

ÇELİK LİF DONATILI BETONUN EĞİLME TOKLUĞU

Fehmi ÇİVİCİ

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampusu/Balıkesir

Geliş Tarihi : 10.11.2004

ÖZET

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 bu özellik, yük-sehim eğrisinin altında kalan alan ile ifade edilir. Çatlak direnci, duktilite, darbe direnci gibi birçok malzeme özelliği enerji yutabilme kapasitesi ile ilişkilidir. ASTM C 1018 ve JSCE SF-4'e göre yapılan tokluk hesaplamaları bir eksenli eğilme deneylerine göredir. Oysa; köprü tabliyeleri, park sahaları, havaalanı kaplamaları vb. yapılarda sıkça uygulanan lifli beton, bu elemanlarda plak davranışına sahiptir. Bu çalışmada, tokluk ASTM C 1018 ve JSCE-SF4 'e göre kiriş testlerinden hesaplanarak, donatısız ve çelik lifli betonun enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Tokluk hesabında kullanılan iki metodun birbirine göre değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca, iki eksenli eğilme altında, donatısız ve çelik lifli beton plak numunelerin davranışları her bir numunenin deneylerinden elde edilen yük-sehim diyagramları aracılığıyla karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler : Lif, Tokluk, Çelik lif, Kiriş, Eğilme tokluğu

FLEXURAL TOUGHNESS OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE

ABSTRACT

Fiber concrete is a composite material which has mechanical and physical characteristics unlike plain concrete. One of the important mechanical characteristics of fiber concrete is its energy absorbing capability. This characteristics which is also called toughness, is defined as the total area under the load-deflection curve. A number of composite characteristics such as crack resistance, ductility and impact resistance are related to the energy absorption capacity. According to ASTM C 1018 and JSCE SF-4 the calculation of toughness is determined by uniaxial flexural testing. Fiber concrete is often used in plates such as bridge decks, airport pavements, parking areas, subjected to cavitation and erosion. In this paper, toughness has been determined according to ASTM C 1018 and JSCE SF-4 methods by testing beam specimens. Energy absorbing capacities of plain and steel fiber reinforced concrete has been compared by evaluating the results of two methods. Also plain and steel fiber reinforced plate specimens behaviors subjected to biaxial flexure are compared by the load-deflection curves of each specimen.

Key Words : Fiber, Toughness, Steel fiber, Beam, Flexural toughness

1. GİRİŞ

Günümüzün popüler yapı malzemelerinden biri olan beton büyük basınç kuvvetlerini taşıyabilmesi özelliği ile bilinir. Buna karşın, çekme etkisi altındaki davranışı iyi değildir. Bu nedenle, yalnız

betonun çekme dayanımı, çatlak direnci, aşınma ve darbe dayanımı, tokluk gibi mekanik özelliklerini geliştirmek için içerisine lif malzemeleri katılmaktadır.

Lifli beton, donatısız betondan farklı olarak mekanik ve fiziksel özelliklere sahip bir kompozit

malzemedir. Lifli betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi, tokluk olarak da adlandırılan enerji yutabilme kapasitesidir. Artan kullanımı ile yapı dünyasında yerini alan lifli betonlar üzerine çalışmalar yoğunluk kazanmıştır.

Yük-sehim eğrisinin altında kalan alan olan tokluk ölçüm metotları tanımlanarak, değişik lif hacimlerinde çentikli ve çentiksiz numuneler ile yapılan deneylere göre; numune boyutu, yükleme hızı ve deney düzeneğinin tokluğu etkilediğini belirtmişlerdir (Gopalratnam et al., 1991).

Farklı enkesitli beş tip çelik lif kullanarak oluşturulan beton panellerden, silindirik ve kiriş numuneler keserek deneyler yapmışlardır. Deneylerin sonucunda liflerin betonun hem basınç hemde çekme dayanımını artırdığını göstermişlerdir (Banthia et al., 1992).

Yedi farklı lifin performansını EFNARC (Anon., 1999)'a bağlı olarak yapılan plak eğilme testleri ile ölçmüşlerdir. Uçlarından kancalı liflerin en iyi davranışı gösterdiğini tespit etmişlerdir (Clements et al., 1996).

Çelik lif donatılı betonun kırılma enerjisini ölçmek için üç noktalı eğilme deneyleri yapmışlardır. Deney numunesi olarak kullanılan çentikli kirişlerde 30, 60 ve 90 kg/m³ olarak lifler yer almıştır. Deneylerin sonucunda beton içerisine yüksek oranda liflerin katılması ile büyük deplasmanlar yapabilen sünek malzemelerin elde edilebileceğini ifade etmişlerdir (Barros et al., 2001).

Çelik lifli betonun tokluğunu Japonya İnşaat Mühendisleri Birliği'nin yöntemine göre incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, hesaplanan tokluk faktörü ve lif-donatılma indeksi arasında iyi bir ilişki olduğunu göstermişlerdir (Nataraja et al., 2000).

2. ARAŞTIRMANIN AMAÇ VE KAPSAMI

Günümüzün popüler kompozit yapı malzemelerinden biri olan lifli beton, donatısız betona göre farklı mekanik özelliklere sahiptir. Bunlardan bir tanesi de lifli betonun yüksek enerji yutabilme kapasitesidir.

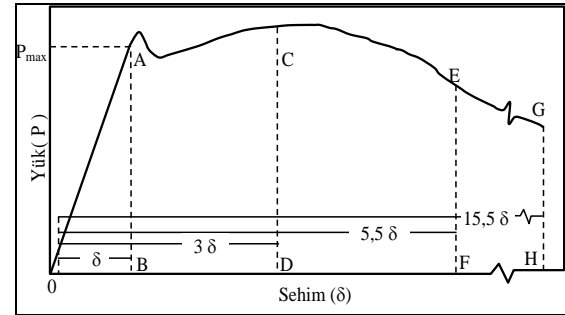
Havaalanı kaplamaları, köprü tabliyeleri, ağır yük taşıyan endüstriyel zeminler gibi plak davranışı gösteren taşıyıcı elemanlarda enerji yutabilme kapasitesinin yüksek olması istenir. Enerji yutabilme kapasitesinin belirlendiği deneyler

genellikle kiriş numunelerin kullanıldığı eğilme tokluğu deneyleridir. Oysa, plak davranışına sahip elemanlardan elde edilecek eğilme tokluğu indeksleri gerçeği daha iyi yansıtabilir. Çalışmada hazırlanan kiriş numunelerin her birinin yük-sehim eğrisinden yararlanarak, hem ASTM C1018 (Anon., 1997) hem de JSCE-SF-4 (Anon., 1984) metoduna göre tokluk hesaplamaları yapılmıştır. Tokluk hesaplamalarında kullanılan bu iki yöntemin irdelenmesi ile incelenen metotların kullanılışığı belirlenecektir. Ayrıca, yapılan plak deneyleri ile iki eksenli eğilme altında yalın ve lifli betonun enerji yutma kapasitelerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

3. ASTM C 1018 VE JSCE SF-4'E GÖRE TOKLUK DEĞERLENDİRMESİ

ASTM C 1018 (Anon., 1997)'de standart haline getirilmiş olan tokluk değerlendirme betonun yük-sehim eğrisi altında kalan alan cinsinden ifade edilir. İçine lif katılan betonun taşıma gücünü yitirmesi için gereken enerji, yük-sehim eğrisinin altında kalan alanın büyümesi ile artacaktır.

ASTM C 1018 (Anon., 1997)'e göre tokluk indeksleri seçilen deplasman değerine kadar malzeme davranışını tanımlamak için kullanılır ve Şekil 1'e bağlı olarak yazılabilecek denklem (1), (2) ve (3)'e göre hesaplanır.



Şekil 1. Tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-sehim eğrisi.

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB} \quad (1)$$

$$I_{10} = \frac{OAEF}{OAB} \quad (2)$$

$$I_{20} = \frac{OAGH}{OAB} \quad (3)$$

Tokluk indeksleri numune özelliklerinden bağımsızdır. Çelik lifli betonların elastik-plastik davranışını açıklayabilmek için geliştirilmiştir. Tokluk indekslerinin hesaplanmasında özellikle ilk çatlak noktasının yerinin belirlenmesi zordur. Bu çalışmada, ilk çatlak noktası yük-sehim eğrisinde yükün maksimum değere ilk kez ulaştığı ve eğrinin lineerlikten ayrıldığı ilk nokta olarak alınabilir (Chen et al., 1995) tanımından yararlanarak belirlenmiştir. Tokluk indekslerinin yanı sıra çelik lifli betonun tokluğunu değerlendirebilmek için, R dayanım faktörü kullanılır. Bir başka deyişle, mukavemet farkı faktörü R, Şekil 1’de CE ve EG deplasman aralıkları için ilk çatlak dayanımının bir yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra malzemede mevcut olan ortalama dayanım seviyesini gösterir. Bu değer 100 olması mükemmel bir plastik davranışı, daha düşük değerler plastik davranışa göre ikinci derecede önemli olan davranışları ifade eder. Yalın betonun dayanım faktörü değeri sıfırdır.

JSCE SF-4’e göre tokluk değerlendirmesi üçte bir noktalarından yüklenmiş kiriş eğilme deneyleri ile yapılır. Bu yöntemle göre; kiriş yüklenme açıklığının 1/150 değerindeki yerdeğiştirme değerine kadar yük-yerdeğiştirme diyagramı çizilir. Daha sonra denklem (4) ile eğilme tokluk faktörü hesaplanır.

$$FT = \frac{A.L}{(L/150)b.h^2} \quad (4)$$

Burada; A yük-yer değıştirme eğrisinin altında kalan alan, L kiriş yüklenme açıklığı, b ve h kiriş enkesit boyutlarıdır.

Ülkemizde kullanılan TS 10515 (Anon.,1992) standardı ise, ASTM C 1018 (Anon., 1997)’e benzerdir.

4. DENEYSEL PROGRAM

4.1. Malzemeler ve Karışım Oranları

Deney numunelerinin üretiminde Balıkesir’deki bir hazır beton tesisinden alınan agregalar kullanılmıştır. Bu agregalar I’nolu mıcır, II nolu mıcır ve kum olarak adlandırılmaktadır. Agregaların fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Çalışmada kullanılan beton numunelerin hazırlanmasında beton karma suyu içilebilir nitelikte olup, kampus su şebekesinden sağlanmıştır. Çimento olarak ise, Balıkesir Set Çimento San. ve Tic. A.Ş. tarafından üretilen özgül ağırlığı 3.10 olan katkı portland çimentosu PKÇ/A 42.5

kullanılmıştır. Kullanılan çelik lifler Dramix RC 80/60 BN türü olup, lif boyu 60 mm, lif çapı 0.75 mm dir. Böylece lifin narınlığı (tel boyu/tel çapı) 80 bulunur. Çelik lifin standart çekme dayanımının en az 1100 N/mm² olduğu firma tarafından belirtilmiştir. Çelik liflerin uçları kancalı olup birbirlerine özel tutkalla yapıştırılmış ve demetler halindedir.

Tablo1. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Agrega İsmi	En Büyük Dane Büyüklüğü(mm)	Sıkışık Birim Ağırlık (g/dm ³)	Gevşek Birim Ağırlık (g/dm ³)	Su Emme Oranı(%)
I no’lu mıcır	16	1509.4	1415	1.09
II no’lu mıcır	31.5	1537.5	1433.9	0.78
kum	4	1551.8	1273.5	5.00

Agregaların granülometrik dağılımı TS 802 (Anon., 1985)’de yeralan uygun bölgeye düşmektedir. Agregaların karışım oranları, 0-4 mm kum 0.40, I no’lu mıcır 0.30, II no’lu mıcır 0.30 olarak seçilmiştir. C20 betonu için yapılan hesaba göre; 1 m³ betonun teorik karışım oranları Tablo 2’de verilmektedir.

Tablo 2. 1 m³ Betonun Teorik Karışım Oranları.

Agrega İsmi	Hacmi, dm ³	Ağırlığı, kg/m ³
Kum	286.2	758.43
I no’lu mıcır	214.65	568.82
II no’lu mıcır	214.65	568.82
Çimento	114.5	355.00
Su	160.0	160.0

4. 2. Beton Üretimi ve Bakımı

Deney numunelerinin üretiminde kullanılan beton, dış ortam şartlarında ve 0.25 m³ kapasiteli eğik eksenli betoniyerde karıştırılarak üretilmiştir. Öncelikle betoniyere agregası ve çimento konularak 60 sn kuru karıştırma işlemi yapıldıktan sonra çelik lifler atılmış, daha sonrada su ilave edilerek homojen bir karışım elde edilmesi için 3 dakika daha karıştırmaya devam edilmiştir. Taze beton kalıplara üç tabaka halinde ve her defasında 25 kez şişlenerek yerleştirilmiştir. 600 x 600 x 100 mm boyutunda 23 adet plak ve 150 x 150 x 500 mm’lik 10 adet kiriş numune lifsiz ve lifli olarak üretilmiştir. Kiriş numunelerdeki lif içeriği % 1.5 olarak sabit alınmıştır. Ayrıca, betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü tayininde kullanılmak üzere 150 x 300 mm’lik 33 adet silindir numune üretilmiştir. Bu numunelerin üretiminde kullanılan harman miktarı yaklaşık 3 m³’dür.

4. 3. Beton Numuneleri Üzerinde Yapılan Deneyler

Taze beton için TS EN 12350-2 (Anon., 2002)'e göre çökme hunisi metodu ile kıvam deneyi yapılmıştır. Sertleşmiş beton için TS EN 12390-3 (Anon., 2003)'e göre basınç dayanımı tayini ve TS 3502 (Anon., 1981)'e göre statik elastisite modülü tayini deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3 ve 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Silindirik Basınç Dayanımı ve Elastisite Modülleri

Numune No	Lif Miktarı (%)	28 Günlük Ortalama Basınç Dayanımı, $f_{ck,28}$ (MPa)	28 Günlük Ortalama Elastisite Modülü, E_{28} (MPa)
1, 2, 7	0.00	22.7	21490
3, 4, 9	0.00	24.1	
5, 6, 8	0.00	23.9	
10, 11	1.50	33.1	22769
12, 13	1.50	25.1	24235
14, 15	1.50	31.9	27848
16, 17, 18	0.00	22.8	20304
19, 20, 21	0.00	24.3	
22, 23, 24	0.00	24.6	
25	0.00	20.7	
26, 27	0.00	23.3	25019
28, 29	1.50	22.5	
30, 31	1.50	27.6	
32, 33	1.50	27.6	

Tablo 4. Taze Betonun Çökme Değerleri

Karışım No	Lif Miktarı (%)	Çökme Değeri (mm)
1	0.0	71
2	0.0	69
3	1.5	45
4	1.5	43
5	1.5	40
6	1.5	40
7	1.5	39
8	0.0	75
9	0.0	80
10	0.0	79
11	1.5	35
12	0.0	73

4. 4. Deney Düzenegi

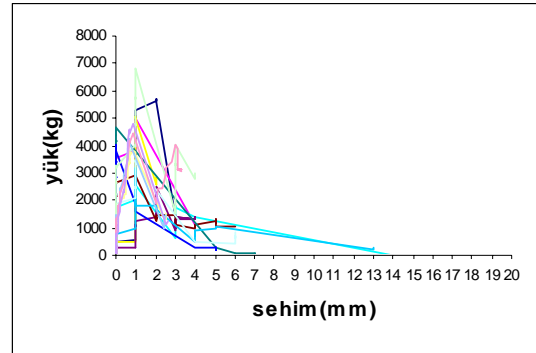
Hazırlanan 600 x 600 x 100 mm'lik plak ve 150 x 150 x 500 mm'lik kiriş numunelerin, Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında kurulan yükleme çerçevesinde eğilme etkisi altındaki davranışları incelenmiştir. Plak numunelere yük, plak üst yüzünün ortasına, plak kenarlarına paralel 100 x 100 mm enkesitli başlıkla hidrolik kriko aracılığıyla uygulanmıştır. Plak deneyleri EFNARC (Anon., 1999) olarak bilinen Fransız deney yöntemine benzer biçimde yapılmıştır. Ancak bu deney yönteminde belirtilen, plak merkezinde deformasyon dakikada 1.5 mm olmalıdır şartına,

kullanılan deney cihazı deformasyon kontrollü olmadığından uyulamamıştır.

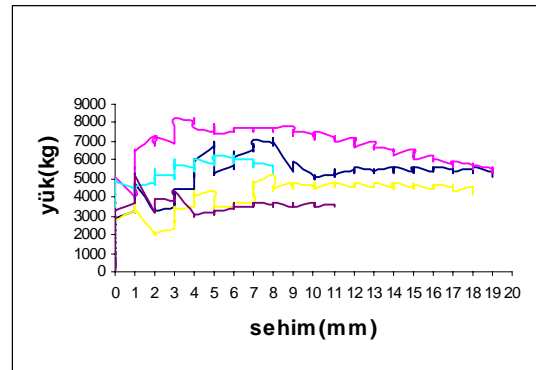
Deneylerde, sehim ve onunla eş zamanlı olan yük değerlerinin ölçülmesi için, yük hücresi (loadcell) ve sehim ölçer (LVDT)den gelen verileri toplayan iki kartlı, tek kanallı bir ölçüm cihazı kullanılmıştır. Yapılan ölçümler her 0.25 sn'lik zaman diliminde numunenin merkezinde alttan sehim ve onunla aynı zamanda ölçülen yük değeridir. Bu zaman diliminde ölçülen yük-sehim değerlerine ait ölçüm cihazından bilgisayara gelen verilerin düzenlenmesi ile yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Deney sırasında numunenin kırılma davranışını gözlemek için numune altından bir adet webcam kamera ile kayıt edilmiştir. Kiriş deneyleri ise TS 10515 (Anon., 1992)'de yer aldığı gibi üçte bir noktalarından yüklenmiş deney metoduna bağlı kalınarak yapılmıştır.

4. 5. Deney Sonuçları

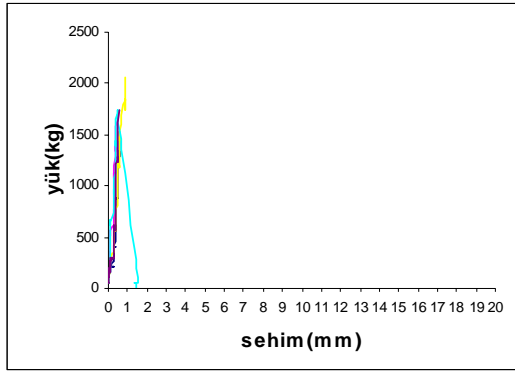
Plak ve kiriş numunelerin deneylerinden elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 2, 3, 4 ve 5'de verilmiştir.



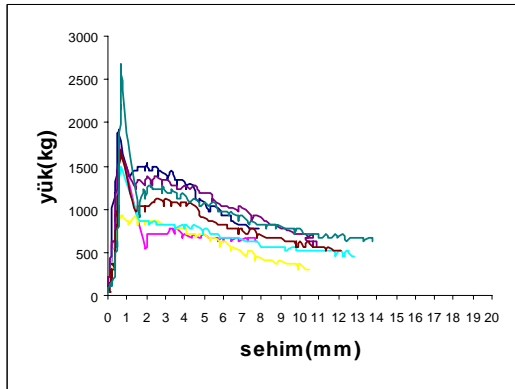
Şekil 2. Lifsiz plak numunelere ait yük-sehim eğrileri



Şekil 3. % 1.5 lifli plak numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 4. Lifsiz kiriş numunelerin yük-sehim eğrileri



Şekil 5. % 1.5 lifli kiriş numunelerin yük-sehim eğrileri

Yapılan deneylerin sonucunda, betona liflerin ilave edilmesinin betonun eğilme tokluğu ve bu kavramla ilişkili özelliklerini geliştirdiği görülmüştür.

Tablo 5’de ASTM C 1018 (Anon., 1997)’ye göre kirişlerin hesaplanan tokluk indeksleri ve JSCE SF-4 (Anon.,1984)’e göre eğilme tokluğu değerleri verilmiştir. Bu tabloda verilen tokluk indekslerinin ASTM C1018 (Anon., 1997) ve TS- 10515 (Anon., 1992)’de verilen elastik şekil değiştirme kriterleri ile karşılaştırıldığında üretilen betonun enerji yutma kapasitesinin iyi olduğu söylenebilir.

Kiriş deneyleri ile birlikte, hazırlanan 600 x 600 x 100 mm’lik donatısız ve çelik lifli plak numunelerin iki eksenli eğilmeye maruz bir şekilde deneyleri yapılmıştır. Donatısız numunelerin ani bir şekilde gevrek olarak, lifli numunelerin ise lifle beton arasındaki aderans gerilmesi yenilinceye kadar taşıma gücünü yitirmeyip, sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kullanılan liflerin uçlarının kancalı oluşu yutulan enerjideki artmanın bir başka nedenidir. Önceki çalışmalardan ve bu çalışmada yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre, lifli beton deneylerinde liflerin herhangi bir şekilde kopmadığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla liflerin beton dayanımına katkısı aderans dayanımları kadar olmuştur.

Tablo 5. ASTM’ye Göre Kirişlerin Tokluk İndisleri ve JSCE SF-4’e Göre Eğilme Tokluğu

	Kiriş No	I _{ilk}	I ₅	I ₁₀	I ₂₀	FT, kgf/cm ² , (MPa)	TS 10515’te Verilen Kriterler		
							I ₅	I ₁₀	I ₂₀
Lifsiiz	1	362.09	1	1	1	-----	1	1	1
	2	397.122	1	1	1	-----			
	3	744.56	1	1	1	-----			
	4	391.77	1	1	1	-----			
	5	434.76	1	1	1	-----			
% 1.5 Lifli	6	487.52	4.82	6.70	16.78	17.7 (1.77)	1-6	1-12	1-25
	7	439.16	4.298	7.066	15.52	12.7 (1.27)			
	8	335.84	4.938	9.198	15.878	10.4 (1.04)			
	9	453.34	4.778	7.394	13.61	13.0 (1.30)			
	10	418.0	5.28	10.07	18.53	16.9 (1.69)			

Kiriş deneylerinde lif yönlenmesi numunenin davranış biçimini etkilemektedir. Liflerin kesit içinde dağılımı eğilmeden oluşan çekme kuvvetlerinin karşılanmasında etkili rol oynamaktadır.

Tablo 4 incelendiğinde, karışımların lifli olması durumunda çökme değerlerinin önemli derecede azaldığı görülmüştür. Bu, lif miktarının artması ile işlenebilirlikte olumsuz etkilerin görülmesinin artması anlamına gelebilir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada hem ASTM C1018 (Anon., 1997) hem de JSCE SF-4 (Anon., 1984)’e göre kiriş eğilme deneylerinden tokluk hesaplanmış olup, bu iki yöntemin birbirine göre değerlendirmesi yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda; ASTM C1018 (Anon., 1997) yönteminde ilk çatlak noktasının yerinin belirlenmesi oldukça güç olmuştur. ASTM C1018 (Anon., 1997) ’den farklı bir yöntem olan JSCE SF-4 (Anon., 1984)’de ilk çatlak noktasından

sonra yük-sehim eğrisindeki kararsızlık önemli değildir. Çünkü; bu yöntemde açıklığın yüzellide birindeki uç nokta deplasmanı, eğrinin başlangıç bölgesindeki kararsızlık bölgesinden oldukça uzakta olduğu yük-sehim diyagramlarından görülmüştür. Buna karşın JSCE SF-4 (Anon., 1984)'teki sınırlamalardan bir tanesi hesaplanan eğilme tokluğunun numune geometrisi bağımlı oluşudur. Fakat yinede JSCE SF-4 (Anon., 1984)'e göre eğilme tokluğunun belirlenmesi çok basit ve deplasman ölçüm tekniğinden bağımsızdır. Bu metod da belirlenmesi çok zor olan ilk çatlak noktası kullanılmamaktadır.

Betona lif ilave edilmesi ile tokluğun önemli derecede geliştiği, bununla birlikte enerji yutma kapasitesindeki artış dikkat çekicidir. Bu bağlamda çelik lif donatılı elemanlarda çelik lif içeriği optimum düzeyde değiştirilerek istenen çözümler elde edilebilir. Böylece üretilecek sünek davranış ile şok yüklemelere ve deprem sırasında oluşabilecek yüklere karşı kararlı bir davranış elde edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- Anonim, 1981. TS 3502, Statik Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü.
- Anonim, 1985. TS 802, Beton Karışım Hesap Esasları, Türk Standartları Enstitüsü.
- Anonim, 1992. TS 10515, Beton-Çelik Tel Takviyeli-Eğilme Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü.
- Anonim, 2002. TS EN 12350-2, Taze Beton Kıvam Deneyi (çökme hunisi metodu ile), Türk Standartları Enstitüsü.
- Anonim, 2003. TS EN 12390-3, Beton Basınç Mukavemeti Deney Metodu, Türk Standartları Enstitüsü.
- Anonymous, 1997. ASTM C1018, Standart Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading).
- Anonymous, 1999. EFNARC, European Specification for Sprayed Concrete, Guidelines.
- Anonymous, 1984. JSCE SF-4, Standards For Tests Methods of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute, pp. 45-51.
- Banthia, N., Trottier, J-F., Beaupre, D. Wood, D. May. 1992. Steel Fiber Reinforced Wet-Mix Shotcrete: Influence of Fiber Geometry, Concrete International: Design and Construction, pp. 24-28.
- Barros, J. A.O., Cruz, J. S. 2001. Fracture Energy of Steel Fiber –Reinforced Concrete, Mechanics of Composite Materials and Structures, pp. 29-45.
- Chen, L., Mindess, S., Morgan, D. R., Shah, S. P., Johnston, C. D., Pigeon, M. 1995. Comparative Toughness Testing of Fiber Reinforced Concrete, Testing of Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-155, pp. 41-70.
- Clements, B. E., Matthew, J. K. 1996. Measuring the Performance of Steel Fibre Reinforced Shotcrete, IX Australia Tunnelling Conference, Sydney, Australia.
- Gopalaratnam, V. S., Shah, S. P., Batson, G. B., Criswell, M. E., Ramakrishnan, V., Wecharatara, M. 1991. Fracture Toughness of Fiber Reinforced Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 88, No. 4, pp. 339-353.
- Nataraja, M. C., Dhang, N., Gupta, A.P. 2000. Toughness Characterization of Steel Fiber-Reinforced Concrete by JSCE Approach, Cement and Concrete Research, pp. 593-597.