedir ([21]).



Betonarme kolon numunelerin testi sırasında ilk çatlaklar çekme bölgesinde ve yaklaşık olarak numunelerin ortasında meydana gelmiştir. Uygulanan aksel yükün artması ile birlikte çekme bölgesinde oluşan ilk çatlakların genişlediği görülmüş ve numune boyunca yeni çatlaklar oluşmuştur. Maksimum yüke ulaşıldığında numunelerde basınç bölgesinde ezilmeler gözlenmiş ve en çok zorlanan köşelerde donatı akma konumuna ulaşmıştır. Bu aşamadan sonra elemanın yük taşıma kapasitesinde hızla azalma gözlenirken, yanıl deformasyonlar ise hızla artmıştır. Test edilen kolon numunelerde kırılma anında basınç bölgesindeki donatının burkulduğu gözlenmiştir. Bu aşamadan sonra deney sonlandırılmıştır. Yapılan deneylerde numunelerde gözlenen kırılma başlıklarda değil, kolon ortasında veya orta bölgeye yakın yerlerde meydana gelmiştir. Bu durum numunelerin öngörülen tasarıma uygun davrandığını göstermektedir. Deneylerde gözlenen tipik kırılma biçimi Şekil 7’de sunulmuştur. Deneysel çalışma kapsamında test edilen kolonlar için, yükleme başlama aşamasından göçme oluşuncaya kadar geçen süre içerisinde yük–deplasman davranışının deneysel ve teorik olarak karşılaştırılması amacı ile, kolon numunelerde oluşan tüm aksel yük ve karşılık gelen deplasman değerleri zamana bağlı olarak kaydedilmiştir. Deneysel çalışma ile ilgili daha kapsamlı bilgi [20,21] kaynaklarında yer almaktadır.



Şekil 7. Betonarme kolon kırılma biçimi

4. TEST EDİLEN BETONARME KOLONLARIN ANALİZİ

4.1. Taşıma Gücü Analizi

Test edilen kare ve L-kesitli betonarme kolonlar, önerilen yöntemle dayalı olarak geliştirilen bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Analizde beton basınç bölgesi için Hognestad modeli ve çelik için ise elasto-plastik davranış esas alınmıştır. Deneysel olarak elde edilen betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi, yanal deplasman değerleri ve maksimum yüke karşılık gelen taşıma gücü moment değerleri Çizelge 3’de sunulmuştur.

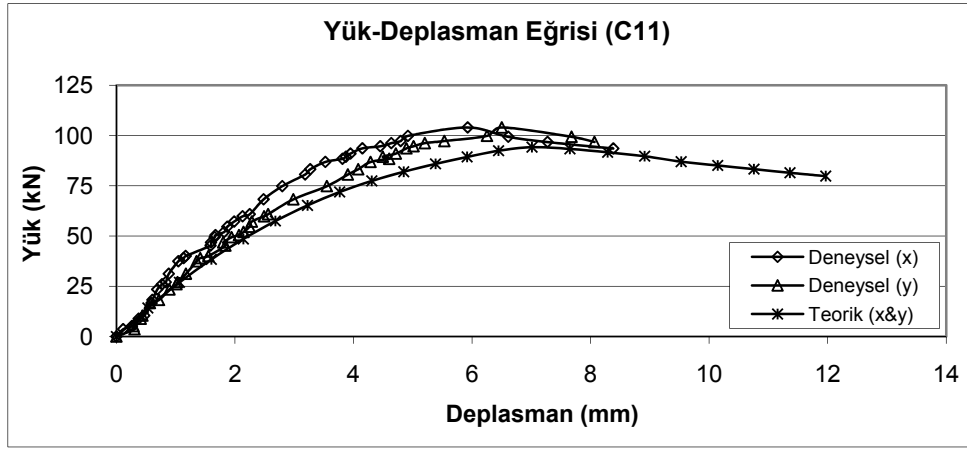
Çizelge 3. Betonarme kolon deneysel ve teorik taşıma gücü değerleri

Kolon no.	Deneysel					Teorik			Oran
	N_{test} (kN)	δ_x (cm)	δ_y (cm)	M_x (kN.cm)	M_y (kN.cm)	N_u (kN)	M_{ux} (kN.cm)	M_{uy} (kN.cm)	N_u/N_{test}
C11	104	0.63	0.63	429.52	429.52	94.32	395.24	395.24	0.907
C12	95	0.81	0.81	456.95	456.95	96.37	459.87	459.87	1.014
C13	98	0.79	0.79	420.42	420.42	95.34	398.82	398.82	0.973
C14	58	0.74	0.74	303.92	303.92	65.58	342.87	342.87	1.131
C21	238	0.51	0.51	1073.38	1073.38	236.36	1049.18	1049.18	0.993
C22	199	0.43	0.43	1080.57	1080.57	204.68	1128.86	1128.86	1.029
C23	192	0.45	0.45	1046.40	1046.40	185.61	1020.54	1020.54	0.967
LC1	196	0.75	0.75	857.50	857.50	198.32	850.13	850.13	1.012
LC2	182	0.78	0.78	892.71	892.71	165.12	790.56	790.56	0.907
LC3	178	0.74	0.74	954.97	954.97	170.34	918.63	918.63	0.957
Ortalama									0.989

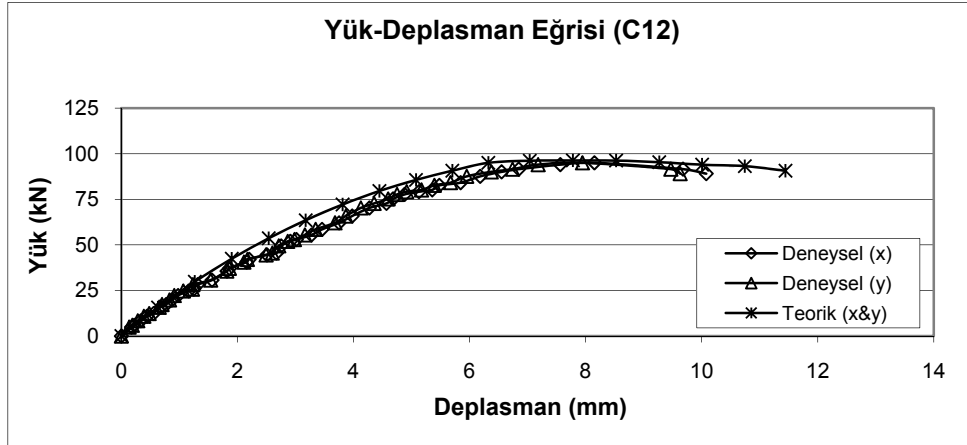
Analiz sonucunda elde edilen taşıma gücü aksel kuvvet ve moment değerleri ile teorik aksel kuvvet taşıma gücü kapasitesinin deneysel olarak elde edilen aksel kuvvete oranı Çizelge 3’de verilmiştir. Oransal değerlerin incelenmesinden, analiz sonucu elde edilen değerlerin deneysel değerlerle uyumlu olduğu görülmektedir. Analizde beton ve çelik malzemeler için kullanılan gerilme–birim deformasyon ilişkisinin sunulan çalışma için uygun sonuçlar sağladığı belirlenmiştir.

4.2. Yük–Deplasman Analizi

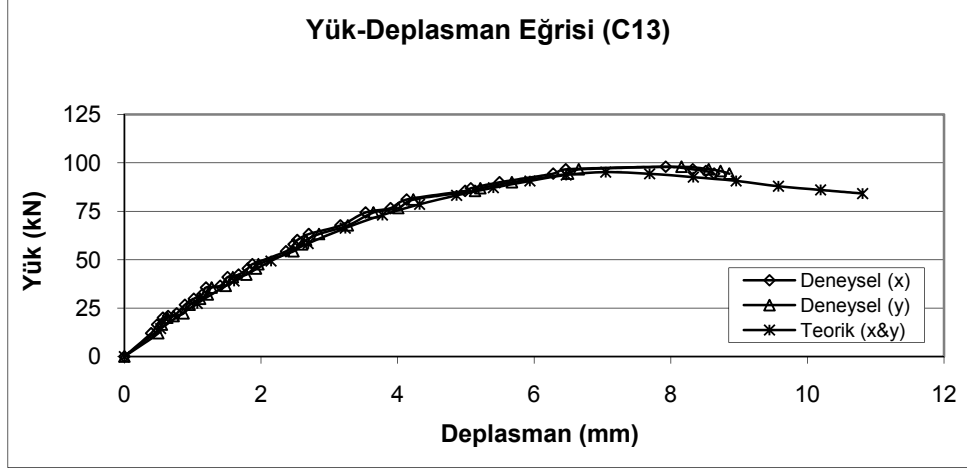
Test edilen betonarme kolonların önerilen analiz yöntemi ile elde edilen teorik yük–deplasman eğrileri, deneysel olarak elde edilen eğrilerle karşılaştırılmış ve sonuçlar grafik ortamda Şekil 8(a–j)’de sunulmuştur.



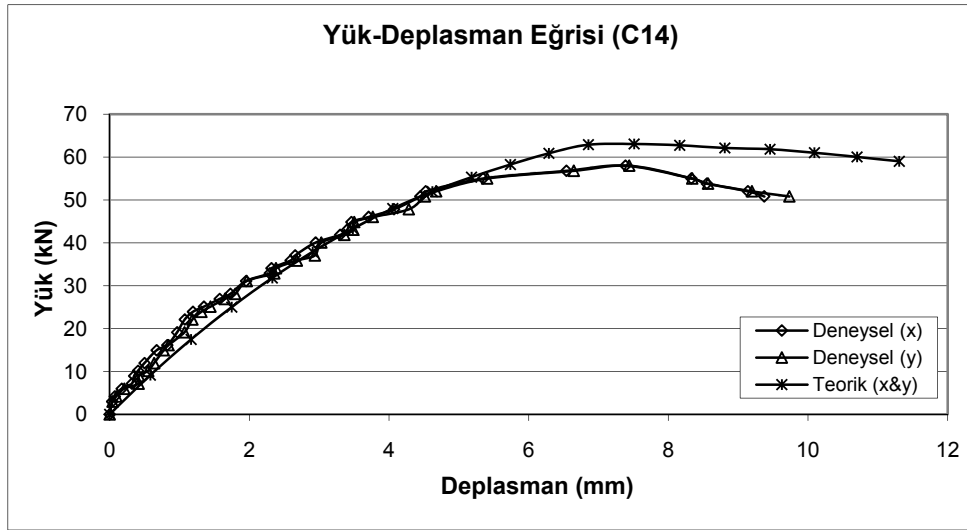
(a)



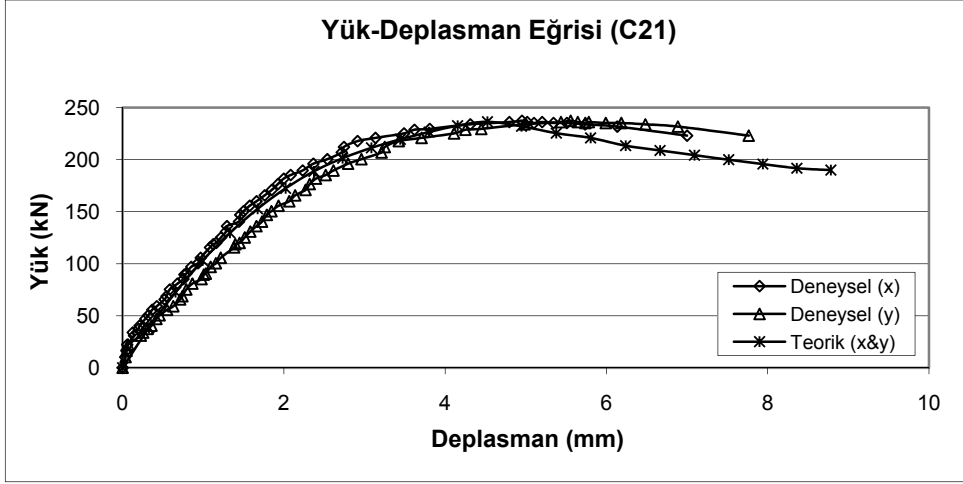
(b)



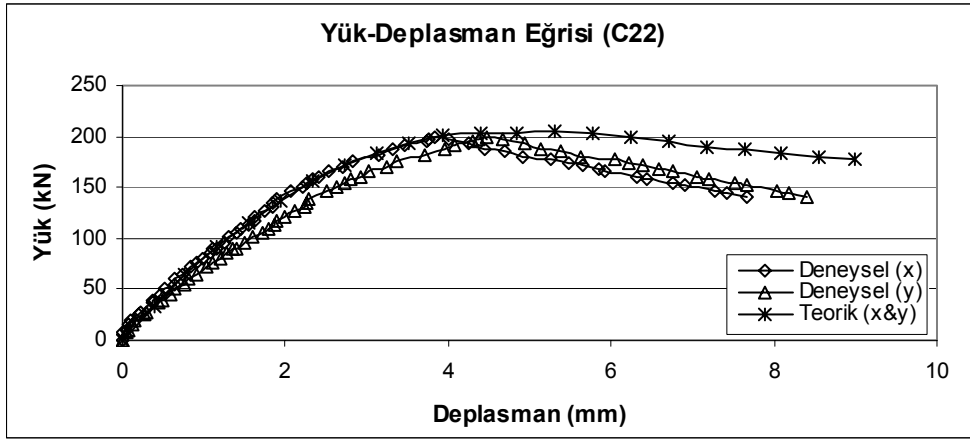
(c)



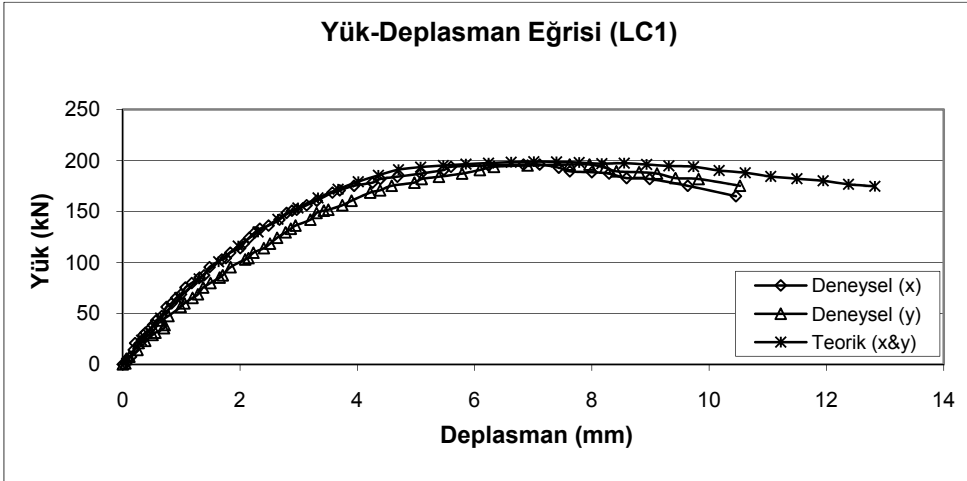
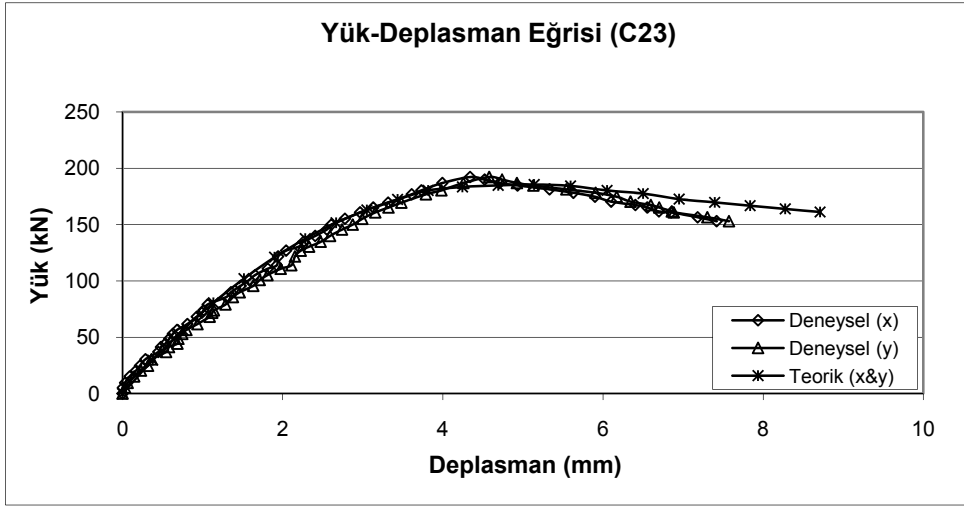
(d)

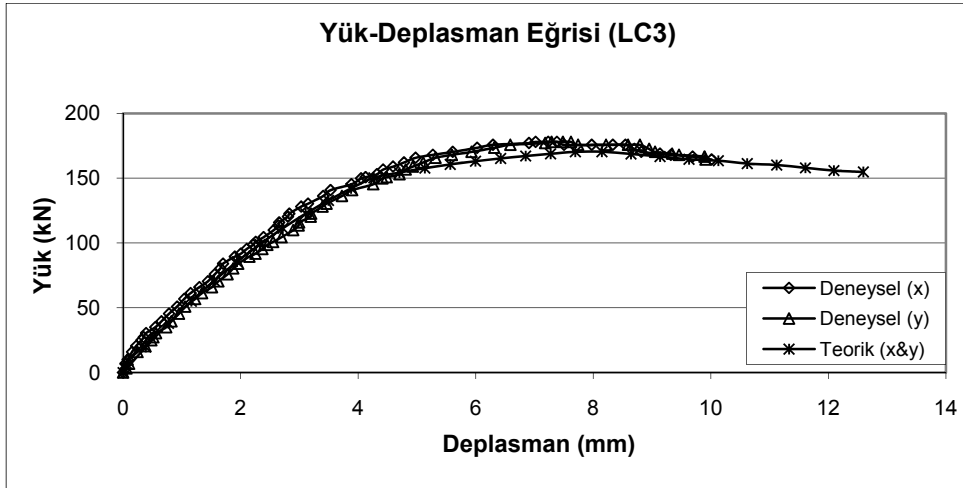
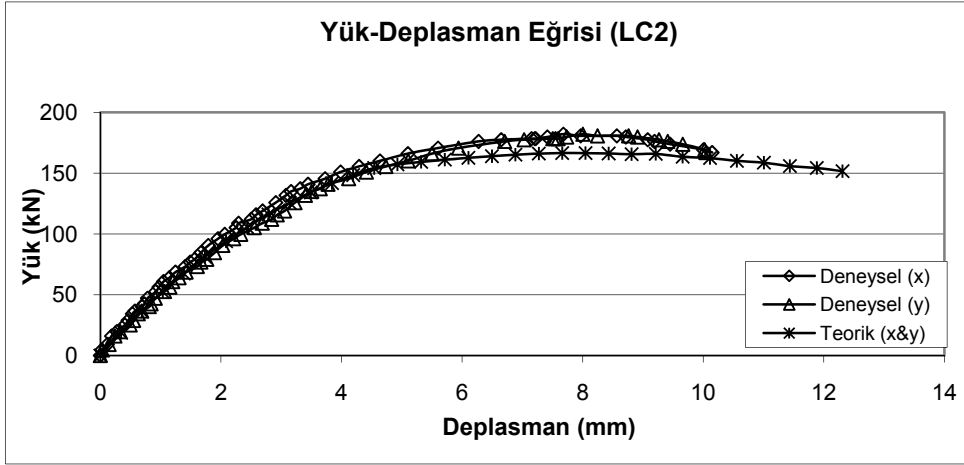


(e)



(f)





Şekil 8(a-j). Test edilen kolonlara ait deneysel ve teorik yük-deplasman eğrileri

Analizde beton için esas alınan Hognestad modeli ve çelik için kabul edilen elasto-plastik davranış kolonların yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesinde uygun sonuçlar sağlamıştır (Şekil 8(a-j)). Grafikler, betonarme kolon numunelerin maksimum yükten sonra deformasyon yaparak kırıldığını göstermektedir. Sunulan çalışmada, önerilen teorik yöntem ile bulunan yük-deplasman eğrilerinin, deneysel olarak elde edilen yük-deplasman eğrileri ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Sunulan çalışmada, iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altında poligon kesitli betonarme kolonların analizi ve yük-deplasman eğrilerinin belirlenmesi için bir yöntem önerilerek, yöntemi uygulayan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Teorik yöntemde, malzemelerin doğrusal olmayan davranışları esas alınmakta ve ikinci mertebeye momenti nedeniyle meydana gelen narinlik etkisi hesaplara yansıtılmaktadır.

Çalışma kapsamında, Çukurova Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında iki eksenli eğilme ve eksenel basınç altında test edilen kare ve L-kesitli betonarme kolon numuneler, başlıca deney parametreleri olan beton basınç dayanımı, çelik akma dayanımı, numune kesit özellikleri ve dışmerkezlik değerleri kullanılarak yük-deplasman eğrilerinin belirlenmesi için analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen teorik yük-deplasman eğrilerinin deneysel olarak elde edilen eğrilerle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Önerilen analiz yöntemi ve yöntemde kullanılan beton ve çelik gerilme-birim deformasyon ilişkisi sunulan çalışma için uygun sonuçlar sağlamıştır.

Deney ve analiz sonuçları, beton basınç bölgesi için seçilen gerilme-birim deformasyon modelinde kabul edilen maksimum birim kısalma değerinin (ϵ_{cu}), iki eksenli eğilme ve eksenel basınç maruz kolonların taşıma gücü kapasitesi ve yük-deplasman eğrilerinin elde edilmesinde önemli rol oynadığını ortaya koymuştur. Ayrıca, beton basınç dayanımı (f_c) ve kolona uygulanan dışmerkezlik değerinin kolonun taşıma gücü kapasitesinde önemli derecede etkili olduğu belirlenmiştir.

Teşekkür

Sunulan çalışma kapsamında yer alan deneyler FBE2002D224 proje numarası ile Çukurova Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir.

Semboller

- A : Alan
a : Tarafsız eksenin x eksenini kestiği noktanın x-y eksen takımına göre uzaklığı
 \bar{A}_{ck} : k'nci beton şerit alanı
 A_{st} : Kolon kesitindeki toplam boyuna donatı alanı
 A_{si} : i'nci donatı alanı
c : Tarafsız eksenin y eksenini kestiği noktanın x-y eksen takımına göre uzaklığı

E_s	: Çeliğin elastisite modülü
e_x	: x eksen yönündeki dışmerkezlilik
e_y	: y eksen yönündeki dışmerkezlilik
f_c	: Beton basınç dayanımı
f_y	: Donatı akma dayanımı
G	: Poligon kesit ağırlık merkezi
L	: Kolonun boyu
L_e	: Kolon etkili boyu
m	: Kolondaki boyuna donatı sayısı
M_x	: x eksen yönündeki moment
M_y	: y eksen yönündeki moment
N	: Eksenel kuvvet
N_{test}	: Kolon deneysel taşıma gücü
N_u	: Taşıma gücü eksenel kuvveti
M_{ux}	: x eksen yönündeki taşıma gücü momenti
M_{uy}	: y eksen yönündeki taşıma gücü momenti
t	: Beton basınç bölgesi şerit sayısı
u	: Deplasman
x_g	: Kesitin x-y eksen takımına göre ağırlık merkezinin x koordinatı
\bar{x}_{ck}	: k 'nci beton şeritin x-y eksen takımına göre ağırlık merkezinin x koordinatı
x_i	: i 'nci donatının x-y eksen takımına göre x koordinatı
y_g	: Kesitin x-y eksen takımına göre ağırlık merkezinin y koordinatı
\bar{y}_{ck}	: k 'nci beton şeritin x-y eksen takımına göre ağırlık merkezinin y koordinatı
y_i	: i 'nci donatının x-y eksen takımına göre y koordinatı
σ_c	: Betondaki gerilme
σ_{ck}	: k 'nci beton şerit gerilmesi
σ_s	: Donatı gerilmesi
σ_{si}	: i 'nci donatı gerilmesi
ϵ_c	: Betondaki birim kısalma
ϵ_{co}	: Maksimum gerilmeye karşılık gelen birim kısalma
ϵ_{cu}	: Maksimum birim kısalma
ϵ_i	: Herhangi bir noktadaki şekil değiştirme
ϵ_s	: Donatı birim deformasyonu
δ	: Deplasman
δ_x	: x eksen yönündeki deplasman
δ_y	: y eksen yönündeki deplasman

- ϕ : Eğrilik
 ϕ_x : x eksenli yönündeki eğrilik
 ϕ_y : y eksenli yönündeki eğrilik

Kaynaklar

- [1] ACI 318 : Building Code Requirements for Structural Concrete. Detroit (MI), American Concrete Institute, 2002.
- [2] TS 500: Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, 2000.
- [3] Ersoy, U., Özcebe, G., Betonarme Temel İlkeler TS500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) göre Hesap. Evrim Yayınevi, İstanbul, 2001.
- [4] Furlong, R. W., Concrete Columns Under Biaxially Eccentric Thrust. ACI J., 1093–1118, 1979.
- [5] Hsu, C. T., Biaxially Loaded L-Shaped Reinforced Concrete Columns. J. Struct. Eng. ASCE, 111(12), 2576–2595, 1985.
- [6] Hsu, C. T., Channel-Shaped Reinforced Concrete Compression Members Under Biaxial Bending. ACI Struct. J., 84, 201–211, 1987.
- [7] Hsu, C. T., T-Shaped Reinforced Concrete Members Under Biaxial Bending and Axial Compression. ACI Struct. J., 86(4), 460–468, 1989.
- [8] Rangan, B. V., Strength of Reinforced Concrete Slender Columns. ACI Struct. J., 87(1), 32–38, 1990.
- [9] Bazant, Z. P., Cedolin, L., Tabbara, M. R., New Method of Analysis for Slender Columns. ACI Struct. J., 88(4), 391–401, 1992.
- [10] Wang, G. G., Hsu, C. T. T., Complete Biaxial Load Deformation Behavior of RC Columns. ASCE, J. Struct. Eng., 118(9), 2590–2609, 1992.
- [11] Dündar, C., Şahin, B., Eğik Eğilme ve Eksenel Yük Altında Gelişigüzel Geometriye Sahip Betonarme Elemanların Tasarımı. İMO Teknik Dergi, 3(2), 1992.
- [12] Dündar, C., ve Sahin, B., Arbitrarily Shaped Reinforced Concrete Members Subjected to Biaxial Bending and Axial Load. Comput. Struct., 49, 643–662, 1993.
- [13] Ahmad, S. H., Weerakoon, E. S. L., Model for Behavior of Slender Reinforced Concrete Columns Under Biaxial Bending. ACI Struct. J., 92(2), 188–198, 1995.
- [14] Ersoy, U., Özcebe, G., Sarılmış Betonarme Kesitlerde Moment-Eğrilik İlişkisi Analitik Bir İrdeleme. İMO Teknik Dergi, 9(4), 1998.
- [15] Rodriguez, J. A. Ochoa, J. D., Biaxial Interaction Diagrams for Short RC Columns of Any Cross Section. J. Struct. Eng., 125(6), 672–683, 1999.

- [16] Yalcin, C., Saatcioglu, M., Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Columns. *Comput. Struct.*, 77, 539–555, 2000.
- [17] Hong, H. P., Strength of Slender Reinforced Concrete Columns Under Biaxial Bending. *J. Struct. Eng.*, 127(7), 758–762, 2001.
- [18] Furlong, R. W., Hsu, C. T. T., Mirza, S. A., Analysis and Design of Concrete Columns for Biaxial Bending-Overview. *ACI Struct. J.*, 101(3), 413–423, 2004.
- [19] Canbay, E., Özcebe, G., Ersoy, U., High-Strength Concrete Columns Under Eccentric Load., *J. Struct. Eng.*, ASCE, 132(7), 1052–1060, 2006.
- [20] Tokgoz, S., Öngerilmeli ve Betonarme Elemanların İki Eksenli Eğilme ve Eksenel Yük Etkisi Altında Davranışı. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 259 sayfa, 2006.
- [21] Dundar, C., Tokgoz, S., Tanrikulu, A. K., Baran, T., Behaviour of Reinforced and Concrete-Encased Composite Columns Subjected to Biaxial Bending and Axial Load. *Build. Environ.*, 43(6), 1109–1120, 2008.
- [22] Majewski, T., Bobinski, J., Tejchman, J., FE Analysis of Failure Behaviour of Reinforced Concrete Columns Under Eccentric Compression. *Eng. Struct.*, 30(2), 300–317, 2008.
- [23] Hognestad, E., Hanson, N. W., McHenry, D., Concrete Stress Distribution in Ultimate Stress Design. *ACI J.*, 27(4), 455–479, 1955.
- [24] Tokgoz, S., Dundar, C., Experimental Tests on Biaxially Loaded Concrete-Encased Composite Columns. *Steel Compos. Struct.* 8(5), 423–438, 2008.
- [25] Tokgoz, S., Effects of Steel Fiber Addition on the Behaviour of Biaxially Loaded High Strength Concrete Columns., *Mater Struct*, 42(8), 1125–1138, 2009.