# Çimento Esaslı Kompozitlerde Polimerik Lif Türünün Eğilme Performansına Etkisi\*

Eren Gödek<sup>1</sup>, Muhammer Keskinateş<sup>2</sup>, Tarık Yıldırım<sup>3</sup>, Kamile Tosun Felekoğlu<sup>4</sup>, Burak Felekoğlu<sup>5</sup>

### Özet

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (ECC), çimentolu bir matris içerisine polimerik liflerin eklenmesiyle üretilen yeni nesil yapı malzemeleridir. ECC'nin geleneksel lifli kompozitlerden en önemli farkı bünyesinde çok sayıda kararlı çatlak oluşumu gerçekleşmesidir. Açılan her yeni çatlak ile kompozitin hem yük taşıma hem de deformasyon kapasitesi artmakta ve geleneksel lifli betonların aksine deformasyon sertleşmesi davranışı göstermektedir. ECC'nin bu özel davranışı kompoziti oluşturan matris, lif ve lif-matris ara yüzey özellikleri ile doğrudan ilişkilidir.

Bu çalışmada, farklı polimerik lif türleri kullanılarak kompozitler üretilmiş ve lif türünün eğilme performansına etkisi araştırılmıştır. Bu kapsamda, aynı dozajda (hacimce %2) yüksek molekül ağırlıklı polietilen, polivinil alkol ve yüksek çekme dayanımlı poliproplen lif kullanılarak 25x60x300 mm boyutlarında plaka kompozitler üretilmiştir. Kompozitlerin dört noktalı eğilme yüklemesi altındaki mekanik performansları incelenmiş ve çoklu çatlak davranışları değerlendirilmiştir. Sonuçta, mekanik performansın lif

#### Effect of Polymeric Fiber Type on Flexural Performance of Cement Based Composites

Engineered Cementitious Composite (ECC) is a new kind of construction material that produced by the addition of polymeric fibers into a cement based

matrix. The main difference between ECC and the conventional fiber reinforced composites is its steady state multiple cracking behavior. Both load bearing and deformation capacity of these composites increase with the opening of each new crack and exhibit deformation hardening behavior in contrast to that of conventional fiber reinforced composites. This unique behavior of ECC is directly related to fiber, matrix and fiber-matrix interface properties.

In this study, composites were prepared by using different types of polymeric fibers and their effect on the flexural performance was investigated. For this purpose, plate composites with 25x60x300 mm dimensions were produced by using high molecular weight polyethylene, polyvinyl alcohol and high

tenacity polypropylene fiber at the same dosage (2% by volume). Mechanical performances of these composites were investigated under four-point flexural loading conditions and their multiple cracking behaviors were evaluated. In conclusion, mechanical performance is highly variable depending on the fiber type and ECC's that performing a flexural strength

between 6.8-21.5 MPa and a deflection capacity between 4.0-16.8 mm can be produced.

türüne bağlı olarak oldukça değişken olduğu tespit edilmiş ve eğilme dayanımı 6,8-21,5 MPa, sehim kapasitesi 4,0-16,8 mm arasında değişen ECC'ler üretilmiştir.

# 1. GİRİŞ

Başta beton olmak üzere, çimento esaslı kompozitlerin tamamı yapıları gereği gevrek bir göçme davranışı göstermektedir. Bu nedenle yük altında kolayca çatlamakta ve oluşan çatlak hızla ilerleyerek sistemin yük taşıma kapasitesini kaybetmesine neden olmaktadır [1]. Günümüzde, beton icerisine donati ve lif benzeri malzemelerin ilavesi ile geleneksel betona kıyasla daha yüksek çekme ve eğilme dayanımına sahip, şekil değiştirme yeteneği yüksek yeni nesil kompozitler üretilebilmektedir [2], ancak, üretilen bu kompozitlerin birçoğu deformasyon yumuşaması davranışı göstererek yük taşıma kapasitesinin yalnızca tek çatlakta kontrollü bir şekilde kaybedilmesini sağlamaktadır. Yeni nesil cimento esaslı kompozitlerde ise bu davranışın aksine çoklu çatlama ve deformasyon sertleşmesi davranışı gözlenmektedir [3].

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (ECC), yükleme altında geleneksel betona kıyasla oldukça yüksek deformasyon kapasitesine sahip yeni nesil yapı malzemeleridir. ECC, mikro-mekanik açıdan tasarlanması sonucu istenilen

performans hedefine göre üretilebilmektedir [4]. Yapısı gereği gösterdiği çoklu çatlama davranışına bağlı olarak hem yük taşıma hem de deforme olma kapasitesini, bünyesinde

<sup>1.</sup>Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Çorum, erengodek@hitit.edu.tr 2. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, muhammerkeskinates@kmu.edu.tr 3. Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, yildirimtarik75@gmail.com 4-5. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir kamile.tosun@deu.edu.tr, burak.felekoglu@deu.edu.tr (\*) Türkiye Hazır Beton Birliği tarafından düzenlenen Beton İstanbul 2017 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

açılan her bir yeni çatlak ile üzerine uygulanan yükleme türünden bağımsız olarak arttırabilmektedir (deformasyon sertleşmesi davranışı)[5]. Bu sayede, başta ABD olmak üzere bazı yabancı ülkelerde, geleneksel betona kıyasla daha fazla birim deformasyon yeteneğine sahip, enerji sönümleme kapasitesi yüksek kompozitler üretilebilmektedir [6].

ECC icerisinde iki temel faz bulunmaktadır. Bunlar matris fazı ve lif fazı olarak adlandırılabilir. Bu iki fazın özellikleri ve bunların mekanik yükleme altında birbirleriyle gösterdiği uyum. kompozit performansını etkileyen en önemli parametreleridir [5, 7, 8]. Kompozitin matris fazında ana bileşen olarak çimento, cesitli mineral katkılar ve ince tane boyutlu (<100 µm) agregalar kullanılmaktadır. Agrega en büyük tane boyutu; homojen lif dağılımının sağlanması ve kırılma tokluğunun azaltılması için geleneksel betona kıyasla önemli oranda küçültülmüştür. Lif fazına ise çatlama sonrasında gerilme dağılımının yeniden yayılabilmesi için polimer kökenli mikro lifler eklenmektedir. Literatürdeki ilk ECC örnekleri naylon, aramid, polietilen ve polipropilen türevi lifler kullanılarak üretilmiştir [9]. Günümüzde ise ECC üretiminde en yaygın olarak kullanılan lifler polivinil alkol liflerdir [10, 11]. Ayrıca, son yıllarda liflerin üretilme tekniklerinde gelişen yöntemler yardımı ile yüksek molekül ağırlıklı polietilen ve yüksek çekme dayanımlı polipropilen gibi yeni nesil polimerik lifler kullanılmaktadır [12, 13].

Birinci derece deprem kuşağında bulunan ülkemizde ise, bu yeni nesil yapı malzemesinin üretilebilirliği hâlen üzerine çalışılan güncel bir araştırma konusudur. Bu çalışma kapsamında, üç farklı polimerik lif türü kullanılarak çimento esaslı kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, son dönemlerde üzerine yoğun araştırmaların yapıldığı yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE), polivinil alkol (PVA) ve yüksek çekme dayanımlı poliproplen (HTPP) lifler kullanılmıştır. Kompozitlerin eğilme yüklemesi altındaki mekanik performansı 28 günlük dört noktalı eğilme deneyi ile tespit edilerek, lif türünün kompozitin eğilme ve çoklu çatlak davranışı üzerine etkisi incelenmiştir.

### 2. KULLANILAN MALZEMELER VE YÖNTEM

Kompozitlerin üretiminde CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmış ve kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de sunulmuştur. Karışımlarda ince agrega olarak özgül ağırlığı 2,65 ve Blaine özgül yüzey alanı 538 m²/kg olan kireç taşı tozu kullanılmıştır. Kullanılan kireç taşının 63 µm'lik elekten geçme yüzdesi ise %99'dur. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı ise TS EN 934-2 [14] Standardı'na göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı sınıfına girmektedir. Kompozitlerin lif fazında Ultra Yüksek Molekül Ağırlıklı Polietilen (UHMWPE), Polivinil alkol (PVA) ve Yüksek Çekme Dayanımlı Poliproplen (HTPP) olmak üzere üç farklı polimerik kökene sahip lif kullanılmıştır. Kullanılan liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur. Üretilen kompozitin 1 m³ hacim için hesaplanan malzeme miktarları ise Tablo 3'te verilmiştir.

Kimyasal Analiz	Basit Oksit Oranları (%)	Basınç Dayanımı (MPa)			
SiO <sub>2</sub>	18,3	2 Günlük (MPa)	30,6		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,86	7 Günlük (MPa)	44,9		
Fe <sub>2</sub> 0 <sub>3</sub>	3,11	28 Günlük (MPa)	55,7		
Ca0	64,4	Fiziksel Özellikleri			
MgO	1,27	Özgül Ağırlık	3,10		
Na <sub>2</sub> 0	0,53	Özgül Yüzey (m²/kg)	337		
K <sub>2</sub> 0	0,76	Hacim Sabitliği (mm)	0,5		
SO <sup>3</sup>	3,62				
Klor	0,006				
Serbest CaO	1,8				

#### Tablo 1: Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

## **MAKALE ARTICLE**

	UHMWPE	PVA	HTPP
Özgül Ağırlık	0,97	1,30	0,91
Uzunluk (mm)	10	12	10
Çap (µm)	18	39	12
Elastisite Modülü (GPa)	107	42,8	6
Çekme Dayanımı (MPa)	3400	1620	850-900
Kopma Uzaması (%)	3,9	6	21

**Tablo 2:** Kullanılan polimerik liflerin fiziksel ve mekanik özellikleri

Tablo	<b>3:</b> 1 m	³ hacim	için	hesapl	lanan	malzeme	miktarları

(kg/m³)	Çimento	Kireç taşı Tozu	Su	Süper akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı*	Toplam
PE-ECC <sup>1</sup>	854	854	380	13,9	2101,9
PVA-ECC <sup>2</sup>				10,1	2098,1
HTPP-ECC <sup>3</sup>				16,8	2104,8

<sup>1</sup>Hacimce %2 oranında UHMWPE lif eklenmiştir.

<sup>2</sup>Hacimce %2 oranında PVA lif eklenmiştir.

<sup>3</sup>Hacimce %2 oranında HTPP lif eklenmiştir.

\*Akıcı kıvamlı kompozit üretimi için gerekli miktar döküm sırasında ayarlanmıştır.

Kompozitler hazırlanırken 40 l kapasiteli, üç farklı devirde karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dk.) sahip, zemin tipi bir Hobart mikser kullanılmıştır. Karışımlar hazırlanırken ilk olarak toz malzemeler 2 dk. birinci devirde kuru karıştırılmış, daha sonra su ve katkı ilavesi yapılarak 1 dk. birinci devirde ve 2 dk. ikinci devirde karıştırılmıştır. Ardından polimerik lif ilavesi yapılmış ve liflerin matris içerisinde ayrışması ve homojen bir şekilde dağılması amacıyla 2 dk ikinci devirde ve 3 dk ücüncü devirde karıştırma işlemine devam edilmiştir. Karışım içerisinde lif topaklaşması olup olmadığı el ile kontrol edilmiş, eğer topaklanma varsa lif topaklarını açtırmak amacıyla ek bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Her karışımdan 3 adet 25x60x300 mm boyutlarında toplamda 9 adet kompozit kalıba alınmıştır. Kalıpların üzeri plastik filmle kapatılarak kalıp içerisinde 3 gün bekletilmiştir. Kalıplardan sökülen numuneler 28 gün boyunca 20±2 °C'deki suda kür edilmiş ve dört noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır (Şekil 1).









Eğilme deneylerinde, 600 kgf kapasiteli yük hücresine sahip, deformasyon hızı kontrollü bir cihaz kullanılmıştır. Deformasyon hızı 0,5 mm/dk. ve yükleme açıklığı 260 mm olacak şekilde dört noktalı eğilme yüklemesi yapılmış (Şekil 1a) ve yük-orta nokta sehimi artış değerleri bilgisayardaki yazılım yardımıyla kaydedilmiştir. Elde edilen bu veriler kullanılarak kompozitlerin yük-sehim eğrileri çizdirilmiştir. Kompozitlerin ilk çatlak yükü ise, yük-sehim eğrisinin lineerliğinin bozulduğu ilk nokta olarak belirlenmiştir. Yük artışının son bularak düşüşe geçtiği nokta ise maksimum eğilme yükü olarak dikkate alınmış ve bu noktaya karşılık gelen orta nokta sehim değeri sehim kapasitesi olarak adlandırılmıştır. Kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri PL/bh² formülü ile hesaplanmıştır. Burada P maksimum eğilme yükü, L mesnetler arası açıklık, b en kesit genişliği, h ise en kesit yüksekliğidir. Tokluk hesabında ise ilk çatlak bölgesi ile deformasyon sertleşmesi bölgesinin tepe noktasına kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve "pik" tokluk olarak adlandırılmıştır (pik tokluk=maksimum yüke kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan). Pik tokluk, kompozitin yük kaybetmeye başlamadan önceki "tokluk kapasitesi" olarak düşünülebilir.

### 3. KOMPOZİTLERİN MEKANİK PERFORMANSLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

#### 3.1. Yük-Sehim Eğrilerinin Değerlendirilmesi

Kompozitlerin yük-sehim eğrileri Şekil 2'de sunulmuştur. Yüksehim eğrileri yardımıyla, kompozitlerin taşıyabildiği en büyük yük ile karşılık gelen sehim değerleri hesaplanmış ve ortalamaları alınarak noktalar hâlinde şekil içerisinde gösterilmiştir. Yük-sehim eğrileri incelendiğinde, PE lif kullanılarak üretilen kompozitin hem yük taşıma hem de sehim kapasitesinin PVA ve HTPP lif içeren kompozitlere kıyasla belirgin ölçüde fazla olduğu görülmektedir. PVA ve HTPP lif içeren kompozitler kıyaslandığında ise, PVA lif içeren kompozitin yük taşıma kapasitesinin HTPP lif içeren kompozitlere kıyasla bir miktar fazla olduğu görülmektedir, ancak, yine aynı kompozitlerin sehim kapasiteleri dikkate alındığında HTPP lif içeren kompozitlerin sehim yapma yeteneğinin PVA lifli kompozitlere kıyasla %120 oranında daha fazla olduğu tespit edilmiştir.







**Şekil 2:** Kompozitlerin yük-sehim eğrileri, a) PE-ECC, b) PVA-ECC, c) HTPP-ECC.

#### 3.2. Kompozitlerin İlk Çatlak ve Eğilme Dayanımlarının Değerlendirilmesi

Yük-sehim eğrilerinden elde edilen ilk çatlak ve eğilme dayanımı değerleri ile dayanım oranı (eğilme dayanımı/ilk çatlak dayanımı:  $\sigma_i/\sigma_{maks}$ ) - çatlak sayısı ilişkisi Şekil 3'te sunulmuştur. Şekil 3a incelendiğinde, PE ve HTPP lif içeren kompozitlerin ilk çatlak dayanımlarının birbirine yakın olduğu görülmektedir, ancak, PVA lif içeren kompozitlerin çatlak dayanımlarının diğer liflere kıyasla neredeyse 3 kat daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Kompozitler içerisindeki en yüksek eğilme dayanımı PE lifli kompozitlerden elde edilmiştir (17,5-21,5 MPa). PVA ve HTPP lifli kompozitlerin eğilme dayanımları ise PE lifli kompozitlere kıyasla yaklaşık olarak %50 oranında daha düşük olup 7-10 MPa arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 3a).

ECC'nin çoklu çatlak davranışına etki eden en önemli parametrelerden birisi de daha önceden de belirtildiği üzere kompozitlerin eğilme dayanımı/ilk çatlak dayanımı ( $\sigma_i/\sigma_{maks}$ ) oranıdır. Üretilen kompozitlerin  $\sigma_i/\sigma_{maks}$  oranı ile çatlak sayıları arasındaki ilişki Şekil 3b'de gösterilmiştir.  $\sigma_i/\sigma_{maks}$  oranının artışına bağlı olarak kompozitlerin çatlak sayılarının da belirgin bir şekilde arttığı görülmektedir (R=0,91). PE lifli kompozitlerde bu oran 4,6-7,5 arasında değişirken çatlak sayıları da 107-141 arasında değişiklik göstermiştir. Dayanım oranın en düşük olduğu PVA lifli kompozitlerde ise (1,2-1,5 arasında) çatlak sayıları 7-10 civarındadır. HTPP lifli kompozitlerde ise dayanım oranının 2,2 ile 3,5 arasında değiştiği ve artan dayanım oranı ile birlikte kompozitlerin çoklu davranışının PVA lifli kompozitlere kıyasla gelişme gösterdiği tespit edilmiştir.

# **MAKALE ARTICLE**

25 20 15 10 5 0 PE-ECC PVA-ECC HTPP-ECC ilk Çatlak Dayanımı (MPa) Eğilme Dayanımı (MPa) (a)



**Şekil 3:** Kompozitlerin; a) İlk çatlak ve eğilme dayanımı değerleri, b) Dayanım oranı-çatlak sayısı ilişkisi.

#### 3.3. Kompozitlerin Bağıl Tokluk, Sehim Kapasitesi ve Çatlak Sayısı İlişkilerinin Değerlendirilmesi

Kompozitlerin çatlak sayısı-sehim kapasitesi ve sehim kapasitesi-bağıl tokluk grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur. Şekiller içerisinde, sütun grafik değerleri sol düşey eksende, çizgisel grafik değerleri ise sağ düşey eksende gösterilmiştir. Genel olarak bakıldığında, çatlak sayısısehim kapasitesi ve sehim kapasitesi-bağıl tokluk ilişkisinin birbirine paralel olduğu görülmektedir. Artan çatlak sayısıyla birlikte kompozitlerin sehim kapasiteleri de artmıştır (Şekil 4a). Kompozitlerin çatlak sayılarıyla sehim kapasiteleri arasında pozitif ve güçlü bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir (R=0,76).



**Şekil 4:** Kompozitlerin, a) çatlak sayısı-sehim kapasitesi, b) çatlak sayısı-sehim kapasitesi korelasyonu.

Benzer şekilde sehim kapasitesinin artışı da kompozitlerin pik tokluk değerlerinin artmasını sağlamıştır (Şekil 5). Çoklu çatlak davranışı açısından en olumlu sonuçlar PE-ECC'den elde edilmiştir (Şekil 5a). Buna bağlı olarak, sehim kapasitesi ve pik tokluk açısından da en olumlu performansı yine PE-ECC göstermiştir. PVA-ECC'nin çatlak sayısının göreceli olarak daha düşük olması, sehim kapasitesi ve pik tokluk değerlerini de sınırlandırmıştır. HTPP-ECC'de ise PVA-ECC'ye kıyasla daha etkili bir çoklu çatlak davranışı gözlenmiş ve buna bağlı olarak hem sehim kapasitesi hem de pik tokluk değerleri yaklaşık olarak 2 kat artmıştır. Kompozitlerin sehim kapasitesi ile pik tokluk değerleri arasındaki korelasyon katsayısı R=0,91 olarak hesaplanmıştır (Şekil 5b). Ayrıca, artan sehim miktarına bağlı olarak kompozitlerin pik tokluk değerlerinin konveks bir artış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun çatlak sayısının yanı sıra çatlak genişliklerinin de artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.







**Şekil 5:** Kompozitlerin, a) Pik tokluk-sehim kapasitesi, b) Pik tokluk-sehim kapasitesi korelasyonu

### 4. GENEL DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Hem dayanım hem de sehim kapasitesi açısından PE lif kullanımı en olumlu sonuçları vermiştir. HTPP lif kullanımı PVA lif kullanımına kıyasla sehim kapasitesi, pik tokluk ve çoklu çatlak davranışı açısından daha olumlu sonuçlar vermiştir. PVA lifli kompozitlerde ise eğilme dayanımı HTPP lifli kompozitlere kıyasla bir miktar daha fazladır. PVA liflerin hidrofilik yapısı nedeniyle çimento ile bağ yapması liflerin sıyrılmasını zorlaştırmış, bu nedenle kompozitlerin yük taşıma kapasiteleri bir miktar artarken sehim kapasiteleri göreceli olarak kısıtlı kalmıştır. PVA liflerin deney sonunda koparak göçtüğü gözlenmiştir. HTPP lifli kompozitlerde ise liflerin hidrofobik yapısı ve çapının küçük olması sebebiyle enkesite düşen lif sayısı arttığından (PVA'ya kıyasla 10 kat daha fazla lif) yük taşıma kapasitesinde belirgin bir düşüş olmadan sehim kapasitesi arttırılabilmiştir. HTPP liflerde ise göçme aşamasında genişleyen çatlakta sıyrılma gözlenmiştir.

Artan çatlak sayısına bağlı olarak tüm kompozitlerin sehim kapasitesinin ve pik tokluk değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. Çoklu çatlak davranışı açısından en olumlu sonuçlar yine PE lif kullanılan kompozitlerden elde edilmiştir. ECC'nin deforme olabilme yeteneğini sağlayan temel farklılık, kompozitin gösterdiği çoklu çatlak davranışıdır. Etkili bir çoklu çatlak davranışının sağlanması ile kompozitin hem sehim kapasitesi hem de pik tokluğu artacaktır.

Bu küçük kapsamlı deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, farklı matrislerde de inceleme yapılarak life uygun matrisin seçilmesinin kompozit performansını geliştireceği düşünülmektedir.

### Teşekkür

Deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan ekipmanı ve gerekli finansal desteği sağlayan Dokuz Eylül Üniversitesi ve TÜBİTAK'a (114M246), malzeme desteği için Çimentaş firması kalite kontrol şefi Kim. Yük. Müh. Nilüfer Azrak Karakaş'a (Çimento), Grace firması yetkilisi Dr. Müh. Ali Raif Sağlam'a, Saint-Gobain Brasil firması yetkilisi Sergio İkai'ye ve Kuraray firması yetkilisi Takayuki Kobayashi'ye teşekkürlerimizi sunarız.

### Kaynaklar

[1] Yang, E. H., "Designing Added Functions in Engineered Cementitious composites", PhD Thesis, The University of Michigan, ProQuest, 2008.

[2] Bentur, A., and Mindess, S., "Fibre Reinforced Cementitious Composites", CRC Press, 2006.

[3] Naaman, A. E. ve Reinhardt, H. W., "Proposed Classification of HPFRC Composites Based on Their Tensile Response", Materials and Structures, No.39, Cilt.5, pp. 547-555, 2006.

[4] Kim, J. K., Kim, J. S., Ha, G. J., Kim, Y. Y., "Tensile and Fiber Dispersion Performance of ECC (engineered cementitious composites) Produced with Ground Granulated Blast Furnace Slag", Cement and Concrete Research, No.37, Cilt.7, pp. 1096-1105, 2007.

[5] Li, V.C., "From Micromechanics to Structural Engineering - The Design of Cementitious Composites for Civil Engineering Applications". JSCE Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, No.10, Cilt.2, pp. 37-48, 1993.

[6] Li, V.C., "On Engineered Cementitious Composites (ECC)", Journal of Advanced Concrete Technology, No.1, Cilt.3, pp. 215-230, 2003.

# **MAKALE ARTICLE**

[7] Li V. C., "Engineered Cementitious Composites (ECC) -Tailored Composites Through Micromechanical Modeling", Fibre reinforced concrete: Present and the future. In: Banthia N, Mufti A, (eds.), Canadian Society of Civil Engineers, pp. 64-97, 1998.

[8] Kanda, T., Li, V.C., "Practical Design Criteria for Saturated Pseudo Strain Hardening Behavior in ECC", Journal of Advanced Concrete Technology, No.4, Cilt.1, pp. 59-72, 2006.

[9] Li, V.C., Wu, H.C., "Conditions for Pseudo Strain-hardening in Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites", Applied Mechanics Reviews, No.45, Cilt.8, pp. 390-398, 1992.

[10] Redon, C., Li, V. C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., Ogawa, A., "Measuring and Modifying Interface Properties of PVA Fibers in ECC Matrix", Journal of Materials in Civil Engineering, No.13, Cilt.6, pp. 399-406, 2001. [11] Li, V. C., Wu, C., Wang, S., Ogawa, A., and Saito, T. (2002). "Interface Tailoring for Strain-hardening Polyvinyl Alcoholengineered Cementitious Composite (PVA-ECC)". ACI Materials Journal, 99(5), 463-472.

[12] Ranade, R., Li, V. C., Heard, W.F., "Tensile Rate Effects in High Strength-high Ductility Concrete", Cement and Concrete Research, No.68, pp. 94-104, 2015.

[13] Felekoglu, B., Tosun-Felekoglu, K., Ranade, R., Zhang, Q., Li, V.C. "Influence of Matrix Flowability, Fiber Mixing Procedure, and Curing Conditions on the Mechanical Performance of HTPP-ECC", Composites Part B: Engineering, No.60, pp. 359-370, 2014.

[14] EN, T.S. 934-2, "Admixtures For Concrete, Mortar and Grout-Part 2: Concrete Admixtures; Definitions, Requirements, Conformity, Marking and Labelling". TSE (Turkish Standards Institute), 2002.