

Çelik lif donatılı betonların performans sınıflarının belirlenmesi

Muhsin YALÇIN*, **Canan TAŞDEMİR**, **Mehmet Ali TAŞDEMİR**

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Çelik Lif Donatılı Betonların (ÇLDB) performans sınıflarını belirlemek için performansa dayalı tasarım parametrelerinden olan eşdeğer eğilme-çekme dayanımı Kullanılabilirlik Sınır Durumu'na (KSD) ve Taşıma Gücü Sınır Durumu'na (TSD) göre belirlenmelidir. Bu amaçla yalın ve çelik lifli tüm karışımlarda su/çimento oranı 0.55 alınmış ve sabit tutulmuştur. Beton üretimlerinde 80, 65 ve 55 olmak üzere üç farklı narinlikteki (L/d) uçları kancalı çelik lifler, her bir narinlikte üç farklı hacim oranlarında kullanılmıştır. Karışımlarda çimento (CEM I 42.5 R) miktarı 350 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Kimyasal katkı, belirli işlebilirlikte (çökme değeri=100-130 mm) karışımlar üretilebilmek için çimento ağırlığının % 1.35-% 1.65 arasında değişen oranlarda kullanılmıştır. ÇLDB'ler üzerinde basınç, elastisite modülü, yarmada çekme ve kiriş eğilme deneyleri yapılmıştır. 150x150x750 mm boyutundaki çentiksiz kiriş numuneler üzerinde yapılan kiriş eğilme deneyleri sonucunda yük-sehim eğrileri elde edilmiştir. Yük-sehim eğrilerinin altında kalan alanlar esas alınarak Almanya Beton Birliği Yöntemi'ne (ABBY) göre eşdeğer eğilme dayanımları (KSD ve TSD) belirlenmiştir. Deneyler sonucunda, çelik lif hacim oranı artışının betonun basınç ve elastisite modülüne etkisi olmadığı görülmüştür. ÇLDB'nin yarma çekme ve eğilme dayanımının arttığı ve lif narinliği büyük olan betonlarda bu artışların daha fazla olduğu belirlenmiştir. Belirli bir çelik lif narinliği için çelik lif hacmi arttıkça, KSD ve TSD için eşdeğer eğilme çekme dayanımları belirgin bir biçimde artmıştır. Çelik lif donatılı betonların performans sınıflarının elde edilmesi yapısal tasarım ve uygulamalarda büyük yararlar sağlayacağı düşünülmektedir.

Anahtar Kelimeler: *Çelik lif donatılı beton, performans sınıfları, eşdeğer eğilme-çekme dayanımı, kullanılabilirlik sınır durumu, taşıma gücü sınır durumu.*

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Muhsin YALÇIN muhsinyalcin@gmail.com; Tel: (535) 482 74 80.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Çelik lif donatılı betonların performansa dayalı tasarımı ve optimizasyonu" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 12.03.2009 tarihinde dergiye ulaştı, 26.03.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The determine of the performance classes of steel fiber reinforced concrete

Extended abstract

Traditional concrete has weak characteristics regarding tensile strength and load bearing capacity following cracks. These weak characteristics of concrete cause sudden collapse on the concrete following rupture from dynamic effects such as impact, stroke and earthquake. The studies were performed to improve these characteristics by using different types of fibers in recent years. In these studies, performed in order to improve ductility and mechanical properties of concrete, it is observed that various types of steel fibers are used more than the other types of fibers. Tensile strength, aspect ratio and volume ratio of steel fiber have important effects on performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete (SFRC).

For the performance classes of SFRCs, their equivalent flexural tensile strength values were determined according to both Serviceability Limit State (SLS) and Ultimate Limit State (ULS). For this purpose, water-cement ratios of 0.55 were used in the production of concretes. For same water/cement ratio volume fractions of different type steel fibers were varied from 0.26 to 0.64%. This study used three different steel fiber type ($L/d=80, 65, 55$). The complete load versus deflection curves were obtained for all unnotched beams of 150x150x750 mm. During the testing, the load and signals for deflections were recorded and stored by a computerized data acquisition system. Hence, five concrete batches were made for same water/cement ratio. In each series, the same aggregates (sand: 0 to 4 mm, limestone fines: 0 to 5 mm, crushed limestones: 4 to 11 mm and 8 to 22 mm) were used. Ordinary Portland cement (CEMI 42.5) contents in the mixtures with "water/cement" ratio of 0.55 were 350 kg/m³. The amount of water reducing admixture varied between 1.35% and 1.65% by weight of cement for different concrete mixtures to maintain approximately the nominal slump between 100 and 130 mm. In mixing, cement, sand, limestone fines, and crushed limestones were blended first in dry condition. Half of the water reducing admixture and of the water were mixed in a pan and added to the mixture. The remaining of the water reducing admixture and the water were added to the mixture gradually to provide homogeneity in the mixture.

Steel fibers were scattered in the mixture and carefully mixed to achieve a uniform distribution. The specimens were cast in steel moulds and compacted on a vibration table. All the specimens were demoulded after about 24 hours, stored under wet burlap at 20°C until 28 days of age, then laboratory air-cured until testing days at 56 days. The dimensions of the beams, prepared for four point bending tests, were 150x150x750 mm. At least four beam specimens from each concrete mixture were used. For each mixture, three cylinders, 150 mm in diameter and 300 mm in height, were used for compressive strength and modulus of elasticity tests. Six disc specimens, 150 mm in diameter and 60 mm in height, were prepared for the splitting test.

For a certain volume fraction of hooked end steel fibers, the fracture energy and the equivalent flexural tensile strengths for both SLS and ULS increase significantly. It is shown that the ability of the beam to absorb energy was substantial, even if the cut-off points were taken at the specified deflections for SLC and ULC. According to the experiment results, it is observed that steel fiber volume percentage and aspect ratio in each matrix strength do not affect compressive strength and elasticity module of steel fiber reinforced concrete. On the contrary, as steel fiber volume percentage and aspect ratio in each matrix strength increased, energy absorption capacity and equivalent flexural strength that are utilized in designs based on performance increased. It is examined that steel fiber aspect ratio and toughness increment along with volume percentage increment are more effective in same fiber aspect ratio and volume rated steel fiber reinforced concretes with higher matrix strength. The necessity of high energy to separate the fiber-matrix bond while fibers are breaking off and getting scraped from matrix may interpret the increase in toughness. As for the enhancement in toughness by increasing steel fiber volume, it can be explained by the increment in fiber's crack bridging effect with the increase of steel fiber quantity in unit area. One of the reasons why semi-brittle concrete gains ductile behavior characteristic can be explained with steel fiber's load bearing from the splitting of matrix to the crack formation in fiber-matrix interface.

Keywords: Steel fiber-reinforced concrete, performance classes, equivalent flexural tensile strength, serviceability limit state, ultimate limit state.

Giriş

Gevrek bir malzeme olan geleneksel betonlar çekme dayanımı, yorulma dayanımı, aşınma dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasiteleri bakımından zayıf özelliklere sahiptir. Liflerin betona katılmasıyla betonların bu özelliklerinde belirgin iyileşmeler elde edilmiştir.

Yapılan çalışmalar sonucunda beton içerisinde süreksiz bir şekilde dağılı olarak bulunan liflerin betonda çatlak oluşumunu önemli ölçüde azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini, tokluğunu, çarpma ve çekme dayanımını arttırdığını ve süneklik düzeyi yüksek betonlar elde etmeyi mümkün kıldığı ortaya çıkmıştır. (Taşdemir, 1999; Groth ve Ghasemlou, 1996; Swamy, 1971). Bundan dolayı ani göçmeyi önlemek için büyük enerji yutma kapasitesine sahip YDB'lerin elde edilmesinde çelik lif kullanımını önemli bir yere sahiptir. Çelik liflerin betona katılmasındaki amaç, çatlak kontrolünü sağlamak ve tepe yükü sonrası çimento matrisi tarafından uzun süre taşınamayan çekme kuvvetlerine karşı koymaktır. Genel olarak ÇTDB'lerin davranışını şu iki özellik belirler; eğilme dayanımı ve eğilmedeki tokluğudur. Çelik liflerin betonlar üzerindeki yaptığı iyileşmeleri belirleyen en önemli etkenler ise lif narinliği (lif boyu/lif çapı), kullanılan lifin miktarı, matristen sıyrılma dayanımı, matris içerisinde yönlendirilmesi ve kopma dayanımıdır (Shah ve Rangan, 1971; Köksal vd., 2002).

Betonun zayıf olan özelliklerini iyileştirmek için kullanılan liflerden biri olan çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlarda dahil olmak üzere homojen olarak dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon süreci malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Her yöndeki çekme gerilmelerine çelik lifler karşı koyar; rötre çatlakları oluşmadan, şekillenmeden ve daha fazla büyümeden önlenir (Shah ve Rangan, 1971).

Lif içermeyen betonların günümüz beton teknolojisinde çevresel etki sınıfları ve durabiliteye göre tasarımı iki önemli faktör olan su/çimento oranı ve çimento içeriğinin sınırlanması ile sağlanabilmektedir. Çelik liflerin de betonların

süneklik, eğilme dayanımı gibi özelliklerini iyileştirmesinde üç önemli etken olan çelik lif dayanımı, narinliği ve hacim yüzdesine bağlı olarak performans dayalı tasarımın yapılması betonun farklı inşaat yapılarında kullanım alanlarının artmasını sağlayacaktır. Betondaki matris fazının çevresel etki sınıfları ve durabiliteye göre tasarımı ile ilgili sınırlamalarla birlikte çelik liflerin de beton içerisinde istenilen performans dayalı tasarımının optimizasyonu ile beton yapıların yük taşıma kapasitesi ile birlikte performans dayalı projelerinin geliştirilmesine imkan sağlaması beklenmektedir. Avrupa da özellikle Almanya'nın öncülüğünde çelik lif donatılı betonların performansa göre tasarımı ile ilgili önemli gelişmeler sağlanmış ve bazı ülkelerde performansa bağlı olarak resmi olmayan performans sınıfları belirlenmiştir (Taşdemir vd., 2005).

Betonda çelik lif kullanımı, betonun enerji yutma kapasitesini ve sünekliğini arttırmaktadır (Wafa ve Ashour, 1992). Çelik liflerin betondaki esas etkisi çatlak sonrası davranışta görülmektedir. Eğer uygun bir karışım tasarlanırsa; ilk çatlak oluşuktan sonra matristeki rastgele dağılmış olan kısa çelik lifler köprüleme etkisi ile çatlağın ilerlemesini önler. Liflerin betondan sıyrılması sırasında, çatlak genişlemesi geciktirilmiş ve çatlağın ilerlemesi önlenmiş olur (Banthia ve Trottier, 1995; Kurihara vd., 2000). Liflerin matristen sıyrılarak çıkması fazla enerji gerektirdiğinden toklukta belirgin bir artış elde edilir (Barros ve Figueiras, 1999). Çelik lif tipi, lif narinliği (boy/çap), lif hacmi, liflerin matris içindeki yönlendirilmesi ve liflerin çekme dayanımı matris özellikleri ile Birlikte Çelik Lif Donatılı Betonların (ÇLDB) performansını etkiler (Bayramov vd., 2004a-b; Köksal vd., 2006).

ÇLDB'lerin kaplama, koruma, endüstriyel zeminler, prefabrik elemanlar, kıyı ve liman yapıları, güçlendirme projeleri, tünel kaplamaları, şev stabilizasyon işleri gibi oldukça geniş kullanım alanları vardır (Balagaru ve Shah, 1992). Özellikle, ÇLDB'lerin ana uygulama alanları, kaplamalar ve diğer tipteki döşeme ve plaklardır (TFHRC, 2000). Küçük endüstriyel zeminler genellikle darbe ve diğer mekanik yüklere ma-

ruzdur. Ancak, büyük endüstriyel zeminler ve büyük saha betonları (havaalanı pistleri gibi) mekanik yükler yanında rötre ve termal çatlaklara karşı da dayanıklı olmak zorundadır (Gettu vd., 2000).

Almanya Beton Birliği'nin önerileri (DBV, 1996) çelik lif donatılı zemin betonunun tasarımı için kullanılmaktadır. İki farklı tasarım yönteminden; ilkinde elastik teori kullanılırken ikincisi ÇLDB'nin enerji yutma kapasitesini hesaba katmaktadır. Günümüzde enerjiye dayalı başka tasarım yaklaşımları da önerilmiştir. Örneğin, Moens ve Nemegeer (1991) tarafından tokluk değerlerinin ve taşıma gücü eğilme dayanımlarının kullanılması, ve Falkner vd., (1995) tarafından kiriş deneylerinden elde edilen eşdeğer eğilme dayanımlarının kullanılması yoluyla yöntemler geliştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı, geleneksel ÇLDB'lerin performans sınıflarının eşdeğer eğilme dayanımı yaklaşımı ile belirlenmesidir.

Deneysel çalışma

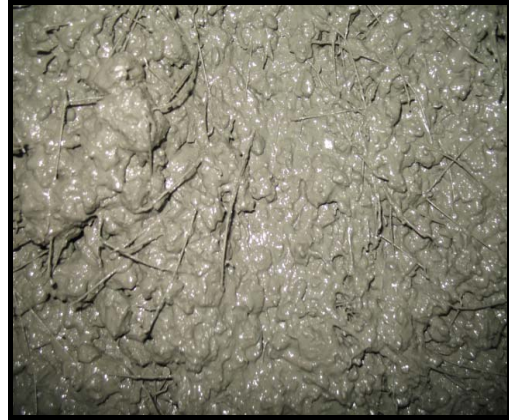
Numune karakteristikleri ve üretim

Çelik lif içeren ve içermeyen tüm karışımlarda su/çimento oranı 0.55 alınmış ve sabit tutulmuştur. Beton üretimlerinde 80, 65 ve 55 gibi üç farklı narinlikte (L/d) uçları kancalı çelik lifler kullanılmıştır. Yoğunluğu 7.85 gr/cm^3 olan çelik liflerin çekme dayanımları $1000-1100 \text{ N/mm}^2$ arasında değişmektedir. Her bir narinlikte üç farklı lif hacim oranında 9 seri çelik lifli ve 1 seri lif içermeyen normal betonla birlikte 10 seri karışım üretilmiştir. Karışımlarda kullanılan çelik liflerin özellikleri ve hacim oranları Tablo 1'de verilmektedir. Tüm karışımlarda 0-4 mm kum, 0-5 mm kırmataş (kalker) tozu, 4-11 mm kırmataş I (kalker) ve 8-22 mm kırmataş (kalker) II sırasıyla % 17, % 21, % 31 ve % 31 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlarda Portland çimentosu (CEM I 42.5R) miktarı 350 kg/m^3 'tür. Kimyasal katkı miktarı, taze karışımlarda çökmeyi 100-130 mm arasında tutabilmek için çimento ağırlığının % 1.35-% 1.60 arasında kullanılmıştır.

Tablo 1. Lif özellikleri ve hacim oranları

Lif Tipi	Narinlik L/d	Boy (mm)	Çap (mm)	Lif Hacim Oranı (%)
80/60	80	60	0.75	0.26
				0.38
				0.51
65/60	65	60	0.90	0.32
				0.45
				0.58
55/30	55	30	0.55	0.38
				0.51
				0.64

Karıştırma işlemine çimento, kum, taş tozu ve kırmataşın kuru olarak karıştırılmasıyla başlanmış, daha sonra kimyasal katkının yarısı ile suyun yarısı başka bir yerde karıştırılarak eklenmiştir. Kimyasal katkının ve suyun kalan kısımları karışıma kontrollü olarak eklenerek karışımın homojenliği sağlanmıştır. Çelik lifler karışıma en son aşamada serpilerek eklenmiş ve homojen olarak dağılına kadar karıştırma yapılmıştır. Üretim sonrası çelik lifli taze beton karışımına ait bir fotoğraf Şekil 1'de verilmektedir.



Şekil 1. Çelik lifli taze beton karışımı

Üretilen betonlar, her bir deney için farklı boyuttaki kalıplara dökülerek vibrasyon masası ile sıkıştırılarak yerleştirildi. Kalıplara yerleştirilen betonlar yaklaşık 24 saat sonra kalıplardan çıkarılarak $20 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıkta kirece doymun kür havuzunda 28. güne daha sonra 56. güne kadar laboratuvar ortamında tutuldu. Üretilen farklı

boyuttaki numunelerde uygulanan deneyler ve elde edilen mekanik özellikler Tablo 2’de verilmektedir. Her bir karışımda basınç ve elastisite modülü deneyleri üç adet silindir numunesi, yarma çekme deneyleri altı adet disk numunesi ve dört noktalı eğilme deneyleri dört adet kiriş numunesi üzerinde uygulanmıştır.

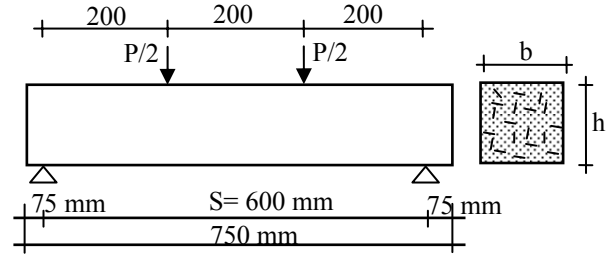
Tablo 2. Deney numuneleri ve boyutları

Deney	Numune	Ölçüler (mm)	Mekanik Özellikler
Basınç, Elastisite modülü	Silindir	Ø150, h=300	Basınç dayanımı (f_c), MPa Elastisite modülü (E), MPa
Yarma çekme	Disk	Ø150, h=60	Yarma çekme dayanımı (f_y), MPa
Dört noktalı eğilme	Kiriş	150x150x750	Eşdeğer eğilme dayanımı ($f_{eş}$), MPa Eğilme dayanımı (f_e), MPa

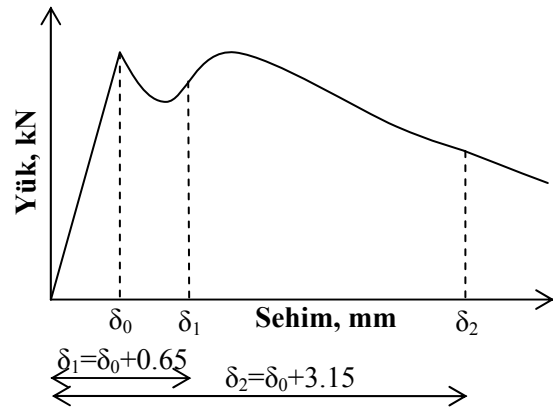
Deney tekniği

Standart basınç ve yarma çekme dayanım deneyleri TS EN 12390-3 (2003) ve TS EN 12390-6’ya (2002) göre yapılmıştır. Dört noktalı eğilme deneyi 150x150x750mm boyutundaki kiriş numunelere ASTM C 1018’e (1997) uygun olarak Şekil 2a’da görülen deney düzeneğine göre uygulanmıştır. Yalın beton için, kiriş orta noktasındaki yerdeğiştirme hızı 0.02 mm/dk değerinde sabit tutulmuştur. Çelik lifli kirişler ise 0.5 mm sehime kadar 0.05 mm/dk, daha sonra 5 mm sehime kadar 0.1 mm/dk yerdeğiştirme hızı ile deneye tabi tutulmuştur. Yükleme, kapalı çevrimli deplasman kontrollü, 100 kN kapasiteli Instron 5500R deney makinesi ile yapılmış ve yerdeğiştirmeler anlık olarak iki adet Doğrusal Değişken Deplasman Transdüseri (LVDT) ile ölçülmüştür. Her bir kiriş için yük-sehim eğrileri, kiriş orta noktasından elde edilen iki ölçümün ortalaması alınarak elde edilmiştir. Elde edilen yük-sehim eğrileri altındaki alanlar kullanılarak kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumları (KSD ve TSD) için eşdeğer eğilme-çekme dayanımları belirlenmiştir. Şekil 2b’de görüldüğü

gibi kiriş orta noktasındaki yük-sehim eğrisinin altında kalan alan her bir yerdeğiştirme için gerekli olan enerjinin bir ölçüsü olarak tanımlanmaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2. (a) Dört noktalı eğilme deney numunesi yerleşim düzeni (b) Eşdeğer eğilme dayanımlarının belirlenmesinde kullanılan sehime değerleri ve şekil değiştirme bölgeleri

Karakteristik eşdeğer eğilme-çekme dayanımı şu şekilde hesaplanabilir (DBV, 1996):

$$f_{eş} = \frac{T_i}{\delta_i} \cdot \frac{S}{bh^2} \quad (1)$$

Bu denklemde; T_i , KSD ya da TSD için yük-sehim eğrisi altında kalan alanı, δ_i her bir sınır duruma karşılık gelen sehimi; $b \times h$ (150x150 mm) ve S (600 mm) sırasıyla kiriş kesit alanı ve mesnet açıklığını göstermektedir.

Çelik lif donatılı betonlar için Alman Beton Birliği Yöntemi’ne (DBV, 1996) göre kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumları için şe-

kil değiştirme bölgeleri Tablo 3'te tanımlanmaktadır.

Tablo 3. Çelik lif donatılı betonlar için şekil değiştirme bölgeleri (DBV, 1996)

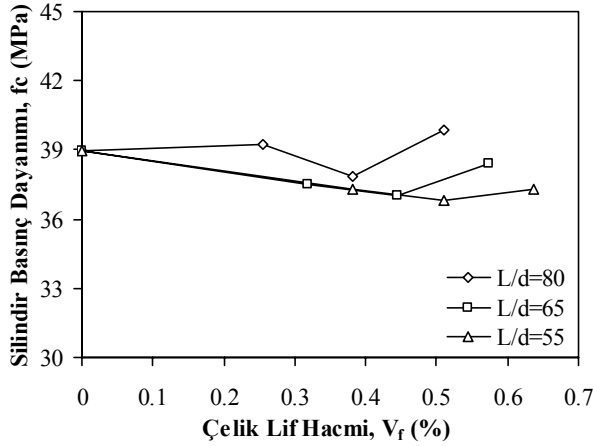
Şekil Değiştirme Bölgesi	Sınır Durumu	Sehim (mm)
I (küçük sehim durumu)	KSD	$\delta_1 = \delta_0 + 0.65$
II (büyük sehim durumu)	TDS	$\delta_2 = \delta_0 + 3.15$

Deney sonuçlarının değerlendirilmesi

Deneyler, betonda lif kullanımındaki temel değişkenlerden lif narinliğinin ve hacminin, KSD ve TSD için tanımlanan eşdeğer eğilme-çekme dayanımlarına etkisini ve çelik lifli betonların performans sınıflarını belirlemek üzere yapılmıştır.

Basınç dayanımı ve elastisite modülü

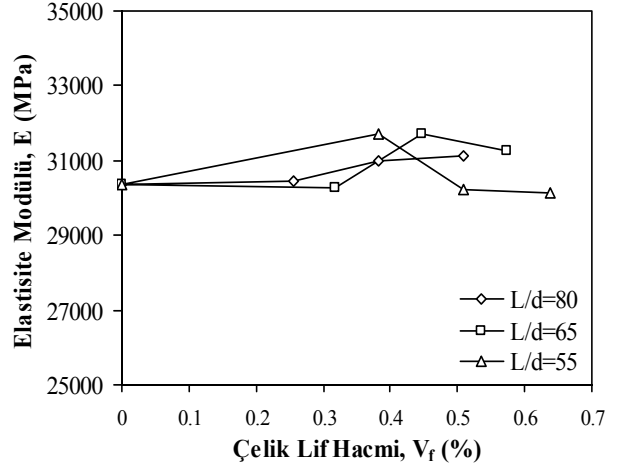
Farklı narinlikte ve hacim oranlarında çelik lif ilavesinin, aynı S/Ç oranındaki silindir numunelerin basınç dayanımlarına etkisi Şekil 3'te ve basınç elastisite modülüne etkisi Şekil 4'te verilmektedir.



Şekil 3. Çelik lif narinliği ve hacim oranının silindir basınç dayanımına etkisi

Aynı S/Ç oranındaki karışımlara, farklı narinlikte ve hacim oranlarında çelik lif eklenmesinin, betonun basınç dayanımına önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlendi. Farklı lif narinliğinde ve hacim oranlarında çelik liflerin ilavesi, basınç da-

yanımından ziyade basınç kırılmasındaki tokluğu artırıcı bir etkiye sahip olduğu söylenebilir. Farklı narinliğe sahip liflerin farklı hacim oranlarında karışımlara eklenmesinin basınç elastisite modüllerine de bir etkisi olmadığı gözlemlenmiştir.

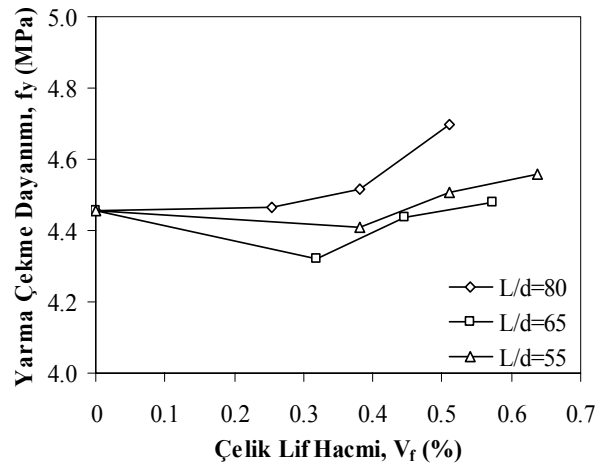


Şekil 4. Çelik lif narinliği ve hacim oranının basınç elastisite modülüne etkisi

Sonuçta, betona çelik lif eklemenin basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde önemli bir değişiklik yapmadığı söylenebilir.

Yarma çekme dayanımı

Farklı narinlikte ve hacim oranlarında çelik lif katılmasının, aynı S/Ç oranındaki disk numunelerin yarmada çekme dayanımına etkisi Şekil 5'te verilmektedir.

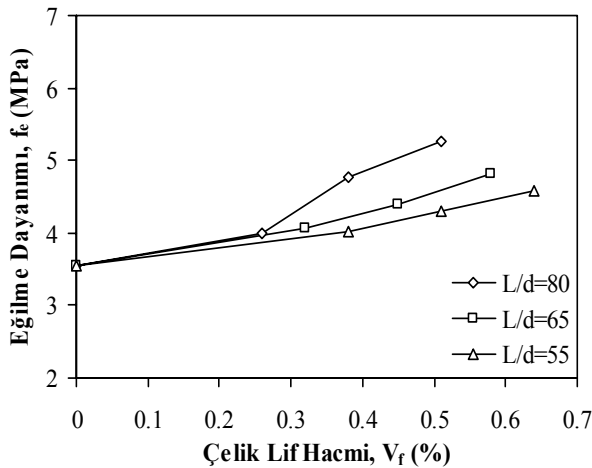


Şekil 5. Çelik lif narinliği ve hacim oranının yarmada çekme dayanımına etkisi

Lif narinliği büyük olan numunelerin yarma çekme dayanımlarında daha fazla artışlar belirlendi. En düşük yarma çekme dayanımları narinliği 65 olan numunelerde görüldü. Narinliği 80, 65 ve 55 olan liflerin hacim oranları arttıkça yarmada çekme dayanımlarının az da olsa arttığı görülmektedir. Yarma çekme dayanımında en fazla artış, narinliği 80 olan lifin kullanımı ile elde edilmiştir. Yarma dayanımının 4.51 MPa değerine narinliği 55 olan liften % 0.51 oranında (40 kg/m³) kullanılarak erişilirken, aynı değer için narinliği 80 olan liften % 0.38 oranında (30 kg/m³) kullanmak yeterli olmaktadır.

Eğilme dayanımı

Şekil 6'da verilen eğilme dayanımı (f_e) sonuçları incelendiğinde, çelik lif narinliği ve hacim oranı arttıkça eğilme dayanımının arttığı görülmektedir. Narinliği 55 olan liflerin hacim oranının 0'dan % 0.64'e kadar artması eğilme dayanımını % 29, narinliği 65 olan liflerin hacim oranının 0'dan % 0.58'e kadar artması eğilme dayanımını % 35 ve narinliği 80 olan liflerin hacim oranını 0'dan % 51'e kadar artması ise eğilme dayanımını % 48 arttırmıştır. Narinliği 80 olan liflerin daha az miktarda kullanılmasına karşın daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu, lif narinliğinin eğilme dayanımında önemli etkisinin olduğunu göstermektedir.



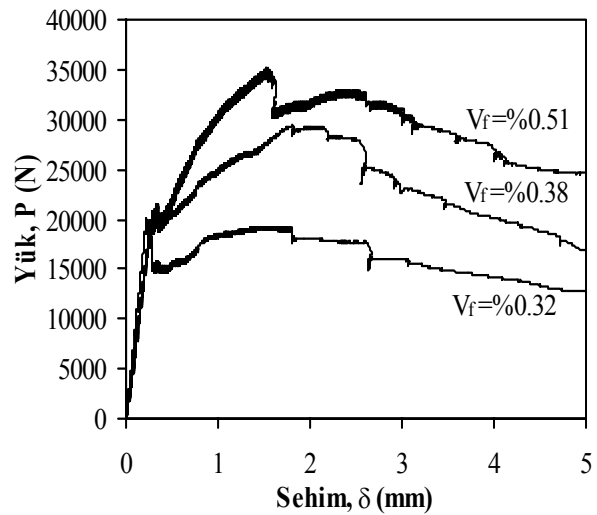
Şekil 6. Çelik lif narinliği ve hacim oranının eğilme dayanımına etkisi

Çelik lif donatılı betonların kırılma süreci, yavaş ilerleyen çatlakların oluşması esnasında liflerin betondan sıyrılmaya çalışması ile meydana

gelir. Nihai göçme, düzensiz çatlak yayılmasıyla liflerin tamamen betondan sıyrılması ve içsel kayma gerilmelerinin taşıma gücü dayanımını aşmasıyla gerçekleşir. Eğilme dayanımının artmasının sebebi, matris fazında ilk çatlak oluştuktan sonra liflerin betona gelen yükü, lif ile beton arasındaki aderans bölgesinin çatlamasına kadar taşımasıdır (Gao vd., 1999).

Yük-sehim eğrileri

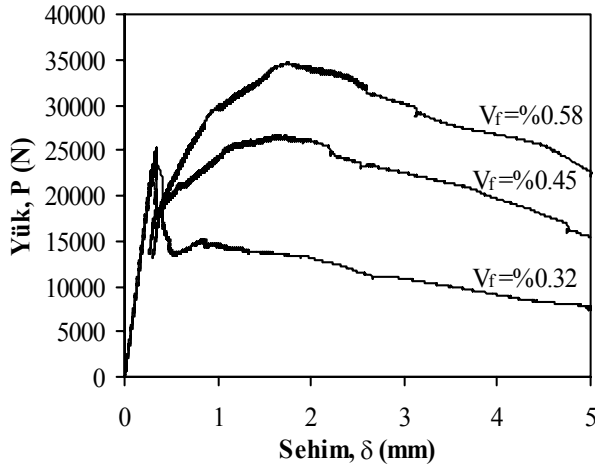
Farklı narinlikte liflerle üretilen ÇLDB'lerin eğilme deney sonuçlarından elde edilen tipik yük-sehim eğrileri, L/d=80 olan liflerin kullanıldığı karışımlar için Şekil 7'de, L/d=65 olan lifli karışımlar için Şekil 8'de ve L/d=55 olan lifli karışımlar için Şekil 9'da verilmiştir. Bu eğriler kullanılarak KSD ve TSD için tanımlanan eşdeğer eğilme-çekme dayanımları hesaplanmıştır. Yük-sehim eğrinin altında kalan alan, malzemenin kırılma enerjisinin değeri olarak tanımlanır. Çelik lif hacim oranı arttıkça kırılma enerjisi de artmaktadır. Çelik lif hacim yüksek olan betonlarda ilk çatlak oluştuktan sonra eğrinin tekrar yükselmesi yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir davranışdır.



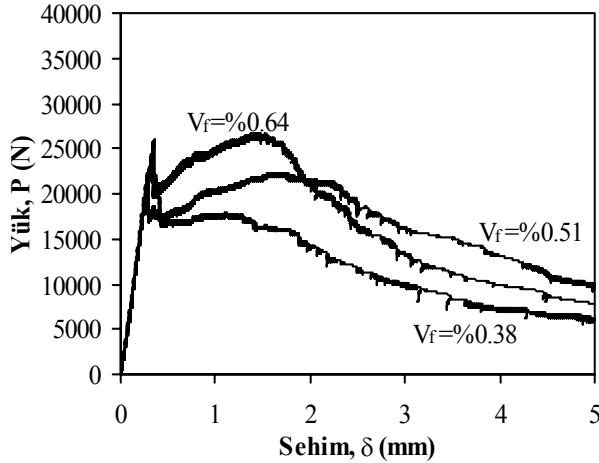
Şekil 7. L/d=80 olan çelik lifli betonlar için tipik yük-sehim eğrileri

Liflerin matristen sıyrılmaya mekanizmasına lif narinliği ve uzunluğu yüksek olan çelik liflerin daha fazla katkı sağlaması ile enerji yutma kapasitesi daha yüksek ÇLDB'ler elde edilmiştir.

Lif narinliği yüksek ve daha uzun çelik liflerin kullanıldığı numunelerde ilk çatlak sonrasında daha büyük tepe yükü değerleri elde edilmiştir. Bununla birlikte ÇLDB'lerin 5 mm'lik sehime sonunda taşıyabildikleri yük değerlerinin (eğilme dayanımının), lif narinliği ve hacim oranı yüksek olan numunelerde daha büyük olduğu görülmüştür. Bu nedenle numunelerin enerji yutma kapasitelerindeki iyileşme oranında çelik lif narinliği ve hacim oranının etkili olduğu söylenebilir.



Şekil 8. $L/d=65$ olan çelik lifli betonlar için tipik yük-sehim eğrileri



Şekil 9. $L/d=55$ olan çelik lifli betonlar için tipik yük-sehim eğrileri

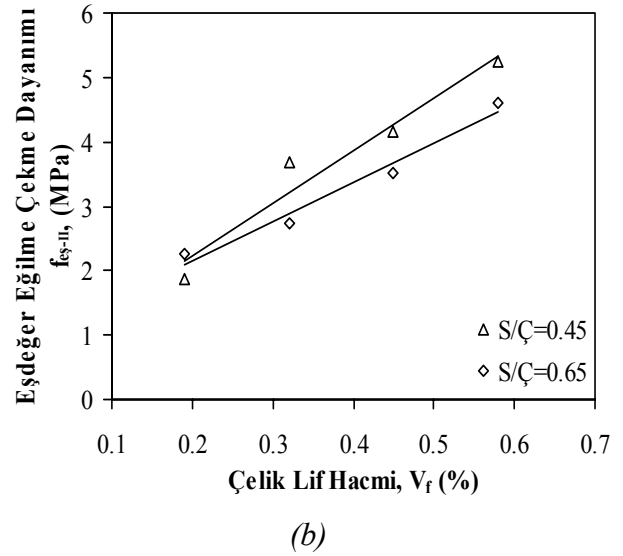
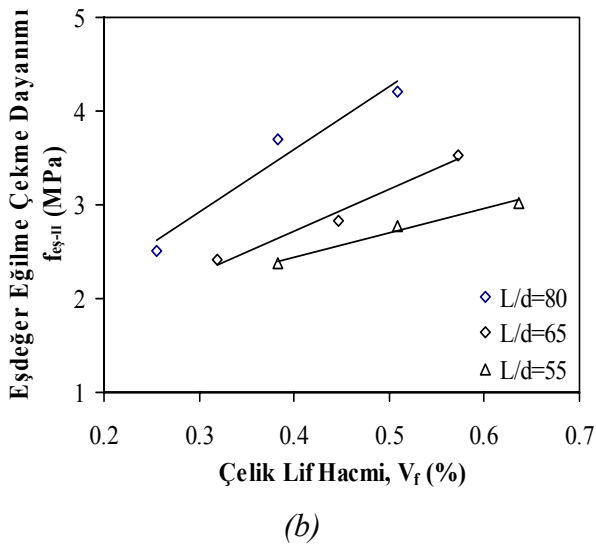
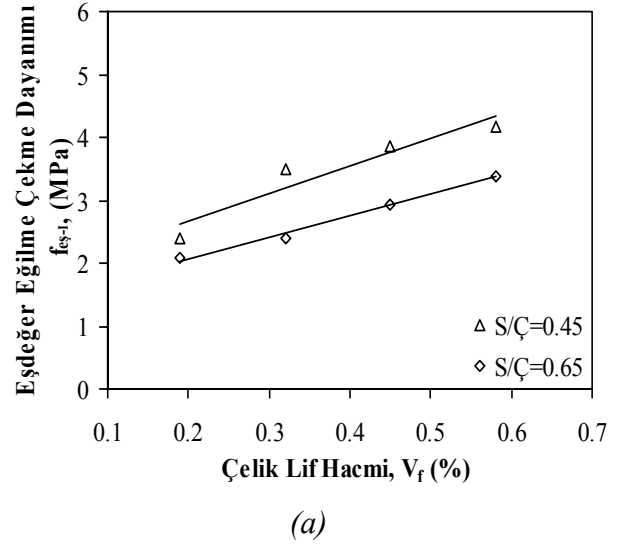
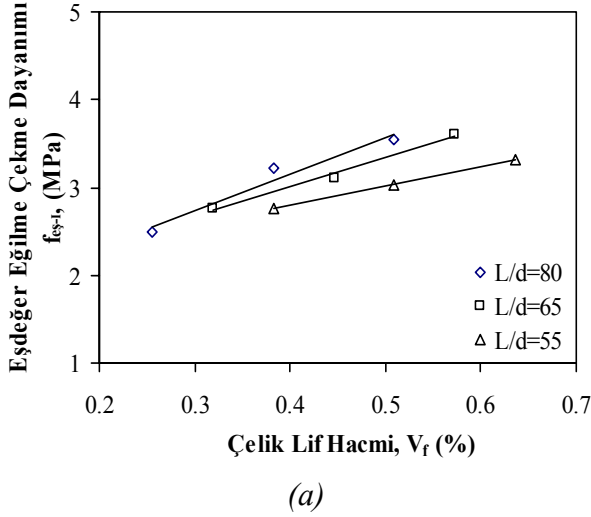
Eşdeğer eğilme-çekme dayanımları

Çelik liflerin betonda kullanılmasının en önemli yararlarından biri şekil değiştirme kapasitesinde (kırılma enerjisi) artışın sağlanmasıdır. ÇLDB'lerin

şekil değiştirme kapasitesiteleri, yük-sehim eğrisinin belirli bir sehime kadar olan kısmının altında kalan alan hesaplanarak elde edilmiştir. KSD ve TSD için belirlenen sehimler sırasıyla $\delta_0+0.65$ mm ve $\delta_0+3.15$ mm'dir. Eğilme deneylerine, kiriş numunelerin orta noktasında 5 mm'lik sehime meydana gelene kadar devam edilmiştir. Şekil 7'de, Şekil 8'de ve Şekil 9'daki eğrilerde görüldüğü üzere 5mm sehime kadar olan kırılma enerjileri numunelerin nihai kırılma enerjileri değildir. Çelik lif donatılı betonlarda, yüksek sünekliğin bir sonucu olarak lif narinliği ve hacmine göre değişen yüksek eş-değer eğilme-çekme dayanımları elde edilmiştir.

Aynı S/Ç ($S/Ç=0.55$) oranındaki ÇLDB'lerin eşdeğer eğilme-çekme dayanımlarında KSD ($f_{eş-i}$) için Şekil 10a'da ve TSD ($f_{eş-ii}$) için Şekil 10b'de görüldüğü gibi narinliği yüksek olan çelik liflerin etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir. Farklı narinliğe sahip çelik lifli numuneler arasında KSD ve TSD için en büyük eşdeğer eğilme çekme dayanımları sırasıyla $L/d=80$ ve $V_f=\%0.51$ olan numunelerde 3.54 MPa ve 4.21 MPa olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre yüksek narinliğe sahip çelik liflerin, TSD'ye göre eşdeğer eğilme çekme dayanımı üzerinde daha etkili olduğu söylenebilir.

Şekil 10b'de narinliği 80 olan çelik liflerin hacmen kullanım oranları arttıkça TSD için eşdeğer eğilme-çekme dayanımının daha belirgin bir biçimde arttığı görülmektedir. Bu deney sonuçlarının, normal dayanımlı bir matriste ve kopma dayanımı 1100 MPa olan düşük karbonlu çelik liflerin kullanıldığı durumda geçerli olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Bayramov vd., 2002; Falkner vd., 1999). Kirişlerin enerji yutma kapasitelerinin KSD ve TSD için belirlenen $\delta_0+0.65$ ve $\delta_0+3.15$ mm sehime durumları için oldukça iyi olduğu söylenebilir. KSD ve TSD için elde edilen eşdeğer eğilme-çekme dayanımlarındaki artış, çelik liflerin yüksek kopma enerjileri ve kırılma sürecinde liflerin beton-dan sıyrılırken yuttuğu yüksek enerjiden kaynaklanmaktadır. Deneylerden elde edilen sonuçlar yarı kırılğan bir malzeme olan betonun, çelik liflerin eklenmesi ile nasıl sünek kompozit bir malzemeye dönüştüğünün açık bir göstergesidir.



Şekil 10. Farklı lif narinliği ve hacim oranının KSD (a) ve TSD (b)'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme-çekme dayanımına etkisi

Şekil 11. Farklı su/çimento ve çelik lif hacim oranının KSD (a) ve TSD (b)'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme-çekme dayanımına etkisi

Şekil 11a ve Şekil 11b, su/çimento oranı ve çelik lif hacim oranının, KSD ve TDS için tanımlanan eşdeğer eğilme dayanımlarına etkisini göstermektedir. Bu çalışma Yalçın vd., (2007) tarafından yapılmış ve çelik lif narinliği 80 olarak sabit tutulmuştur. Şekil 10a ve 10b'de belirli bir lif hacmi için su/çimento oranı azaldıkça, kullanılabilirlik ve taşıma gücü sınır durumları için tanımlanan eşdeğer eğilme dayanımları belirgin şekilde arttığı görülmektedir. Bayramov ve dieğerleri (2002) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar bulunmuştur. Bu nedenle, çelik lif hacminin ve narinliğinin, çelik lif donatılı betonların performans sınıflarını belirlemedeki ana değişkenler olduğu söylenebilir.

Performans sınıfları

Almanya Beton Birliği Yöntemi'ne (ABBY) göre elde edilen deney sonuçlarına dayanarak çelik lif donatılı betonların performans sınıfları küçük ve büyük sehimlere göre (KSD ve TSD) belirtilebilir. Örneğin, su/çimento oranı 0.55 olan ve 80 narinliğindeki çelik liflerin % 0.51 oranında kullanıldığı 55N80-51 kodlu karışımın performans sınıfı C 30/37 F 3.54/4.21 şeklinde yazılabilir. Bu gösterimde C 30/37, çelik lif donatılı betonun basınç dayanım sınıfını, F 3.54/4.21 ise çelik lif donatılı betonun performans sınıfını ifade etmektedir. Benzer gösterimle 55N65-45 kodlu karışım için performans sını-

fi, C 30/37 F 3.11/2.82 şeklinde yazılabilir. Buna göre çelik lif donatılı betonlar için Almanya Beton Birliği Yöntemi'ne göre performansa dayalı tasarım ile belirlenen performans sınıfları Tablo 4'te verilmektedir. Böylece performansa dayalı tasarım ile belirli bir mekanik ve süneklik özelliklerine sahip ÇLDB'ler elde edilmiştir.

Sonuçlar

Bu araştırmada elde edilen deney sonuçları ve literatürdeki diğer çalışmaların deney sonuçlarına göre aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- Bu araştırmanın kapsamında elde edilen sonuçlar, farklı narinlikte ve farklı hacim oranlarında çelik lif katılmasının betonun basınç dayanımı ve elastisite modülünü etkilemediğini göstermektedir. Çelik lif narinliği ve hacim oranı yarma çekme ve eğilme dayanımlarını önemli oranda etkilemektedir.
- Çelik lif narinliği ve hacim oranı eşdeğer eğilme dayanımlarını (KSD ve TSD) etkilemektedir. Belirli bir çelik lif narinliği için çelik lif hacim oranının artmasıyla kullanılabilirlik sınır durumu ve taşıma gücü sınır durumuna göre daha yüksek eşdeğer eğilme dayanımları elde edilmektedir. Narinliği daha büyük olan çelik lif kullanılması durumunda daha yüksek eşdeğer eğilme dayanımları elde edilmiştir. Lif narinliği en düşük (L/d=55) olan liflerin kullanıldığı karışımlarda yük-sehim eğrisinde tepe yükü sonrasında ani azalmalar meydana gelmesi nedeniyle TSD'ye göre belirlenen eşdeğer

eğilme-çekme dayanımının KSD'den daha düşük olduğu belirlenmiştir. Diğer lif narinliklerinde ise TSD'ye göre belirlenen eşdeğer eğilme-çekme dayanımının KSD'den daha büyük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuç, lif narinliğinin yük-sehim eğrisi altındaki alan (tokluk) ve eşdeğer eğilme çekme dayanımları üzerinde önemli etkisinin olduğunu göstermektedir.

- Çelik lifli kiriş numunelerin yük-sehim eğrilerinde belirli bir hacim oranından daha fazla oranda lif kullanılması durumunda ilk çatlak oluşuktan sonra eğri tekrar yükselmektedir. Bu durum yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemelerin tipik bir davranışdır.
- ÇLDB kirişler üzerinde 5 mm'lik sehime kadar yapılan eğilme deneyleri sonunda, numunelerin iki parçaya ayrılmadığı ve daha fazla şekil değiştirmeye uğrayarak sünek kırılma sergilediği görüldü. Yalın kiriş numuneler ise ilk çatlak sonrasında aniden kırılarak tipik gevrek davranış özelliği gösterdi.
- Bu araştırmada ÇLDB'lerin şekil değiştirme kapasitelerine göre belirlenen performans parametreleri kullanılarak; beton sınıfı, lif narinliği ve hacim oranına göre performans sınıflarının elde edilebileceği gösterilmiştir. Böylece bu araştırmanın, ÇLDB'lerin yapı tasarım ve uygulamalarında kullanılabilmesine yönelik çalışmalara performans sınıflarının belirlenmesi bakımından önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

Tablo 4. Çelik lif donatılı betonların performans sınıfları

S/Ç	Beton sınıfı	Lif narinliği (L/d)	Lif hacmi (%)	Karışım kodu	Eşdeğer eğilme-çekme dayanımı (MPa)		Performans sınıfı	
					KSD	TSD		
0.55	C30/37	80	0.26	55N80-26	2.49	2.51	C30/37 F 2.49/2.51	
			0.38	55N80-38	3.22	3.70	C30/37 F 3.22/3.70	
			0.51	55N80-51	3.54	4.21	C30/37 F 3.54/4.21	
		65	0.32	55N65-32	2.75	2.42	C30/37 F 2.75/2.42	
			0.45	55N65-45	3.11	2.82	C30/37 F 3.11/2.82	
			0.58	55N65-58	3.60	3.53	C30/37 F 3.60/3.53	
			0.38	55N55-38	2.76	2.37	C30/37 F 2.76/2.37	
			55	0.51	55N55-51	3.03	2.78	C30/37 F 3.03/2.78
				0.64	55N55-64	3.32	3.02	C30/37 F 3.32/3.02

Teşekkürler

Bu araştırma İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi'nde tamamlanmıştır. Deney numunelerinin üretimi Akçansa Çimento San. ve Tic. A.Ş.-Betonla Teknoloji Merkezi'nde gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- ASTM C 1018-97, (1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading), *ASTM Standard*, V.4.02, 509-516, West Conshohocken, PA.
- Balagaru, P.N. ve Shah, S.P., (1992). *Fiber-reinforced cement composite*, McGraw-Hill, New York.
- Banthia, N. ve Trottier, J.F., (1995). Concrete reinforced with Deformed Steel Fibres, Part II: Toughness characterization, *ACI Materials Journal*, **92**, 2, 146-154.
- Barros, J.A.O. ve Figueiras, J.A., (1999). Flexural behaviour of SFRC: Testing and modeling, *Journal of Materials in Civil Engineering*, **11**, 4, 331-339.
- Bayramov, F., Tasdemir, C. ve Tasdemir, M.A., (2002). Optimum design of cement-based composite materials using statistical response surface method, *Proceedings, ACE 2002: Fifth International Congress on Advances in Civil Engineering*, **2**, 725-734, Istanbul, Turkey.
- Bayramov, F., Ilki, A., Tasdemir, C. ve Tasdemir, M.A., (2004). An optimum design of steel fiber reinforced concretes under cyclic loading, *Proceedings, Fracture Mechanics Cos-5*, **2**, 1121-1128, Vail, Colorado, USA.
- Bayramov, F., Tasdemir, C. ve Tasdemir, M.A., (2004). Optimisation of steel fiber reinforced concrete by means of statistical response surface method, *Cement and Concrete Composites*, **26**, 665-675.
- DBV (1996) *Recommendation: Basis for the design of industrial floor slabs out of steel fiber reinforced concrete*, Eigenverlag, Wiesbaden, Sweden.
- Falkner, H., Huang, Z. ve Teutsch, M., (1995). Comparative study of plain and steel fiber reinforced concrete ground slabs, *Concrete International*, **17**, 1, 45-51.
- Falkner, H., Teutsch, N. ve Klinkert, H., (1999). *Leistungsklassen von stablfaserbeton*, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig.
- Gao, J., Sun, W. ve Morino, K., (1999). Mechanical properties of steel fiber reinforced, high strength, and lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, **19**, 307-313.
- Gettu, R., Schnütgen, B., Erdem, E. ve Stang, H., (2000). A state-of-the-art report, Report of sub-task 1.2, Test and design methods for SFRC, Brite-EuRam Project BRPR-CT98-0813 (DG, 12 -BRPR).
- Groth, P. ve Ghasemlou, F., (1996). Toughness characteristics of steel fibre reinforced concrete with energetically modified cement, Lulea University of Technology, Division of Structural Engineering, Internal Report, 96-05.
- Koksal, F., Ilki, A., Bayramov, F. ve Tasdemir, M.A., (2006). Mechanical behaviour and optimum design of SFRC plates, *Proceedings, 16th European Conference of Fracture, MMMCP, S.P. Shah Symposium*, 199-205, Alexandroupolis, Greece.
- Köksal, F., Eyyubov, C. ve Özcan, D.M., (2002). Çelik tel içeriğinin betonun mekanik özelliklerine etkisi, *Bildiriler Kitabı*, 5. İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 169-179, İstanbul.
- Kurihara, N., Kunieda, M., Kamada, T., Uchida Y. ve Rokugo, K., (2000). Tension softening diagrams and evaluation of properties of steel fibre reinforced concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, **65**, 2, 235-245.
- Moens, I. ve Nemegeer, D., (1991). Designing reinforced concrete based on toughness characteristics, *Concrete International*, **13**, 11, 38-43.
- Shah, S.P. ve Rangan, B.V., (1971). Lif takviyeli betonların özellikleri, *ACI Materials Journal*, **68**, 126-135.
- Swamy, R.N., (1971). Fibre reinforced of cement and concrete evaluation of fibre reinforcement cement and composite, FRC Committe, *Materials and Structures*, **8**, 45, 235-254.
- Taşdemir, M.A., (1999). Çelik tel takviyeli yüksek dayanımlı betonların mekanik davranışı, Çelik Tel Donatılı Betonlar Sempozyumu, Sabancı Center, İstanbul.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Açar A.Ş. ve Yerlikaya, M., (2005). Çelik tel donatılı betonların performansına dayalı tasarımı, *Bildiriler Kitabı*, 6. Ulusal Beton Kongresi, 33-44, İstanbul.
- TS EN 12390-3, (2003). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- TS EN 12390-6, (2002). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-deney numunelerinin yarmada çekme da-

- yanımının tayini, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- Wafa, F.F. ve Ashour, S.A., (1992). Mechanical properties of high-strength fibre reinforced concrete, *ACI Materials Journal*, **89**, 5, 449-455.
- Yalçın, M., Şengül, C., Taşdemir, C., Gökalp, İ., Yüceer, Z. ve Ekim, H., (2007). Performance based design of steel fiber reinforced concrete, *Proceedings, TCMA 3rd International Symposium, Sustainability in Cement and Concrete*, 931-940, Istanbul.
-
- TFHRC (2000), Turner-Fairbank Highway Research Center, Library, Chapter 5-High Performance Concretes.
<http://www.tfhrc.gov/structure/hcp2/chap5.htm>.