

AŞIRI DONATILI KİRİŞLERDE BOYUT ETKİSİNDE KIRILMA PARAMETRELERİNİN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZİ

Çağatay M. BELGİN ve Sıddık ŞENER

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Maltepe 06570, Ankara
cmbelgin@gazi.edu.tr, siddik@gazi.edu.tr

(Geliş/Received: 26.12.2005; Kabul/Accepted: 24.05.2006)

ÖZET

Geometrik olarak benzer farklı boyutlu yapıların, kırılma anındaki nominal gerilme değerlerinin elemanın karakteristik boyutu ile azalması boyut etkisi olarak tanımlanmaktadır. Betonarme elemanların göçme yükünde boyut etkisinin sadece betonun çekme gerilmelerini taşıyamadığı için değil basınç gerilmelerini taşıyamadığı için oluşan kırılmalarda da geçerli olduğu araştırmalarla görülmüştür. Aynı durum öngörülmesi için betonlar, betonarme kolonlar için de geçerlidir. Bu çalışmada dört nokta yüklemesi altında denge üstü donatılı dikdörtgen betonarme kirişlerde gevrek göçme yüklerine karşılık gelen boyut etkisi analizleri yapılmış ve sonuçlar Bazant'ın boyut etkisi yasaları kullanılarak değerlendirilmiştir. Gevrek numunelerde artık gerilmeler kaydedilmiş ve Matlab® da hazırlanan kısa bir programla, Marquardt-Levenberg algoritması kullanılarak Bazant'ın boyut etkisi ifadesinde modellenmiştir. Kullanılan iki metod birbirleriyle kıyaslanmıştır. Bu çalışma boyut etkisinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Davranış ve kapasite hesaplamaları yapılırken boyut etkisi dikkate alınmalıdır. Artık gerilmelerin oluşacağı büyük numunelerde geliştirilmiş Bazant eşitliği Bazant eşitliğine göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme kiriş, dört nokta yüklemesi, boyut etkisi, kırılma mekaniği.

THE EVALUATION OF FRACTURE PARAMETERS BY LINEAR AND NON-LINEAR ANALYSIS IN SIZE EFFECT OF OVER REINFORCED CONCRETE BEAMS

ABSTRACT

The decrease in the nominal failure stress of geometrically similar but different sized members with the increasing characteristic size is called size effect. This effect occurs not only in tension failures but in compression failures as well. This is the case for prestressed concrete members and columns as well. In this study test results of full-scale failure of singly reinforced four-point-bend beams of different sizes containing deformed longitudinal reinforcing bars are reported. A residual stress in brittle specimens are recorded which are modelled and inserted in Bazant's size effect law by using Marquardt-Levenberg algorithm by a short program prepared in Matlab®. Two methods are compared with each other. This study indicates a significant size effect which should be considered in behaviour and design of structures and Bazant's modified size effect law is more successful than the Bazant's former law in greater specimens because of residual stresses.

Keywords: Reinforced concrete beam, four point load, size effect, fracture mechanics.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde yapı teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte daha güvenli ve daha ekonomik yapılar yapılmaya başlanmıştır. İnsanoğlunun doğaya hükmetmek amacıyla daha büyük yapılar yapmaya gerek duyduğu bugünlerde yapıların daha ekonomik ve daha güvenli olabilmesi için bilimadamları çalışmalarını sürdürmektedir. Tek-

noloji ne kadar gelişmiş olursa olsun halen en ucuz yapı malzeme betonarmedir. Bu da betonun ve betonarmenin davranışlarını çok daha iyi anlamak gerçeğini ortaya koymaktadır. Taşıma gücü hesabı modelinden sonra geliştirilen ve betonda çatlak ilerlemesini enerji tüketimi ile açıklamaya çalışan kırılma mekaniği modeli bu nedenle son yıllarda araştırmacıların üzerinde en çok çalıştığı yöntemlerden biri olmuştur. Çelik, cam ve

seramik gibi homojen malzemelere uygulaması çok daha çabuk gerçekleşmiş olan kırılma mekaniğinin beton ve betonarmeye uygulaması bu malzemenin homojen olmaması nedeniyle zor olmaktadır. Üretildiğinde de çatlaklı olan betonun davranışını geleneksel kuramlarla doğru olarak açıklamak olası görünmemektedir. Ancak çatlak ilerlemesi için gereken enerji ve yapının şekli ile davranışın daha doğru açıklanabildiği araştırmacılar tarafından deneysel verilere dayanarak kanıtlanmıştır. Son on yılda betonun kırılma mekaniği konusunda yapılan araştırmalar çelikten çok betonun kırılmaya yol açtığı tüm elemanların göçme yükünde boyut etkisi göstermelerinin gerektiğini ortaya koymuştur. Bu yalnız betonun çekme gerilmelerini taşıyamadığı için oluşan kırılmalarda değil betonun basınç gerilmelerini taşıyamadığı için meydana gelen kırılmalar için de geçerlidir [1-2]. Geçmişte betonarme kolonların davranışının anlaşılması için birçok çalışma yapılmış [3-5] büyük ve küçük elemanlar arasındaki ölçek farklılığı görecelik ve kuantum mekaniği teorilerinin gelişmesi sağlanmıştır. Yakın zamana kadar betonda boyut etkisi malzeme dayanımının olasılıksal analiz olan Weibull tipi teorilerle boyut etkisi açıklanmıştır. Göçme yükü için güvenlik katsayıları kullanılmıştır. Gerçekte ise maksimum yüke ulaşılmadan önce büyük çatlaklar olmaktadır [6-7]. Büyük yapılar küçük yapılara göre daha küçük gerilmelerde göçmektedir. Temel olarak, beton da çatlak gelişirken davranış şu biçimde açıklanabilir; Daha büyük yapı daha fazla birim boy değişim enerjisi tutabilir (çatlak önündeki her birim çatlak gelişimi için enerji tüketimi yapı boyutuna bağlı olmaksızın aynıdır) ve daha fazla enerji ile çatlak ortaya çıkartır. Bu nedenle elastik kuramda kullanılan gerilme eşitlikleri yapı boyutu büyüdükçe doğru sonuç vermekten uzaklaşmaktadır. Araştırmacılar beton, çelik, seramik gibi malzemelerin kırılma davranışlarını daha iyi modelleyebilmek için kırılma mekaniği kuramlarını oluşturmuşlardır. Kırılma mekaniği iki temel kriteri dikkate alan bir davranış kuramıdır. Malzeme dayanımını enerji ve dayanım kriteri ile birleştiren ve çatlamayı bütün yapı boyunca ilerleyen bir davranış olarak gören bir kuramdır. Kırılma mekaniği kuramı uzun süredir metal malzemelerin tasarımında, denizcilikte, uzay bilimlerinde ve nükleer mühendislikte kullanılmasına karşın beton davranışını açıklamada kullanımı çok yenidir [8-12].

2. DENEY KİRİŞLERİ (TEST BEAMS)

Deney elemanları olarak farklı boyutlarda geometrik olarak benzer dikdörtgen kesitli kirişler seçilmiştir. Bu çalışmada seçilen kirişler iki boyutlu boyut etkisi göstermektedirler. Toplam onsekiz adet deney kirişi imal edilmiş ve denenmiştir. Numuneler iki ayrı grup altında değerlendirilmiştir. Deneylerin yinelenebilir olduğunu göstermek için her deney elemanından üçer adet hazırlanmıştır.

Gruplardaki elemanlar adlandırılırken şu kurala uyulmuştur; her adın başındaki harf kirişin boyunu göstermektedir. Buna göre “S” boyu 1.15 m olan kirişleri,

“M” boyu 2.3 m olan kirişleri ve “L” de boyu 4.6 m olan kirişleri belirtmektedir. İlk harften sonra gelen sayı kiriş kesitinin genişliğini ve en son sayı ise kiriş kesitinin yüksekliğine karşı gelmektedir. En sondaki harf ise her bir elemandan üçer adet üretildiği için bu üç elemanın birbirinden ayırt edilebilmesi için kullanılmıştır. “a” birinci, “b” ikinci ve “c” de üçüncü elemanı göstermektedir.

Deney elemanları bir kiriş ile birbirine eşit iki tekil kuvvete ayrılan dört nokta yüklemesi ile denenmiştir. Bu yükleme düzeneği ile kesme kuvveti ve eğilme momentinin etkileri birbirinden ayrılmıştır. Moment maksimum olduğu ve kesme kuvvetinin sıfır olduğu yüklerin ortasındaki bölgede kirişlerin basınç ezilmesi sonucunda göçmesinin oluşması tasarlanmıştır. Deneysel programda yer alan deney elemanlarının adlandırılması ve özellikleri Çizelge 1’de verilmiştir.

Deney kirişlerinin üretilmesi sırasında uygulanan işlemler aşağıda sırası ile sunulmuştur. Boyut etkisi analizinde üretim sırasında uyulması gerekli olan en önemli kurallardan biri tüm deney kirişlerinin malzeme özelliklerinin aynı olmasıdır. Deney kirişlerinin boylarının uzun olması ve kirişlerin geometrik boyutlarındaki sapmayı en aza indirmek amacı ile kalıp olarak 21 mm’lik plywood malzemesi kullanılmıştır. Kalıplar verilen ölçülerde laboratuvarında üretilmiştir. Deney kirişlerinin boyuna donatıları ve etriyeleri verilen ölçülerde hazırlanmış ve daha sonra önceden hazırlanan kalıpların içerisine yerleştirilmiştir. I. Grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 1’de ve II. Grup deney kirişlerinin çizimi ve donatı düzeni Şekil 2’de verilmiştir. Deney kirişlerinden S11.15b kirişi deneyden önce taşıma esnasında hasar görebilir kırılmış ve denenmemiştir.

Beton dökümünden önce kalıpların iç kısımları kalıp yağı ile yağlanmıştır. Dökümden 5 gün sonra kirişler

Çizelge 1. Deney kirişleri (Test beams)

Grup	Kiriş	L(m)	b(mm)	h(mm)
I. Grup	S11.15a	1.15	110	150
	S11.15b	1.15	110	150
	S11.15c	1.15	110	150
	M11.30a	2.30	110	300
	M11.30b	2.30	110	300
	M11.30c	2.30	110	300
	L11.60a	4.60	110	600
	L11.60b	4.60	110	600
	L11.60c	4.60	110	600
II. Grup	M5.7a	2.30	55	75
	M5.7b	2.30	55	75
	M5.7c	2.30	55	75
	M11.15a	2.30	110	150
	M11.15b	2.30	110	150
	M11.15c	2.30	110	150
	M22.30a	2.30	220	300
	M22.30b	2.30	220	300
	M22.30c	2.30	220	300

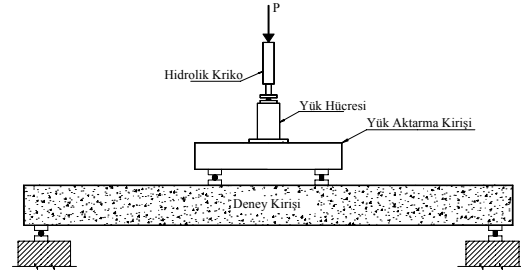
Deney kirişlerinde kullanılan donatılar İzmir Demir Çelik Fabrikasından bu deneyde kullanılmak üzere temin edilmiştir. Nervürlü S420 sınıfında üretilen donatılar istenilen boyutlarda fabrikada kesilmiş, kargo ile yollanmış, hazır halde laboratuvara gelmiştir. Deney kirişlerimizde S420 sınıfında $\Phi 32$, $\Phi 16$ ve $\Phi 8$ 'lik boyuna donatılar ve S220 sınıfında $\Phi 8$ ve $\Phi 5$ 'lik etriyeler kullanılmıştır. Fakültemiz Makine Mühendisliği Bölümü'nde bulunan yüklem ve yerdeğiştirme kontrollü deney yapabilen DARTEC Marka aksel çekme düzeneği ile gerçekleştirilen çelik çekme deneylerinden S420 sınıfındaki $\Phi 32$ lik donatıların akma dayanımlarının 520 MPa ve akma birim uzama değerinin 0.0027, $\Phi 16$ 'lık donatıların akma dayanımlarının 510 MPa ve akma birim uzama değerinin 0.0028, $\Phi 8$ 'lik donatıların akma dayanımlarının 512 MPa ve akma birim uzama değerinin 0.0028 olduğu görülmüştür. Donatılar S420 standardına göre daha gevrek ve daha yüksek dayanımlıdır. Bütün kiriş kesitlerinde donatı oranı $\rho = \%3$ dür. S500 çeliği ve C17-C20 aralığındaki beton dayanımı için dengeli donatı oranı $\rho_b = \%1.1$ ile $\%1.25$ arasında değişmektedir. Dolayısı ile bütün kesitler denge üstü davranış göstermektedirler. Deney kirişlerine ait orta nokta en büyük yerdeğiştirmeleri, teorik kırılma yükleri ve deneysel kırılma yükleri Çizelge 2'de verilmiştir. Nominal gerilme hesabı yapılırken, kesitin kırılma anındaki en büyük yükünden kırılma anındaki moment değeri hesap edilmiş ve $\sigma = My/I$ değerinden en üst life etki eden gerilme değeri bulunmuştur. Bu değer nominal gerilme değeri olarak alınmıştır.

3. DENEY YÖNTEMİ (Experimental Method)

Deneyler Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda yer alan 4.0 m yüklem açıklığı ve 300 kN yük taşıma sığalı HiTec marka 1998 model eğilme çerçevesinde gerçekleştirilmiştir. Deney çerç-

Çizelge 2. Orta nokta en büyük yerdeğiştirmeleri, teorik kırılma yükleri ve deneysel kırılma yükleri (Displacements and failure loads of specimens)

Grup	Kiriş	Orta nokta en büyük yerdeğiştirmeler (mm)	Teorik kırılma yükleri (kN)	Deneysel kırılma yükleri (kN)
I.Grup	S11.15a	27	43,62	62,088
	S11.15b	-	43,24	-
	S11.15c	28	43,48	56,521
	M11.30a	26	85,98	100,052
	M11.30b	28	87,00	104,923
	M11.30c	25	85,07	95,645
	L11.60a	38	194,75	143,738
	L11.60b	43	195,21	161,444
II.Grup	L11.60c	55	195,31	151,702
	M5.7a	77	2,94	4,253
	M5.7b	65	2,93	4,021
	M5.7c	51	2,94	4,407
	M11.15a	51	20,58	20,799
	M11.15b	64	20,39	22,577
	M11.15c	62	20,50	22,423
	M22.30a	33	194,34	176,135
	M22.30b	43	200,65	193,223
	M22.30c	41	200,76	193,996



Şekil 3. Deney düzeneği (Test setup)

vesinin eğilme katılığı 565 kN/mm'ir. Deney elemanları eğilme çerçevesine çelikten yapılmış sabit ve kayıcı mesnet özelliklerinde ara parçalar ile mesnetlenmişlerdir. Yüklem çerçevesine 300 kN basınç sığalı bir hidrolik krikonun, 300 kN basınç sığalı bir yük hücresi ve bir adet mafsal yerleştirilmiştir.

Deney elemanlarına yüklem monotonik olarak uygulanmıştır. Yük sıfır düzeyinden deney elemanları basınç kırılması ile göçene kadar boşaltılmadan ve sürekli artacak bir biçimde etkilmiştir. Şekil 3'te deney düzeneği görülmektedir.

Deney sırasında oluşan yerdeğiştirmeler ve yük, elektronik olarak bilgisayara bir data toplayıcı aracılığı ile bağlanmış elektronik yerdeğiştirme ölçerler (LVDT) kullanılarak ölçülmüştür. Daha sonra data toplayıcı tarafından derlenen yerdeğiştirme değerleri deney sırasında deneyin izlenmesi ve verilerin kaydedilmesi için geliştirilmiş olan özel bir bilgisayar yazılımı ile bilgisayara kaydedilmiştir. Bu bilgisayar yazılımı ile deney sırasında deney elemanlarının orta nokta yerdeğiştirmesinin yüke bağlı olarak değişen yük-yerdeğiştirme grafiği izlenerek deney yapılmıştır. Daha sonra bilgisayardaki veriler değerlendirilerek deney sonuçlarının yorumlanması sağlanmıştır.

Deney sırasında yüklem analitik olarak hesaplanmış kırılma yüküne beş dakikada ulaşılacak şekilde yük kontrollü olarak elle kumanda edilen bir hidrolik krikonun yapılmıştır.

4. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (Discussion of Experimental Result)

4.1. Bazant'ın Boyut Etkisi Denklemine Göre Analiz (Evaluation of Bazant's Size Effect Theory)

En basit boyut etkisi eşitliği Bazant tarafından pek çok deneysel ve analitik araştırmanın sonucunda önerilmiştir. Bu eşitlikte çatlak gelişimi için gerekli enerji eşitliği elde edilmiştir. Kırılma enerjisi eşitlikde görülmektedir. Eşitliği sadeleştirmek için sadece iki parametrelilikte aşağıdaki eşitlik verilmiştir:

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1+D/D_0}} \quad [1]$$

Bu eşitlikte f_t malzemenin çekme gerilmesi, B boyutsuz bir sabit, D_0 ise birimi uzunluk olan bir

sabittir. B ve D_0 malzemenin geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı birer sabittir. Bu iki sabit malzeme boyutundan bağımsızdır. D hesaplarda kullanılan karakteristik boyuttur. D/D_0 değerine β gevreklik sayısı denir. Hesaplamalar yapılırken numuneye ait herhangi bir boyut karakteristik boyut olarak seçilebilir. Betonun çekme dayanımının hesaplanması zor olduğundan malzeme sabiti B çekme dayanımından ayrı düşünülmesinin ikisinin çarpımı birlikte değerlendirilmektedir. Bilinmeyen Bf_t ve D_0 değerleri Bazant'ın denklemine çeşitli doğrusal analizler uygulanarak bulunabilir. Çalışmada iki ayrı doğrusal analiz yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan birinci doğrusal analiz şu şekilde yapılmaktadır. 1 eşitliği,

$$Y = AX + C \quad (\text{Doğrusal analiz I}) \quad [2]$$

biçiminde düzenlenir ise,

$$X=D, \quad Y = \left(\frac{1}{\sigma_N^2} \right), \quad Bf_t = 1/\sqrt{C}, D_0 = C/A \quad [3]$$

olarak hesaplanabilir. Çalışmada kullanılan ikinci doğrusal analiz Planas tarafından önerilmiş olup aşağıdaki biçimdedir:

$$Y' = A X' + C' \quad (\text{Doğrusal analiz II}) \quad [4]$$

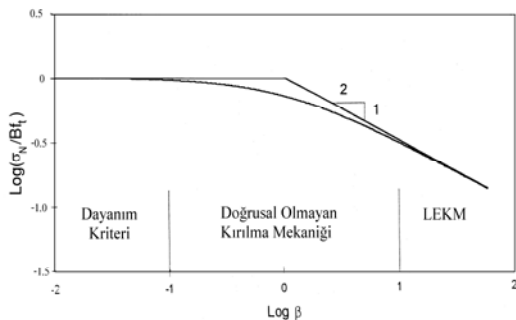
şeklinde düzenlenir ise;

$$X' = 1/D, \quad Y' = \frac{1}{\sigma_N^2 D} \quad [5]$$

$$Bf_t = 1/\sqrt{A'} \quad [6]$$

$$D_0 = A'/C' \quad [7]$$

olarak hesaplanabilir. Bazant'ın önerdiği ve boyut etkisi bağıntısında eşitlik 1 için, yapı çok küçük $D \ll D_0$ ise $\beta = D/D_0$ değeri birin yanında küçük olduğundan ihmal edilebilir. $\sigma_N = Bf_t$ olur ki göçme gerilmesi plastik limit analizi ya da emniyet gerilmeleri yöntemi ile analiz edilmektedir. Eğer yapı çok büyük ise ($D \gg D_0$) bir değeri β değeri yanında çok küçüktür, $\sigma_N = Bf_t \beta^{1/2}$ olur. Yani göçme gerilmesi doğrusal elastik kırılma mekaniği ile analiz edilmekte ya da $\log \sigma_N = -1/2 \log \beta + \text{sabit}$, Şekil 4'te logaritmik eksen takımında eğimi $-1/2$ olan doğru ile gösterilmektedir.



Şekil 4. Boyut etkisinin logaritmik ölçekte gösterimi (Showing of size effect in logarithm scale)

Asimptotun kesim noktası, plastik analiz ve LEKM teorileri eşitlenerek,

$$Bf_t = Bf_t \beta^{-1/2} \quad [8]$$

$$\beta^{-1/2} = 1 \quad [9]$$

buradan

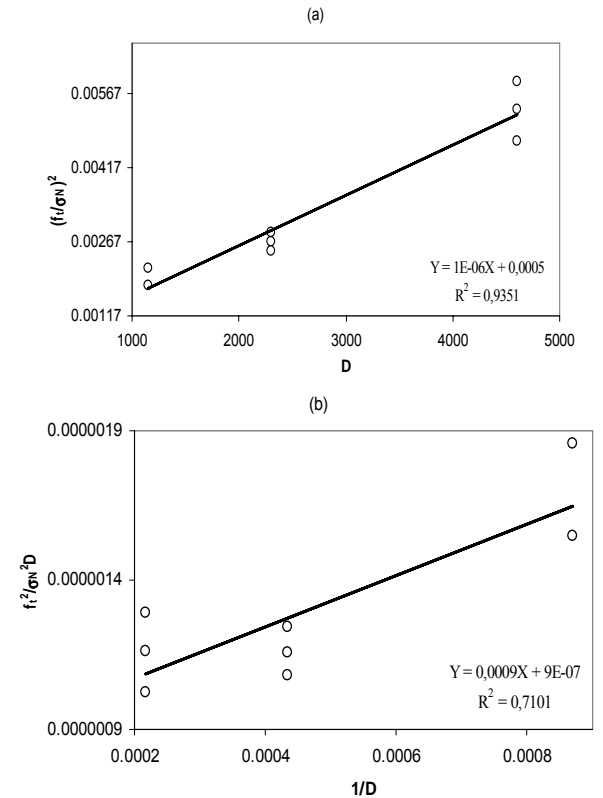
$$\beta = 1, \quad D = D_0 \quad [10]$$

bulunur.

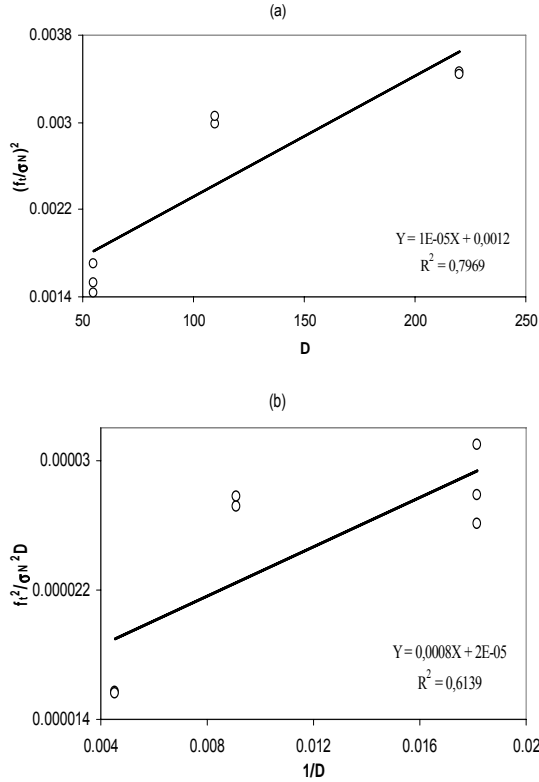
Kirişler boyutlarından herhangi biri karakteristik boyut olarak seçilebilir. I. grupta karakteristik boyut olarak kiriş uzunluğu, II. grupta kiriş kesit genişliği seçilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kırılma yüklerine göre çizilen I. gruba ait doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II şekilleri, Şekil 5'te verilmiştir.

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen kırılma yüklerine göre çizilen II. gruba ait doğrusal analiz I ve doğrusal analiz II şekilleri ise Şekil 6'da verilmiştir.

Her iki grupta da doğrusal analiz şekillerine baktığımızda, doğrusal analiz I'den elde edilen varyasyon sayısı R doğrusal analiz II'den elde edilen varyasyon sayısı R den daha yüksek olduğu için her iki grupta da doğrusal analiz I den elde edilen A ve C değerleri Bf_t ve D_0 malzeme ve şekil sayılarının bulunmasında kullanılmıştır. Hesaplanmış A, C, Bf_t ve D_0 Çizelge 3'te verilmiştir. Çizelge'de "b" kiriş kesit genişliğini, "L" kiriş boyunu göstermektedir.



Şekil 5. I. grup a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II (Series-I a) lineer analiz, b) Non-linear analysis)



Şekil 6. II. grup a) doğrusal analiz I, b) doğrusal analiz II (Series-2 a) linear analysis, b) non-linear analysis)

Çizelge 3. Boyut etkisi sabitleri (Size effect constants)

	D (mm)	A	C	Bf_t	D_0
I.Grup	L (1150,2300,4600)	1×10^{-6}	0.0005	44.7	500
II.Grup	b (55,110,220)	1×10^{-5}	0.0012	28.9	120

Bulunan Bf_t ve D_0 değerleri kullanılarak hesaplanan doğrusal olmayan çizimler Şekil 7'de verilmiştir. Grafikler $\text{Log } \sigma_N/Bf_t$ 'e karşılık $\text{Log } D/D_0$ eksenlerinde çizilmiştir.

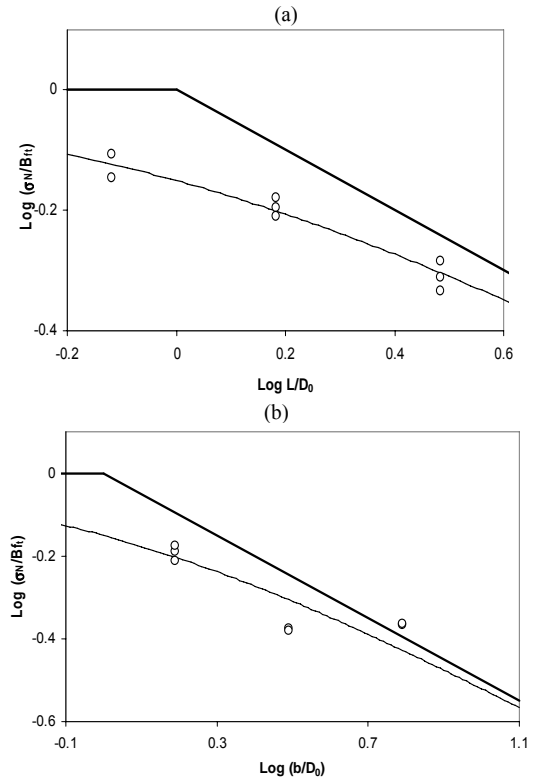
Şekil 7'ye bakıldığında I. gruba ait deney sonuçlarının Bazant'ın önerdiği boyut etkisi ifadesiyle uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Ancak II.grup deney sonuçlarına baktığımızda Bazant'ın önerdiği boyut etkisi ifadesinden uzaklaşıldığı görülmektedir. Bunun nedeni gevreklik arttıkça kırılma sonrasında betonda artık gerilmelerin kalmasıdır. Bazant'ın önceden önerdiği boyut etkisi eşitliğinde değişiklik yapılarak artık gerilmelerin etkisi aşağıdaki ifade ile dikkate alınabilir:

$$\sigma_N = \sigma_0 \left(\frac{\alpha_1}{\sqrt{1+\beta}} + \alpha_r \right) \quad [11]$$

$$\beta = \frac{D}{D_0}, \quad \beta_1 = \frac{D_1}{D_0}, \quad \alpha_1 = (1 - \alpha_r) \sqrt{1 + \beta_1} \quad [12]$$

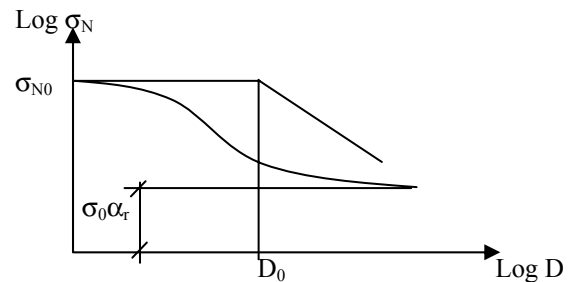
Bu eşitlikte $\sigma_N = My/I$, σ_0 ise $D=D_1$ boyutu için nominal eğilme gerilmesi, σ_N boyut düzeltilmiş nominal eğilme gerilmesini göstermektedir.

β =kirişin göreceli boyutu D =geometrik olarak benzer kirişlerin karakteristik boyutu α_r =artık sürtünme



Şekil 7. Doğrusal olmayan çizimler a) I.grup b) II.grup (Nonlinear illustrations, a) series-1, b) series-2)

gerilme oranıdır. Bu durumda eşitlikteki üç bilinmeyen $\sigma_0 \alpha_1$, D_0' ve $\sigma_0 \alpha_r$ olmaktadır. Bu bilinmeyenlerin teorik bulunma olasılığı karmaşık kırılma mekaniği analizi ya da yerel olmayan hasar analizi gerektiğinden çok zordur. Geliştirilmiş Bazant eşitliğinin şekilsel anlatımı Şekil 8'de verilmiştir. Eşitlik 11'deki değişkenleri doğrusal analizle bulmak çok karmaşık ve uzun birtakım hesaplamalar gerektirmektedir. Bunun yerine Levenberg-Marquardt algoritmasını kullanarak üç bilinmeyeni bulan bir program Matlab®'da yazılmıştır. Bu program sayesinde eşitlikteki değerler başlangıç değerleri atama yoluyla kolaylıkla bulunabilmiştir. Program yapılan hatayı da vermektedir. Her üç bilinmeyen için 1'den başlayarak 10000'e kadar başlangıç değerleri atanmış ve en az hatayı veren başlangıç değerlerine denk gelen üç bilinmeyen değerleri alınmıştır. Birbirine karşılaştırmak için her iki grup için bu değerler hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler aşağıdaki tabloda verilmiştir. İki eşitlikten bulunan sonuçları karşılaştırmak için Bazant'ın önceki boyut etkisi denkleminde bulunan değerleri de Çizelge 3'ten alınmıştır (Çizelge 4).



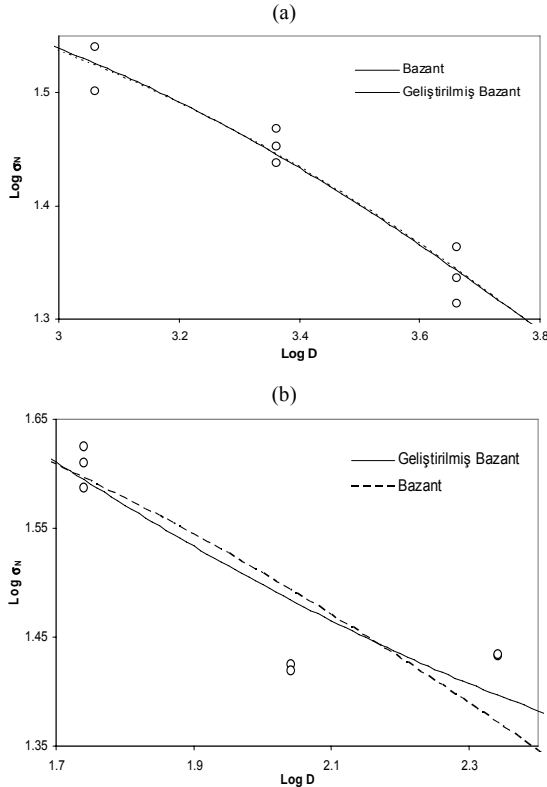
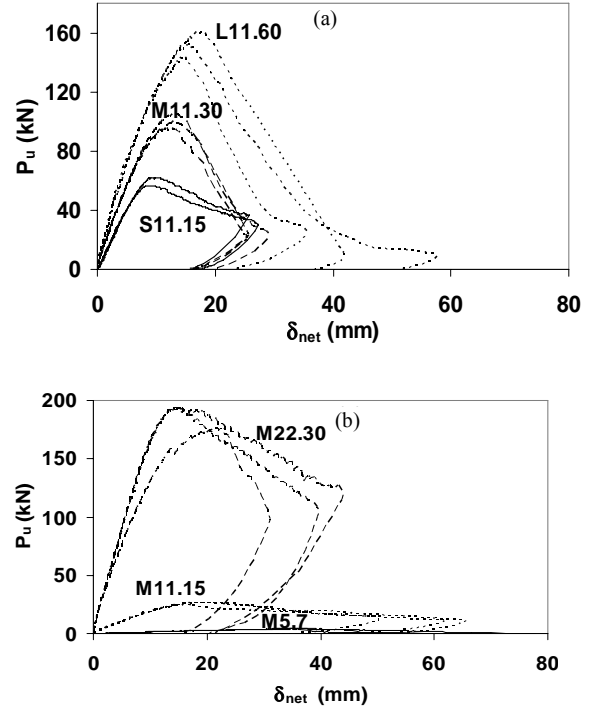
Şekil 8. Artık gerilme (Residual stress)

Çizelge 4. İki yöntemin sabitlerinin karşılaştırılması
(Comparison of constants between two methods)

	Geliştirilmiş Bazant eşitliği			Bazant eşitliği	
	$\sigma_0 \alpha_1$	D_0'	$\sigma_0 \alpha_2$	Bf_t	D_0
I. Grup	44.67	1331	0.84	44.7	500
II. Grup	170.1	1.70	9.75	28.9	120

Çizelge 3'e bakıldığında artık gerilmenin az olduğu zaman Levenberg-Marquardt algoritması kullanılarak yapılan hesaplamalardan bulunan değerlerin doğrusal analiz yapılarak bulunan değerlere yakın olduğu görülmektedir. Ancak artık gerilme değeri artmaya başladığında hesaplanan bu değerler sapma göstermektedirler. Artık gerilmeyle birlikte Bazant'ın boyut etkisi eğrisinin yönü değişmektedir. Hesaplanan artık gerilmeyle bulunan eğri Log σ_N 'e karşılık Log D şeklinde gösterilmiştir. Şekilde Bazant'ın boyut etkisi eğrisi de karşılaştırma yapmak için gösterilmiştir (Şekil 9). Şekil 9'da I. grubun şekline baktığımızda artık gerilme çok az olduğundan her iki eşitlikte benzer sonuç vermiştir. II. grubun şekline bakıldığında artık gerilmenin varlığı ile iki eşitliğin birbirinden farklılığı açıkça görülmektedir. Artık gerilmeyi dikkate alarak hesapladığımız geliştirilmiş model deney sonuçları ile daha iyi uyum sağlamıştır.

Şekil 10'da her iki gruba ait yük-orta nokta yerdeğiştirme şekilleri verilmiştir. Numune boyutları büyüdükçe gevrekliğin ve doğrusal bölgenin rijitliğinin arttığı gözlenmektedir.

**Şekil 9.** Geliştirilmiş Bazant ve Bazant boyut etkisi eşitlikleri a) I. grup b) II. grup (Modified Bazant and Bazant's size effects)**Şekil 10.** Yük-orta nokta yerdeğiştirmeleri a) I. grup b) II. grup (Load-midpoint displacements a) series I b) series II)

5. SONUÇ (CONCLUSIONS)

Bazant'ın boyut etkisi ifadesindeki bilinmeyen, şekil ve malzeme sabitleri hesaplanırken Bazant'ın ve Planas'ın önerdiği doğrusal analiz metodları kullanılmıştır. Her iki grupta da Bazant'ın önerdiği doğrusal analiz metodu daha yüksek korelasyon değeri vermiştir. Buradan elde edilen şekil ve malzeme sabitleri ile iki gruba ait kırılma değerleri doğrusal olmayan analizde gösterilmiştir.

Birinci gruba ait doğrusal olmayan analize bakıldığında deney sonuçlarının Bazant'ın önerdiği boyut etkisi eğrisi ile uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Böylelikle plastik analizden doğrusal elastik kırılma mekanikine geçişin birbirini kesen iki doğru ile değil Bazant'ın önerdiği eşitlikteki gibi yumuşak bir geçişle olduğu görülmektedir.

Doğrusal elastik kırılma mekanikliği numune boyutları arttıkça σ_N/Bf_t değerinin sürekli azaldığını söylemektedir. Halbuki yapılan deneysel araştırmalar numune boyutunun arttıkça numunede artık gerilmelerin kaldığını göstermektedir. İkinci gruba bakıldığında deney sonuçlarının Bazant'ın boyut etkisi ifadesinden saptığı görülmektedir. Bu grupta numune boyutu büyüdükçe σ_N/Bf_t değerinde düşüşün azaldığı görülmektedir. Bu numunelerde artık gerilmelerin olduğu düşünüldüğünden bu grup Bazant'ın artık gerilmeleri de dikkate alan geliştirilmiş ifadesi ile yeniden analiz edilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için birinci gruba ait kırılma değerleri de geliştirilmiş Bazant boyut etkisi ifadesiyle analiz edilmiştir. Birinci grubun geliştirilmiş boyut etkisi ifadesiyle analizine bakıldığında, bu numunelerde artık gerilme olmadığı için her iki ifadenin eğrileri birbiri

ile çakışmaktadır. Ancak artık gerilmenin var olduğu ikinci grubun deney sonuçlarına bakıldığında, geliştirilmiş boyut etkisi ifadesinin önceki boyut etkisi ifadesine göre deney sonuçlarını ifade etmekte daha başarılı olduğu görülmektedir. Deney sonuçlarının eğrilere olan uzaklıklarının karelerinin toplamın karekökü alınarak yapılan hata hesabı sonucuna göre ikinci grup deney sonuçlarının önceki boyut etkisi ifadesi ile gösteriminde hata değeri 0.0234 ve geliştirilmiş boyut etkisi ifadesi ile gösteriminde hata değeri 0.0134 olmaktadır. Birinci grup deney sonuçları için hata hesabı yapıldığında önceki boyut etkisi ifadesi ile gösteriminde hata değeri 0.0027 ve geliştirilmiş boyut etkisi ifadesi ile gösteriminde hata değeri 0.0028 olmaktadır.

Toplam onsekiz adet betonarme kiriş üzerinde yapılan boyut etkisi deneylerinden elde edilen sonuçlarında, numune boyutu büyüdükçe Bazant'ın geliştirilmiş boyut etkisi eşitliğinin kullanılmasının davranışı daha iyi modellediği bulunmuştur. Numune boyutları büyüdükçe gevreklik yani β artmaktadır. Numuneler daha gevrek kırılmaktadırlar. Gevreklik arttıkça numunede kırılma sonrasında artık gerilmeler kalmaktadır. Bu durumlarda kullanımı daha zor da olsa Bazant'ın geliştirilmiş boyut etkisiyle analizi yapılması önerilmektedir.

Boyutları küçük olan numunelerin daha sünek bir şekilde kırıldıkları bulunmuştur. Artık gerilmenin gözlenmediği bu durumlarda her iki eşitlik de kullanılabilir. Ancak laboratuvar şartlarında yapılan deneylerde belirli oranlarla küçültülen numunelerde gerçek boyutlarına göre, artık gerilme olmayacağı ve davranışın gerçek boyuta göre farklı olacağı unutulmamalıdır.

Deneyler boyut etkisinin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Laboratuvar şartlarında elde edilen deneysel veriler ile oluşturulan davranış, kapasite eşitlikleri boyut etkisini dikkate alacak şekilde güncellenmelidir.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

- B malzeme özelliklerine bağlı boyutsuz bir sabit,
 D hesaplarda kullanılan karakteristik boyut.
 D_0 malzemenin geometrisine bağlı birimi uzunluk olan bir sabit.
 f_t malzemenin çekme gerilmesi,
 I eylemsizlik momenti
 M eğilme momenti
 R varyasyon katsayısı
 y üst veya alt lifin tarafsız eksene uzaklığı

- α_r artık sürtünme gerilme oranı
 α_1 artık sürtünme malzeme sabiti oranı
 β gevreklik sayısı
 Φ donatı çapı
 σ_N nominal kırılma gerilmesi
 σ_0 artık gerilme çarpanı

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Belgin, Ç.M., **Beton Kolonların Göçme Yüklerinde Boyut Etkisi**, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1997.
2. Belgin, Ç., M., **Aşırı Donatılı Betonarme Kirişlerde Boyut Etkisi Deneyleri** Doktora Tezi, Gazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
3. Bazant, Z.P., Kwon, Y.W. "Failure of Slender and Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests of Size Effect", **Materials and Structures**, Cilt 27: 79-90, 1994.
4. Şener, S., Belgin Ç., Öztürk A., "Betonarme Kolonlarda Yapım Kusurlarının Deneysel Bulunması", **10. Ulusal Mekanik Kongresi**, İst., 85-86, 1997.
5. Şener, S., Barr, B.I.G., Abusiyaf, H.F., "Size Effect Tests of Reinforced Concrete Columns", **J. Struct. Eng. ASCE**, Cilt 130, No 4, 662-670, 2004.
6. Bazant, Z.P., Cedolin, L., "Stability of Structures: Elastic, Inelastic, Fracture and Damage Theories", Oxford Univ. Press, NY, 1-65, 1991.
7. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock, Metal", **J. Engng. Mech. ASCE**: Cilt 110, 518-535 1984.
8. Bazant, Z., P., Planas, J., "Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials" CRC Press, London, 1-150 1999.
9. Wittmann, F.H., "Fracture Mechanics of Concrete", Elsevier, Amsterdam, 54-78, 1983.
10. ACI Committee 446 "Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Determination of Material Properties", In Fracture Mechanics of Concrete Structures, Z.P. Bazant, **Elsevier Applied Science**, London, 1-140, 1992.
11. VanMier, J.G.M., "Fracture Processes of Concrete, Assess. of Mater. Parameters for Fracture Models", CRC Press, London, 1-78 1997.
12. Shah, S.P., Swartz, S.E., Ouyang, C., "Fracture Mechanics of Concrete: Applications of Fracture Mechanics to Concrete, Rock, and other Quasibrittle Materials", John Wiley & Sons, Inc., New York, 1-35, 1995.