

## NORMAL DAYANIMLI BETON MOD-I ELEMANLARINDA BOYUT ETKİSİ

Varol KOÇ

*Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Müh. Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü 55139 Kurupelit, Samsun*  
[kvarol@omu.edu.tr](mailto:kvarol@omu.edu.tr)

**ÖZET:** Normal dayanımlı betondan hazırlanmış mod-I elemanlarında boyut etkisini incelemek amacıyla, konsol eksenlerine paralel doğrultuda basınç yükleriyle yüklenmişlerdir. Numunelere,  $c$  konsol genişliği olmak üzere,  $e=c/5$  ve  $e=c/10$  dışmerkezliklerine sahip, basınç yüklemesi uygulanmıştır. Deney elemanları, kalınlık sabit, diğer iki boyutta geometrik olarak benzer ve benzerlik oranları 1:2:4 olacak şekilde,  $t=30, 40$  ve  $50$  mm kalınlıklarında üç ayrı seride üretilmiştir. Her seriden, iki farklı dışmerkezlikle yüklenmek üzere ikişer adet, bu serilerdeki her bir elemandan da üçer adet hazırlanmıştır. Her bir seride 9, üç seride 27 olmak üzere, iki farklı dışmerkezlikle yüklenen toplam 54 adet deney elemanı üretilmiş ve denenmiştir. Her deneyde bir düşey ve iki yatay olmak üzere üç yerdeğiştirme ölçülmüş, konsol uçlarındaki yatay yerdeğiştirmelerin toplanmasıyla yatay açılma değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarının boyut etkisi analizleri yapılarak boyut etkisi parametreleri bulunmuş, logaritmik eksen takımlı boyut etkisi eğrileri çizilmiştir. Yük- yatay yerdeğiştirme eğrilerinden yararlanarak her numunenin enerji yutma kapasitesi hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kırılma mekaniği, beton boyut etkisi, mod-I göçmesi, çift konsol elemanı

### Size Effect For Mod-I Element Of Normal Strength Concrete

**ABSTRACT:** Mod-I elements which produced from normal strength concrete are tested under eccentric compressive loads parallel to the cantilever axes. Loads are applied having eccentricities of  $e=c/5$  and  $e=c/10$  eccentric where  $c$  is cantilever width. Specimens are produced having  $t=30, 40$  and  $50$  mm in constant thickness, three different series and geometrically similar in other two dimensions with the ratio of 1:2:4. Each series have two different specimens to be loaded with two different load eccentricity and each element in each series are prepared as three units. Each series include 9 elements and three series include 27 elements. Total of 54 units specimens are produced and tested for two different load eccentricity. Two horizontal and one vertical displacements are measured at each experiment and opening displacements are obtained for adding to horizontal displacements for each cantilever ends. Test results are analysed by size effect and the parameters of size effect are found by drawing bi-logarithmic graphics for each series. Energy absorbed capacities are obtained for each specimen by utilizing from the load- horizontal displacement curve.

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

### GİRİŞ

Kırılma, bir malzemenin mekaniksel, fiziksel veya herhangi başka bir dış etkiden dolayı direncinin kaybolması şeklinde tanımlanır. Leonardo da Vinci, kırılma olgusunu araştıran ilk araştırmacıdır. Farklı uzunluklardaki teller

üzerinde kırılma mukavemetinin değişimini incelemiştir. O günden beri malzemelerin kırılma davranışını anlamak için birçok çalışma yapılmıştır. Anderegg, cam çubuklar ve fiberler üzerinde numune boyutunun etkisini araştırmak için deneyler yapmıştır (Anderegg, 1939). Weibull boyut etkilerinin malzemedeki içsel

çatlaklar dolayısıyla olduğunu göstermek amacıyla istatistiksel teknikler kullanmıştır (Weibull, 1939). Yine aynı dönemlerde, Lloyd ve Hodgkinson, demir çubuklar üzerinde boyut etkisini incelemiştir (Todhunter ve Pearson, 1986).

Kompozit bir malzeme olan beton, yarı gevrek bir malzeme olup, yalnızca plastik ya da elastik teoriyle davranışının açıklanması pek gerçekçi değildir. Kırılma mekaniğinde en önemli konulardan birisi, yapı elemanını oluşturan malzeme ve eleman davranışının, birbirinden bağımsız olarak düşünülmeeyeceğidir. Ancak, yapı ile malzeme davranışı arasındaki bu etkileşim yeterince göz önünde tutulmamıştır. Kırılma mekaniğinde, malzeme davranışının, sadece gerilme ve birim yerdeğiştirme cinsinden tanımlanması gerçekçi bulunmaz. Kırılma mekaniği, yapı elemanında göçmenin yayılmasını göz önüne alan, malzeme dayanımına bağlı enerji kriterleri kullanan bir göçme teorisidir. Her yapı elemanı içinde mikro çatlaklar vardır ve göçme, gerilmeler altında bu çatlakların birbirleriyle birleşmesi sebebiyle oluşur. Çatlak gelişimi enerji gerektirir ve kırılma mekaniği bunu dikkate alır. Geometrik olarak benzer yapıların göçme gerilmesi, boyut arttıkça azalır. Dayanım kriterlerine (klasik gerilme analizlerine) göre, farklı boyutlardaki nominal gerilme değişmezken, göçme davranışı, boyut etkisi içeren kırılma mekaniği kriterleri ile, daha gerçekçi olarak gösterilebilir. Kırılma mekaniğinin beton için uygulanmasının gerekliliğini gösteren nedenlerden biri de, beton ve betonarme elemanlarla yapılan deneylerde, boyut etkisinin gözlenmiş olmasıdır.

Plastik limit analizdekinin tersine, gevrek ve yarı gevrek malzemeden oluşan yapı elemanlarının göçmesinde daima boyut etkisi beklenir. En kuvvetli boyut etkisi lineer elastik kırılma mekaniğinde (LEKM) oluşur ki, burada malzeme göçmesi herhangi bir zamanda sadece bir noktada, çatlak tepesinde oluşarak kesit boyunca hareket eder. Beton gibi yarı gevrek malzemede göçme, yapı boyutundan bağımsız sonlu boyutlu kırılma bölgesinde oluşur. Bu nedenle de boyut etkisi gözlenir. Çünkü büyük yapı elemanlarında kırılma bölgesi kesitin küçük bir kısmını kaplar yani göçme yerleşir ve davranış, nokta göçmesi olan LEKM 'ne yaklaşır.

Küçük yapı elemanlarında, örnek olarak laboratuvar numunelerinde kırılma bölgesi kesitin büyük kısmını kaplar ve göçme davranışı plastik limit analize yakındır; yani göçme yüzeyinin çoğunda dayanım aynı anda aşılır. Geometrik olarak benzer yapı elemanları için nominal gerilme yapı boyutuna bağlı olduğundan, küçük yapı elemanlarında plastik limit analiz, büyük yapı elemanlarında LEKM geçerlidir. Nominal dayanıma bağlı olarak, doğrusal olmayan kırılma mekaniği (boyut etkisi) analizleri yapılabilir. Gözlenen boyut etkisi, plastik limit analizden, LEKM 'ne geçişi gösterir.

Yürürlükteki yönetmeliklerde boyut etkisi göz önüne alınmamaktadır. Günümüzde kırılma mekaniğinin betona uygulanması çalışmaları önem kazanmaktadır. Hawkins, ACI yönetmeliklerinde kırılma mekaniği teorilerinin kullanılmasının gerekli olduğunu 20 yıl önce açıklamıştır (Hawkins, 1984). Son dönemlerde ACI yönetmeliği (ACI Committee 446, 1992) kırılma mekaniği üzerine oturtulmaya çalışılmıştır.

Beton kırılma mekaniğiyle ilgili son dönem literatüründeki bazı çalışmalar şunlardır: Darbe etkisi testlerinde kayma gerilmeleriyle yüzey kabuğunun göçmesinde (Bazant ve Cao, 1987), çift taraflı zımbalama etkisine maruz silindirik numunelerde (Marti, 1989), kiriş boyuna donatılarının spirallı ve sargısız aderans eki deneylerinde (Şener ve diğerleri, 1999b), merkezi yüklü normal dayanımlı beton kolonlarda (Şener ve diğerleri 1999a), normal ve yüksek dayanımlı betonarme kirişlerde basınç göçmesi deneylerinde (Ozbolt ve diğ. 2000), cam liflerle güçlendirilmiş seramik malzemeden yapılmış çubukların üç ve dört nokta yüklemesinde (Fischer ve diğ. 2002), boyut etkisini incelemiştir. Eksenel basınç gerilmesine maruz silindirik çimento harcı numunelerinde çatlak gelişiminin X ışınlarıyla izlenmesi ve üç boyutlu analizi yapılmıştır (Landis ve Edwin, 2000). Ayrıca lifli, hafif ve normal betondan üretilmiş çift konsol deney numunelerine basınç yüklemesi yapılarak boyut etkisi araştırılmıştır (Koç ve Şener, 2003a; 2003b; 2004).

Kırılma mekaniğinde çift konsol deney elemanları, klasik olarak açılma modu (mod I) parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılır.

Bu nedenle mod I deney elemanı olarak da isimlendirilebilir. Açılma göçmesi elde edebilmek için, bu elemanların konsol uçlarına yanal çekme kuvvetleri uygulanır. Bu çalışmada, aynı elemana, konsol eksenlerine paralel doğrultuda basınç yüklemesi uygulanmış, basınç yükünün oluşturduğu momentle açılma göçmesi elde edilmiştir. Basınç yükünü iki farklı dış merkezlikte uygulayarak da sonucun göçme yüklerine etkisi incelenmiştir. Bu çalışma, daha önce araştırılmamış olan, çift konsol beton elemanlarda boyut etkisinin varlığını, beton elemanlar için önemli bir yükleme durumu olan basınç yüklemesi altında ortaya koyması bakımından önemlidir.

## TEORİK 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 aşağıdaki şekilde verilebilir (Bazant ve Planas 1998):

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1-\beta}} \quad [1]$$

$$\beta = \frac{D}{D_0} \quad [2]$$

Bu eşitliklerde;  $\sigma_N$ : göçmedeki nominal gerilme, B: yapı elemanının biçimine bağlı boyutsuz bir katsayı,  $f_t$ : betonun çekme dayanımı,  $\beta$ : gevreklik katsayısı, D: yapı elemanının karakteristik boyutu,  $D_0$ : gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi gösteren uzunluk boyutunda bir katsayı olarak verilmiştir.

$D_0$  parametresi, boyut etkisi eğrisinde, geometrik olarak yatay asimptot (dayanım teorisine karşı gelen) ile eğimli asimptotun (LEKM'ne 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 veya taşıma gücü yöntemi) göre hesap dayanımı, yatay bir çizgi olarak verilir. Taşıma gücü ve emniyet gerilmeleri yöntemleri arasındaki tek fark, yatay çizginin düzeyindedir. LEKM için, göçme eğrisi tümüyle farklıdır. Bütün LEKM çözümlerinde  $\sigma_N$  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 [1] denkleminde  $\sigma_N$  değeri, 1'in yanında çok küçük olduğundan göz önüne alınmayabilir. Bu durumda  $\sigma_N$  göçme gerilmesi,  $f_t$  dayanımı ile orantılıdır ve gerilme hesabında, plastik kuram veya emniyet gerilmeleri yöntemi yeterlidir. Eğer yapı elemanı çok büyük olursa, 1 değeri  $\sigma_N$ 'nin yanında göz önüne alınmaz.  $\sigma_N$  göçmedeki nominal gerilme,  $D^{1/2}$  değeri ile ters orantılıdır. Geçmişte çoğu göçme ölçütü (eğilme, kesme, çekme), dayanım ölçütüne göre ( $\sigma_N$  ihmal edilerek) yapılırken, günümüzde, boyut etkisini içeren bağıntıları verecek araştırmalar devam etmektedir. [1] denklemi, yalnız aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutunu içeren yapılara uygulanabilir.

## DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### Deney malzemesi

Çift konsol deney elemanlarının üretiminde kullanılan normal beton karışım oranları, çimento/çakıl/kum/su oranı 1/2/2/0.55 olarak alınmış, Portland Kompoze Çimentosu (PKÇ/B 32.5R) ve Kızılırmak nehrinden elde edilen doğal agrega kullanılmıştır. Karışımlarda en büyük agrega çapı 9,5 mm, en büyük kum çapı 4,8 mm'dir. Beton karışım oranları, Çizelge 1.'de verilmiştir. Betonun basınç dayanımlarını elde etmek için 3 adet 150×300 mm boyutlarında kontrol silindiri dökülmüştür. Silindir basınç deneylerinden elde edilen dayanım ve standart sapma değerleri, Çizelge 2' de verilmiştir. Bütün numuneler, olası dağılım etkilerini en aza indirmek amacıyla aynı karışımdan dökülmüş ve bakım havuzunda 28 gün bekletilmişlerdir.

**Çizelge 1.** Beton karışım oranları.  
(Mixture proportions of concrete)

Çimento kg/m <sup>3</sup>	Su Kg/m <sup>3</sup>	Kum kg/m <sup>3</sup>	Çakıl kg/m <sup>3</sup>	Çelik lif kg/m <sup>3</sup>
414	228	829	829	70

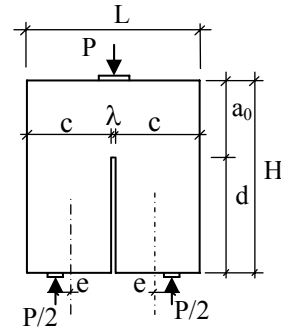
**Çizelge 2.** Silindir basınç dayanımları.  
(Pressure strengths of cylinder)

Silindir No	Göçme Yükü (kN)	Dayanım (MPa)	Ortalama Dayanım (MPa)	Standart Sapma (MPa)	Varyasyon Katsayısı
1	659	37,31	30,76	5,19	0,169
2	536	30,35			
3	435	24,63			

### Numunelerin üretilmesi

Çift konsollar beton eleman ortasında açılan derin çentiklerle elde edilmiştir. Çentikler, kalıplara, beton dökümü sırasında yerleştirilen ve ön prizden sonra sökülen yağlanmış plastik parçalarla yapılmıştır. Kalıplar, kalıbın su emmesini önlemek amacıyla plywood malzemeden hazırlanmıştır. Kalıp parçaları, birbirine vidalı birleşimlerle tutturulmuş, böylece elemanların kalıptan çıkarılması ve kalıpların tekrar oluşturulması kolaylaşmıştır. Her bir kalıp sistemi, birbirinin aynı olan üç elemanı verecek şekilde tasarlanmıştır. Normal dayanımlı betondan hazırlanan numuneler üç farklı seride dökülmüştür. Betonun kalıplara yerleştirilmesi, betonun kalıp içine boşluksuz yerleşmesini sağlamak amacıyla, masa vibratörü üzerinde olmuş, eleman dökümleri üç kademe halinde yapılarak, her kademe 10-15 saniye vibrasyon uygulanmıştır. Numune kalınlıkları (t), A serisinde 30 mm, B serisinde 40 mm, C serisinde 50 mm olarak alınmıştır. Farklı kalınlıklı serilerin üretilme nedeni, her bir ayrı kalınlığa ait seride, boyut etkisinin araştırılmasıdır. Her seri, c konsol genişliği olmak üzere, konsol ekseninden konsol dış yüzüne doğru,  $e=c/10$  ve  $e=c/5$  dışmerkezlikleriyle ayrı ayrı yüklenmiştir. Böylece, farklı dışmerkezliğe ait yüklenme durumları için de ayrı ayrı boyut etkisi

araştırılabilmıştır. Numuneler, P başlangıç harfi ile simgelenmiştir.  $e=c/10$  dışmerkezliğiyle yüklenen numuneler, seri harfinden sonra, 0 rakamı kullanılarak gösterilmiştir. 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, üç seri arasında ve seriler içinde basınç yüklemesi altında boyut etkisi incelenebilmiştir. Şekil 1 ve Çizelge 3' de, numune boyutları gösterilmiştir. Numunelerin en küçük boyutu, betonun kalıba boşluksuz yerleşimini sağlamak amacıyla, en büyük iri agrega boyutunun yaklaşık üç katından büyük olacak şekilde, 3cm olarak seçilmiştir (TS500, 2000).



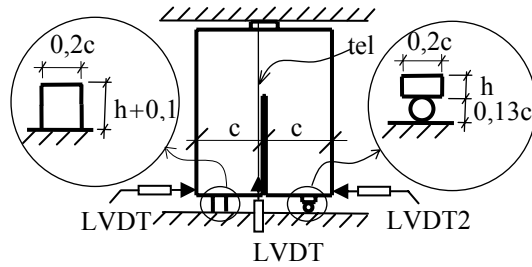
**Şekil 1.** Çift konsol elemanı.  
(Double cantilever beams element)

**Çizelge3. Çift konsol boyutları.**  
(Dimensions of double cantilever beams element)

NUMUNE	H (mm)	L (mm)	d (mm)	a <sub>0</sub> (mm)	c (mm)	t (mm)	⊙ (mm)	e=c/5 (mm)	e=c/10 (mm)	
A SERİSİ	A1,A2,A3	300	260	120	180	127,5	30	5	25,5	12,8
	A4,A5,A6	150	130	60	90	62,5	30	5	12,5	6,3
	A7,A8,A9	75	65	30	45	30,0	30	5	6,0	3,0
B SERİSİ	B1,B2,B3	400	340	160	240	167,5	40	5	33,5	16,8
	B4,B5,B6	200	170	80	120	82,5	40	5	16,5	8,3
	B7,B8,B9	100	85	40	60	40,0	40	5	8,0	4,0
C SERİSİ	C1,C2,C3	500	420	200	300	207,5	50	5	41,5	20,8
	C4,C5,C6	250	210	100	150	102,5	50	5	20,5	10,3
	C7,C8,C9	125	105	50	75	50,0	50	5	10,0	5,0

### Deney yükleme ve ölçüm sistemi

Mesnetlenme sistemi Şekil 2’de, deney düzeneği Şekil 3’ de, gösterilmiştir. Deneylerin 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 mm<sup>2</sup> ve çekme dayanımı 160 MPa olup bu çerçevede uygulanabilecek en büyük yük 1220 kN, ve çerçevenin rijitliği ise 560kN/mm dir. Yükleme yükü kontrollü yapılmış olup, göçme yüklerine bütün konsollarda 3 dakikada erişilecek biçimde küçük numunelerde piston uzama hızı yavaş, büyük numunelerde hızlı olarak seçilmiştir. Yükler 225 kN kapasiteli yükleme ölçer ile ölçülmüştür. Yük okumaları yanında konsol uçlarında yatay yerdeğiştirme (LVDT1 ve LVDT2) okumaları ile, düşey yerdeğiştirme (LVDT3) okumaları veri toplayıcı ile bilgisayara kaydedilmiştir.



**Şekil 2. Mesnetlenme sistemi**  
(System of supporting conditions)

### DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

Denklem [2]’ de söz konusu yapı karakteristik boyutu (D) çift konsol numunelerde kırılma bölgesi olan, çentik altı bölge yüksekliği (d) olarak alınmış, denklem [1]’ de kullanılan betonun çekme dayanımı (f<sub>t</sub>), TS500’ün (TS500, 2000) verdiği bağıntı ile bulunmuştur:

$$f_t = 0.35 \sqrt{f_c} \quad [3]$$

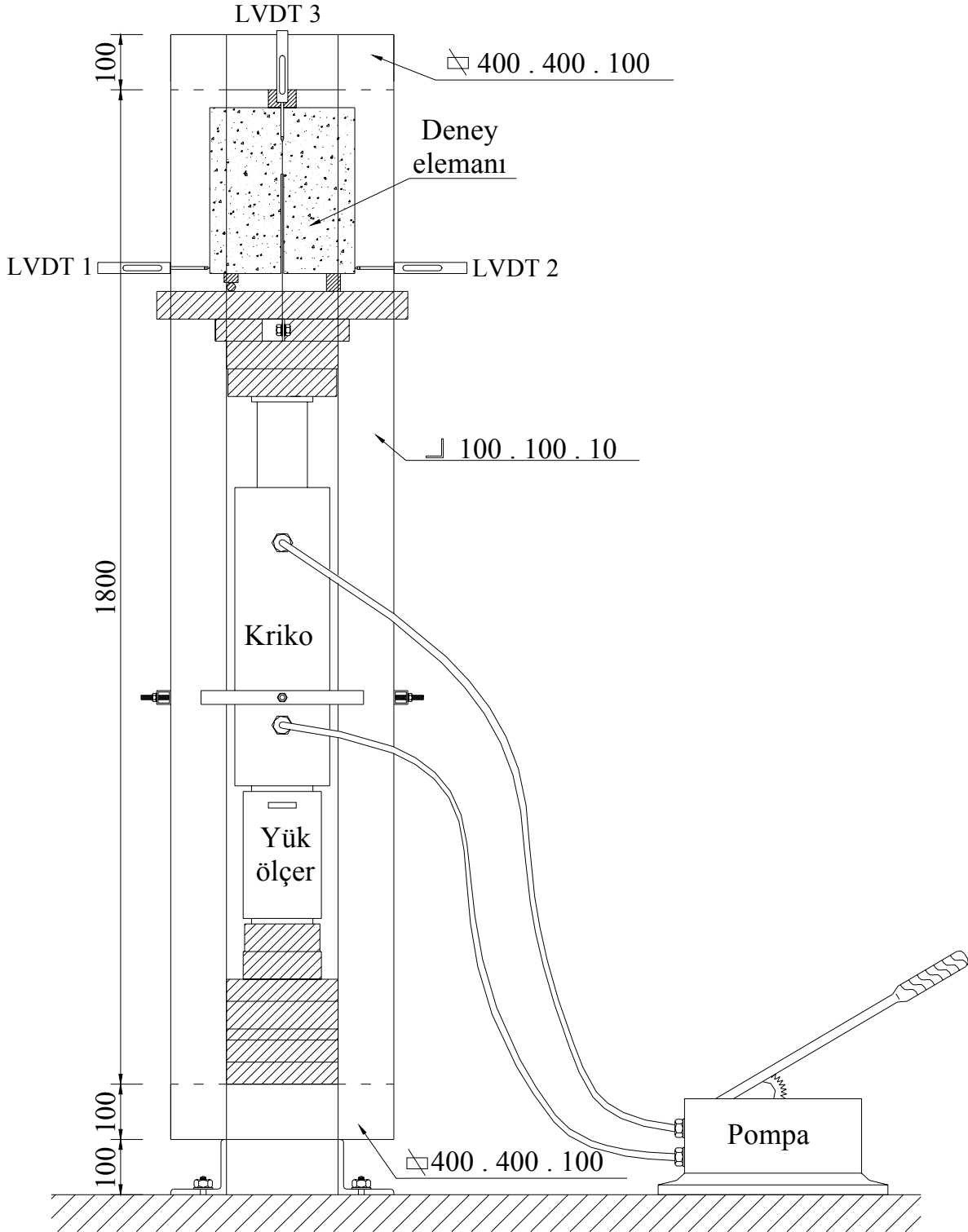
Burada; f<sub>c</sub>: beton basınç dayanımı (MPa) olarak verilmiştir. Nominal göçme gerilmesi olarak asal gerilmeler aşağıdaki gibi kullanılmıştır:

$$\sigma_N = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad [4]$$

Burada,  $\sigma = M/w$ ,  $\tau = PF/St$ ,  $M = P(e + c/2 + \lambda/2)/2$ ,  $w = td^2/6$ ,  $F = td$ ,  $S = td^2/8$  olarak verilmiştir. Söz konusu ifadelerde;  $\sigma$  eğilme gerilmesi, M: yükleme sonucu oluşan moment, w: dayanım momenti,  $\tau$  kayma gerilmesi, P: basınç yükü olarak yükleme ölçerden okunan değer, F: çift konsol elemanı çentik üstü bölge kesit alanı, S: statik moment, t: eleman kalınlığı, e: yükün konsol ekseninden dışmerkezliği,  $\odot$ : konsollar arası mesafe (çentik genişliği), c: konsol genişliği, d: çift konsol elemanda çentik üstü bölge yüksekliğini göstermektedir.

Deney elemanlarının ölçülen göçme yükleri Çizelge 4' de, yük-yatay yerdeğiştirme eğrileri Şekil 4' de, yük-düşey yerdeğiştirme eğrileri Şekil 5' de verilmiştir. Her numunenin yük-

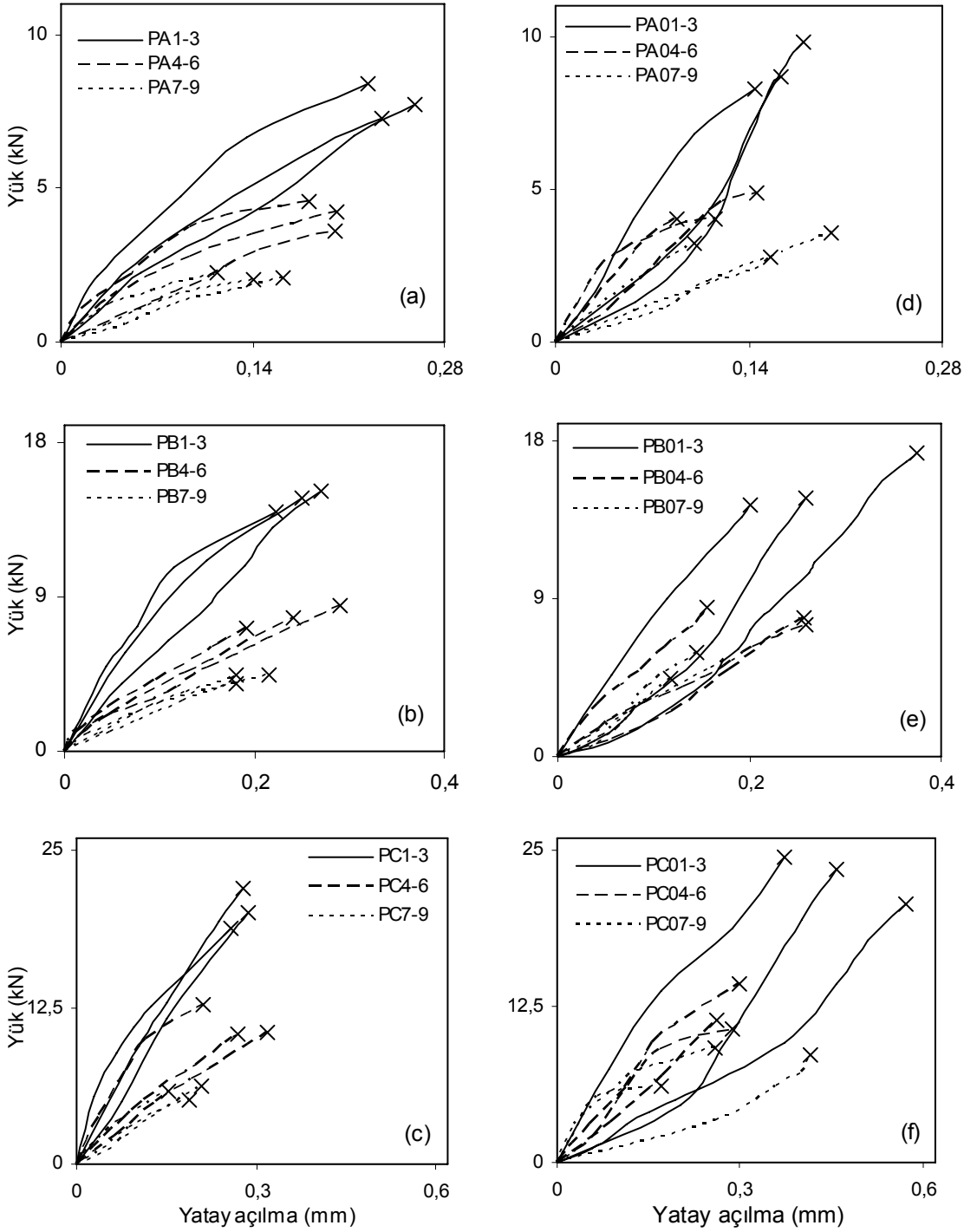
yatay yerdeğiştirme eğrileri altında kalan alanlardan bulunan enerji yutma kapasiteleri ile bu değerlere ait standart sapma ve varyasyon katsayıları da Çizelge 4' de verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği.  
(Tests setup)

**Çizelge 4.** Göçme yükleri ve yutulan enerjiler.  
(Failure loads and absorbed energies)

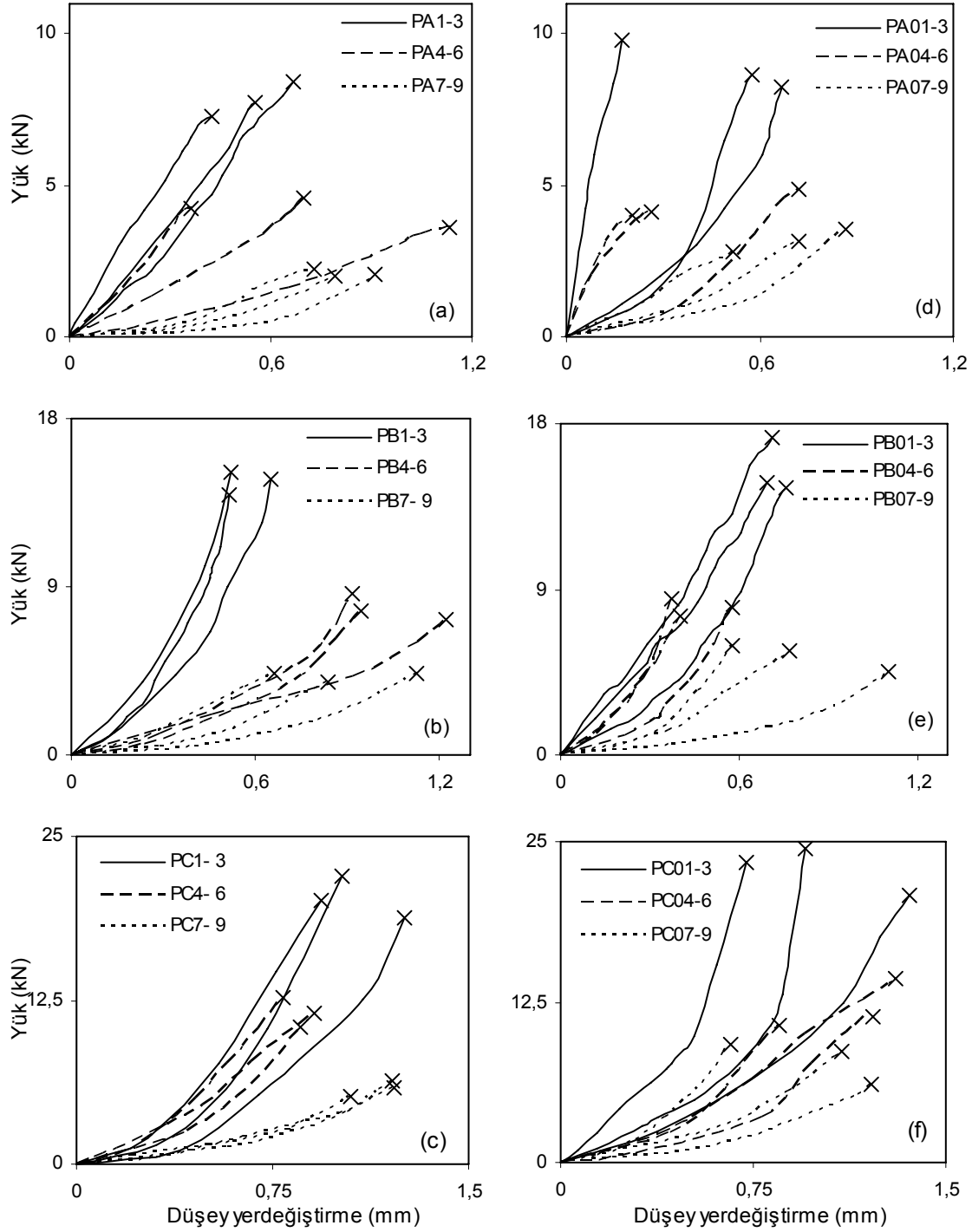
Eleman Adı	Max. Yük kN	Yutulan Enerji kNmm	Standart Sapma kN/mm	Varyasyon Katsayısı
PA1	7,712	1,053		
PA2	7,268	0,982		
PA3	8,428	1,182	0,083	0,077
PA4	4,253	0,530		
PA5	4,585	0,554		
PA6	3,611	0,389	0,073	0,148
PA7	2,010	0,163		
PA8	2,088	0,174		
PA9	2,242	0,162	0,005	0,033
PB1	13,926	1,971		
PB2	15,155	2,119		
PB3	14,723	2,207	0,097	0,046
PB4	7,191	0,777		
PB5	7,732	1,021		
PB6	8,505	1,352	0,236	0,224
PB7	4,430	0,442		
PB8	4,407	0,514		
PB9	3,943	0,408	0,044	0,097
PC1	18,789	3,062		
PC2	22,004	3,229		
PC3	20,103	2,980	0,104	0,034
PC4	10,438	1,478		
PC5	12,680	1,702		
PC6	10,500	1,778	0,127	0,077
PC7	5,799	0,511		
PC8	5,180	0,525		
PC9	6,186	0,642	0,059	0,105
PA01	8,273	0,966		
PA02	8,660	0,932		
PA03	9,820	1,097	0,071	0,071
PA04	4,021	0,417		
PA05	4,871	0,566		
PA06	4,021	0,272	0,120	0,287
PA07	2,784	0,296		
PA08	3,557	0,530		
PA09	3,247	0,238	0,126	0,356
PB01	14,791	2,674		
PB02	17,32	3,862		
PB03	14,372	2,163	0,712	0,245
PB04	7,555	1,429		
PB05	7,964	1,522		
PB06	8,505	0,966	0,243	0,186
PB07	5,954	0,568		
PB08	5,644	0,760		
PB09	4,485	0,314	0,183	0,334
PC01	20,722	4,850		
PC02	24,510	4,439		
PC03	23,428	4,030	0,335	0,075
PC04	10,747	2,114		
PC05	11,366	1,969		
PC06	14,382	2,364	0,163	0,076
PC07	9,201	1,430		
PC08	6,108	0,773		
PC09	8,660	1,057	0,269	0,248



**Şekil 4.** Yük- yatay açılma eğrileri:  $e = c/5$  dışmerkezlikli çift konsol, (a) A serisi, (b) B serisi, (c) C serisi;  $e = c/10$  dışmerkezlikli çift konsol, (d) A serisi, (e) B serisi, (f) C serisi

(Load - dehiscence curves: Double cantilever beams of  $e = c/5$  eccentric (a) A series, (b) B series, (c) C series; Double cantilever beams of  $e = c/10$  eccentric, (d) A series, (e) B series, (f) C series)





**Şekil 5.** Yük- düşey yerdeğiştirme eğrileri:

$e = c/5$  dışmerkezlikli çift konsol, (a) A serisi, (b) B serisi, (c) C serisi;

$e = c/10$  dışmerkezlikli çift konsol, (d) A serisi, (e) B serisi, (f) C serisi

(Load – vertical displacements curves:

Double cantilever beams of  $e = c/5$  eccentric (a) A series, (b) B series, (c) C series;

double cantilever beams of  $e = c/10$  eccentric, (d) A series, (e) B series, (f) C series)

Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi denklemi [1], farklı regresyon analizleriyle düzenlenebilir (Bazant ve Planas, 1998). Regresyon analizlerinden, bilinmeyen malzeme sabitleri B ve  $D_0$  elde edilebilir. Bu çalışmada, her seri için Lineer I ve Lineer II regresyon analizleri yapılmış ve korelasyon katsayısı yüksek olan analizlere ait B ve  $D_0$  değerleri alınmıştır. Lineer I regresyonunda denklem [5], Lineer II regresyonunda denklem [6] kullanılmıştır.

$$Y = AX + C \quad [5]$$

$$Y' = A'X' + C' \quad [6]$$

Bu denklemlerde

$$X = D, Y = (1/\sigma_N)^2, C = (1/Bf_t)^2,$$

$$A = C/D_0, X' = 1/D, Y' = (1/\sigma_N D)^2,$$

$$A' = (1/Bf_t)^2, C' = A'/D_0 \text{ olarak alınır.}$$

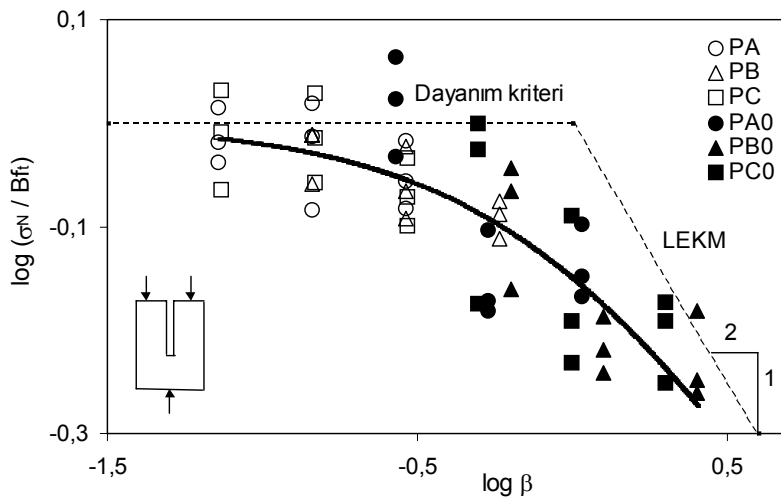
Korelasyon katsayıları yüksek olan lineer regresyon analizlerinden bulunan, her seriye ait B ve  $D_0$  katsayıları ile, korelasyon katsayıları (R), Çizelge 5' de verilmiştir. Elde edilen B ve  $D_0$  katsayılarının [1] ve [2] denklemlerinde yerine konulmasıyla, boyut etkisini içeren gerilme formülü bulunur. Denklem [1]' i kullanarak her seri için logaritmik eksen takımında  $\sigma_N/Bf_t$  ve

$\sigma_N/Bf_t$  değerleri gösterilebilir. Tüm serilerin Şekil 6' da ayrı ayrı, Şekil 7'de birlikte boyut etkisi eğrileri gösterilmiştir. Bu eğrilerde kesik çizgi ile gösterilen yatay doğru dayanım kriterini göstermektedir. 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.

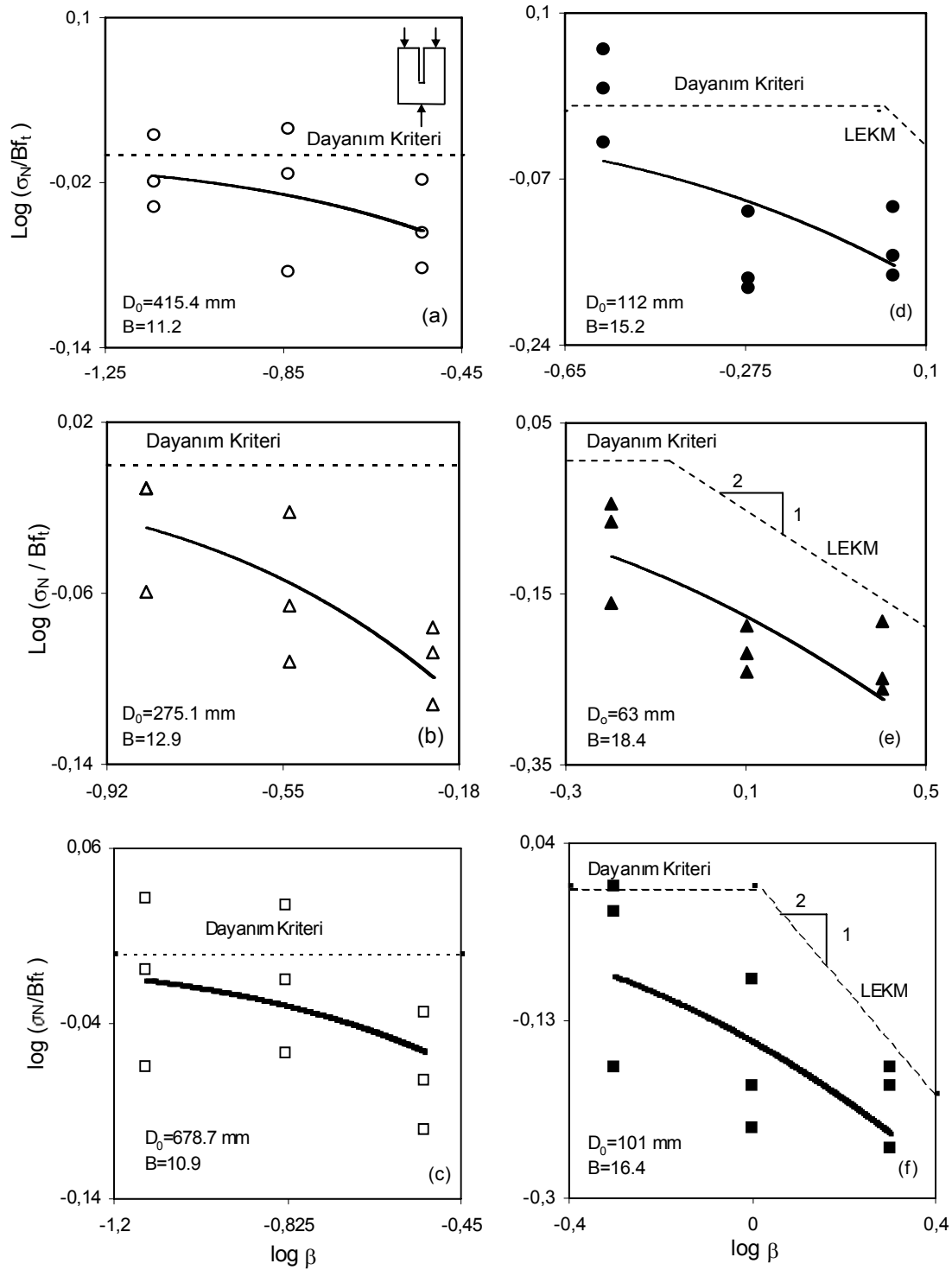
Çizelge 5. Korelasyon katsayıları ve malzeme sabitleri

(Correlation coefficient and constants of material)

Deney serileri	Alınan analiz	Katsayılar		
		r	B	$D_0$ (mm)
PA	Lineer-II	0,96	11,2	415,4
PB	Lineer-II	0,96	12,9	275,1
PC	Lineer-II	0,92	10,9	678,7
PA0	Lineer-I	0,61	15,2	111,7
PB0	Lineer-II	0,73	18,4	63,2
PC0	Lineer-II	0,63	16,4	100,6



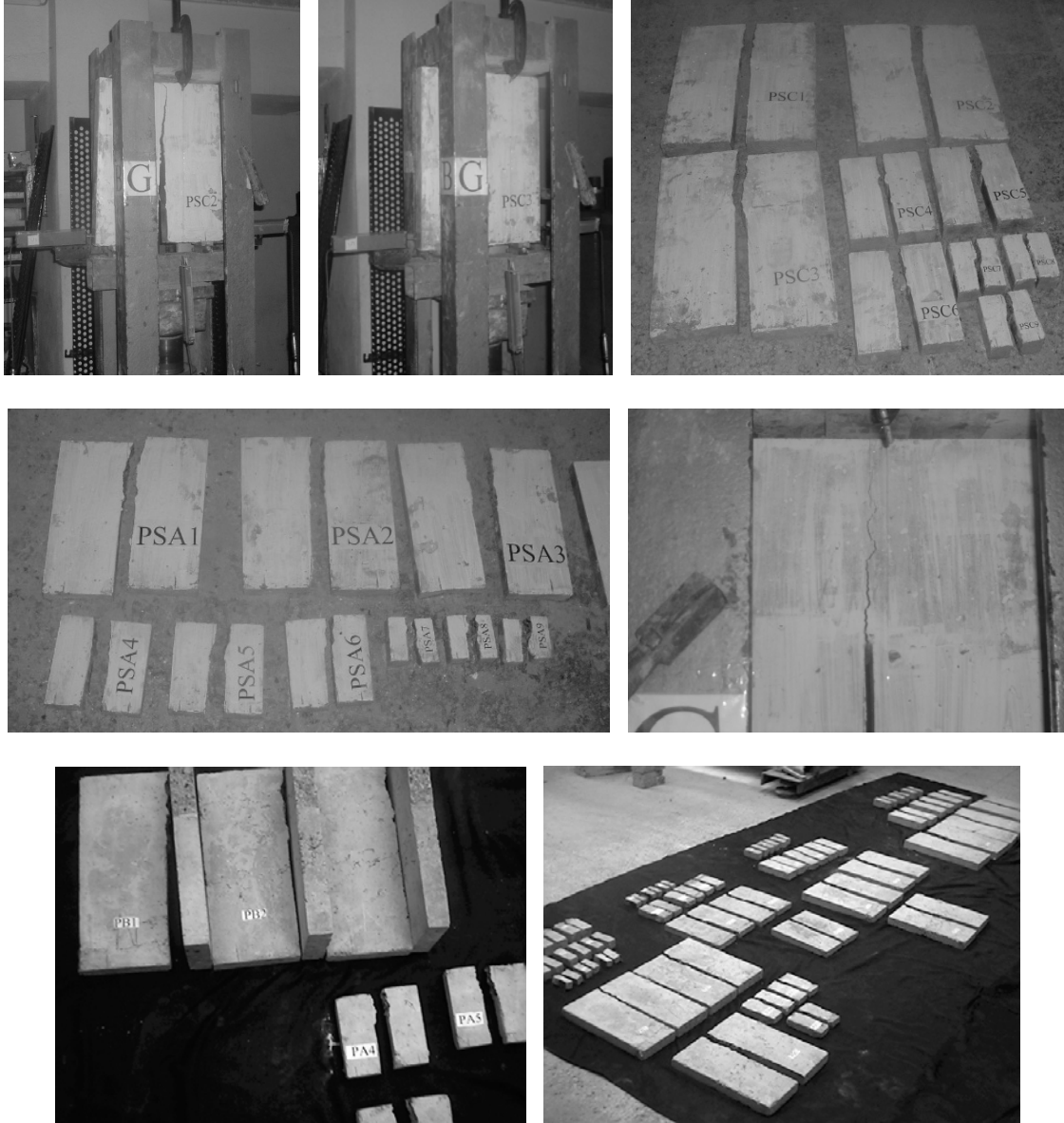
Şekil 6. Toplam boyut etkisi  
(Collected size effect curve)



**Şekil 7.** Boyut etkisi eğrileri:  $e = c/5$  dışmerkezlikli çift konsol (a) A serisi, (b) B serisi, (c) C serisi;  $e = c/10$  dışmerkezlikli çift konsol (d) A serisi, (e) B serisi, (f) C serisi  
 (Size effect curves: Double cantilever beams of  $e = c/5$  eccentric (a) A series, (b) B series, (c) C series; double cantilever beams of  $e = c/10$  eccentric, (d) A series, (e) B series, (f) C series)

Deney elemanları, sağdaki hareketli mesnetin oluşturduğu mesnetlenme şartının da etkisiyle, taşıyabilecekleri en büyük yüke ulaştıklarında, ani ve gevrek olarak, çatlağın çentik üstü bölgeyi kaplamasıyla kırılmaktadır. Bu nedenle yük-yerdeğişme eğrilerinde, en büyük yük sonrasında deney ani bir şekilde sonlandığından, yerdeğiştirme değerleri, en büyük yüke kadardır. Deney sonunda çift konsol deney elemanı, birbirinden tamamen kopuk iki ayrı konsol haline gelmektedir. Çift konsollar üzerindeki kırılma yüzeyinin, hemen hemen konsol eksenine paralel bir hat üzerinde olması,

göçmenin, çekme gerilmelerinin etkisiyle, çekme gerilme yönüne dik yönde oluşan çekme çatlaklarından dolayı oluştuğunu göstermektedir. Bu durum, kırılma mekaniğinde Mod-I olarak tanımlanan açılma modu göçmesi durumudur. Bununla birlikte, elemanların göçme yüzeylerinin düzensiz eğrilikler gösterdiği gözlenmiştir. Bunun nedeni, heterojen bir yapı olan beton malzeme içindeki agrega ve rijitlik dağılımının farklı olması ve çatlağın, dayanımı düşük olan bölgelerden geçerek kesiti katetmesidir. Bahsedilen bu durumları gösteren deney fotoğrafları, Şekil 8.'de görülmektedir.



Şekil 8. Deney fotoğrafları  
(Photographs of experiment)

## SONUÇLAR

Çalışmada elde edilen sonuçlar, aşağıda sıralanmıştır:

- 1- Deney elemanları, sağdaki hareketli mesnetin oluşturduğu mesnetlenme şartının da etkisiyle, taşıyabilecekleri en büyük yüke ulaştıklarında, ani ve gevrek olarak, çatlağın çentik üstü bölgeyi kaplamasıyla kırılmışlardır. Dolayısıyla bütün çift konsollu numunelerin göçmesi, çentiklerin ilerleyerek elemanların iki parçaya ayrılması ile olmuştur. Konsolları ayıran çatlağın konsol eksenlerine paralel olması, bunun, çekme gerilmelerine dik yönde gelişen bir çekme çatlağı olduğunu ve göçmenin çekme çatlakları nedeniyle oluştuğunu gösterir. Mod I göçmesi olarak isimlendirilen bu durum, tüm numune göçmelerinde aynı olduğundan, aynı göçme moduna sahip bu numune serilerine boyut etkisi denklemi uygulanabilir.
- 2- Numune boyutu arttıkça, deneysel (nominal) eğilme kesme gerilmesinin, elastisite teorisinden hesaplanan gerilmelere oranla azaldığı görülmüştür. Bu durum, göz önüne alınan yükleme durumu ve eleman geometrisi için boyut etkisinin yüksek olduğunu gösterir.
- 3- Deney sonuçlarından elde edilen değerler Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumludur. Çift konsolun basınç göçmesi için, boyut etkisi içeren yaklaşık [1] ve [2] bağıntıları,  $e=c/5$  dışmerkezlikli elemanlarda  $B=12$ ,  $D_0=456$  mm ve  $e=c/10$  dışmerkezlikli elemanlarda  $B=17$ ,  $D_0=92$  mm olmak üzere önerilebilir. Dışmerkezliğin azalması ile  $D_0$  katsayılarının azaldığı, dolayısıyla  $\sigma$  gevrekliğinin arttığı görülmektedir. Bu davranış biçimi, Şekil 6' da gösterilen boyut etkisi grafiklerinde, küçük dışmerkez yüklemesi altındaki elemanların LEKM davranışına daha çok yaklaşmış

olmalarından da anlaşılmaktadır. B ve  $D_0$  değişkenleri, eleman şekli, boyutu, malzeme türü ve yükleme durumuyla ilişkili olarak, çok farklı değerler alabilmektedir. Örnek olarak literatürdeki bazı çalışmalarda bulunan B ve  $D_0$  değerleri şöyledir: 34,1 MPa dayanımlı betondan yapılmış, çentik boyunun kiriş yüksekliğine oranı 1/6, kiriş boyunun kiriş yüksekliğine oranı 2,7 ve kalınlığı 38,1mm olan üç nokta yüklemesine maruz kenar çentikli kirişlerde  $B= 3,1$   $D_0= 70$ mm olarak bulunmuştur (Bazant ve Pfeiffer, 1987). Basınç yüklü, yükseklik ve çapları eşit silindirik beton numunelerde, 33,3 MPa dayanımlı elemanlar için  $B=1,3$   $D_0= 352$ mm; 23,6 MPa dayanımlı elemanlar için  $B=1,1$   $D_0= 601$ mm olarak bulunmuştur (Marti, 1989). En büyük eleman boyutları 200×200×2080mm olan farklı narinlikli betonarme kolonlardan, 9,7 narinliğine sahip elemanlarda  $B= 9,8$   $D_0= 1508$ mm; 18 narinliğine sahip betonarme kolonlarda  $B= 13,2$   $D_0= 208$ mm; 34,7 narinliğine sahip elemanlarda  $B=13,6$   $D_0= 168$ mm olarak bulunmuştur (Şener ve diğ. 2004).

- 4- Şekil 4 ve Şekil 5' de verilen yatay ve düşey yerdeğiştirme eğrileri incelendiğinde, her seri içindeki eleman boyutlarının azalmasının elemanı sünek davranışa götürdüğü görülür. Bu durum, boyut etkisinin sadece eleman boyutlarının artmasıyla yalnız göçme yüklerinde gözlenen bir azalma olmayıp, eleman davranışını da önemli ölçüde etkileyen bir öge olduğunun göstergesidir.

## 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**

- ACI Committee 446, 1992, "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.
- Anderegg, F.O., 1939, "Strength of glass fibre", *Industrial Engineering Chemistry*, 31, 290- 298.
- Bazant, Z.P., and Cao, Z., 1987, "Size effect in punching shear failure of slabs", *ACI Structural Journal*, 84(1), 44-53.
- Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A., 1987, "Determination of fracture energy from size effect and brittleness number.", *ACI Materials Journal*, 84 (6), 463- 480.
- Bazant, Z.P., and Planas, J. 1998, "Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials", CRC Press, Boca Raton, Fla.,452.
- Fischer H., Rentzsch W., and Marx R., 2002, "A modified size effect model for brittle nonmetallic materials", *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 781-791.
- Hawkins, N.M., 1984, "The role for fracture mechanics in conventional reinforced concrete design", NATO workshop of Fract. Mech., Northwestern Univ., Evanston, III.
- Koç, V., and Şener, S., 2003a, "Lifli Beton Çift Konsolun Basınç Göçmesinde Boyut Etkisi", *Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı II, TÜBİTAK, Konya*, 169-172.
- Koç V., and Şener S., 2003b, "Hafif ve normal betondan yapılmış çift konsol numunelerin basınç göçmesinde boyut etkisi", *Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi*, 137-141, İstanbul.
- Koç V., and Şener S., 2004, "Eksenel doğrultuda basınç yüklü çift konsollarda boyut etkisi", *Advances in Civil Engineering*, 6<sup>th</sup> International Conference, Boğaziçi Üniv.,İstanbul, 531-540.
- Landis E.N., and Edwin N. N., 2000, "Three-dimensional work of fracture for mortar in compression", *Engineering Fracture Mechanics*, 65, 223-234.
- Marti, P., 1989, "Size effect in double- punch tests on concrete cylinders", *ACI Materials Journal*, 86: 597-601.
- Ozbolt, J., Mestrovic, D., Li, Y.J., and Eligehausen, R., 2000, "Compression failure of beams made of different concrete types and sizes", *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126 (2): 200-208.
- Şener, s., Barr, B.I.G., and Abusiaf, H.F., 1999a, "Size effect tests in unreinforced concrete columns", *Magazine of Concrete Research*, 51(1), 3-11.
- Şener, S., Bazant, Z.P., and Giraudon, E.B., 1999b, "Size effect tests of bond splices", *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 125 (6), 653-660.
- Şener, S., Barr, B. I. G. and Abusiaf, H. F., 2004, "Size effect in axially loaded reinforced concrete Columns", *Journal of Structural Engineering*, 130 (4): 662- 670.
- Todhunter, I., and Pearson, K., 1986, "History of the theory of elasticity and of the strength of materials from Galileo to the present time", Cambridge University Press, 103-104.
- TS500, 2000, "Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları", *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*, 67.
- Weibull,W., 1939, "A statistical theory of strength of materials" *Proc. Royal Swedish Academy of Engineering Sciences*, 151, 1-45.