

Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı The use of hybrid in cementitious composites

Kazım TÜRK^{1*}, Ceren KINA²

¹İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, İnönü Üniversitesi, Malatya, Türkiye.
kazim.turk@inonu.edu.tr, crnkna@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 04.04.2016, Kabul Tarihi/Accepted: 05.09.2016
* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2016.17047
Derleme Makalesi/Review Article

Öz

İnşaat sektöründeki gelişmelerle birlikte çok yüksek katlı betonarme binaların yaygınlaşması, altyapıya verilen önemin artması, nükleer enerji alanındaki yatırımların söz konusu olması gibi gelişmelerden dolayı beton teknolojisinde lif kullanımı büyük bir önem kazanmıştır. Dolayısıyla, bu lif takviyeli kompozitin özellikle, süneklik özelliğine sahip olması gerektiği açıktır. Lif takviyeli kompozitler yapısal elemanların sünekliğini artırarak, deprem, roket darbeleri ve patlamalar gibi aşırı deplasman oluşturan olaylar esnasında büyük miktarda enerji yutarak ileri düzeyde yapısal göçmeyi engellemek için tasarlanmaktadır. Bu kompozitlerin inşaat sektöründe kullanılmasıyla birlikte, çok yüksek betonarme binaların inşa edilebilmesi, önemli altyapı elemanlarının dayanıklılığının ve ekonomik ömrünün artırılabilmesi, nükleer enerji santrallerinin güvenliği açısından büyük önem arz eden koronak binalarının daha güvenli yapılabilmesi, betonarme taşıyıcı elemanların kesit ve donatı oranlarında azalmalara gidilebilmesi çok daha mümkün olabilmektedir. Bu bağlamda, beton teknolojisinde yukarıda belirtilen kompozit özelliklerinin sağlanması açısından lif kullanımının önemi artmaktadır. Değişik malzeme özelliklerine sahip lif türlerinin tek veya farklı lif kombinasyonlarıyla birlikte karma olarak kullanımıyla daha gelişmiş kompozitler üretmenin mümkün olduğu yapılan incelemeler sonucunda tespit edilmiştir. Bu makalede, çimento esaslı kompozit üretiminde lif kullanımının önemi, lif tipleri ve kullanım şekilleri (tek lif ve karma lif) ve makro ve mikro lif türlerinin karma lif takviyeli kompozitlerin mühendislik özellikleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Sonuçta, çoklu çatlak oluşumu ve yüksek çekme dayanımı gibi avantajları nedeniyle inşaat sektöründe karma lif takviyeli kompozit kullanımı büyük önem kazanmaktadır.

Anahtar kelimeler: Çimento esaslı kompozit, Karma lif, Mikro ve makro lif, Süneklik

Abstract

With the developments in the construction sector, the use of fiber in concrete technology has gained great importance due to the developments of the spread of high rise concrete buildings, the increasing importance given to infrastructure, investments in nuclear energy field. Therefore, it is clear that this fiber reinforced composite especially should have also ductility properties. Fiber reinforced composites are designed in order to prevent extremely structural collapse by absorbing massive amount of energy during extreme load-displacement events such as earthquakes, projectile impacts and explosions. It will be much more possible with using this composite in the construction sector to construct much higher concrete building, increase the economic life and strength of important infrastructure members, construct more secure containment buildings which is important for the safety of nuclear power plant, reduce the section and reinforcement ratios in reinforced concrete structural members. In this regard, in the concrete technology in order to provide the above mentioned composite properties, the significance of fiber usage has increased. It was found from studies made that it is possible to produce more developed composites using hybrid fiber having different properties with single or different fiber combinations. In this paper, the significance of the use of fiber for producing the cementitious composite, fiber types and the using forms (single or hybrid) and the effects of micro and macro fiber types on the engineering properties of the hybrid fiber reinforced composites are investigated. Finally, at construction sector the use of hybrid reinforced composites has gained great importance due to the formation of multiple crack and high tensile strength.

Keywords: Cementitious composite, Hybrid fiber, Micro and macro fiber, Ductility

1 Giriş

Lif takviyeli beton ile ilgili ilk çalışmalar 1950 ve 1960'larda çelik lif takviyeli betonun mekanik davranışını anlamak amacıyla yapılmıştır [1]. Lif takviyeli beton, gelişigüzel yönlendirilmiş lifler içeren beton olarak tanımlanmaktadır [2]. Günümüz inşaat sektöründe lif takviyeli betonlar, önemli altyapı elemanlarının dayanıklılığının ve ekonomik ömrünün artırılmasında, nükleer enerji santrallerinin güvenliği açısından büyük önem arz eden koronak binalarının yapılmasında ve yol kaplamaları, endüstriyel döşemeler, su yapıları, tüneller, köprüler, patlamaya dayanıklı askeri yapılar, uçak pistleri, beton borular ve ön dökümlü beton elemanlar gibi birçok uygulamada kullanılmaktadır.

Yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitin özel bir türü olan Engineered Cementitious Composites (ECC), mikromekanik prensipler sayesinde minimize edilmiş lif miktarıyla ($\leq 2\%$) birbirini izleyen çoklu mikro çatlak genişliği ve yüksek çekme sünekliği gösterecek şekilde tasarlanmıştır

[3]-[5]. Çünkü, lifli betonlarda çatlak genişliği genelde 300-400 μm seviyelerindeyken, bu değer ECC için 60 μm 'den az olmaktadır. Bu ise ECC'nin diğer beton türlerine göre çevresel etkiler altında da daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır [6]. Bu sebeple, tamir malzemesi olarak beton veya tipik lif takviyeli beton kullanılarak kontrol edilen sistemlere kıyasla daha güçlü, daha sünek, daha fazla enerji yutma kapasitesine sahip olan ECC tamir sistemi daha iyi çatlak genişliği kontrolü sergiler [7]. Özellikle, tek eksenli çekme altında %2.5'tan fazla şekil değiştirme kapasitesi sergileyebilen erken yüksek dayanımlı ECC'nin hızlı ve dayanıklı beton onarımları için uzun vadede dayanıklılık sağlaması açısından oldukça uygun bir malzeme olduğu görülmüştür [8].

Birden çok süreksiz lif tipinin karışımı ile geleneksel beton matrisinin birleşiminden elde edilen lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denilmektedir [9]-[14]. Beton karışımında karma çelik lif birleşimi görüşü ilk olarak Rossi ve diğ. [15] tarafından önerilmiştir. Karma lif takviyeli kompozitte, mikro

çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol eden küçük ve yumuşak lifler ile makro çatlakları kontrol eden büyük ve güçlü liflerin bir arada kullanılması mühendislik açısından oldukça önemli avantajlar sağlar [16],[17]. Karma çelik lifli betonun daha iyi bir performans sergilemesi, büyük ölçüde rapor edildiği gibi sinerjik etkiden kaynaklanmaktadır [18]-[21]. Yani, birden çok lifin birlikte meydana getirdiği etkinin, her bir lifin tek başına olan etkilerinin toplamından daha fazla olması demektir. Örneğin, Stahli ve diğ. [22], üç tip lif kullanarak yüksek performanslı beton geliştirmişler ve bulgular, üç tip lif içeren karma lif takviyeli karışımın bir veya iki tip lif içeren karışımından daha etkili olduğunu göstermişlerdir. Bazı araştırmacılar [23],[24], daha uygun maliyetli sentetik lif kullanıldığında, ülkelerin tasarım yönetmelikleri tarafından gerekli görülen enine donatı miktarının azaltılabileceğini savunmuşlardır. Bu araştırmalar, lif takviyeli beton kullanılarak mekanik performansta kayda değer gelişmelerin başarılabileceğini göstermektedir. Fakat tek lif takviyeli beton kullanıldığında, betondaki göçmenin aşamalı ve çok ölçekli bir süreç olması, her bir lif tipinin sadece sınırlı bir bölgede etkili olabileceği, en uygun performansa ulaşamayacağı dikkatten kaçırılmamalıdır. Bu nedenle, beton malzemelerinin özelliklerini en iyi şekilde kullanmak ve betonarme elemanlarının mekanik performanslarını geliştirmek için çimento esaslı kompozitlerde değişik yapısal tepkileri, boyutları ve işlevleri olan lif kombinasyonları kullanmaya teşebbüs edilmiştir. Bu makalede daha önce yayımlanan çalışmalar derlenerek, kompozit üretiminde lif kullanımının önemi, lif kullanım şekilleri ve tek ve karma lif takviyesinin kompozitin süneklik ve taze özelliklerine etkisi hakkında bilgi verilmiştir.

2 Lif Kullanımının önemi ve kompozitin davranışına etkisi

Son birkaç yılda yapılan çok sayıdaki deprem sonrası araştırmalar [25],[26], depreme dayanıklı betonarme yapıların tasarımındaki hedefin gerçekte tam olarak başarılamadığını ortaya koymaktadır. Depreme maruz kalmış bölgelerde, kolonların çoğu ciddi bir şekilde hasar görmüş ve kolonların uçlarında plastik mafsallar oluşmuştur. Bu olay, yalın beton (yani lif takviyesi içermeyen beton) malzemelerin düşük çekme dayanımı, düşük tokluk ve gevrek doğası gibi özünde olan dezavantajlar ile alakalıdır [27],[28]. Bu sorunun üstesinden gelebilmek için, plastik mafsalların oluşabileceği yapı elemanlarının bu bölgelerinde, betonun sargı etkisini geliştirebilen daha sık aralıklarla enine donatılar (etriyeler) yerleştirmekten ibaret olan geleneksel metot uygulanmaktadır [29],[30]. İyileştirilmiş beton, dayanım düşmesini azaltan çatlakların açılmasını ve yayılmasını engeller ve böylece, betonarme kolonun sismik performansını geliştirir. Ancak, rölatif olarak çok miktarda etriye, yapının inşasındaki zorlukları arttırmasına ilaveten aşırı donatı sıklığına neden olur. Bu metot sadece çelik donatı malzemesi ve üretim giderlerindeki maliyetin artmasına neden olmaz, aynı zamanda özellikle betonlama aşamasında ekstra yakın kalite kontrolü de gerektirmektedir [31]. Geleneksel donatı çubuğu içeren yalın betonun bu belirtilen dezavantajlarının üstesinden gelmek amacıyla lif takviyeli beton önerilmektedir.

Lif takviyeli beton, gelişigüzel yönlenmiş lifler içeren beton olarak tanımlanabilir. Beton, göçme başladığında yarı gevrek ve neredeyse yük taşıma kapasitesinin tamamını kaybeden bir davranış gösteren malzeme olarak karakterize edilir. Kısa gelişigüzel dağılmış lifler ile takviye edilmiş beton, betonun

gevrekliği ve çatlak büyümesine olan zayıf direnci ile ilgili bazı kaygıları ortadan kaldıracaktır [32]. Matristeki rastgele dağılmış lifler, çatlakları köprüleyebilen, çekme gerilmesi taşıyabilen ve enerji yutabilen üç boyutta birleştirici ağ oluştururlar. Lif takviyesi, çimento esaslı kompozitlerin eğilme dayanımı ve tokluk kapasitesinin gelişmesinde en etkili yoldur. Betonun mekanik özellikleri, üniform bir şekilde dağılmış olan süreksiz liflerin eklenmesiyle geliştirilebilir. Böylece, rastgele yönlenmiş bu lifler çatlak birleşmesini, yayılmasını ve başlamasını kontrol ederek ve engelleyerek açılan çatlaklar boyunca yükü taşırlar [1],[2],[33]. Çatlaklar, makro çatlak olarak isimlendirilen daha geniş çatlakları oluşturmak için bağlanan veya iç içe giren ince, süreksiz, yayılı mikro çatlakların gelişimi sonucu oluşmaktadır. Lifler, mikro çatlakların oluşmasını ve makro çatlakların oluşumuna neden olan mikro çatlakların birbirleriyle bağlantı oluşturma sürecini erteleyerek, kırılmanın gelişimini önemli ölçüde etkilerler. Ayrıca, takviye olarak kullanılan lifler, mikro ve makro düzeydeki çatlakları durdurmada etkili olabilirler. Mikro düzeyde, lifler çatlak başlamasını ve büyümesini engeller ve mikro çatlaklar makro çatlaklar ile birbirine karıştıktan sonra etkili köprüleme ve dayanım kazancı, tokluk ve süneklik sağlarlar [33],[34]. Lif takviyeli beton, çatlama karşı üstün direncinin yanında mükemmel çekme dayanımı ve enerji yutma kapasitesi de göstermektedir. Lifler, ilave bir enerji emilimi sağlayarak, çimento esaslı malzemelerin özelliklerini geliştirebilirler. Eğer çekme kuvveti nedeniyle lif takviyeli çimento esaslı kompozitte çatlak oluşursa ve lifler boşluklar arasında köprüleme için mevcutsa, çatlak yayılması için lif-matris aderansını kırarak ilave enerji sağlanmalıdır. Bunun sonucunda, lif çekip-çıkıma, akmaya veya kopmaya uğrayacaktır [33]-[36].

Çimento esaslı lif takviyeli kompozitler, plastik şekil değiştirme esnasında, birçok küçük çatlak oluşması ile tek bir çatlak genişlemesini kontrol ederek çok önemli bir özellik sergilerler. Yani, ilk çatlak oluşumundan sonra, şekil değiştirme devam etmesine rağmen yük taşıma kapasitesi hala artmaya devam edecektir [37]. Ancak, gelişigüzel dağılmış mikro liflerle donatılmış beton veya kompozitteki kırılma ise, çok sayıda paralel çatlak meydana gelmesiyle gerçekleşir. Örneğin, beton içerisinde, gerek hidrasyon esnasında oluşan mikro çatlaklar gerekse içsel gerilmelerden oluşan çatlaklar, eleman yük taşımaya başladıktan sonra büyümeye başlayacaktır. Çatlakın ilerlemesini sağlayan gerilme enerjisi, öncelikle liflere aktarılacak ve lifler tarafından karşılanmaya başlayacaktır. Daha sonra, yük aktarılan lif bu enerjiyi karşılamada yetersiz kaldığında, lif ya kopmaya uğrayacak ya da betondan sıyrılacaktır. Lif koptuktan ya da sıyrıldıktan sonra, gerilme enerjisi tekrar betona aktarılacak, çatlak bir sonraki lifle karşılaşınca kadar ilerlemeye devam edecektir. Bu durum, yük arttıkça tekrarlanacak ve elemanda paralel çatlaklar meydana gelecektir. Elemanda tam kırılma gerçekleşinceye kadar meydana gelen paralel çatlakların miktarı, elemanın ne oranda enerji yuttuğunun göstergesidir. Oysaki lif takviyesiz yalın betonlarda ilk çatlak oluşumuyla birlikte kırılma gerçekleşmektedir. Lif içeren ve içermeyen betonların yük-deplasman davranışı incelendiğinde, ilk çatlak oluşuktan sonra yalın betonun ani olarak kırıldığı, ancak lif içeren betonun yük taşımaya devam ettiği, hatta eğilme dayanımının arttığı görülecektir [38].

Lifli betonlarda ön plana çıkan bu özellikler, hasarı azaltmak ve güçlü kolon oluşturmak için betonarme kolonlarda lif takviyeli betonun direkt uygulamasına izin vermektedir [31].

3 Lif tipleri

Lifler malzemelerin en geliştirilmiş halidir, çünkü dayanımları genellikle aynı malzemenin büyük hacimli formuna göre oldukça yüksektir. Özelliklerindeki farklılık ve kullanım alanları dikkate alındığında, çok sayıda lif çeşidi mevcuttur [39]. Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler Tablo 1'de görülmektedir [39],[40].

Tablo 1: Değişik türdeki liflere ait fiziksel özellikler [39],[40].

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Uzama (%)	Yoğunluk
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-3.5	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Poliyeten(PE)	690	0.14-0.4	10	0.95
YP-PE	2700	120	5	0.97
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.90
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5
Mineral Yünü	483-759	69-117	0.6	2.7

Çelik lif, cam lif ve karbon lif gibi yüksek elastisite modülüne sahip lifler, polivinil-alkol (PVA), polipropilen (PP) ve polietilen (PE) gibi düşük elastisite modülüne sahip liflere kıyasla daha gevrek olan davranışları sebebiyle kompozitin daha çok dayanımını ve tokluğunu arttırmaları. Düşük elastisite modülüne sahip olan lifler ise, kompozitte çatlamayı azaltarak özellikle sünekliğin artmasını sağlarlar [41]-[44]. Üstün çekme dayanımı ve kırılma tokluğu elde etmek için organik (PP, naylon) ve inorganik liflerin (cam, asbest ve karbon) birarada kullanılmasının faydaları 40 yıl önce Walton ve Majumdar [45] tarafından farkedilmiştir.

Çelik en çok kullanılan lif türüdür. Bu lifin popülerliği, çeliğin beton ile olan iyi uyumu, kullanım kolaylığı, yüksek tokluğu ve statik ve dinamik yüklere karşı direnci ile alakalıdır [46]. Çelik lif takviyesinin, betonun mekanik özelliklerini geliştirmek, çatlak oluşumunu kontrol etmek ve betonun sünekliğini arttırmak için kullanıldığı bilinmektedir. Bununla ilgili yapılan araştırmalarda, tünel segmentlerine çelik lif eklenmesinin, çekme dayanımını ve sünekliği etkili bir şekilde geliştirdiği, çevre sıcaklığında oluşabilecek çatlakları ve geleneksel çelik takviye çubuklarına olan talebi azalttığı ve inşaat süresini kısalttığı görülmüştür. Ayrıca, tek ölçekte ve belli kesitlerdeki çatlakları önleyebilen sadece geleneksel donatılı betonarme tünel kaplamayla karşılaştırıldığında, çelik liflerin varlığının çatlak yayılımını da kontrol ettiğini ve böylece sürekli yüksek sıcaklığın söz konusu olduğu durumlarda ve sonrasında betonun toplamdaki performansını iyileştirdiği tespit edilmiştir [47],[48]. Bununla birlikte, daha uzun kancalı liflerin, kendiliğinden yerleşen betonun sadece yarmada çekme dayanımı değil, işlenebilirlik özellikleri üzerinde de önemli bir etkiye sahip olduğu bulunmuştur [49].

4 Lif kullanım şekilleri

4.1 Tek tip lif kullanımı

Uygulamada kullanılan lif takviyeli beton, genellikle tek tip lif içerir. Lif takviyeli betonun karakteristikleri, lifin hacimsel oranına ve özelliğine bağlıdır ve her bir lif tipi bazı özel işlevsellikler bakımından etkili olabilir [50]. Betondaki liflerin

en önemli işlevi, çatlaklar arası köprüleme yapması ve çatlak sonrası sünekliğe neden olan çatlakların genişlemesini geciktirmesidir. Bununla birlikte, betondaki göçme aşamalı ve çok ölçekli bir süreçtir. Uygulanan yük altında, betonda önceden mevcut olan mikro çatlaklar büyür ve makro çatlak oluşumu için birleşir. Makro çatlak stabil olmayan bir yayılım kazanana kadar, kararlı bir hızda yayılır ve ani bir göçmeye neden olur. Betondaki kırılmanın aşamalı ve çok ölçekli doğası, belli bir lifin sadece bir seviyede ve şekil değiştirmelerin olduğu sınırlı bir bölge içinde etkili olabileceğini gerektirir [51]. Lif takviyesi, beton içindeki gelişigüzel dağılmış olan çatlak önleme bölgelerini korurken, çoğu lif takviyeli beton karışımları sadece tek tip lif içeren karışımlarda olduğu gibi yalnız tek ölçekte donatılmış olur.

4.2 Karma lif kullanımı

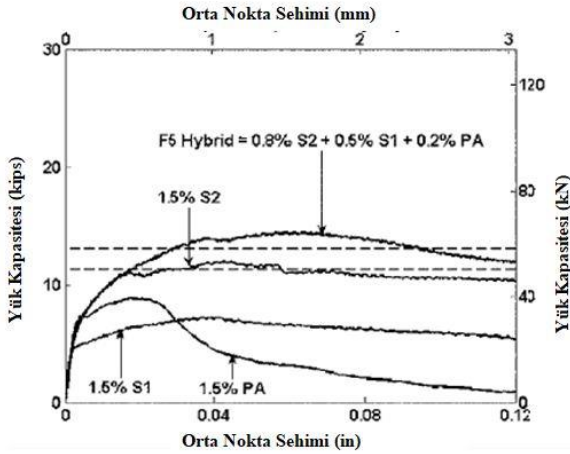
Tek tip lif içeren beton kullanıldığında, betondaki göçme aşamalı ve çok ölçekli bir süreç olduğundan, her bir if tipi sadece sınırlı bir bölgede etkili olabilecek ve böylece en uygun performansa ulaşamayacaktır. Bu nedenle, beton malzemelerin özelliklerini en iyi şekilde kullanmak ve betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için çimento esaslı kompozitlerde değişik yapısal tepkileri, boyutları ve işlevleri olan lif kombinasyonları kullanmaya başlanmıştır. Bu amaçla birden çok süresiz lif tipinin karışımı ile geleneksel beton matrisinin birleşiminden elde edilen lif takviyeli betona karma lif takviyeli beton denir [9]-[14]. Beton karışımında farklı tip çelik lif birleşimi görüşü ilk olarak Rossi ve diğ. [15] tarafından önerilmiştir ve ortaya çıkan malzeme Çok-Ölçekli Lif-Takviyeli Beton diye isimlendirilmiştir. Bu teoriye göre, çelik lifler hem malzeme hem de yapısal seviyede rol oynar. Öncelikli olarak, küçük çelik lifler mikro çatlakların büyümesini kontrol ederek köprüler ve betonda yüksek çekme dayanımına neden olurlar, sonrasında da daha büyük lifler yapı elemanlarının hem sünekliğini hem de yük taşıma kapasitesini geliştirerek makro çatlakları kontrol ederler. Yani, küçük ve yumuşak lifler mikro çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol ederken, büyük ve güçlü lifler makro çatlakları kontrol ederler. Böyle bir karma lif takviyeli kompozitte, bir tip lif varlığı diğer lif özelliklerini faydalı kıldığı için daha ilgi çekici mühendislik özellikler de sunar [16],[17].

Şekil 1'de karma ve tek lif içeren karışımların eğilme davranışının kıyaslanması gösterilmiştir. Blunt ve Ostertag [52] tarafından yapılan bu çalışmada, tüm karışımlarda toplam lif miktarı %1.5 olarak sabit tutulmuştur. Şekil 1'de belirtilen kısaltmalardan PA, PVA lifini; S1 boyu 30 mm ve narınlığı 55 olan çelik lifi; S2 ise boyu 60 mm, narınlığı 80 olan çelik lifi göstermektedir. Görüldüğü gibi, uygun kombinasyonlarda kullanılan lifler içeren karma lifli kompozitler, tek çeşit lif içeren kompozitlerden daha üstün özellikler sergilemektedir.

Liflerin mikro ve makro boyutlarda karma kullanımı, istenen mekanik performanslar sürdürülürken işlenebilirliği de iyileştirmek için önerilmiştir. Bunun yanında, Bentur ve Mindess [34] karma lif sisteminin ilgi çekici avantajlarını şöyle sıralamaktadırlar:

1. Daha güçlü ve daha rijit olan birinci tip lif ilk çatlak gerilmesini ve nihai mukavemeti geliştirirken, daha esnek ve daha sünek olan ikinci tip lif çatlama sonrası bölgedeki gelişmiş tokluk ve şekil değiştirme kapasitesine öncülük eder,

- Daha küçük olan lif tipi mikro çatlakları köprüleyerek büyümelerini kontrol eder. Bu tip lif kompozitin daha yüksek çekme dayanımına ulaşmasını sağlar. Daha büyük olan ikinci tip lif ise makro çatlakların yayılmasını durdurur ve kompozitin önemli oranda tokluğunu geliştirebilir,
- Lif tiplerinin dayanıklılığı farklıdır. Dayanıklılığı az olan lif, kompozit elemanlarının taşınması ve kurulması esnasında kısa süreli performansı garanti ederken, dayanıklı liflerin varlığı ileriki yaşlardaki dayanımı ve/veya tokluğu artırır.



Şekil 1: Karma ve tek lifli karışımların eğilme davranışı [52].

Karma lif takviyeli kompozitler, değişik boy, narinlik ve elastisite modülüne sahip lifler içerebilirler. Bu değişik özelliklere sahip liflerin karma kullanımı ve kompozitin eğilme performansı üzerinde oluşturduğu etkileri araştırılmıştır. Sonuçta, bazı lif kombinasyonlarının sinerjik etki oluşturduğu bulunmuştur [19],[51],[53]. Liflerin birleştirilmiş kullanımı veya farklı orjinden ve/veya değişik geometriye sahip liflerin iki veya daha fazla karma kullanımı, kompozitlerin eğilme performansını geliştirmek için kullanılabilir. Amaç, karma sistemlerin performansının, her bir lif tipinin tek başına neden olabileceği performansı geçmesini sağlamaktır. Yani, bir sinerji oluşturmaktır [54]. Aşağıda tanımlandığı şekliyle birçok lif kombinasyonu ile sinerji sağlanabilir [45],[55].

4.2.1 Tepkisel lif esaslı karma kullanım

Rölatif olarak esnek olan lif tipi, çatlak sonrası bölgedeki tokluğun ve şekil değiştirme kapasitesinin artmasına öncülük ederken, daha güçlü ve daha rijit olan lif tipi, uygun ilk çatlak dayanımı ve nihai dayanım sağlar.

4.2.2 Boyutsal lif esaslı karma kullanım

Daha küçük olan lif tipi, mikro çatlakları köprüler ve böylece çatlakların büyümesini kontrol eder ve çatlakların birleşmesini geciktirir. Bu durum, kompozitin daha yüksek çekme dayanımına sebep olur. İkinci lif daha büyüktür ve bu tip lifle makro çatlakların yayılmasının engellenmesi amaçlanır ve böylece kompozitin kırılma tokluğunda önemli artışa neden olur. Küçük boyuttaki lifler (mikro lifler) çimento hamurundaki ve harç fazındaki çatlakların birleşmesini geciktirir ve bu fazlardaki görünür çekme dayanımını artırır.

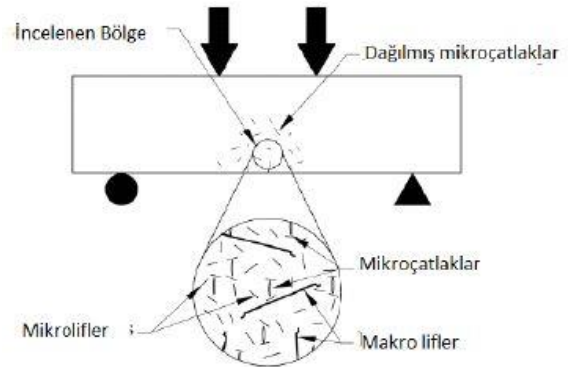
4.2.3 İşlevsel lif esaslı karma kullanım

Kompozitin üretim kolaylığı ve plastik rötre gibi taze ve erken yaş özelliklerini iyileştirmeyi amaçlayan lif tipi ile mekanik

özellikleri geliştiren diğer bir lif tipinden oluşan karma liflerdir.

4.3 Mikro ve makro lif kullanımının davranışa etkisinin incelenmesi

Kompozitlerde, takviye etkisini daha çok geliştirmek için değişik tip ve boylardaki karma lifler, son yıllarda popülerite kazanmaktadır. Bu amaçla mikro lif (kısa, narinliği düşük lif) ve makro lif (daha uzun ve yüksek narinlikteki lif) kullanılmaktadır [11],[19],[56]-[60]. Mikro ve makro lifin beraber kullanıldığı numunelerde başlangıçta, rastgele dağılmış mikro çatlaklar, çok sayıda ve birbirine yakın olan mikro lifler tarafından kuşatılır (Şekil 2). Daha sonra, mikro çatlak oluşan bölgede köprüleme sayesinde, artmakta olan gerilme daha büyük olan liflere aktarılır. Böylece, çatlakların birbirine yaklaşması ve birleşmesi geciktirilir. Bu durum, malzemeye süneklik kazandırır [61].



Şekil 2: Sünek davranış gösteren karma lifli kompozitlerin çatlama davranışı [61].

Makro lif takviyeli harçlardaki çatlaklar, lif takviyesiz harçlardaki çatlaklar ile benzer davranış sergilemektedir. Buna karşın, harçlarda mikro lif kullanımı maksimum yük öncesi birleşmiş çatlakların genişlemesini azaltarak çoklu çatlak oluşumuna neden olmaktadır [56]. Mikro lif takviyeli harç matrisi içerisindeki makro lifin çekip-çıkarma testlerinde, mikro liflerin mikro çatlaklara karşı direnç gösterme karakteristikleri ile alakalı sinerjik etkisi nedeniyle maksimum yük ve sürtünmede artış olduğu görülmüştür [62].

Geleneksel donatı içeren betonarme kolonlarla karşılaştırıldığında, karma lif takviyeli beton kolonların (özellikle daha yüksek eksenel basınç değerine sahip kolonlar) süneklik ve enerji emilimi kapasitesi bakımından önemli sinerjik etki sergiledikleri bulunmuştur [31]. Hem yüksek hem de düşük elastisite modülüne sahip liflerin bulunduğu karma lif takviyeli kompozit malzemesinin, çekme dayanımında ve şekil değiştirme kapasitesinde aynı anda düzelme göstermesi beklenir. Böylece kompozit, darbeye karşı daha dirençli olur [44].

4.4 Mikro ve makro lif kullanımının taze özelliklere etkisinin incelenmesi

Hangi şekil, boyut ve malzeme özelliğine sahip liflerin en etkili olduğunu anlamak için, liflerin beton matrisi ile etkileştiği mekanizmayı dikkate almak gerekir [63].

Gelişigüzel dağılmış kısa (mikro) liflerle takviye edilmiş çimento hamuru ya da beton karışımları, çimento, agrega, su, lifler ve çeşitli katkı maddeleri kullanılarak üretilirler. Mikro liflerle takviye edilmiş betonların ya da kompozitler için iki farklı uygulama şekli söz konusudur:

1. Agregas gibi betonu oluşturan ve karışım bileşenlerinden biri olarak kullanılan mikro lifler, gelişigüzel çimento hamurunun içine karıştırılır ve bu şekilde oluşturulan yapı elemanı geleneksel donatı ile de takviye edilir,
2. Gelişigüzel beton içine karıştırılmış mikro lifler doğrudan donatı olarak kullanılır, başka bir donatı kullanılmaz [38].

Tek başına mikro liflerin etkili oranlanması durumunda, plastik rötre çatlağı [64],[65], alkali-silika reaksiyonu [66] ve korozyon [67] gibi dayanıklılıkla alakalı özelliklerin iyileştirilmesinde önemli bir etkiye sahip olabildiği bulunmuştur. Her ne kadar karışımın çekme özelliklerini geliştirmede mikro liflerin optimal olmadığı tespit edilmiş olsa bile, mikro lif takviyeli karışımların işlenebilirliğinin makro lif takviyeli karışımlarından çok daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca, mikro lifli karışımların makro lif takviyeli karışımlara kıyasla, daha az hava hapsettikleri de tespit edilmiştir [19],[68].

Bununla birlikte, betonda mikro lif kullanımı zordur. Çünkü, kaba agreganın varlığı kırılma sürecinde bu liflerin rolünü güçlü bir şekilde etkiler ve onların etkili olmalarını sınırlandırır. Ayrıca, daha büyük boyutta kaba agregas kullanımı, daha büyük oranda sürekli arayüz bölgesine neden olur. Arayüz bölgesinin kendine özgü zayıflığı, lif takviyesiz normal betonun kırılma sürecinde baskın olur, çünkü çatlaklar bu bölgede başlar ve daha sonra komşu agregalar çevresinde oluşan çatlaklar ile birleşerek kritik makro çatlak boyuna büyür. Sonuç olarak, agregas betona dahil edildiğinde, hamur hacim oranı önemli ölçüde azaltılır ve bu mikroliflerin etkinliğini iki yönde etkiler. Birincisi, belli bir enkesit için liflerin dağılabileceği alan önemli derecede azaltılır çünkü lifler sadece hamur fazında bulunmaktadır. İkincisi ise, liflerin dağılımını ve yerleşen malzemenin tüm kalitesini etkileyen agreganın karışıma ilave edilmesiyle işlenebilirlikte azalma görünür [69]. Betonda, standartlar tarafından önerilen akıcılık, terleme ve ayrışmaya direnç eş zamanlı olarak başarılardan önce, mikro liflerin yüksek yüzey alanını kaplamak için yeterli miktarda geniş hacimli hamura ihtiyaç duyulduğu bulunmuştur. Akış ve hamur hacmi arasındaki ilişki esas alındığında, çimento içeriğini azaltırken, belli bir lif harmanı için etkili bir şekilde akışı maksimuma çıkartan uygun hamur hacim oranı seçilebilir.

4.5 Karma lif kullanımında farklı türden lif kombinasyonlarının incelenmesi

Farklı türden lif kombinasyonlarının, karma lif kullanımının etkisi üzerine odaklanan önceki çalışmalar, PVA-karbon [7], çelik-PP [70],[71], PVA-çelik [72],[73],[42], çelik-PE [74],[75], PVA-PE [76], çelik-palmiye lifi [77] olarak listelenebilir. Mexata ve diğ. [7] tarafından yapılan çalışmada, PVA mikro lifi ile karbon nano lifin bir arada kullanıldığı çimento esaslı kompozite ait eğilme dayanımı, elastisite modülü ve tokluğun önemli düzeyde arttığı bulunmuştur. Ahmed ve Maalej [74] yürüttükleri çalışmada da, çelik-PE karma kompozitin, çelik-PVA karma kompozite göre daha düşük eğilme dayanımına fakat daha yüksek sehim kapasitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, çelik-PE karma kompozitlerde maksimum yükten sonraki dayanım kaybı oranının, çelik-PVA karma sisteme kıyasla daha düşük olduğu sonucuna da varmışlardır. Yazarlar başka bir çalışmada, çelik lifin, kompozitin nihai çekme dayanımının gelişimi üzerindeki katkısının aksine PE liflerin, karma lif kompozitlerin çekme

şekil değiştirme kapasitesini geliştirdiğini bulmuşlardır [75]. Çelik-PP lifi kombinasyonunda, daha güçlü ve daha rijit olan çelik lif, kompozitin nihai dayanımını arttırırken, daha esnek ve daha sünek olan PP lif çatlak sonrası bölgedeki tokluk ve şekil değiştirme kapasitesini geliştirmiştir [70]. Çelik makro lifler ve PVA mikro lifler içeren karma lif takviyeli kompozitler ise, çekme altında yüksek oranda çoklu çatlama eğilimli kompozitler meydana getirirler [73],[42].

Ayrıca, çelik ve polipropilen lif içeren karma lif takviyeli beton, belirgin üstün yangın performansı nedeniyle de ilgi çekmektedir. [78],[79]. Polipropilen lifler yaklaşık olarak 160-170 °C'de erir, bu durum kompozit malzemesinin kalıcı dayanımında bazı azalmalara neden olsa da, ısınmış beton içindeki polipropilen lifinin erimesinin betonun parçalanmaya karşı direnci için anahtar mekanizmalar sağladığına inanılmaktadır. Çünkü, mevcut teorilerden, polipropilen liflerin erimesinin yeni genleşme kanalları oluşturduğu ve beton malzemesi içerisinde varolan iç kanalları birleştirdiği [80] ve böylece biriken su buharının bu iç kanallara kaçarak beton içerisindeki oluşan gözenek basıncını azalttığı, bu nedenle de betonun parçalanma ihtimalini azalttığı anlaşılmaktadır [81],[82]. Sentetik ve çelik lifin bir arada kullanılması durumunda, çelik lifler yüksek süneklik sağlarken ve betondaki çatlak yayılımını azaltırken, polipropilen lifler ise betondaki parçalanmayı hafifletebilirler [83]. Böylece beton için arzu edilen ısıl stabiliteye ulaşılır [47]. Sonuç olarak, karma lif kullanımının gelişmiş eğilme karakteristiğine sahip dayanıklı kompozit geliştirmek için etkili bir imkân sağlayacağı açıktır.

5 Sonuç

Bu çalışmada, yapılan diğer çalışmalar ışığında çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımının önemi araştırılmış ve kompozitin sünekliğine, işlenebilirliğine ve mekaniksel özelliklere etkisi ortaya konmuştur. Sağladığı avantajlardan dolayı kompozitte karma lif takviyesi inşaat sektöründe gelecek vaat etmektedir. Çünkü, sadece sınırlı bir bölgede etkili olabilen ve en uygun performansa ulaşmada yetersiz kalan tek tip lif kullanımı yerine, betonarme elemanların mekanik performanslarını geliştirmek için çimento esaslı kompozitlerde değişik yapısal tepkileri, boyutları ve işlevleri olan lif kombinasyonları kullanılması çok ilgi çekici mühendislik özellikler sunmaktadır. Bu bağlamda, kompozite kazandırdığı özellikler bakımından daha faydalı olan karma lif takviyesi kullanımı yaygınlaştırılabilir ve kullanım alanları genişletilebilir.

6 Kaynaklar

- [1] Hannant DJ. *Fiber Cements and Fiber Concrete*. Chichester, UK, Wiley, 1987.
- [2] Bentur A. *Fiber-reinforced cementitious materials*. Editors: Skalny JP. Material Science of Concrete, 223-285, Westerville, Ohio, The American Ceramic Society, 1989.
- [3] Li VC. "From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications". *Japan Society of Civil Engineering Journal of Structural Mechanical Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48, 1993.
- [4] Kanda T, Li VC. "A new micromechanics design theory for pseudo strain-hardening cementitious composite". *American Society of Civil Engineers Journal of Engineering Mechanics*, 124(4), 373-381, 1999.

- [5] Li VC. *Engineered Cementitious Composites (ECC)-Tailored Composites through Micromechanical Modeling*. Editors: Banthia N, Bentur A, Mufti A. Fiber reinforced concrete: present and the future, 64-97, Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 1998.
- [6] Sahmaran M, Li M, Li VC. "Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure". *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611, 2007.
- [7] Metaxa ZS, Konsta-Gdoutos MS, Shah SP. "Crack Free Concrete Made with Nanofiber Reinforcement". Robert R. McCormick School of Engineering and Applied Science, Year 3 Final Report, 115-124, 2011.
- [8] Li M, Li VC. "High-Early-Strength engineered cementitious composites for fast, durable concrete repair-material properties". *ACI Materials Journal*, 108(1), 3-12, 2011.
- [9] Ding YN, You Z, Jalali S. "Hybrid fiber influence on strength and toughness of RC beams". *Composite Structures*, 92(9), 2083-2089, 2010.
- [10] Issa M, Metwally I, Elzeiny SM. "Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars". *Engineering Structures*, 33(5), 1754-1763, 2011.
- [11] Ganesan N, Indira PV, Sabeena MV. "Behaviour of hybrid fibre reinforced concrete beam-column joints under reverse cyclic loads". *Materials Design*, 54, 686-693, 2014.
- [12] Caggiano A, Cremona M, Faella C, Lima C, Martinelli E. "Fracture behavior of concrete beams reinforced with mixed long/short steel fibers". *Construction and Building Materials*, 37, 832-840, 2012.
- [13] Dazio A, Buzzini D, Trüb M. "Nonlinear cyclic behavior of hybrid fiber concrete structural walls". *Engineering Structures*, 30, 3141-50, 2008.
- [14] Sukontasukkul P, Jamsawang P. "Use of steel and polypropylene fibers to improve flexural performance of deep soil-cement column". *Construction and Building Materials*, 29, 201-215, 2012.
- [15] Rossi P, Acker P, Malier Y. "Effect of steel fibres at two different stages: the material and the structure". *Materials and Structures*, 20(6), 436-439, 1987.
- [16] Mobasher B, Li Cheng Y. "Mechanical properties of hybrid cement based composites". *American Concrete Institute Materials Journal*, 93(3), 284-92, 1996.
- [17] Akcay B. "Experimental investigation on uniaxial tensile strength of hybrid fibre concrete". *Composites: Part B*, 43, 766-78, 2012.
- [18] Banthia N, Sappakittipakorn M. "Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization". *Cement and Concrete Research*, 37, 1366-72, 2007.
- [19] Banthia N, Gupta R. "Hybrid fibre reinforced concrete (hyfr): fibre synergy in high strength matrices". *Mater Struct*, 37(10), 707-716, 2004.
- [20] Pons G, Mouret M, Alcantara M, Granju JL. "Mechanical behaviour of self-compacting concrete with hybrid fibre reinforcement". *Materials and Structures*, 40(2), 201-210, 2007.
- [21] Markovic I, Walraven JC, Van Mier JGM. "Development of high performance hybrid fiber". *4th International conference on high performance fiber reinforced cement composites (HPRCC 4)*, France, 2003.
- [22] Stähli P, Van Mier JGM. "Three-fibre-type hybrid fibre concrete". *5th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, Vail, Colorado, USA, 2004.
- [23] Zhao H. Experimental and theoretical research on seismic performance of concrete frame with special-shaped columns reinforced with polypropylene fiber. Tianjin University, Tianjin, 2008.
- [24] Laura I, Patrick P, Rami E, Jean P. "Seismic behavior of synthetic fiber-reinforced circular columns". *ACI Materials Journal*, 111(1), 189-200, 2014.
- [25] Wang ZF. "A preliminary report on the great wenchuan earthquake". *Earthquake Eng Eng Vibr*, 7, 225-234, 2008.
- [26] California Department of Transportation Division of Structures. "The Northridge earthquake". Post Earthquake Investigation Report, 1994.
- [27] Gu DS, Wu YF, Wu G, Wu ZS. "Plastic hinge analysis of FRP confined circular concrete columns". *Constructions and Building Materials*, 27(1), 223-233, 2012.
- [28] Barrera A, Bonet J, Romero M, Miguel P. "Experimental tests of slender reinforced concrete columns under combined axial load and lateral force". *Engineering Structures*, 33, 3676-89, 2011.
- [29] Paulay T, Priestley M. *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. New York, USA, John Wiley & Sons Inc, 1992.
- [30] ACI 318-05, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, American Concrete Institute, America, 2005.
- [31] Huang L, Xu L, Chi Y, Xu H. "Experimental investigation on the seismic performance of steel polypropylene hybrid fiber reinforced concrete columns". *Construction and Building Materials*, 87, 16-27, 2015.
- [32] Bentur A, Mindess S. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 2nd ed. New York, USA, Taylor and Francis, 2007.
- [33] Balaguru PN, Shah SP. *Fiber Reinforced Cement Composites*. 1st ed. New York, USA, McGraw-Hill Inc., 1992.
- [34] Bentur A, Mindess S. *Fiber Reinforced Cementitious Composites*. 1st ed. London and New York, Elsevier Applied Science, 1990.
- [35] Nawy EG. *Fundamentals of High-Performance Concrete*. 2nd ed. New York, USA, John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [36] Johnston CD. *Fiber-Reinforced Cements and Composites*. 3rd ed. Amsterdam, Holland, Gordon and Breach Science Publishers, 2001.
- [37] Ersoy HY. *Kompozit Malzeme*. İstanbul, Türkiye, Literatür Yayınları, 2001.
- [38] Arısoy B. "Lifli hafif betonların optimum karışım tasarımı". *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
- [39] Kurt G. Lif İçeriği ve Su-Çimento Oranının GRC'nin Mekanik Davranışına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [40] Horikoshi T, Ogawa A, Saito T, Hoshiro H. "Properties of polyvinylalcohol fiber as reinforcing materials for cementitious composites". *International Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications*, Honolulu, HI, USA, 2005.

- [41] Kawamata A, Mihashi H, Fukuyama H. "Properties of hybrid fiber reinforced cement based composites". *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 283-290, 2003.
- [42] Lawler J, Zampini D, Shah S. "Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604, 2005.
- [43] Maalej M, Quek ST, Zhang J. "Behaviour of hybrid-fiber engineered cementitious composites subjected to dynamic tensile loading and projectile impact". *Journal of Materials in Civil Engineering ASCE*, 17(2), 143-152, 2005.
- [44] Zhang MH, Sharif MSH, Lu G. "Impact resistance of high-strength fiber reinforced concrete". *Magazine of Concrete Research*, 59(3), 199-210, 2007.
- [45] Walton PL, Majumdar AJ. "Cement-Based composites with mixtures of different types of fiber". *Composites*, 6(5), 209-216, 1975.
- [46] Holschemacher K, Mueller T, Ribakov Y. "Effect of steel fibres on mechanical properties of high-strength concrete". *Materials and Design*, 31(5), 2604-2615, 2010.
- [47] Yan ZG, Zhu HH, Ju JW. "Behavior of reinforced concrete and steel fiber reinforced concrete shield TBM tunnel linings exposed to high temperatures". *Construction and Building Materials*, 38, 610-618, 2013.
- [48] Cheng F, Kodur V, Wang T. "Stress-Strain for high strength concrete at elevated temperatures". *Journal of Materials in Civil Engineering*, 16(1), 84-90, 2004.
- [49] Şahmaran M, Yaman İÖ. "Hybrid fiber reinforced self compacting concrete with a high-volume coarse fly ash". *Journal of Construction and Building Materials*, 27(1), 150-156, 2007.
- [50] Bentur A, Mindess S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Technology & Engineering. 2nd ed. UK, Taylor & Francis, 2006.
- [51] Banthia N, Soleimani SM. "Flexural response of hybrid fiber-reinforced cementitious composites". *ACI Materials Journal*, 102(6), 382-389, 2005.
- [52] Blunt JD, Ostertag CP. "Deflection hardening and workability of hybrid fiber composites". *ACI Materials Journal*, 106(3), 265-72, 2009b.
- [53] Banthia N, Nandakumar N. "Crack growth resistance of hybrid fiber reinforced cement composites". *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 3-9, 2003.
- [54] Mindess S. "Thirty years of fibre reinforced concrete research at the UWM British, Colombia". *The international conference sustainable construction materials and technologies*, 2007.
- [55] Xu G, Magnani S, Hannant DJ. "Durability of hybrid polypropylene-glass fiber cement corrugated sheets". *Cement and Concrete Composites*, 20(1), 79-84, 1998.
- [56] Lawler JS, Wilhelm T, Zampini D, Shah SP. "Fracture processes of hybrid fiber-reinforced mortar". *Materials and Structures*, 36, 197-208, 2003.
- [57] Betterman LR, Ouyang C, Shah SP. "Fiber-Matrix interaction in microfiber-reinforced mortar". *Advanced Cement Based Materials*, 2(2), 53-61, 1995.
- [58] Yap SP, Bu CH, Alengaram UJ, Mo KH, Jumaat MZ. "Flexural toughness characteristics of steel-polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete". *Materials & Design*, 57, 652-659, 2014.
- [59] Wang F, Liu Y. "Mechanical and tribological properties of ceramic-matrix friction materials with steel fiber and mullite fiber". *Materials & Design*, 57, 449-455, 2014.
- [60] Rambo DAS, Silva FDA, Filho RDT. "Mechanical behavior of hybrid steel-fiber self-consolidating concrete: materials and structural aspects". *Materials & Design*, 54, 32-42, 2014.
- [61] Blunt J, Ostertag CP. "Performance based approach for the design of a deflection hardened hybrid fiber-reinforced concrete". *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, 135(9), 978-986, 2009.
- [62] Markovich I, Van Mier JGM, Walraven JC. "Single fiber pullout from hybrid fiber reinforced concrete". *Heron*, 46(3), 191-200, 2001.
- [63] Li VC, Maalej M. "Toughening in cement based composites. Part I: Cement, mortar and concrete". *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 223-237, 1996.
- [64] Naaman AE, Wongtanakitcharoen T, Hauser G. "Influence of different fibers on plastic shrinkage cracking of concrete". *ACI Materials Journal*, 102(1), 49-58, 2005.
- [65] Banthia N, Gupta R. "Repairing with fiber-reinforced concrete". *Concrete International*, 28(11), 36-39, 2006.
- [66] Yi CK, Ostertag CP. "Mechanical approach in mitigating alkali-silica reaction". *Cement and Concrete Research*, 35(1), 67-75, 2005.
- [67] Grubb JA, Blunt J, Ostertag CP, Divine TM. "Effect of steel microfibers on corrosion of steel reinforcing bars". *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1115-1126, 2007.
- [68] Chung DDL. "Cement reinforced with short carbon fibers: a multifunctional material". *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 511-526, 2005.
- [69] Lawler JS. Hybrid Fiber Reinforcement in Mortar and Concrete. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA, 2001.
- [70] Feldman D, Zheng Z. *Synthetic fibers for fiber concrete composites*. Editor: Ronald K. Eby, et al, High Performance Polymers and Polymer Matrix Composites, 123-128, Pittsburgh, Materials Research Society, 1993.
- [71] Qian CX, Stroeven P. "Development of hybrid polypropylene-steel fibre-reinforced concrete". *Cement and Concrete Research*, 30(1), 63-69, 2000.
- [72] Ostertag CP. "Damage resistance of reinforced concrete structures that utilize High Performance Hybrid Fibre Reinforced (HYFRC) Composites". *2nd International RILEM conference on strain hardening cementitious composites (SHCC2-Rio)*, 2011.
- [73] Lawler J, Zampini D, Shah S. "Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load". *ACI Materials Journal*, 99(4), 379-385, 2002.
- [74] Ahmed SFU, Maalej M, Paramasivam P. "Flexural responses of hybrid steel- polyethylene fibre reinforced cement composites containing high volume fly ash". *Constr Build Mater*, 21(5), 1088-1097, 2007.
- [75] Ahmed SFU, Maalej M. "Tensile strain hardening behaviour of hybrid steel-polyethylene fibre reinforced cementitious composites". *Construction and Building Materials*, 23(1), 96-106, 2009.
- [76] Yun HD, Rokugo K. "Freeze-Thaw influence on the flexural properties of ductile fibre-reinforced cementitious composites (DFRCCs) for durable infrastructures". *Cold Regions Science and Technology*, 78, 82-88, 2012.
- [77] Dawood ET, Ramli M. "Durability of high strength flowing concrete with hybrid fibres". *Construction and Building Materials*, 35, 521-530, 2012.

- [78] Suhaendi LS, Horiguchi T. "Effect of short fibers on residual permeability and mechanical properties of hybrid fibre reinforced high strength concrete after heat exposition". *Cement and Concrete Research*, 36(9), 1672-1678, 2006.
- [79] Bangi MR, Horiguchi T. "Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures". *Cement and Concrete Research*, 41(11), 1150-1156, 2011.
- [80] Pliya P, Beaucour AL, Noumowé A. "Contribution of cocktail of polypropylene and steel fibres in improving the behaviour of high strength concrete subjected to high temperature". *Construction and Building Materials*, 25(4), 1926-1934, 2011.
- [81] Zeiml M, Leithner D, Lackner R, Herbert AM. "How do Polypropylene Fibers Improve the Spalling Behavior of in-situ Concrete?". *Cement and Concrete Research*, 36(5), 929-942, 2006.
- [82] Kalifa P, Chéné G, Gallé C. "High-Temperature behaviour of hpc with polypropylene fibres: from spalling to microstructure". *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1487-1499, 2001.
- [83] Rodrigues JPC, Laím L, Correia AM. "Behaviour of fiber reinforced concrete columns in fire". *Composite Structures*, 92(5), 1263-1268, 2010.