

MİKROMEKANİK OLARAK TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTİN (ECC) KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİ

*Ceren KINA**
*Kâzım TÜRK**

Alınma: 29.09.2016; düzeltme: 01.08.2017; kabul: 29.09.2017

Öz: Tüm dünyada, çimento esaslı kompozitler çok yaygın bir şekilde kullanılan yapı malzemeleri haline gelmiştir. Bununla birlikte, bu malzemelerde yapının servis ömrünün başlangıcından itibaren bozulma kaçınılmazdır. Daha sonra, çoğunlukla işçilik ve harcama yoğunluğu olan bakım ve onarım işleri söz konusu olmaktadır. Bu sebeple, çevresel etkilerle bozulan çimento esaslı kompozitlerin kendiliğinden iyileşmesi büyük bir öneme sahiptir. Çimento esaslı kompozitlerde kendiliğinden iyileşme olayı, uzun zamandır birçok araştırmacı tarafından dikkate alınmakta ve incelenmektedir. Özellikle, ECC’de lokal olarak sürekli genişleyen bir çatlak yerine betonda birbirini izleyen çoklu çatlak oluşumu, kendiliğinden iyileşmeyi bu alanda daha cazip bir yöntem haline getirmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mikromekanik Tasarım, ECC, Kendiliğinden İyileşme, Kür Koşulları

Self-Healing of Engineered Cementitious Composite Based on Micromechanics

Abstract: Cementitious composites have become very widely used in building materials in all over the world. However, deterioration is inevitable since the initiation of the service life of structure. Then, labor and expenditure based maintenance and repair works become necessary. Therefore, self-healing of the cementitious composites deteriorated due to environmental effects has great importance. The self-healing behavior of cementitious composites have been considered and examined by many researchers for a long time. Especially, self-healing was be more attractive method for ECC due to its sequential development of multiple cracks instead of continuous widening of one localized crack in concrete.

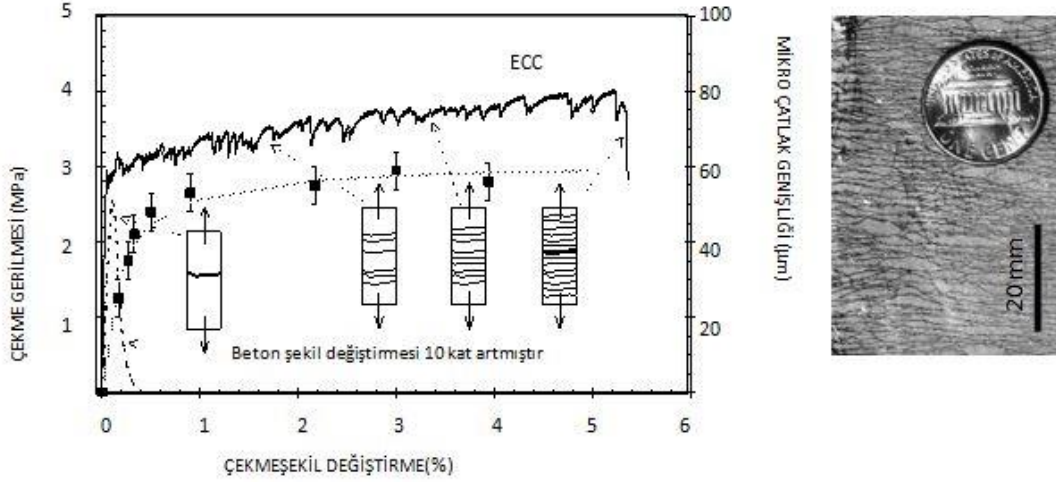
Keywords: Micromechanical Design, ECC, Self-healing, Curing Conditions

1. GİRİŞ

“Engineered Cementitious Composites” (tasarlanmış çimento esaslı kompozitler – ECC), mikromekanik prensiplerle tasarlanmış yüksek performanslı lif takviyeli çimento esaslı kompozitin özel bir türüdür (Li, 1998; Li, 2003; Li ve diğ. 2001) Mikromekanik tasarım, lif takviyesini hacimce %2’den daha az miktara minimize ederek aşırı çekme şekil değiştirme kapasitesine sahip yüksek performanslı kompozit optimizasyonuna imkân sağlar. ECC üretiminde lif olarak polivinil-alkol (PVA) kullanmak genellikle rastlanan bir durumdur. 1600-2500 MPa çekme dayanımına ve %6 birim uzamaya sahip PVA lifinin maliyetinin polietilene kıyasla daha düşük olması, bu lifin kullanılmasını daha yaygın hale getirmektedir. (Li ve diğ., 2001). Çimento esaslı bu kompozitin işlenebilirlik özelliklerinin belirlenmesinde ise çökme-yayıma ve Marsh hunisi akma zamanı testleri uygulanmaktadır. Belirlenmiş herhangi bir standardı olmayan ve belli sınır değerleri (örneğin, Marsh hunisi akma zamanı için 23 ± 2 °C sıcaklıkta 100 ml harcın akma süresi 1.76 saniye) içerisinde kalması gereken bu işlenebilirlik

*İnönü Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 44280, Malatya
İletişim Yazarı: Kâzım TÜRK (kazim.turk@inonu.edu.tr)

testleri kompozitin harç kısmı üzerinden yürütülmektedir. Üretiminde %2 oranında PVA lif içeren ECC'nin tipik aksenal çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 1'de gösterilmektedir (Weimann ve Li, 2003). Şekilden görüleceği üzere, ilk çatlaktan sonra karakteristik şekil değiştirme sertleşmesi, çoklu mikro çatlak özelliği ile birlikte meydana gelmiştir. Plastik deformasyon sırasında meydana gelen çatlakların gelişimi de Şekil 1'de gösterilmiştir. Çatlak genişliği azami yük taşıma kapasitesinde dahi 100 µm seviyesinin çok altında kalmıştır. Yük altındaki çatlak genişliği lifli betonlarda 300-400 µm seviyelerinde iken, bu değer ECC için 60 µm'den az olmaktadır. Bu ise ECC'nin diğer beton türlerine kıyasla çevresel şartlar altında da daha dayanıklı olmasını sağlamaktadır (Şahmaran ve Li, 2007; Şahmaran ve Li, 2008; Şahmaran ve Li, 2009, Şahmaran ve diğ., 2007; Şahmaran ve diğ., 2008; Li ve diğ., 2007).



Şekil 1:

ECC'nin tipik çekme gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi ve çatlak genişliği gelişimi (Weimann ve Li, 2003)

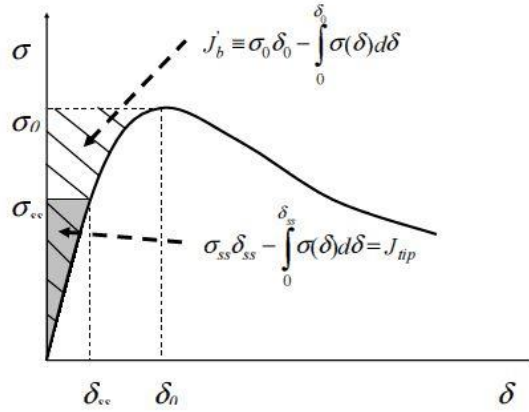
Uygulamada betonarme elemanlar, uygulanan mekanik yükler ve neredeyse kaçınılmaz olan kısıtlanmış durumlarda beklenen rötre ve termal deformasyonlar sebebiyle çatlaklar (Wittmann, 2002; Mihashi ve Leite, 2004). Bu çatlaklar betonda bozulmaya sebep olan zararlı maddelerin nüfuzu için kolay yollar sağlar. Klor, oksijen ve karbonatlaşmaya neden olan maddeler bu çatlaklar vasıtasıyla taşınır ve sonuç olarak, çelik donatının paslanmasına sebep olurlar. Bu sebeple, dayanıklılık beton, betonarme ve öngermeli beton yapıların hizmet edebilirliği ve ekonomisi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Ancak, inşaat altyapıları çatlama ile birlikte dayanıklılıktaki değişikliklere neden olan çevresel etkiler ve mekanik yüklerin etkisi altındadır. Çatlak oluşumu meydana geldiğinde, betonun bozulmamış özelliklerini geri kazanmak kolay olmayacaktır. Çünkü, çatlaklar malzemenin içerisine çeşitli maddelerin (sıvılar, agresif iyonlar, gazlar vb.) taşınmasını hızlandıran ilave yollar oluşturmaktadır. Bu çeşitli maddelerin taşınımı devam ederken, korozyon, sülfat ve asit hücumu ve donma çözülme hassasiyeti gibi bozucu mekanizmaların ihtimalinin artması, ciddi ve hızlı bozulma ile birlikte betonu son derece hücumu maruz duruma getirir. Birçok durumlarda, çatlak-başlangıcı ve daha çok ilerlemiş bozulmalar, hasarlı alanların acil onarılmasını gerektirmektedir. Ancak, onarım ve/veya bakım uygulamaları sıkıntılı olabilir ve bozulmuş beton yapıların yenilenmesinin maliyeti yüksek olabilir. Hatta bazı durumlarda, yapının başlangıçtaki maliyetini bile aşabilir. Finansal konulara ilaveten, hasar görmüş altyapıların restorasyonu esnasında meydana gelen çevresel etkiler, yapıların onarım ve/veya bakım uygulamalarını engelleyebilir (Wittmann, 1998). Bu bağlamda, bir beton malzemesindeki çatlakların özünde olan kendiliğinden iyileşme yeteneği, dayanıklılık ve bazı durumlarda mekanik özellikleri geri kazanmak için ilgi çekici bir metodolojidir.

Bu makalede, yayımlanmış çalışmalar derlenerek ECC'nin mikromekanik esaslı tasarımı ve kendiliğinden iyileşme özellikleri hakkında bilgi verilmiştir.

2. ŞEKİL DEĞİŞTİRME SERTLEŞMESİ İÇİN MİKROMEKANİK ESASLI TASARIM

Şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif takviyeli gevrek matris kompozitlerin tasarım stratejisi lif, matris ve arayüzey arasındaki sinerjik etkileşimi anlamaya dayanır. Mikromekanik esaslı tasarım, malzeme iç yapısı ile kompozit özellikleri arasında bağ kurmak için bir araç olarak kullanılabilir. Malzeme iç yapısı ve kompozit özellikleri arasındaki mekanizmalar oluşturulduğunda, amaçlanan kompozit davranış malzeme iç yapısının kontrolüyle uygun hale getirilebilir (Yang ve diğ., 2006).

Lif takviyeli gevrek bir matris kompozitte, görünüşte (pseudo) şekil değiştirme-sertleşmesi davranışı, çoklu çatlakların birbirini izleyen şekilde gelişimiyle elde edilir. Çoklu çatlak için esas şart, çekme altında kararlı düz çatlak yayılımının baskın olmasıdır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, bu şartın sağlanabilmesi için çatlak uç tokluğunun (J_{tip}), köprüleme gerilmesi (σ) ile çatlak açıklığı (δ) eğrisinden hesaplanan tamamlayıcı enerjiden (J_b') daha az olması gerekir (Marshall ve Cox, 1988).



Şekil 2:

Çekme şekil değiştirme sertleşmesi için tipik σ - δ eğrisi (Marshall ve Cox, 1988)

Düz çatlak yayılımı esnasındaki dış iş, matrisin kırılmasıyla meydana gelen çatlak uç enerji emilimi (matris tokluğu) ve lif/matris arayüzeyin ayrılması ve kaymasıyla açığa çıkan çatlak alın enerji emilimi arasındaki enerji denge kavramları denklem (1) ile ifade edilmektedir.

$$J_{tip} \leq \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \equiv J_b' \quad (1)$$

Burada, $J_{tip} = K_m^2 / E_m$, σ_0 , δ_0 çatlak açıklığına karşılık gelen maksimum köprüleme gerilmesi, K_m , matris kırılma tokluğu ve E_m ise matrisin elastisite modülüdür. Bu enerji esaslı kriter, çatlak yayılma modunu (kararlı düz çatlak veya modifiye edilmiş Griffith çatlak) belirler. Düz çatlak yayılımının modifiye edilmiş Griffith çatlak yayılımı üzerindeki baskınlığı önemlidir. Çünkü çatlak genişliği, δ_0 ile sınırlandırılabilir ve böylece, gerilme seviyesi sürekli olarak liflerin köprüleme kapasitesinin altında tutulmuş olur. Aksi takdirde, çekme yumuşaması (tension-softening) ve tek bir çatlakın daha çok açılması sonucu kırılmanın sadece belli bir yerde yoğunlaşması söz konusu olacaktır.

Lif köprüleme davranışının esasını oluşturan gerilme-çatlak açıklığı ilişkisi (σ - δ), kırılma mekaniği, mikromekanik ve olasılığın analitik formülleri kullanılarak elde edilir (Lin ve diğ., 1999). Özellikle, belli bir ankraj boyuna sahip lifin köprüleme kuvvetini ve lif/matris

aderansının kaybolması sürecini ölçmek için lif/matris boyunca tünel-çatlak yayılımı enerji biliminden faydalanılır. Olasılık, çatlak düzlemine göre lifin konumu ve yöneliminin rastgeleliğini tanımlamak için kullanılır. Lifin rastgele yönlendirilmesi, aynı zamanda eğimli lif ve matris çatlağı arasındaki etkileşim mekaniğinin dikkate alınmasını da gerektirir. Sonuç olarak, σ - δ eğrisi, lifin çekip-çıkarması esnasında sıyrılmaya-sertleşmesi davranışı için hesaplanan ve sıyrılmaya-sertleşmesi katsayısı (β), arayüzey sürtünme aderansı (τ_0) ve arayüzey kimyasal aderansı (G_d) gibi mikromekanik parametreleri içeren bir fonksiyon olarak tanımlanabilir. Ayrıca, eğik açıyla çekildiğinde lif mukavemetindeki azalmaya ilaveten, lif ve matris arasındaki etkileşimi hesaplamak için yönlenme (snubbing) katsayısı (f) ve mukavemet azaltma faktörü (f') kullanılır. σ - δ eğrisi, arayüzey özelliklerinin yanısıra, matris elastisite modülü (E_m), lif içeriği (V_f) ve lif çapı (d_f), lif boyu (L_f) ve lifin elastisite modülü (E_f) tarafından da kontrol edilir.

Görünüşte (pseudo) şekil değiştirme-sertleşmesi için diğer bir koşul ise, matris ilk çatlak dayanımının (σ_{fc}), maksimum lif köprüleme dayanımını (σ_0) aşmamasıdır.

$$\sigma_{fc} < \sigma_0 \quad (2)$$

Burada matris ilk çatlak dayanımı (σ_{fc}), matris kırılma tokluğu (K_m), önceden varolan iç kusur boyutu (a_0) ve σ - δ eğrisi yardımıyla elde edilir. Denklem (1) ile ifade edilen enerji kriteri, çatlak yayılma modunu kontrol ederken, Denklem (2)'de verilen dayanım esaslı kriter ise, çatlakların oluşma başlangıcını kontrol eder. Hem Denklem (1) hem de Denklem (2)'nin sağlanması sünek şekil değiştirme sertleşmesi davranışını başarmak için gereklidir. Aksi takdirde, lif takviyeli kompozitin davranışı normal çekme-yumuşaması (tension-softening) ile sonuçlanır (Lin ve diğ., 1999; Li ve Leung, 1992).

Çimentolu kompozitlerdeki lif dağılımı ve önceden varolan kusur boyutunun rastgele doğasından dolayı, σ_{fc} ve σ_0 'nın yanısıra J_b' ile J_{tip} arasında da büyük bir fark olması tercih edilir. Görünüşte (pseudo) şekil değiştirme-sertleşmesi (PSH) performansı indeksi, σ_{fc} ve σ_0 ile J_b' ve J_{tip} aralarındaki fark niceliksel olarak değerlendirmek için kullanılmaktadır ve aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Wu, 2001);

$$PSH_{enerji} = \frac{J_b'}{J_{tip}} \quad (3)$$

$$PSH_{dayanım} = \frac{\sigma_0}{\sigma_{fc}} \quad (4)$$

PSH indekslerinin daha büyük değerlerine sahip malzemelerin, yeterli düzeyde daha iyi çoklu çatlak oluşumu göstermesi beklenilir. Yetersiz PSH davranışı, çoğunlukla kompozitlerin çekme şekil değiştirme kapasitesinde azalmaya ve çekme sünekliğinde ise büyük değişkenliğe sebep olur. Yapılan bir deneysel çalışmada (Kanda, 1998), $J_b'/J_{tip} > 3$ ve $\sigma_0/\sigma_{fc} > 1.2$ performans indekslerine sahip polietilen (PE) lif takviyeli çimentolu kompozitlerin, yeterli düzeyde PSH davranışı gösterdiği görülmüştür. Bununla birlikte, Wu (2001) yürüttüğü bir incelemede, PVA lif takviyeli çimentolu kompozitler için gözlemlenen çatlak modelleri σ_0/σ_{fc} indeksinin 1.2 yerine 1.45'den daha büyük olmasının gerektiğini tespit etmiştir. Bu durum, lifin kopma eğiliminin daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Yani PE lif ile kıyaslandığında PVA lifi daha düşük lif dayanımına ve daha yüksek arayüzey aderansına sahiptir. Bu da PVA lifinin köprüleme kapasitesinde daha büyük değişime neden olmaktadır. Bu yüzden, matrisin ilk çatlak dayanımı (σ_{fc}) ve maksimum lif köprüleme dayanımı (σ_0) arasında daha yüksek bir farka ihtiyaç duyulmaktadır. Polipropilen (PP) lif takviyeli kompozitler için de benzer durum söz konusudur. Burada, PP lif-çimento arayüzey aderans özellikleri, her iki lifin hidrofobik yüzeyinden dolayı PE lif-çimentonunkine benzer olmasına rağmen, PP lifin dayanımı PE lifinkinden çok daha düşüktür (Wu, 2001; Kanda, 1998; Kim, 1999). Yang ve diğ. (2006) çalışmalarında, PP lif

sistemi için $\sigma_0/\sigma_{fc}>2$ PSH dayanım indeksini varsayımlardır. Ayrıca, bu varsayımın doğrulanması için çok sayıda deneysel çalışmalara ihtiyaç duyulduğunu belirtmişlerdir.

Deneysel çalışmalar için kullanılan deneysel yöntemler detaylı ve açıklayıcı bir biçimde verilmelidir. Kullanılan yöntem, başkaları tarafından tekrarlanabilecek şekilde açıklayıcı olmalıdır. Teorik çalışmalar için ise türetimi başka yerde yapılmış ise formüller referans ile verilerek içeriğindeki her bir nicelik açıklanarak son formül yazılmalıdır yoksa gerekli türetim ana hatlarıyla yapılmalıdır.

3. ECC’NİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞMESİ

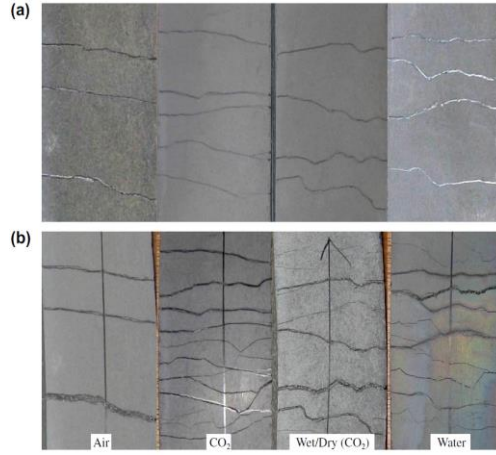
Kendiliğinden iyileşme olgusu, çimento esaslı malzemelerde yıllardır görülmektedir (Wang ve diğ., 1997). Betonun kendini iyileştirmesi bazı koşullar altında betonun kendi kimyasal ürünleri ile kendinde varolan çatlak genişliğini azaltabilmesi demektir. Önemli deneysel çalışmalar ve bu alandaki uygulamalar esas alındığında, çimento esaslı malzemelerin çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesinin karışık bir kimyasal ve fiziksel sürecin kombinasyonu ile gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Birçok literatür çalışmasına göre (Schlangen, 2010), aşağıda belirtilen olayların kendiliğinden iyileşme olgusu kapsamında olduğu tespit edilmiştir:

- a. Kalsiyum karbonat ve kalsiyum hidroksit oluşumu
- b. Sudaki kirliliğin ve betonun dökülmesiyle oluşan gevşek beton parçacıklarının çatlakları kapatması
- c. Reaksiyona girmemiş çimento veya çimento esaslı malzemelerin hidratasyonu
- d. Hidrate olmuş çimento esaslı matrisin, çatlak kısımlarda genişmesi (C-S-H’ın şişmesi)

Kendiliğinden iyileşebilme için çok sayıda daha küçük çatlak genişliği önemli bir parametredir (Şahmaran ve diğ., 2013). Jacobsen ve diğ. (1995), Reinhardt ve Joos (2003), Sahmaran ve Yaman (2008), Edvardsen (1999) ve Clear (1985) kendiliğinden iyileşen çatlak için maksimum çatlak genişliğini $5\mu\text{m} - 300\mu\text{m}$ olarak kabul etmişlerdir. Bu, özellikle, hidrate olmamış çimento esaslı malzemenin sürekli hidratasyonuna bağlı kendiliğinden iyileşme olgusu için büyük önem arz etmektedir. Çünkü, en ciddi problem, çatlaktaki tam iyileşme için tolere edilebilecek çatlak genişliğidir. Bu nedenle, çatlak genişliği betonun kendini iyileştirmesinde anahtar faktördür.

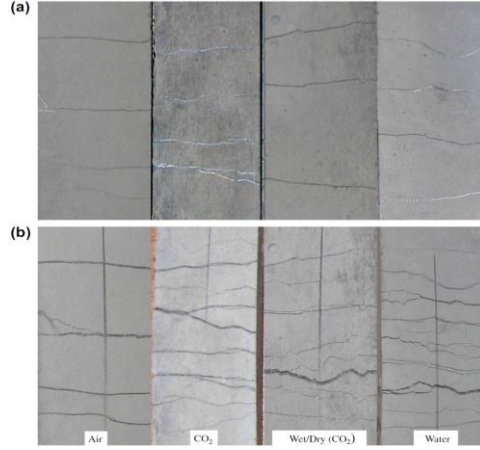
Ayrıca, dışarıdan su ilavesi olmadan, ECC'deki kendiliğinden iyileşme davranışını artırmak için dağılmış iç su rezervleri olarak nano-kil kullanımı da alternatif bir çözüm olabilir. Bu amaçla yapılan bir çalışmada (Qian ve diğ., 2010), ağırlıkça %0.6 oranında nano-kil içeren Ma karışımı ile %1.2 oranında nano-kil içeren Mb karışımı diğer malzeme oranları sabit tutularak hazırlanmıştır. Sonuçta, Şekil 3 ve 4’de, nano kil oranı M_a ’ya göre %50 daha fazla olan M_b numunelerinde tekrar yükleme sonrasında oluşan çatlaklardaki kendiliğinden iyileşmenin daha belirgin olduğu görülmektedir.

ECC’yi diğer çimento esaslı malzemelerden ayıran önemli özelliği, yüksek oranda çimento esaslı bileşenlere ve düşük su/bağlayıcı oranına sahip olmasıyla birlikte benzersiz mikroçatlak davranışı ve birbirini izleyen çok sayıda çatlak genişlik kontrolü sebeplerinden dolayı kendiliğinden iyileşmeyi gerçekleştirmede büyük bir potansiyele sahip olmasıdır (Zhang ve diğ., 2014; Wu ve diğ., 2012). Çünkü ECC, mikromekanik tasarım kullanılarak minimize edilmiş lif içeriği sayesinde, birbirini izleyen çoklu mikro çatlak genişliği ve yüksek çekme sünekliği sergileyebilen bir kompozittir (Li, 2003; Li, 1993; Wang, 2005).



Şekil 3:

56 günlük ön-çatlama yaşına sahip Ma karışımı için çatlak izi karşılaştırması: (a) kür ve tekrar yükleme öncesi (b) kür ve tekrar yükleme sonrası.



Şekil 4:

56 günlük ön-çatlama yaşına sahip Mb karışımı için çatlak izi karşılaştırması: (a) kür ve tekrar yükleme öncesi (b) kür ve tekrar yükleme sonrası.

Mineral katkıları, ECC'nin kendiliğinden iyileşme davranışını oldukça etkilemektedir. Kan ve Shi (2012) tarafından yürütülen çalışmada, yüksek oranda uçucu kül içeren daha ileri yaşlardaki numunelerde daha küçük genişliğe sahip çoklu çatlak oluşumun daha mümkün olduğu tespit edilmiştir. Farklı oranlarda uçucu kül (UK) içeren üç ECC karışımının kullanıldığı başka bir çalışmada (Zhang ve diğ., 2014), uçucu kül miktarının artmasıyla hem basınç dayanımının hem de çatlak genişliğinin azaldığı, bununla birlikte, birbirini izleyen daha yoğun çoklu çatlak oluşumunun sehim kapasitesini arttırdığı bulunmuştur. Yapılan geçirimsizlik testlerinden, ağırlıkça UK/PC oranının 4.0 olduğu ECC karışımlarının en iyi kendiliğinden iyileşme davranışı gösterdiği bulunmuştur. Üç farklı mineral katkının (C sınıfı uçucu kül, F sınıfı uçucu kül ve yüksek fırın cürufu) kullanıldığı diğer çalışmada (Şahmaran ve diğ., 2013) ise, uçucu kül içeren ECC karışımlarının daha çok hidrate olmamış çimento esaslı malzemeye sahip olması ve dolayısıyla da kendiliğinden iyileşme açısından daha avantajlı olmasına rağmen, yüksek fırın cürufu içeren ECC karışımlarında kendiliğinden iyileşme ürünü daha belirgin olarak gözlemlenmiştir.

3.1. Ön-çatlak Oluşturma

Kendiliğinden iyileşme davranışını incelemek amacıyla ilk olarak numuneleri çatlak oluşumu için ön-yüklemeye maruz bırakmak gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda, numuneler genellikle doğrudan çekme (Yang ve diğ., 2011), yarmada çekme (Şahmaran ve diğ., 2013, Homma ve diğ., 2009) ve dört noktalı eğilme yüklemeleri (Qian ve diğ., 2010; Zhang ve diğ., 2014; Li, 1993; Wang, 2005; Kan ve Shi, 2012) altında ön-çatlamayla hasara uğratılmaktadır.

Yang ve diğ. (2011) tarafından yürütülen çalışmada, ön-yükleme şekil değiştirmesinin %0.3 ile sınırlandırıldığında erken yaştaki numunelerin kendiliğinden iyileşmesinin, yüksek dayanıklılık göstermesi bakımından ileriki yaş numunelere kıyasla daha iyi olduğu bulunmuştur. Kan ve Shi (2012), yaptıkları deneysel incelemede ağırlıkça su-bağlayıcı oranı 0.27 ve uçucu kül-çimento oranı 1.2 olan Standart M45-ECC numunelerini %0.3, %0.5, %1.0 ve %2.0 seviyelerinde şekil değiştirme oluşturmak amacıyla ön-yüklemeye maruz bırakmışlardır. Homma ve diğ. (2009) karma lif takviyeli ECC numuneler ile ilgili yaptığı çalışmada numuneleri yarmada çekme testi ile hasara uğratmışlardır. Yapılan diğer bir çalışmada (Qian ve diğ., 2010) ise, ön-çatlama zamanının artmasıyla birlikte numunelere ait özelliklerde azalmalar görülmesine rağmen, kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında numunelerin eğilme rijitliğinin önemli oranda korunduğu gözlemlenmiştir.

3.2. Kür Koşulları

Ön-yüklemeyle hasara uğratılmış numunelerin kendiliğinden iyileşmesi, numunelerin değişik çevresel koşullara maruz bırakılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Literatürde numunelerin kendiliğinden iyileşmesi için maruz bırakıldıkları kür koşulları şöylece sıralanabilir:

1. Su/hava döngüsü
2. Su/yüksek sıcaklıklı hava döngüsü
3. Rölatif nem/hava döngüsü
4. Suya batırma
5. Su ve hava kürü
6. Islak/kuru (kuru kür %3 CO₂ konsantrasyonu altında) döngüsü
7. Donma-çözülme döngüsü

Yapılan çalışmalarda araştırmacıların bazıları, yukarıda bahsedilen kendiliğinden iyileşme davranışı için kür koşullarından birkaçını kullanarak kıyaslama yaparken, bazıları da tek kür koşulu altında kendiliğinden iyileşme davranışı gösteren numunelerin birçok özelliklerini incelemişlerdir. Yang ve diğ. (2011), yürüttükleri çalışmada, kendiliğinden iyileşme için ECC numunelerini su/hava, su/yüksek sıcaklıklı hava döngüleri, %90 rölatif nem/hava döngüsü ve suya batırma gibi farklı koşullarına maruz bırakmışlardır. Qian ve diğ. (2010), ECC kirişlerini hava kürü, %3 CO₂ konsantrasyonunda kür, ıslak/kuru (kuru kür %3 CO₂ konsantrasyonu altında) döngüsü kürü ve su kürüne maruz bırakarak, ECC'nin kendiliğinden iyileşme davranışı üzerinde kür koşulunun etkisini incelemişlerdir. Sonuçta, ECC kiriş numunelerinin, maruz bırakıldıkları tüm kür koşulları altında kendiliğinden iyileşmeden sonraki sehim kapasitelerinin düzelebildiğini bulmuşlardır. Şahmaran ve diğ. (2013) tarafından yürütülen çalışmada, ECC numuneleri sürekli ıslak, sürekli havada ve donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Zhang ve diğ. (2014) ve Homma ve diğ. (2009) su kürü, Alyousif ve diğ. (2015) ise, ıslanma/kuruma döngüsü ile kendiliğinden iyileşme davranışını incelemişlerdir. Kan ve Shi (2012), döngüsünün kendiliğinden iyileşmeye önemli düzeyde yardımcı olduğunu, hatta kendiliğinden iyileşmenin büyük bir kısmının, 4-5 ıslanma/kuruma döngüsüne ulaşmadan gerçekleştiğini tespit etmişlerdir.

3.3. Kendiliğinden İyileşme Hız ve Mertebesinin Belirlenmesi

Yukarıda belirtildiği üzere, değişik yüklemeler yardımıyla ön-çatlak oluşturulan numunelerin, daha sonrasında farklı kür koşullarına maruz bırakılması neticesinde meydana gelen kendiliğinden iyileşme davranışının hız ve mertebesini anlamak amacıyla literatürde yapılan çalışmalarda farklı yollara başvurulmuştur. Mevcut literatürde genel olarak kendiliğinden iyileşmenin hız ve mertebesini belirlemek amacıyla kullanılan metodlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1. Rezonans frekans ölçümü
2. Tek eksenli çekme testi
3. ESEM (Çevresel Taramalı Elektron Mikroskobu) ve EDS (Enerji Dağılım Spektrometresi)
4. Su geçirimsizlik testi
5. Hızlı klor geçirgenliği testi
6. Mikroskopik gözlem ve mikro yapısal analiz
7. Kapiler su emme testi

Kan ve Shi (2012) ve Yang ve diğ. (2011) kendiliğinden iyileşmenin hangi hız ve oranda gerçekleştiğini değerlendirmek için rezonans frekans ölçümlerini kullanmışlardır. Yang ve diğ. (2011) yaptıkları çalışmada, rezonans frekans ölçümlerine ilaveten ECC numunelerine tek eksenli çekme testleri de uygulamışlardır. Sonuçta, suyun var olduğu çevresel koşullar altında ECC'de belli bir oranda yüksek çekme sünekliğine ulaşılabildiğini ve 60 µm altındaki çatlak genişliklerinde kendiliğinden iyileşmenin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, erken yaşta görülen bu iyileşmenin daha olgun numunelerdeki iyileşmeye kıyasla daha az etkili olduğu tespit edilmiştir. Kan ve Shi (2012) yürüttükleri çalışmada, 10 ıslanma/kuruma döngüsünden sonra, kendiliğinden iyileşmeden dolayı rezonans frekans değerlerindeki artışın, %2.0 şekil değiştirme oluşacak şekilde ön-yüklemeye hasara uğratılmış farklı yaşlardaki M45-ECC numuneleri için %75'i, yüksek hacimde uçucu kül içeren ECC numuneler için ise %85'i aştığını bulmuşlardır.

Ma ve diğ. (2014), ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme sürecini ve kendiliğinden iyileşmeye sebep olan ürünlerin kimyasal bileşimini araştırırken ESEM ve EDS yöntemlerini kullanmışlardır. Benzer şekilde, Kan ve Shi (2012) tarafından yapılan çalışmalarda da Standart M45-ECC numunelerinde oluşan yeni çatlak yollarının belirlenmesi ve kendiliğinden iyileşme ürünlerinin kimyasal analizi için aynı yöntemler kullanılmıştır. Ma ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, kendiliğinden iyileşmiş orta-erken dayanımlı (OED) ECC numunelerine ait eğilme dayanımı, eğilme rijitliği ve deformasyon kapasitesi gibi mekanik özelliklerdeki artışın yanında numunelerin su geçirimsizliğinde de önemli azalma meydana geldiğini bulunmuşlardır. Kendiliğinden iyileşme ürününün esas bileşeni olarak da CaCO₃ ile birlikte Ca(OH)₂/CaCO₃ karışımı olduğunu tespit etmişlerdir. Kan ve Shi (2012) tarafından yürütülen çalışmada ise, kendiliğinden iyileşme ürünlerinin esas olarak C-S-H ve CaCO₃ içerdiği bulunmuştur.

Kendiliğinden iyileşmenin hangi hız ve oranda gerçekleştiğini değerlendirmek amacıyla kullanılan diğer bir yöntem olan hızlı klor geçirgenliği testi ise, Zhang ve diğ. (2014), Şahmaran ve diğ. (2013) ve Alyousif ve diğ. (2015) tarafından kullanılmıştır. Hızlı klor geçirgenliği testine ilaveten, Zhang ve diğ. (2014) su geçirimsizlik testini, Şahmaran ve diğ. (2013) mikroskopik gözlem ve mikro-yapısal analiz yöntemlerini ve Alyousif ve diğ. (2015) kapiler su emme testini de uygulamışlardır. Farklı yaşlardaki (7, 28 ve 90 gün) ve üç farklı mineral katkı (C sınıfı uçucu kül, F sınıfı uçucu kül, yüksek fırın cürufu) içeren mikro çatlaklı ECC numunelerinin farklı taşınım özellikleri üzerine yapılan çalışmada (Alyousif ve diğ., 2015), uygun mineral katkı tipi ve uygun kür şartları ile kapiler su emmede %92 iyileşmeye ulaşılabildiği görülmüştür. Ayrıca, bu iyileşmenin büyük bir kısmının, numunenin sadece 7 gün suda kür edilmesinden sonra meydana geldiği ve çatlaklı ECC'de kapiler emme ile su taşınım riskinin önemli oranda azaldığı sonucuna varılmıştır. Kılcal geçirimsizlik ölçümleri gibi, klor

iyon geçirgenlik değerlerinin de çoğu 30 gün su kürü sonrasında büyük oranda azaltılabilir. Deneysel bulguların çoğu, bu periyod esnasında ASTM C1202'de belirtilen düşük geçirimlilik düzeyinde yer almıştır. Hızlı klor geçirgenliği bulguları açısından, kendiliğinden iyileşme su kürünün ilk 7 gününde görülmeye başlamasına rağmen, kılcal geçirimlik bulgularının aksine, hızlı klor geçirgenliğinde önemli gelişmeler için daha çok zamana ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Homma ve diğ. (2009) tarafından yapılan çalışmada, tek lif olarak polietilen ve çelik tel kullanılması yanında polietilen ve çelik telin karma olarak kullanıldığı numunelerin kendiliğinden iyileşmesinin hız ve mertebesini öğrenmek için mikroskobik gözlem uygulanmıştır. Üç günlük kür neticesinde, sadece polietilen ve karma olarak da polietilen ve çelik telin kullanıldığı numunelerde iyileşme gözlemlenirken, tek lif olarak çelik telin kullanıldığı numunelerde kendiliğinden iyileşmenin yeterli olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, kendiliğinden iyileşme hızının servis ömrü boyunca belli bir altyapı tipinde baskın olan farklı taşınım mekanizmalarına bağlı olarak değiştiği bulunmuştur.

4. SONUÇ

Çimento esaslı kompozitlerin çok erken yaşta bozulmaya başlaması sebebiyle tamir ve bakım durumunun söz konusu olması, mühendislik açısından büyük bir endişeye sebep olmaktadır. Bu yüzden, kendiliğinden iyileşme özelliğine sahip çimento esaslı malzemeler, uygulamada gelecek vaat etmektedir. Bu bağlamda, ECC mikromekanik tasarım kullanılarak minimize edilmiş lif içeriği ile birbirini izleyen benzersiz mikroçatlak davranışı ve çatlak genişlik kontrolü sebeplerinden dolayı kendiliğinden iyileşmeyi gerçekleştirmede büyük bir potansiyele sahiptir. Ayrıca, kendiliğinden iyileşme davranışının çoklu-mikro çatlaklı ECC için faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışmada, önceki çalışmalar ışığında ECC'nin şekil değiştirme sertleşmesi davranışı göstermesine neden olan mikromekanik esaslı tasarım hakkında detaylı bir araştırma yapılmıştır. Sonuçta, mikromekanik olarak tasarlanan ECC'nin kendiliğinden iyileşme davranışı ve dolayısıyla altyapı için ideal bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.

KAYNAKLAR

1. Alyousif, M., Lachemi, M., Yildirim, G. ve Şahmaran, M. (2015) Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13, 112-123. doi:10.3151/jact.13.112
2. Clear, C. A. (1985) The effects of autogenous healing upon the leakage of water through cracks in concrete. *Wexham Springs, Cement and Concrete Association*, 28.
3. Edvardsen, C. (1999) Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Material Journal*, 96, 448-55. doi: 10.14359/645
4. Homma, D., Mihashi, H. ve Nishiwaki, T. (2009) Self-healing capability of fibre reinforced cementitious composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 217-228. <https://doi.org/10.3151/jact.7.217>
5. Jacobsen, S., Marchand, J. ve Homain, H. (1995) SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete. *Journal of Cement and Concrete Research*, 25, 1781-90. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00174-3](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00174-3)
6. Kan, L. ve Shi, H. (2012) Investigation of self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) materials. *Construction and Building Materials*, 29, 348-356. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.051

7. Kanda, T. (1998) Design of Engineered Cementitious Composites for Ductile Seismic Resistant Elements, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, University of Michigan.
8. Kim, P.J. (1999) Micromechanics Based Durability Study of Lightweight Thin Sheet Fiber Reinforced Cement Composites, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, University of Michigan.
9. Li, M., Sahmaran, M. ve Li, V.C. (2007) Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment, *Proceedings of HPFRCC5-High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, Stuttgart, Germany, July 10-13, 313-322.
10. Li, V.C. (1993) From micromechanics to structural engineering – the design of cementitious composites for civil engineering applications. *JSCE Journal of Structural Mechanical Earthquake Engineering*, 10(2), 37-48. https://doi.org/10.2208/jscej.1993.471_1
11. Li, V.C. (1998) Engineered cementitious composites (ECC) – tailored composites through micromechanical modeling, in: Banthia N, Bentur A, Mufti A, editors. *Fiber reinforced concrete: present and the future*. Montreal: Canadian Society for Civil Engineering, 64-97.
12. Li, V.C. (2003) On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its application. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 215-30. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>
13. Li, V.C., Leung, C.K.Y. (1992) Steady State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
14. Li, V.C., Wang, S. ve Wu, C. (2001) Tensile strain-hardening behaviour of polyvinyl alcohol engineered cementitious composite. *ACI Material Journal*, 98(6), 483-92. doi: 10.14359/10851
15. Lin, Z., Kanda, T. ve Li, V.C. (1999) On Interface Property Characterization and Performance of Fiber-Reinforced Cementitious Composites. *Journal of Concrete Science and Engineering*, 1(3), 173-184.
16. Ma, H., Qian, S. ve Zhang, Z. (2014) Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of medium-early-strength cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 68, 92-101. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.065>
17. Marshall, D.B. ve Cox, B.N. (1988) A J-Integral Method for Calculating Steady-State Matrix Cracking Stresses in Composites. *Mechanics of Materials*, 7(2), 127-133. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(88\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0167-6636(88)90011-7)
18. Mihashi, H. ve De Leite, J.P.B. (2004) State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete. *Advanced Concrete Technology*, 2(2), 141-154. <https://doi.org/10.3151/jact.2.141>
19. Qian, S.Z., Zhou, J. ve Schlangen, E. (2010) Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. *Cement and Concrete Composites*, 32, 686-693. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.015
20. Reinhardt, H. ve Joos, M. (2003) Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Journal of Cement and Concrete Research*, 33, 981-5. doi:10.1016/S0008-8846(02)01099-2

21. Sahmaran, M. ve Li, V.C. (2007) De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1035–1046. doi:10.1016/j.cemconres.2007.04.001
22. Sahmaran, M. ve Li, V.C. (2008) Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under high alkaline environment. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 72–81. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.09.004
23. Sahmaran, M. ve Li, V.C. (2009) Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC. *Journal of Materials and Structures (RILEM)*, 42(5), 593– 603. https://doi.org/10.1617/s11527-008-9406-6
24. Sahmaran, M. ve Yaman, I.O. (2008) Influence of transverse crack width on reinforcement corrosion initiation and propagation in mortar beams. *Can Journal Civil Engineering*, 35, 236–45. https://doi.org/10.1139/L07-117
25. Sahmaran, M., Li, M. ve Li, V.C. (2007) Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure. *ACI Materials Journal*, 104(6), 604–611. doi: 10.14359/18964
26. Sahmaran, M., Li, V.C. ve Andrade, C. (2008) Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams. *ACI Materials Journal*, 105(3), 243–250. doi: 10.14359/19820
27. Sahmaran, M., Yildirim, G. ve Erdem, T.K. (2013) Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. *Cement Concrete Composites*, 35, 89-101, 2013. http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.013
28. Schlangen, E. (2010) Fracture mechanics. CT5146 Lecture Notes. In: Hua X. Selfhealing of Engineered Cementitious Composites (ECC) in concrete repair system, Master thesis, Delft University of Technology.
29. Standard Test Method for Electrical Indication of Chloride's Ability to Resist Chloride (ASTM C1202-94), 1994, Annual Book of ASTM Standards V 04.02, ASTM, Philadelphia, 620-5.
30. Wang, K. (2005) Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites, PhD dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor.
31. Wang, K., Jansen, D., Shah, S. ve Karr, A. (1997) Permeability study of cracked concrete. *Cement and Concrete Research*, 27(3), 381–93, 1997. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00031-8
32. Weimann, M.B. ve Li, V.C. (2003) Hygral behavior of engineered cementitious composites (ECC). *International Journal of for Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), 513-534. https://doi.org/10.1515/rbm-2003-5791
33. Wittmann, F.H. (1998) Separation of assignments: A new approach towards more durable reinforced concrete structures. Proceeding of the Fifth Workshop on Material Properties and Design, Durable Reinforced Concrete Structures, Aedification Publishers, 151-160.
34. Wittmann, F.H. (2002) Crack formation and fracture energy of normal and high strength concrete. *Sadhana*, 27(4), 413-423. https://doi.org/10.1007/BF02706991
35. Wu, C. (2001) Micromechanical Tailoring of PVA-ECC for Structural Applications, Ph.D. Thesis, Departmental of Civil and Environmental Engineering, Ann Arbor, University of Michigan.

36. Wu, M., Johannesson, B. ve Geiker, M. (2012) A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials*, 28, 571–583. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.08.086
37. Yang, E., Wang, S., Yang, Y. ve Li, V.C. (2006) Fiber Bridging Constitutive Law of Engineered Cementitious Composites. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(1), 181-193. <https://doi.org/10.3151/jact.6.181>
38. Yang, Y., Yang, E. ve Li, V.C. (2011) Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and Concrete Research*, 41, 176–183. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.002
39. Zhang, Z., Qian, S. ve Ma, H. (2014) Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash. *Construction and Building Materials*, 52, 17-23. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.001>