

Düşük dayanımlı betona sahip betonarme elemanların güçlendirilmesi için HPFRCC

İdris BEDİRHANOĞLU*, Alper İLKİ

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

Özet

Bu çalışmada; düşük dayanımlı betonarme elemanların deprem yükleri altında davranışlarını iyileştirmek amacı ile kullanılabilen bir malzeme geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç için farklı özelliklerde Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit (HPFRCC) numunelerin mekanik davranışı araştırılmıştır. Betonarme elemanların bu malzeme ile üretilecek ve kalınlıkları 20-50 mm arasında olması düşünülen ön üretilmiş HPFRCC ince plakların elemanların yüzeyine epoksi ve mekanik ankrajlar yardımıyla monte edilmesi ile güçlendirilmesi hedeflenmektedir. Bu plakaların mekanik özelliklerinin özellikle çekme dayanımlarının güçlendirilmesi düşünülen düşük dayanımlı panellere göre çok daha iyi olmasından dolayı güçlendirmede kullanılabilenliği düşünülmüştür. Malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek amacı ile çeşitli parametrelerin etkilerinin incelendiği 27 adet standart silindir basınç (150×300 mm), 54 adet standart disk yarma-çekme (150×60 mm) ve 9 adet kiriş eğilme deneylerini (100×100×500 mm) kapsayan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Standart silindir ve standart disk yarma-çekme deneyleri sonuçları sıcak kürün çekme dayanımını arttırdığını göstermiştir. Liflerin az miktarda korozyona uğratılmasının mekanik özellikleri pratik olarak etkilemediği görülmüştür. Çelik lif oranının artışı çekme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikleri olumlu yönde etkilemesine karşın basınç dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özellikleri pratik olarak etkilemediği görülmüştür. Eğilme deneyleri sonucunda çelik lif oranının % 4'e çıkması ile lifsiz numuneye göre tokluğunun çok büyük oranlarda ve net eğilme dayanımının yaklaşık altı kat arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, çelik lif, düşük dayanımlı beton, güçlendirme, HPFRCC.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: İdris BEDİRHANOĞLU. ibedirhan@ins.itu.edu.tr; Tel: (212) 285 37 95.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Mühendisliği Programı'nda tamamlanmış olan "Düşük dayanımlı betona sahip betonarme kolon ve birleşimlerin deprem yükleri altında davranışlarının incelenmesi ve iyileştirilmesi" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.06.2009 tarihinde dergiye ulaşıp, 08.07.2009 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 31.03.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

HPFRCC for retrofitting of reinforced concrete members built with low-strength concrete

Extended abstract

Improvements in concrete technology enabled engineers to produce special concretes with high strengths. However, as known high strength concrete exhibits a very brittle behavior. Many researchers have tried to change this brittle failure mode to a ductile type failure by adding various types of fibers in to the concrete. Consequently, different types of concrete with fibers were developed such as Fiber Reinforced Cementitious Composites (FRCC), Fiber Reinforced Concrete (FRC), Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC), High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) etc. Many researches on this topic have showed that fibers increased the ductility and energy dissipation capacity of the concrete members.

In this research; the main goal is to develop a material that can be used to improve the behavior of reinforced concrete members built with low-strength concrete ($f' \approx 10$ MPa, in which f'_c is the compressive strength of the concrete) under seismic loads. HPFRCC may be used for this purpose. The main idea is to produce precast thin panels made of HPFRCC and retrofitting reinforced concrete members by attaching these panels to the surface of the reinforced concrete members. It is clear that as the mechanical properties of the HPFRCC improve, the effectiveness of HPFRCC panels in retrofitting will also increase. In order to investigate the mechanical characteristics of the HPFRCC, two series of experimental studies were carried out. The first series of tests included compression tests of 27 standard cylinder specimens and tension tests of 54 standard splitting disc specimens. For compression tests nine sets and for each set three identical cylinder specimens were produced. For tension tests six standard splitting disc specimens were produced for each of nine sets. The diameter of cylinder is 150 mm and height is 300 mm. The diameter and height of the standard splitting discs are 150 and 60 mm, respectively. In the tests of the first series, the testing parameters included hot water curing, decomposition of steel fibers before adding them into mixture, corrosion and the amount of steel fibers. Second series of tests included flexural tests of beams with dimensions of 100×100×500 mm. The only parameter in

beam tests is the amount of steel fibers. Three different mixtures and for each mixture there identical beams were produced.

Compression tests of standard cylinder specimens were carried out either under static monotonic or cyclic axial compression loads by using Amsler machine with 5000 kN loading capacity. Two linear displacement transducers were used to measure axial deformations. To determine the elastic modulus, the specimens were subjected to one loading and unloading cycle in the linear range of the stress-strain curve before the full test and then elastic modulus was obtained from the slope of the linear best-fit line. During loading and unloading cycle axial deformations were measured both in the full length (≈ 300 mm) and in 150 mm at midheight of the specimens. For the tests of standard disc specimens a 1000 kN capacity Amsler machine was used. For the beam tests 100 kN capacity Instron 5500R machine was used. Fracture energy, bending strength and toughness of the specimens were obtained from load-displacement curves. Three point loading tests were carried out for beams and loading rates were 0.05 mm/minute and 0.1 mm/minute for the ascending and descending branch of load-displacement curves, respectively. The displacements were measured at the middle point of the beams. In the tests of specimens without steel fibers the loading rate was 0.0175 mm/minute during the entire test. The maximum target displacement was 10 mm, which corresponded to 2.5% drift ratio for specimens with steel fibers. For the tests of specimens without steel fibers, there was no maximum target displacement since the behavior was very brittle. The brittle failures occurred around 0.03% drift ratio.

As results of the compression and splitting tension tests, the hot water curing was found to increase the tensile strength of concrete significantly. It was also found that small amount of the corrosion of steel fibers have no effect on the mechanical characteristics. It was clearly seen that as the amount of steel fibers increased, the mechanical properties such as tensile strength, toughness and ductility also increased while compressive strength and elastic modulus did not change. Results of beam tests showed that the bending strength and toughness increased significantly with increasing amount of steel fibers.

Keywords: *HPFRCC, low strength concrete, reinforced concrete, retrofitting, steel fibers.*

Giriş

Son yıllarda beton teknolojisindeki ilerlemeler, yüksek dayanıma sahip özel betonların üretilmesine olanak sağlamıştır. Ancak, yüksek dayanımlı betonlar tipik olarak gevrek davranış sergilerler. Birçok araştırmacı tarafından yapılan çalışmalarda, bu olumsuzluk, beton karışımının içine lifler katılarak giderilmeye çalışılmıştır. Böylece; Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit (FRCC), Lif Donatılı Beton (FRC), Lif Donatılı Harç (FRM), Sünek Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit (DFRCC), Yüksek Performanslı Lif Donatılı Çimento Esaslı Kompozit (HPFRCC), Yüksek Oranda Ağ Şeklinde Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacı (SIMCON), Yüksek Oranda Kısa Kesilmiş Çelik Tel İçeren Çimento Bulamacı (SIFCON), Reaktif Pudra Betonu (RPC) ve Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (ECC) gibi yeni malzemeler geliştirilmiştir (Taşdemir vd., 2004). Çelik lif katkılı kompozitlerin üretimi ve kullanım alanları üzerine yürütülen pek çok çalışma sonucunda; çelik lif kullanımının, eleman davranışını özellikle süneklik ve enerji yutma kapasitesi bakımından iyileştirdiği birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir (Falkner vd., 1995; Vandewalle, 1996; Taşdemir vd., 2002; Bayramov vd., 2004). Çelik lif katkılı kompozitlerin güçlendirme alanında kullanımı yeni bir yaklaşımdır ve yapılan çalışmalarda betonarme elemanların dayanım, süneklik, çatlak kontrolü ve enerji yutma kapasitesi özelliklerinde iyileşme sağlanmıştır. Ancak, karışımların işlenebilirliğindeki zorluklar nedeniyle, yerinde döküm güçlendirme uygulanması sırasında oldukça sıkıntı yaşandığı gözlenmiştir. Bu durum çimento esaslı kompozitlerin ön üretimli prefabrik panel olarak üretilip betonarme elemanların yüzeyine yapıştırma ile güçlendirme yönteminin geliştirilmesine yol açmıştır. Bu doğrultuda; Alaae ve Karihaloo (Alaae, 2002; Alaae vd., 2002; Alaae ve Karihaloo, 2003) yaptıkları çalışmalarda, betonarme kirişleri öndöküm kompozit (CARDIFRC) panellerle dışarıdan sararak güçlendirmiş ve kirişlerin eğilme ve kesme kapasitelerinde önemli oranda iyileşme elde etmiştir. İlki ve diğerleri yaptıkları çalışmalarda, düşük dayanımlı betona sahip kolon elemanların sarılma bölgelerini, Öndöküm Yüksek Perfor-

manslı Çelik Lifli Beton (HPFRCC) panellerle sararak aksel yük (İlki vd., 2006) ve eğilmeye (Yılmaz, 2004; İlki vd., 2009) karşı güçlendirmiş, dayanım ve özellikle süneklik açısından oldukça iyi bir davranış elde etmişlerdir. Bedirhanoglu ve diğerleri (2008) HPFRCC plakalar ile güçlendirilmiş düşük dayanımlı betona sahip beton panellerin davranışını incelemiştir. HPFRCC plaklar beton panelin karşılıklı iki yüzüne yapıştırmışlardır. Özellikle mekanik ankrajlar ile HPFRCC plağın beton panel yüzeyine iyi yapışması sağlanabildiğinde dayanımda ve süneklite büyük artışlar olduğunu görmüşlerdir.

Bu çalışmada betonarme elemanların depreme karşı güçlendirilmesinde kullanılması düşünülen ince kalınlıklı ön üretimli panellerin üretiminde kullanılacak HPFRCC malzemesinin mekanik özelliklerini geliştirmek amacı ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalar; basınç, yarma-çekme ve eğilme deneylerini kapsamaktadır. Standart silindir basınç ve disk yarma çekme deneylerinde sıcak kür, liflerin karışıma katılmadan önce ayrıştırılması, liflerin korozyona uğratılması ve çelik lif miktarı deney değişkenleri olarak kullanılmıştır. Bu amaçla üretilen standart silindir ve standart disk yarma numuneleri monotonik artan statik aksel basınç ve yarma çekme deneylerine tabi tutulmuştur. Standart silindir numunelerinden bazıları aksel tekrarlı statik basınç gerilmelerine maruz bırakılmıştır. Deneylerde incelenen temel parametreler sıcak su kürü, liflerin önceden ayrıştırılması, liflerin az bir miktar korozyona uğratılması, yüklemenin monotonik artan veya tekrarlı olması ve karışımda kullanılan çelik lif miktarıdır. Bu deneyler sonucunda sıcak kürün, liflerin önceden ayrıştırılmasının ve çelik lif oranının çekme dayanımı, süneklik ve tokluk gibi mekanik özellikler üzerinde etkili olduğu görülmüştür. Çelik lif oranının artmasının basınç dayanımı ve elastisite modülü üzerinde etkili olmadığı görülmüştür. Eğilme deneylerinde çelik lif miktarı değişken olarak göz önüne alınmıştır ve çelik lif miktarının kirişin tokluğu ve çelik lif miktarındaki artmanın eğilme dayanımı ve tokluk gibi mekanik özellikleri önemli miktarlarda iyileştirdiği gözlenmiştir.

Deneysel çalışma

İki bölümden oluşan deneysel çalışmanın ilk bölümü 27 adet standart silindir basınç deneyini ve 54 adet standart disk yarma-çekme deneyini kapsamaktadır. İkinci bölüm deneysel çalışma dokuz adet üç nokta yükleme ile yapılan eğilme kirişi deneylerini kapsamaktadır.

Numune özellikleri

Bu deneysel çalışmada yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini araştırmak amacı ile ilk etapta farklı özelliklere sahip dokuz (M1-M9) döküm yapılmıştır (Tablo 1).

Her dökümde üçer adet 150 mm çapında 300 mm yüksekliğinde standart silindir ve altışar adet 150 mm çapında 60 mm kalınlığında standart disk numunesi üretilmiştir. Genel olarak numuneler, standart olarak 7 gün ılık kür havuzunda (~20°C) bekletilmiştir. Ilık kürden sonra numunelere farklı kürler uygulanmıştır. M1 ve M2 karışımlarında üçer adet standart disk yarma numunesi 7 gün ılık kürden sonra denenmiş, geri kalan standart disk yarma ve standart silindir numuneler ise deney öncesi 7 günlük ılık kürden sonra 3 gün sıcak suda (~90°C) sonra 5 gün daha ılık suda bekletilmiştir. M3 ve M4 karışımlarında bütün numuneler ılık kürden sonra 3 gün sıcak (~90°C) suda bekletilmiş ve daha sonra tekrar ılık suya (~20°C) alınarak 5 gün bekletilmiştir.

M5-M11 karışımlarında her karışımdan üçer adet standart disk yarma numunesi sıcak kürden sonra 5 gün ılık suda bekletildikten sonra denenmiştir. Diğer standart disk yarma numuneleri ve silindir numuneleri sıcak kürden sonra 18 gün daha ılık suda bekletildikten sonra denenmiştir. Bütün karışımlara ait malzeme ve miktarları ve kür şartları Tablo 1’de verilmiştir. M1 karışımında çelik lifler ayrıştırılmadan harcın içine katılmıştır. M1 karışımı dışındaki bütün karışımlarda çelik lifler önceden suyun içinde ayrıştırılarak kurutulmuş ve sonra harcın içine atılmıştır. M3 ve M4 karışımlarında lifler önceden suda ayrıştırılmış ve nemli ortamda sırasıyla üç ve altı gün korozyona maruz bırakılmıştır. M5-M9 karışımları çelik lif miktarının etkisini incelemek üzere dökülmüştür. Üretimde izlenen karıştırma sırası şöyledir: 1-Silis Kumu ve İnce Kum, 2-Silis Dumanı ve Çimento, 3-Su, 4-Hiperakışkanlaştırıcı ve 5-Çelik Lif. Dökümden önce karıştırıcının teknesi ıslak bir bezle silinmiştir. Silis kumu ve dere kumu karışımı bir dakika boyunca karıştırıldıktan sonra çimento ve silis dumanı da karışıma eklenerek bir dakika daha karıştırılmıştır. Daha sonra suyun yarısı karıştırıcı dönerken yavaş bir şekilde karışıma eklenmiş ve üç dakika karıştırıldıktan sonra diğer yarısı aynı şekilde eklenerek üç dakika daha karıştırılmıştır. Daha sonra hiperakışkanlaştırıcının yarısı eklenmiş iki dakika karıştırılmış ve iki dakikanın sonunda diğer

Tablo 1. Karışımlara ait malzeme miktarları ve birim hacim ağırlıkları

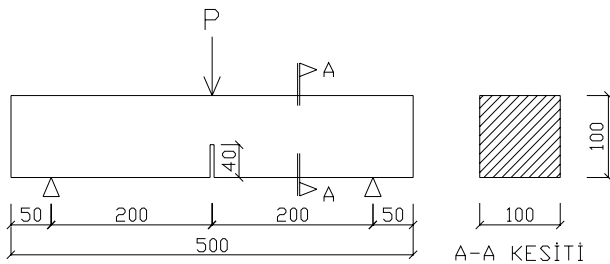
Karışımlar	M1, M2	M3, M4	M5	M6	M7	M8	M9
Çelik lif oranı	%4	%4	% 0	%1	%2	%3	%4
Çimento (kg/m ³)	924.9	924.9	967.9	957.0	946.3	939.2	924.9
Silis kumu (kg/m ³)	557.0	557.0	578.6	575.0	568.6	562.8	557.0
Kum (kg/m ³)	278.5	278.5	289.3	287.5	284.3	281.4	278.5
Silis dumanı (kg/m ³)	185.7	185.7	192.8	192.8	189.3	189.3	185.7
Su (kg/m ³)	203.5	203.5	210.7	210.7	208.5	207.1	203.5
Süper akış. k. (kg/m ³)	33.60	33.60	35.0	34.6	33.9	33.9	33.6
Çelik lif (kg/m ³)	314.2	314.2	0.0	78.5	157.0	235.5	314.0
Birim hacim ağırlıklar (kg/m ³)	2492	2492	2246	2318	2372	2440	2492
Ilık kür (200C) – (gün)	12	12	25	25	25	25	25
Sıcak kür (90 ⁰ C) – (gün)	3	3	3	3	3	3	3

yarısı da eklenmiş, viskozlaşma gözlenene kadar (yaklaşık 1.5 ile 3 dakika arasında bir süre ile) karıştırılmıştır. Viskozlaşma gözlendikten sonra karıştırıcı durdurularak çelik lifin yarısı karışımın her tarafına dağılacak şekilde serpiştirilmiş ve 1.5 dakika karıştırıldıktan sonra liflerin diğer yarısı karışıma eklenmiştir. Yaklaşık 3.5–6 dakika sonra karıştırıcı durdurularak karışımın birim hacim ağırlığı hesaplanmış ve numuneler önceden hazırlanmış çelik kalıplara dökülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Karışım sırası

İkinci etapta denenen eğilme kirişleri için değişen lif oranlarında (% 0, % 2, % 4) üç farklı döküm gerçekleştirilmiştir. Her dökümde özdeş üç numune üretilmiştir. Eğilme kirişi numuneleri Şekil 2’de görüldüğü gibi 100×100×500 mm ebatlarında üretilmiştir.

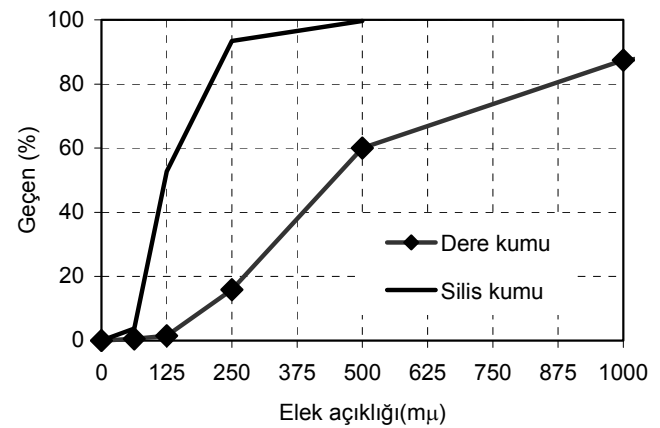


Şekil 2. Eğilme kirişi deneyleri (Boyutlar [mm])

Bu numunelere uygulanan kür koşulları M5-M9 karışımlarında uygulanan kür ile aynıdır. Numuneler üretim tarihinden itibaren 50-52 gün sonra deneye tabi tutulmuşlardır. Şekil 2’de görüldüğü gibi numunelerin etkin kesit alanı 100×60 mm (genişlik, derinlik) olacak ve her numunenin orta bölgesine denk gelecek şekilde, 40 mm derinliğinde ve 5 mm genişliğinde çentik açılmıştır.

Malzeme özellikleri

Bu çalışmada Dramix ZP305/0.55 tipi çelik lifler kullanılmıştır. Liflerin çapı 0.55 mm, uzunlukları 30 mm ve çekme dayanımları 1100 MPa’dır. Çimento ile yer değiştiren bir malzeme olarak, Elkem tarafından üretilmiş olan 2.25 kg/dm³ özgül ağırlığa sahip, maksimum dane çapı 500 mikrondan küçük silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanı kalsiyum hidroksitle girdiği reaksiyon sonucu, betondaki en zayıf bölge olan çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansı artırır. Süper akışkanlaştırıcı olarak BASF-YKS Glenium 51 kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcı gibi kimyasal ve silis dumanı gibi ultra incelikteki mineral katkıların birlikte kullanılması, iyi bir dağılım elde edilmesine yardımcı olur. Çalışmada Şişecam’dan temin edilen silis kumunun maksimum dane çapı 500 mikrondan küçük olup, özgül ağırlığı 2.66 kg/dm³’tür (Şekil 3).



Şekil 3. Elek analizi

Dere kumu karışıma katılmadan önce elek çapı 1000 mikron olan elek ile elenmiştir. Şekil 3’te kumlar için elde edilen elek analizi sonuçları

verilmiştir. Çimento olarak Nuh Çimento tarafından üretilmiş olan PÇ 42.5 normal portland çimentosu kullanılmıştır.

Deney düzeneği, yükleme ve ölçüm sistemi

Basınç deneylerinde yükleme için 5000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı, standart disk yarma deneylerinde 1000 kN kapasiteli Amsler yükleme aygıtı kullanılmıştır. Yük değerleri Amsler cihazının göstergesinden okunmuştur. Basınç deneyleri sırasında elastisite modülünün belirlenebilmesi amacıyla TML CM-15 ölçüm çerçevesi (kompresometre) kullanılmıştır. Standart silindirin ölçüm boyundaki (yükseklik boyunca ortadaki 150 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere, ölçüm çerçevesine bağlı konumdaki iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-5), tüm boydaki (300 mm) yerdeğiştirmeleri ölçmek üzere de iki adet yerdeğiştirmeölçer (TML CDP-25) kullanılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Standart silindir basınç ve disk yarma çekme deneyleri

Eğilme deneyleri için 100 kN kapasiteli INSTRON 5500R yükleme aygıtı kullanılmıştır (Şekil 5).



Şekil 5. Eğilme kirişi deneyleri

Şekil 2 ve 5'te görüldüğü gibi 3 nokta eğilme deneyine tabi tutulan numunelerin, yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilerek, kırılma enerjileri, eğilme dayanımları ve karakteristik boyları hesaplanmıştır. Eğilme deneylerinde, TML TDS-303 Veri Toplayıcı ve INSTRON5500R olmak üzere iki farklı veri toplama sistemi aynı anda kullanılmıştır. Her iki veri toplama sistemine ait yerdeğiştirmeölçerler, numunenin her iki yanına çentik hizasında yerleştirilmiş yerdeğiştirmeler bu şekilde belirlenmiştir. Deneylerden alınan veriler bilgisayar ortamında değerlendirildikten sonra, TML TDS-303 Veri Toplayıcı'dan elde edilen veriler esas alınmış, gerekli hesaplamalar bu verilere göre yapılmıştır.

Deney sonuçları

Numunelerin çekme dayanımları standart disk yarma deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak Denk. 1 yardımı ile belirlenmiştir.

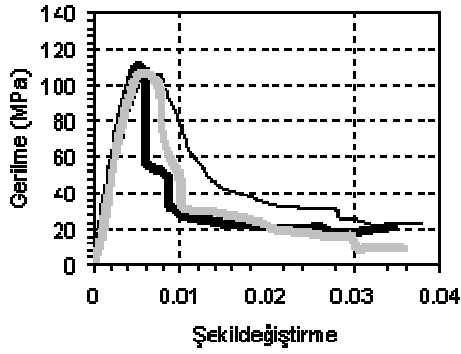
$$f_{cts} = \frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

Bu denklemde; f_{cts} numunenin yarma çekme dayanımını, P deneyde ölçülen yarma yükünü, d disk çapını (standart yarma diskleri için 150 mm), l ise disk boyunu (standart yarma diskleri için ~60 mm) simgelemektedir. Basınç deneyleri sırasında elastisite modüllerinin bulunması için numune kapasitesinin üçte biri düzeyinde yükleme ve boşaltma uygulanmıştır. Elastisite modülü bu yükleme boşaltma çevrimleri sırasında elde edilen gerilme-şekildeğiştirme eğrisinin doğrusal kısmının eğimi olarak hesaplanmıştır. Elastisite modülünün hesabı için kompresometreden ölçülen değerler kullanılmıştır. Bu çalışmada verilen gerilme-şekildeğiştirme diyagramlarının elde edilmesinde numune dışına konulan iki adet yerdeğiştirmeölçer ile 300 mm ölçüm boyundan alınan ölçümler kullanılmıştır.

Sıcak kür ve liflerin harç içine katılmadan önce suda ayrıştırılması

Sıcak kürün çelik lifli betonun çekme dayanımı üzerindeki etkisi M1 karışımı ile incelenmiştir.

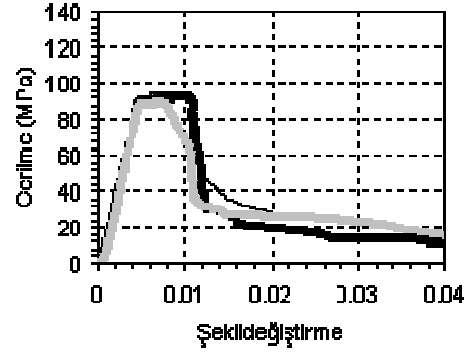
Deneyler sonucunda çelik lifli betonun sıcak külden önceki 7 günlük çekme dayanımı ortalaması 10.5 MPa, sıcak külden sonraki 15 günlük çekme dayanımı ortalaması ise 14.1 MPa olarak ölçülmüştür. Betonun çekme dayanımındaki bu artışın sadece 8 günlük zaman farkından kaynaklanmadığı düşünülmüş, sıcak külden betonun çekme dayanımına önemli ölçüde katkı sağladığı sonucuna varılmıştır. Yapılan deneyler sonrasında çelik liflerin iyi ayrılmayıp beton içerisinde tam olarak dağılmadığı görülmüştür. Bunun üzerine çelik liflerin karışıma katılmadan önce ayrıştırılmasının çelik lifli betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisi M2 karışımı ile incelenmiştir. Bu amaçla çelik lifler önceden sıcak su yardımıyla birbirinden ayrıştırılmış ve karışıma bu şekilde ilave edilmiştir. M2 karışımının, birinci karışımdan tek farkı çelik liflerin önceden su içinde ayrıştırılmasıdır. M2 karışımının sıcak külden önceki 7 günlük çekme dayanımı ortalaması 11.1 MPa, sıcak külden sonraki 15 günlük çekme dayanımı ortalaması ise 15.9 MPa olarak ölçülmüştür. Her iki karışıma ait standart silindir basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 6 ve 7'de verilmiştir.



Şekil 6. M1 karışımı için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde M2 karışımının M1 karışımına göre az miktarda daha yüksek çekme dayanımına sahip olduğu görülmüştür. Şekil 7'de görüldüğü gibi M2 deneme karışımı kullanılarak üretilen numunelerde daha sünek bir davranış elde edilmiş, buna karşılık basınç dayanımları M1 karışımı ile üretilen numunelerin basınç dayanımlarının bir miktar altında çıkmıştır. Çelik liflerin ayrıştırıldıktan

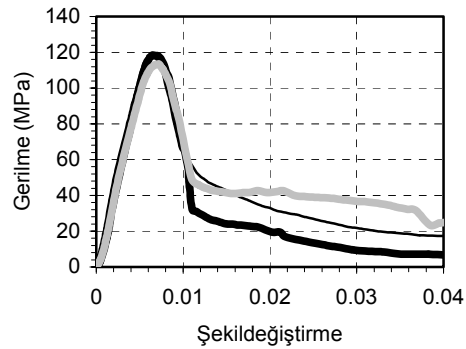
sonra beton içerisinde daha iyi bir dağılım göstermesi çekme dayanımı ve süneklik açısından sağlanan gelişmenin gerekçesi olarak düşünülebilir.



Şekil 7. M2 karışımı için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Liflerin az düzeylerde korozyona uğratılması

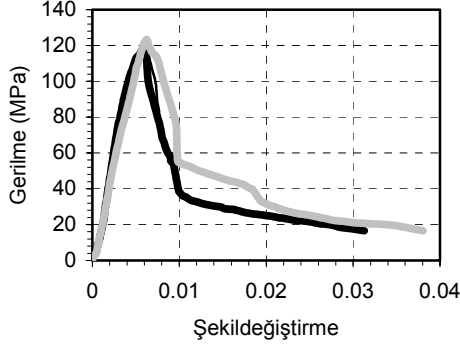
M3 ve M4 karışımlarında lifler 3 ve 6 gün süre ile nemli olarak laboratuvar ortamında saklanmış ve liflerin az düzeyde korozyona uğraması sağlanmıştır. Her iki karışımda kullanılan malzemeler ve miktarları, ilk iki karışım ile aynıdır. M3 ve M4 karışımlarına sahip numunelerin basınç deneylerinden elde edilen gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 8 ve 9'da verilmiştir.



Şekil 8. M3 karışımı için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Yarma çekme deneyleri sonucunda her karışım için kullanılan toplam altı numunenin ortalama çekme dayanımları M3 karışımı için 15.4 MPa ve M4 karışımı için 14.9 MPa olarak bulunmuştur. Şekil 8 ve 9 ve çekme dayanımı sonuçlarının

dan görüldüğü gibi korozyonun artması ile beton basınç dayanımında ve süneklikte önemli bir değişim oluşmamıştır. Bu deneyler sonucunda, düşük düzeyde korozyonun çelik lifli betonun mekanik karakteristiklerini etkilemediği anlaşılmıştır.



Şekil 9. M4 karışımı için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri

Çelik lif miktarının mekanik özelliklere etkisi

Çelik lif oranının değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla; çelik lif oranları hacimce % 0, % 1, % 2, % 3 ve % 4 olan dökümler (M5, M6, M7, M8 ve M9) yapılmıştır. Her bir döküme ait numuneler kullanılarak 12. günde 3 adet yarma çekme deneyi yapılmıştır. Geriye kalan numuneler ise 28. günde yarma çekme ve standart silindir basınç deneylerinde kullanılmıştır. Bu deneyler sonucunda numunelerin çekme dayanımları, basınç dayanımları ve gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri belirlenmiştir. Basınç deneyi için hazırlanmış olan standart silindir numuneler monoton artan yükler altında denenmiştir. % 0-% 4 oranlarında çelik lif içeren karışımlara ait gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri Şekil 10a-e'de verilmiştir. Her karışımı temsil eden birer numune için gerilme-şekildeğiştirme ilişkileri toplu olarak Şekil 10f'de verilmiştir. Ayrıca bu karışımlar ile üretilen numunelerin 28. gün standart silindir basınç dayanımları, elastisite modülleri ile 12. ve 28. gün çekme dayanımları Tablo 2'de verilmiştir. Bu tablodan görüldüğü gibi, aynı karışıma ait numuneler için elde edilen basınç dayanımları ve elastisite modülleri (E_c) arasında çok az fark bulunmaktadır. Tablo 2 incelendiğinde çelik lif oranının artması ile çekme daya-

nımının arttığı, buna karşılık basınç dayanımı ve elastisite modüllerinin çok değişmediği görülmektedir. Farklı lif oranlarına sahip karışımlar için yapılan standart silindir basınç deneylerinden elde edilen karakteristik şekildeğiştirme değerleri Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3'de $\epsilon_{c,(f'_{co})}$, ilgili standart silindir numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde maksimum yük seviyesine karşı gelen şekildeğiştirme değerini, $\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}$ ise ilgili standart silindir numunesinin gerilme-şekildeğiştirme eğrisinde düşen kol üzerinde maksimum yükün 0.85'i seviyesine karşı gelen şekil değiştirme değerini, μ sünekliği ($\epsilon_{c,(0.85f'_{co})}/\epsilon_{c,(f'_{co})}$) ve μ_{ort} elde edilen süneklik değerlerinin ortalamasını simgelemektedir. Bu şekildeğiştirme değerleri basınç deneyinde 300 mm ölçüm boyundan alınan yerdeğiştirme değerleri kullanılarak çizilen gerilme-şekil değiştirme ilişkilerinden elde edilmiştir.

Kiriş eğilme deneyleri

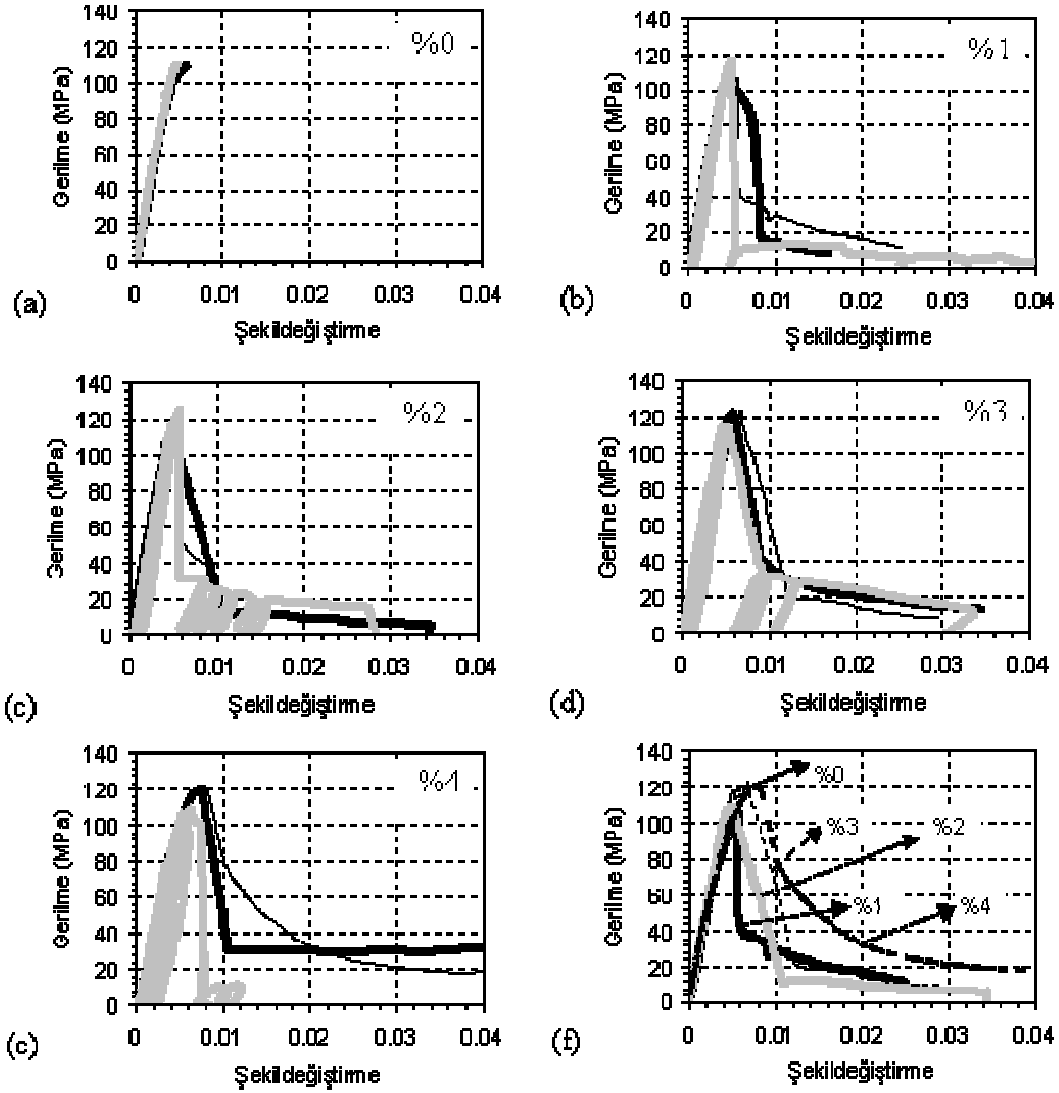
Çelik lif oranının değişiminin betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla; hacimce çelik lif oranları % 0, % 2 ve % 4 olan kirişler üretilmiştir. Üç nokta eğilme deneyine tabi tutulan numunelerin, yük-yerdeğiştirme eğrileri elde edilerek, kırılma enerjileri, eğilme dayanımları ve karakteristik boyları kullanılarak hesaplanmıştır. Deneylerden elde edilen yük-yer değiştirme eğrileri, hacimce % 0, % 2 ve % 4 çelik lif oranına sahip numuneler için Şekil 11'de verilmiştir.

Şekilden görüldüğü gibi çelik lif katılması numunelerin hem yük taşıma kapasitelerini hem de tokluklarını çok büyük oranda artırmıştır. Deneylerden elde edilen yük-yerdeğiştirme eğrileri kullanılarak, her numune için, kırılma enerjisi, net eğilme dayanımı ve karakteristik boy değerleri sırasıyla; Denk. 2-4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$G_f = (W_o + mg\delta_o) / A_{lig} \quad (2)$$

$$F_{net} = (P_m L / 4) / (B (D - a_o)^2 / 6) \quad (3)$$

$$I_{hc} = E_{c,28} G_f / f_t^2 \quad (4)$$



Şekil 10. M4 karışımı için gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

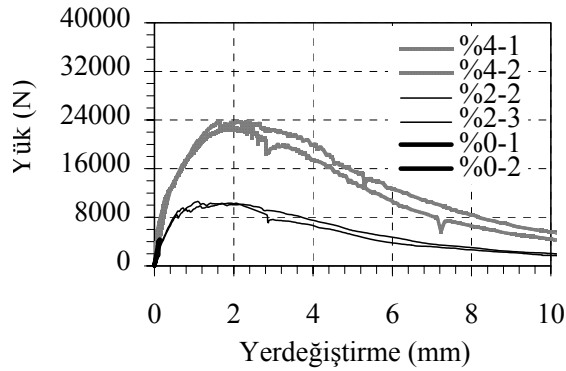
Bu denklemlerde; W_0 yük-yer değiştirme eğrisi altında kalan alanı, m numune ağırlığını, g yer çekimi ivmesini, δ_0 elemanın çentik hizasında yaptığı maksimum yer değiştirmeyi, A_{lig} etkin kesit alanını, P_m uygulanan maksimum yükü, L mesnetler arası uzaklığı, B numune kesitinin genişliğini, D numune kesitinin yüksekliğini, a_0 çentik derinliğini, $E_{c,28}$ 28 günlük elastisite modülünü, f_t ise yarma çekme dayanımını simgelemektedir. Deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 4'te gösterilmiştir. Tablo 4'ten açık olarak görüldüğü gibi çelik lif miktarının artması ile söz konusu değerlerde sürekli bir artış olmaktadır. Tablo 4'te görüldüğü gibi çelik lif miktarının artması ile kırılma enerjisi ve net eğilme dayanımları önemli miktarlarda artmıştır.

Tablo 2. Basınç ve yarma-çekme deneylerinin sonuçları

%	f'_c (MPa)	$f'_{c,ort}$ (MPa)	Çekme dayanımı (12 ve 28 gün)	E_c (GPa)	$E_{c,ort}$ (GPa)
0	118.2.		6.7-7.2	40.6	
	116.3	115		40.7	41
	111.0			40.5	
1	106.0	108	8.5-8.3	38.6	39
	109.4			38.8	
2	119.5	114	11.1-13.6	41.0	40
	108.8			39.8	
3	123.2	122	14.2-14.1	41.4	41
	120.7			41.3	
4	119.9	120	14.2-13.8	40.5	40
	119.9			39.7	

Tablo 3. Şekil değiştirme değerleri

%	$\epsilon_{c,(f_{co})}$	$\epsilon_{c,(0.85f_{co})}$	μ	μ_{ort}
1	0.0054	0.0058	1.04	1.19
	0.0049	0.0065	1.34	
2	0.0052	0.0055	1.05	1.14
	0.0050	0.0061	1.22	
3	0.0068	0.0077	1.14	1.14
	0.0059	0.0067	1.14	
4	0.0081	0.0091	1.13	1.13
	0.0075	0.0083	1.12	



Şekil 11. Değişik oranlarda çelik lif içeren kirişlerin yük-yer değiştirme ilişkileri

Yapılan deneyler sonucunda çekme dayanımı, tokluk ve net eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri en iyi olan karışım olan ve % 4 çelik lif oranına sahip M9'un, güçlendirme amaçlı kullanılacak ön üretilmiş HPFRCC panellerin üretimde kullanılabilir en uygun karışım olduğu görülmüştür.

Tablo 4. RILEM kırılma enerjisi deneylerinin sonuçları

Hacimce çelik lif oranı	% 0	% 2	% 4
Kırılma enerjisi (N/m)	47	9300	24930
Süneklik (μ)	1.0	2.4	2.4
Net eğilme dayanımı (MPa)	7.2	17.2	40.9
Karakteristik boy	36	2002	5146
	32	2194	4678

HPFRCC ile güçlendirme

En uygun karışım belirlendikten sonra söz konusu karışım kullanılarak betonarme elemanların

güçlendirilmesinde kullanılabilir kalınlıkları 20-50 mm arasında değişen ince plaklar üretilmiştir (Şekil 12). Şekil 13'te HPFRCC plakların güçlendirme uygulamalarına örnekler görülmektedir. Şekil 13'te gösterilen kolon-kiriş birleşim bölgesinde uygulandığı gibi plakların beton yüzeyinden ayrılmasını engellemek için epoksi uygulamasına ilave olarak ankraj çubukları ve bulonlar kolay bir şekilde kullanılabilir.



Şekil 12. HPFRCC panel üretimi



Şekil 13. HPFRCC paneller ile güçlendirme uygulamaları

Sonuçlar

Bu deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan ön plana çıkanlar burada özetlenmeye çalışılmıştır:

- Çelik liflerin numunelerin mekanik özelliklerini iyileştirdiği özellikle süneklik, tokluk ve çekme dayanımlarını arttırdığı gözlenmiştir.
- Sıcak kürün çekme dayanımını önemli derecede arttırdığı görülmüştür.
- Karışımındaki çelik lif oranının % 4'e kadar artırılması % 1 çelik lifli karışıma göre süneklikte ortalama % 0.2, çekme dayanımında ise ortalama % 67 artış sağlamıştır.
- Çelik liflerin hafif şekilde korozyona uğramasının HPFRCC'nin mekanik özelliklerini pratik düzeyde etkilemediği görülmüştür.

- Basınç dayanımının ve elastisite modülünün çelik lif içeriğinden pratik anlamda etkilenmediği görülmüştür (değişim miktarı < % 10'dur).
- Tekrarlı yüklemenin davranış üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür.
- Yapılan RILEM kırılma enerjisi deneylerinde çelik lif oranının % 4'e çıkması ile lifsiz numuneye göre tokluğunun çok büyük oranlarda ve net eğilme dayanımının yaklaşık altı kat arttığı görülmüştür.
- Çekme dayanımı ve karışımın işlenebilirliği göz önüne alınarak HPFRCC plakların üretimi için % 4 çelik lif oranına sahip M9 karışımının kullanılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır.

Kaynaklar

Alaee, F.J., (2002). Retrofitting of concrete structures using high performance fibre reinforced cementitious composite (HPFRCC), *Doktora Tezi*, Cardiff University, UK.

Alaee, F.J., Benson, S.D.P. ve Karihaloo, B.L., (2002). A new technique for retrofitting concrete structures, *Proc. ICE, Structures and Buildings*, 152, 309-318.

Alaee, F.J. ve Karihaloo, B.L., (2003). Retrofitting of reinforced concrete beams with CARDIFRC, *ASCE Journal of Composites for Construction*, 7, 174-186.

Bayramov, F., Tasdemir, C. ve Tasdemir, M.A., (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement and Concrete Composites*, 26, 6, 665-675.

Bedirhanoglu, I., Ilki, A., Incecik, O. ve Kumbasar, N., (2008). Retrofit of concrete panels with prefabricated HPFRCC plates, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 14WCEE, Beijing, China.

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.

Ilki, A., Akgun, D., Goray, O., Demir, C. ve Kumbasar, N., (2006). Retrofit of concrete members with externally bonded prefabricated SFRCC jackets, 16th European Conference of Fracture Failure Analysis of Nano and Eng. Materials and Structures, MMCP S.P. Shah-Sessions, Alexandroupolis, Greece, July 3-7, (invited paper).

Ilki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I. ve Kumbasar, N., (2009). Seismic retrofit of brittle and low strength rc columns using fiber reinforced polymer and cementitious composites, *Journal of Advances in Structural Engineering*, 12, 3, 325-347.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, N.A. ve Yerlikaya, M., (2004). Betonun performansa göre tasarımında yeni gelişmeler, Beton 2004 Kongresi, 10-12 Haziran 2004, İstanbul.

Tasdemir, M.A., Ilki, A. ve Yerlikaya, M., (2002). Mechanical behaviour of steel fibre reinforced concrete used in hydraulic structures, Hydro 2002 International Conference on Hydropower and Dams, November 4-7 2002, Kiris-Antalya 159-166.

Vandewalle, L., (1996). Influence of the yield strength of steel fibres on the toughness of fibre reinforced high strength concrete, Proceedings, the CCMS Symposium Chicago, World wide *Advances in Structural Concrete and Masonry*, 496-50.

Yılmaz, E., (2004). Çelik lif takviyeli öndöküm beton paneller ile kolon güçlendirmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.