

METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

**Eren GÖDEK, Muhammer KESKİNATEŞ*,
Kamile TOSUN FELEKOĞLU, Burak FELEKOĞLU**

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye

Geliş / Received: 25.06.2015

Düzeltilmelerin gelişi / Received in revised form: 06.09.2015

Kabul / Accepted: 07.09.2015

ÖZ

Bu çalışmada farklı su/bağlayıcı (S/B) oranları ve süperakışkanlaştırıcı katkı miktarları kullanılarak polivinil alkol (PVA) lifli içeren metakaolin katkıli kompozitler üretilmiştir. Söz konusu kompozitlerin çoklu çatlak davranışını geliştirmeye yönelik olarak yapılan boşluk yapısı modifikasyonunun ve uygulanan kür koşullarının etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında 36 adet 40x40x160 mm ayrıtlı örnek hazırlanmıştır. Lifli karışımların işlenebilirliğin eşitlenmesi için süperakışkanlaştırıcı miktarı S/B oranı artışı ile azalacak şekilde ayarlanmıştır. Hazırlanan örneklerin yarısına matrislerin boşluk yapısının modifikasyonu için sabit miktarda 3 mm çaplı plastik tane ilavesi yapılmıştır. Kür koşullarının etkisini incelemek amacıyla her seriden örneklerin yarısı suda (20±1°C) diğer yarısı da havada (laboratuvar ortamında 20±4°C, %60-70 bağıl nem) kür edilmiştir. 28 günlük kür süresi sonunda 3 noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin; ilk çatlak dayanımları, eğilme dayanımları, sehim kapasiteleri ve efektif eğilme tokluğu değerleri belirlenmiştir. Ayrıca eğilme sonrası çatlak analizi yapılmış ve örnekler iki parçaya ayrılıp eğilme deneyi sonrası basınç dayanımları da test edilmiştir. Kompozitlerin eğilme yükü etkisi altında gösterdikleri çoklu çatlak davranışları kıyaslamalı olarak incelenmiştir ve elde edilen bulgular değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Lif katkıli kompozitler, metakaolin, çoklu çatlak davranışı, polivinil alkol lifi, kür etkisi

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON THE IMPROVEMENT OF MULTIPLE CRACKING BEHAVIOUR OF FIBER REINFORCED METAKAOLIN-BASED COMPOSITES

ABSTRACT

In this study, polyvinyl alcohol (PVA) fiber reinforced composites incorporating metakaolin have been prepared by using different water/binder (W/B) ratios and superplasticizer dosages. The role of pore structure modification and curing conditions have been investigated for the purpose of improving the multiple-cracking behaviour. 36 specimens with 40x40x40 mm dimensions have been prepared within the scope of the experimental study. Superplasticizer dosages have been adjusted with increasing W/B ratios for the purpose of equalizing the workability of fiber-reinforced mixtures. The pore structure of half of the specimens was modified by adding plastic particles with 3 mm diameter. For the purpose of investigating the effect of curing conditions, half of specimens of each series were cured in water (20±1°C) and others cured in air (laboratory conditions 20±4°C, 60-70% relative humidity). 3 point flexural loading tests were performed at the end of 28 days curing. The first cracking strength, flexural strength, deflection capacity and effective flexural toughness values have been determined. Additionally, crack analysis and compressive strength tests of two pieces for each specimen

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 232 301 70 41; e-mail/e-posta: muhammerkeskinates@hotmail.com

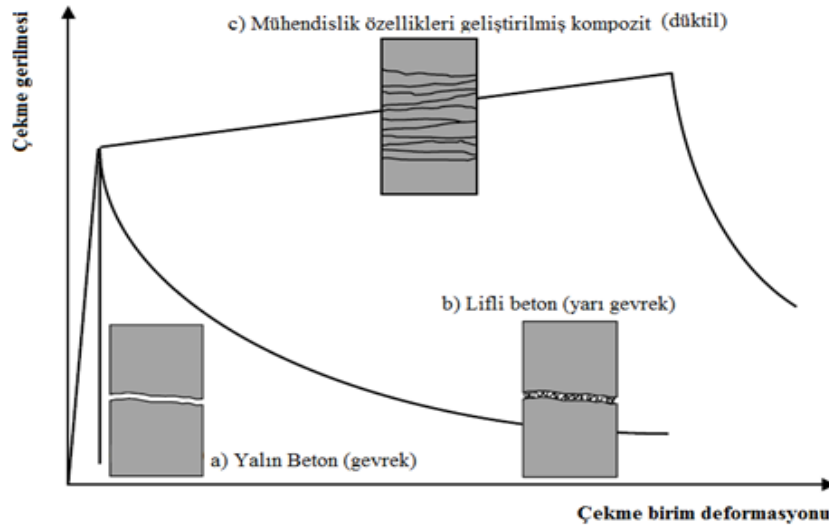
METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

after flexure was also performed. Multiple-cracking behaviour of composites under flexural loading has been comparatively investigated and results were evaluated.

Keywords: Fiber reinforced composites, metakaolin, multiple cracking behaviour, polyvinyl alcohol fiber, curing effect

1. GİRİŞ

Beton gevrek bir malzemedir ve çekme dayanımı betonarme hesaplarda ihmal edilecek kadar düşük seviyelerdedir. Aynı zamanda donatısız betonun çekme birim deformasyon kapasitesi yaklaşık % 0,01 seviyelerindedir [1]. Şekil 1a'da yalın beton için çekme gerilmesi ile birim deformasyon ilişkisi görülmektedir. Çekme gerilmesi altında göçme, ani şekilde ve tek çatlak açılması ile sonuçlanmaktadır. Donatı ilavesi yoluyla beton çekme ve eğilme etkilerine karşı güçlendirilebilir. Betonun çekme gerilmelerine karşı zayıflığını azaltmaya ve ilk çatlak sonrası davranışını geliştirmeye yönelik olarak çeşitli lif türleri beton ve/veya harç bünyesine eklenebilir. Ancak bu tür kompozitlerde kullanılabilirlik lif miktarı işlenebilirlik problemi nedeniyle sınırlı seviyede kalmaktadır. Yetersiz lif miktarı da çoğunlukla ilk çatlak sonrasında aynı çatlağın genişlemesine ve deformasyon yumuşaması davranışına yol açmaktadır. Şekil 1b'de lifli beton için bu davranış görülmektedir. Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlerde ise hacimce % 2 lif kullanımı ve uygun lif-matris seçimi yapılarak çoklu çatlak davranışı elde edilebilmektedir [2-5]. İlk çatlak sonrasında lifler açılan kesitte yeterli miktarda ve homojen dağılımda ise; bir de lif-matris arasındaki aderans yeterli seviyede ise lifler gerilmeyi kesitin diğer bölgelerine de taşıyabilmektedir. Böylece kesitin diğer bölgelerinde daha küçük kusurların bulunduğu bölgelerde de gerilme seviyesi yükselmekte ve söz konusu kusurlar da aktive olarak yeni çatlaklar oluşma ihtimali artmaktadır. Her yeni çatlak açıldığında ortaya çıkan lifler çekme birim deformasyon kapasitesine katkıda bulunmaktadır. Çatlak sayısı ne kadar fazla olursa, çekme birim deformasyon kapasitesi de o kadar fazla olmaktadır. Kritik bir gerilme seviyesine kadar yeni çatlak açılması devam etmekte, ancak açılan kesitlerden herhangi biri köprüleme gerilmesi kapasitesini yitirdiğinde söz konusu kesitteki çatlak genişleyerek kompozit göçmektedir. Şekil 1c'de çoklu çatlak davranışı geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlere bir örnek verilmiştir. Bu örnekte görüldüğü üzere, çekme birim deformasyon kapasitesi diğer kompozitlere göre önemli ölçüde artmıştır [6]. Bu şekilde tasarlanmış yüksek düktiliteli çimento esaslı kompozitlerin çekme birim deformasyon kapasitesi % 2,5-4,0 seviyelerine kadar çıkabilmektedir [7].



Şekil 1. Çekme gerilmesi altında; yalın betonun (a), lifli betonun (b) ve mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlerin (c) davranışı [1]

Çoklu çatlak davranışı gösteren ve yüksek düktiliteye sahip çimento esaslı kompozitler Prof. Dr. Victor Li ve grubu tarafından geliştirilmiş ve “Mühendislik özellikleri geliştirilmiş kompozitler (Engineered Cementitious Composites (ECC))” olarak adlandırılmıştır [8]. Kuzey Amerika’da MIT ve Michigan Üniversitesinde ilk teorik

temelleri 90'lı yıllarda atılmış olan bu kompozitlerle ilgili yoğun araştırma geliştirme ve modelleme çalışmaları günümüzde de sürmektedir [9-13].

ECC üretiminde kompoziti oluşturan matris ve lif fazlarının seçimi kompozitin çoklu çatlak potansiyeline sahip olmasını garantileyecek şekilde yapılmalıdır [4]. Lif olarak genellikle hacimce % 2 oranını aşmayacak şekilde polivinil alkol (PVA) kökenli lifler tercih edilmektedir. Matris dayanımı, lifin dayanımı, boyutu ve geometrisi ile matris-lif arasındaki aderansı etkileyen lif yüzey özellikleri gibi parametreler ECC tasarımında dikkate alınmaktadır [14]. ECC'nin matris fazında; uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli mineral katkılardan, silis kumu ve kireçtaşı tozu gibi inert malzemelerden yararlanılmıştır [3]. Bu tür malzemeler matris-lif aderansını değiştirerek köprüleme gerilmesi – çatlak genişliği davranışını etkiler. Kaolin killerinin 700-850°C ısıtılmasıyla elde edilen bir puzolan olan metakaolinin de ECC matrisinde kullanılabilme potansiyeli vardır. Özbay ve ark. [15] tarafından bu konuda yapılan çalışmalarda metakaolinin ECC'nin yüksek duktilite davranışını ve mekanik özelliklerini kaybetmeksizin; çatlak direnci, düşük su emme oranı ve klor iyonu geçirimsizliği gibi durabilite avantajları sağladığı saptanmıştır.

Bu makalede, metakaolin katkılı çimento esaslı lifli kompozitlerin çoklu çatlak davranışını geliştirmeye yönelik olarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ve elde edilen sonuçlar verilmiştir. Farklı su/bağlayıcı (S/B) oranı ve süperakışkanlaştırıcı katkı miktarları kullanılarak metakaolin katkılı matrisler hazırlanmıştır. Söz konusu matrislere, sabit miktarda PVA lif ilave edilmiş ve işlenebilirliğin eşitlenmesi için süperakışkanlaştırıcı miktarı S/B oranı artışı ile azalacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca üretilen örneklerin yarısına matrislerin boşluk yapısının modifikasyonu için sabit miktarda 3 mm çaplı plastik tane ilavesi yapılmıştır. Hazırlanan örnekler farklı koşullarda kür edildikten sonra 28 günlük eğilme ve eğilme sonrası basınç deneyleri yapılarak eğilme yükü etkisi altında gösterdikleri çoklu çatlak davranışları kıyaslamalı olarak incelenmiştir.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Materyal

Deneysel çalışmalarda özgül ağırlığı 3,09 olan CEM I 42.5R tipi Portland çimentosu ile özgül ağırlığı 2,60 olan metakaolin kullanılmıştır. Metakaolinin SiO₂ ve Al₂O₃ oranı sırasıyla % 52-54 ve % 42-44 aralığında olup, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O ve K₂O gibi diğer safsızlıkların oranı % 1'in altındadır. Bağlayıcılar dışında matrisin inert fazını kireçtaşı tozu oluşturmaktadır. Kireçtaşı tozu % 99 saflıkta olup, tamamı 63 mikron elekten geçmektedir ve özgül ağırlığı 2,65'tir. PVA lifler 39 µm çaplı ve 12 mm uzunluğunda olup, yoğunluk, çekme dayanımı, elastisite modülü ve kopma uzaması değerleri sırasıyla 1,3 g/cm³, 1620 MPa, 42,8 GPa ve % 6'dır. PVA liflerin yüzeyi çimento hamuru ile yüksek aderans yapabilmektedir. Deneysel çalışmada kullanılan polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcı katkının özgül ağırlığı 1,18, pH değeri 6,5 ve katı madde oranı % 35,7 olup TS EN 934-2 standardına göre yüksek oranda su azaltıcı / süperakışkanlaştırıcı sınıfına girmektedir. Boşluk yapısı modifikasyonu amacıyla PETKİM Petrokimya Holding A.Ş. üretimi YYPE I668 Pellet plastik taneleri kullanılmıştır. Tane boyutu eşit ve 3 mm çaplı plastik tanelerin hidrofob yapıları nedeniyle çimento ile aderansları zayıftır. Harç bünyesinde yapay boşluk oluşturma amacıyla kullanılmışlardır.

2.1.1. Karışım Oranları

Üç farklı su/bağlayıcı (S/B=0,53, 0,63 ve 0,78) oranında ve bağlayıcı madde miktarının yarısı çimento, diğer yarısı metakaolin olacak şekilde matrisler hazırlanmıştır. Karışım oranları Tablo 1'de sunulmuştur. Söz konusu matrislere, sabit miktarda PVA lif ilave edildiğinde işlenebilirliğin benzer hale getirilmesi amacıyla süperakışkanlaştırıcı miktarı S/B oranı artışı ile azalacak şekilde belirlenmiştir.

2.1.2. Deney Programı ve Örneklerin Hazırlanması

Tablo 1'de karışım oranları verilen kompozitler doğal boşluk yapısıyla birer set hazırlanmış ve "N" koduyla adlandırılmıştır. Ayrıca boşluk modifikasyonu amacıyla toplam hacmin % 6'sı oranında 3 mm çaplı plastik taneler ilave edilerek ikinci bir set daha hazırlanmış ve "M" koduyla adlandırılmıştır. Kür koşullarının çoklu çatlak davranışına etkisini incelemek amacıyla her seriden hazırlanan 6'şar adet prizmatik örneğin yarısı suda (20±1°C) diğer yarısı da havada (laboratuvar ortamında 20±4°C, % 60-70 bağıl nem) 28 gün kür edilmiştir. Havada ve suda kür koşulları sırasıyla "A" ve "W" harfleri ile kodlanmıştır. Örneklerin kodlanmasında kullanılan kısaltmalar Tablo 2'den takip edilebilir.

METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tablo 1. Kompozitlerde kullanılan malzeme miktarları (kg/m³)

Seri kodu (S/B oranı)	Çimento (kg/m ³)	Taş Tozu (kg/m ³)	Metakaolin (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Süperakışkanlaştırıcı (kg/m ³)	PVA lif (kg/m ³)
0,53	372	745	372	395	36	26
0,63	351	702	351	442	15	26
0,78	319	637	319	497	9	26

Bir Hobart mikser kullanılarak her karışımdan yaklaşık 1 dm³ harç hazırlanmış ve dökümlerin tümünde aynı karıştırma yöntemi kullanılmıştır: Öncelikle toz malzemeler 30 sn kuru karıştırılmış, daha sonra su ilavesi yapılarak 1 dk karıştırılmıştır. Devamında süperakışkanlaştırıcı katkı ilave edilip 2 dk daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Homojen ve akıcı bir matris karışımı elde edildikten sonra lif ilavesi yapılmış ve 2 dk daha karıştırılmıştır. Boşluk modifikasyonu yapılan serilerde bu aşamadan sonra plastik taneler ilave edilip 1 dk daha karıştırmaya devam edilmiştir. Her karışımdan 3'er adet 40x40x160 mm'lik prizmatik kalıplara doldurulmuştur. Taze harcın sıkıştırılması için dış vibrasyon uygulanmıştır. Kür koşullarının davranışa etkisini incelemek amacıyla aynı seri dökümler iki kez tekrarlanmıştır. Toplam 16 adet döküm gerçekleştirilmiş ve 48 adet prizma örnek hazırlanmıştır. Dökümü gerçekleştirilen örnekler kalıp içinde 1 gün bekledikten sonra kalıptan alınmış ve örnekler yukarıda sözü edilen kür koşullarında 28 gün bekletilmiştir.

Tablo 2. Örneklerin kodlanmasında kullanılan kısaltmalar

Doğal boşluk yapısında		Boşluk modifikasyonu yapılmış	
Havada kür	Suda kür	Havada kür	Suda kür
0,53N-A	0,53N-W	0,53M-A	0,53M-W
0,63N-A	0,63N-W	0,63M-A	0,63M-W
0,78N-A	0,78N-W	0,78M-A	0,78M-W

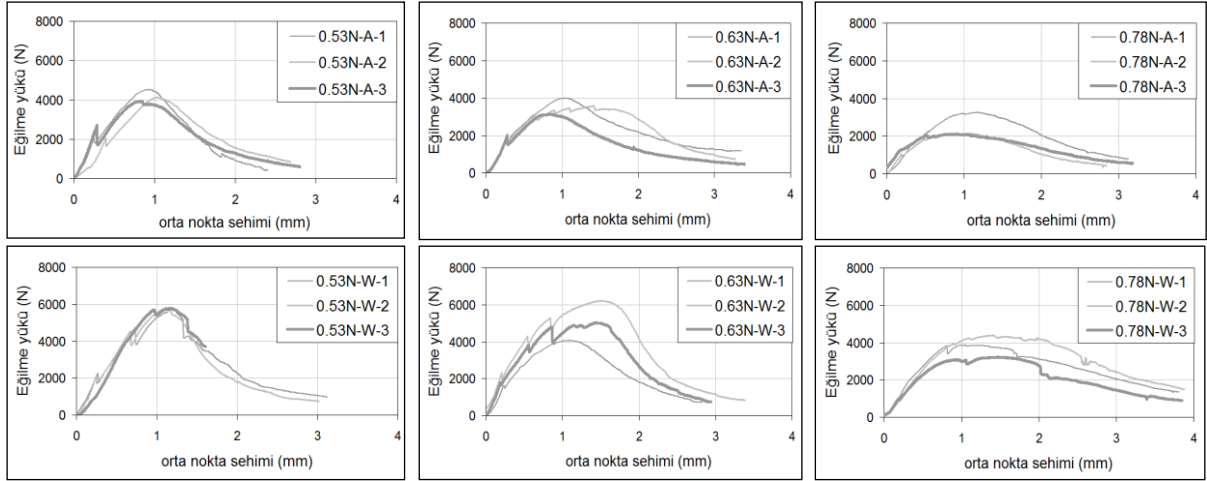
2.2. Metot

Örneklerin 28 günlük eğilme yükü - orta nokta sehimi eğrileri üç noktalı eğilme yüklemesi altında deformasyon kontrollü bir eğilme cihazına bağlı bir yük hücresi ve LVDT (Linear Variable Differential Transformers) yardımıyla 0,5 mm/dk hızla yükleme yapılarak elde edilmiştir. LVDT'ler $\pm 0.5\text{mm} - \pm 1000\text{mm}$ hassasiyetine sahip manyetik ölçme cihazlarıdır [16]. Eğilme yükü - orta nokta sehimi eğrilerinden ilk çatlak yükü ve maksimum yük değerleri okunup, "ilk çatlak dayanımı" ve "eğilme dayanımı" hesaplanmıştır. Maksimum yükteki sehim değeri belirlenip, eğrinin bu noktaya kadar altında kalan alan hesaplanarak "efektif eğilme tokluğu" belirlenmiştir. Eğilme deneyi sonrasında örneklerin yüzeylerinde oluşan çatlaklar işaretlenmiş ve fotoğrafları çekilerek çatlak sayımı yapılmıştır. Son olarak eğilme sonrası ayrılan parçalar üzerinde basınç dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA

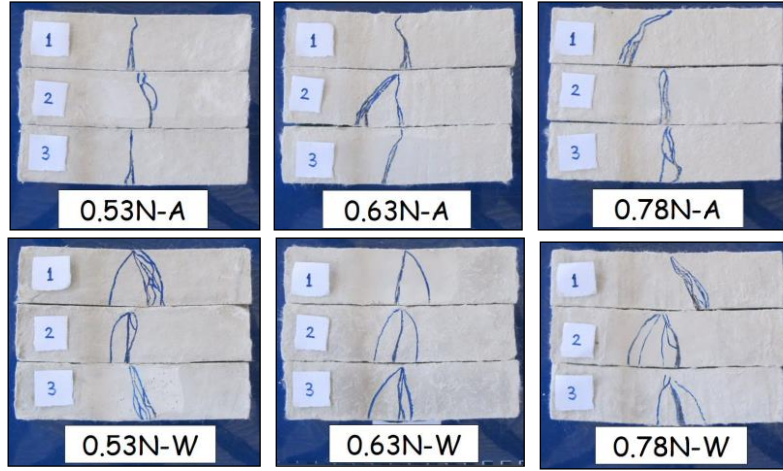
Doğal boşluk yapısına müdahale edilmeyen kompozitlerin eğilme yükü-orta nokta sehimi eğrileri Şekil 2'de toplu olarak sunulmuştur. Bu eğrilerden görüldüğü üzere, S/B oranı arttıkça hem havada hem suda kür için yük-sehim eğrilerinin tepe noktaları düşmekte, aynı zamanda sağa doğru ötelenmektedir. Aynı S/B oranına sahip kompozitler karşılaştırıldığında, suda kür edilen serilerin tepe noktalarının havada kür edilenlere göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı zamanda su kürü yapılmasıyla birlikte yük-sehim eğrilerinin çıkış kısımlarının dikleştiği görülmektedir. Örneklerdeki ilk çatlak öncesi rijitlik artışının, su kürü sayesinde, hidrasyon ve puzolanik reaksiyon ürünlerinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir [15]. İlk çatlak sonrası, suda kür edilen örneklerde daha belirgin şekilde görülen çoklu çatlak davranışı da lif-matris aderansını olumlu etkileyen puzolanik reaksiyon ürünlerine bağlanabilir.

E. GÖDEK, M. KESKİNATEŞ, K. TOSUN-FELEKOĞLU, B. FELEKOĞLU



Şekil 2. Boşluk modifikasyonu yapılmayan kompozitlerin (N serisi) eğilme yükü-orta nokta sehim eğrileri

Eğilme deneyi sonunda örneklerde meydana gelen çatlakların fotoğrafları Şekil 3’de verilmiştir. Suda kür edilmeyen serilerde çatlak sayıları ortalama 1-2 iken, kür yapılması çatlak sayılarını tüm S/B oranlarında arttırmıştır. Bu durum lif-matris arasındaki aderansın su kücü ile artmasından kaynaklanmış olabilir. İlk çatlak sonrasında açılan kesitte yükselen gerilmeyi köprüleyen liflerin matrisle olan aderansları yeterli olduğunda, daha küçük kusurların bulunduğu bölgelerde de çatlakların açılması mümkün olabilmektedir. Çatlak sayısının çok olduğu örneklerde yük-sehim eğrisinin sola ve üste doğru ötelemeği görülmektedir (Şekil 2 ve 3).

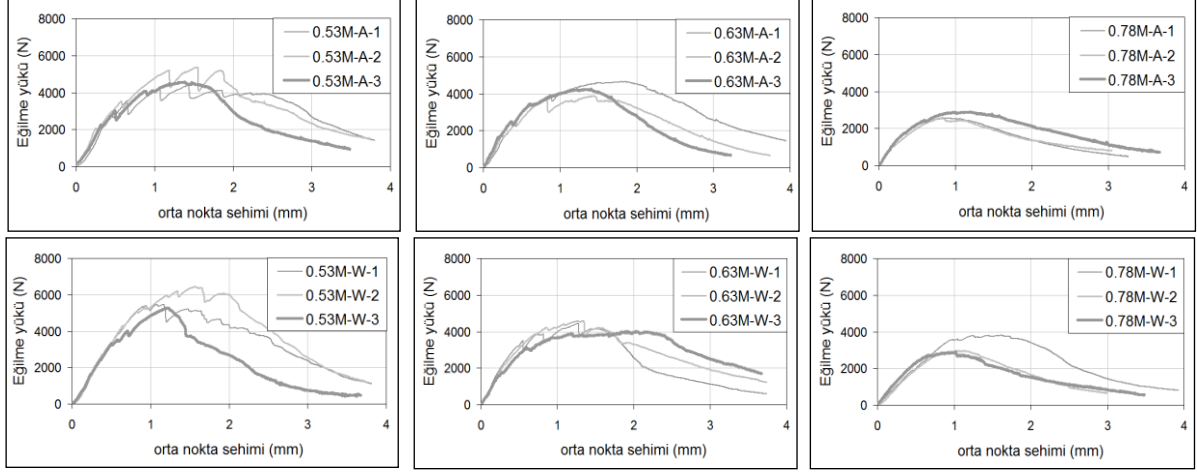


Şekil 3. Boşluk modifikasyonu yapılmayan kompozitlerin (N serisi) eğilme deneyi sonrası çatlak fotoğrafları

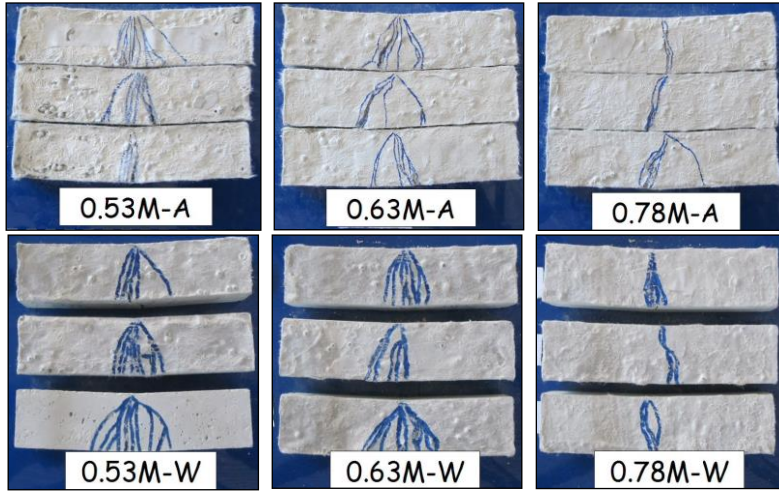
Şekil 4’te boşluk yapısı hacimce % 6 oranında 3 mm çaplı plastik tane ilavesi yapılan kompozitlerin eğilme yükü-orta nokta sehim eğrileri görülmektedir (M serisi). Tüm serilerde S/B oranı artışı ile eğilme yükü tepe noktaları modifikasyonsuz serilere (N serisi) benzer şekilde azalmaktadır. Ancak özellikle S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan kompozitlerde eğriler altında kalan alan artış göstermiştir. Gerek suda kür edilen gerekse kür edilmeyen örneklerde gözlenen çatlak sayısı da S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan kompozitlerde boşluk modifikasyonu ile artış göstermiştir (Şekil 5). Bu durum kür edilmemiş örneklerde daha belirgindir. Hem çatlak sayısı hem de çatlakların yayıldığı alan boşluk modifikasyonu yapılmayan N serisine göre artmıştır. S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan kompozitlerde, kür yapılmamasının eğilme dayanımını ve çoklu çatlak davranışına olan olumsuz etkisi, boşluk modifikasyonu ile giderilmiştir. Diğer taraftan S/B oranı 0,78 olan kompozitlerde boşluk modifikasyonunun hem kürlü hem de kürsüz seriler için belirgin bir olumlu veya olumsuz etkisi olmamıştır. Kompozit bünyesine katılan plastik taneler ilk çatlak yükü ile maksimum yük arasında açılan çatlak sayısını arttırmada, S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan kompozitler için yararlı olmuştur. Çünkü bu serilerde lif-matris arasındaki aderans liflerin yükü köprüleyerek sıyrılması için yeterli seviyelerdedir. Ancak lif-matris arası

METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

aderansın çok düşük olduğu $S/B=0,78$ serisinde ilk çatlak sonrası liflerin gerilmeyi köprüleme kapasitesi zayıf olduğu için bu seride çoklu çatlak performansı düşmüştür. Şekil 5'te verilen çatlak fotoğraflarından da bu farklılık açıkça görülmektedir.



Şekil 4. Boşluk modifikasyonu yapılan kompozitlerin (M serisi) eğilme yükü-orta nokta sehim eğrileri



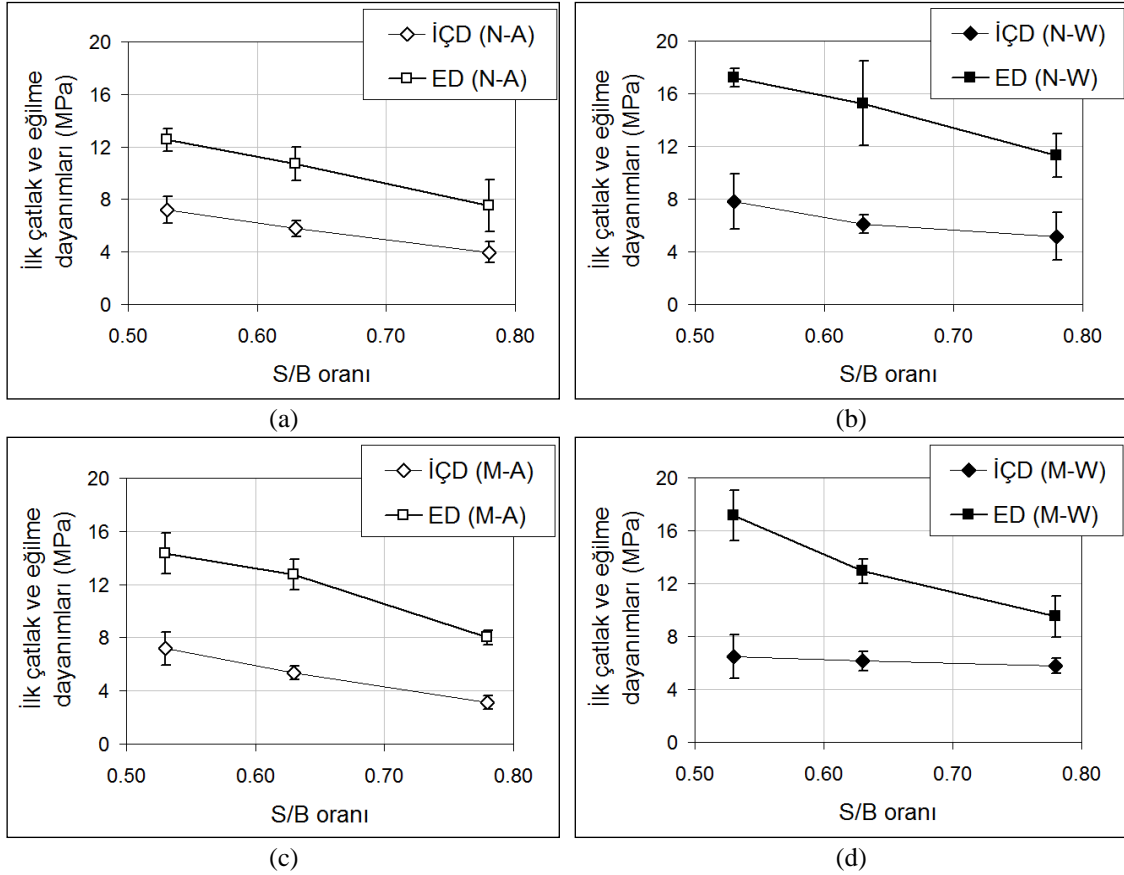
Şekil 5. Boşluk modifikasyonu yapılan kompozitlerin (M serisi) eğilme deneyi sonrası çatlak fotoğrafları

Şekil 6'da doğal boşluk yapısına müdahale edilmeyen kompozitlerin ilk çatlak dayanımı ve eğilme dayanımlarının S/B oranı ile değişimi görülmektedir. Ortalama değerlerin \pm standart sapma kadar değişkenliği aynı grafikte gösterilmiştir. Yük-sehim eğrilerinden elde edildiği üzere ilk çatlak ve eğilme dayanımları S/B oranı artışı ile azalmakta, su kürü ile artmaktadır. Su kürü uygulanan $S/B=0,53$ serisinde ilk çatlak dayanımı 8 MPa ve eğilme dayanımı 17 MPa seviyelerinde iken, $S/B=0,78$ serisinde ilk çatlak dayanımı 6 MPa ve eğilme dayanımı 11 MPa seviyesine düşmüştür. Buna karşın maksimum yükteki sehim değerleri S/B oranı arttıkça artmaktadır. Benzer sonuçlar Atahan ve ark. [17] tarafından da PVA lif katkılı kompozitler için rapor edilmiştir. Aynı zamanda su kürü yapılan örneklerde ilk çatlak dayanımı ile eğilme dayanımı arasındaki fark açılmış, bu durum çoklu çatlak potansiyelini bir miktar arttırmıştır. Boşluk modifikasyonu yapılan serilerde ilk çatlak dayanımı genellikle azalmış, eğilme dayanımları ise bazı örneklerde az miktarda düşmüş, bazı örneklerde boşluk modifikasyonundan etkilenmemiştir (Şekil 6).

Tüm serilerde maksimum yüke kadar yük-sehim eğrisi altında kalan alan hesaplanmış ve "efektif eğilme tokluğu" olarak adlandırılmıştır. Efektif eğilme tokluğu değerleri Şekil 7'de sütun grafiklerle gösterilmiştir. S/B oranı 0,53 olan serilerde efektif eğilme toklukları boşluk modifikasyonu ile kürsüz durumda 2273 N.mm'den 4638 N.mm'ye yükselmiştir. Kür yapılmayan serilerde çok sayıda yeni çatlak oluşturulması efektif eğilme

E. GÖDEK, M. KESKİNATEŞ, K. TOSUN-FELEKOĞLU, B. FELEKOĞLU

tokluğunu önemli miktarda arttırmıştır. Efektif eğilme tokluğu su kürü yapılması halinde ise daha az artış göstererek 3910 N.mm'den 4623 N.mm'ye çıkmıştır. S/B oranı 0,63 olan serilerde boşluk modifikasyonu su kürü yapılan kompozitlerin tokluğunu etkilemezken, kür yapılmayan serilerde % 88 artış kaydedilmiştir. S/B oranı 0,78 olan serilerde boşluk modifikasyonunun efektif eğilme tokluğu değerlerine önemli bir etkisi olmamıştır. Bu durum, liflerin yetersiz köprüleme gerilmesi kapasitesinden kaynaklanmaktadır. Yükleme sırasında plastik tanelerin matrise gömülü olduğu bölgelerden yeni çatlakların açılması nedeniyle yeteri kadar yüksek gerilme seviyelerine ulaşılamamıştır.



Şekil 6. İlk çatlak ve eğilme dayanımlarının S/B oranına göre değişimi

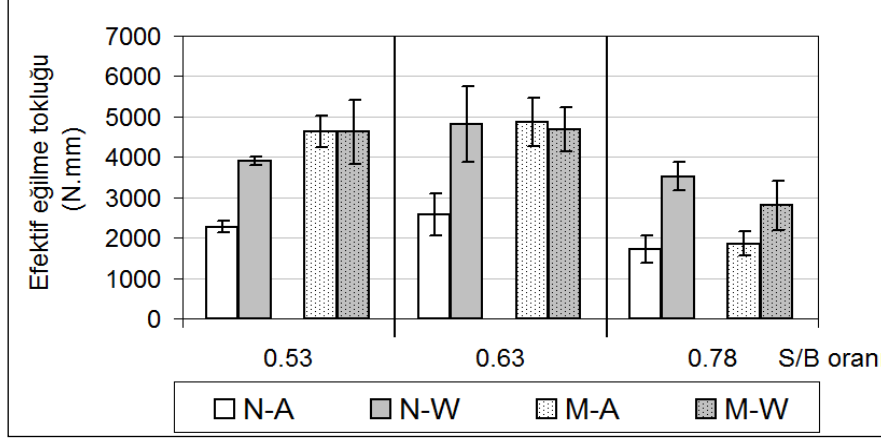
Çoklu çatlak davranışının maksimum yükteki orta nokta sehimi ve efektif eğilme tokluğu ile ilişkileri Şekil 8'deki grafiklerde tüm seriler için çizilmiştir. Genellikle orta nokta sehimi artışı ile çatlak sayısı da artmaktadır. Çoklu çatlak davranışı en yoğun olarak S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan M serisi kompozitlerde gözlenmiştir (Şekil 8a, daire içindeki noktalar: ortalama 5-7 çatlak). Aynı bağıntının efektif eğilme tokluğu için de olduğu söylenebilir (Şekil 8b, daire içindeki noktalar). Diğer taraftan hem orta nokta sehimi hem de efektif eğilme tokluğu açısından en kötü çoklu çatlak davranışı boşluk modifikasyonu yapılmayan, yüksek S/B oranlı ve kür edilmeyen serilerden elde edilmiştir.

Eğilme deneyi sonrasında yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 9'da sunulmuştur. Tüm serilerde eğilme dayanımlarına benzer şekilde S/B oranı artışı ile basınç dayanımları azalmıştır. Su kürü yapılan örneklerin basınç dayanımları aynı S/B oranında yapılan kıyaslamalarda her zaman kürsüze göre daha yüksektir. Boşluk modifikasyonu yapılan serilerden en düşük S/B oranına sahip olan 0,53 serisinde modifikasyonla birlikte basınç dayanımında 5-10 MPa azalma söz konusudur. Diğer taraftan S/B oranı 0,63 olan seride basınç dayanımı kayıpları çok daha düşük mertebelere düşmüştür. S/B oranı 0,78 olan seride boşluk modifikasyonu ile kayda değer bir dayanım kaybı olmamıştır.

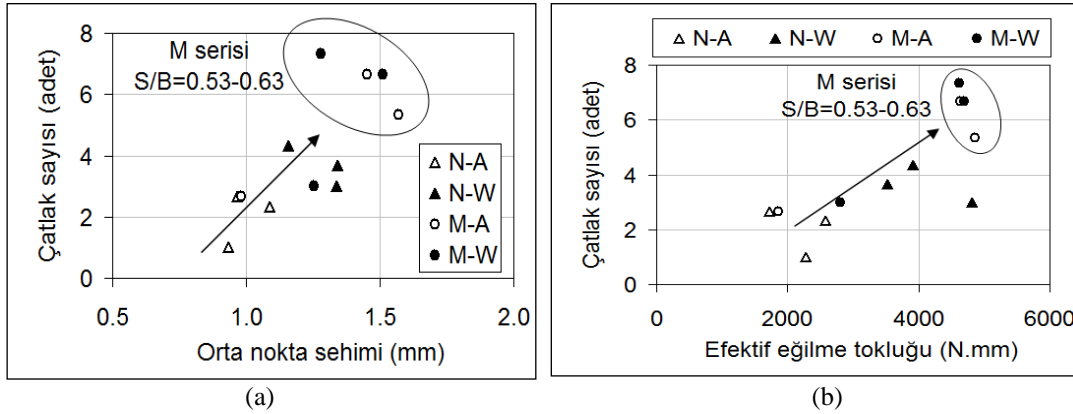
Genel bir değerlendirme yapılacak olursa efektif eğilme tokluğunu ve çatlak potansiyelini hem su kürü yapılan hem de kürsüz koşulda en çok arttıran serilerin S/B oranı 0,53 ve 0,63 olan seriler olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda S/B oranı 0,63 olan kompozitlerde basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikler boşluk modifikasyonundan daha az etkilenmiştir. Özetle incelenen seriler içinde çoklu çatlak performansını geliştirmede

METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

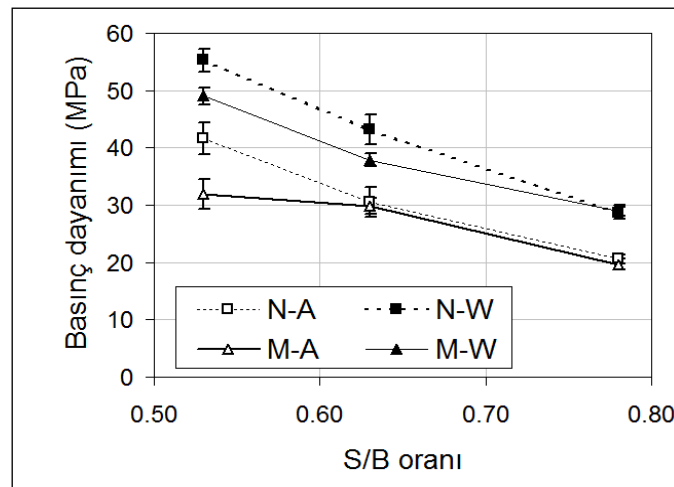
en uygun S/B oranının 0,63 olduğu söylenebilir. Kompozit matris yapısının (S/B oranı ve boşluk yapısı) uygun şekilde tasarlanması halinde eğilme etkisindeki sürekli donatılı kirişlerde gözlenen çoklu çatlak davranışının süreksiz mikro donatılı (lifli) kompozitlerde de elde edilebileceği söylenebilir.



Şekil 7. Efektif eğilme tokluğunun S/B oranına göre değişimi. Değişkenlik çubuklarının uzunluğu bir standart sapma kadardır



Şekil 8. Çatlak sayısı - maksimum yükteki sehim (sehim kapasitesi) (a) ve çatlak sayısı - efektif eğilme tokluğuna bağıntıları (b)



Şekil 9. Kompozitlerin basınç dayanımı değerleri

4. SONUÇLAR

Deneysel çalışmalar ışığında elde edilen sonuçlar aşağıda listelenmiştir:

1. S/B oranı yüksek olan serilerde (0,78) çoklu çatlak potansiyeli ve mekanik özellikler azalmıştır. Lif-matris aderansının yetersiz olması, liflerin sağlayacağı köprüleme gerilmesi seviyesini azaltmakta ve örneğin farklı bölgelerine gerilme yayılmadığı için yeni çatlakların açılma olasılığını azaltmaktadır.

2. Suda kür edilen örneklerde gerek hidrasyon reaksiyonu, gerekse puzolanik reaksiyon sayesinde lif matris arasındaki geçiş bölgesi güçlenerek aderans artmaktadır. Böylece liflerin köprüleme gerilmesi seviyesi artarak yeni çatlakların açıldığı gözlenmiştir. Aynı zamanda S/B=0,53 olan kompozitlerde su kürü yapılması eğilme dayanımını ve efektif eğilme tokluğunu sırasıyla % 38 ve % 72 oranında arttırmıştır. Artış oranları S/B oranı 0,63 olan seride sırasıyla % 43 ve % 87'dir.

3. Doğal boşluk yapısı modifiye edilerek çoklu çatlak potansiyeli arttırılmıştır. Toplam hacmin % 6'sı oranında 3 mm çaplı plastik taneler kullanılarak efektif eğilme tokluğu ve çatlak sayısında önemli artışlar kaydedilmiştir. Örneğin S/B oranı 0,53 olan ve su kürü yapılmış seride efektif eğilme tokluğu ve çatlak sayısı sırasıyla yaklaşık 2 ve 7 kat artmıştır. Boşluk modifikasyonu sayesinde ilk çatlak yükü ile maksimum yük arasında daha fazla sayıda yeni çatlağın açılması sağlanmıştır. Böylece kompozitin büyük bir bölümü gerilmeye karşı etkin şekilde kullanılmıştır.

4. Aynı S/B oranında kıyaslama yapıldığında, boşluk modifikasyonu yapılan serilerde çoklu çatlak davranışı, kür koşullarından modifikasyon yapılmayan serilere kıyasla daha az etkilenmiştir. Su kürü uygulanmayan kompozitlerin efektif eğilme toklukları boşluk modifikasyonu ile S/B=0,53 serisinde % 104, S/B=0,63 serisinde % 88 arttırılmıştır. Kür yapılmayan örneklerde plastik tane ilavesi ile ilk çatlak dayanımı azaltılıp, daha düşük gerilme seviyelerinde yeni çatlakların açılması sağlanmıştır. Böylece kür edilmeyen kompozitlerde de çoklu çatlak davranışı gözlenebilmiştir.

5. Boşluk modifikasyonu ile basınç dayanımı gibi mekanik özellikleri önemli ölçüde kaybetmeden çoklu çatlak davranışı en çok geliştirilen kompozitler S/B oranı 0,63 olan serilerden elde edilmiştir.

6. Kompozit matris yapısının (S/B oranı ve boşluk yapısı) uygun şekilde tasarlanması halinde eğilme etkisindeki sürekli donatılı kirişlerde gözlenen çoklu çatlak davranışının süresiz mikro donatılı (lifli) kompozitlerde de belirgin şekilde elde edilebileceği tespit edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarda cihaz ve malzeme desteği sağlayan TÜBİTAK'a (114M246) ve deneysel çalışmaların gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı İnş. Müh. Anıl Arslan'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] WANG, S., LI, V.C., "Polyvinyl Alcohol Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composites: Material Design and Performances", Proceedings of Int. RILEM Workshop on HPFRCC in Structural Applications, Published by RILEM SARL, 65-73, Hawaii, 2005.
- [2] LI, V.C., "On Engineered Cementitious Composites (ECC) - A Review of the Material and its Applications", Advanced Concrete Technology, 1, 215-230, 2003.
- [3] ZHOU, J., QIAN, S., BELTRAN, M.G.S., YE, G., VAN BREUGEL, K., LI, V.C., "Development of Engineered Cementitious Composites with Limestone Powder and Blast Furnace Slag", Materials and Structures, 43, 803-814, 2010.
- [4] ŞAHMARAN, M., LI, V.C., "Durability Properties of Micro-Cracked ECC Containing High Volumes Fly Ash", Cement and Concrete Research, 39, 1033-1043, 2009.
- [5] YANG, E.H., LI, V.C., "Fiber-bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites", Advanced Concrete Technology, 6, 181-193, 2008.
- [6] LI, V.C., MISHRA, D.K., WU, H.C., "Matrix Design for Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites", Materials and Structures, 28, 586-595, 1995.
- [7] LI, V.C., "Advances in ECC Research", ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications, SP 206, 373-400, 2002.
- [8] LI, V.C., "Can Concrete Be Bendable?", Journal of American Scientist, 100, 484-493, 2012.
- [9] LI, V.C., KANDA, T., "Engineered Cementitious Composites for Structural Applications", Innovations Forum in ASCE J. Materials in Civil Engineering, 10, 66-69, 1998.

METAKAOLİN KATKILI LİFLİ KOMPOZİTLERİN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINI GELİŞTİRMEYE YÖNELİK DENEYSEL ÇALIŞMALAR

- [10] KEOLEIAN, G., KENDALL, A., LEPECH, M., LI, V.C., "Guiding the Design and Application of New Materials for Enhancing Sustainability Performance: Framework and Infrastructure Application", Proceedings of Materials Research Society Symposium, 1-13, Cambridge University Press, 2006.
- [11] ŞAHMARAN, M., LACHEMI, M., HOSSAIN, K.M.A., RANADE, R., LI, V.C., "Influence of Aggregate Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites", ACI Materials Journal, 106, 308-316, 2009.
- [12] TOSUN-FELEKOĞLU, K., FELEKOĞLU, B., RANADE, R., LEE, B.Y., LI, V.C., "The Role of Flaw Size and Fiber Distribution on Tensile Ductility of PVA-ECC", Composites Part B: Engineering, 56, 536-545, 2014.
- [13] CHOI, W.C., YUN, H.D., KANG, J.W., KIM, S.W., "Development of Recycled Strain-Hardening Cement-Based Composite (SHCC) For Sustainable Infrastructures", Composites Part B: Engineering, 43, 627-635, 2012.
- [14] LI, V.C., MAALEJ, M., "Toughening in Cement Based Composites, Part II: Fiber Reinforced Cementitious Composites", Cement and Concrete Composites, 18, 239-249, 1996.
- [15] ÖZBAY, E., KARAHAN, O., LACHEMI, M., HOSSAIN, K.M.A., ATIŞ, C.D., "Investigation of Properties of Engineered Cementitious Composites Incorporating High Volumes of Fly Ash and Metakaolin", ACI Materials Journal, 109, 565-572, 2012.
- [16] BARADAN, B., İnşaat Mühendisleri için Malzeme Bilgisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 2014.
- [17] ATAHAN, H.N., PEKMEZCI, B.Y., TUNCEL, Y., "Behavior of PVA Fiber Reinforced Cementitious Composites under Static and Impact Flexural Effects", Journal of Materials in Civil Engineering, 25, 1438-1445, 2013.