

ÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLERDE SU/ÇİMENTO ORANI VE MİNERAL KATKI TÜRÜNÜN ÇOKLU ÇATLAK DAVRANIŞINA ETKİSİ

(EFFECTS OF WATER/CEMENT RATIO AND MINERAL ADDITIVE
TYPE ON MULTIPLE CRACKING BEHAVIOR OF FIBER
REINFORCED CEMENT BASED COMPOSITES)

Eren GÖDEK¹, Muhammer KESKİNATES²,
Burak FELEKOĞLU², Kamile TOSUN FELEKOĞLU²

ÖZ

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), mekanik açıdan uyumlu bir polimerik lif ve matris kullanılarak üretilen, geleneksel betona kıyasla daha düktil ve çoklu çatlak davranışı gösteren yeni nesil yapı malzemeleridir. Bu çalışmada mineral katkı türünün ve Su/Çimento (S/Ç) oranının eğilme performansına olan etkisi incelenmiştir. Deneysel çalışmalarda farklı kaynaklardan elde edilen iki farklı uçucu kül ve bir öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu türü kullanılarak üç farklı S/Ç oranında prizmatik kompozit (25x60x300 mm) üretimi gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kompozitlerin yarısında yapay boşluk modifikasyonu yapılmıştır. 54 adet örnek hazırlanarak 28 gün su kürü sonrası 4 noktalı eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, yüksek sehim kapasitesine (260 mm açıklıkta 14.9 mm orta nokta sehimi) ve yüksek eğilme dayanımına (11.9 MPa) sahip mikronize çatlama davranışı gösteren kompozitlerin üretilebileceği gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu, Lif

ABSTRACT

Engineered Cementitious Composites (ECC) are new generation construction materials that exhibit more ductility compared to traditional concrete by showing multiple cracking behavior which can be produced by using a mechanically compatible polymeric fiber and matrix. The effect of mineral admixtures' type and water to cement ratio (W/C) on flexural performance have been investigated in this study. Within the scope of experimental studies, prismatic composites (25x60x300 mm) were prepared by using two fly ashes from different resources and a granulated blast furnace slag at three different W/C ratios. The pore structures of the half of the composites were modified by adding artificial flaws. 54 samples were prepared and 4 point bending tests were performed after 28 days water curing. Test results showed that composites exhibiting micro-cracking behaviour with a high deflection capacity (14.9 mm mid-point deflection at 260 mm midspan) and high flexural strength (11.9 MPa) can be obtained.

Keywords: Engineered Cementitious Composites, Fly Ash, Blast Furnance Slag, Fiber

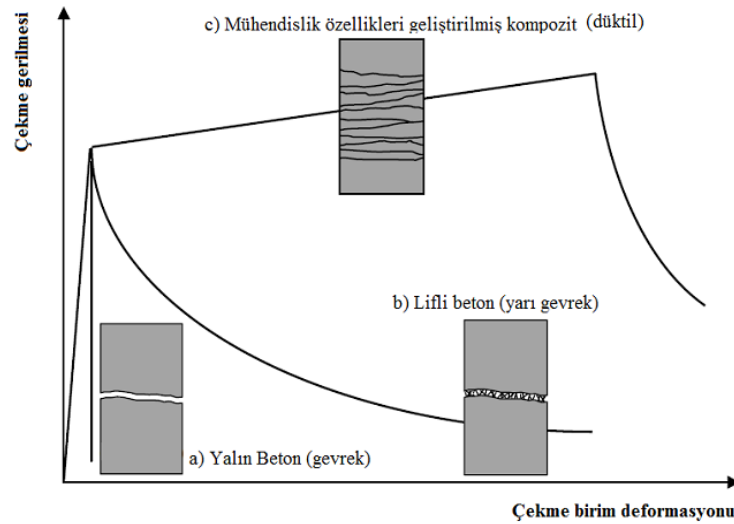
¹ Yaşar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir. eren.godek@yasar.edu.tr

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Müh. Bölümü, İzmir.

muhammer.keskinates@deu.edu.tr, burak.felegoklu@deu.edu.tr, kamile.tosun@deu.edu.tr

1. GİRİŞ

Geleneksel beton bilindiği üzere son derece gevrek bir malzeme olup, dış yüklemeler altında şekil değiştirme ve enerji sönmleme kapasitesi kısıtlıdır. Yalın betonun çekme birim deformasyon kapasitesi yaklaşık %0.01 seviyelerindedir. Yükleme altında tek çatlak açılmakta ve ani bir göçme meydana gelmektedir. Bu nedenle beton içerisine donatı ve lif benzeri malzemeler ilave edilerek bir kompozite dönüştürülür. Böylece kırılma ve çatlak ilerlemesi aşamalarında yük taşımaya devam etmesi sağlanmaktadır. Ancak eğilme ve çekme gerilmeleri altında, ilk çatlak oluşumundan sonraki aşamada beton çatlamış kesitteki zorlanmalar nedeniyle tüm kütleyi kullanmaya imkan vermeden yük taşıma kapasitesini kaybetmektedir (Şekil 1a)[1]. Pek çok lif türü ve dozajı için bu durum geçerlidir. İlk çatlaktan sonra yük artışı olmaz, çatlak genişleyerek deformasyon yumuşaması meydana gelir (Şekil 1b). “Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler - Engineered Cementitious Composites (ECC)” deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren malzemeler olup, betonun yukarıda açıklanan potansiyel kısıtlarını gidermeye yönelik olarak tasarlanan ve polimerik lif içeren kompozitlerdir (Şekil 1c). Bu konuda özellikle Amerika’da Prof.Dr.Victor Li öncülüğünde çok yoğun araştırmalar yapılmaktadır [2,3].

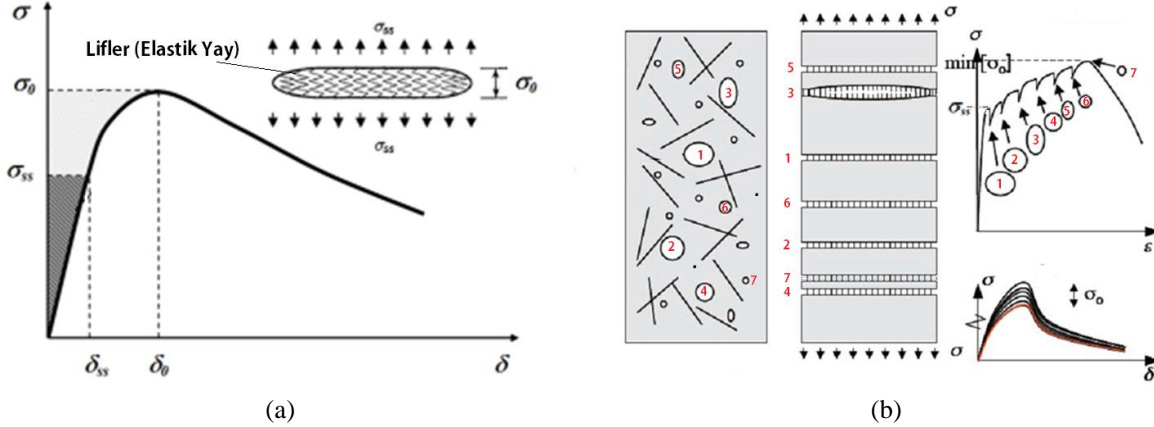


Şekil 1. Çekme gerilmesi altında; yalın betonun (a), lifli betonun (b) ve mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlerin (c) davranışı [4].

ECC, geleneksel betona kıyasla çok daha yüksek tokluğa sahiptir. Ayrıca çekme ve eğilme gerilmeleri altında deformasyon kapasitesi yüksek bir kompozittir. ECC üretiminde hacimce %2 lif kullanımı ve uygun bir lif-matris seçimi yapılarak çoklu çatlak davranışı elde edilebilmektedir [5]. Literatürde hacimce %2 lif kullanımı ile çekme birim deformasyon kapasitesi %2,5-4'e kadar çıkan ECC'ler rapor edilmiştir [6].

ECC üretiminde kompoziti oluşturan matris ve lif fazlarının seçimi kompozitin çoklu çatlak potansiyeline sahip olmasını garantileyecek şekilde yapılmalıdır [7]. Li vd., [8]'in geliştirdiği mikromekanik modele göre yüksek düktilite için lif, matris ve ara yüzey arasındaki etkileşimin optimize edilmesi gereklidir [9]. Bu mikromekanik teoriye göre, çoklu çatlak oluşumu için enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisi birden sağlanmalıdır [10]. Açılan her çatlak yüzeyi için liflerin köprüleme gerilmesi (σ_o), ilk çatlak dayanımından (σ_{ss}) yüksek olmalıdır (Şekil 2a). Köprüleme gerilmesi ile ilk çatlak dayanımı arasındaki farkın artırılması

kompozitin daha kolay çatlamasını sağlayacak, kompozitin çoklu çatlak davranışı gösterme potansiyelini artıracaktır (Şekil 2b). Köprüleme gerilmesini arttırmak kompozitin çoklu çatlak davranışı göstermesinde faydalı olacaktır [11]. Çoklu çatlak potansiyelini arttırmanın bir diğer yolu da matris kırılma tokluğunu azaltmaktır. Matris içerisindeki kusur boyut ve dağılımının değiştirilmesiyle de kompozitin çoklu çatlak potansiyeli arttırılabilmektedir. Kusur boyutu ve miktarı arttırıldığında ilk çatlak dayanımları düşecektir. Yapılan boşluk modifikasyonu neticesinde basınç ve çekme dayanımları yüksek oranda düşüş göstermez ve matrisin enerji yutma kapasitesi arttırılabilir ise, mekanik özellikler korunurken çatlak sayısını arttırmak yerinde bir yaklaşım olacaktır [12].



Şekil 2. Mikromekanik teoriye göre, çoklu çatlak oluşumu için gerekli kriterler [10]:

a) Oluşan ilk çatlakta $\sigma_0 > \sigma_{ss}$ olma şartı, b) $\sigma_0 - \sigma_{ss}$ arasındaki fark fazla olmalı

Literatürdeki ilk ECC polietilen (PE) lifler kullanılarak hazırlanmıştır [13,14]. Ancak günümüzde PE liflere daha ekonomik bir alternatif olan poli-vinil-alkol (PVA) lifler kullanılarak üretilen PVA-ECC üzerine çalışmalar yapılmaktadır [15-17]. Ancak PVA lifler kullanıldığında, lif-matris arasında PVA liflerin hidrofilik yüzey yapısından kaynaklanan güçlü bir kimyasal bağ oluşur. Bu durumda lifler gerilme altında matristen az miktarda sıyrılır ve belirli bir gerilme seviyesine ulaşıldığında koparak çoklu çatlak potansiyelinin azalmasına sebep olur. Söz konusu problemi çözmek için lif yüzeylerine farklı oranlarda kaplama yapılarak çimentolu matris ile lif yüzeyi arasındaki aderans optimize edilmiştir [15,17]. Her ne kadar PVA lifler PE liflere kıyasla daha az maliyetli olsa da, lif maliyeti hala ECC'nin malzeme maliyetinin yaklaşık olarak %50'sini oluşturmaktadır [18]. Polimer endüstrisindeki teknolojik gelişmelerle birlikte (Wet-Spinning yöntemi vb.) son yıllarda geliştirilen yüksek çekme dayanımlı çok ince çekilen polipropilen lifler (HTPP) göreceli olarak çok daha düşük maliyete sahip olması nedeniyle yeni bir alternatif olarak araştırılmaktadır. Bu lifler 10-12 mikron çapında, 8-15 mm uzunluğunda ve 800-900 MPa çekme dayanımında Brezilya'da Brasilit firması tarafından ticari olarak üretilmektedir [19-21].

ECC'lerin matris fazında geleneksel betondan farklı olarak iri agrega bulunmamaktadır. Agregalar ECC matrisinin kırılma tokluğunu ve lif dağılımını değiştirdiğinden deformasyon sertleşmesi davranışını oldukça etkilemektedir. İyi bir çekme performansının elde edilebilmesi için standart ECC karışımlarında iri agrega kullanımından kaçınılmalı veya en büyük agrega boyutu ve miktarı azaltılmalıdır [22]. Matris fazından agreganın çıkartılması, karışımın çimento içeriğini geleneksel betona kıyasla 5 kat arttırmaktadır. Bu durum daha fazla rötreye, hidrasyon ısısına, CO₂ gazı çıkışına ve maliyet artışına sebep olmaktadır [23,24]. Sözü edilen teknik, çevresel ve ekonomik etkenlerden dolayı, puzolanik özelliği de bulunabilen uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atıklar ECC üretiminde çimento

ile ikame edilerek kullanılmaktadır.

Uçucu kül (UK) ve yüksek fırın cürufu (YFC), ECC üretiminde en çok kullanılan mineral katkılardır. Yapılan ECC çalışmalarında UK ikamesinin artmasıyla birlikte matrisin kırılma tokluğunun azaldığı, çekme düktilitesi ve eğilmede sehim kapasitesi açısından ECC'nin performansının arttığı bilinmektedir [1, 25-27]. Ancak elde edildiği termik santrale göre UK'nın farklı kimyasal ve fiziksel özelliklere sahip olması dolayısıyla, ECC bünyesindeki performansının değişebileceği dikkate alınmalıdır.

YFC ile yapılan bazı çalışmalarda ise UK içeren matrislerin davranışlarına benzer durumlar gözlenmiştir. YFC'nin çimento ile %70 oranında ikame edilmesi ECC'nin çekme birim şekil değiştirme ve eğilme deformasyon kapasitesini arttırmıştır [28]. UK kullanılarak üretilen ECC matrislerinde, YFC'nin UK ile ikame edilmesiyle kompozitin birim şekil değiştirme kapasitesinin ve düktilitesinin arttığı bildirilmiştir [29]. Ayrıca, YFC'nin camı yapısındaki kırılmış Si-O bağlarından kaynaklanan polarite ve yüzeylerindeki elektriksel çift tabaka sayesinde süperakışkanlaştırıcı katkı adsorbe edebildikleri, bu sayede hem matrisin işlenebilirliğinin artırılacağı hem de liflerin daha homojen dağıtılabileceği belirtilmiştir [30].

Bu çalışma kapsamında farklı türdeki mineral katkıları (UK ve YFC) kullanılarak üç farklı Su/Çimento (S/Ç) oranına sahip HTPP-ECC'ler üretilmiştir. Bu sayede kompozit üretiminde kullanılan mineral katkı türünün ve S/Ç oranının çoklu çatlak davranışı üzerine etkisi incelenmiştir. Ayrıca üretilen kompozitlerin bir kısmına PE tane ilavesi yaparak çoklu çatlak davranışının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL ve METOD

Deneyisel çalışmalarda üretilen kompozitlerin matris fazında CEM I 42.5 R tipi Portland çimentosu, iki farklı özellikte uçucu kül (TUK ve YUK) ve granüle yüksek fırın cürufu (YFC) kullanılmıştır. TUK külü $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin % 70'in üzerinde ve CaO'in % 10'un altında olması nedeniyle, ASTM C 618 standardına göre F sınıfı (düşük kireçli) uçucu küle uygun olmaktadır. YUK külü ise $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değerinin % 70'in altında olması ve CaO oranının %10'dan fazla olması nedeniyle kireçsi kül sınıfına (C sınıfı) girmektedir. Kullanılan YFC'nin toplam karma oksit miktarı ise %81 olarak ölçülmüştür. YFC içeren karışımlarda ayrıca %90 saflıkta CaCO_3 'den oluşan kireçtaşı tozu kullanılmıştır. Karışımlarda TS EN 934-2 standardına göre yüksek oranda su azaltıcı/süper akışkanlaştırıcı katkı sınıfına giren polikarboksilat esaslı bir kimyasal katkı kullanılmıştır. Deneyisel çalışmalarda boşluk modifikasyonu amacıyla YYPE I668 Pellet plastik taneleri kullanılmıştır. Tane boyutu eşit ve 3 mm çaplı plastik tanelerin hidrofob yapıları nedeniyle çimento ile aderansları zayıftır. ECC bünyesinde yapay boşluk oluşturma ve böylece çatlak oluşturma amacıyla kullanılmışlardır. Kompozitlerin lif fazında ise özgül ağırlığı 0.91, uzunluğu 10 mm, çapı 12 μm , çekme dayanımı 850 MPa, elastisite modülü 6 GPa, kopma uzaması %21, alkali dayanıklılığı yüksek ve hidrofob yüzey özelliğine sahip HTPP lifler kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmalar kapsamında TUK ve YUK serilerinde S/Ç oranı 0.82, 0.96 ve 1.19 olan kompozitler hazırlanmıştır. YFC serilerinde ise S/Ç oranı 0.66, 0.82 ve 0.98 olarak belirlenmiştir. Tüm kompozitlerde Toz Malzeme (Mineral Katkı + varsa taştuzu)/Çimento oranı 3.0 olarak belirlenmiş ve sabit tutulmuştur. Matrislerin karışım oranları (Çizelge 1) hava içeriğinin hacimce %2 olduğu varsayılarak yapılmıştır. Karışımlar hazırlanırken 40 lt kapasiteli zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır. Hobart mikser üç farklı devirde karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dak) sahiptir. Her seriden yaklaşık 3.10 dm^3 lük karışım hazırlanmıştır. Öncelikle toz malzemeler 2 dk birinci devirde kuru karıştırılmış, daha sonra su

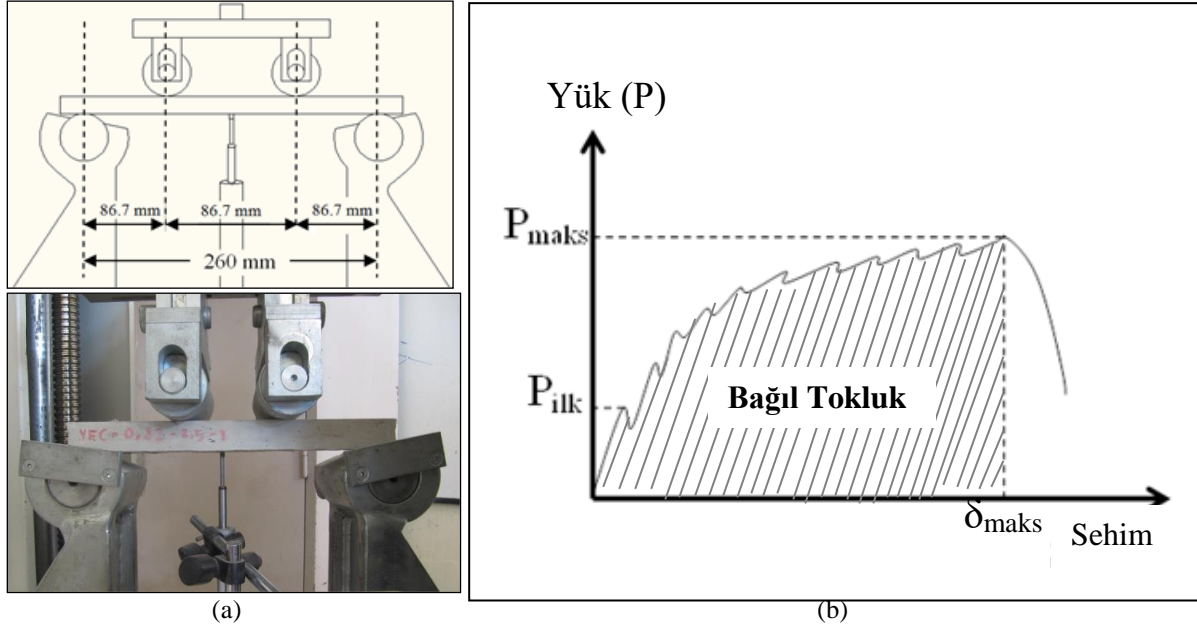
ve katkı ilavesi yapılarak 1 dk birinci devirde ve 2 dk ikinci devirde karıştırılmıştır. Homojen ve akıcı bir matris karışımı elde edildikten sonra lif ilavesi yapılarak 2 dk ikinci devirde ve 3 dk üçüncü devirde karıştırılmıştır. Karışım içerisinde lif topaklaşması olup olmadığı el ile kontrol edilmiş, eğer topaklanma varsa lif topaklarını açtırmak amacıyla ek bir karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karışımdan 3 adet 25x60x300 mm boyutlarında numuneler alınmıştır. Daha sonra karışıma hacimce %6 oranında YYPE plastik tane ilave edilerek karışım 1 dk daha karıştırılmış ve 3 adet numune daha alınmıştır. Taze harcın sıkıştırılması için sadece vibrasyon uygulanmıştır. Sistemik deneylerde toplamda 9 adet döküm gerçekleştirilmiş ve 54 adet prizmatik örnek hazırlanmıştır. Numunelerin üzeri plastik filmle kapatılarak kalıp içerisinde 3 gün bekletilmiştir. Kalıplardan sökülen numuneler 28 gün boyunca $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ 'deki suda kür edilmiştir. Su kürü uygulanan örnekler 28 gün sonunda 1 gün kurutulmuş ve ardından 4 noktalı eğilme deneyleri yapılmıştır.

Çizelge 1. Matrislerin karışım oranları

Malzemeler Matris	Çimento (kg/m^3)	Su (kg/m^3)	Uçucu Kül (kg/m^3)	Cüruf (kg/m^3)	Taş Tozu (kg/m^3)	Kim. Katkı (kg/m^3)
TUK-0.82-2.5	412	339	1030	-	-	24
TUK-0.96-2.5	393	376	981	-	-	13
TUK-1.19-2.5	363	403	906	-	-	3
YUK-0.82-2.5	396	325	989	-	-	67
YUK-0.96-2.5	388	373	971	-	-	25
YUK-1.19-2.5	360	428	900	-	-	9
YFC-0.66-2.5	504	333	-	633	633	15
YFC-0.82-2.5	466	384	-	583	583	8
YFC-0.98-2.5	435	426	-	543	543	4

Eğilme deneylerinde, 600 kg 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 3b) ve yük-orta nokta sehim artış değerleri bilgisayardaki yazılım yardımıyla kaydedilmiştir. Eğilme dayanımı değerleri PL/bh^2 formülü ile hesaplanmıştır. Burada P maksimum eğilme yükü, L mesnetler arası açıklık, b en kesit genişliği, h ise en kesit yüksekliğidir. İlk çatlak yükü, yük-sehim eğrisinin lineerliğinin bozulduğu ilk nokta olarak belirlenmiştir. Deformasyon sertleşmesi gösteren kompozitlerde, kompozitin taşıdığı yük ilk çatlak olduğu anda ani bir şekilde düşmekte (P_{ilk}), daha sonra kompozit maksimum yük taşıma kapasitesine ulaşana kadar kademeli olarak artarak devam etmektedir. Yük artışının son bularak düşüşe geçtiği nokta maksimum eğilme yükü (P_{maks}) ve bu noktaya karşılık gelen orta nokta sehim de maksimum yükteki orta nokta sehim (δ_{maks}) olarak adlandırılmaktadır. Bu noktada kompozit taşıyabileceği maksimum yük kapasitesine ulaşmıştır. Bu noktadan sonra taşıma kapasitesine ulaşmış olan çatlak genişleyecek ve kompozit deformasyon yumuşaması davranışı gösterecektir. ECC'nin aksine, çoğu lifli kompozit deformasyon yumuşaması davranışını ilk çatlaktan hemen sonra göstermektedir.

ECC'nin tokluk hesabında yük-sehim eğrisi altında maksimum yük değerine kadar olan alan hesaplanmış ve bu değer bağıl tokluk olarak tanımlanmıştır (Şekil 3b).



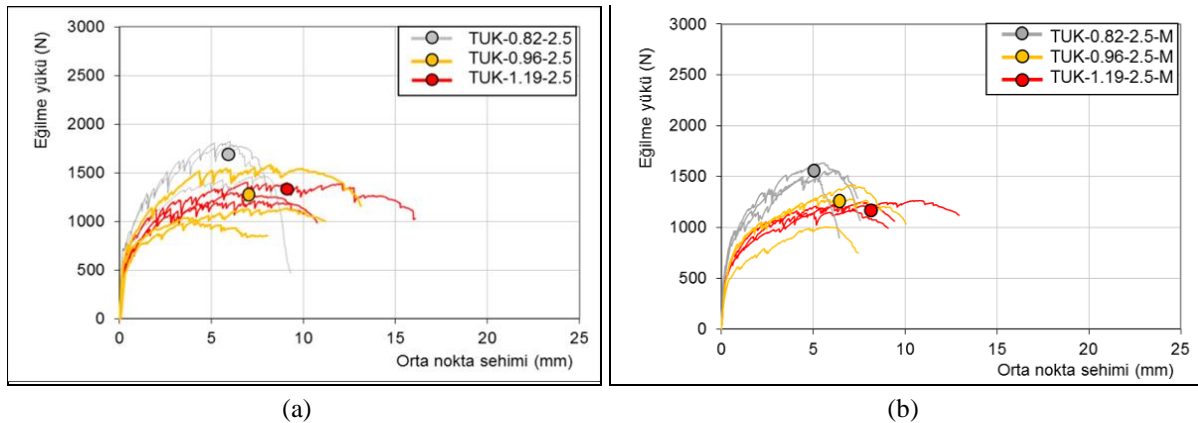
Şekil 3. a) Dört noktalı yükleme deneyi, b) Deneysel parametrelerin belirlenmesi

3. DENEYSEL VERİLERİN DEĞERLENDİRİLMESİ

3.1. YÜK-SEHİM EĞRİLERİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

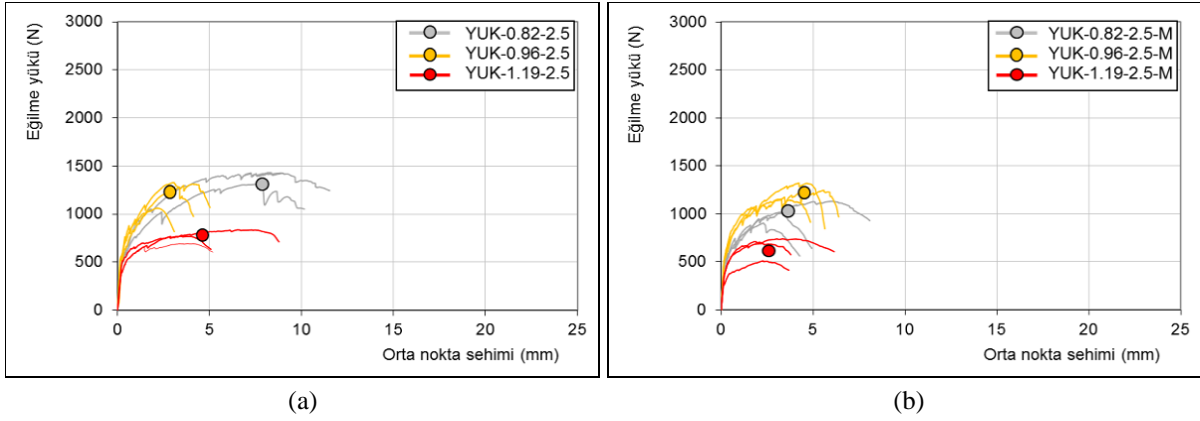
Örneklerin dört noktalı eğilme yükleme sonucu elde edilen yük-sehim eğrileri Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.

Tunçbilek uçucu külü kullanılarak üretilen örneklerin eğilme yükü – sehim eğrileri Şekil 4'de sunulmuştur. S/Ç oranı 0.82 olan örneklerin ortalama maksimum eğilme yükü değeri en fazladır. S/Ç oranının 0.82'den 0.96'ya artırılmasıyla ortalama maksimum eğilme yükü azalmakta, orta nokta sehim kapasitesi ise artmaktadır. S/Ç oranının 0.96'dan 1.19'a artırılmasıyla hem maksimum yük değeri hem de maksimum yükteki orta nokta sehim değeri artış görülmüştür (Şekil 4a). Plastik tane ilavesi yapılmamasıyla örneklerin maksimum eğilme yükü değerlerinde S/Ç oranı 0.82 ve 1.19 olan örneklerde azalma olurken, S/Ç oranı 0.96 olan örnekte önemli bir değişiklik görülmemiştir. Maksimum yükteki orta nokta sehim değerleri ise tüm örneklerde bir miktar azalmıştır (Şekil 4b).



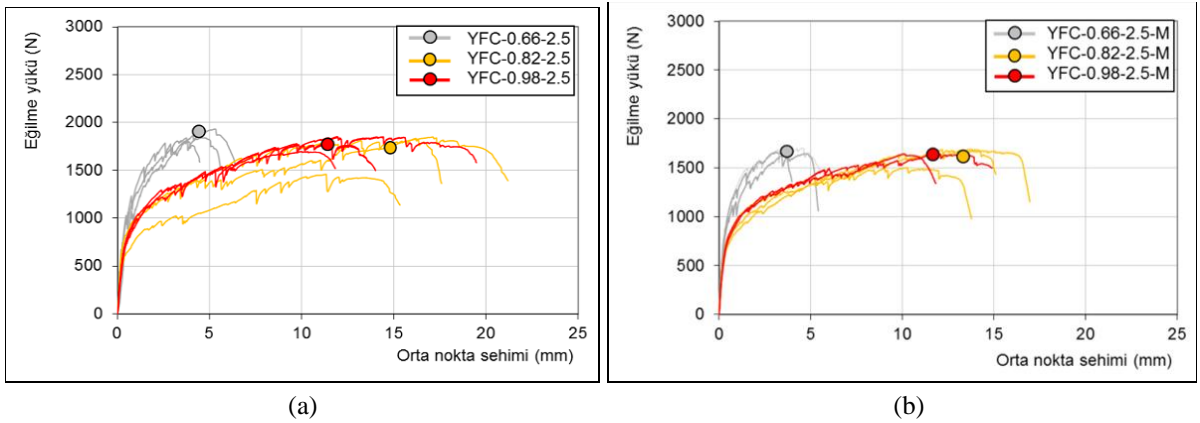
Şekil 4. TUK; a) Doğal boşluk yapısına sahip örnekler, b) Plastik tane ilavesi yapılan örnekler

Yatağan uçucu külü kullanılarak üretilen örneklerin eğilme yükü – sehim eğrileri Şekil 5’de sunulmuştur. Artan S/Ç oranına bağlı olarak, örneklerin maksimum eğilme yükü değerleri azalmaktadır (Şekil 5a). Maksimum yükteki orta nokta sehim değerleri ise S/Ç oranı artışıyla azalmış ancak S/Ç oranının 0.96’dan 1.19’a çıkarılmasıyla bir miktar artmıştır. Plastik tane ilavesiyle (Şekil 5b), S/Ç oranı 0.82 ve 1.19 olan örneklerde hem maksimum eğilme yükü hem de maksimum yükteki orta nokta sehim değerleri azalmıştır. S/Ç oranı 0.96 olan örnekte ise maksimum eğilme yükünde belirgin bir fark gözlenmezken maksimum yükteki orta nokta sehim değeri bir miktar ötelenmiştir.



Şekil 5. YUK; a) Doğal boşluk yapısına sahip örnekler, b) Plastik tane ilavesi yapılan örnekler

YFC serisinde (Şekil 6) S/Ç oranı arttırıldığında maksimum eğilme yükü değerlerinde belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Ancak, S/Ç oranının arttırılmasıyla maksimum yükteki orta nokta sehim değeri başlangıca göre artmaktadır (Şekil 6a). Plastik tane ilavesi maksimum eğilme yükü değerlerini bir miktar azaltmıştır. S/Ç oranı 0.66 ve 0.82 olan örneklerde maksimum yükteki orta nokta sehim kapasitesi azalırken, 0.98 olan örnekte yaklaşık aynı kalmıştır.



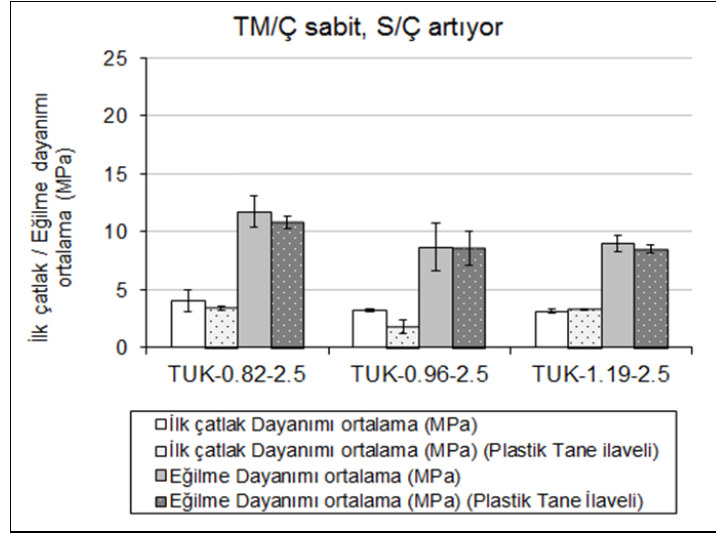
Şekil 6. YFC; a) Doğal boşluk yapısına sahip örnekler, b) Plastik tane ilavesi yapılan örnekler

3.2. İLK ÇATLAK ve EĞİLME DAYANIMLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Örneklerin yük-sehim eğrilerinden elde edilen ilk çatlak dayanımları ile eğilme dayanımları değerlerinin ortalamaları alınarak sütun grafikler halinde Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Sütunların üzerinde ise örneklerin maksimum yükteki orta nokta sehim değerlerinin ortalamaları sayısal olarak belirtilmiştir.

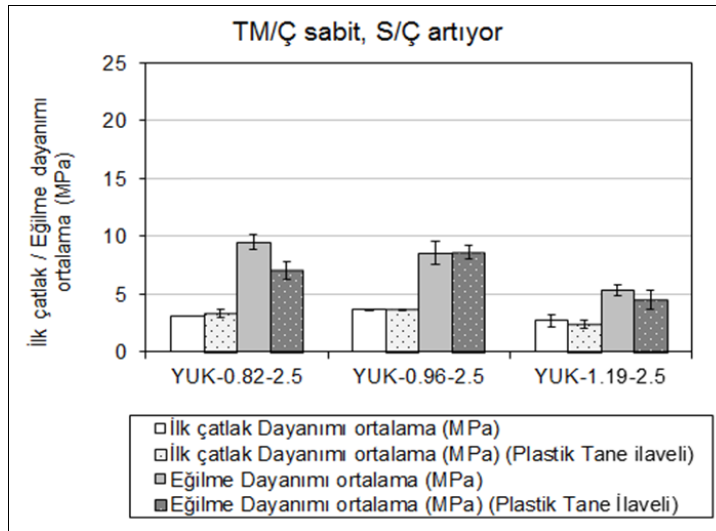
TUK serisinde (Şekil 7) S/Ç oranının 0.82’den 0.96’ya çıkartılmasıyla hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımları azalmıştır. S/Ç oranının daha da arttırılarak 1.19’a çıkartılmasıyla ilk

çatlak ve eğilme dayanımı değerlerinde belirgin bir değişiklik oluşturmamıştır. Yapılan plastik tane ilavesi ise bir istina hariç tüm örneklerde hem ilk çatlak hem de maksimum eğilme dayanımını olumsuz etkilemiştir (TUK-1.19-2.5’de ilk çatlak dayanımında bir miktar artış gözlenmiştir).



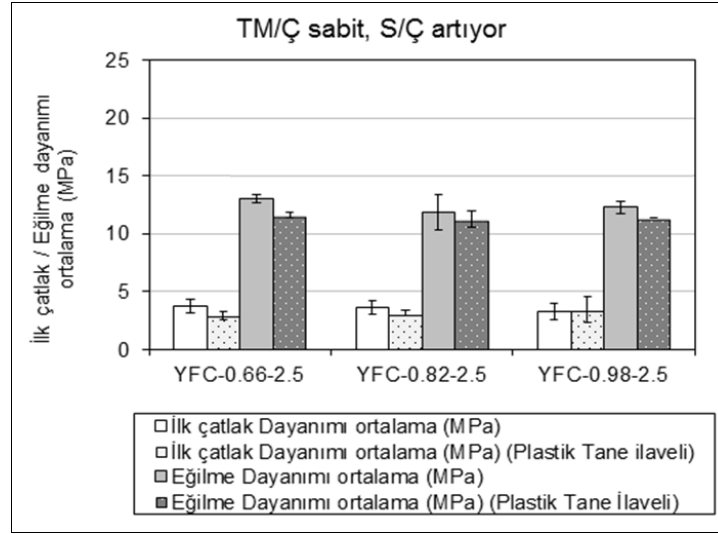
Şekil 7. TUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve orta nokta sehmlerinin değerlendirilmesi

YUK serisi örneklerinde S/Ç oranı artışının ilk çatlak dayanımına belirgin bir etkisi yoktur. Ancak, S/Ç oranı artışıyla maksimum eğilme dayanımı değerleri giderek azalmaktadır. İlk çatlak dayanımlarında belirgin bir artma ya da azalma eğilimi görülmemektedir. Plastik tane ilavesi yapılan örneklerde ise eğilme dayanımları S/Ç oranı 0.82 ve 1.19 olan seride azalmış, 0.96 olan seride aynı seviyede kalmıştır. S/Ç oranının 0.96 olan örneklerde ise plastik tane ilavesinin hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımı üzerine herhangi bir olumsuz etkisi görülmemiştir.



Şekil 8. YUK serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve orta nokta sehmlerinin değerlendirilmesi

YFC serisi örneklerinde S/Ç oranının artırılmasıyla hem ilk çatlak hem de eğilme dayanımları herhangi bir olumsuz etki görülmemiştir. Ancak yine plastik tane ilavesiyle örneklerin ilk çatlak ve eğilme dayanımları bir miktar azalmıştır (Şekil 9).

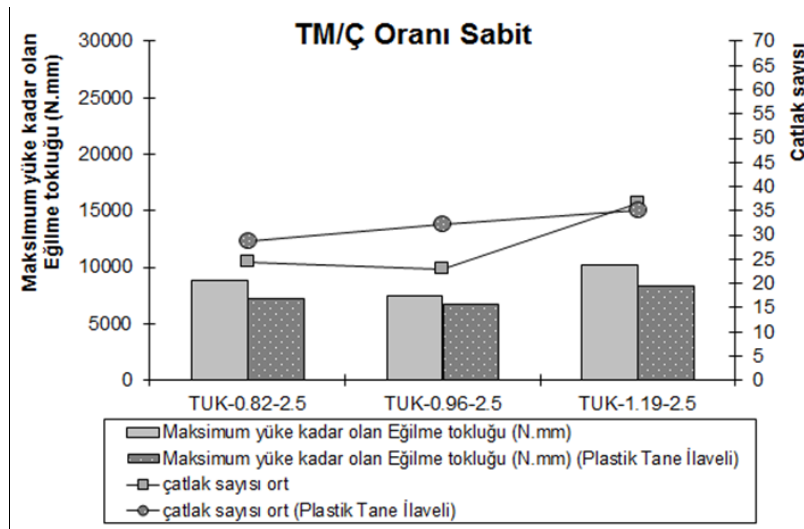


Şekil 9. YFC serisi ilk çatlak, eğilme dayanımı ve orta nokta sehimlerinin değerlendirilmesi

3.3. BAĞIL TOKLUK VE ÇATLAK SAYISI İLİŞKİSİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Örneklerin çatlak sayıları ile bağıl tokluk değerleri arasındaki ilişkiler Şekil 10, Şekil 11 ve Şekil 12’de gösterilmiştir.

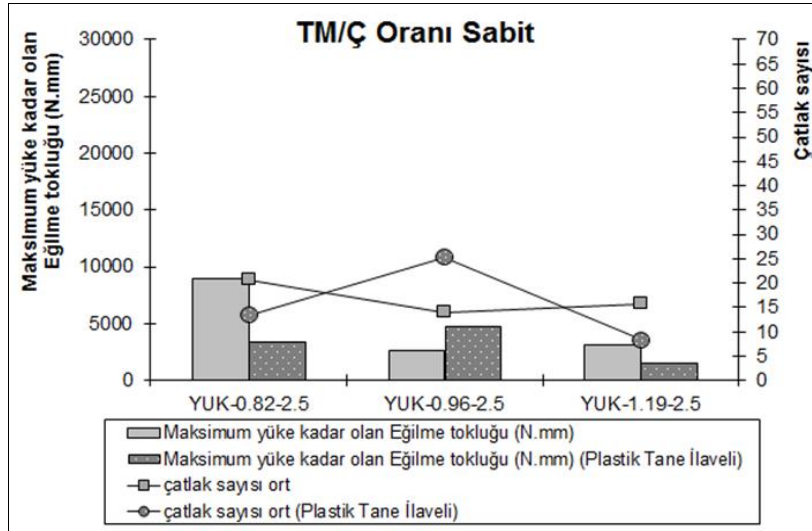
TUK serisine ait örneklerde (Şekil 10), S/Ç oranının 0.82’den 0.96’ya çıkartılmasıyla bağıl tokluk değerleri birbirine yakın değerler vermektedir. Ancak, S/Ç oranının bir miktar daha arttırılarak 1.19’a çıkartılmasıyla hem çatlak sayısı hem de tokluk değerleri paralel bir şekilde artmıştır. Plastik tane ilavesiyle S/Ç oranı 0.82 ve 0.96 olan örneklerde çatlak sayıları artmakta, tokluk değerleri ise azalmaktadır. S/Ç oranı 1.19 olan örnekte ise çatlak sayısı ve tokluk değerlerinde bir miktar azalma görülmüştür.



Şekil 10. TUK serisi bağıl tokluk-çatlak sayısı ilişkisi

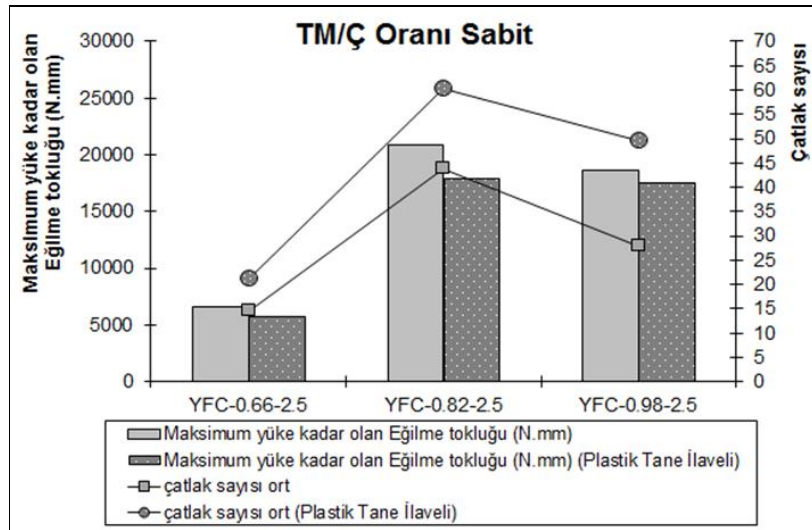
YUK serisine ait grafikler incelendiğinde, S/Ç oranı artarken tokluk değerleri ve çatlak sayılarının başlangıçtaki duruma göre (S/Ç=0.82) azaldığı görülmektedir. Plastik tane ilavesiyle YUK-0.96-2.5 hariç diğer örneklerin çatlak sayıları ve bağıl tokluk değerleri

giderek azalmıştır. YUK-0.96-2.5 örneğinde ise hem çatlak sayısı hem de bağıl tokluk değeri plastik tane ilavesiyle yaklaşık olarak 2 kat artmıştır (Şekil 11).



Şekil 11. YUK serisi bağıl tokluk-çatlak sayısı ilişkisi

YFC serisinde S/Ç oranının 0.66'dan 0.82'ye artırılması hem çatlak sayısını hem de bağıl toklukları önemli derecede arttırmıştır. S/Ç oranı 0.96'ya çıkartıldığında ise çatlak sayısı ve tokluk değerleri bir miktar azalmıştır. Plastik tane ilavesi çatlak sayılarını belirgin bir şekilde arttırırken, tokluk değerlerinde düşüşler görülmüştür (Şekil 12).

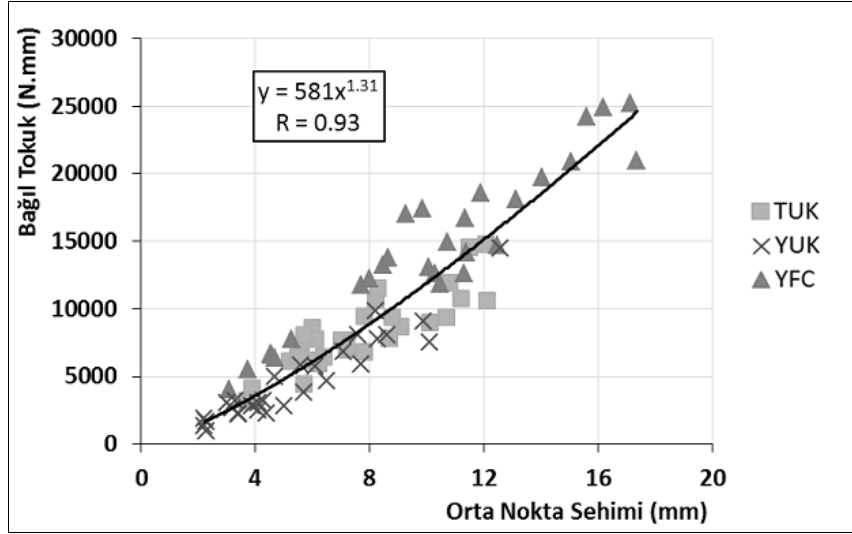


Şekil 12. YFC serisi bağıl tokluk-çatlak sayısı ilişkisi

3.4. TOKLUK KORELASYONLARI

Maksimum eğilme yüküne karşılık gelen orta nokta sehimi değerleri ile hesaplanan bağıl tokluk değerleri arasındaki ilişki incelenmiştir. Şekil 13'de görüldüğü üzere maksimum yükteki orta nokta sehimi değeri arttıkça örneklerin bağıl tokluk değerleri giderek artmaktadır. Maksimum yükteki orta nokta sehimi ile bağıl tokluk arasında $R=0.93$ gibi güçlü bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Çünkü maksimum yükteki orta nokta sehimi hem çatlak

sayısı hem de çatlak genişliğinin bir fonksiyonu olarak artmaktadır. Her matristeki karakteristik çatlak genişliği farklı değerler almaktadır.



Şekil 13. Maksimum yükteki orta nokta sehimini - bağıl tokluk ilişkisi

4. YORUMLAR ve SONUÇ

TUK serisi örneklerinde en yüksek eğilme dayanımı değerini veren örnekler, matris içerisindeki su miktarının en az olduğu TUK-0.82-2.5 (ortalama 11.7 MPa eğilme dayanımı, 6.6 mm orta nokta sehimini, 23 adet çatlak) örnekleri olmuştur. Maksimum orta nokta sehim değeri açısından en iyi performansı veren örnekler ise matristeki su miktarının en fazla olduğu TUK-1.19-2.5 (ortalama 8.9 MPa eğilme dayanımı, 9.1 mm orta nokta sehimini, 35 adet çatlak) örnekleri olmuştur. Matristeki su miktarı arttıkça eğilme dayanımının azaldığını ancak maksimum yükteki orta nokta sehimini değerlerinin arttığı söylenebilir [31]. Matris bünyesindeki su miktarının artmasıyla matrisin kırılma tokluğu azalmış ve lif-matris arasındaki aderans göreceli olarak zayıflamıştır [9, 30]. Bu durumun matrisin eğilme dayanımının azalmasına yol açtığı ve çatlak sayısını artırarak matrisin sehim kapasitesinin artmasını sağladığı düşünülmektedir. Lif-matris aderansının hem çok düşük ne de çok yüksek olması çoklu çatlak davranışını olumsuz etkilediğinden, bu değer optimize edilmesi gerektiği söylenebilir [32]. Plastik tane ilavesi ile su miktarı az olan matrislerde performans düşüşleri gözlenirken, su miktarı fazla olan matrislerin maksimum yükteki orta nokta sehimini değerlerinde az miktarda düşüş meydana gelmiş, ancak eğilme dayanımları yaklaşık aynı seviyelerde kalmıştır. Su miktarı fazla olan matrislerde, hem matrisin göreceli olarak daha kolay çatlaması hem de doğal boşluk yapısı (yüksek oranda kapiler boşluk varlığı) çoklu çatlak davranışını desteklemektedir. Bu nedenle yapılan plastik tane ilavesiyle matrisin aşırı zayıfladığı ve mekanik performans düşüşüne sebep olduğu düşünülmektedir. Matriste yapay kusur oluşturan diğer araştırmacılar da kusur boyutu ve miktarı ile ilgili benzer değerlendirmelerde bulunmuştur [33]. Bağıl tokluk açısından da en avantajlı örnek TUK-1.19-2.5 (10179.6 N.mm) olarak belirlenmiştir.

YUK serisi örneklerinde hem eğilme dayanımı hem de sehim değerleri açısından en iyi örnekler YUK-0.82-2.5 (ortalama 9.5 MPa eğilme dayanımı, 7.9 mm orta nokta sehimini, 15 adet çatlak) örnekleridir. Çatlak sayıları açısından YUK-0.82-2.5 serisi diğer örneklerle yaklaşık aynı seviyelerdedir. Orta nokta sehim değeriindeki artışın sebebi olarak çatlak

sayısının yanı sıra çatlak genişliğinin de etkili olabileceği gözlenmiştir. Plastik tane ilavesi YUK-0.96-2.5 hariç tüm örneklerde hem eğilme dayanımını hem de sehimi kapasitesini olumsuz etkilemiştir. Ancak, YUK-0.96-2.5 örneklerinde maksimum eğilme yükü değerlerinde herhangi bir düşüş yaşanmadan maksimum yükteki orta nokta sehimi değerlerini ötelemede başarılı olmuştur. Bağlı tokluk açısından da yine en iyi performansı YUK-0.82-2.5 (8936.4 N.mm) vermiştir.

YFC serisinde genel olarak tüm serilerin eğilme dayanımları göreceli olarak yüksek olup 12 MPa seviyelerindedir. Maksimum yükteki orta nokta sehimi değerleri de dikkate alındığında YFC-0.82-2.5 serisi (ortalama 11.9 MPa eğilme dayanımı, 14.9 mm orta nokta sehimi, 41 adet çatlak) en iyi performansı vermektedir. YFC serilerinde S/Ç oranının artışı ile kompozitlerin eğilme dayanımı değerleri korunurken, orta nokta sehimleri S/Ç oranı 0.66 olan örneklerle kıyasla belirgin bir şekilde ötelemektedir. YFC-0.98-2.5 serisinde maksimum yükteki orta nokta sehiminde bir miktar düşüş gözlenmiştir. Bunun sebebi olarak, TUK serisinde olduğu gibi matristeki su miktarının artışıyla lif matris aderansının aşırı zayıfladığı, dolayısıyla gerilmenin matrisin diğer kesitlerine aktarılamaması nedeniyle çatlak sayılarındaki azalmadan kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan plastik tane ilavesiyle tüm serilerin çatlak sayıları artmış ancak tokluk değerleri düşüş göstermiştir. Bunun sebebi olarak yine artan çatlak sayısına bağlı olarak ortalama çatlak genişliğinin azalması ön plana çıkmaktadır. Bağlı tokluk açısından en iyi performansı yine YFC-0.82-2.5 (20888.7 N.mm) örnekleri göstermiştir.

ECC üretiminde kullanılan mineral katkının türü ve özellikleri performansı önemli ölçüde etkilemektedir [7, 34]. Deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler dikkate alındığında YFC kullanılarak üretilen kompozitlerin mekanik açıdan (maksimum eğilme yükü, maksimum yükteki orta nokta sehimi ve tokluk) en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Kim ve arkadaşları, 2007 tarafından yapılan çalışmalarda da YFC ile üretilen kompozitlerin çoklu çatlak davranışı ve çekme birim şekil değiştirme performansı açısından daha iyi performans verdiği belirtilmiştir [30].

Farklı türdeki uçucu küller kullanılarak üretilen TUK ve YUK serilerinde ise, üretilen kompozitlerin performanslarının kullanılan mineral katkıların fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak değişkenlik gösterebileceği görülmüştür. Örneğin, hem maksimum eğilme dayanımı hem de maksimum yükteki orta nokta sehiminin bir fonksiyonu olarak bağlı tokluk değerleri dikkate alınır en iyi performansın TUK serisinde S/Ç oranı en fazla olan TUK-1.19-2.5 serisinden, YUK serisinde S/Ç oranı en düşük olan YUK-0.82-2.5 serisinden elde edildiği görülmektedir.

Kompozitlerin çatlak sayıları yapılan plastik tane ilavesi ile genellikle artmıştır. Ancak, literatürün aksine yapılan plastik tane ilavesinin performansı genelde olumsuz etkilediği görülmüştür. Bunun iki farklı sebebinin olabileceği düşünülmektedir;

- i. Yapılan plastik tane ilavesi ile matristeki boşluk yapısının gereğinden fazla miktarda artırılması sonucu kesitteki lif sayısı azalmış, buna bağlı olarak performanslar olumsuz etkilenmiştir. Ön çalışmalarla plastik tane dozajı ve boyutu değiştirilerek en uygun boşluk yapısı tespitinin yapılması yoluna gidilebilir [35, 36].
- ii. Kompozitin bağlı tokluk kapasitesi, açılan çatlak sayısının yanı sıra bu çatlakların genişliği ile de doğrudan ilişkilidir. Oluşan yeni çatlaklar sebebiyle eski çatlaklar yük taşıma kapasitesine ulaşmadan (yeterince genişleyemeden) göçmenin meydana gelmesinin performansı olumsuz etkilediği gözlenmiştir.

Qian ve Li tarafından yapılan çalışmalarda deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren çimento esaslı kompozitlerin eğilmede sehimi kapasiteleri ile çekme birim şekil değiştirme kapasiteleri arasında pozitif artan doğrusal bir korelasyon olduğu rapor edilmiştir [37]. Bu

korelasyon dikkate alındığında, tüm seriler içerisinde en kötü performansı veren YUK-1.19-2.5-M (ortalama 4.49 MPa eğilme dayanımı, 2.63 mm orta nokta sehimi, 1464.3 N.mm bağıl tokluk kapasitesi) örneğinin bile yaklaşık %1 çekme birim şekil değiştirme kapasitesine sahip olduğu söylenebilir. Bu durumda en kötü şartlarda dahi geleneksel betona kıyasla 100 kat daha fazla deformasyon kapasitesine sahip kompozitler üretilebilmektedir. Sonuçta ECC'nin yapısal kusurlara ya da daha sonradan meydana gelebilecek hasarlara karşı yüksek toleranslı bir yapı malzemesi olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Deneylerin gerçekleştirilmesinde kullanılan ekipmanı ve gerekli finansal desteği sağlayan TÜBİTAK'a (114M246), malzemelerin temin edilmesi sırasında yardımcı olan BASF firması yetkilisi İnş.Yük.Müh. Okan DUYAR'a, Çimentaş firması kalite kontrol şefi Kim.Yük. Müh. Nilüfer Azrak Karakaş'a (Çimento), Grace firması yetkilisi Dr. Müh. Ali Raif Sağlam'a ve Saint-Gobain Brasil firması yetkilisi Sergio İkai'ye teşekkürlerimizi sunarız. Numune üretimi, eğilme deneyleri ve çatlak analizinin gerçekleştirilmesindeki katkılarından dolayı İnş. Müh. Mustafa Durkut, İnş. Müh. Efe Behlül Kuru, İnş. Müh. Oğuz Recep Kahraman, İnş. Müh. İbrahim Piştöf ve İnş. Müh. İbrahim Can Gündüzler'e teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1] Wang S, Li V.C. Engineered cementitious composites with high-volume fly ash, *Materials Journal*, Cilt.104, No.3, 2007, s.233-241.
- [2] Li V.C, Kanda T. Innovations Forum: Engineered cementitious composites for structural applications, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Cilt.10, No.2, 1998, s.66-69.
- [3] Keoleian G, Kendall A.M, Lepech M.D, Li V.C. Guiding the design and application of new materials for enhancing sustainability performance: Framework and infrastructure application. *In MRS Proceedings*, Cilt.895, p.6, Cambridge University Press, 2005.
- [4] Fischer G, Li V.C. Influence of matrix ductility on tension-stiffening behavior of steel reinforced engineered cementitious composites (ECC), *ACI Structural Journal*, Cilt.99, No.1, 2002, s.3.
- [5] 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*, Cilt.43, No.6, 2010, s.803-814.
- [6] Li V.C. Large volume, high-performance applications of fibers in civil engineering, *Journal of Applied Polymer Science*, Cilt.83, No.3, 2002, s.660-686.
- [7] Sahmaran M, Yucel H.E, Demirhan S, Arik M.T, Li V.C. Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites, *ACI Materials Journal*, Cilt.109, No.6, 2012, s.627-638.
- [8] Li V.C, Wang Y, Backer S. Fracture energy optimization in synthetic fiber reinforced cementitious composites, *In MRS proceedings*, Cilt.211, p.63, Cambridge University Press, 1991.
- [9] Li V.C. Engineered Cementitious Composites (ECC) – Tailored Composites Through Micromechanical Modeling, *Fiber Reinforced Concrete: Present And The Future*. Canadian Society of Civil Engineers; In: Banthia N, Mufti A, (Ed.), 1998, s.64–97.
- [10] Li V.C. J-Integral applications to characterization and tailoring of cementitious materials, *Multiscale Deformation and Fracture in Materials and Structures*, Cilt.84, 2002, s.385-406.
- [11] Li V.C, Wang S. Suppression of fracture failure of structures by composite desing based on fracture mechanics, *Paper 5543 of Compendium of Papers CD ROM*, İtalya, Mart 2005, s.4.

- [12] Gödek E, Felekoğlu B, Tosun-Felekoğlu K. Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitlerde Boşluk Yapısının ve Kür Koşullarının Eğilme Davranışı Üzerine Etkileri, *8. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, Çankaya Üniversitesi, Ankara, 14-15 Mayıs 2015, s343-347.
- [13] 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*, Cilt.10, No.2, 1993, s.37–48.
- [14] Lin Z, Li V.C. Crack bridging in fiber reinforced cementitious composites with slip-hardening interfaces, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Cilt.45, No.5, 1997, s.763-787.
- [15] 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*, Cilt.13, No.6, 2001, s.399-406.
- [16] Li V.C, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite (PVA-ECC), *ACI materials Journal*, Cilt.98, No.6, 2001, s.483-492.
- [17] Li V.C, Wu C, Wang S, Ogawa A, Saito T. Interface tailoring for strain-hardening polyvinyl alcohol-engineered cementitious composite (PVA-ECC), *ACI Materials Journal*, Cilt.99, No.5, 2002, s.463-472.
- [18] 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*, Cilt.60, 2014, s.359-370.
- [19] Yang, E.H. Designing added functions in engineered cementitious composites. *ProQuest*, 2008.
- [20] de Lhoneux B, Reinhard K, Patricia K, Li V.C, Lin Z, Vidts D, Wang S, Wu H.C. Development of high tenacity polypropylene fibers for cementitious composites. *Proceedings of the JCI International Workshop on Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composites (DFRCC) - Application and Evaluation (DRFCC-2002)*, Takayama, Japan, Oct. 2002, s.121-132.
- [21] Ikai, S, Reichert J.R, Vasconcellos A.R, Zampieri V.A. Asbestos-free technology with new high tenacity PP–polypropylene fibers in air-cured Hatschek process. *In 10th Int. Inorganic-bonded Fiber Composites Conf.(Iibcc 2006)*, 2006.
- [22] Huang X, Ranade R, Ni W, Li V.C. Development of green engineered cementitious composites using iron ore tailings as aggregates, *Construction and Building Materials*, Cilt.44, 2013, s.757-764.
- [23] Altwair N.M, Johari M.M, Hashim S.S. Flexural performance of green engineered cementitious composites containing high volume of palm oil fuel ash, *Construction and Building Materials*, Cilt.37, 2012, s.518-525.
- [24] Bang J.W, Prabhu G.G, Jang Y.I, Kim Y.Y. Development of Ecoefficient Engineered Cementitious Composites Using Supplementary Cementitious Materials as a Binder and Bottom Ash Aggregate as Fine Aggregate, *International Journal of Polymer Science*, 2015.
- [25] Yang Y.Z, Zhu Y, Gao X.J, Deng H.W. Experimental study on high-ductile PVA fiber-reinforced cement-based composite materials with fly ash, *Journal of Qingdao technological university*, Cilt.4, 2009, s.51-54.
- [26] Sahmaran M, Yucel H.E, Demirhan S, Arik M.T, Li V.C. Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites, *ACI Materials Journal*, Cilt.109, No.6, 2012, s.627-638.

- [27] Li W, Zhou X, Li N. Research on the Effect of Fly Ash Content on the Tensile Properties of PVA-ECC. *In 2015 Asia-Pacific Energy Equipment Engineering Research Conference*, Atlantis Press, 2015.
- [28] Özbay E, Karahan O, Lachemi M, Hossain K.M, Atis C.D. Dual effectiveness of freezing–thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC, *Composites Part B: Engineering*, Cilt.45, No.1, 2013, s.1384-1390.
- [29] Chen Z, Yang Y, Yao Y. Quasi-static and dynamic compressive mechanical properties of engineered cementitious composite incorporating ground granulated blast furnace slag, *Materials & Design*, Cilt.44, 2013, s.500-508.
- [30] 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*, Cilt.37, No.7, 2007, s.1096-1105.
- [31] Zhang, J, Gong, C, Guo, Z, Zhang, M. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage. *Cement and Concrete Research*, Cilt.39, No.4, 2009, s.303-312.
- [32] Li, V.C. Tailoring ECC for special attributes: A review. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, Cilt.6, No.3, 2012, s.135-144.
- [33] Wang, S, Li, V.C. Lightweight engineered cementitious composites (ECC). *In PRO 30: 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC 4)*, Cilt.1, 2003, p.379.
- [34] Wittman, F.H., (Ed.). Durability of strain-hardening fibre-reinforced cement-based composites (SHCC), *Springer Science & Business Media*, Cilt.4, 2010, s.133.
- [35] Gödek E, Arslan A. Polimerik Lif Katkılı Kompozitlerin Çoklu Çatlak Davranışını Geliştirmeye Yönelik Çalışmalar, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği*, 2014, s.32.
- [36] Yıldırım T, Uzun M.C, Ünal A.B. Boşluk yapısı modifiye edilmiş polimer lif katkılı kompozitlerin eğilme yüklemesi altında performanslarının incelenmesi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği*, 2014, s.44.
- [37] Qian S, Li V.C. New simple method for quality control of Strain Hardening Cementitious Composites (SHCCs), *Fracture Mechanics of Concrete Structures – High Performance Concrete, Brick-Masonry and Environmental Aspects*, Carpinteri et al. (eds), 2007, s.1395-1402.

ÖZGEÇMİŞ / CV

Eren GÖDEK; İnş. Müh. (Civ. Eng. - MSc. Candidate)

Lisans derecesini 2014'te Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden aldı. 2016 yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemesi A.B.D'nda Yüksek Lisans eğitimini tamamladı. Şu anda Yaşar Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak akademik hayatına devam etmekte ve Dokuz Eylül Üniversitesi Yapı Malzemesi A.B.D'nda da Doktora eğitimini almaktadır. Temel çalışma alanları: Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitler, Klinker ve Kompozit Mikroyapısı, Kendiliğinden Yerleşen Beton, Reoloji, Mineral Katkılar, Kimyasal Katkılar ve Tarihsel Harçlar üzerinedir.

He got his bachelors' degree in the Civil Engineering Departmet at Dokuz Eylül University. In 2016, he got his master's of science degree in the Civil Engineering - Construction Materials program at Dokuz Eylül University. Recently, he continues his academic career as Research Assistant at Yaşar University and studies his Doctoral education in Construction Materials program at Dokuz Eylül University. His majör areas of interests are: Engineered Cementitious Composites, Clinker and Composite Micro-structure, Self Consolidating Concrete, Rheology, Mineral Admixtures, Chemical Admixtures and Historical Mortars.