



Investigation of multiple cracking behavior of cement-based fiber composites by digital image correlation method

Tarık Yıldırım^{1*}, Kamile T. Felekoğlu², Eren Gödek³, Muhammer Keskinateş^{1,4}, Burak Felekoğlu², Okan Önal²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Buca, İzmir, 35390, Türkiye

²Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, 35390, Türkiye

³Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Çorum, 19169, Türkiye

⁴Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, 70100, Türkiye

Highlights:

- Literature review about deformation measurement of digital image correlation (DIC) method
- DIC and MATLAB have been used as alternative methods to find the number of cracks and crack width.
- Obtaining full-field strain maps with DIC

Keywords:

- Engineered cementitious composites,
- Digital image correlation,
- Multiple cracking behavior

Article Info:

Research Article

Received: 20.07.2017

Accepted: 19.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416508

Acknowledgement:

To Turkey Scientific and Technological Research Institution (Project No: 115R012) and Serdar Okuyucu

Correspondence:

Author: Tarık Yıldırım
e-mail: tarik.yildirim@ogr.deu.edu.tr
phone: +90 554 914 6208

Graphical/Tabular Abstract

In this study, application areas of digital image correlation (DIC) on deformation measurements of engineering materials were presented with a detailed literature review. Studies on the analysis of the multiple cracking behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) had been researched and the availability of the DIC method for multiple crack analysis was experimentally investigated.

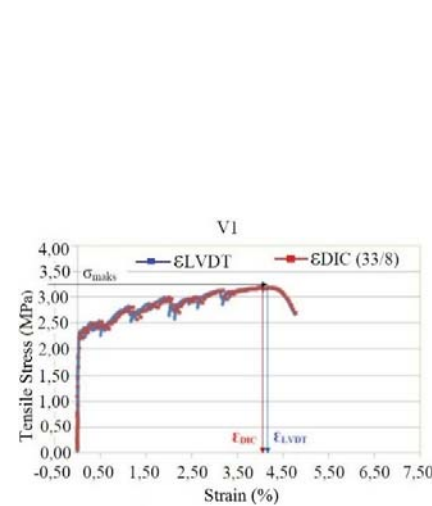


Figure A. Comparison of ϵ_{LVDT} and ϵ_{DIC}

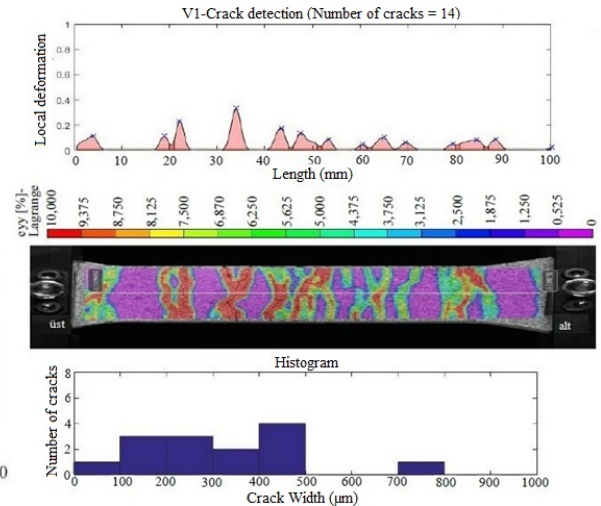


Figure B. Determination of crack number and crack width histogram for V1 specimen

Purpose: To compare the deformation measurements obtained by LVDT (Linear variable differential transformer) and DIC methods; to investigate the usability of DIC technique for multiple cracking analysis of ECC.

Theory and Methods: Dog-bone shaped tensile specimens were produced by using high tenacity polypropylene fibers (HTPP-ECC). The deformations of the composites under tensile loading were recorded by use of 4 LVDT and a DIC based camera system. Stress-strain curves of specimens were drawn and the strains obtained by LVDT (ϵ_{LVDT}) and DIC (ϵ_{DIC}) measurements were compared. Crack analysis of HTPP-ECC's were performed by using DIC method and compared with manual crack counting results.

Results: Strains obtained from the LVDTs and DIC were close to each other. Difference between the number of cracks found by manual crack count and DIC analysis was observed.

Conclusion: DIC has superiority than traditional methods such LVDT owing to its availability to both deformation and multiple crack analysis.



Çimento esaslı lifli kompozitlerin dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile çoklu çatlak davranışının incelenmesi

Tarık Yıldırım^{1*}, Kamile T. Felekoğlu², Eren Gödek³, Muhammer Keskinates^{1,4}, Burak Felekoğlu², Okan Önal²

¹Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Buca, İzmir, 35390, Türkiye

²Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Buca, İzmir, 35390, Türkiye

³Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Çorum, 19169, Türkiye

⁴Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, 70100, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Dijital görüntü korelasyonu (DIC) yönteminin deformasyon ölçümüyle ilgili literatür araştırması
- Çatlak sayısı ve çatlak genişliği taramasında alternatif yöntem olarak DIC ve MATLAB kullanılmıştır.
- DIC ile alansal deformasyon haritalarının elde edilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.07.2017

Kabul: 19.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416508

Anahtar Kelimeler:

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler, dijital görüntü korelasyonu, çoklu çatlak davranışı

ÖZET

Dijital görüntü korelasyonu (DIC), matematik tabanlı temassız bir deformasyon ölçüm tekniğidir. Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimentolu kompozitler (ECC) geleneksel lifli kompozitlerden farklı olarak kararlı çoklu çatlama davranışı göstermektedir. Bu kararlı çoklu çatlama davranışının analizi, kompozitin mekanik ve durabilite performansının değerlendirilmesi açısından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, DIC'in mühendislik malzemelerinin deformasyon ölçümleriyle ilgili uygulama alanları detaylı bir literatür taramasıyla sunulmuştur. ECC'nin çoklu çatlak davranışının analizi ile ilgili yapılan çalışmalar taranmış ve DIC yönteminin bu amaçla kullanılabilirliği deneysel olarak incelenmiştir. Bu kapsamda yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif kullanılarak kemik şeklinde çekme numuneleri üretilmiştir (HTPP-ECC). Kompozitlerin çekme yüklemesi altındaki deformasyonları numune etrafına yerleştirilen 4 adet geleneksel deformasyon ölçer (LVDT- Linear variable differential transformer) ve DIC tabanlı bir kamera sistemiyle kaydedilmiştir. LVDT ve DIC yöntemleri ile elde edilen bulgular kıyaslanarak, DIC tekniğinin kompozitlerin çoklu çatlama davranışının incelenmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır. Sonuç olarak, DIC'nin ECC'lerde deformasyon ölçümü açısından LVDT'lerle yakın sonuçlar verdiği ve çatlak analizi avantajıyla geleneksel yöntemlerden üstün yanları olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of multiple cracking behavior of cement-based fiber composites by digital image correlation method

H I G H L I G H T S

- Literature review about deformation measurement of digital image correlation (DIC) method
- DIC and MATLAB have been used as alternative methods to find the number of cracks and crack width.
- Obtaining full-field strain maps with DIC

Article Info

Research Article

Received: 20.07.2017

Accepted: 19.12.2017

DOI:

10.17341/gazimmfd.416508

Keywords:

Engineered cementitious composites, Digital image correlation, Multiple cracking behavior

ABSTRACT

Digital image correlation (DIC) is a mathematically based non-contact deformation measurement technique. Engineered cementitious composites (ECC) exhibit steady state multiple-cracking behavior unlike conventional fiber reinforced composites. Analysis of this stable multiple cracking behavior is quite important in terms of evaluating the mechanical and durability performance of the composite. In this study, DIC's application areas on deformation measurements of engineering materials are presented with a detailed literature review. Studies on the analysis of the multiple cracking behavior of ECC have been researched and the availability of the DIC method experimentally investigated for this purpose. In this context, dog-bone shaped tensile specimens were produced by using high tenacity polypropylene fibers (HTPP-ECC). The deformations of the composites under tensile loading were recorded with 4 conventional deformation gauges (LVDT-Linear variable differential transformer) and a DIC based camera system. The usability of DIC technique in the investigation of the multiple cracking behavior of composites was investigated by comparing the data obtained by LVDT and DIC methods. In conclusion, DIC has close results with LVDTs in terms of deformation measurement in ECCs and has superiority than traditional methods with the advantage of crack analysis.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: tarik.yildirim@ogr.deu.edu.tr, kamile.tosun@deu.edu.tr, erengodek@hitit.edu.tr, muhammer.keskinates@deu.edu.tr, burak.felegoglu@deu.edu.tr, okan.onal@deu.edu.tr / Tel: +90 554 914 6208

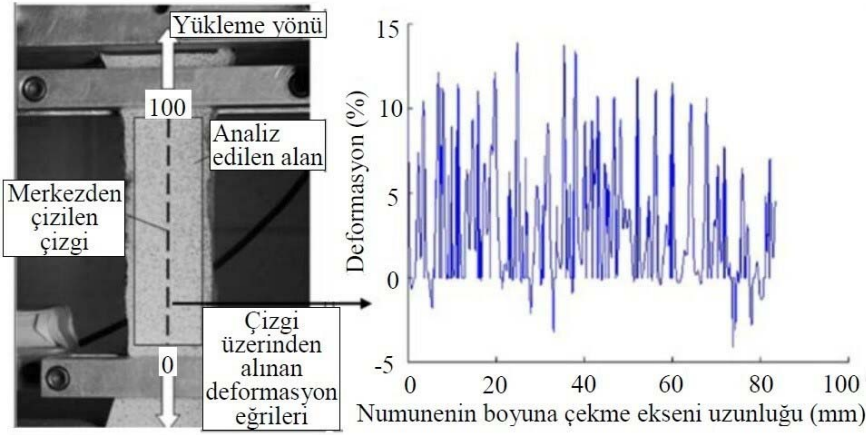
1.GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dijital görüntü korelasyonu (DIC-Digital Image Correlation) son yıllarda hızla gelişen ve temassız bir ölçüm tekniği olarak kullanımı giderek yaygınlaşan bir deformasyon ölçüm yöntemidir. Mekanik deneyler süresince deformasyona uğrayan örneğin dijital görüntüleri bir kamera yardımıyla çekilerek belirli zaman aralıklarında kaydedilir. Bu görüntüler yardımıyla örneklerin yüzeyine yapılan beneklemelerin deformasyon altındaki değişikliği bir bilgisayar yazılımı kullanılarak analiz edilir ve sonuçlar değerlendirilir [1-3].

DIC yöntemi 80'lerde 2 boyutlu (yüzeysel-in plane) yer değiştirme ve birim deformasyonların dijital görüntülerden hesaplanması amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır. Bu konudaki ilk çalışmalar, Yamaguchi [4], Peters ve Ranson [5] ve Güney Carolina Üniversitesi'nden Sutton ve arkadaşları [6] tarafından gerçekleştirilmiştir. Aslında dijital görüntü korelasyonu yönteminin çıkışında, akışkanların akma davranışlarının incelenmesinde kullanılan tanecik hızı görüntüleme (digital particle image velocimetry – DPIV) tekniklerinden esinlenilmiştir [7, 8].

DIC'nin, geleneksel deformasyon ölçüm tekniklerine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. DIC yöntemi örnek yüzeyindeki sınırlı sayıda farklı noktalar yerine tüm görünür yüzeyi inceleme imkânı sağlar. DIC, günümüzde çeşitli boyutlarda geniş aralıklı bir yüklem durumunda

betonarme elemanlarda oluşan çatlakların izlenmesi için kullanılmaktadır [9, 10]. Ayrıca, DIC başlangıç çatlaklarını (ilk çatlaklar) bulmada duyarlıdır ve bunun için deneyin durmasını gerektirmez [10]. Böylece, oluşan çatlaklar mikron boyutlarında iken tespit edilerek, çatlak ilerlemesi hassas bir şekilde takip edilebilmektedir [7, 11]. Normal şartlarda gözle görmenin mümkün olmadığı mikron mertebesindeki çatlaklar, DIC yöntemine entegre yazılım programlarıyla kolay bir şekilde tespit edilebilmektedir. DIC yöntemi bir nevi çatlak öncesi erken uyarı sistemi vazifesi görmekte, çatlak öncesi yerel deformasyon farklılıklarının izlenmesine olanak sağlamaktadır. Görsel inceleme ile böyle bir veri elde etmek mümkün değildir. Kareyaj teknikleri ile iki fotoğrafta birim deformasyon alanı oluşturma çabası hem çok fazla zaman alıcı hem de çatlak doğuşunun tespitinde DIC yöntemi kadar etkili değildir. Çünkü DIC yöntemi ile yüzlerce fotoğraf kısa sürede analiz edilebilmekte, hatta deformasyon gelişiminin videosu oluşturmak mümkün olmaktadır [12]. Çatlakların gelişiminin yanı sıra, çatlak sayısını ve genişliğini belirlemek ve bu verileri kullanarak istatistiksel analizlerini yapmak mümkündür [13]. Çatlak sayısı ve genişliği ile ilgili Ohno ve Li [14] tarafından yapılan bir çalışmada, DIC analizi sırasında incelenen örneğin merkezinde eksene dik olarak çizilen bir çizgi yardımıyla çizgisel deformasyonlar kaydedilmiştir (Şekil 1). Deformasyonların temel kaynağının çatlak oluşumu olarak kabul edildiği çalışmada, çizgi üzerindeki ani deformasyon değişimlerinden çatlak sayıları ve genişlikleri tespit edilmiştir (Tablo 1).



Şekil 1. DIC yöntemi ile elde edilen çizgisel deformasyonlar (Linear deformations obtained by DIC method) [14]

Tablo 1. DIC analizi ile hesaplanan çatlak genişliği dağılımları (Crack width distributions computed from DIC analysis) [14]

Deformasyon Seviyesi (Birim Şekil Değiştirme (%))	Çatlak sayısı	Maksimum çatlak genişliği (μm)	Ortalama çatlak genişliği (μm)
1,0	12	79	47 \pm 17
2,0	27	83	43 \pm 17
3,0	36	92	47 \pm 19
4,0	43	100	45 \pm 22
4,5	45	117	45 \pm 23

2. DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU (DIC) İLE DEFORMASYON ANALİZİ VE ANALİZİ ETKİLEYEN PARAMETRELER (DEFORMATION ANALYSIS WITH DIGITAL IMAGE CORRELATION AND PARAMETERS THAT AFFECT TO ANALYSIS)

DIC, bir örneğe belirli bir deformasyon/gerilme uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra çekilen bir çift dijital görüntüyü kullanarak, matematiksel olarak tanımlı fonksiyonlar yardımıyla “yer değiştirme vektör alanı”nın tahmini esasına dayanır [15]. Örneğin yüzeysel dijital görüntüsü kesikli bir fonksiyon olarak ifade edilebilir (8 bit görüntü için 0-255 farklı gri tonda pikselden oluşur). Komşu pikseller belirli sayıda gruplandırılarak alt kümeler elde edilir. Bu alt kümeler kullanılarak her alt kümenin alan merkezinin yer değiştirme vektörü belirlenir ve korelasyon hesaplamaları yapılır [16]. Referans (deforme olmamış) ve deforme olmuş örnek yüzeyinden alınan görüntüler üzerindeki “küçük piksel grupları” veya “alt kümeler” arasında eşleştirme yapılırken maksimum korelasyonun yakalanması hedeflenir [7].

2.1. DIC'nin Temel Prensipleri (The Basic Principle of DIC)

DIC yönteminde hedef görüntüdeki bir noktayı tanımlamak için pikseller kullanılır (Şekil 2) [17-19]. DIC yönteminin kullanılabilmesi için mekanik deney öncesinde örnek yüzeyi beneklendirilmelidir. DIC yönteminde deformasyona uğrayan örneğin iki adet beneklenmiş görüntüsünün deforme olmamış (referans görüntü) ve deforme olmuş (test durumu) halleri kaydedilip, rastgele gri seviyesi yoğunluk dağılımları kullanılarak analiz edilmektedir [20, 21]. Referans görüntüsü (deforme olmamış örneğin deney başlangıcındaki ilk görüntüsü) üzerinde analiz yapılacak bölge alansal olarak seçilerek alt küme denilen uygun boyutlarda kare pencerelere bölünür [18, 19]. Seçilen her bir referans alt küme görüntüsü deforme olmuş görüntüdeki olası tüm alt kümelerle çapraz korelasyonlanmaktadır [22, 23]. Referans görüntüsünde test edilen ilgili bölgede ki (Region of Interest-ROI) fiziksel noktaların çevresi NxN piksellerinde kare alt küme olarak seçilir ve deforme olmuş görüntüde hesaplanmış korelasyon katsayısının maksimum değerini hedefleyerek ilgili konumlarını bulmak için kullanılır [19]. DIC’de deformasyon analizi için kullanılan çeşitli korelasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu korelasyonlar

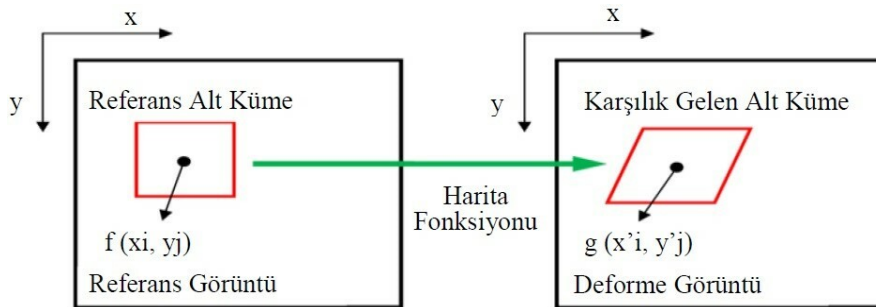
referans ve deforme olmuş görüntü arasındaki benzerliklerin hesaplanmasında oldukça kritik bir öneme sahiptir. Araştırmacılar tarafından korelasyon kriteri için kare farklarının toplamı (sum of squared differences-SSD), normalleştirilmiş çapraz korelasyon (normalized cross-correlation-NCC) gibi çeşitli korelasyon hesaplamaları önerilmiştir [17]. Tablo 2’de korelasyon hesaplamalarında kullanılan SSD, sıfır ortalamalı kare farkının toplamı (zero-mean sum of square difference-ZSSD), normalleştirilmiş kare farklarının toplamı (normalized sum of squared differences-NSSD), sıfır ortalamalı normalleştirilmiş kare farklarının toplamı (normalized sum of squared differences-ZNSSD), NCC, mutlak farkların toplamı (sum of absolute differences-SAD) yöntemlerinin formülleri sunulmuştur [25]. Burada; F_i : taranan i 'nci alt kümenin referans görüntüdeki gri renk skalası değerleri, G_i : taranan i 'nci alt kümenin deforme görüntüdeki gri renk skalası değerleri, $\bar{F} = \sum F/n$, $\bar{G} = \sum G/n$, $\bar{F}_i = F_i - \bar{F}$ ve $\bar{G}_i = G_i - \bar{G}$ olarak tanımlanmaktadır [25].

Tablo 2. DIC yönteminde kullanılan temel korelasyon hesaplamaları

(The basic correlation calculations used in DIC method) [25]

Yöntem	Korelasyon hesaplama formülü
SSD	$\sum_i (G_i - F_i)^2$
ZSSD	$\sum_i ((G_i - \bar{G}) - (F_i - \bar{F}))^2$
NSSD	$\sum_i \left(\frac{\sum F_i G_i}{\sum G_i^2} G_i - F_i \right)^2$
ZNSSD	$\sum_i \left(\left(\frac{\sum \bar{F}_i \bar{G}_i}{\sum \bar{G}_i^2} G_i - \bar{G} \frac{\sum \bar{F}_i \bar{G}_i}{\sum \bar{G}_i^2} \right) - (F_i - \bar{F}) \right)^2$
NCC	$1 - \frac{\sum F_i G_i}{\sqrt{\sum_i F_i^2 \sum_i G_i^2}}$
SAD	$\sum_i F_i - G_i $

DIC, deney süresince örneklerinin yüzey görüntülerini kaydetmek ve dijital formda depolamak amacıyla video kameralar ya da fotoğraf makineleri kullanır. DIC yönteminde çizgiler, noktalar ve rastgele diziler dahil birçok desen yardımıyla tüm yüzey alanındaki deformasyonu



Şekil 2. DIC'nin temel prensibi; referans görüntüdeki referans alt küme ve deforme görüntüdeki hedef alt küme (The basic principle of DIC; reference subset in reference image and target subset in deformed image) [24]

ve/veya hareket ölçümlerini elde etmek için görüntü analizi gerçekleştirilmektedir. DIC yöntemi deplasmanı ölçerken görüntü yüzeydeki değişimler ile paralel sonuçlar verir [26]. Son birkaç yılda teknolojinin ilerlemesiyle birlikte DIC'nin doğruluğu ve hesaplama hızı geliştirilmiş ve buna bağlı olarak uygulama alanları da genişlemiştir. DIC ile elde edilen sonuçların doğruluğu benekleme kalitesi, alt küme (subset) boyutu, adım aralığı (step size) ve korelasyon kriteri gibi birçok faktör tarafından etkilenmektedir. Bu kriterlerin analiz sonuçlarına etkileri birçok araştırmacı tarafından yapılan farklı çalışmalarla incelenmiş ve optimize edilmeye çalışılmıştır [17]. Dijital görüntü korelasyonunun kullanımı geniş bir alanda çalışmayı, sürekliliği ve analiz sonrasında analiz görüntülerine eklenebilen sayısız sanal sensörle eşdeğer ölçümler elde etmeyi sağlar. Bu nedenle kullanım kolaylığı, tekrarlı kullanımı sayesinde uzun vadede düşük maliyetli bir görüntü analiz tekniği olarak geleneksel deformasyon ölçümlerine kıyasla daha avantajlıdır [2]. DIC yönteminin avantajlarının yanı sıra bir takım dezavantajları da mevcuttur. İlk olarak; hasar gören alanların analizinde birtakım zorluklar oluşmakta ve deformasyona uğrayan görüntüde alt kümeler tanımlanırken tüm alt kümedeki piksellerin gri renk kodları eşit olarak algılanmaktadır. Hasarlı alanların yakınındaki pikseller üzerinde hesaplama yapılırken analiz sonuçları bu durumdan etkilenmektedir [17]. DIC yönteminde her beneklenmiş desen üzerinde korelasyon oluşmayabilir. Bu durum aşırı deformasyondan veya çatlak gibi süreksizliklerin oluşumundan kaynaklanabilir. Buna bağlı olarak görüntü üzerinde oluşan bu bölgedeki yer değiştirmelerin korelasyon ile hesaplanamaması söz konusu olabilir [25]. Optik metot kontrollü ortam sağlanamadığında (kontROLSÜZ ışıklandırma) hata oranı kontrast düşüşünden dolayı artacaktır. Zemin titreşimleri gibi dış etkenlerin bulunması da ölçülen sonuçları olumsuz yönde etkileyebilir. Ayrıca kamera başlangıç kalibrasyon parametreleri kameranın hareket etmesinden dolayı bu da yeniden kurulum gerektirebilir [2].

2.2. Analiz Sonuçlarını Etkileyen Parametreler (Parameters that Affect on Analysis Results)

2.2.1. Numune hazırlanması ve benekleme (Sample preparation and speckle)

DIC ile incelenen örneğin doğal bir yüzey dokusu yoksa malzeme yüzeyine yapay rastgele benekleme

uygulanmalıdır. Buradaki amaç, oluşturulan her bir alt kümenin benzersiz desene sahip olmasını sağlamaktır [1, 28]. Örnek yüzeyi tekrarsız, izotrop ve yüksek kontrastlı olduğunda benzersiz alt kümelerin oluşma ihtimali artarak daha belirgin analiz sonuçlarının alınmasını sağlanmaktadır (Şekil 3) [28, 29]. Benekleme yöntemi mikroskop altında çekilmiş mikro fotoğraflarda kullanılabilirdiği gibi metrelerce uzunlukta çerçeve sistemlerinin deformasyonunda da kullanılabilir [2]. Benekleme uygulaması için örnek yüzeyine beyaz mürekkep tabaka uygulandıktan sonra 4 mm polivinil klorür (PVC) şablon kullanılarak bağımsız noktalarla benekleme yapılmıştır. DIC ve deformasyon ölçerleri arasındaki iyi korelasyon, DIC'nin bu çalışmada pratik ve güvenilir bir yöntem olduğunu doğrulamıştır. Ayrıca, analiz edilecek görüntüde benek başına düşen piksel sayısı 3-8 arasında olması önerilmektedir [2, 30].

Alt küme boyutunun seçimi, deneysel çalışmalara ve deplasman verileri ile korelasyon problemleri arasındaki karşılaştırmaya dayanır [31]. Ortalama benek boyutu için benek kontrastı yüksek ise referans alt kümenin küçük olması daha uygun olur [22]. Park ve arkadaşlarının [32] yaptığı çalışmada, benekleme modellerinin alt küme seçimi ile ilgili hatalar üzerinde, alt küme boyutundan daha önemli (alt küme boyutunun yeterli olması koşuluyla) etkilere sahip olduğunu göstermektedir [32]. Belirli bir benek desenindeki benek boyutunun, alt küme boyutu ile kombinasyonu yapıldığında ölçülen yer değiştirmelerin doğruluğunu etkilediği görülmüştür [33]. Ancak, benekleme ve alt küme ilişkisi ile ilgili farklı yoğunluklarda benekleme ve farklı boyutlarda alt küme analizi üzerine çalışmalar yapılmasına rağmen alt küme ve benek deseni ile ilgili kesin sonuçlar elde edilememiştir [34]. Numuneler üzerindeki beneklemeleri sayısallaştırmak için daha fazla araştırma yapılmalıdır, bu sayede benekleme türü ve boyutu deneysel çalışmalar ile kontrol edilip optimize edilebilir [33].

DIC kullanımı sırasında beneklenmiş görüntülerin sağlıklı elde edilebilmesi için de bazı gerekliliklerin sağlanması şarttır;

- Numune yüzeyi düz olmalı,
- Düzlem dışı deformasyonlar ihmal edilecek kadar küçük olmalı,
- Kamera ve numune yüzeyi birbirlerine paralel olmalıdır (Şekil 4) [17, 18].



Şekil 3. a) DIC yöntemi için uygun olmayan desen türleri b) ideal Benekleme
(a) Improper pattern types for DIC analysis, b) ideal speckle) [29]



Şekil 4. Beneklenmiş görüntü elde etmek için tipik DIC sistemi (Typical DIC system for obtaining the speckled image) [18]

2.2.2. Analizde kullanılacak fotoğraf makinası (Camera that will be used for analysis)

DIC yönteminde görüntüleri elde etmek için kullanılan fotoğraf makinasının bazı özelliklerine dikkat edilmelidir. Lens, çözünürlük ve sensör başlıca önemli özelliklerdendir. Özellikle sensörler fotoğraf kalitesini etkilemektedir. En yaygın olan sensör türleri CCD (Charged Coupled Device) çift geçirgenli aygıt ve CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) tamamlayıcı yarı-iletken metal oksittir [35, 36]. Sensör ışığa duyarlı binlerce foto diyottan (photodiode) oluşan küçük düz bir ekrandır. Her bir foto diyot ışığın üzerine düşmesiyle bir gerilim üretir. Görüntü, piksel denilen ışık noktacıklarından oluşur. Son derece minyatür görüntüleme sistemlerine dayalı CMOS görüntü sensörü teknolojisi düşük maliyetli görsel tasarım ve multimedya uygulamalı CCD'ye rakip olarak ortaya çıkmıştır [37]. Yüksek hızlı olayları yakalamak için yeterli miktarda görüntü karesi sağlayabilecek CMOS kamera kullanılmalıdır [38]. CMOS sensörlerin ışığa karşı duyarlılıkları CCD sensörler kadar iyi değildir [37]. CMOS kameralar kaliteli görüntü verseler bile CCD kameralar kadar iyi olmadıkları, bu yüzden yüksek hassasiyetli ölçümlerde CCD kamera kullanılması önerilmektedir [39]. CCD fotoğraf makinesindeki görüntü kalitesi mevcut ışık yoğunluğuna bağlıdır [40]. DIC yöntemi yüksek maliyetli görüntü elde eden donanımları gerektirmektedir, bu donanımlar da sıklıkla gürültü oranı düşük sinyale (signal to noise ratio - SNR) sahiptirler. Bu nedenle farklı fotoğraf makinelerinin görüntü gürültüsü (noise) ve bundan kaynaklanan yer değiştirme hataları önemlidir. CCD fotoğraf makinesinin CMOS fotoğraf makinesine göre daha iyi SNR'ye sahip olduğu belirtilmektedir [41].

2.2.3. Alt küme ve analiz adım aralığı (Subset and step size)

DIC yönteminde optimum alt küme boyutunu belirlemek için kullanılan genel bir kural yoktur. Bu yüzden optimum alt küme boyutu uygulamadan uygulamaya değişkenlik göstermektedir. Büyük alt küme boyutu daha uzun hesaplama süresi gerektirir ve yer değiştirme alanının ortalama sonucunu vermektedir. Çok küçük alt küme boyutu yetersiz sayıda özellik içerir ve görüntü içerisinde diğer alt

kümelerden ayırt ederken zorlanmalar başlar. Bu nedenle küçük alt küme boyutu güvenilir bir korelasyon sağlamayabilir [42]. Belirli bir boyuttan sonra alt küme boyutunun artması ölçüm kalitesinin somut bir şekilde gelişeceği anlamına gelmez [43]. Bu durumda, referans resimle en iyi eşleşmeyi sağlayacak alt küme boyutunun seçiminin yapılan benekleme ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Alt küme boyutuna bağlı olarak daha çok bilgi içeren alt kümelerin rastgelelik hatasına daha az maruz kaldığı görülmüştür. Ancak, optimum küme boyutunun rastgelelik hatasına değil, eşleşmeyen görüntülerden kaynaklanan sistematik hataya dayandığı da unutulmamalıdır [44]. Son yıllarda yapılan çalışmalarda, alt küme boyutları analiz açısından ideal alt küme boyutu olarak 31x31 – 51x51 piksel kümeleri arasında önerilmektedir. Belirlenen alt kümelerin takibi [42] ve taraması için bir korelasyon algoritması da kullanılabilir [44, 45].

Adım aralığının temel rolü alt küme taranma sıklığını belirlemektir. Analiz adım aralığı, bir sonraki noktayı hesaplamak için alt kümenin dikey ve yatay yönde kaç piksel yer değiştirdiğini tanımlar [43, 46]. Uygun bir analiz adım aralığı seçimi, sınırlı sayıda ölçüm noktası için gerçeğe yakın deformasyonların hesabına imkân verir. Küçük analiz adım aralığı çok sayıda ölçüm noktasına erişilmesini sağlar, ancak elde edilen deformasyon bölgesi daha gürültülü duruma gelir. Bu nedenle amaçlanan uygulamaya yönelik olarak alt küme boyutunun yanı sıra analiz adım aralığı da optimize edilmelidir [43]. Yapılan bir çalışmada, deformasyon değişkenliğini azaltmak için, analiz adım aralığı en az 1 piksel ile başlanması ve analiz için seçilen alt küme boyutunun ½'sine eşit ya da küçük olması önerilir. Analiz adım aralığı boyutu ne kadar küçükse, deplasman veri noktalarının sayısı o kadar artar ve korelasyon hesaplama süresi de bir o kadar uzun olur [46-48].

3. MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ GELİŞTİRİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI LİFLİ KOMPOZİTLER (ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES)

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı lifli kompozitler (Engineered Cementitious Composites-ECC) çekme, eğilme ve kesme yüklemeleri altında çoklu çatlak

davranışı gösterebilen yüksek süneklığe ve tokluğa sahip yeni nesil yapı malzemeleridir [49, 50]. ECC; çimento esaslı bir matris ve mikro boyutlu polimerik lifler kullanılarak üretilmektedir [51]. ECC'nin matris fazında çimentonun yanı sıra uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli mineral katkılardan, silis ve kireçtaşı tozu (<200 µm) gibi inert malzemelerden de yararlanılmaktadır [52]. Lif olarak genellikle hacimce %2 oranını aşmayacak şekilde polietilen (PE), polivinil alkol (PVA) veya son yıllarda yüksek dayanımlı polipropilen (HTPP) lifler tercih edilmektedir [53]. Matris dayanımı, lif dayanımı, boyutu ve geometrisi ile matris-lif arasındaki aderansı etkileyen lif yüzey özellikleri gibi parametreler ECC tasarımında dikkate alınmaktadır [54]. ECC'nin gösterdiği bu üstün performans özelliklerinin temel nedeni, matris içerisinde çok sayıda ve tüm kesitlere dağılmış halde bulunan polimerik mikro lifler sayesinde gösterdiği kararlı çoklu çatlama davranışıdır [55]. ECC, yük altında oluşturduğu bu kararlı çoklu çatlama davranışıyla normal beton ve geleneksel lifli kompozitlerden farklı olarak deformasyon sertleşmesi gösterir. Bu davranışın temelinde ise kompoziti oluşturan matris, lif ve lif-matris aderans özelliklerine bağlı olarak gerçekleşen mikro-mekanik bir model bulunmaktadır. 1990'lı yıllarda Li ve arkadaşları tarafından tasarlanan bu mikro-mekanik modele göre, kararlı çoklu çatlak davranışının görülebilmesi için mikro-mekanik model içerisinde bulunan enerji ve dayanım kriterlerinin her ikisinin de sağlanması gerekir [55]. Enerji kriteri, kompozit bünyesinde oluşacak çatlakların türünü (Griffith tipi ya da kararlı çatlak) belirlemektedir. Dayanım kriteri ise açılan çatlaklardaki lif köprüleme gerilmesinin matristeki ilk çatlak dayanımından yüksek olması gerektiğini belirtmektedir.

ECC'nin yük taşıması sırasında oluşan kararlı çatlakların kontrolü, oluşan bu çatlakların gelişiminin takip edilmesi ve bölgesel olarak ölçülmesi ile sağlanabilir [14]. Ancak, ECC'nin çatlak analizinin bütünüyle yapılabilmesinde geleneksel ölçüm yöntemleri (noktasal sensörler, çatlak genişliğini ölçen mikro-sensörler vb.) yetersiz kalmaktadır. Bu durumun nedeni, çok sayıda mikro boyutlu kararlı çatlakların örneğin kesiti üzerinde rastgele oluşmasıdır. Her bir çatlağın yük altındaki genişleme davranışını incelemek, hem açılan çatlakların kesit üzerinde nerede oluşacağını bilinememesi hem de çok sayıda sensör gerektirmesi nedeniyle uygulamada neredeyse imkânsızdır. Bu durum, ECC'nin çatlak analizinin eş zamanlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için, geniş bir alanı mikron mertebesinde inceleyebilecek bir sistemin gerekliliğini zorunlu kılmıştır [56]. Ohno ve Li [14], çekme gerilmesi altında çoklu çatlak davranışı gösteren mühendislik özellikleri geliştirilmiş polimerik lif katkılı geopolimer kompozitleri incelemiştir. %4-5 çekme birim deformasyon kapasitesine sahip geopolimer kompozitlerde 20 mikrondan büyük çatlakları DIC yöntemi ile tespit ederek kompozitin çatlak

doğunluğuna ulaştığını göstermiştir. Felekoğlu ve Keskinates [56] tarafından yapılan çalışmada hem gerçek hem de sanal LVDT değerlerinin birbirine yakın olduğu, yerel deformasyonların ve deformasyon yoğunlaşma bölgelerinin belirlenmesinde DIC yönteminin kullanılabilmesi tespit edilmiştir. Ayrıca istenen birim şekil değiştirme seviyelerinde kompozit çatlak sayısı çatlak genişliği değerlerinin DIC'den elde edilen verilerle belirlenebileceği gösterilmiştir.

Klasik deformasyon ölçme yöntemlerinde ECC kompozitlerinin ilk çatlak dayanımlarının belirlenmesi için subjektif bir yöntem kullanılmaktadır. Genellikle kompozitin yük-sehim eğrisinin ilk sapma noktası kompozitin ilk çatlak dayanımı olarak kabul edilmektedir. Bu yöntemle her ne kadar ilk çatlak yükü tahmin edilebilse de, oluşan çatlağın yerinin belirlenmesi henüz çatlak genişliğinin mikron mertebesinde olması sebebiyle mümkün olmamaktadır. DIC'nin getirdiği en önemli avantajlardan birisi de kompozit üzerinde oluşacak olan ilk çatlağın yük değeri ile yerinin kolayca ve yüksek doğrulukta tespit edilebilmesidir. Ayrıca, kompozit üzerinde oluşan diğer çatlakların sayısı ve genişliği, DIC'nin deney sonrası analiz yapma özelliği (post-processing analysis) ile hesaplanabilmektedir. Yu ve arkadaşlarının [57] yaptığı çalışmada ECC'nin ilk çatlak dayanımının ve yerinin tespitinde DIC yöntemini kullanmış ve sonradan işlenebilirlik özelliğini kullanarak kompozitlerin çatlak genişliklerini tespit etmiştir. ECC'nin farklı sıcaklıktaki mekanik davranışının incelendiği çalışmada, sıcaklık değerinden bağımsız olarak DIC yöntemi ile tespit edilen çatlak genişliklerinin 120 µm civarında olduğu bulunmuştur [57].

Bu çalışmanın deneysel kısmında, hacimce %2 oranında yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) kullanılarak hazırlanan kemik şeklindeki çekme örneklerine tek eksenli çekme deneyleri uygulanmıştır. Deney sırasında örneklerin çekme yüklemesi altındaki deformasyonları, örneğin etrafına yerleştirilen 4 adet geleneksel deformasyon ölçer (LVDT) ve DIC tabanlı bir kamera sistemiyle kaydedilmiştir. LVDT ve DIC yöntemleri ile elde edilen bulgular kıyaslanarak, DIC tekniğinin kompozitlerin çoklu çatlama davranışının incelenmesinde kullanılabilirliği araştırılmıştır.

4. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

4.1. Kullanılan Malzemeler (Materials Used)

Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan örneklerin lif fazında yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP), matris fazında ise öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC), Portland çimentosu (CEM I 42,5R), su ve süper

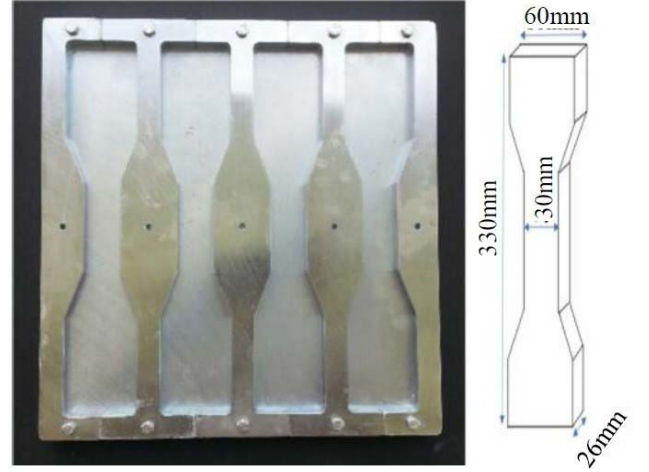
Tablo 3. Matrisin karışım oranları (Mixing ratio for matrix)

Bileşenler	Çimento	Yüksek Fırın Cürufu	Su	Süper akışkanlaştırıcı	HTPP lif
Ağırlık (kg/m ³)	447	1118	438	4,25	18

akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Örneklerin hazırlanması sırasında kullanılan malzeme miktarları Tablo 3'te sunulmuştur. Hazırlanan örneklerin su/bağlayıcı (S/B) oranı 0,29, su/çimento (S/Ç) oranı 0,98 ve puzolan/çimento (P/Ç) oranı 2,5 olarak belirlenmiştir.

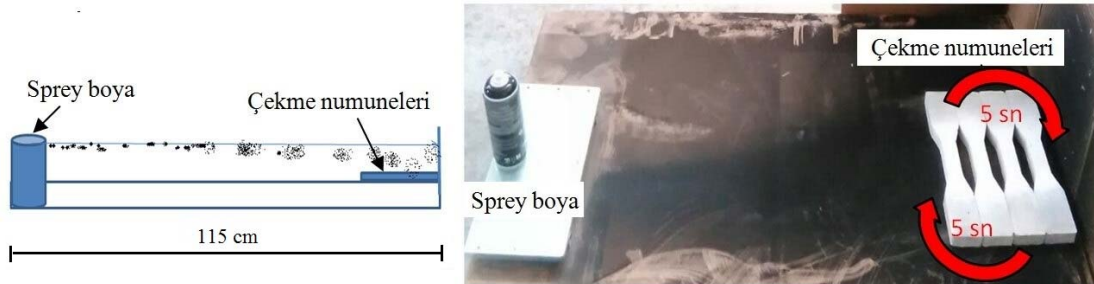
Örnekler, zemin tipi bir Hobart mikser kullanılarak karışım hacmi 4 dm³ olacak şekilde hazırlanmıştır. Öncelikle toz malzemeler 3 dakika kuru olarak karıştırılmış, ardından su ilavesi yapılarak 3 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Homojen ve akıcı bir matris elde edildikten sonra matrislere hacimce %2 oranında HTPP lif ilavesi yapılmış ve lifler tüm matrise homojen şekilde dağıtılabilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilip 3 dakika daha karıştırılmıştır. Hazırlanan matris karışımı 26 mm kalınlığında kemik şeklindeki çekme kalıplarına doldurulmuştur. Taze haldeki karışımdan örnek alımı sırasında kullanılan kalıplar, Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu'nun yüksek performanslı lifli kompozitler üzerine çıkartmış olduğu öneri kitabı (JSCE, 2008)'de belirtilen ölçülere uygun olarak yaptırılmıştır (Şekil 5). Taze harcın sıkışması için kısa süreli dış vibrasyon uygulanmıştır. Örnekler kalıba alındıktan 2 gün sonra kalıplardan sökülmüş ve kür havuzuna konularak 28 gün boyunca 20±2°C'deki kirece doygun suda saklanmıştır. 28 gün sonunda kürden çıkarılan örnekler 1 gün havada kurutulmuş, ardından çekme deneyleri yapılarak gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. Çekme numuneleri DIC sistemi için hazırlanırken analiz edilecek bölgedeki lifler, beneklemeyi olumsuz etkilememesi için yakılmıştır. Örneklerin DIC yöntemiyle analiz edilebilmesi amacıyla örnek yüzeyinde rastgele benekleme yapılmıştır. Bu amaçla siyah ve beyaz renkli sprey boyalar kullanılmıştır. Arka planı beyaz boya ile hazırlanmış örnekler üzerine siyah sprey boya (mat) ile 115 cm mesafeden karşı yüzeye doğru 5 sn numunenin bir yanından, 5 sn öteki yanından olmak üzere toplamda 10 sn boya püskürtülmüştür. 85-115 cm uzaklıktaki bölgeye numuneler koyularak beneklendirme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 6). Çekme deneyi sonrasında numuneler üzerindeki çatlaklar 2 yöntem ile sayılarak belirlenmiştir. Bunlar, maksimum gerilmeye denk gelen görüntünün orta bölgesinde manuel olarak sayılması ve yine aynı görüntünün orta bölgesinden çizilen çizgi boyunca DIC analizinden elde edilen birim deformasyon değerlerinin bir grafik halinde çizilip pik değerlerin çatlak olarak kabul edilmesi esasına dayanır. Çekme deneyleri sırasında kullanılan DIC sistemi entegre edilmiş deney düzeneği Şekil 7'de sunulmuştur.

Şekilde gösterilen çekme deneyi düzeneği ile yükleme hızı 0,5 mm/dk olacak şekilde çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. DIC ile incelenecek analiz bölgesinin uzunluğu 100 mm olarak belirlenmiş ve bu bölgedeki birim şekil değiştirmeler, 2 tanesi önde ve 2 tanesi arkada olmak üzere toplamda 4 adet gerçek LVDT kullanılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Şekil 7'de gösterilen analiz görüntüsü üzerine 3 adet çizgisel ekstansometre (sanal LVDT) çizilerek elde edilen birim şekil değiştirmelerin ortalaması 4 adet gerçek LVDT ortalaması ile kıyaslanmıştır.



Şekil 5. Çekme numunesi kalıbı ve boyutları (Tensile specimen mold and its dimensions)

Fotoğraf makinesi MachVis yazılımı aracılığı ile lens türüne bağlı olarak numunenin analiz edilecek bölgesinin net alan derinliği içerisinde kalması sağlanarak numuneye 132,5 cm uzaklığa konumlandırılmıştır. Numune yüzeyine dik olması için 3 eksenli lazer düzleyiciden yararlanılmıştır. Bu sayede görüntü yüzeyi ile numunenin paralelliği sağlanmıştır. Çekme deneyleri süresince her 5 saniyede bir görüntü kaydedilmiştir. Görüntülerin çekiminde 8 bit mono kamera (Tablo 4) ile LED ve halojen ışıklar kullanılmıştır. Elde edilen görüntülerin analizleri ise çekme deneyi sonrasında VIC-2D isimli ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zhang ve arkadaşları [45] yaptıkları bir çalışmada alt küme boyutu olarak 31x31-51x51 piksel önermektedirler. Bu yüzden analizler sırasında bu aralıkta bulunan alt küme boyutu 33x33 piksel ve adım aralığı olarak ise alt kümenin %75 eşlenerek taranması sağlayan 8 piksel



Şekil 6. Sprey boya ile benekleme metodu (Speckle method with spray paint)

seçilmiştir. Ayrıca NSSD korelasyon ($\sum((\sum FiGi / \sum Gi^2) Gi - Fi)^2$) yöntemi kullanılmıştır. Bu korelasyon yöntemi VIC-2D programının varsayılan ayarıdır ve aydınlatma seviyesinden etkilenmemektedir. Korelasyon yöntemi belirlenen alt küme için tüm analiz bölgeleri için uygulandıktan sonra sona erer. Korelasyon değerleri, en küçük kareler yönteminin normalize edilerek elde edilen değerlerdir. En iyi korelasyon NSSD ile ulaşılan ve sifıra en yakın olan değerdir.

Tablo 4. Kamera özellikleri (Camera properties)

Çözünürlük	3384x2710 piksel
Sensör	1" CCD
Lens	Rodegon 80, C-mount
Maksimum kare/sn değeri	10,1 kare/sn (fps-frame per second)
Bit derinliği	8-bit
Çalışma Sıcaklığı	(+5) °C ile (+45) °C arasında
Kamera türü	Monokrom
Alan Derinliği	4,8 mm
Odak uzaklığı	82,29 mm
Uzatma tüpü	48 mm

4.2. VIC-2D Hata Analiz Verileri (Error Analysis Data of VIC-2D)

Her bir numune için analiz tamamlandıktan sonra VIC-2D programı analiz raporunu otomatik olarak hazırlamaktadır. Raporda analiz süresi, hata oranları, her bir numune için analiz edilen piksel sayısı gibi parametreler yer almaktadır. Bu parametrelerin bazıları Tablo 5'te gösterilmiştir. Programın sunduğu hata değerleri eşleşme kalitesini göstermektedir. Düşük değerler daha iyi kalitede eşleşme olduğu anlamına gelmektedir. VIC-2D yazılı ile eşleşen görüntülerdeki hata oranları her bir görüntü ardışık olarak

kıyaslandığında ortalama %0,19 hata vermektedir. Referans görüntü ile maksimum gerilmedeki görüntü kıyaslandığında ise maksimum %1,90 hata oluşmaktadır.

4.3. Gerçek LVDT ve DIC (sanal LVDT) Sonuçlarının Kıyaslanmasında Kullanılan Yöntemler

(Method that Use for Comparison of (virtual LVDT) DIC and Real LVDT Results)

Mekanik deneylerden elde edilen veriler (LVDT) ve DIC yöntemi kullanılarak elde edilen analiz sonuçları kullanılarak her bir numune için ϵ_{LVDT} (4 adet LVDT'nin ortalaması), ϵ_{DIC} (3 adet çizgisel sanal LVDT'nin ortalaması) parametreleri hesaplanmış, her bir numune için $\sigma-\epsilon_{LVDT}$ ve $\sigma-\epsilon_{DIC}$ eğrileri çizdirilmiştir. LVDT değerleri referans alınarak iki farklı yöntem yardımıyla DIC verilerinin kullanılabilirliği araştırılmıştır.

1. yöntem, maksimum gerilme noktasına göre birim şekil değiştirmelerin kıyaslanmasıdır. $\sigma-\epsilon$ diyagramında maksimum gerilmeye (σ_{mak}) karşılık gelen birim şekil değiştirmelerin (ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC}) kıyaslanmasıdır (Şekil 8). Bu yöntemde ϵ_{LVDT} değerleri mutlak doğru kabul edilmiş ve ϵ_{DIC} değerleri, ϵ_{LVDT} değerlerinin yüzdesi olarak ifade edilmiştir (Eş. 1). Bu metoda göre; $(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 = 100$ ise $\epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT}$ (Mükemmel ölçüm), $(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 > 100$ ise $\epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT}$ (DIC analizinin fazla ölçmesi) ve $(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 < 100$ ise $\epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT}$ (DIC analizinin eksik ölçmesi) şeklinde üç farklı durum ortaya çıkabilmektedir.

$$(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 \quad (1)$$

2. yöntem ise maksimum gerilme noktasına kadar tüm birim şekil değiştirme değerlerinin kıyaslanmasıdır. $\sigma-\epsilon$

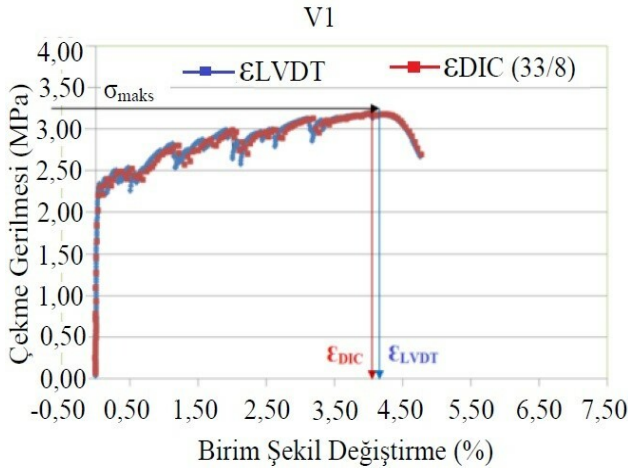


Şekil 7. Çekme deneyi cihazı ve görüntü analiz ekipmanları (Tensile test setup and image analysis equipment)

Tablo 5. VIC-2D programı hata analiz verileri (Error analysis data of VIC-2D program)

Numune kodu	Görüntü sayısı	Toplam analiz süresi (saniye)	VIC-2D Analiz Verileri	
			Her bir görüntünün ardışık olarak eşleşme hatası (ortalama (%))	Referans görüntüsü ile maksimum görüntü arasındaki eşleşme hatası (%)
V1	151	49	0,18	1,90
V2	125	39	0,20	0,90
V3	160	52	0,20	1,40

diyagramında maksimum gerilmeye kadar her bir gerilme değerindeki LVDT ve DIC'nin birim şekil değiştirme değerlerini kıyaslama metodudur. Bu yöntemde eksenal sistemde düşey ekseninde ϵ_{LVDT} yatay ekseninde ϵ_{DIC} verileri olacak şekilde eğri çizdirilmiş ve elde edilen eğrinin doğrusal denklemi elde edilmiştir (Şekil 9). Eş. 2'e göre; b değeri 1'e ne kadar yakın olursa, ϵ_{DIC} ile ϵ_{LVDT} verileri birbirine o kadar yakın olacağı için değerlendirmeler yapılırken, b değerleri dikkate alınmıştır. Buna göre; $b=1$ ise $\epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT}$ (Mükemmel ölçüm), $b>1$ ise $\epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT}$ (DIC analizinin fazla ölçmesi) ve $b<1$ ise $\epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT}$ (DIC analizinin eksik ölçmesi) olduğu ifade edilmiştir.



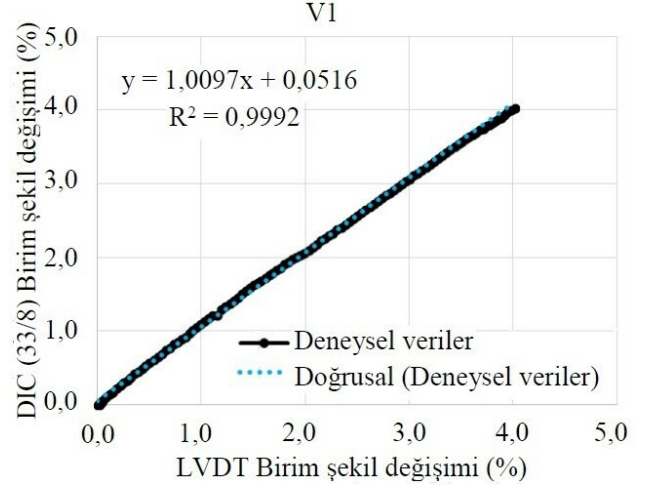
Şekil 8. V1 örneği için σ - ϵ diyagramında maksimum gerilmeye (σ_{maks}) karşılık gelen birim şekil değiştirmeler (ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC}) (In the σ - ϵ diagram, the unit deformations corresponding to the maximum stress (σ_{maks}) for V1 specimen) (ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC})

$$y = a + b.x \rightarrow \epsilon_{DIC} = a + b.\epsilon_{LVDT} \quad (2)$$

2. yöntemde, 1. yöntemden farklı olarak σ - ϵ diyagramında σ_{maks} 'dan sonra çatlak yapısı, kararlı çatlak durumundan (steady state crack) kararsız çatlak durumuna (Griffith type crack) dönüştüğü için σ_{maks} 'dan sonraki kısımlar hata hesaplamalarında dikkate alınmamıştır.

5. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

Yapılan çalışmada 3 adet numune için çekme deneyleri yapılmış ve mekanik sonuçları Tablo 6'da verilmiştir. Ayrıca numunelerin maksimum gerilmedeki fotoğrafları kullanılarak; çatlak sayıları hem görüntü üzerinden hem de VIC-2D yazılımında elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan bir MATLAB algoritması ile elde edilmiştir. DIC yazılımı ile analiz bölgesinin orta bölgesine çekme yönü doğrultusunda sanal bir çizgi çizilerek buradaki lokal deformasyonlar belirlenmiştir. Bu lokal deformasyonlardaki ani değişimler (pik noktalar) numunenin çatladığının göstergesi ve her bir pik değerinin altında kalan alan ise çatlak genişliği olarak kabul edilmiştir. Şekil 10'da V1 numunesi için deformasyon haritası, çatlak sayısı ve çatlak genişliği değerleri gösterilmiştir.

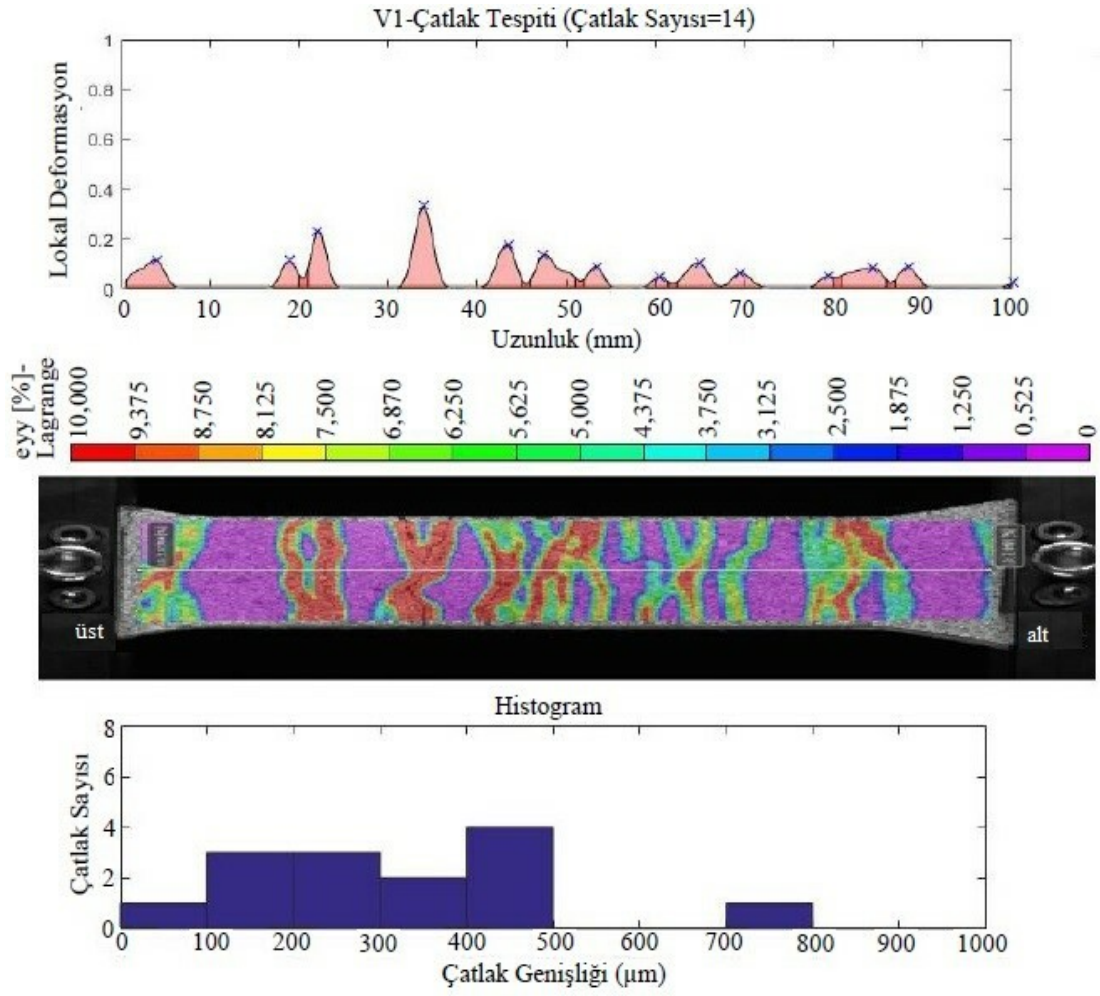


Şekil 9. V1 örneği için LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması
(Comparison of all unit strain data of LVDT and DIC for V1 specimen)

Kompozitlere ait çekme düktiliteleri ile çatlak olarak kabul edilen ani lokal değişimler için çatlak sayısı ve çatlak genişlikleri Tablo 6'da verilmiştir. Çekme düktilitesi, Gerilme - Birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde kompozitin taşıyabileceği en büyük gerilme seviyesine karşılık gelen birim şekil değiştirme değeridir. Ohno ve Li [14] tarafından yapılan çalışmada benzer bir şekilde deformasyon-uzunluk grafiğinde (Şekil 1) her bir pik çatlak olarak belirlenmiştir. Manuel olarak görüntü üzerinden çatlak sayıları belirlenmiştir ve bir görüntü işleme programı yardımıyla numunenin ilk ve maksimum görüntülerindeki piksel değişimleriyle toplam ve ortalama çatlak genişlikleri elde edilmiştir.

V2 örneğinde manuel çatlak sayımı ile DIC analizi sonucu bulunan çatlak sayıları arasında farklılık tespit edilmiştir. Bu örnekte ilginç bir durumla karşılaşmıştır. Fotoğraf üzerinden bazı çatlaklar manuel olarak gözlenemeyecek kadar ince oldukları için çatlak sayısı daha az çıkmıştır. DIC analizindeki bu fazlalık dikkate alınarak örnek yüzeyleri mikroskop altında tekrar incelenmiş ve söz konusu çatlakların çok ince olduğu, fotoğraftan tespit edilemediği ve DIC analizi ile bu çatlakların yakalanabildiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuç DIC analizinin avantajını ortaya koymaktadır. Yukarıda açıklanan nedenle V2 kodlu örnekte ortalama çatlak genişlikleri manuel sayım ve DIC analizi sonuçlarında yaklaşık %50 oranında farklı çıkmaktadır. Gerçeğe daha yakın sonuçların DIC analizi ile elde edildiği tespit edilmiştir.

Çekme deneyleri tamamladıktan sonra LVDT ve DIC ile elde edile deformasyon değerleri ile σ - ϵ_{LVDT} , σ - ϵ_{DIC} eğri grafikleri oluşturulmuştur (Şekil 11). Eğriler incelendiğinde yüksek oranda benzerlik gösterdiği görülmektedir. Deformasyon değerlerinin maksimum gerilmeye kadar olan tüm verileri her bir numune için ayrı ayrı kıyaslanmıştır (Şekil 12). Korelasyon değerleri %99 mertebelerindedir. Hata oranları için eğimi dikkate aldığımızda maksimum hata oranı ϵ_{DIC} verileri için %2,69 elde edilmiştir.



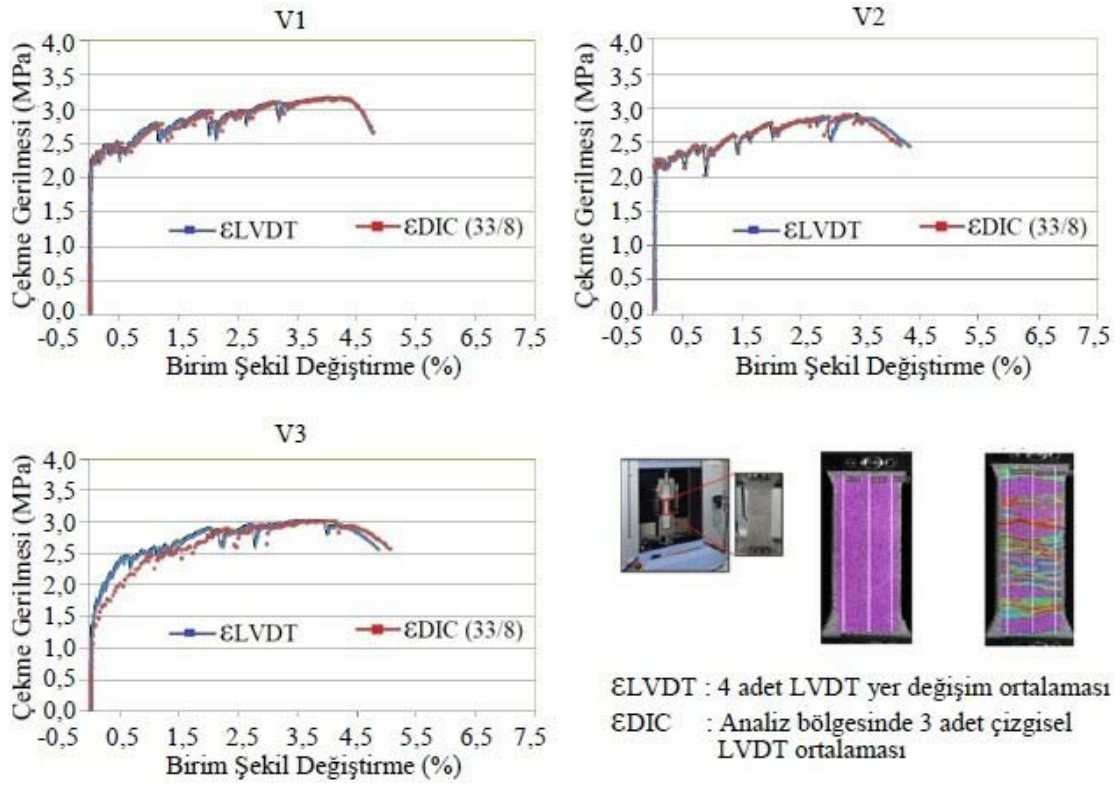
Şekil 10. V1 örneği için Çatlak sayısı tespiti ve çatlak genişliği histogramı
(Determination of crack number and crack width histogram for V1 specimen)

Tablo 6. Çekme deneyi sonuçları ve çatlak sayısı (Tensile test results and number of cracks)

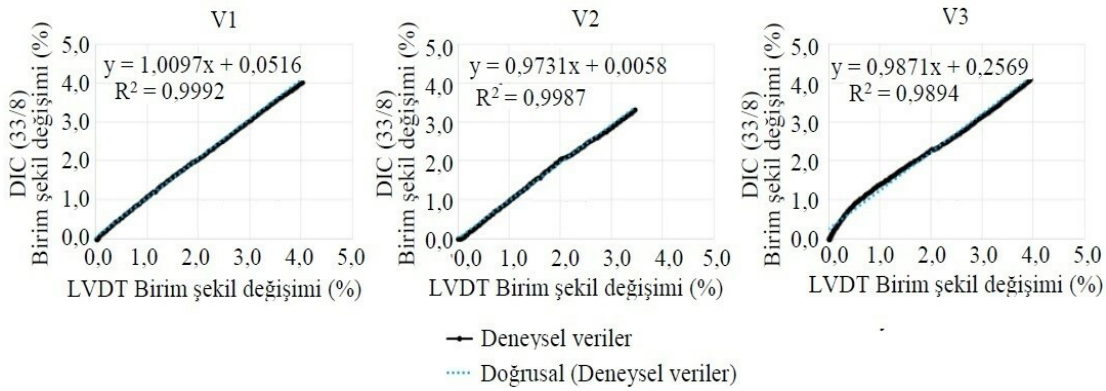
Kod	Çekme Düktilitesi (%)		Çatlak Sayısı		Toplam Çatlak Genişliği (mm)			Ortalama Çatlak Genişliği (mm)				
	Mak. Gerilme (MPa)	ϵ_{LVDT}	ϵ_{DIC}	Manuel	DIC-MATLAB	Fark (%)	Manuel	DIC-MATLAB	Fark (%)	Manuel	DIC-MATLAB	Fark (%)
V1	3,19	4,01	4,04	14	14	0	3,91	4,34	10	0,279	0,310	10
V2	2,92	3,46	3,33	8	12	33	3,45	3,48	1	0,432	0,290	-49
V3	3,05	3,94	4,12	15	14	-7	4,42	4,31	-2	0,294	0,308	4

Çizgisel deformasyon oranları sırasıyla her iki yöntem için de LVDT değerleri ile kıyaslanıp Şekil 13'da gösterilmiştir.

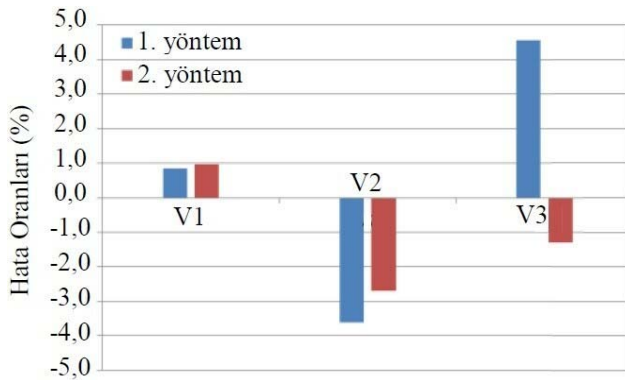
Çizgisel deformasyon değerleri LVDT değerleri ile daha yakın sonuçlar vermiştir.



Şekil 11. Çekme gerilmesi-birim şekil değişirme grafikleri (Tensile stress-strain graphs)



Şekil 12. LVDT ve DIC deformasyon değerleri kıyaslaması (Comparison of LVDT and DIC deformation values)



Şekil 13. DIC yönteminin LVDT'ye göre hata oranları (Error rates of DIC method according to LVDT)

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan literatür taramasından DIC analizini etkileyen en önemli parametrelerin benekleme metodu, alt küme boyutu, analiz adım aralığı, korelasyon metodu, ışık ve kamera olduğu tespit edilmiştir. Bu parametrelerin optimizasyonu yapıldığında DIC yöntemi ile istenilen herhangi bir bölgedeki lokal deformasyon haritaları oluşturulabilmekte ve çatlakların doğuşu ve gelişimi kolaylıkla takip edilebilmektedir. Bu sayede çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri hesaplanabilmektedir.

Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan 3 HTPP-ECC kompozit üzerinde yapılan çekme deneyi sonuçlarına göre kompozitlerin ortalama çekme dayanımının 3,05 MPa,

ortalama çekme düktilitesinin %3,8 ve ortalama çatlak sayısının 14 mertebelerinde olduğu belirlenmiştir. VIC-2D ile yapılan analizler sonucunda ardışık yapılan eşleşmelerin hata oranı ortalaması %0,19 ve referans görüntü ile maksimum görüntü arasındaki eşleşme hatası V1, V2 ve V3 için sırasıyla %1,90, %0,90, %1,40 olarak elde edilmiştir. Bu hatalar oldukça düşük mertebelere sahiptir ve bu durum yazılımın alt kümeleri iyi bir şekilde eşleştirebildiğini göstermektedir.

Sanal LVDT'ler ile gerçek LVDT'ler birbirlerine çok yakın deformasyon değerleri vermiştir. Tüm analizlerde %5'in altında hata değerleri hesaplanmıştır. Her iki yöntemde de bakıldığında, 1. yöntemdeki hata oranları %0,84, %-3,61 ve %4,55 ve 2. yöntemdeki hata oranları ise %0,97, %-2,69 ve %-1,29 olarak elde edilmiştir.

Çatlak sayısı ve genişliği açısından, DIC-MATLAB ölçümü ve manuel ölçüm değerleri birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Manuel çatlak sayımında ortalama çatlak sayısı 12 ve DIC-MATLAB için ortalama 13 olarak bulunmuştur. Ortalama çatlak genişliği manuel ölçüm ile 0,335 mm ve DIC-MATLAB yöntemi ile 0,303 mm olarak hesaplanmıştır. Bazı örneklerde manuel sayım yöntemiyle gözlenemeyen çatlakların DIC yöntemi ile tespit edilebildiği ispatlanmıştır. Bu durum DIC'nin geleneksel deformasyon ölçüm yöntemlerinden üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Çalışmaya maddi destek sağlayarak deneylerin gerçekleşmesini sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (Proje No: TÜBİTAK 115R012) ve MATLAB yazılımının geliştirilmesinde yardımcı olan Araş. Gör. Serdar OKUYUCU'ya teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Mehdikhani M., Aravand M., Sabuncuoglu B., Callens M.G., Lomov S.V., Gorbatikh L., Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation, *Composite Structures*, 140, 192-201, 2016.
- Ramos T., Furtado A., Eslami S., Alves S., Rodrigues H., Arêde A., Tavares P.J., Moreira P.M. G.P., 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering-Measurements in a Masonry Wall, *Procedia Engineering*, 114, 215 – 222, 2015.
- Hamrat M., Boulekbache B., Chemrouk M., Amziane S., Flexural cracking behavior of normal strength, high strength and high strength fiber concrete beams, using digital image correlation technique, *Construction and Building Materials*, 106, 678-692, 2016.
- Yamaguchi I., A laser-speckle strain gauge. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 14 (11), 1270-1273, 1981.
- Peters W.H., Ranson W.F., Digital imaging techniques in experimental stress analysis, *Optical Engineering*, 21 (3), 213427-213427, 1982.
- Sutton M.A., Wolters W.J., Peters W.H., Ranson, W.F., McNeill S.R., Determination of displacements using an improved digital correlation method, *Image and Vision Computing*, 1 (3), 133-139, 1983.
- Hild F., Raka B., Baudequin M., Roux S., Cantelaube F., Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image correlation, *Applied Optics*, 41 (32), 6815-6828, 2002.
- Hild F., Roux S., Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—a review, *Strain*, 42 (2), 69-80, 2006.
- Shih, M.H., Sung, W.P., Application of digital image correlation method for analysing crack variation of reinforced concrete beams, *Sadhana*, 38 (4), 723-741, 2013.
- Mahal M., Blanksvärd T., Täljsten B., Sas G., Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams, *Engineering Structures*, 105, 277-288, 2015.
- Roux S., Hild F., Digital image correlation and fracture: an advanced technique for estimating stress intensity factors of 2D and 3D cracks, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 (21), 214004, 2009.
- Besnard G., Guérard S., Roux S., Hild F., A space-time approach in digital image correlation: Movie-DIC, *Optics and Lasers in Engineering*, 49 (1), 71-81, 2011.
- Vanlanduit S., Vanherzeele J., Longo R., Guillaume P., A digital image correlation method for fatigue test experiments, *Optics and Lasers in Engineering*, 47 (3), 371-378, 2009.
- Ohno M., Li V.C., A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites, *Construction and Building Materials*, 57, 163-168, 2014.
- Wang Y., Cuitiño A.M., Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation. *International Journal of Solids and Structures*, 39 (13), 3777-3796, 2002.
- Mguil-Touchal S., Morestin F., Brunei M., Various Experimental Applications of Digital Image Correlation Method, *Transactions on Modelling and Simulation (Computer Methods and Experimental Measurements)*, WIT Press, 16, 45-58, 1997.
- Liang Z., Yin B., Liu H., Mo J., Wang S., Displacement measurement of specimen surfaces with damaged areas by digital image correlation., *Measurement*, 76, 183-188, 2015.
- Liu X.Y., Li R.L., Zhao H.W., Cheng T.H., Cui G.J., Tan Q.C., Meng G.W., Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126 (23), 4206-4211, 2015.
- Gu G., A comparative study of random speckle pattern simulation models in digital image correlation, *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 126 (23), 3713-3716, 2015.
- Pan B., Xie H., Wang Z., Qian K., Wang Z., Study on subset size selection in digital image correlation for

- speckle patterns, *Optics Express*, 16 (10), 7037-7048, 2008.
21. Pierré J.E., Passieux J.C., Périé J.N., Bugarin F., Robert L., Unstructured finite element-based digital image correlation with enhanced management of quadrature and lens distortions, *Optics and Lasers in Engineering*, 77, 44-53, 2016.
 22. Mudassar A.A., Butt S, Improved Digital Image Correlation method, *Optics and Lasers in Engineering*, 87, 156-167, 2015.
 23. Su Y., Zhang Q., Xu X., Gao Z., Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors. *Optics and Lasers in Engineering*, 86, 132-142, 2016.
 24. Gonzáles G.L.G., Rodrigues L.D., Meggiolaro M.A., Freire J.L.F., Strains in Shallow and Deep Notches Using Two DIC Algorithms, In *Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 3, 281-294, 2016.
 25. Sutton M.A., Orteu J.J., Schreier H., *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*, Springer Science Business Media, 2009.
 26. Aparna M.L., Chaitanya G., Srinivas K., Rao J.A., Fatigue Testing of Continuous GFRP Composites Using Digital Image Correlation (DIC) Technique a Review, *Materials Today: Proceedings*, 2 (4), 3125-3131, 2015.
 27. Turner D.Z., Peridynamics-Based Digital Image Correlation Algorithm Suitable for Cracks and Other Discontinuities, *Journal of Engineering Mechanics*, 141(2), 04014115, 2014.
 28. Xu Hui, "Application of Visual Imaging Correlation-2D to Strain Measurement", Thesis, Rochester Institute of Technology, 2014. <http://scholarworks.rit.edu/theses/8566>. Erişim tarihi Eylül 15, 2016.
 29. Digital Image Correlation: Overview of principles and Software, University of South Carolina, SEM2009 workshop.
 30. VIC-2D Testing Guide. Reference Manuel. <http://correlatedsolutions.com/>. Erişim tarihi Haziran 15, 2016.
 31. He T., Liu L., Makeev A., Shonkwiler B., Characterization of stress-strain behavior of composites using digital image correlation and finite element analysis, *Composite Structures*, 140, 84-93, 2016.
 32. Park J., Yoon S., Kwon T.H., Park K., Assessment of speckle-pattern quality in digital image correlation based on gray intensity and speckle morphology, *Optics and Lasers in Engineering*, 91, 62-72, 2017.
 33. Lecompte D., Smits A., Bossuyt S., Sol H., Vantomme J., Van Hemelrijck D., Habraken A.M., Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation, *Optics and Lasers in Engineering*, 44(11), 1132-1145, 2006.
 34. Hassan G.M., MacNish C., Dyskin A., Shufrin I., Digital Image Correlation with Dynamic Subset Selection, *Optics and Lasers in Engineering*, 84, 1-9, 2016.
 35. Magnan P., Detection of visible photons in CCD and CMOS: A comparative view, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 504(1), 199-212, 2003.
 36. Zurich N.B., CCD versus CMOS--has CCD imaging come to an end?, 140, 131-137, 2001. www.ifp.uni-stuttgart.de/publications/phowo01/blanc.pdf. Erişim tarihi Eylül 20, 2016.
 37. Litwiller D., CCD vs. CMOS, *Photonics Spectra*, 35(1), 154-158, 2001.
 38. Fossum E.R., CMOS image sensors: electronic camera-on-a-chip, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 44(10), 1689-1698, 1997.
 39. Hain R., Kähler C.J., Tropea, C., Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras, *Experiments in Fluids*, 42(3), 403-411, 2007.
 40. Krstulović-Opara L., Surjak M., Vesenjajk M., Tonković Z., Kodvanj J., Domazet Ž., Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials, *Infrared Physics Technology*, 73, 166-174, 2015.
 41. Gao G., Yao W., Xia K., Li Z., Investigation of the rate dependence of fracture propagation in rocks using digital image correlation (DIC) method. *Engineering Fracture Mechanics*, 138, 146-155, 2015.
 42. Khoo S.W., Karuppanan S., Tan C.S., A Review of Surface Deformation and Strain Measurement Using Two-Dimensional Digital Image Correlation, *Metrology and Measurement Systems*, 23(3), 461-480, 2016.
 43. Haddadi H., Belhabib S., Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique, *Optics and Lasers in Engineering*, 46(2), 185-196, 2008.
 44. Bomarito G.F., Hochhalter J.D., Cannon A.H., Image Correlation Pattern Optimization for Micro-Scale In-Situ Strain Measurements, 8. SEM International Congress, Orlando-FL-United States, 6-9 Haziran 2016.
 45. Zhang J., Jin G., Ma S., Meng L., Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement, *Optics Laser Technology*, 35(7), 533-542, 2003.
 46. Cooreman S., Lecompte D., Sol H., Vantomme J., Debruyne D., Identification of mechanical material behavior through inverse modeling and DIC, *Experimental Mechanics*, 48(4), 421-433, 2008.
 47. Reu P., Stereo-Rig Design: Creating the Stereo-Rig Layout-Part 1, *Experimental Techniques*, 36(5), 3-4, 2012.
 48. Ke X.D., Schreier H.W., Sutton M.A., Wang YQ., Error assessment in stereo-based deformation measurements, *Experimental Mechanics*, 51(4), 423-441, 2011.
 49. Sherir M.A., Hossain K.M.A., Lachemi M., MAT-731: Mechanical durability properties of engineered cementitious composites with different aggregates, CSCE Annual Conference, London-England, 1-4 Haziran 2016.

50. Li V.C., Can Concrete Be Bendable? The notoriously brittle building material may yet stretch instead of breaking, *American Scientist*, 100(6), 484-93, 2012.
51. Dhawale A.W., Joshi V.P., Engineered cementitious composites for structural applications, *International Journal of Application or Innovation in Engineering Management*, 2, 198-205, 2013.
52. 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(6), 803-814, 2010.
53. 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*, 60, 359-370, 2014.
54. Li V.C., Maalej M., Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites, *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 239-249, 1996.
55. 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*, 10(2), 37-48, 1993.
56. Felekoğlu B., Keskinateş M., Multiple cracking analysis of HTPP-ECC by digital image correlation method. *Computers and Concrete*, 17 (6), 831-848, 2016.
57. Yu J., Lin J., Zhang Z., Li V.C., Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 99, 82-89, 2015.

