

LİFLİ BETONDA BOYUT ETKİSİ TOKLUK VE KIRILMA ENERJİSİ

Varol Koç*, Fahri Birinci

Özet: Normal ve lifli betondan hazırlanan çift konsol elemanlara, c konsol genişliği olmak üzere, $e=c/5$ ve $e=c/10$ dışmerkezliklerine sahip, konsol eksenlerine paralel basınç yüklemesi uygulanmıştır. Numune kalınlıkları sabit olup $t=30$ mm' dir. Diğer boyutlar büyük numuneden küçük numuneye doğru 4:2:1 benzerlik oranlarına sahiptir. Böylece numune serilerinde boyut etkisi incelenmiştir. Her numunede 2 yatay ve 1 düşey yer değiştirme ölçülmüş, konsol uçlarında ölçülen yatay yer değiştirmelerin toplanmasıyla açılma yer değiştirmesi bulunmuştur. Deneysel sonuçlarının boyut etkisi analizleri yapılarak boyut etkisi parametreleri bulunmuş, logaritmik eksen takımlı boyut etkisi eğrileri düzenlenmiştir. Ayrıca numunelere ait bağıl tokluklar, tokluk indeksleri ve kırılma enerjileri ile, boyut etkisi denklemlerinden yararlanılarak elde edilen malzeme özgül kırılma enerjileri de bulunmuş ve karşılaştırılmıştır.

Anahtar sözcükler: Kırılma mekaniği, tokluk, kırılma enerjisi, beton boyut etkisi, çift konsol elemanı, lifli beton, beton malzeme deneyleri

SIZE EFFECT, TOUGHNESS AND FRACTURE ENERGY FOR REINFORCED STEEL FIBER CONCRETE

Abstract: Double cantilever beams elements are produced from reinforced steel fiber concrete $e=c/5$ and $e=c/10$ eccentric compressive loads parallel to cantilever axes in which c is cantilever width is applied. Specimen thickness t is constant and 30 mm. Other sizes are geometrically similar with ratio 1:2:4. In this, size effect is investigated in specimen series. Two horizontal and one vertical displacements are measured for each specimens. Opening displacements are found for adding to horizontal displacements for each cantilever ends. Test results are analysed for size effect and parameters of size effect are found and so bilogarithmic plots of size effect are prepared for each series.

Key words: Fracture mechanic, toughness, fracture energy, concrete size effect, double cantilever beams, steel-fiber reinforced concrete, concrete material tests

1.Giriş

Çekme gerilmeleri bir çatlaktan, pek çok çatlağın yayılmasına neden olarak betonu göçmeye sürükler. Bu dağılı çatlaklar, boyut etkisini doğurur. Ancak çekme gerilmelerinin oluşması için, elbette çekme yüklemesi yapmak şart değildir. Bu çalışmada olduğu gibi, basınç yüklemesine dik yönde, eleman kritik ara kesitlerinde çekme gerilmeleri de oluşacak, hatta basınç yüklemesi sonucu oluşan kayma ve çekme etkileriyle, karışık modla eleman göçmesi gerçekleşecektir. Bu nedenle özellikle literatürde eksikliği olan, basınç yüklemesi ve karışık mod göçmeleri üzerinde yapılacak boyut etkisi çalışmalarının önemi büyüktür. Ayrıca genelde, çatlak gelişimine karşı betonun direncini ve düktilitesini artırmak için, betonun liflerle güçlendirilmesi etkili bir yoldur. Lifli betonlarda çekme mukavemeti, kırılma enerjisi ve tokluğun analizinde prensip olarak geçerli bir yol olan kırılma mekaniği kullanılır. Kırılma enerjisi, elemanı göçmeye götürmek için gerekli olacak enerjidir. Numunenin kırılmasına

* Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü 55139 Kurupelit, Samsun. E-posta: kvarol@omu.edu.tr.

kadar birim hacim başına yapılan işe ise “Kırılma şekil değiştirme işi” yani “tokluk” adı verilir. Tokluğun değeri, olağan gerilme-şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alana eşittir. (Nataraja ve diğerleri, 1999) Bahsedilen ve bu çalışma boyunca bahsedilecek bir çok nedenlerden ötürü, özellikle özel betonlar ve dolayısıyla lifli betonlar üzerinde, boyut etkisi prensipleriyle çalışarak kırılma mekaniği parametrelerini (tokluk, kırılma enerjisi) elde etmek büyük yarar sağlar. Zira elastisite modülü betondan yüksek olan çelik liflerin betona katılmasıyla betonun tokluk ve kırılma enerjisi gibi çeşitli malzeme kriterlerinde (kırılma mekaniği parametreleri) iyileşmeler meydana gelmektedir. Özellikle beton kırılmaya başladıktan, yani lineer- elastik bölgeden uzaklaşmaya başladıktan sonra, lifler çok daha etkin bir rol oynayıp kırılma enerjisini oldukça yükseltmektedir. Ayrıca kırılma yüküne yakın yükleme durumlarında normal betonlarda, lifli betonlara göre daha az sayıda çatlak oluşmakta, fakat lifli betonlarda açılma ve çatlaklar eleman hacminde yayılmakta ve fazla oranlarda çatlak lokalleşmeleri olmamaktadır. (Arslan ve Ulucan, 1997) Bu ideale yakın durum, çatlakların bir bölgede yığılarak yarığa dönüşüp elemanı erken göçmeye götürmesini engellemektedir.

Lifli beton, değişik yükler altında gösterdiği davranış ve performans açısından geleneksel betondan oldukça farklı bir özelliğe sahiptir. Sözü edilen davranış farklılığı, beton içerisinde gelişi güzel dağılan liflerin, çatlakların ilk oluşum anında çatlak sonlarındaki gerilmeleri kendi üstlerine ya da sağlam alanlara transfer ederek işlevlerini yerine getirmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu şekilde, betonu yıkılmaya götürecek olan çatlakların oluşumu ve büyümesi engellenir; kırılma daha büyük yüklerde meydana gelir. Kompozitlerin ani yüklemelere ya da tekrarlı yüklemelere karşı yeterli dayanıma sahip olması ve yük altında yutulabilen enerji miktarının fazlalığı açısından liflerin sağladığı artış, lifli betonların avantajları arasında sayılabilir. Literatürden, çelik, naylon ve karma liflerin, basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri pek etkilememesine rağmen, eğilme- çekme dayanımı, süneklilik ve tokluk gibi mekanik özelliklerini çok yüksek oranda artırdığı, hatta kırılma enerjisini 70 kata kadar yükselttiği görülmektedir. Çelik tel dayanımı arttıkça kırılma enerjisi daha da artmaktadır. Benzer şekilde, bu çalışmada da görüleceği gibi, yine bir kırılma mekaniği parametresi olan karakteristik boy da büyümektedir. Ayrıca eğilme tokluğunda olduğu gibi, basınç altındaki toklukta da artışlar kaydedilmiştir. (Şengül, 2005 ve Yılmaz ve diğerleri, 2007)

2. Kırılma Mekaniği, Boyut etkisi ve Literatürü

Beton elemanda çatlak oluşumu sonucu göçme için enerji gereklidir. Fiziki bakımdan çatlağın başlaması gerilmeye bağlıdır. Gerilme, çatlak oluşumu için katının yüzey enerjisi ile tanımlanan kırılma enerjisini oluşturur. Bu nedenle göçme mekanizması hesaplamalarında enerji kriteri kullanılmalıdır. Fizikçiler için gerekli olan bu kriter tasarımcılar için gerekli görülmemiş, enerjiye bağlı göçmeyi yalnız kırılma mekaniği kullanmıştır. Diğer yöntemler, emniyet gerilmeleri yöntemi ya da taşıma gücü, enerjiyi göçmede kullanmaz. Yapıların göçme mekanizmalarında emniyet gerilmeleri ya da taşıma gücü yöntemlerinin dikkate alınmadığı ve kırılma mekaniğinin araştırma alanına giren başlıca dört durumdan söz edilebilir: 1) Malzeme dayanımı, göçme yüzeyinin farklı noktalarında, farklı zamanlarda aşılır. 2) Çatlağın gelişip yayılmasıyla, en büyük yük sonrası yumuşama görülür. 3) Büyük yapıda çatlak, kesit boyutuna göre çok daha küçük bir bölgede lokalize olup hareket eder. Bu durum, davranışı lineer elastik kırılma mekaniğine (LEKM) yaklaştırır. 4) Lokalizasyon ve enerji açığa çıkışı, kırılma mekaniği tarafından ele alınır.

Yük- yer değiştirme diyagramına bağlı olarak, elastik ve plastik olmak üzere iki tip yapısal göçme vardır. Plastik göçmenin tipik karakteristiği, yapının çeşitli parçalarının göçmesinin tek bir parametre ile orantılı, tek serbestlik dereceli olarak aynı anda gelişmesidir. Bu göçmeler, yük- yer değiştirme eğrisinde uzun akma platosu ile gösterilirler. Eğer yük- yer değiştirme eğrisinin böyle bir akma platosu yok ise, göçme plastik değil, gevrek (yada yarı gevrek). Gerçekte, kırılma, çatlama ve diğer hasarlar yüzünden malzemede yumuşama gözlenir ve akma platosu yok olur ve göçme işlemi tek serbestlik dereceli sistem olarak gelişmez. Sünek göçme arzulandığı halde, betonarme gibi, %98'i beton olan elemanlarda gevrek göçme, akma platosu olmadığı için kaçınılmazdır. Yarı gevrek bir davranış sergileyen beton ve betonarme elemanlarda, en büyük yükten sonra yumuşama bölgesi vardır. Bu bölgede, eleman boyutuna göre daha gevrek ya da daha sünek bir davranış belirir ve bu durum emniyet gerilmeleri ya da taşıma gücü yöntemlerinde göz önüne alınmaz. Yük yer değiştirme eğrisinin altındaki alan göçme sırasında yapının yuttuğu enerjiyi verir. Bu enerji özellikle dinamik yüklemelerde önemlidir ve yapının sünekliğini oluşturur. Plastik analiz en büyük yükün azalması (yukarıda belirtilen yumuşama) ve yutulan enerji hakkında bilgi vermez. Bu yüzden kırılma mekaniği ve kolay bir uygulaması olan boyut etkisi, araştırmacılar tarafından araştırılmaktadır.

Boyut etkisi ile ilgili Literatürdeki çalışmalardan bazıları şunlardır: Kirişlerde diyagonal kesme göçmesinde boyut etkisi, dıştan çubuklarla ve levhalarla kuvvetlendirilmiş kirişlerde (Bazant ve diğ., 1984), etriye ve agrega boyutu değişken kirişlerde (Bazant and Sun, 1987) ve etriyesiz kirişlerde (Bazant and Kazemi, 1991) araştırılmıştır. Döşemelerde zımbalama etkisinde (Bazant and Cao, 1987), yüksek dayanımlı kenar çentikli kirişlerde üç nokta yüklemesinde (Gettu ve diğ., 1990) iki yüzeyinden kenar çentikli kirişlerde çekme (Bazant and Pfeiffer, 1987) ve kayma (Bazant and Pfeiffer, 1986) gerilmesi testlerinde boyut etkisi incelenmiştir. Aşırı donatılandırılmış betonarme kirişlerde basınç göçmesinde (Belgin ve Şener, 2008), donatılı ve donatısız beton- betonarme kolonlarda basınç göçmesinde (Şener ve diğerleri, 1999 ve Şener ve diğerleri 2004), basınç yüklemesi altında çift konsol numunelerin ve farklı narinlikli, çentikli ve betonlu silindirlerin kırılmasında (Koç ve Şener, 2004b ve Koç, 2005) farklı çentiklere ve narinliklere sahip normal ve yüksek dayanımlı beton silindirlerde (Koç ve Şener, 2009) boyut etkisi incelenerek basınç göçmesindeki varlığı ve parametreleri de araştırılmıştır.

3. Lifli Betonun Gelişimi ve Kırılma Mekaniği Perspektifinden Değerlendirilmesi

Yalın beton, çekme dayanımı, yapısal tasarımda ihmal edilebilecek düzeyde düşük, yüksek tokluk ve süneklilikten yoksun, gevrek bir malzemedir. Normal betonlarda, her hangi bir çatlağın yayılması için gerekli enerji düşüktür. Çelik ve/veya sentetik liflerin betona katılması, betonun bu handikaplarını giderir. Lifli betonlarla, aslında, ince- iri agrega, su, çimento ve katkı maddesinden oluşan kompozisyona rasgele dağılmış süreksiz liflerin katılmasıyla, çatlak gelişiminin kontrol altına alınması ve böylelikle tokluğun artırılması amaçlanmıştır. Basınç, çekme ve eğilme dayanımları yüksek ve salt metal yapı malzemelerden daha ekonomik olan, farklı tür yapı malzemesi arayışları sırasında, 1960 lı yıllarda, özellikle İngiltere ve İskandinav ülkelerindeki yoğun çalışmalar sonucu, lifli beton teknolojileri ortaya çıkıp gelişmiştir. Aslında lifli betonlara esin kaynağı olan saman takviyeli kil harcı (kerpiç) 4500 yıl öncesinden beri yapı malzemesi olarak kullanılmaktaydı. Benzer şekilde tuğla ve harçta keçi kılı, at yelesi hatta insan saç gibi lifler de kullanılmıştı. 1900 lü yılların başlarından itibaren ise asbest lifler de benzer amaçlarla betonda kullanılmaya başlanmışlardı. Günümüzde ise, beton bileşenleriyle kimyasal reaksiyonlara girmemesi nedeniyle tam anlamıyla katkı maddesi denemese de, bir çeşit beton katkı malzemesi olarak

kimyasal ve mineral maddelerin yanı sıra, çeşitli ebatlarda çelik lifler de kullanılmaktadır. Çelik lif katkılı betonlar, son yıllarda karayollarında, tünel kaplamalarında, beton büz borularda ve betonarme çerçevelerde, beton dayanımına olan olumlu etkileri (özellikle çekme-eğilme dayanımı) ve enerji yutma kapasitelerinin fazla olması nedeniyle yaygın olarak uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle eğilme-çekme ve kesme etkisi altında, dolayısıyla basınç yüklemesine de maruz kalan elemanlarda çatlak oluşumunu ve ilerlemesini, gelişimini geciktireceği için, karışımda çelik lif kullanılması, aşağıda bahsedilecek olan belli başlı mekanik karakteristiklere olumlu yönde katkı yapar. Bu nedenle de bu çalışmada, özellikle basınç yüklemesi altında ve çift konsol arakesitlerinde eğilme-çekme ve kayma gerilmeleri oluşturacak bir eleman geometrisi ve yüklemesi seçilmiştir.

Çelik lifli beton, basınç düktilitesi de gösterir. Yani taşıma gücüne eriştiği halde yük taşıma özelliği vardır. Ayrıca kesme, burulma ve yorulmaya karşı mukavemeti fazladır. Çatlamalar, dökülme, parçalanma ve dağılmalar azdır. Lifler düzgün dağılıp betonda boşluklar oluşmazsa, lifli betonun basınç mukavemetinde de belirli bir artış görülür. Zira yükleme düzlemine dik olan lifler, basınç gerilmesinde herhangi bir işlev üstlenmez, hatta burulmaları ve boşluk artırıcı yönlendirmeleri nedeniyle olumsuz bir işlev üstlenirken, yükleme düzlemine paralel lifler, basınç gerilmesini ve sünekliliği artırır. Liflerin düzgün dağılması teriminden de yük durumuna göre bu istenen yönelimi sağlamış olmaları ve betonda boşluk oluşturmamaları kastedilir. Çekme mukavemetinde ise lifli betonda, normal betona göre oldukça önemli artışlar gözlenir. (Arslan ve Aydın, 1999) Genellikle yapı uygulamalarında çelik lifli beton kullanıldığı zaman sadece kırılmayı önlemek için değil, dinamik yükleme veya çarpma mukavemetini artırmak için malzemenin dökülme, parçalanma ve dağılmasını önlemek için de çelik lif ilave edilmektedir. (ACI Commitee, 1984) Ayrıca çelik lifli betonun kesme dayanımı da normal betona göre oldukça yüksek olmaktadır (Arslan ve diğerleri, 1991). Bu nedenle kesme veya burulma elemanlarında da kullanımı oldukça avantajlı görünmektedir. Özellikle yüksek kırışlerde, betonarme silolarda ve deprem perdelerinde kullanımı çok anlamlı olmaktadır.

Normal betonlar gerilme altında sınırlı miktarda deformasyon yapabilir ve yük artımı sonucunda sistem göçer. Lifler, çatlakları sınırlı mertebede tutup, gerilme transferi ile betona daha yüksek deformasyon yapma yeteneği sağlarlar. Lifli betonda gerilme transferi sebebiyle, çatlağın yayılması için, çatlağın oluşması için gereken enerjiden daha fazla enerji gerekmektedir. Bu durum, çatlağın yayılması yerine, sağlam bölgelerde yeni çatlakların oluşmasını kolaylaştırır. Böylece daha fazla enerji sönmelenir. Kompozit, göçmeden, daha fazla deformasyon yapabilir. Çelik lifli betonlarda, basma yükü eksenine dik olan lifler, kendilerine paralel yönde oluşmuş olan çekme kuvvetlerini karşılamaları, ve yanal deformasyonları, beton matrisle aralarındaki sürtünme ile oluşan aderans ve yüksek çekme kapasiteleri sayesinde azaltmaları nedeniyle, tokluğu artırmaktadırlar. Bu nedenlerle aynı durum, polipropilen lifler içeren betonlarda pek yüksek seviyede sağlanamamaktadır. Donatı ve çelik lifler arasındaki en önemli fark, beton içerisindeki fonksiyonları ve buradaki çatlakların kontrolünü nasıl ve ne zaman yaptıklarıdır. Çelik lifler, betonun yapısını değiştiren, betonu plastik bir davranışa iten malzemelerdir. Çelik lifli betonun özelliği, onun arttırılmış elastikiyet ve enerji yutma yeteneğidir. Yani lifli betonlarda, maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda, yükün azalma hızı, normal betonlara göre çok daha yavaştır. Dolayısıyla meydana gelen şekil değiştirme işi çelik lifli betonlarda çok daha büyüktür. Liflerle güçlendirilmiş betonlarda liflerin matrisle çatlak oluştuktan sonraki etkinliği daha fazladır. Çatlama sonrası dayanım ise lif uzunluğu, şekil ve boyutları ile gerilme-şekil değiştirme özelliklerine bağlıdır. (Shah and Rangan, 1971) Bu nedenlerle nihai yükte belirgin bir artış olmamasına karşın, lifli beton, tek eksenli yükleme altında daha sünek

davranabilmektedir. Ayrıca lifleri düzgün dağılı ve boşluğu az bir lifli betonun ilk çatlak dayanımı da yüksektir. Beton içinde homojen olarak dağılı bulunan, kısa kesilmiş lifler, betonda çatlak oluşmasını, çatlak yayılımını ve ilerlemesini geciktirir. Aşamalı olarak matrizen sıyrılma ve kopma mekanizması ile betonun enerji yutma kapasitesini önemli oranda geliştirir.

4. Lifli Beton Kırılma Parametreleri ve Literatürü

Lifli beton, donatısız betondan farklı mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir kompozit malzemedir. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi enerji yutabilme kapasitesidir. Tokluk olarak da adlandırılan enerji yutma kapasitesi, betonun yük altında sönümlendiği enerji miktarı olarak tanımlanır. Yük- deformasyon eğrisi altında kalan alan, deney numunesi boyutlarından, deney düzeneği yükleme tipinden, yükleme hızından etkilenir. Çatlak direnci, duktilite, darbe direnci gibi bir çok malzeme özelliği, enerji yutabilme kapasitesi ile ilişkilidir. Standart haline getirilmiş tokluk değerlendirmeleri vardır. Örneğin ASTM C 1018 (Anonymous, 1997) ve JSCE SF-4'e (Anonymous, 1984) göre yapılan tokluk hesaplamaları bir eksenli eğilme deneylerine göredir. Ülkemizde kullanılan TS 10515 (Anonim, 1992) standardı ise, ASTM C 1018 benzeridir. Dolayısıyla bu standartlar baz alınarak yapılan deneylerde lifli betonun standart eğilme tokluğu elde edilmiş olur. Ancak tokluk tanımı ve işlevi aslında göreceli olduğundan, örneğin standart silindirlere basınç yüklemesi yapılmasıyla elde edilen veya bu çalışmada olduğu gibi standartlarla tespitlenmemiş bir numune geometrisi ve yükleme sistemine sahip deneysel çalışmalardan bulunacak olan tokluk ise, bağıl basınç tokluğu ya da bağıl tokluk olarak isimlendirilebilir. Tokluk, beton içindeki çelik liflerin rolüne bağlıdır ve lifli betonların işlevselliği değerlendirilirken esas alınan bir parametredir. Bu özellik, çelik lifli betonun lif miktarı, narinlik oranı, lif boyu, lif geometrisi ile yükleme hızı ve numune boyutları gibi faktörlerden etkilenir. Betondaki lif içeriğinin artması, lif boyunun ve narinlik oranının büyümesi ile betonun tokluğu da artar. Bununla birlikte, lif tipi ve lif dozajı ile elastisite modülü ve basınç dayanımı arasında tanımlanabilecek bir fonksiyon ya da ilişki belirlenememiştir. Ancak betonun elastisite modülü ve basınç mukavemetinin yanında kırılma enerjisi de oldukça önemli bir malzeme parametresidir. Çelik lifli beton, özellikle ilk kırılma yükünden sonra oldukça yüksek bir duktilite gösterir. Bu nedenle lif oranı arttıkça, kırılma enerjisi de artış kaydetmektedir. Çelik lifli betonların bu tür özelliklerini ortaya koymak üzere, literatürde bir çok ampirik tanımlama yapılmıştır. Bunlardan en önemlisi Barr 'ın geliştirdiği tokluk indeksi (Toughness Index) tanımlamasıdır. Lifli betonun gerilme- birim boy değişimi eğrisinin ilk kırılma yüküne kadar olan kısmının altında kalan alanın, eğri altındaki toplam alana oranı, Tokluk İndeksi olarak tanımlanmıştır. (Barr ve diğerleri, 1982)

Tokluk indeksleri de standartlara geçmiştir. Yukarıda bahsedilen standartlar baz alınarak yapılan deney ve hesaplardan bulunan tokluk indekslerine, standart eğilme tokluğu indeksleri denebilir. Bu indeksler, yük- deplasman eğrilerinde, belirlenen bir sehime kadar olan eğri altında kalan alanın, ilk çatlak kadar olan alana bölünmesiyle elde edilen sayılardır. Başka bir deyişle tokluk indeksleri, seçilen deplasman değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılır. Yük- sehime eğrisinin, lineer bölümden ilk kez ayrıldığı nokta tanımlanarak, ilk çatlak belirtilir. Eğride tespit edilen ilk çatlak noktası öncesi alandan da ilk çatlak tokluğu bulunur. Tokluk indeksleri, betonun enerji yutma kapasitesini göstermesi ve şahit betonla karşılaştırılması açısından önemlidir. ASTM C 1018'e göre Tokluk indeksleri düşükse, çatlaktan sonra enerji yutma kapasitesi düşük demektir. Tokluk indeksleri, aslında, çelik lifli betonların elastik- plastik davranışını açıklayabilmek amacıyla geliştirilmiştir. Tokluk indekslerinin değerinin düşük oluşu, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük,

enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu göstermektedir. Çelik lifin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi ile tokluk indekslerinin 20 gibi değerlere ulaşması ve hatta aşması da mümkündür (Karahan, 2006) Tokluk indekslerinin hesaplanmasında, özellikle ilk çatlak noktasının yerinin belirlenmesi zordur. İlk çatlak noktası, yük-sehim eğrisinde yükün maksimum değere ilk kez ulaştığı ve eğrinin lineerlikten ayrıldığı ilk nokta olarak alınabilir. (Çivici, 2006 ve Chen ve diğerleri, 1995) Bu çalışmada da bu öneri kullanılmış, çift konsolların bağlı tokluk indeksleri bu şekilde hesaplanmıştır. Gerilme-şekil değiştirme eğrisindeki lineerliğin bitiş noktasında, malzemede ilk çatlak oluşmuş demektir. Çatlama sonrası kenetlenme, özellikle liflerle güçlendirilmiş betonda, betonarme elemanlara nazaran daha da önemli bir görev üstlenir. İlk çatlak sonrasındaki matrisle lifler arasındaki kenetlenme, kompozit malzemenin özelliğini belirlemede önemlidir. Matrisle lifler arasında, gerilme transferinin tipine bağlı olarak kayma ve çekme kenetlenmeleri mevcuttur. Genelde bu iki kenetlenme tipi de birbiriyle ilgilidir. (Bartos, 1981) Yine bu çalışmada seçilen eleman geometrisi ve yükleme tarzı, özellikle liflerle matris arasındaki kenetlenme gerilmelerine uygun olarak, çift konsolların ara kesitinde eğilme-çekme ve kesme gerilmeleri oluşturmaya yönelik olmuştur.

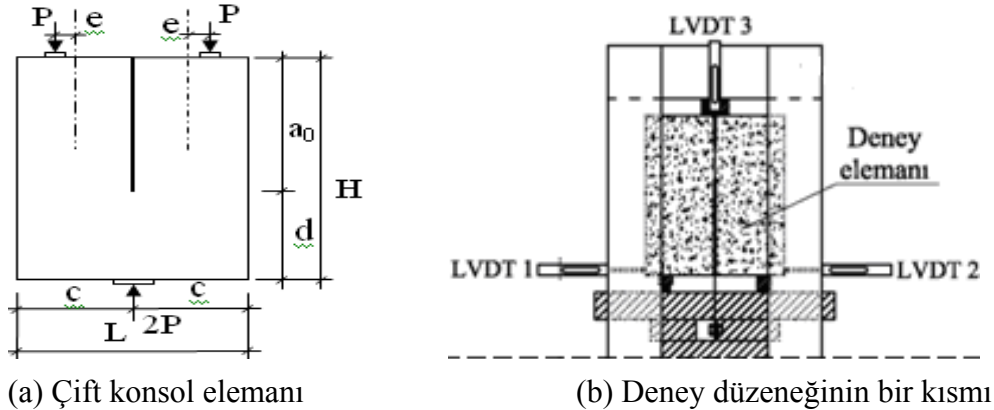
Çelik lifli betonun kırılma enerjisi ve bağlı- standart tokluklarının tespiti ile ilgili literatürdeki bazı çalışmalar şunlardır: Farklı oranlarda çelik ve polipropilen liflerin katılmasıyla oluşturulmuş beton numunelerde, betonların basınç ve kayma dayanımlarıyla kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Söz konusu çalışmada, Betonun karışık moda kırılma performanslarını modelleyebilecek, aynı anda her üç kırılma modunun bir numune üzerinde izlenebilmesini sağlayabilecek bir numune geometrisi seçilerek, farklı bölgelerde dört kırılma yüzeyi meydana getirilmiş ve betonun heterojen yapısı daha iyi bir şekilde ifade edilmiştir (Arslan, 1995). Uçucu kül, polipropilen ve çelik liflerle farklı oranlarda güçlendirilmiş beton elemanların özellikleri incelenmiş, 4 nokta yüklemesine maruz bırakılmış beton kirişlerden, standart eğilme toklukları elde edilmiştir. (Karahan, 2006) Farklı çelik lif tiplerinin farklı oranlarla kullanılmasıyla elde edilen beton kirişlerde ve plaklarda, ASTM C 1018, JSCE SF-4 ve TS 10515' e uygun standart eğilme toklukları ve tokluk indeksleri bulunarak karşılaştırılmıştır. (Çivici, 2006) 4 nokta yüklemesine maruz, farklı dozajlı ve çelik lif oranlı betonarme kirişlerin standart toklukları bulunmuş, aynı betonların standart silindir numunelerinden de bağlı toklukları(enerji yutma kapasitesi) elde edilmiştir (Altun ve diğerleri, 2006). Farklı çelik lif oranlı C20 sınıfından beton standart silindir numunelerinin elastisite modülleri ve bağlı toklukları bulunmuştur. (Altun ve diğerleri, 2005) Farklı çelik lif ve beton karışım oranlarına sahip standart silindirlerin basınç altındaki bağlı tokluk yetenekleri bulunmuştur (Ünal ve diğerleri, 2007). Farklı çelik lif oranlarına sahip ve farklı ısı işlemlere maruz bırakılmış beton standart silindir numunelerinin basınç altında kırılma şekil değiştirme işleri (bağlı tokluk) bulunmuştur (Ünal ve diğerleri, 2005). Farklı lif oranlarına sahip Standart silindir ve prizma numunelerinin değişik kür ortamlarına göre bağlı toklukları (enerji yutma) bulunmuştur (Ünal ve Uygunoğlu, 2005)

5. Deneysel Çalışma

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. Kırılma mekaniğinde çift konsollar kırılma parametrelerini bulma amacıyla klasik olarak açılma modunda (Mod I) incelenirken, burada basınç yüklemesinde incelenmiş, konsol ve çentik yarı genişlikleri ve yük dış merkezliği sayesinde basınç yükünün Mod I açılması ve ek olarak Mod II kesme etkisi oluşturması sağlanarak, karışık mod kırılması meydana getirilmiştir.. Normal ve Lifli betondan hazırlanan numuneler kalınlıkları

$t = 30$ mm olarak dökülmüştür. c konsol genişliği olmak üzere, konsol ekseninden konsol dış yüzüne doğru, $e = c/10$ ve $e = c/5$ dışmerkezlikleriyle ayrı ayrı yüklenmişlerdir. Normal beton numuneler P, Lifli beton Numuneler, F başlangıç harfi ile simgelenmiştir. $e = c/10$ dışmerkezliğiyle yüklenen numuneler, P veya F başlangıç 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 boyut etkisi incelenebilmiştir. Şekil 1a ve Tablo 1’ de, numune boyutları gösterilmiştir.

Hem normal hem de lifli beton karışım oranları çimento/ çakıl/ kum/ su = 1/ 2/ 2/ 0.55 olarak alınmış, lifli betonda çelik lif, toplam beton ağırlığının %3’ü kadar konulmuştur. Dramix çelik lif uzunlukları 30 mm olup, Belçika-Türk ortak şirketi Beksa üretimidir. Lifler eğik donatı biçimli olup uzunluk/kalınlık oranı= 70 dir. Karışım hazırlanırken, önce lifler, topaklanmayı önlemek için, betonyere çakıl ile birlikte konulmuştur. Karışımlarda Portland Kompoze Çimentosu (PKÇ/B 32.5R) kullanılmıştır. En büyük iri 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, normal beton numunelerinde karakteristik dayanım 30,76 MPa, standart sapma 5,19 MPa, varyasyon katsayısı 0,169; lifli beton numunelerinde karakteristik dayanım 37,6 MPa, standart sapma 3,18 MPa, varyasyon katsayısı 0,085 bulunmuştur. Bütün normal ve lifli beton numuneler, olasılıksal dağılım etkilerini en aza indirmek için, kendi içlerinde, aynı bir karışımdan dökülmüş ve kür havuzunda 28 gün bekletilmişlerdir.



Şekil 1. Numune geometrisi ve deney düzeneğinin bir kısmı

Tablo 1. Numune boyutları.

NUMUNE	H (mm)	L (mm)	d (mm)	a_0 (mm)	c (mm)	t (mm)	$e=c/5$ (mm)	$e=c/10$ (mm)
P1-P3, F1-F3	300	260	120	180	127.5	30	25.5	12.8
P4-P6, F4-F6	150	130	60	90	62.5	30	12.5	6.3
P7-P9, F7-F9	75	65	30	45	30	30	6	3

Deney düzeneğinin bir kısmı Şekil 1b’ de gösterilmiştir. Bütün çift konsollar, 1200 kN kapasiteli, uzama katılığı 560 kN/mm olan yüklem çerçevesinde yüklenmiştir. Yüklemeler 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 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.

Lifli beton çift konsola yük uygulanması, daha önceki çalışmalarda olduğu gibi, çentik altında ilerleyen çatlağın çentik altı bölgeyi boydan boya katletmesine kadar sürdürülmüştür (d mesafesi) (Koç ve Şener, 2003a). Böylece gelişen çatlağın çift konsolları iki ayrı parçaya ayırması sağlanmıştır. Ancak lifli, beton numunelerde bu iki ayrı konsol, daha önce normal, yüksek ve hafif betonlarla yapılan çalışmaların aksine (Koç ve Şener, 2003b, 2004), birbirinden tamamen kopuk olmayıp, hala yük taşır bir durumda, aradaki çelik liflerle bir arada tutulmuşlardır. Çelik liflerin etkisiyle çatlak ilerlemesi, normal ve hafif betonlara göre oldukça sünek bir davranış göstermiştir.

6. Analiz Çalışması

İki ve üç boyutlu geometrik olarak benzer, beton gibi heterojen malzemeden yapılmış yapıların yarı gevrek göçmeleri için Bazant tarafından çıkarılan boyut etkisinin yaklaşık ifadesi şu şekilde verilebilir (Bazant, 1984):

$$\sigma_N = \frac{Bf_t}{\sqrt{1-\beta}} \quad (1)$$

$$\beta = \frac{D}{D_0} \quad (2)$$

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 (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 σ_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. LEKM için, göçme eğrisi tümüyle farklıdır. Bütün LEKM çözümlerinde 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 Denklem (1)' de 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.

Deney elemanlarının ölçülen göçme yükleri Tablo 2' de, yük- yatay açılma eğrileri Şekil 3' de verilmiştir.

Tablo 2. Her numuneye ait göçme yükleri

Eleman	En büyük	Eleman	En büyük	Eleman	En büyük	Eleman	En büyük
--------	----------	--------	----------	--------	----------	--------	----------

adı	yük kN	adı	yük kN	adı	yük kN	adı	yük kN
P1	7,712	P01	8,270	F1	8,628	F01	9,124
P2	7,268	P02	8,660	F2	8,396	F02	11,057
P3	8,428	P03	9,720	F3	7,932	F03	10,747
P4	4,253	P04	4,100	F4	5,103	F04	8,438
P5	4,585	P05	4,800	F5	4,871	F05	6,804
P6	3,611	P06	4,010	F6	4,948	F06	5,722
P7	2,008	P07	2,820	F7	2,156	F07	3,511
P8	2,095	P08	3,510	F8	2,233	F08	3,325
P9	2,265	P09	3,200	F9	2,01	F09	2,288

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_t , Anonim (2000)' in verdiği bağıntı (3) ile bulunmuştur:

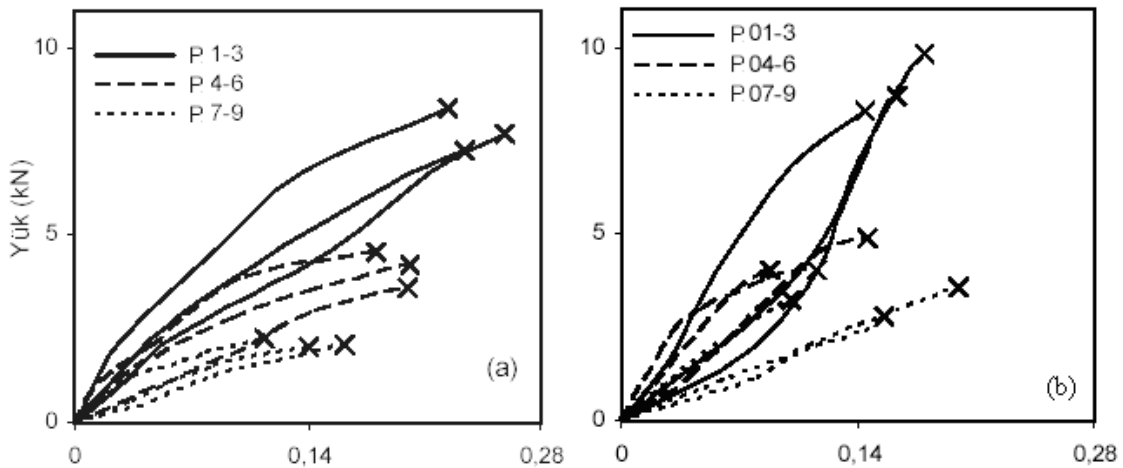
$$f_t = 0.35 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

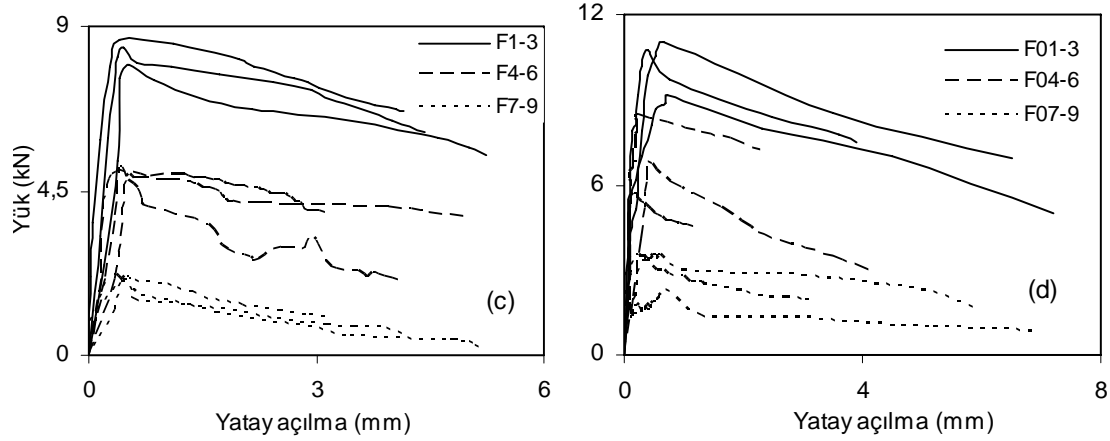
Burada; f_{ck} : Beton karakteristik basınç dayanımı (MPa) olarak verilmiştir. Nominal göçme gerilmesi olarak asal gerilmeler kullanılmıştır:

□

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

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.





Şekil 3. Yük- yatay açılma eğrileri: (a) Normal beton, $e=c/5$ dışmerkezlikli çift konsol (b) Normal beton, $e=c/10$ dışmerkezlikli çift konsol (c) Lifli beton, $e=c/5$ dışmerkezlikli çift konsol (d) Lifli beton, $e=c/10$ dışmerkezlikli çift konsol.

Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi denklemi (1), farklı regresyon analizleriyle düzenlenebilir (Bazant and Planas, 1998). Regresyon analizlerinden, bilinmeyen malzeme sabitleri B ve D_0 elde edilebilir. Bu çalışmada, her seri için Lineer I analizleri yapılmış, ve B ve D_0 değerleri bulunmuştur. Lineer I regresyonunda Denklem (5) kullanılmıştır:

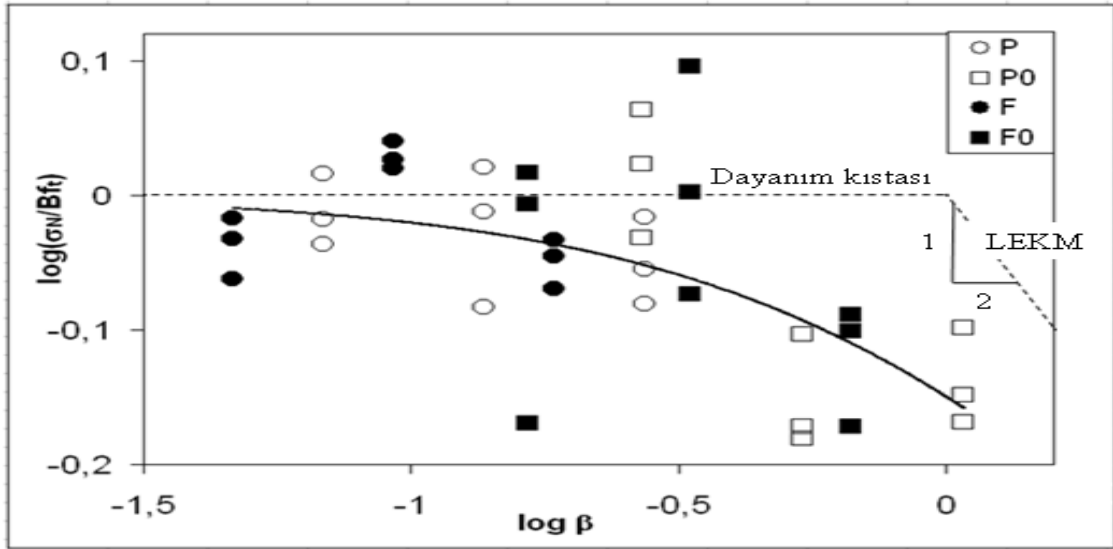
$$Y=AX+C \quad (5)$$

Burada; $X=D$, $Y=(1/\sigma_N)^2$, $C=(1/Bf_t)^2$, $A=C/D_0$ olarak alınır.

Lineer-I regresyon analizlerinden bulunan, A, lineer doğru eğimi, B ve D_0 katsayıları ile, korelasyon katsayıları (r), Tablo 3' 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 logaritmik eksen takımında σ_N/Bf_t ve $\beta=D/D_0$ değerleri gösterilebilir. Şekil 4' de normal ve lifli beton numunelerde, ikişer farklı dışmerkezlik için toplu boyut etkisi eğrileri bir arada gösterilmiştir. Bu eğride 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.

Tablo 3. Korelasyon katsayıları, doğru eğimleri ve malzeme sabitleri.

Deney Serileri	Katsayılar			
	r	$A \times 10^6$	B	D_0
P	0,44	4,53	11	438
P0	0,61	9,52	15	112
F	0,31	2,7	11	649
F0	0,4	4,74	16	182



Şekil 4. Toplu boyut etkisi eğrisi.

Normal betonlarda her numunenin yük- yatay açılma eğrileri altında kalan alanlardan bulunan enerji yutma kapasiteleri (bağlı tokluk) ile bu değerlerin çatlağın geliştiği ara kesit alanına oranlanmasından elde edilen bağlı kırılma enerjileri (Hillerborg, 1985) Tablo 4 'de verilmiştir.

Tablo 4. Normal beton numunelerinde bağlı tokluk ve bağlı kırılma enerjileri

Numune No	Tokluk Nmm	Alan mm ²	G _F N/mm	Numune No	Tokluk Nmm	Alan mm ²	G _F N/mm
P1	1053	3600	0,293	P01	966	3600	0,268
P2	982	3600	0,273	P02	932	3600	0,259
P3	1182	3600	0,328	P03	1097	3600	0,305
P4	530	1800	0,294	P04	417	1800	0,232
P5	554	1800	0,308	P05	566	1800	0,314
P6	389	1800	0,216	P06	272	1800	0,151
P7	163	900	0,181	P07	296	900	0,329
P8	174	900	0,193	P08	530	900	0,589
P9	162	900	0,180	P09	238	900	0,264

Tablo 5. Lifli beton numunelerinde bağıl ilk çatlak tokluğu ve kırılma enerjisi; bağıl son tokluk ve kırılma enerjisi ile bağıl tokluk indeksleri

Numune No	Alan mm ²	İlk Tokluk Nmm	İlk G _F N/mm	Son Tokluk Nmm	Son G _F N/mm	Tokluk İndeksi
F1	3600	2553	0,709	31649	8,791	12,4
F2	3600	2153	0,598	31338	8,705	14,6
F3	3600	2017	0,560	32984	9,162	16,4
F4	1800	881	0,489	12365	6,870	14,0
F5	1800	904	0,502	20020	11,122	22,1
F6	1800	787	0,437	13875	7,709	17,6
F7	900	758	0,843	4739	5,265	6,2
F8	900	427	0,474	4884	5,427	11,4
F9	900	323	0,359	4584	5,093	14,2
F01	3600	5036	1,399	51264	14,240	10,2
F02	3600	4929	1,369	55970	15,547	11,4
F03	3600	2894	0,804	33684	9,357	11,6
F04	1800	991	0,551	17117	9,509	17,3
F05	1800	1247	0,693	18219	10,122	14,6
F06	1800	545	0,303	5439	3,022	10,0
F07	900	1913	2,125	15999	17,777	8,4
F08	900	581	0,645	7405	8,228	12,8
F09	900	1169	1,299	8579	9,532	7,3

3 nokta yüklemesine maruz çentikli kirişler için geliştirilmiş, boyut etkisine ait Lineer- I analizi sonucu bulunan doğru eğiminden (A) yararlanarak malzeme özgül kırılma enerjisini bulmaya yönelik aşağıda verilen (6), (7) ve (8) formülasyonları (RILEM,1990 ve Bazant ve Planas, 1998), gerek geometri ve gerek yükleme benzerliklerine, ayrıca çentik üstü ara kesitte oluşan eğilme ve kesme zorlanmalarının özdeşliğine dayanarak, bu çalışmanın konusu olan çift konsol numunelere uyarlanıp, yukarıda bulunan bağıl eleman kırılma enerjileriyle de karşılaştırarak, yaklaşık bir özgül malzeme kırılma enerjisi elde edilebilir. Boyut etkisi denklemlerinden, kırılma enerjisini elde etmeye yönelik formülasyonların bir kısmı,

$$\frac{l}{d} = 2,5 \quad \text{için} \quad F_{2,5}(\alpha) = \frac{1 - 2,5\alpha + 4,49\alpha^2 - 3,98\alpha^3 + 1,33\alpha^4}{(1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad \text{ve} \quad \alpha = \frac{a}{d} \quad (6)$$

$$g(\alpha) = \left(\frac{l}{d}\right)^2 \pi \alpha [1,5F(\alpha)]^2 \quad (7)$$

$$G_f = \frac{g(\alpha_0)}{E_c A} \quad (8)$$

olarak verilmektedir. Bu ifadelerde, l: mesnetler arası numune açıklığı, d: Numune kesit yüksekliği, a: çatlak (ya da ilk çentik) boyu, α : relatif çatlak (ya da ilk çentik) boyu, $F_{2,5}(\alpha)$: l/d oranı 2,5 ve daha küçük olan numuneler için boyut etkisi- kırılma enerjisi dönüştürüm yardımcı fonksiyonu, $g(\alpha)$: boyutsuz enerji salınım oranı, G_f : malzeme özgül kırılma enerjisi, $g(\alpha_0)$: Daha çatlamaş numunede, sadece çentik varken ki boyutsuz enerji salınım oranı, E_c : Beton numune malzemesinin elastisite modülü, A: Boyut etkisi lineer-I analizinden bulunan doğrunun eğimi olarak tanımlanmaktadır.

Bu formülasyonların uyarlanmasıyla, yaklaşık özgül malzeme kırılma enerjileri, P serisinde 0,591 N/mm, P0 serisinde 0,281 N/mm olmak üzere normal betonda ortalama 0,436 N/mm; F serisinde 0,902 N/mm, F0 serisinde 0,514 N/mm olmak üzere lifli betonda ortalama 0,708 N/mm olarak bulunmuştur. Lifli betonda bulunan bu değer, nihai kırılma enerjisi değil, ilk çatlak kırılma enerjisidir.

7. Sonuçlar ve Tartışmalar

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. Ancak yukarıda da belirtildiği gibi, lifli beton numunelerde bu iki ayrı konsol, birbirinden tamamen kopuk olmayıp, hala yük taşıyor bir durumda, aradaki çelik liflerle bir arada tutulmuşlardır. Şekil 3c ve d' den deney sonunda lifli beton elemanların hala yük taşıyor durumda oldukları görülmektedir. Şekil 3a ve b' den ise, normal beton numunelerin, en büyük yük sonrasında gevrek ve lifli beton numunelere göre çok daha ani ve çabuk bir şekilde göçmeye gittikleri görülmektedir.

2- Yukarıda bahsedildiği gibi, çelik lif içermeyen beton numuneler gevrek bir şekilde kırılırken, lifli numuneler, yüksek miktarda enerji yutarak, kontrollü bir şekilde ve uzun sürede kırılmıştır. Betonda önemli bir sorun olan gevrek davranış ortadan kalkmış, malzeme sünek bir davranış sergiler olmuştur. Pik yüke ait deformasyonlar da lifli betonda artmıştır. Çelik lif katkısı, yük- deformasyon eğrisinin artan kısmını, biraz daha eğik-lineer hale getirirse de, önemli oranda etkilememiş, fakat eğrilerin azalan kısımları, önemli şekilde değişmiştir.

3- Deney sonuçlarından elde edilen değerler Bazant'ın yaklaşık boyut etkisi yasası ile uyumludur. Çift Konsolun basınç yüklemesinde göçmesi için, boyut etkisi içeren yaklaşık (1) ve (2) bağıntıları, Tablo 3'de verildiği gibi, normal beton numunelerde, $e=c/5$ dışmerkezlikli elemanlarda $B=11$, $D_0=438$ mm ve $e=c/10$ dışmerkezlikli elemanlarda $B=15$, $D_0=112$ mm; lifli beton numunelerde, $e=c/5$ dışmerkezlikli elemanlarda $B=11$, $D_0=649$ mm ve $e=c/10$ dışmerkezlikli elemanlarda $B=16$, $D_0=182$ mm olmak üzere önerilebilir. D_0 , yani karakteristik boy küçüldükçe eleman göçmesi gevrekleşip LEKM' ne yaklaşıyor demektir. Bu durumda hem lifli beton numunelerde hem de normal beton numunelerde, dış merkezlik büyüdükçe davranışın LEKM' ne yaklaştığı, bir bütün olarak normal beton numunelerin lifli beton numunelere göre ilk göçmelerinin LEKM' ne daha yakın olduğu söylenebilir. Söz konusu bu açıklamalar, Şekil 5' de verilen toplu boyut etkisi eğrisinden de anlaşılabilir. Ayrıca bahsedilen bu olgular, Şekil 3' de verilen yatay açılma eğrileri incelendiğinde de görülebilmektedir.

4- Şekil 3' de verilen yatay açılma eğrileri incelendiğinde, hem normal hem de lifli beton numunelerde, eleman boyutlarının azalmasının elemanı sünek davranışa götürdüğü görülür. Bu durum, deneyler yapılırken büyük boyutlu elemanların nispeten daha ani ve gürültülü göçmeleriyle de gözlenmiş olup, boyut etkisinin sadece eleman boyutlarının artmasıyla yalnız göçme yüklerinde gözlenen bir azalma olmayıp, eleman davranışını da önemli ölçüde etkileyen bir öğe olduğunun göstergesidir.

5- Tablo 2 ve Şekil 3'den görüleceği üzere, hem normal hem de lifli betonlarda, yüklemenin dış merkezliği arttıkça, doğal olarak yükün momenti ve oluşan mod I etkisi de büyüyeceğinden, ulaşılan en büyük yüklerde azalma olmuştur. Aynı yük dış merkezliğine

sahip numunelerden ise, lifli beton numunelerin, normal beton numunelere göre, yukarıda madde 2’de de belirtildiği üzere, ilk göçme yükünün de genelde yüksek olduğu görülür.

6- Tablo 4 ve 5 incelendiğinde, lifli beton numunelerin ilk tokluk ve G_f lerinin de normal beton numunelerden yüksek olduğu (ortalama değerlere göre, küçük dış merkezlikli elemanlarda 3,4; büyük dış merkezlikli elemanlarda 2,2 kat) görülür. Benzer olarak, standart silindir basınç göçmeleri üzerine yapılan deneylerden toklukların, değişik oranlarda çelik lif katkısıyla 2 ile 2,5 kat arttığı görülmektedir (Altun ve diğerleri, 2005). Farklı tip ve oranlarda çelik lif katkılı betonların basınç altındaki tokluk yeteneklerinin de 1,5 ila 5,5 kat arttığı gözlenmiştir (Ünal ve diğerleri, 2007). Lifli ve liffsiz yüksek dayanımlı standart silindir beton numunelere uygulanan basınç yüklemeleri sonucunda da lif katkısının tokluğu, 7 günlük beton numunelerde 2,7; 28 günlüklerde 2,5 oranında artırdığı gözlenmiştir (Yiğiter ve Türkel, 2004). Yine çelik lif katkısının, standart silindir basınç göçmelerinde, havada kür edilmiş numunelerde 1,76; suda kür edilmiş numunelerde 1,62 oranında basınç tokluğunu artırdığı görülmüştür (Ünal ve Uygunoğlu, 2005). Ayrıca beton kiriş 3 nokta yüklemesi deneylerinden elde edilen değerlere dayanılarak çelik lif katkısının tokluğu 1,35 ile 1,5 kat artırdığı belirtilmektedir (Altun ve diğerleri, 2006).

7- Tablo 4 ve 5 incelendiğinde görüldüğü üzere, lifli beton numunelerin son tokluk ve son G_f değerleri ise normal beton numunelerin yaklaşık 33 katı değere sahiptir (ortalama değerlere göre, küçük dış merkezlikli elemanlarda 36; büyük dış merkezlikli elemanlarda 30 kat). Benzer olarak, farklı uçucu kül oranlarına sahip, %1,5 çelik lif oranlı beton kirişlerde 3 nokta yüklemesiyle bulunan tokluk değerlerinin çelik liffsiz, uçucu küllü beton numunelere ait değerlerin 20 ila 30 katı arasında olduğu tespit edilmiştir (Karahana, 2006). Çelik ve naylon karma lif karışımı numunelerde kırılma enerjisinin ise yalın betonlara göre 45 ile 70 kat arasında artış gösterdiği belirtilmiştir (Yaşar ve diğerleri, 2011). Lifli ve liffsiz yüksek dayanımlı beton kirişlere yapılan eğilme deneyleriyle eğilme tokluğunun, lif katkısıyla 7 günlük numunelerde 27,8 kat arttığı görülmüştür (Yiğiter ve Türkel, 2004).

8- Tablo 5’den Tokluk indeksleri ortalama olarak, büyük dış merkezlikli elemanlarda 14,3; küçük dış merkezlikli elemanlarda 11,5 bulunmuştur. Bu da lifli beton elemanın maruz kaldığı moment arttıkça, sünek davranışını büyütebildiği anlamına gelir. Çelik lifli beton tokluk indeksleri, farklı oranlardaki lifli betonlarda 13,61 ile 18,53 (Çivici, 2006); farklı oranlardaki uçucu küllü ve çelik lifli betonlarda ise, 16,4 ile 17,6 (Karahana, 2006) arasında değişim göstermiştir.

9- Ortalama numune bağıl kırılma enerjisi, normal beton numunelerde 0,277 N/mm; lifli beton numunelerde 0,787 N/mm’dir. Boyut etkisinden bulunan ortalama özgül malzeme kırılma enerjileri ise, özellikle lifli beton için, bu değerlerle kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla sahip olmak üzere, normal betonda 0,436 N/mm, lifli betonda 0,708 N/mm olarak bulunmuştur. Bu mevcut yaklaşıklıklar, 3 nokta yüklemesine maruz çentikli beton kirişler için çıkarılmış olan boyut etkisi- kırılma enerjisi dönüşüm fonksiyonlarının (RILEM,1990 ve Bazant ve Planas, 1998), 3 noktalı basınç yüklemesindeki çift konsol numunelere de kabul edilebilir bir yaklaşıklıkla uygulanabileceğinin göstergesi olarak yorumlanabilir. Daha önceki çalışmalar, lifli betonlarda kırılma enerjisinin lif narinliği ve karışımdaki lif oranına göre 0,9 ile 4,2 N/mm arasında değiştiğini ortaya koyulmuştur (Bayramov ve diğerleri, 2002). $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^3$ agrega konsantrasyonuna sahip normal beton numunelerin kırılma enerjisinin ise 0,13 N/mm civarında olduğu ve agrağa konsantrasyonu arttıkça betonun kırılma enerjisinin arttığı belirtilmiştir (Taşdemir ve Karihaloo, 2001). Üç nokta eğilme yüklemesine maruz, iri agrağa ile ince agrağa oranının 1 olduğu karma lifli kendiliğinden yerleşen beton kirişlerde, yük-

deplasman eğrilerinin altında kalan alanlardan hesaplanmış olunan kırılma enerjisi (bağlı) ise 5,47 N/mm olarak bulunmuştur (Şengül ve diğerleri, 2007).

Teşekkür: Bu çalışmanın yapılması için Beksa şirketinden Dramiks çelik lif sağlanmıştır. Kendilerine teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynaklar

- ACI Commitee 544 (1984) Guide for specifying, mixing, placing and finishing steel- fibre reinforced concrete, American Cpncrete Ins. Proc., March-April, pp 140-146.
- Altun F, Özcan D.M, Vekli M, Karahan O (2005) Çelik lif katkılı C20 betonun mekanik özelliklerinin deneysel araştırılması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4 (1-2), 31-40.
- Altun F., Yılmaz C., Durmuş A., Arı K., (2006) Çelik lif katkılı ve katkısız betonarme kirişlerin basit eğilme ve patlama yüklemesiyle davranışlarının incelenmesi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22 (1-2), 112- 120.
- Arslan, A., (1995) Mixed mode fracture performance of fiber reinforced concrete under impact loading, Materials and Structures, Vol. 28, pp. 473- 478.
- Arslan A ve Aydın, A.C., (1999) Lifli betonların genel özellikleri. Hazır beton dergisi, kasım-aralık, 67- 75.
- Arslan, A., Hughes, T.G. and Barr, B.I.G., (1991) Mixed-mode fracture including torsion in a new compact test specimen geometry, Proc. Int. Conf. On Fracture Processes in Concrete, Rock and Seramics, June 19-21, London, pp737-746.
- Arslan, A., Ulucan, Z.C. (1997) Çelik liflerin erken yaştaki betonarme kirişlerin göçmesine etkisi, İMO Teknik Dergisi, 1507-1515
- Anonim, (1992) TS 10515, Beton-çelik tel takviyeli- eğilme mukavemeti deney metodu, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Anonim, (2000) TS500, Betonarme yapıların tasarım ve yapım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Anonymous, (1997) ASTM C1018, Standart test method fot flexural toughness and first- crack strength of fiber- reinforced concrete (Using beam with third- point loading).
- Anonymous, (1984) JSCE SF-4, Standarts for tests methods of fiber reinforced concrete, Japan Concrete Institute, pp. 45-51.
- Barr, B.I.G., Liu, K. and Dowers, R.C.A., (1982) Toughness Index measure the linergy absorption of fibre reinforced concrete, Int. J. Cement Composities and Lightweight Concrete, Vol. 4, No. 4, pp. 221- 227.
- Bartos, P., (1981) Rewiwv paper: Bond in reinforced cements and concretes, International Journal of Cement Composites, Vol. 3, No. 3, August, pp. 159-177.
- Bayramov, F., Taşdemir, C., and Taşdemir, M.A.,(2002) Optimum Design of Cement-Based Composite Materials using Statistical Response Surface Method, Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey, pp. 725-734.
- Bazant, Z. P. (1984) Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, Jour. Engng. Mech. ASCE, 110, s. 518-535.
- Bazant, Z.P., Kim, J.K. and Şener, S. (1984) Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams. ACI Jour., Vol. 81, pp. 456 - 468. (Discussion and Closure 82, 579-583).
- Bazant, Z. P. and Pfeiffer, P.A. (1986) Shear Fracture Tests of Concrete. Mater. Struct., Vol. 19, pp.111-121.
- Bazant, Z.P. and Cao, Z. (1987) Size Effect in Punching Shear Failure of Slabs., ACI Struct. Jour., Vol. 84, pp. 44-53.
- Bazant, Z.P. and Pfeiffer, P.A. (1987) Determination of Fracture Energy From Size Effect and Brittleness Number. ACI Mater. Jour., Vol. 84, No. 6, pp. 463-480.
- Bazant, Z.P. and Sun, H.H. (1987) Size Effect in Diagonal Shear Failure: Influence of Aggregate Size and Stirrups. ACI Mater. Jour., Vol. 84, pp. 259-272.
- Bazant, Z.P. and Kazemi, M.T. (1991) Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups. ACI Struct. Jour., Vol. 88, No. 3, pp. 268-276.

- Bazant, Z.P., and Planas, J. (1998). Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials, CRC Press, Boca Raton, Fla., Boston, ABD.
- Belgin, Ç., Şener, S. (2008). Size effect on failure of overreinforced concrete beams. Engineering Fracture Mechanics, 75, 2308-2319.
- Chen, L., Mindess, S., Morgan, D.R., Shah, S.P., Johnston, C.D. and Pigeon, M. (1995) Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete, Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP- 155, pp. 41-70.
- Çivici F., (2006) Çelik lif donatılı betonun eğilme tokluğu, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 12(2), 183- 188.
- Gettu, R., Bazant, Z.P. and Karr, M.E. (1990) Fracture Properties and Brittleness of High Strength Concrete. ACI Mater. Jour., Vol. 87, pp. 608-618.
- Hillerborg, K., (1985). "The theoretical basis of a method to determine the fracture energy G_F of concrete." *RILEM, Mat. and Struct.*, 18, 291-296.
- Karahan O., (2006) Liflerle güçlendirilmiş uçucu küllü betonların özellikleri, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. A.B.D., Doktora Tezi, Adana, 256 syf.
- Koç, V. (2005). Size effect on normal and high strength concrete element in compression failure, Ph.D. thesis, Gazi univ., Ankara (in Turkish).
- Koç, V. ve Şener, S. (2003a) Lifli beton çift konsolun basınç göçmesinde boyut etkisi. Yapı Mekaniği Laboratuvarları Toplantısı II, TÜBİTAK, Konya, s. 169-172.
- Koç, V. ve Şener, S. (2003b) Hafif ve normal betondan yapılmış çift konsol numunelerin basınç göçmesinde boyut etkisi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre ve Sergisi, İstanbul, s. 137-141.
- Koç V. ve Şener S. (2004a) Eksenel doğrultuda basınç yüklü çift konsollarda boyut etkisi. Advances in Civil Engineering, 6th International Conference, Boğaziçi Üniv., İstanbul, s. 531-540.
- Koç V., Şener S. (2004b). "Size effect tests of axially loaded double cantilever specimens." 6th International Conference on Advances in Civil Engineering, İstanbul, 531-540 (in Turkish).
- Koç V., Şener S. (2009). "Size effect in normal- and high-strength concrete with different notches under the axial load." ASCE, J.of Materials in Civil Engineering, 21, 9, 433-445.
- Nataraja, M.C., Dhang, N. And Gupta, A.P. (1999) Stres-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression, Cement and Concrete Composites 21, 383-390.
- RILEM (1990). Size effect method for determining fracture energy and process zone of concrete. RILEM & Mat. and Struct., 23, 461-465.
- Shah, S.P and Rangan, B.V., Fiber reinforced concrete properties, ACI Journal, Title No: 68- 14, pp. 126-136.
- Şener, S., Barr, B. I. G. and Abusiaf, H. F. (1999b). "Size effect tests in unreinforced concrete columns," Magazine of Concrete Research, 51(1), 3-11.
- Şener, S., Barr, B. I. G., Abusiaf, H. F. (2004). "Size effect tests of reinforced concrete columns.", J. Struct. Eng. ASCE, 130(4), 662- 670.
- Şengül, C. (2005) Kendiliğinden yerleşen çelik lif donatılı betonların mekanik davranışına su/ince malzeme oranının ve lif dayanımının etkisi. İTÜ Fen Bil. Enst., Yüksek lisans tezi, İstanbul.
- Şengül C., Taşdemir M.A., Yılmaz N., Arslan G. (2007) "Karma Lifli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Davranışına Agrega Oranlarının Etkisi", TMMOB, İnşaat Müh. Odası, 7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul 373- 382.
- Ünal O, Uygunoğlu T, (2005) Farklı ortamlarda kür edilmiş lif katkılı betonların deprem yükü etkisi altındaki davranışlarının araştırılması, Deprem Sempozyumu, 23-25 Mart, Kocaeli, 629- 636.
- Ünal O, Uyan M, Uygunoğlu T, (2005) Isıl işlem görmüş lifli betonlarda gerilme şekil değiştirme ilişkileri, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4 (1-2), 31-40.
- Ünal, O., Uygunoğlu, T. ve Gençel, O., (2007) Çelik liflerin beton basınç ve eğilme özelliklerine etkisi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 13(1), 23- 30.
- Taşdemir, M.A., Karihaloo, B.L., (2001) Effect of Aggregate Volume Fraction on the Fracture Parameters of Concrete: A Meso- Mechanical Approach, Magazine of Concrete Research, 53(6), 405-415.
- Yaşar, D., Taşsemir M.A., Kop E., Yalçın M., (2011) Naylon Lif Donatılı Betonların Mekanik Davranışı, Hazır Beton Kongresi- Beton 2011, pp. 120-129.

Yılmaz, B., Dinç, A., Şengül, C., Akaya, Y. ve Taşdemir, M.A., (2007) Effects of cement/powder ratio on workability and mechanical behaviour of SCFRCs. International conference on ACBM- ACI, 11pp, Lahore.

Yiğiter, H. ve Türkel, S. (2004) Çelik lif kullanımının yüksek performanslı betonların süneklik özelliğine etkisi, Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII. Teknik Kongre Ve Sergisi, İstanbul, syf. 469 – 477.