

Beton boyut etkisi ve kırılma parametrelerinin tespiti

Varol KOÇ^{1,*}

¹Ondokuz Mayıs Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü 55139
Kurupelit/Samsun

Özet

Normal dayanımlı betondan hazırlanan çift konsol elemanlara, konsol eksenlerine paralel basınç yüklemesi uygulanmıştır. Yüklemeler iki farklı mesnetlenme durumunda uygulanarak birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Numune kalınlıkları sabit olup $t=30$ mm' dir. Diğer boyutlar büyük numuneden küçük numuneye doğru 4:2:1 benzerlik oranlarına sahiptir. Her numunede 2 yatay ve 1 düşey yerdeğiştirme ölçülmüş, konsol uçlarında ölçülen yatay yerdeğiştirmelerin toplanmasıyla açılma yerdeğiştirmesi bulunmuştur. Her numuneye ait yük- açılma yerdeğiştirmesi eğrilerinin altında kalan alanlardan yararlanarak enerji yutma kapasiteleri tespit edilmiştir. Deney sonuçları boyut etkisi eğrileri şeklinde düzenlenmiş ve boyut etkisi parametreleri elde edilmiştir. Deneylerin Ansys 5.4 sonlu elemanlar programıyla benzeşimi yapılmış, yine bu program yardımıyla elemanların kırılma toklukları bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Kırılma mekaniği, beton boyut etkisi, çift konsol elemanı, kırılma tokluğu, mod I göçmesi

Size effect and determined of fracture parameters for concrete

Abstract

Double cantilever beams elements which prepared from normal strength concrete are applied compressive loads paralel to cantilever axes. Loadings are applied to two different supported and compared with each other. Specimen thickness t is constant and 30 mm. Other sizes are geometrically similar with ratio is from big specimens to small specimens 4:2:1. Two horizontal and one vertical displacements are measured for each specimens and opening displacements are found for adding to horizontal displacements for each cantilever ends. Energy absorbed capacities are determined by utilizing from each specimen area of under the load- opening displacement curve. Test results are arranged for size effect curve and size effect parametters are obtained. Experiments are simulated with Ansys 5.4 finite element programs and though fracture toughnesses are found with helping this program.

Key words: Fracture mechanic, concrete size effect, double cantilever beams, fracture toughness, mod-I failure.

* Varol KOÇ, kvarol@omu.edu.tr

1. Giriş

Beton yapıların göçmesi en büyük yüke ulaşmadan önce büyük çatlakların ve çatlama bölgesinin gelişmesi ile olur. 20. yüzyılın ortasından beri temel kırılma mekaniği teorileri elde edildiği halde henüz beton ve/veya betonarme tasarımı kırılma mekaniğine dayanmamaktadır. Kırılma mekaniği cam gibi homojen gevrek malzeme ile homojen gevrek-sünek metallere uygulanmıştır. Kırılma mekaniğinin beton yapı tasarımında kullanılması önemli yararlar getirir. Özellikle farklı boyutlu yapılar için aynı güvenliğe ulaşmak mümkündür. Bununla yapısal güvenlik ve ekonomi arttırılır. Böylece yeni beton malzeme ve yeni tasarım yönetmeliklerinin kullanılma olasılığı artacaktır. Kırılma mekaniği, özellikle yüksek dayanımlı, hafif ve lifli beton gibi özel betonlarla yapılmış yapıların, beton barajlar gibi çok büyük boyutlu yapıların, öngerilmeli yapıların, nükleer reaktör hücreleri, savunma yapıları gibi güvenliğin çok yüksek olduğu ve göçmeleri büyük felakete neden olabilecek yapıların güvenli ve ekonomik olarak inşa edilebilmeleri için oldukça önemlidir. Kırılma mekaniği tabanlı analizde, büyük yapıların boyutlandırılmasında göçme mekanizması üzerine yapılan çalışmalar çok başarılıdır. Betonda göçmenin tek bir noktada başlamayıp çatlak önünde sonlu bölgede oluşması, göçmenin yayılarak olduğunu gösterir. Yapılan deneyler, göçmede çatlama gerilmesinin eleman boyutu artarken azaldığını, boyut etkisinin önemli olduğunu göstermiştir. Yarı gevrek malzeme göçmelerinde, dağılı çatlakların doğurduğu boyut etkisi açık olarak görülmekte ve yapılmış olan çalışmalar, Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumlu olmaktadır [1].

Betonun kırılma enerjisi, beton yapıların göçmesinin anlaşılması için gerekli basit bir kırılma karakteristiğidir. Bazantın önerdiği bu kuralda kırılma enerjisi G_f , sonsuz büyüklükteki bir numunede çatlak ilerlemesi için gerekli birim enerji olarak tanımlanmıştır. Bu tanım, hem numune boyutundan hem de numune biçiminden bağımsızdır. Geometrik olarak benzer numuneler ele alındığında ve göçme yükü sonsuz büyüklükteki numuneye genelleştirildiğinde, elde edilen kırılma enerjisi, numune tipinden, boyutundan ve biçiminden bağımsız olmalıdır. Limit durumda kırılma bölgesi, yapı veya numune boyutlarıyla karşılaştırıldığında göz önüne alınmayacak kadar küçülmektedir. Beton kırılma mekaniğiyle ilgili son dönem literatüründeki bazı çalışmalar şunlardır: Beton kirişlerde burulma göçmesi [2] etriyesiz boyuna doğrultuda donatılı kirişlerin diyagonal kesme göçmesi [3] yüksek dayanımlı silindir numunelerin basınç göçmesi [4] karşılıklı yüzeyleri çentikli normal ve yüksek dayanımlı küp beton numunelerde basınç göçmesi [5] deneylerinde boyut etkisi incelenmiştir. Üç nokta yüklemesine maruz dairesel ve dikdörtgen kesitli yüksek dayanımlı beton kirişlerin akustik emüsyon yöntemiyle boyut etkileri ölçülmüştür [6]. Deniz buzunun kırılma parametreleri ve boyut etkisinin elde edilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır [7].

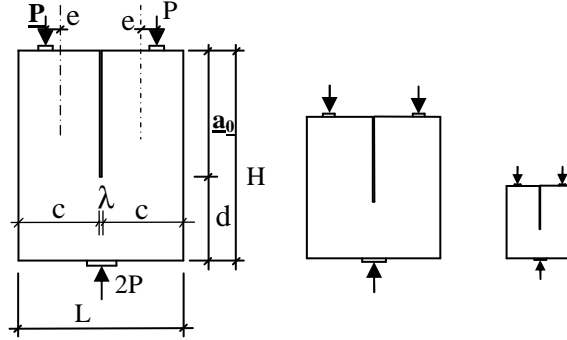
2. Yöntem

2.1. Deneysel çalışma

Kırılma mekaniğinde çift konsollar, klasik olarak açılma modu (mod I) kırılma parametrelerini bulma amacıyla, konsol uçlarından çekme kuvveti uygulanarak incelenirken, bu çalışmada, basınç yüklemesi altında incelenmiştir. Çift konsol elemanına, konsol eksenlerine paralel doğrultuda basınç yüklemesi uygulanmış, basınç yükünün oluşturduğu momentle mod-I (açılma) göçmesi elde edilmiştir. Çift konsola yük uygulanması, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, çentik altında ilerleyen çatlağın

çentik altı bölgeyi boydan boya katetmesine kadar sürdürülmüştür [8-10]. Böylece gelişen çatlağın çift konsolları iki ayrı parçaya ayırması sağlanmıştır. Bu çalışmada çift konsollar, konsol uçlarındaki mesnet şartları simetrik ve asimetrik olacak şekilde iki farklı mesnetlenme durumu için denenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Çift konsollar beton eleman ortasında açılan derin çentiklerle elde edilmiştir. Çentikler, kalıplara, beton dökümü sırasında konan ve ön prizden sonra sökülen yağlanmış plastik parçalarla yapılmıştır. Normal dayanımlı betondan hazırlanan numuneler, kalınlıkları $t=30$ mm olarak dökülmüştür. c konsol genişliği olmak üzere, konsol ekseninden konsol dış yüzüne doğru, $e=c/5$ dışmerkezliğiyle yüklenmişlerdir. Numuneler, P başlangıç harfi ile simgelenmiştir. Simetrik mesnetlenme şartına sahip numunelerde P başlangıç harfinden sonra S harfi konulmuştur. İsimlendirmede kullanılan son karakter ise, numune numarasını göstermektedir. Geometrik olarak benzer elemanlarda, numune boyutu bir numuneden diğerine 2 çarpanı ile büyütülerek değiştirilmiştir. Böylece en büyükten en küçüğe numune boyutları oranı, 4 : 2 : 1 şeklinde alınmıştır. Bu sayede boyut etkisi incelenebilmiştir. Şekil 1 ve Çizelge 1' de, numune boyutları gösterilmiştir.



Şekil 1. Numune şekli
Çizelge 1. Çift konsol boyutları

NUMUNE	H (mm)	L (mm)	d (mm)	a_0 (mm)	c (mm)	t (mm)	$e=c/5$ (mm)	λ (mm)
P1- 3, PS1- 3	300	260	120	180	127,5	30	25,5	5
P4- 6, PS4- 6	150	130	60	90	62,5	30	12,5	5
P7- 9, PS7- 9	75	65	30	45	30	30	6	5

Normal beton karışım oranları çimento/çakıl/kum/su = 1/2/2/0.55 olarak alınmış, Portland Kompoze Çimentosu (PKÇ/B 32.5R) kullanılmıştır. Karışımlarda en büyük agrega çapı 9.5 mm, en büyük kum çapı 4.8 mm' dir. Betonun basınç dayanımlarını elde etmek ve burada da boyut etkisini görmek için her bir karışımdan 3'er adet 150x300 mm, 75x150 mm ve 37.5x75 mm boyutlarında kontrol silindirleri dökülmüştür. Silindir basınç deneylerinden elde edilen karakteristik dayanım ve standart sapmalar Çizelge 2' de verilmiştir. Bütün numuneler, olasılıksal dağılım etkilerini en aza indirmek için aynı bir karışımdan dökülmüş ve kür havuzunda 28 gün bekletilmişlerdir.

Çizelge 2. Silindir basınç dayanımları

Mesnet Şartı	Silindir No	Göçme Yüğü (N)	Dayanım (Mpa)	Ortalama Dayanım	Standart Sapma	Varyasyon Katsayısı
Asimetrik mesnetli elemanlar	1	659000	37,31	30,76	5,19	0,169
	2	536000	30,35			
	3	435000	24,63			
Simetrik mesnetli elemanlar	1	625000	35,39	32,78	1,92	0,059
	2	568000	32,16			
	3	544000	30,80			

Deneilerin yapıldığı yükleme çerçevesinde denenebilir numune uzunluğu 80 cm' dir. Bu çerçeve, 4 köşede St-I (S220) çeliğinden L 100.100.10 korniyerle yapılmıştır. Toplam kesit alanı 7600 mm² ve çekme dayanımı $\sigma_{em}=160$ MPa olup bu çerçevede uygulanabilecek en büyük yük,

$$P = A \cdot \sigma_{em} = 7600 \text{mm}^2 \cdot 160 \text{MPa} = 1216 \text{ kN} \quad (1)$$

ve çerçevenin katılığı ise

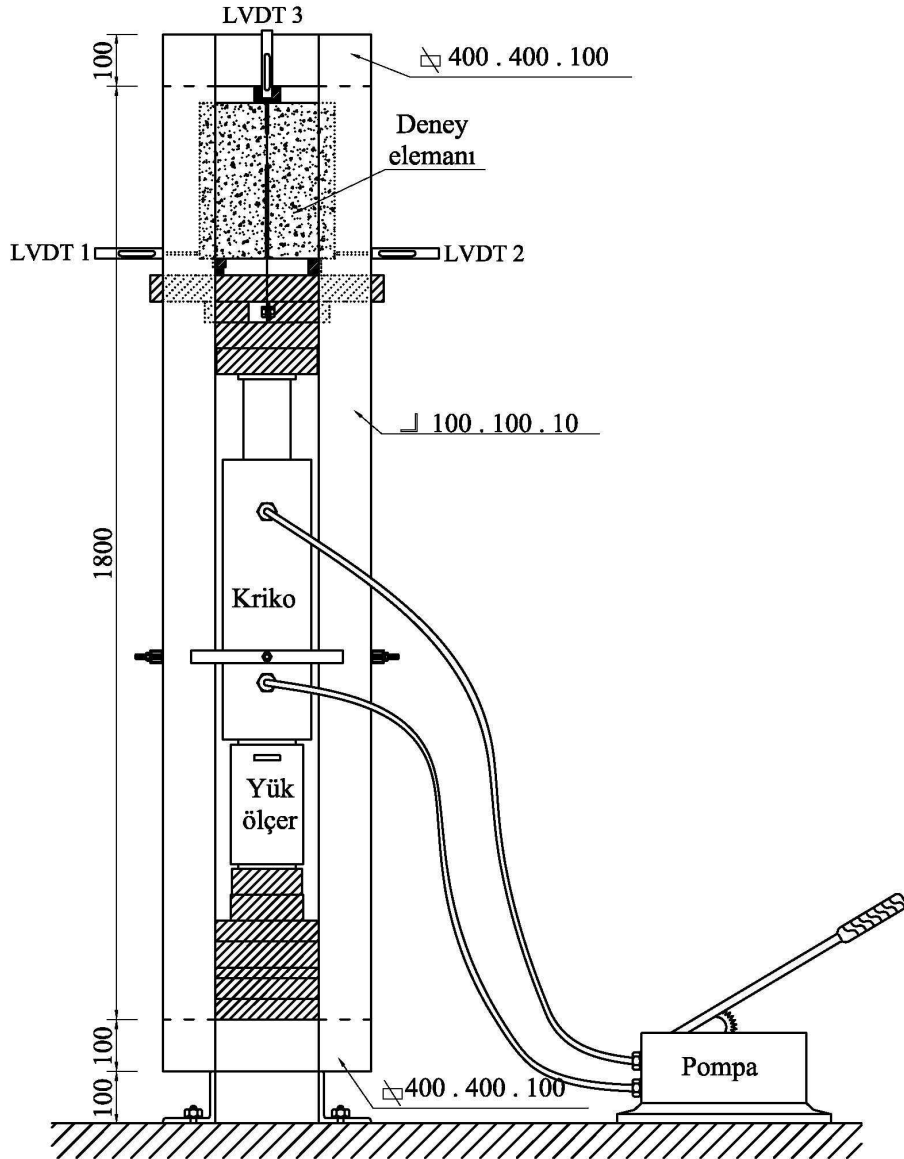
$$k = \frac{AE}{L} = \frac{7600 \text{mm}^2 \times 210000 \text{MPa}}{2850 \text{mm}} = 560 \text{ kN / mm} \quad (2)$$

şeklinde verilebilir. Yükleme yük kontrollü yapılmış olup, göçme yüklerine bütün konsollarda 3 dakikada erişilecek biçimde küçük numunelerde piston uzama hızı yavaş, büyük numunelerde hızlı seçilmiştir. Yükleme 225 kN kapasiteli load cell ile ölçülmüştür. Yük okumaları yanında konsol uçlarında yatay yerdeğiştirme (LVDT1 ve LVDT2) okumaları ile, düşey yerdeğiştirme (LVDT3) okumaları data logger ile bilgisayara kaydedilmiştir (Şekil 2).

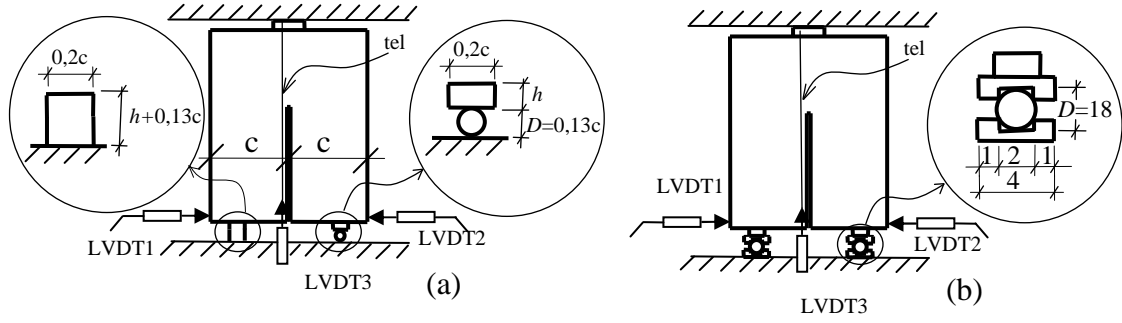
Simetrik olmayan mesnet şartı, numune, yükleme çerçevesine, konsol uçları alta gelecek şekilde yerleştirildiğinde sol mesnet sabit, sağ mesnet hareketli olacak tarzda gerçekleştirilmiştir. Sabit mesnetler, konsol genişliğinin yaklaşık %20 si genişliğe sahip olacak şekilde çelik plakalarla, hareketli mesnetler bu plakaların altına plaka genişliklerinin yaklaşık %60 ı çapında silindir rulolar koyularak gerçekleştirilmiştir. Üst mesnet ise sabit ve hareketli mesnet plaka genişliklerinin 2 katı olarak alınmıştır. Simetrik olmayan mesnetleme durumları Şekil 3a da, mesnet genişlikleri Çizelge 3. de sunulmuştur. Simetrik mesnetleme durumunda ise, her iki konsolda da simetrik olmayan mesnet durumunda kullanılan sabit mesnet plakaları kullanılmıştır. Numunenin basınç altında sıkışıp zorlanmaması ve basınç yüklemesiyle çift konsollar birbirlerinden ayrıldıktan sonra deneyin sonlanması için, simetrik yükleme durumunda mesnet altlarına, Şekil3b 'de görüldüğü gibi U plakalar arasına yerleştirilmiş rulolar koyularak numuneye dönme serbestliği sağlanmıştır. Bütün serilerde aynı aparat kullanılmış, sadece elemana göre, U plakalar üstüne konulan mesnet plakaları değiştirilmiştir.

Çizelge 3. Mesnet boyutları

Eleman No	Konsol Genişliği (cm)	Sabit Mesnet	Hareketli Mesnet		Üst Mesnet Plaka Boyutları (enyükseklik) (cm)
		Plaka Boyutları (enyükseklik) (cm)	Plaka Boyutları (enyükseklik) (cm)	Rulo Çapı (cm)	
P1,P2,P3	12,75	2,5x3,1	2,5x1,6	1,5	5,0x2,0
P4,P5,P6	6,25	1,25x1,3	1,25x0,5	0,8	2,5x1,6
P7,P8,P9	3,00	0,6x1,0	0,6x0,6	0,4	1,25x0,5



Şekil 2. Deney düzeneđi



Şekil 3. Mesnetlenme şartları

2.2. Teorik esaslar

Araştırmalar sonucu iki ve üç boyutlu geometrik olarak benzer, beton gibi heterojen malzemeden yapılmış yapıların gevrek göçmeleri için Bazant tarafından çıkarılan boyut etkisinin yaklaşık ifadesi şu şekilde verilebilir [1]:

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1-\beta}} \quad , \quad \beta = \frac{D}{D_0} \quad (3)$$

Bu eşitliklerde; σ_N : Göçmedeki nominal gerilme (MPa), B: Yapı biçimine bağlı ampirik bir katsayı, f_t : Betonun çekme dayanımı (MPa), β : Gevreklik katsayısı, D: Yapının karakteristik boyutu (mm), D_0 : Gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi gösteren ampirik katsayı (mm) olarak verilmiştir.

D_0 parametresi, boyut etkisi eğrisinde, geometrik olarak yatay asimtot (dayanım teorisine karşı gelen) ile eğimli asimtotun (Lineer elastik kırılma makaniğine (LEKM) karşı gelen) kesim noktasından sapmayı verir. D_0 parametresi, ve elde edilen gevreklik oranı, uygulanan deneyle (eleman şekli, boyutu ve yükleme durumu) yakından ilişkilidir. Geometrik olarak benzer numunelerde B ve D_0 sabittir. Eğer $\log \sigma_N$ in $\log D$ 'ye göre grafik gösterimi yapılırsa (boyut etkisi eğrisi), herhangi bir göçme kriterine (emniyet gerilmeleri yöntemi, taşıma gücü) göre hesap dayanımı, yatay bir çizgi olarak verilir. Taşıma gücü ve emniyet gerilmeleri arasındaki tek fark, yatay çizginin düzeyindedir. Bütün LEKM çözümlerinde ise, σ_N değeri, $D^{1/2}$ değeri ile ters orantılıdır. LEKM' nin logaritmik gerilme- boyut eksenlerinde gösterimi, eğimi -1/2 olan bir doğrudur.

Eğer yapı çok küçük ise (3) denkleminde β değeri, 1'in yanında çok küçük olduğundan göz önüne alınmayabilir. Bu durumda σ_N göçme gerilmesi, f_t dayanımı ile orantılıdır ve gerilme hesabında, plastik kuram veya emniyet gerilmeleri yöntemi yeterlidir. Eğer yapı çok büyük olursa, 1 değeri β 'nın yanında göz önüne alınmaz. σ_N göçme gerilmesi, $D^{1/2}$ değeri ile ters orantılıdır. Geçmişte çoğu göçme ölçütü (eğilme, kesme, çekme), dayanım ölçütüne göre (β ihmal edilerek) yapılırken, günümüzde, boyut etkisini içeren bağıntıları verecek araştırmalar devam etmektedir. (3) denklemi, yalnız aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutunu içeren yapılara uygulanabilir.

Denklem (3)' de söz konusu yapı karakteristik boyutu (D) çift konsol numunelerde kırılma bölgesi olan, çentik altı bölge yüksekliği (d) olarak alınmış, betonun çekme dayanımı (f_t), TS500'ün (11) verdiği şu bağıntı ile bulunmuştur:

$$f_t = 0.35\sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

Burada; f_{ck} : Beton karakteristik basınç dayanımı (MPa) olarak verilmiştir. Denklem (3)'deki nominal göçme gerilmesi olarak ise, asal gerilmeler kullanılmıştır:

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (5)$$

Burada, $\sigma=My/I$, $\tau=8P/(td)$, $M=P(e+c/2)/2$ olarak verilmiştir. Bu eşitliklerde; σ : eğilme gerilmesi (MPa), τ : kayma gerilmesi (MPa), M : yükleme sonucu oluşan moment (Nmm), y : kesit ağırlık merkezinden konsol yüzlerinin uzaklığı (mm), I : eylemsizlik momenti (mm^4), P : basınç yükü olarak load cell'den okunan değer (N), t : eleman kalınlığı(mm), d : çift konsol elemanda çentik altı bölge yüksekliği (mm), e : yükün konsol ekseninden dışmerkezliği (mm), c : konsol genişliği (mm) dir.

Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi denklemi (3), farklı regresyon analizleriyle düzenlenebilir (1). Regresyon analizlerinden, bilinmeyen malzeme sabitleri B ve D_0 elde edilebilir. Bu çalışmada, her seri için Lineer I, Lineer II ve doğrusal olmayan regresyon analizleri yapılmıştır. Lineer I regresyonunda denklem (6), Lineer II regresyonunda denklem (7) kullanılmıştır:

$$Y=AX+C \quad (6)$$

$$Y'=A'X'+C' \quad (7)$$

Burada; $X=D$, $Y=(1/\sigma_N)^2$, $C=(1/Bf_t)^2$, $A=C/D_0$, $X'=1/D$, $Y'=(1/\sigma_N D)^2$, $A'=(1/Bf_t)^2$, $C'=A'/D_0$ olarak alınır. İstatistiksel hesaplarla, C ve A nın değişimi ω_A ve ω_C ; ve dağılım bandının genişliği m de hesaplanabilir.

Doğrusal olmayan analizde ise, (3) bağıntısının her iki tarafının doğal logaritması alınıp düzenlenir:

$$\ln \sigma_N = \ln \frac{Bf_t \sqrt{D_0}}{\sqrt{D_0 + D}} \quad (8)$$

ve analizi kolaylaştırmak için gerekli değişiklikler yapılır:

$$y = \ln \frac{M}{\sqrt{N + e^x}} \quad (9)$$

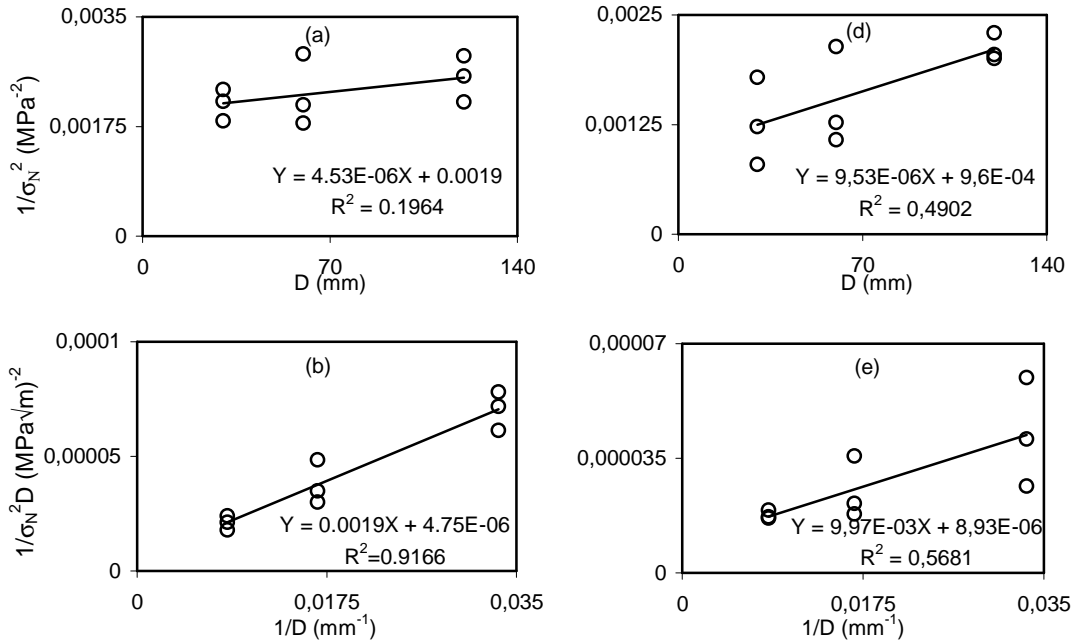
Elde edilen son denklemde $x = \ln D$, $y = \ln \sigma_N$, $Bf_t \sqrt{D_0} = M$, $D_0 = N$ olarak alınır.

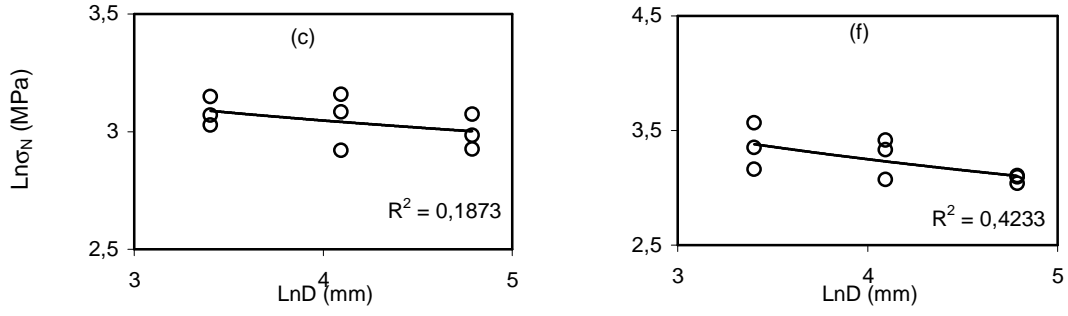
Bu çalışmada her seri için bahsedilen bu 3 regresyon analizi de yapılmış, sonuçlar Çizelge 4 ve Şekil 4' de verilmiştir. Bu analizlerden, literatürde en çok kullanılan Doğrusal I analiz sonuçlarından elde edilen B ve D_0 katsayılarının (3) denklemlerinde

yerine konulmasıyla, boyut etkisini içeren gerilme formülü bulunmuştur. Denklem (3)'ü kullanarak her seri için logaritmik eksen takımında σ_N/Bf_t ve $\beta=D/D_0$ değerleri gösterilebilir. İki serinin Şekil 5' de ayrı ayrı, Şekil 6'da birlikte boyut etkisi eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerde kesik çizgi ile gösterilen yatay doğru dayanım kriterini gösterir. Dayanım kriterinde eleman dayanımı, değişen boyuta rağmen sabit kalır. Eğimi -1/2 olan kesik çizgiyle gösterilen doğru ise, LEKM'ni simgeler. LEKM' de kuvvetli boyut etkisi görülür. Gerçekte beton nominal dayanımı, bu iki ideal durum arasındadır. Eleman boyutları büyüdükçe ve gevreklik arttıkça, LEKM'ne yaklaşılır.

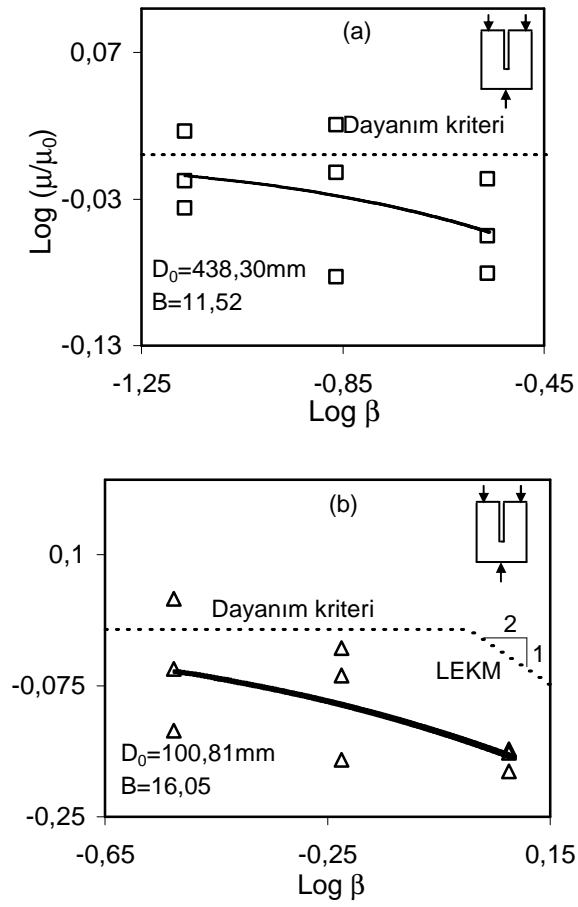
Çizelge 4. Boyut etkisi parametreleri

Değişkenler	P SERİSİ			PS SERİSİ		
	Lineer Analiz I	Lineer Analiz II	Nonlinear Analiz	Lineer Analiz I	Lineer Analiz II	Nonlinear Analiz
A (Ac)	4,53E-06	0,001972	-	9,50E-06	0,000997	-
C (Bc)	0,001985	4,75E-06	-	0,00096	8,93E-06	-
D ₀ (mm)	438,26	415,38	445,85	100,81	111,63	94,8
Bf _t (Mpa)	22,45	22,52	22,54	32,26	31,67	33,19
R	0,44	0,96	0,43	0,7	0,75	0,65
ω_A (ω_{Ac})	0,76	0,11	-	0,39	0,33	-
ω_C (ω_{Cc})	0,14	1,04	-	0,3	0,81	-
m	0,3	0,29	-	0,45	0,64	-

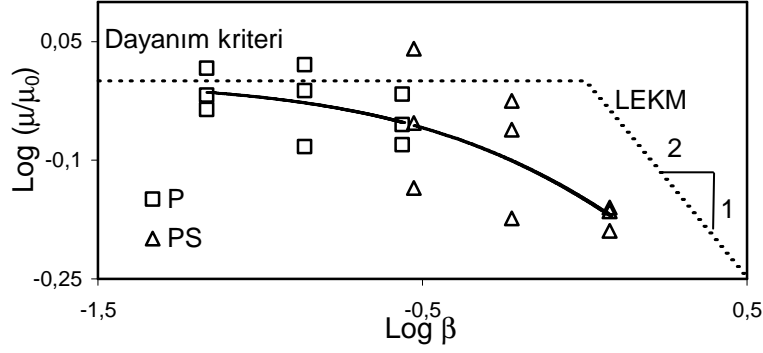




Şekil 4. P serisi a) Linear I, b) LinearII, c) Nonlinear; PS serisi d) Linear I, e) LinearII, f) Nonlinear boyut etkisi regresyon analizleri.



Şekil 5. Boyut etkisi eğrileri a) P serisi, b) PS serisi



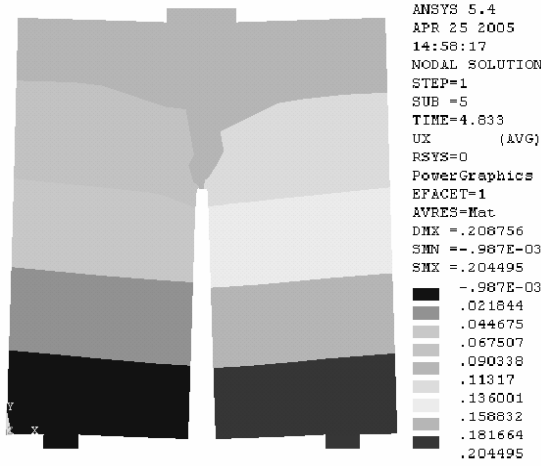
Şekil 6. Toplu boyut etkisi eğrileri

3. Bulgular

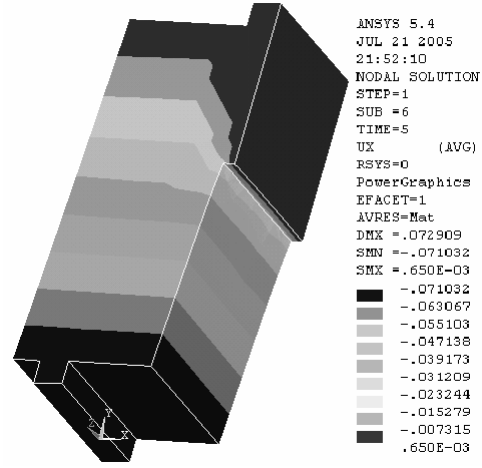
3.1. Deney ve Ansys analizi sonuçları

Deneylerin Ansys 5.4 Nonlinear sonlu elemanlar sayısal analiz programıyla benzeşimi yapılarak yük- deplasman değerleri elde edilmiştir. Beton numuneler Ansys 5.4 programıyla modellenirken Ansys programı eleman tipleri kütüphanesinde tanımlı bulunan Solid65 (3 boyutlu betonarme kabuk) elemanı; mesnetler modellenirken de Solid45 (3 boyutlu yapısal kabuk) elemanı kullanılmıştır. Solid65, beton kabukların 3 boyutlu modellenmesinde kullanılan bir eleman tipidir. Bu eleman tipi, kabukta oluşabilecek çekme kuvveti altında çatlama ve basınç yüklemesinde ezilme özellikleri ile tanımlanmıştır. Eleman, her birinde x,y ve z eksenleri doğrultusunda deplasman serbestliğiyle tanımlanmış 3 serbestlikli 8 düğüm noktasına sahiptir. Solid45 elemanı da Solid65 elemanıya benzer özelliklere sahiptir ve 3 boyutlu çelik malzeden yapılmış elemanların tanımlanmasında kullanılır. Solid65, Solid45 elemanına ek olarak, çatlama ve ezilme kapasitesine de sahiptir. Bu eleman tipinin en önemli özelliği, nonlinear malzeme davranışını, betonun çatlama, ezilme, plastik deformasyon ve sünme gibi özelliklerini yansıtmaktır. Numuneler üçgen sonlu elemanlar ağı ile sonlu elemanlara ayrılmış, böylece hassas sonuç elde etmek için çentik çevresinde yeterli sıklaştırma yapılabilmektedir. Numunelerin Ansys programıyla analizini yaparken uygulanacak yük olarak, aynı boyutlara sahip her üç numuneden deneysel göçme yükü en büyük olanının yükü seçilmiştir. Numune, 6 yükleme adımıyla bu maksimum göçme yüküne kadar yüklenerek, her yükleme adımına ait yük ve deplasman değerleri kaydedilmiş, bu değerlerin yardımıyla yük- yatay açılma eğrileri çizilmiştir. Simetrik mesnetlenme durumuna sahip numunelerin analizi yapılırken simetri ekseninden yararlanılarak numunenin yarısı analiz edilmiş, böylece çözüm stabilitesi artırılmıştır. Örnek olarak P2, P3 ve PS8 elemanlarının bazı Ansys analizi sonuçları Şekil 7 de verilmiştir.

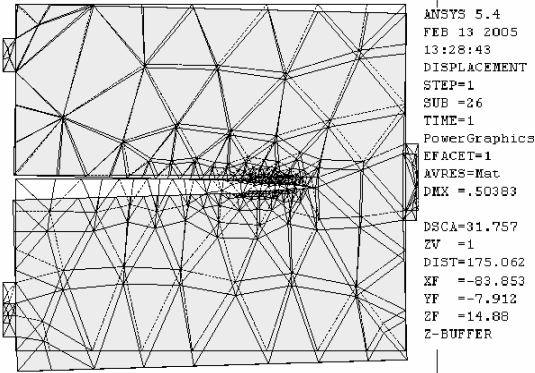
Deney elemanlarının ölçülen göçme yükleri Çizelge 5' de verilmiştir. Numunelere ait deney sonuçlarından elde edilen yük yatay açılma değerleriyle ANSYS 5.4 programından elde edilen yük yatay açılma değerleri ise Çizelge 6 ve Şekil 8' de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Yatay açılma değerleri, konsol uçlarında yapılan LVDT1 ve LVDT2 ölçümlerinin (Bknz. Şekil 2 ve 3) toplanmasıyla elde edilmiştir. Her numunenin yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri altında kalan alanlardan bulunan enerji yutma kapasiteleri ile bu değerlerin standart sapma ve varyasyon katsayıları da Çizelge 5' de verilmiştir.



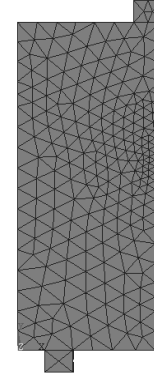
(a) P3 elemanı max. yatay açılma



(b) PS8 elemanı max. yatay açılma



(c) P2 elemanı max. çentik uzunluğuna ait sonlu eleman ağı



(d) PS8 elemanı sonlu eleman ağı

Şekil 7. Bazı Ansys analizi sonuçları

Çizelge 5. Göçme yükleri ve yutulan enerjiler

Eleman Adı	Göçme Yüğü kN	Yutulan Enerji kNmm	Standart Sapma N/mm	Varyasyon Katsayısı
P1	7,712	1,053	0,083	0,077
P2	7,268	0,982		
P3	8,428	1,182		
P4	4,253	0,53	0,073	0,148
P5	4,585	0,554		
P6	3,611	0,389		
P7	2,01	0,163	0,005	0,033
P8	2,088	0,174		
P9	2,242	0,162		
PS1	8,612	2,3012	0,287	0,150
PS2	8,708	1,6174		
PS3	8,134	1,8203		
PS4	4,211	0,4031	0,215	0,336
PS5	5,455	0,5913		
PS6	5,933	0,923		
PS7	2,775	0,0931	0,065	0,452
PS8	3,445	0,2362		
PS9	2,297	0,1032		

3.2. Gerilme tokluklarının bulunması

Eleman yatay açılma- yük değerleriyle çatlak boyları arasında kurulan ilişki, aşağıda açıklandığı şekilde kurularak, gerilme tokluklarını elde etmek için gerekli olan çatlak boyları bulunur.

Şekil 9’da görüldüğü gibi, konsol uçlarında uygulanan $P/2$ yükünün döndürme etkisiyle çift konsollar, u sehimi ve Δa çatlak gelişimi göstererek birbirlerinden ayrılmaktadırlar. Çift konsolun bu davranışı, a toplam çentik boyunu kiriş uzunluğu olarak aldığımız ankastre mesnetli bir kirişin, konsol ucunda, M momenti etkisiyle u sehimi yapmasına denktir. Sonuç itibariyle bu ankastre mesnetli konsolda kiriş boyu a ile yerdeğiştirme u arasında kuracağımız ilişki, basınç yüklü çift konsolda a toplam çentik boyu ile u yerdeğiştirme arasındaki ilişkiyi de simgeler [1]. Bu ilişki, virtüel iş prensibinden yararlanılarak şu şekilde verilebilir:

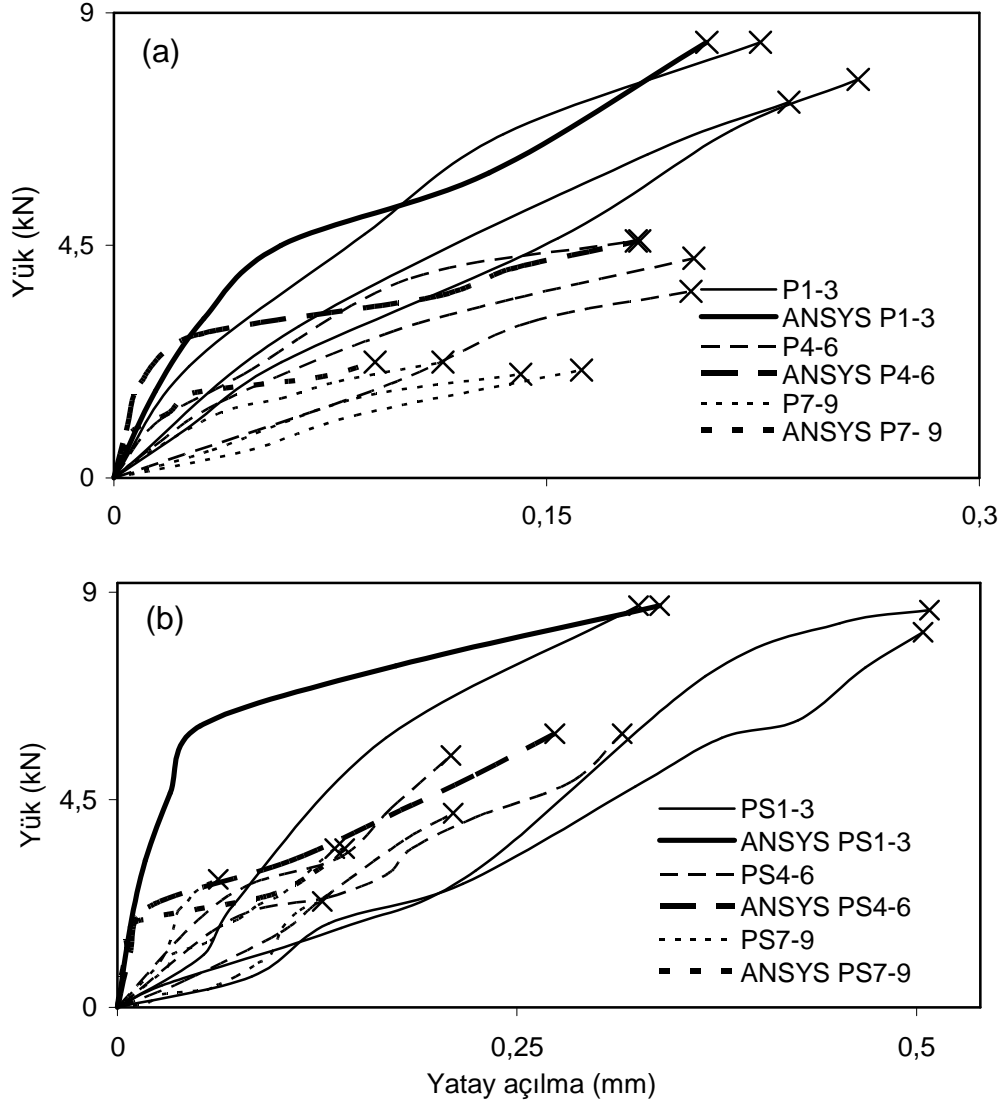
$$u = \frac{Ma^2}{2EI} \quad (10)$$

Burda I eylemsizlik momenti olup, $I = tc^3/12$ olarak alınabilir. Çift konsolda açılma, iki yöndeki u deplasmanlarının toplamı olduğundan, $u = Ma^2/EI$ olur. I eylemsizlik momenti yerine yazılırsa, $u = 12Ma^2/Etc^3$ olarak bulunur. Moment değeri ise, Şekil 9’ da görüldüğü gibi, $M = 0,5P(0,7c+0,5\lambda)$ şeklinde hesaplanabilir. Burada λ : çentik genişliğidir. Sonuç olarak $u = 6P(0,7c+0,5\lambda)a^2/Etc^3$ ve buradan,

$$a = \sqrt{\frac{utc^3E}{6P(0,7c+0,5\lambda)}} \quad (11)$$

şeklinde yazılabilir. Böylece u , yatay açılma değeri, ve a da toplam çentik boyu olmak üzere, yatay açılma değeri ile toplam çentik boyu arasındaki ilişki kurulmuş olur.

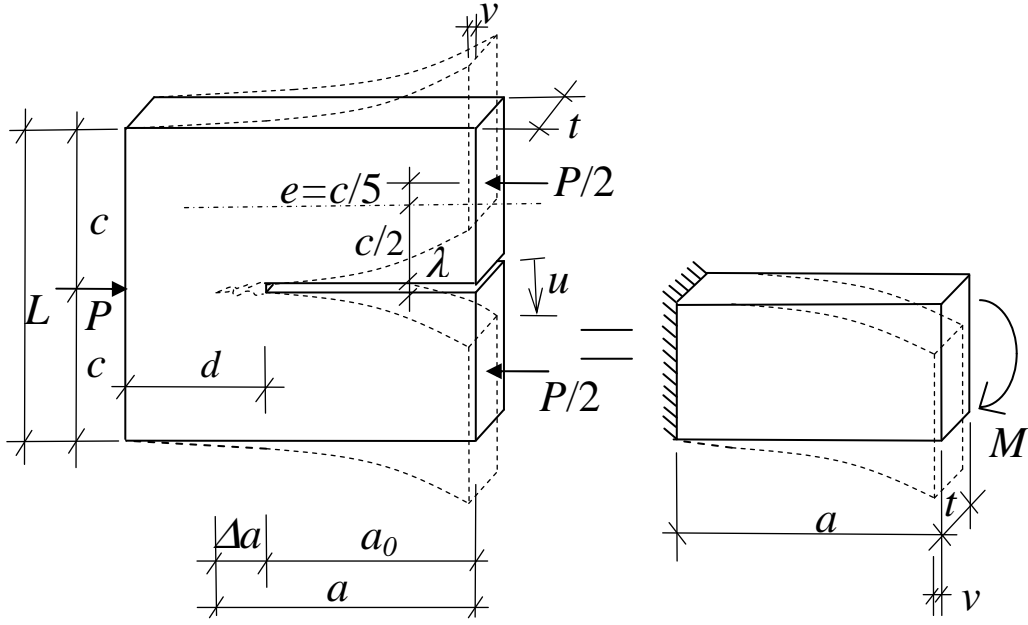
Deney datalarından elde edilen yatay açılma - yük değerlerinden, P göçme yükü olmak üzere, yaklaşık $P/10$, $P/2$ ve P değerlerine denk gelen, u , yatay açılma değerleri bulunur. Denklem (11) kullanılarak bu yatay açılma değerleri, a , toplam çentik boylarına dönüştürülür. Böylece istenen yükleme adımıdaki yüke ait çentik boyu bulunmuş olur. Ardından deney elemanı bu çentiğe sahip haliyle ANSYS programında modellenerek gerilme tokluğu bulunur. Böylece elemana ait $P/10$, $P/2$ ve P değerlerine denk gelen üç çentik boyuna karşılık üç gerilme tokluğu değeri elde edilir. Her elemana ait çentik boyları ve gerilme toklukları Çizelge 7 ve Şekil 10’ da sunulmuştur.



Şekil 8. Yük- yatay açılma değerleri a) P serisi, b) PS serisi

Çizelge 6. Deney ve Ansys yatay açılma değerleri

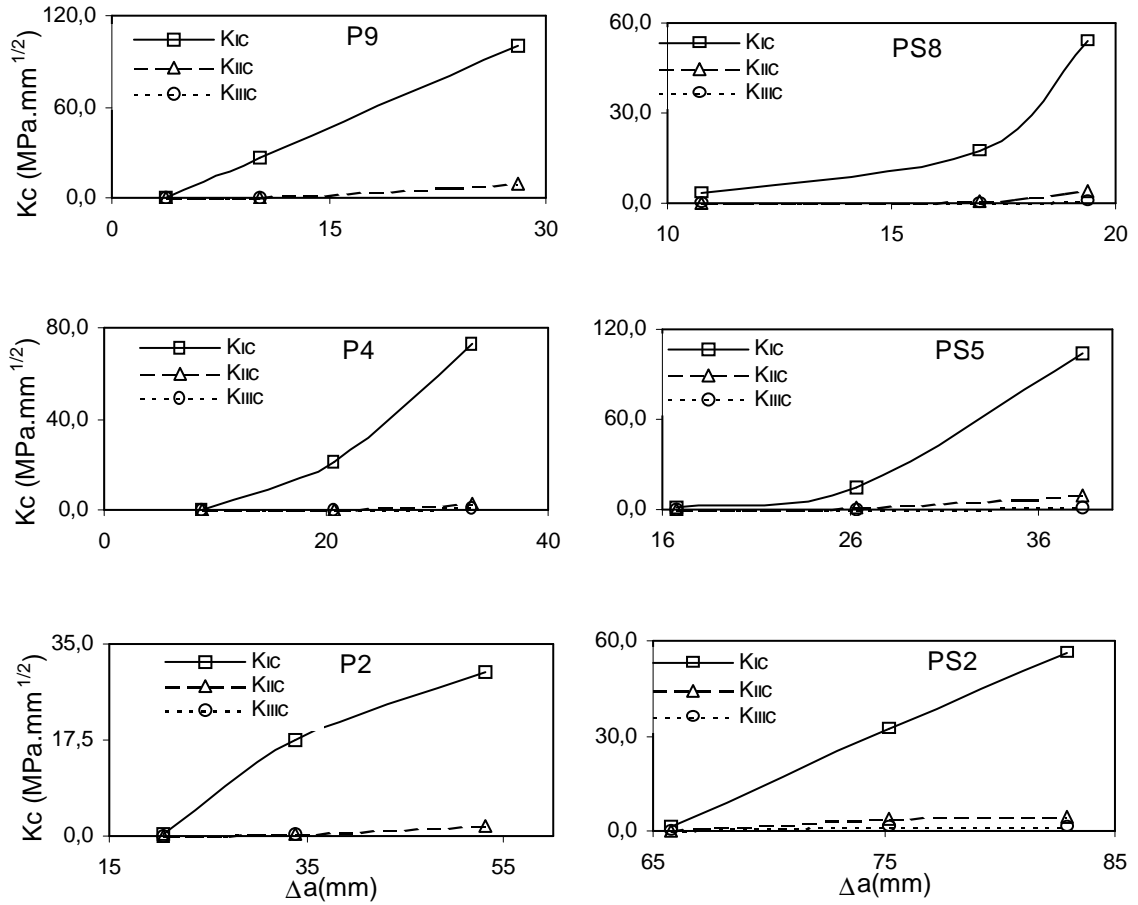
Eleman	Ansys Analizi Sonuçları				Deney Sonuçları	Fark
	Yük N	Sol konsol yatay yerdeğiştirmesi mm	Sağ konsol yatay yerdeğiştirmesi mm	Açılma Yerdeğişimi mm	Maksimum yatay açılma mm	%
P1-3	1685,6	0,000159	0,01418	0,014339	0,224	9
	3087,2	0,000327	0,030839	0,031166		
	4495	0,000547	0,057175	0,057722		
	5897,8	0,000696	0,12932	0,130016		
	8428	0,000987	0,204495	0,205482		
P4-6	916,95	0,0000748	0,004126	0,0042008	0,181	0,6
	1833,9	0,000159	0,008964	0,009123		
	2750,9	0,00032	0,027285	0,027605		
	3516	0,001074	0,110443	0,111517		
	4049,9	0,001282	0,13631	0,137592		
	4584,8	0,001585	0,180621	0,182206		
P7-9	448,42	0,000033	0,003037	0,00307	0,114	26
	896,85	0,0000661	0,006074	0,0061401		
	1270,5	0,000155	0,019229	0,019384		
	1644,3	0,000198	0,026901	0,027099		
	1943,7	0,000398	0,070066	0,070464		
	2242,4	0,000477	0,089997	0,090474		
PS1-3	1741,6	0,003898	0,003898	0,007796	0,326	4
	3189,7	0,008587	0,008587	0,017174		
	4644,3	0,016471	0,016471	0,032942		
	6093,8	0,025793	0,025793	0,051586		
	7404,8	0,087122	0,087122	0,174244		
	8708	0,169601	0,169601	0,339202		
PS4-6	1186,5	0,0039	0,0039	0,0078	0,316	13
	2175,2	0,009564	0,009564	0,019128		
	3164,3	0,053745	0,053745	0,10749		
	4153	0,0851	0,0851	0,1702		
	5042,7	0,112066	0,112066	0,224132		
	5932,6	0,13682	0,13682	0,27364		
PS7-9	689	0,001197	0,001197	0,002394	0,136	4
	1263,2	0,002921	0,002921	0,005842		
	1837,4	0,004794	0,004794	0,009588		
	2411,8	0,046591	0,046591	0,093182		
	2928,3	0,061536	0,061536	0,123072		
	3445,2	0,071032	0,071032	0,142064		



Şekil 9. Çift konsol yatay açılma yerdeğişimi ve konsol kiriş düşey yerdeğişimi

Çizelge 7. Çentik uzunlukları ve kırılma toklukları

Eleman	Nokta	P(kN)	Δa (mm)	K_{Ic}	K_{IIc}	K_{IIIc}
P9	ilk	0,309	3,7595	0,64	0,16	0,01
	orta	1,237	10,266	26,59	0,56	0,64
	son	2,242	28,051	99,92	9,29	3,23
P4	ilk	0,619	8,781	0,11	0,004	0,00003
	orta	2,784	20,694	20,839	0,384	0,033
	son	4,253	33,07	73,172	2,367	0,529
P2	ilk	2,938	20,547	0,479	0,012	0,008
	orta	6,263	33,761	17,622	0,382	0,417
	son	7,268	53,159	30,039	1,88	0,857
PS8	ilk	1,148	10,75	3,324	0,085	0,084
	orta	1,722	16,96	17,251	0,738	0,088
	son	3,445	19,37	54,212	4,002	0,521
PS5	ilk	1,818	16,73	1,844	0,278	0,008
	orta	2,679	26,31	15,295	1,33	0,268
	son	5,455	38,41	104,62	8,792	0,729
PS2	ilk	2,201	65,76	1,432	0,265	0,043
	orta	6,124	75,19	32,324	3,837	1,068
	son	8,708	82,91	56,455	4,11	1,209



Şekil 10. Kırılma toklukları a) P serisi, b) PS serisi

4. Tartışma ve sonuç

- 1- Bütün çift konsollu kolonların göçmesi çentiklerin ilerleyerek elemanların iki parça olması ile olmuştur. Bu da tüm numunelerde göçme modlarının aynı olduğunu ve boyut etkisi denkleminin uygulanabileceğini gösterir. Göçmeler, yarı gevrek göçme olup, numune boyutu arttıkça, deneysel (nominal) eğilme kesme gerilmesinin, elastisite teorisinden hesaplanan gerilmelere oranla azaldığı görülmüştür. Bu durum, denenen yükleme durumu ve eleman geometrisi için boyut etkisinin etkili olduğunu gösterir.
- 2- Deney sonuçlarından elde edilen değerler Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumludur. Çift Konsolun basınç göçmesi için, boyut etkisi içeren yaklaşık (3) bağıntısı, asimetrik mesnetlenme durumunda $B=12$, $D_0=440$ mm ve simetrik mesnetlenme durumunda $B=16$, $D_0=100$ mm olmak üzere önerilebilir. Simetrik mesnetlenmede D_0 katsayılarının azaldığı, dolayısıyla β gevrekliğinin arttığı görülmektedir. Bu davranış biçimi, Şekil 6' da gösterilen toplu boyut etkisi grafiklerinde, simetrik mesnetli elemanların LEKM davranışına daha çok yaklaşmış olmalarından da anlaşılmaktadır. Çizelge 5' den de anlaşılacağı üzere, simetrik

mesnetleme durumunda göçme yükleri büyümektedir. Kırılma yükündeki bu artışın, elemanı daha gevrek bir göçme davranışına götürmüş olduğu düşünülebilir.

- 3- Şekil 8 ve Çizelge 6' nın incelenmesinden, özellikle beton gibi heterojen yarı gevrek bir malzeme için, Ansys analiziyle, deney sonuçlarına yeterli yakınlıkta sonuçlar elde edilebildiği, aralarındaki farkın %0,6 ile %26 arasında olduğu söylenebilir.
- 4- Çizelge 7 ve Şekil 10'a bakıldığında, kırılma tokluklarının büyükten küçüğe, K_{Ic} , K_{IIc} , K_{IIIc} şeklinde sıralandığı görülür. Bunun nedeni, eleman göçmesinde, basınç yükünün oluşturduğu moment etkisinden dolayı, en çok açılma modunun, ardından kesme modunun ve en az da yırtılma modunun etkili olmasıdır.

Teşekkür

Bu çalışmanın yapılması için Gazi Üniversitesi'nden 06/2004-20 kodlu "Beton Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi" isimli araştırma projesi desteği alınmıştır. Bu desteği sağlayan Gazi Üniversitesi'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Kaynaklar

- [1] Bazant, Z. P., and Planas, J. "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials", CRC Press, Boca Raton, Fla. (1998).
- [2] Bazant, Z.P., and Şener, S., "Size effect in torsional failure of concrete beam", **J. Struct. Eng. Proc. ASCE**, 113: 2125-2136 (1987).
- [3] Bazant, Z.P., and Kazemi, M.T., "Size effect on diagonal shear failure of concrete beams without stirrups", **ACI Structural Journal**, 88 (3): 268- 276 (1991).
- [4] Şener, S., "Size effect tests of high strength concrete" **Journal of Materials in Civil Eng, ASCE**, Vol.9, No.1: 46-48 (1997).
- [5] Barr, B. I. G., Abusiaf, H. F., and Şener, S. "Size effect and fracture energy studies using compact compression specimens." **RILEM&Mater. Struct.**, 31, 36-41(1998).
- [6] Labuz J. F., Cattaneo S., and Chen H., "Acoustic emission at failure in quasi-brittle materials", **Construction and Building Materials**, 15, 225-233 (2001).
- [7] Bazant Z.P., Asce F., Guo Z., "Size effect on strength of floating sea ice under vertical line load", **Journal of engineering mechanics**, 254-263 (2002).
- [8] Koç, V., ve Şener, S., "Lifli Beton Çift Konsolun Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi,"**Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı II**, TÜBİTAK, Konya, 169-172 (2003).
- [9] Koç V., ve Şener S., "Hafif ve normal betondan yapılmış çift konsol numunelerin basınç göçmesinde boyut etkisi", **Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi**, 137-141, İstanbul (2003).
- [10] Koç V., ve Şener S., "Eksenel doğrultuda basınç yüklü çift konsollarda boyut etkisi", **Advances in Civil Engineering**, 6th International Conference, Boğaziçi Ün., İstanbul, 531-540 (2004).
- [11] TS500, " Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları ", Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12, (2000).