

FARKLI MESNETLENME ŞARTLARI ALTINDA BETONDA BOYUT ETKİSİ VE KIRILMA PARAMETRELERİ

Varol KOÇ

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, 55139 Kurupelit/Samsun
kvarol@omu.edu.tr

(Geliş/Received: 23.06.2006 ; Kabul/Accepted: 19.10.2006)

ÖZET

Normal dayanımlı betondan hazırlanan çift konsol elemanlara, konsol eksenlerine paralel basınç yüklemesi uygulanmıştır. Yüklemeler iki farklı mesnetlenme durumunda uygulanarak sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Numune kalınlıkları sabit olup $t=50\text{mm}$ 'dir. Diğer boyutlar büyük numuneden küçük numuneye doğru 4:2:1 benzerlik oranlarına sahiptir. Her numunede 2 yatay ve 1 düşey yer değiştirme ölçülmüş, konsol uçlarında ölçülen yatay yer değiştirmelerin toplanmasıyla açılma yer değiştirmesi bulunmuştur. Her numuneye ait yük-açılma yer değiştirmesi eğrilerinin altında kalan alanlardan ve çatlak alanlarından yararlanarak kırılma enerjileri tespit edilmiştir. Deneysel sonuçları boyut etkisi eğrileri şeklinde düzenlenmiş ve boyut etkisi parametreleri elde edilmiştir. Deneysel sonuçları 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, kırılma enerjisi, mod I geçmesi.

SIZE EFFECT AND FRACTURE PARAMETERS FOR CONCRETE UNDER THE VARIOUS SUPPORTED CONDITIONS

ABSTRACT

Double cantilever beams elements of normal strength concrete are loaded in compressive parallel to cantilever axes. Loads are applied in two different supporting conditions and compared with each other. Specimen thickness is 50 mm. Other sizes are geometrically similar with ratio is from large specimens to small specimens 4:2:1. Two horizontal and one vertical displacements are measured for each specimens and dehisces are found by adding two horizontal displacements for each cantilever ends. Fracture energy is determined by using crack area of each specimens and area of under the load-opening displacement curve. Test results are arranged for size effect curve and size effect parameters are obtained. Experiments are modeled with Ansys 5.4 finite element program and fracture toughnesses are found by using numerical results.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Malzemelerin bünyelerindeki süreksizlikler, betondaki hava boşlukları, kompozit malzemeyi oluşturan bileşenlerin katılık ve mukavemetlerindeki değişiklikler gibi durumların olması dolayısıyla, uygulamada, klasik mekanikteki gerilme esaslı yapılan hesaplara göre daha büyük gerilmeler oluşur. Genellikle gerilme yığılmalarını oluşturan büyük gerilmeler, elemanın sadece küçük bir kısmında toplanır. Birçok geometrik

şekillerde, özellikle gerilmenin yüksek olduğu yerlerde, bölgesel, matematiksel bir analiz zor veya uygulanamaz olabilir. Bu nedenle deneysel yöntemlerle elde edilen kırılma parametreleri, gerilme analizlerinde kullanılabilir.

Betonun büyük agrega danelerini kaplayan bir matris-ten oluşan heterojen yapısından dolayı, sonlu bir malzeme parçasında, homojen bir malzemede olduğu gibi düzgün bir gerilme dağılımı oluşmamaktadır.

Betonda rijit agregalar nedeniyle, düzgün olmayan gerilme dağılımları, agrega daneleri etrafında yoğunlaşmakta, sınırlara düzgün bir gerilme uygulanmasına karşın düzgün olmayan bir sınır yer değiştirme gözlenebilmektedir. Betonun bu heterojen yapısı kırılma mekaniğinin temel kavramlarına tam olarak uygunluk göstermez. Bununla birlikte, kırılma mekaniğinin betona uygulanması çalışmaları devam etmektedir. Hillerborg ve RILEM komitesi, kırılma enerjisi yaklaşımının, betonun G_f kırılma enerjisinin ölçümünde etkili bir metot olduğunu göstermiştir [1, 2]. G_f , en genel kullanımı ile, çekme etkisindeki bir beton numunede, hasar bölgesinde sönmülenen enerjinin çatlama kesite oranı şeklinde tanımlanabilir. Bu çalışmada yapıldığı gibi, çift konsol numunelerde basınç yüklemesinin oluşturduğu moment etkisiyle çentik ucunda çekme gerilmeleri meydana gelir. Bu çekme gerilmesi çentiğin ilerlemesini ve numunenin iki eşit parçaya bölünmesini sağlar. Bu işlemde sönmülenen enerji miktarının, çatlama kesit alanına bölünmesiyle G_f kırılma enerjisi elde edilir.

Betonun kırılma davranışı, çentiğin ya da çatlakın önünde geniş bir kırılma işlem bölgesinin oluşması nedeniyle, doğrusal elastik kırılma mekaniği (LEKM) davranışından sapma gösterir. Bu bölgedeki malzeme mikro çatlama dolay aşama aşama yumuşamaktadır. Betonun yük yer değiştirme eğrisinde, en büyük yükten önceki lineer olmayan kısım ve en büyük yükten sonraki kuyruk kısmına kadar olan bölge, mikro kırılmalar dolay oluşmaktadır. Ayrıca, yumuşama eğrisinin kuyruk kısmı, agrega kilitlenmesi ve sürtünmeden etkilenmektedir. Yumuşama bölgesinde kırılma yüzey alanı artarken, çatlak ucundan salıverilen enerji akışı azalmaktadır. Kırılma işlem bölgesinde uzamalar elastik bölgeyi aşmış, yumuşama bölgesine girmiştir. Sünek malzemelerde çatlak gelişim bölgesi küçük kalırken bu bölgenin çevresinde büyük bir doğrusal davranmayan, plastik bölge vardır. Yarı gevrek malzemelerde ise çatlak gelişim bölgesi büyüktür ve bu bölgenin etrafında küçük bir doğrusal davranmayan bölge yer almaktadır. Bu durum ACI Report 446.IR.91. tarafından önerilmiştir [3]. Beton gibi gevrek malzemelerde var olan çatlak arkasında agregaların arasındaki matriste mikro düzeyde çatlamlar olmakta, daha sonra bu çatlaklar daha ilerlerdeki çatlaklarla birleşmekte ve birleşen çatlaklar yoğunlaşarak tek bir ana çatlak oluşturmaktadır. Van Mier'in yaptığı deneysel araştırmalar ile betonda çatlak gelişim bölgesinin küçük olmadığı, neredeyse kesitin tamamını kapladığı bulunmuştur [4].

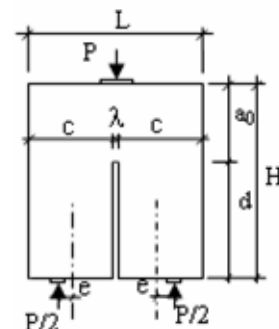
Beton ve betonarme elemanların kırılma mekaniğiyle ilgili son dönem literatüründeki bazı çalışmalar şunlardır: Boyuna doğrultuda donatılı kirişlerin etriyeli, etriyesiz, eğik çekme göçmesinin [5] yorulma etkisi altında yüksek mukavemetli çentikli beton kirişlerin [6] kiriş boyuna donatılarının spiral sargılı ve sargısız aderans eki deneylerinin [7] en büyüğü

60x120 cm boyutlarında olan aksel dinamik darbe yüküyle yüklü yüksek dayanımlı betondan oluşturulmuş silindirik numunelerin [8] boyut etkisi analizleri yapılmıştır. Weibull'dan bu yana boyut etkisinin gelişimi ve lifli beton, deniz buzu gibi malzemelere uygulanması araştırılmıştır [9]. Beton kırılma parametrelerinin istatistiksel yöntemlerle tahmini ve deney standartlarının seçimine yönelik çalışılmıştır [10].

2. YÖNTEM (METHOD)

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 açılma modu göçmesi elde edilmiştir. Çift konsola yük uygulanması, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, çentik üzerinde ilerleyen çatlakın çentik üstü bölgeyi boydan boya kat etmesine kadar sürdürülmüştür [11-13]. Böylece gelişen çatlakın çift konsolları iki ayrı parçaya ayırması sağlanmıştır. Bu çalışmada çift konsollar, konsol uçlarındaki mesnet şartları simetrik ve asimmetrik 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 $t=50\text{mm}$ 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 harfini S harfi izlemiştir. 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.

Normal beton karışım oranları çimento/çakıl/kum/su =1/2/2/0,55 olarak alınmış, Portland Kompoze



Şekil 1. Numune şekli (Shape of specimen)

Çizelge 1. Çift konsol boyutları (Dimensions of double cantilever beams element)

NUMUNE	H (mm)	L (mm)	d (mm)	a ₀ (mm)	c (mm)	t (mm)	λ (mm)	e=c/5 (mm)
P1- 3, PS1- 3	500	420	200	300	207,5	50	5	41,5
P4- 6, PS4- 6	250	210	100	150	102,5	50	5	20,5
P7- 9, PS7- 9	125	105	50	75	50	50	5	10

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 üçer adet 150×300 mm, 75×150 mm ve 37,5×75 mm boyutlarında kontrol silindirleri dökülmüştür. Silindir basınç deneylerinden asimetrik mesnetli elemanların karakteristik basınç dayanımı 30,8 MPa, standart sapması 5,2 MPa, varyasyon katsayısı 0,17; simetrik mesnetli elemanların karakteristik basınç dayanımı 32,8 MPa, standart sapması 1,9 MPa, varyasyon katsayısı 0,06 olarak bulunmuştur. Bütün numuneler, olasılıksal dağılım etkilerini en aza indirmek için aynı bir karışımdan dökülmüş ve bakım havuzunda 28 gün bekletilmişlerdir.

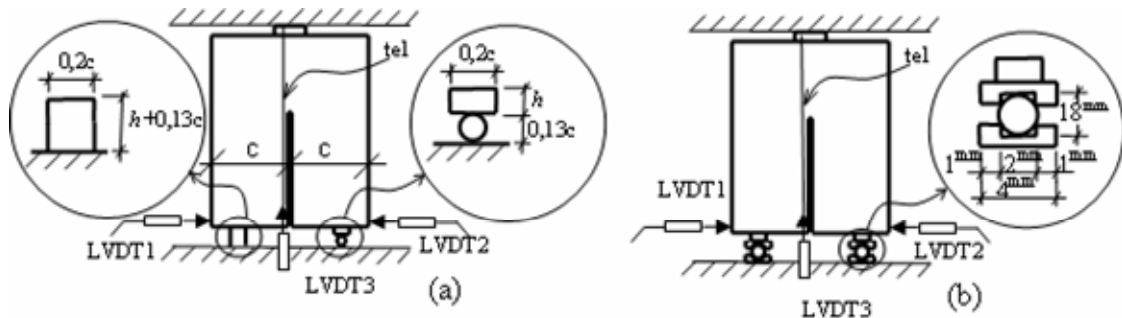
Deneylerin yapıldığı yükleme çerçevesinde denenebilir numune uzunluğu 80 cm'dir. Bu çerçeve, 4 köşede S220 çeliğinden L 100.100.10 korniyerle yapılmıştır. Toplam kesit alanı 7600 mm² ve çekme dayanımı $\sigma_{em}=160$ MPa olup bu çerçevede uygulanabilecek en büyük yük, 1220 kN, çerçevenin katılığı ise 560 kN/mm 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. Yükler 225 kN kapasiteli yükleme ölçer ile ölçülmüştür. Yük okumaları yanında konsol uçlarında yatay yer değiştirme (LVDT1 ve LVDT2) okumaları ile, düşey yer değiştirme (LVDT3) okumaları veri toplayıcı 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 2a da 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, Şekil 2b'de görüldüğü gibi U plakalar arasına yerleştirilmiş rulolar koyularak numuneye dönme serbestliği sağlanmıştır. Bütün serilerde aynı mesnetleme sistemi kullanılmış, sadece elemana göre, U plakalar üstüne konulan mesnet plakaları değiştirilmiştir.

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,

$$\mu = \frac{\mu_0}{\sqrt{1-\beta}}, \mu_0 = B \cdot f_t, \beta = \frac{D}{D_0} \quad (1)$$

şeklinde verilebilir [14]. Bu eşitliklerde; μ : Göçme-deki nominal gerilme, B: Yapı biçimine bağlı ampirik bir katsayı, f_t : Betonun çekme dayanımı, β : Gevreklik katsayısı, D: Yapının karakteristik boyutu, D_0 : Gevrek ve gevrek olmayan davranış arasında geçişi gösteren ampirik 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 $\log \mu$ nün $\log D$ ye veya $\log (\mu/\mu_0)$ nün $\log \beta$ ya 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

**Şekil 2.** Mesnetlenme şartları (Supporting conditions)

ise, μ 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 β değeri, 1'in yanında çok küçük olduğundan göz önüne alınmayabilir. Bu durumda μ 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 'nin yanında göz önüne alınmaz. μ 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. (1) denklemi, yalnız aynı betondan yapılmış ve aynı en büyük agrega boyutunu içeren yapılara uygulanabilir.

3. BULGULAR (FINDINGS)

Denklem (1)'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 [15] verdiği şu bağıntı ile bulunmuştur:

$$f_t = 0.35\sqrt{f_c} \quad (2)$$

Burada; f_c : Beton karakteristik basınç dayanımı (MPa) olarak verilmiştir. Denklem (1)'deki nominal göçme gerilmesi olarak ise, asal gerilmeler kullanılmıştır:

$$\mu = \frac{\sigma}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (3)$$

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. Bu eşitliklerde; σ : eğilme gerilmesi, M: yükleme sonucu oluşan moment, w: dayanım momenti, τ : 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, λ : konsollar arası mesafe (çentik genişliği), c: konsol genişliği, d: çift konsol elemanda çentik üstü bölge yüksekliğidir.

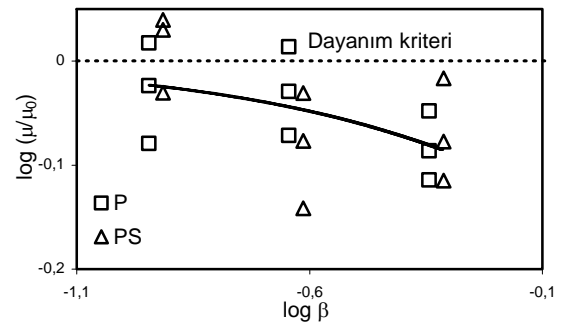
Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi denklemi (1), farklı regresyon analizleriyle düzenlenebilir [16]. Regresyon analizlerinden, bilinmeyen malzeme sabitleri B ve D_0 elde edilebilir. Bu çalışmada, her seri için Lineer I, Lineer II yapılmıştır. Lineer I regresyonunda denklem (4), Lineer II regresyonunda denklem (5) kullanılmıştır:

$$Y=AX+C \quad (4)$$

$$Y'=A'X'+C' \quad (5)$$

Burada; $X=D$, $Y=(1/\mu)^2$, $C=(1/Bf_t)^2$, $A=C/D_0$, $X'=1/D$, $Y'=(1/\mu D)^2$, $A'=(1/Bf_t)^2$, $C'=A'/D_0$ olarak alınır. Bu analizlerden, literatürde en çok kullanılan Lineer I analiz sonuçlarından elde edilen B ve D_0 katsayılarının (1) denklemlerinde yerine konulmasıyla, boyut etkisini içeren gerilme formülü bulunmuştur. Denklem (1)'i kullanarak iki ayrı mesnetlenme durumuna sahip iki seri için logaritmik eksen takımında μ/μ_0 ve β değerleri gösterilebilir. İki serinin Şekil 3'de 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.

Deneylerin Ansys 5.4 Nonlineer sonlu elemanlar sayısal analiz programıyla benzeşimi yapılarak yük-yer değiştirme 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 yer değiştirme serbestliğiyle tanımlanmış 3 serbestlikli 8 düğüm noktasına sahiptir. Solid45 elemanı da Solid65 elemanı ile benzer özelliklere sahiptir ve 3 boyutlu çelik malzemeden yapılmış elemanların tanımlanmasında kullanılır. Solid65, Solid45 elemanına ek olarak, çatlama ve ezilme kapasitesine de sahiptir. Bu eleman tipinin en önemli özelliği, doğrusal olmayan malzeme davranışını, betonun çatlama, ezilme, plastik şekil değiştirme ve sünme gibi özelliklerini yansıtmadır. Numuneler üçgen sonlu elemanlar ağı ile sonlu elemanlara ayrılmış, böylece hassas sonuç elde etmek için çentik çevresinde yeterli sıklaştırma yapılabilmiştir. Numunelerin Ansys programıyla analizini yaparken uygulanacak yük olarak, aynı boyutlara sahip her üç numuneden deneysel göçme yükü en büyük



Şekil 3. Toplu boyut etkisi eğrisi (Collected size effect curve)

olanının yükü seçilmiştir. Numune, 6 yükleme adımıyla bu maksimum göçme yüküne kadar yüklenerek, her yükleme adımına ait yük ve yer değiştirme değerleri kaydedilmiş, bu değerlerin yardımıyla yük- yatay yer değiştirme eğrileri çizilmiştir. Simetrik mesnetlenme durumuna sahip numunelerin analizi yapılırken simetri ekseninden yararlanılarak numunenin yarısı analiz edilmiş, böylece çözüm stabilitesi artırılmıştır. Örnek olarak P5 ve PS4 elemanlarının bazı Ansys analizi sonuçları Şekil 4 de verilmiştir.

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

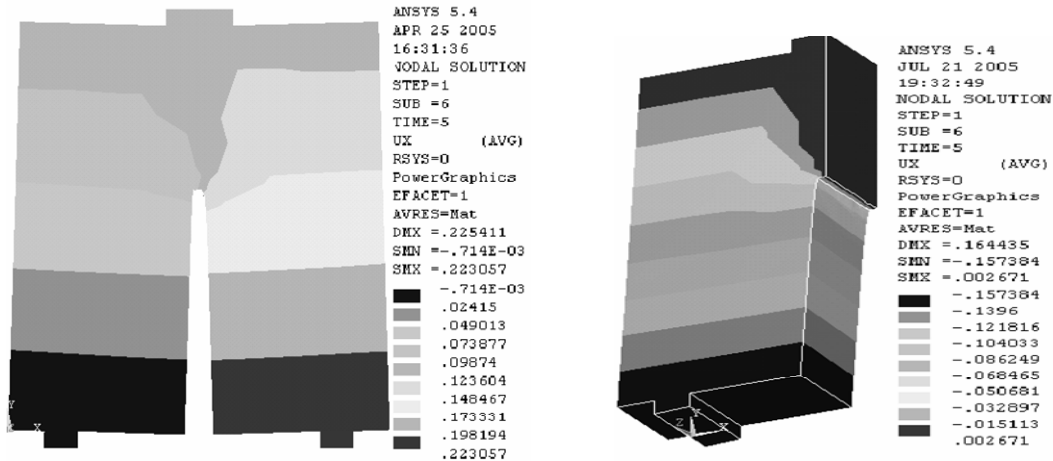
Malzemenin bünyesindeki keskin çatlak uçlarının komşuluklarındaki gerilme bileşenleri, yükleme tarzı ve elastik cismin şekline bağlı olarak tanımlanabilir. Mod I, II ve III olarak üç tip kırılma durumu vardır ve malzemedeki göçmeler bunların bileşkesi halinde ifade edilebilir. Mod I durumunda çatlak yüzleri, kendi düzlemlerine dik yer değiştirme yapmaktadır. O yüzden açılma modu ismi de verilmektedir. Mod II durumunda çatlak yüzlerinin kendi düzleminde birbirlerine göre yer değiştirme yaptığı düzlem gerilme durumu oluşmaktadır. Bu moda düzlemde kesme veya kayma modu ismi de verilmektedir. Mod III durumunda ise çatlak yüzlerinin düzlem dışında birbirlerine göre yer değiştirmelerine neden olan gerilme durumu söz konusudur. Bu duruma düzlem dışında kesme ya da yırtılma modu ismi de verilmektedir. Malzemedeki çatlak boyu, geometri ve yükleme şartlarına bağlı olarak her mod için yaklaşık bir sabit değer bulunabilir ve bu değere gerilme şiddet

çarpanı (K_I , K_{II} , K_{III}) adı verilir. Malzemenin kırılmaya başladığı kritik gerilme değerinde ölçülen gerilme şiddet çarpanı ise, o malzemenin o yükleme durumu, geometri ve çatlak boyuna sahip halindeki kırılma tokluğunu (K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC}) verir. Başka bir deyişle kırılma tokluğu, çatlakın mevcudiyetinde, malzemenin kırılmaya direnç gösterebilme kabiliyetidir [17].

Çizelge 2. Göçme yükleri ve yutulan enerjiler (Failure loads and absorbed energies)

Eleman Adı	Max. Yük kN	Yutulan Enerji kNmm	Standart Sapma N/mm	Varyasyon Katsayısı
P1	18,789	3,062		
P2	22,004	3,229		
P3	20,103	2,980	0,104	0,034
P4	10,438	1,478		
P5	12,680	1,702		
P6	10,500	1,778	0,127	0,077
P7	5,799	0,511		
P8	5,180	0,525		
P9	6,186	0,642	0,059	0,105
PS1	23,828	7,082		
PS2	18,852	4,609		
PS3	20,574	7,903	1,400	0,214
PS4	11,483	1,625		
PS5	10,335	1,197		
PS6	8,900	1,081	0,234	0,180
PS7	6,603	0,425		
PS8	6,794	0,797		
PS9	5,742	0,344	0,197	0,378

Şekil 6'da görüldüğü gibi, konsol uçlarında uygulanan P/2 yükünün döndürme etkisiyle çift konsollar, u yer değişimi 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 düşey yer değişimi yapmasına denktir. Sonuç itibarıyla bu ankastre mesnetli konsolda kiriş boyu a ile düşey yer değiştirme u arasında kuracağımız ilişki, basınç yüklü çift konsolda a toplam çentik boyu ile u yer değişimi arasındaki



(a) P5 elemanı max. yatay açılma (Max. dehiscence of PS4 element)

(b) PS4 elemanı max. yatay açılma (Max. dehiscence of P5 element)

Şekil 4. Ansys analizi sonuçları (Results of Ansys analysis)

Çizelge 3. Deney ve Ansys yatay açılma değerleri (Dehiscence values of experiment and Ansys)

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	22005	0,001	0,292	0,293	0,278	5
P4-6	12680	0,001	0,223	0,224	0,212	5
P7-9	6185,9	0,001	0,204	0,205	0,210	2
PS1-3	23760	0,356	0,356	0,712	0,791	10
PS4-6	11484	0,157	0,157	0,315	0,314	0,2
PS7-9	6747	0,077	0,077	0,154	0,161	4

ilişkiyi de simgeler [16]. Bu ilişki, virtüel iř prensibinden yararlanılarak şu şekilde verilebilir:

$$u = \frac{Ma^2}{2EI} \quad (6)$$

Burada 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 6' da görüldüğü gibi, $M = 0,5P(0,7c+0,5\lambda)$ şeklinde hesaplanabilir. Sonuç olarak,

$u' = 6P(0,7c+0,5\lambda)a^2/Etc^3$ ve buradan,

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

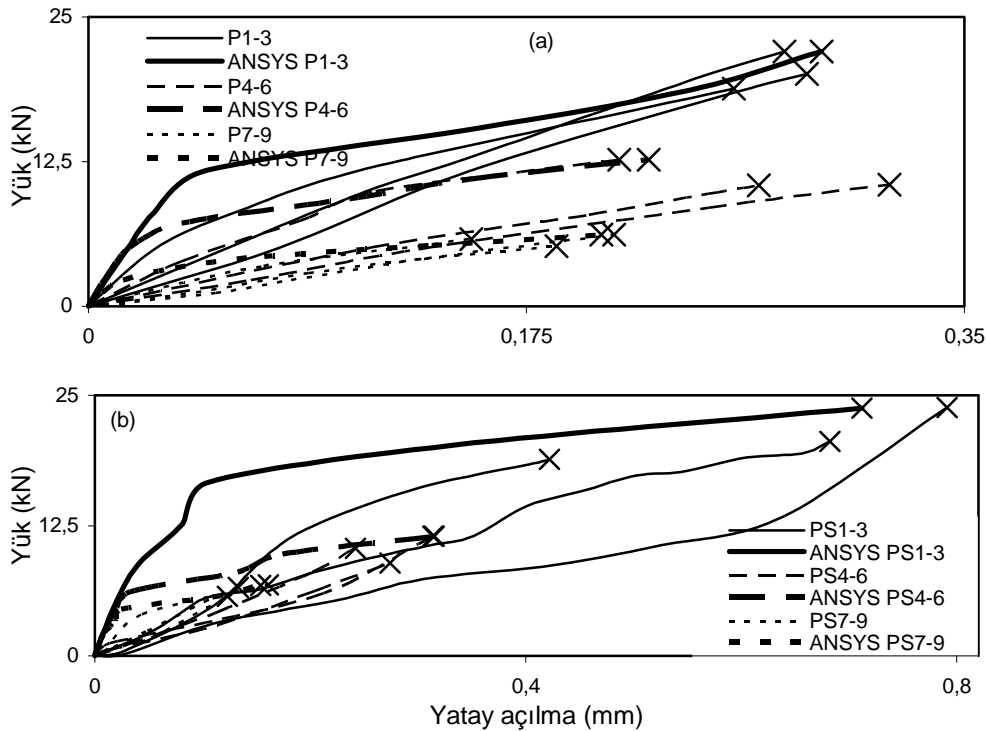
şeklinde yazılabilir. Böylece u' , yatay açılma değeri,

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

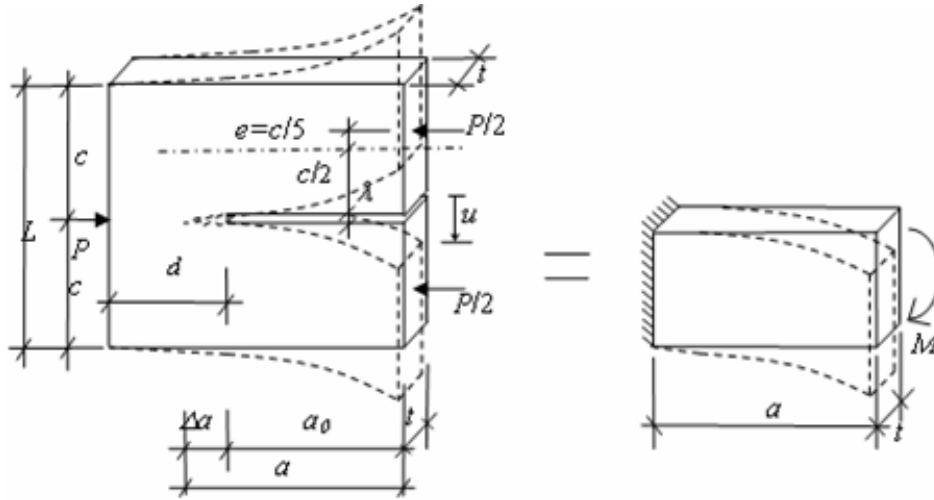
Deney dotalarından elde edilen yatay açılma - yük değerlerinden, P_u göçme yükü olmak üzere, yaklaşık $P_u/10$, $P_u/2$ ve P_u değerlerine denk gelen, u, yatay açılma değerleri bulunur. Denklem (7) kullanılarak bu yatay açılma değerleri, a, toplam çentik boylarına dönüştürülür. Böylece istenen yükleme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

4. SONUÇLAR (RESULTS)

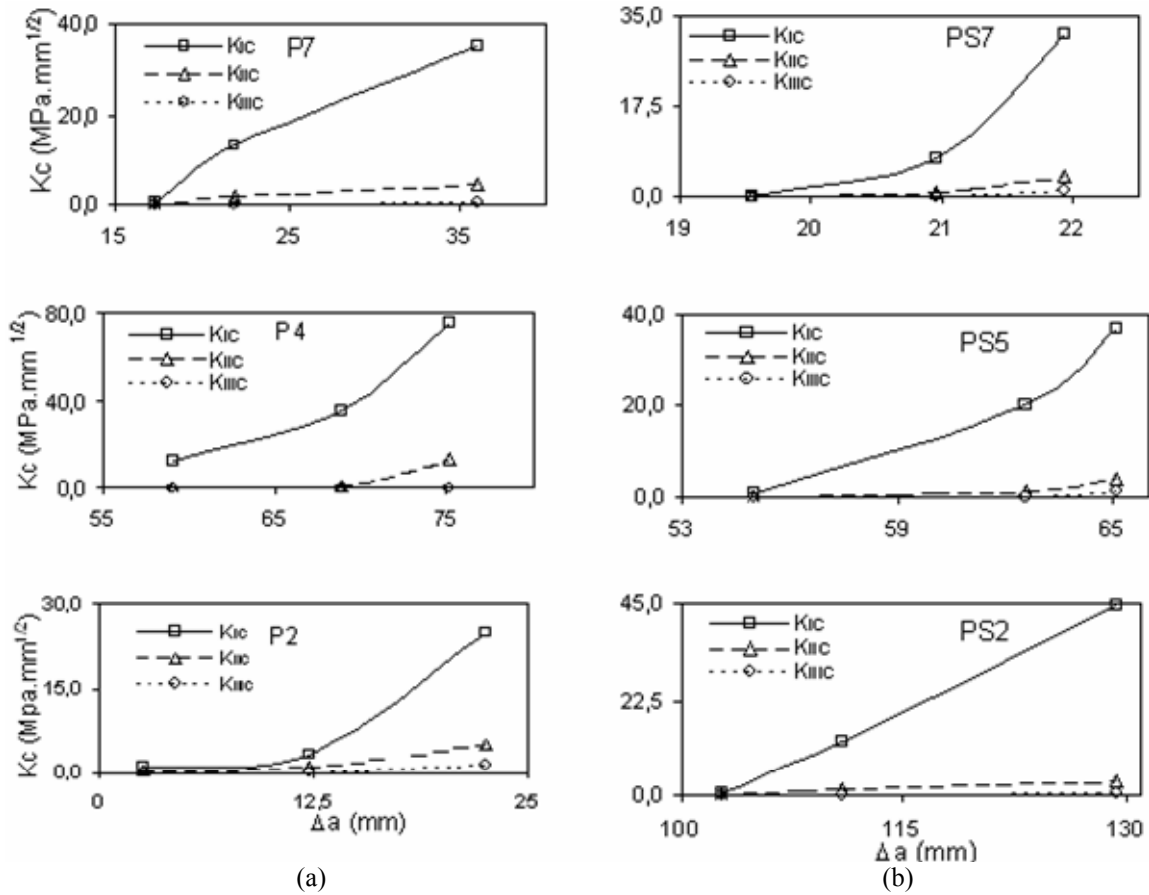
Bütün çift konsollu kolonların göçmesi çentiklerin ilerleyerek elemanların iki parça olması ile olmuştur.



Şekil 5. Yük- yatay açılma değerleri a) P serisi, b) PS serisi (Load- dehiscence values a) P series, b) PS series)



Şekil 6. Çift konsol yatay açılma yerdeğişimi ve konsol kiriş düşey yerdeğişimi (Horizontal dehiscence displacement of double cantilever and vertical displacement of cantilever beam)



Şekil 7. Kırılma toklukları a) P serisi, b) PS serisi (Fracture toughness a) P series, b) PS series)

Bu da tüm numunelerde göçme modlarının aynı olduğunu ve boyut etkisi denkleminin uygulanabileceğini gösterir. Çünkü göçme modları farklı olduğunda, karşılaştırılan göçme gerilmeleri, boyut etkisinden başka etkenlerden de etkileniyor demektir. Göçmeler, yarı gerçek göçme olup, numune boyutu arttıkça, deneysel (nominal) gerilmenin, elastisite teorisinden hesaplanan gerilmelere oranla azaldığı görülmüştür. Bu durum, denenen yükleme durumu ve eleman geometrisi için boyut etkisinin etkili olduğunu gösterir. Deney sonuçlarından elde edilen değerler

Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumludur. Çift konsolun basınç göçmesi için, boyut etkisi içeren yaklaşık (1) bağıntısı, simetrik olmayan mesnetlenme durumunda $B=12$, $D_0=440$ mm ve simetrik mesnetlenme durumunda $B=11$, $D_0=410$ mm olmak üzere önerilebilir. 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: Basınç yüklü, yükseklik ve çapları eşit silindirik beton numunelerinde, 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 [18]. 34,1 MPa dayanımlı betondan yapılmış, çentik boyunun kiriş yüksekliğine oranı 1/6, kiriş boyunun kiriş yüksekliğine oranı 2,7 ve kalınlığı 38,1 mm olan üç nokta yüklemesine maruz kenar çentikli kirişlerde $B= 3,1$ $D_0= 70$ mm olarak bulunmuştur [19]. En büyük eleman boyutları $200 \times 200 \times 2080$ mm 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 [20].

Simetrik ve asimetric mesnetlenmelerde D_0 katsayılarının, dolayısıyla β gevrekliğinin hemen hemen aynı olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, Şekil 3’de gösterilen toplu boyut etkisi grafiklerinde, simetrik mesnetli elemanların LEKM davranışına biraz daha yaklaşmış oldukları görülmektedir. Çizelge 2’den de anlaşılacağı üzere, simetrik mesnetleme durumunda göçme yükleri büyümektedir. Kırılma yükündeki bu artışın, elemanı daha gevrek bir göçme davranışına götürmüş olduğu düşünülebilir.

Şekil 5’de verilen yatay açılma 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. Şekil 5 ve Çizelge 3’ün incelenmesinden, özellikle beton gibi heterojen yarı gevrek bir malzeme için, Ansys analiziyle, deney sonuçlarına yeterli yakınlıkta sonuçlar elde edilebildiği, aralarındaki farkın %0,2 ile %10 arasında olduğu söylenebilir. Şekil 7’ye 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.

SEMBOLLER (SYMBOLS)

A	Doğrusal analiz I denkleminin eğimi
a	Toplam çentik boyu
A'	Doğrusal analiz II denkleminin eğimi
a_0	Çift konsol deney elemanı başlangıç çentik uzunluğu
B	Bazant boyut etkisi denkleminde malzeme geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı bir sabit
C	Doğrusal analiz I denkleminin sabit değeri
c	Çift konsol deney elemanı konsol genişliği
C'	Doğrusal analiz II denkleminin sabit değeri
D	Karakteristik boyut

d	Çift konsol deney elemanında çentik altı bölge yüksekliği
D_0	Bazant boyut etkisi denkleminde malzeme geometrisine ve kırılma özelliklerine bağlı bir sabit
E	Elastisite modülü
e	Çift konsol deney elemanında yükün konsol ekseninden dışmerkezliği
F	Çift konsol elemanı çentik üstü böge kesit alanı
f_c	Beton basınç dayanımı
f_t	Beton çekme dayanımı
h	Çift konsol deney elemanı yüksekliği
H	Mesnet plakası yüksekliği
I	Eylemsizlik momentini
K_{Ic}	Açılma modu kırılma tokluğu
K_{IIc}	Kayma modu kırılma tokluğu
K_{IIIc}	Yırtılma modu kırılma tokluğu
L	Çift konsol deney elemanı genişliği
M	Çift konsol deney elemanında yükleme sonucu oluşan moment
P	Basınç yükü olarak yükleme ölçerden okunan değer
P_u	Göçme yükü
S	Statik moment
t	Çift konsol deney elemanı kalınlığı
u	Konsol düşey yer değişimi
u'	Çift konsol deney elemanı yatay yer değişim
w	Mukavemet momentini
β	Bazant boyut etkisi denkleminde gevreklik sayısı
Δa	Çatlak gelişimi
λ	Çift konsol deney elemanı başlangıç çentik genişliği
σ	Eğilme gerilmesi
μ	Nominal gerilme
μ_0	Bazant’ın boyut etkisi eşitliğinde kullanılan $B.f_i$ değişkeni
τ	Kayma gerilmesi

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

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 (REFERENCES)

- Hillerborg, K., “The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete”, **RILEM, Mat. And Struct.**, 18, 291-296, 1985.
- RILEM “ Size effect method for determining fracture energy and process zone of concrete”, **RILEM & Mat. and Struct.**, 23, 461- 465, 1990.
- ACI Committee 446, **Fracture Mechanics of Concrete: Concepts, Models and Dermination of Material Properties**, In Fracture Mechanics of

- Concrete Structures, Z.P. Bazant, Elsevier Applied Science, London, 1- 140, 1992.
4. Van Mier, J. G. M., **Fracture Processes of Concrete, Assessment of Material Parameters For Fracture Models**, CRC Press, London, 1- 78, 1997.
 5. Bazant, Z. P., Kim, J. K., and Şener, S., “Size effect in shear failure of reinforced concrete beams”, **ACI Journal**, 81 (5), 456 - 468, (Discussion and Closure 82 (4), 579 - 583), 1984.
 6. Bazant, Z. P., and Scheil, W.F., “Fatigue fracture of high- strength concrete and size effect”, **ACI Materials Journal**, 90 (5): 472 - 478, 1992.
 7. Şener, S., “Concrete structures desing based on fracture mechanics”, **The Third Inter Kerensky Conference on Global Trends in Structural Engineering**, Singapore, 563-567, 1994.
 8. Krauthammer, T., Elfahal M.,M., Lim Ji, Ohno T., Beppu M., “Size effect for high-strength concrete cylinders subjected to axial impact”, **International Journal of Impact Engineering**, 28, 1001-1016, 2003.
 9. Bazant, Z.P., “ Size effect on structural strength: a review”, **Archive of applied Mechanics**, 69, 703-725, 1999.
 10. Bazant Z. P. and Giravdon E. B., “Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard”, **Cement and Concrete Research**, 32, 529- 556, 2002.
 11. Koç, V. and Şener, S., “Lifli beton çift konsolun basınç göçmesinde boyut etkisi”, **Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı II**, TÜBİTAK, Konya, 169-172, 2003.
 12. Koç V. and 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.
 13. Koç V. and Şener S., “Eksenel doğrultuda basınç yüklü çift konsollarda boyut etkisi”, **Advances in Civil Engineering**, 6th International Conference, Boğaziçi Üniversitesi., İstanbul, 531- 540, 2004.
 14. Bazant, Z. P., “Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal”, **J. Engng. Mech. ASCE**, 110: 518- 535, 1984.
 15. TS 500, **Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12, 2000.
 16. Bazant, Z. P., and Planas, J., **Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials**, CRC Press, Boca Raton, Fla., 1998.
 17. Irwin, G. R. “Analysis of stres and strains near the end of a crack travesing a plate”, **Journal of Applied Mechanics**, 24, 361- 364, 1957.
 18. Marti, P., “Size effect in double- punch tests on concrete cylinders”, **ACI Materyals Journal**, 86(6), 597- 601, 1989.
 19. Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A., “Determination of fracture energy from size effect and brittleness number.”, **ACI Materyals Journal**, 84 (6), 463-480, 1987.
 20. Şener, S., Barr, B. I. G. and Abusiaf, H. F., “Size effect in axially loaded reinforced concrete Columns”, **Journal of Structural Engineering**, 130 (4): 662- 670, 2004.