



Dijital görüntü korelasyonu ile şekil değiştirme ve çoklu çatlak karakterizasyonuna alt küme boyutunun ve analiz adım aralığının etkisi

Effect of subset size and analysis step interval on strain and multiple crack characterization using digital image correlation

Eren Gödek^{1,*} , Kamile Tosun Felekoğlu² 

¹ Hitit Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, 19030, Çorum, Türkiye

² Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35160, İzmir, Türkiye

Öz

Bu makale kapsamında, mühendislik uygulanmış çimento esaslı kompozitlerin birim şekil değiştirme, çatlak sayısı ve çatlak genişliği özellikleri hem geleneksel ölçüm yöntemiyle hem de farklı alt küme ve adım aralığı değerleri kullanılarak dijital görüntü korelasyonu (DIC) analizleri aracılığıyla hesaplanmıştır. Analizlerde, yedi farklı alt küme boyutu ve yedi farklı analiz adım aralığı boyutu kullanılarak elde edilen sonuçların değişimi kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Sonuç olarak, adım boyutunun birikmiş hata ve gerinim kapasitesi değerleri üzerinde anlamlı bir etkisinin olmadığı, alt küme boyutu arttıkça geleneksel ölçümlerle daha yakın değerler elde edildiği tespit edilmiştir. Ancak, hem alt küme boyutu hem de analiz adım aralığı parametreleri göreceli olarak düşük seviyelerde seçildiğinde, DIC aracılığıyla hesaplanan çatlak sayısı ve çatlak genişliğinin literatürden alınarak uygulanan hesap yöntemine kıyasla daha doğru sonuçlar içerdiği ve DIC'nin sağladığı destekleyici görsel içeriklerle mevcut yöntemlere kıyasla daha güvenilir olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: DIC, ECC, alt küme boyutu, analiz adım aralığı

1 Giriş

Dijital görüntü korelasyonu (Digital Image Correlation (DIC)), 1980'li yıllarda ortaya çıkan görüntülere dayalı temassız bir yüzey izleme sistemi olup, yüzeyde oluşan deformasyonların hesaplanmasında ve görsel çıktılarla bahsi geçen deformasyonların gelişiminin izlenmesinde kullanılabilen temassız bir ölçüm tekniğidir [1]. DIC sisteminde, doğrudan numune yüzeyine hizalanmış bir kamera aracılığıyla mekanik testler sırasında belirli aralıklarla görüntüler alınır. DIC, testin başında deforme olmamış yüzeyden alınan bir referans görüntü ile yükleme sırasında deforme olmuş yüzeyden alınan birçok görüntü arasındaki yer değiştirme vektörlerini hesaplar. Bu hesaplamayı yapmak için numunenin yüzeyinde rastgele bir desen oluşturulmalıdır. Bu desenleme işlemi, önceden boyanmış beyaz yüzey üzerinde rastgele siyah noktalar oluşturularak kolayca yapılabilir. Referans görüntüde bir inceleme alanı (Area of Interest (AOI)) belirlenir ve bu bölge

Abstract

Within the scope of this article, the unit strain, crack number, and crack width properties of engineered cementitious composites were calculated both by conventional measurement method and by digital image correlation (DIC) analysis using different subset size and analysis step intervals values. In the analysis, the variation of the results obtained by using seven different subset sizes and seven different analysis step intervals was examined comparatively. In conclusion, it was determined that while the analysis step intervals did not have a significant effect on the accumulated error and strain capacity values, closer values were obtained with conventional measurements as the subset size increased. However, when both subset size and analysis step spacing parameters are selected at relatively low levels, the crack number and crack width calculated via DIC have more accurate results compared to the calculation method applied from the literature, and it is more reliable than existing methods with the supporting visual content provided by DIC.

Keywords: DIC, ECC, subset size, analysis step interval

alt kümeler adı verilen kare şeklindeki bir grup alt piksellere bölünür. DIC yönteminde alt kümelerin görüntüler arasındaki hareketi adım aralığı adı verilen piksel aralıklarıyla takip edilir. Bu süreçte, bir korelasyon algoritması kullanılarak referans ve deforme olmuş yüzeyden alınan görüntüler arasında her bir alt kümenin merkez noktası için bir yer değiştirme vektörü hesaplanır. Bu vektörler ise matematiksel formülasyonlarla şekil değiştirme ve deformasyon alanlarına dönüştürülür (Şekil 1) [1].

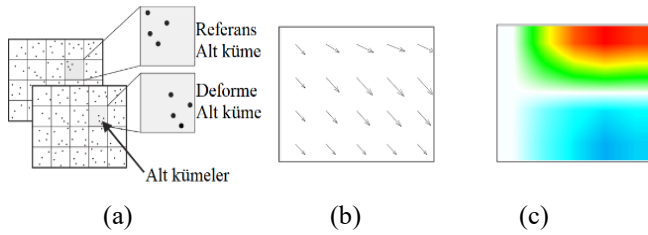
DIC analizlerinde alt küme boyutunun deformasyon ölçümlerinin doğruluğunda belirgin bir etkisi olduğu bilinmektedir. Analizin doğruluğu ve analiz süresi açısından alt küme boyutunun seçimi kritik bir adımdır. Tek bir piksel yerine bir piksel grubundan oluşan alt kümenin tercih edilmesinin nedeni kare şeklindeki bu alt kümenin gri renk seviye değerleri bakımından tek bir piksel ile kıyaslandığında daha anlamlı ve ayırt edilebilir bir matris grubu oluşturmasıdır [2]. DIC analizlerinde, alt küme boyutu

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: erengodek@hitit.edu.tr (E. Gödek)

Geliş / Received: 01.08.2025 Kabul / Accepted: 04.10.2025 Yayınlanma / Published: 15.01.2026

doi: 10.28948/ngumuh.1756091

referans alt küme ile deformasyon vektörü hesaplanacak hedef alt kümelerinin boyutlarını belirtir. Deformasyon vektörlerinin hesaplanmasında iki alt küme arasında yerel farklılıklar arasındaki değişim hesaplanır. Alt kümelerin yeterli düzeyde özgün ve ayırt edilebilir özellikler içermesi yer değiştirme vektörünün yüksek doğruluk ve güvenilirlikle hesaplanmasına fayda sağlamaktadır [3, 4]. Büyük alt küme boyutu seçimi, çok sayıda veri noktası içeren büyük bir hesap matrisi oluşturacağından daha uzun hesaplama süresi gerektirecektir. Bu durum, analiz süresi açısından dezavantaj oluşturabilir. Alt küme boyutunun küçük bir piksel grubu olarak seçilmesi durumunda ise az sayıda tanımlanabilir nokta içeren matrislerin görüntü içerisinde ki diğer alt kümelerle benzerlik göstermesi muhtemeldir [5].



Şekil 1. (a) AOI'nın alt kümelerle ayrılması (b) Yer değiştirme vektörlerinin hesaplanması (c) Deformasyon haritalarının oluşturulması

1990'lı yıllarda Prof. Dr. Victor Li liderliğindeki araştırma grubu tarafından, geleneksel çimento esaslı lifli kompozitlerin sınırlı süneklik özelliklerine karşılık, yalnızca deformasyon sertleşmesi ve çoklu çatlak oluşumu gibi ileri mekanik davranışlar sergileyen, yüksek düktiliteye sahip yeni nesil çimento bazlı kompozit malzemeler geliştirilmiştir. Bu malzemeler, literatürde "Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler" (Engineered Cementitious Composites (ECC)) olarak yer almaktadır. [6]. Günümüzde, çekme yüklemesi altında %8 çekme birim deformasyonuna ve 16 MPa eğilme dayanımına, eğilme yüklemesi altında da 12.3 mm sehim yapma kapasitesine ve 12 MPa eğilme dayanımına sahip kompozitlerin üretimi gerçekleştirilebilmektedir [7, 8]. Çatlak oluşumunda istenilen beklentilerin sağlanıp sağlanmadığının kontrolü örnek üzerindeki çatlak gelişiminin izlenerek bölgesel olarak tespiti ve çatlak özelliklerinin analizi ile belirlenebilir [9]. Ancak, ECC malzemelerindeki çatlak davranışının bütüncül olarak analiz edilmesinde noktasal ya da mikro çatlak genişliği ölçüm sensörleri benzeri geleneksel ölçüm yöntemleri yetersiz kalmaktadır. Bunun temel nedeni, yükleme altında örnek üzerinde rastgele konumlanan çok sayıda mikro ölçekli çatlağın meydana gelmesidir. Her bir çatlağın yük etkisi altındaki genişleme eğiliminin izlenebilmesi, çatlakların önceden oluşum yerlerinin kestirilememesi ve bu izleme için yüksek sayıda sensöre ihtiyaç duyulması nedeniyle pratik uygulamalarda neredeyse olanaksız hale gelmektedir. Bu nedenle Japon İnşaat Mühendisleri Birliği'nin yayınladığı bir rapora uygun olarak bu tür malzemelerin çatlak analizi kompozit üzerindeki yük kaldırıldıktan sonra gerçekleştirilmektedir [10]. Ancak söz konusu analizlerden elde edilen verilerle kompozitin yükleme sırasındaki çoklu çatlama davranışı hakkında bilgi

edinilememektedir. Dolayısıyla, ECC'nin deformasyon ve mikro ölçekteki çatlama davranışının eş zamanlı, kapsamlı ve hassas bir şekilde değerlendirilebilmesi, geniş yüzey alanlarında çalışabilen mikron düzeyinde çözünürlüğe sahip bir izleme teknolojinin kullanımını kaçınılmaz hale getirmiştir. [11].

DIC yönteminin ECC'nin mekanik performansının ve çatlak gelişiminin takibinde kullanıldığı çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur. ECC ile üretilen kiriş numuneleri üzerinde gerçekleştirilen eğilme deneylerinde, yatay deformasyonlar hem DIC yöntemi hem de doğrusal değişken diferansiyel transformatör (Linear Variable Differential Transformer (LVDT)) kullanılarak ölçülmüş ve elde edilen verilerin birbirleriyle yüksek düzeyde uyumlu olduğu belirlenmiştir [12]. Ohno ve Li [9] tarafından yürütülen bir diğer çalışmada, çekme gerilmesi altında çoklu çatlak oluşumu sergileyen, mühendislik uygulanmış polimerik lif takviyeli geopolymer kompozitler incelenmiştir. Bu çalışmada, %5'e kadar çekme birim deformasyon kapasitesine sahip kompozitlerde, 20 mikronun üzerindeki çatlakların tespitinde DIC yöntemiyle başarılı sonuçlar elde edilmiş ve böylece örneklerin çatlak doygunluğuna ulaştığı ortaya konmuştur. Felekoğlu ve Keskinates [11] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hem fiziksel hem de DIC ile konumlandırılan sanal LVDT verilerinden elde edilen birim şekil değiştirme sonuçlarının yüksek düzeyde benzerlik gösterdiği belirlenmiştir. Ayrıca, yerel deformasyon alanlarının ve deformasyon yoğunlaşma bölgelerinin tespitinde DIC yönteminin etkin bir şekilde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Bununla birlikte, istenilen birim şekil değiştirme düzeylerinde kompozit malzemedeki çatlak sayısı ve çatlak genişliği gibi parametrelerin DIC verileri aracılığıyla güvenilir biçimde belirlenebileceği gösterilmiştir. Ding vd. [13] çelik donatılı ECC kirişler ile betonarme kirişlerin göçme davranışlarını DIC ile gözlemlemiş ve tüm yükleme sürecini değerlendirilerek çatlakların oluşumu ve izlenmesinde kıyaslamalar yapılmıştır. Yine yakın zamanda yapılan bir başka çalışmada polietilen lif kullanılarak hazırlanan yüksek performanslı ECC numuneler beyaz boya üzerine rastgele siyah beneklendirme yapılarak hazırlanmış ve eğilme ve çekme yüklemesi altındaki deformasyonlarının ve çatlak oluşumunun izlenmesi amacıyla kullanılmıştır [14].

DIC yönteminde en uygun alt küme boyutunun belirlenmesinde etkili olan iki ana ölçüt desenleme prosedürü ve alt küme boyutu ile analiz adım aralığı değerlerinin uygun olarak seçimidir. Araştırılan mevcut literatürde bu konu ile ilgili genel bir kural yoktur. Bunun temel nedeninin, en uygun alt küme boyutunun uygulamalara ve deney koşullarına göre farklılık göstermesi olarak düşünülmektedir. Bu nedenle amaçlanan uygulamaya yönelik olarak alt küme boyutu ve analiz adım aralığının optimize edilmesi analizlerden sağlıklı sonuçların elde edilmesi için gereklidir. Yukarıda bahsi geçen çalışmalarda, kullanılan alt küme boyutu ve analiz adım aralığının değiştirilmesi durumunda elde edilen sonuçların nasıl değişeceği bilinmemektedir. Bu durum, Tambusay ve arkadaşları [15] tarafından ECC'nin de kullanıldığı bir çalışmada dört farklı alt küme boyutu ve analiz adım aralığı

verileri kullanılarak ilk kez değerlendirilmiş ve görsel olarak yeterli bir şekil değiştirme haritasının elde edilebilmesi için analiz adım aralığı değerinin alt küme boyutunun %20-60'ı arasında seçilmesi önerilmiştir. Ancak, bu konu ile ilgili literatürde halen yeterli çalışma olmadığı görülmektedir. Bu makale kapsamında, üretilen ECC kompozitlerin birim şekil değiştirme özellikleri, çatlak sayısı değerleri ve çatlak genişliği verileri hem geleneksel ölçüm yöntemi olan LVDT'ler hem de farklı alt küme ve adım aralığı değerleri kullanılarak DIC aracılığıyla hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar kıyaslanarak seçilen farklı alt küme boyutu ve analiz adım aralığı kombinasyonlarının analiz sonuçlarına etkisi incelenmiş ve en uygun değerlerin belirlenmesi için literatürdeki bu boşluğun doldurulması amaçlanmıştır.

2 Materyal ve metod

2.1 Numune üretimi ve hazırlığı

Çalışmada çimento, puzolanik özelliğe sahip kalsine kaolin, $D_{maks} < 200 \mu m$ olan kireçtaşı tozu ve yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (High Tenacity Polypropylene (HTPP)) ile kullanılarak kompozitlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Malzemelerin karışım oranları, kullanılan çimentoya ait kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikler ve HTPP life ait fiziksel ve mekanik özellikler sırasıyla **Tablo 1**, **Tablo 2** ve **Tablo 3**'te sunulmuştur.

Mikser içerisine eklenen toz malzemeler kuru karışım halinde karıştırılmıştır. Karışıma su ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı eklenerek karıştırma işlemine devam edilmiştir. Ardından matris içerisine HTPP lifler eklenmiş ve liflerin tüm matrise homojen bir şekilde dağılıp dağılmadığı ve liflerde herhangi bir topaklanma oluşumunun bulunup bulunmadığı el ile kontrol edilmiştir. Hazırlanan taze haldeki karışım Japon İnşaat Mühendisleri Birliği'nin yayınladığı öneri niteliğindeki raporda bulunan ölçülerde üretilen kemik formda 4 adet numune kalıbına alınarak 2 gün kalıpta bekletilmiştir [10]. Kalıptan çıkartılan numuneler 35 gün suda kür edilmiş ardından 1 gün havada kurumaya bırakılmıştır. Hava kurusu duruma gelen numunelerin yüzeyleri ilk olarak beyaz bir spreyci boya ile boyanmıştır. Numuneler 1 saat süre ile üzerine püskürtülen beyaz boyanın kuruması için dinlendirilmiştir. Ardından üzerlerine mat siyah renkli akrilik bir boya yaklaşık 10 saniye püskürtülerek benek deseninin oluşturulması amaçlanmıştır.

Tablo 1. Üretilen kompozite ait karışım oranları

Malzeme	Miktar (kg/m ³)
Çimento	454
Kireçtaşı tozu	851
Kalsine Kaolin	283
Su	399
Süper Akışkanlaştırıcı	16
HTPP lif	18

Tablo 2. Çimento kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri

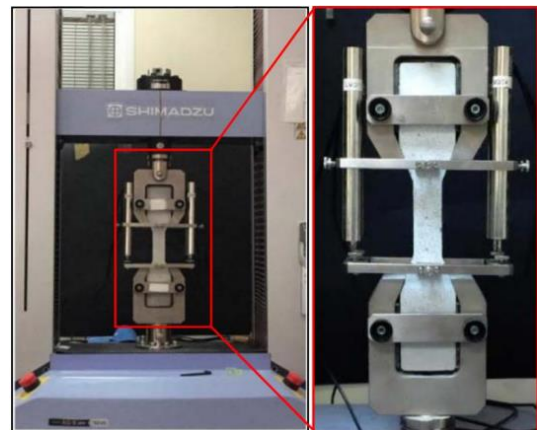
Kimyasal Analiz (%)	
SiO ₂	18.46
Al ₂ O ₃	4.18
Fe ₂ O ₃	3.17
CaO	64.28
MgO	1.27
Na ₂ O	0.50
K ₂ O	0.84
SO ₃	3.14
Cl	0.006
Serbest CaO	1.80
Fiziksel Özellikler	
Blaine Özgül Yüzey Alanı (m ² /kg)	305
Özgül Ağırlık	3.10
Mekanik Özellikler (MPa)	
2 / 7 / 28 günlük basınç dayanımı	28.5 / 43.0 / 54.3

Tablo 3. HTPP life ait fiziksel ve mekanik özellikler

Özgül Ağırlık	0.91
Uzun (mm)	10
Çap (μm)	12
Elastisite Modülü (GPa)	6
Çekme Dayanımı (MPa)	850
Kopma Uzaması (%)	21

2.2 Çekme deney düzeneği

Çekme deneylerinde 50 kN kapasiteli SCHIMADZU marka bir çekme cihazı kullanılmıştır. Deney süresince yük değerleri kaydedilmiş ve deney sonunda numune en kesit alanına bölünerek çekme gerilmesi değerleri hesaplanmıştır (σ_t). Kemik formdaki numuneler çenelere yerleştirildikten sonra bir çerçeve yardımıyla numunenin 4 köşesine ekstensometreler (LVDT'ler) yerleştirilmiştir (**Şekil 2**). Çekme deneylerinde LVDT kontrollü çekme hızı 0.5 mm/dk olacak şekilde bir yükleme prosedürü uygulanmıştır. Deney süresince 4 adet LVDT'den elde edilen birim uzama değerleri kaydedilmiş ve bu değerler kullanılarak LVDT'lere ait birim şekil değiştirme değerleri (ϵ_{LVDT}) hesaplanmıştır.



Şekil 2. Çekme cihazı ve numunenin yerleştirilmesi

2.3 DIC sisteminin kurulması

Çalışma kapsamında çekme cihazı önüne kurulan DIC sistemi **Şekil 3**'te gösterilmiştir. Görüntü alımları için Canon EOS 750D markalı 24.2 MP görüntü çözünürlüğüne sahip

bir kamera ile 55-250 mm odak uzunluğuna sahip titreşim engelleyici görüntü sabitleme özelliği olan bir lens kullanılmıştır. Aydınlatma için ışığın numune üzerine daha etkili ve homojen bir şekilde dağıtılması amacıyla halka şeklinde bir aydınlatma ekipmanı numune orta kısmına simetrik olacak şekilde çekme cihazının ön kısmında konumlandırılmıştır. Konumlandırma sırasında kameranın numune merkezine dik olacak şekilde bulunmasına dikkat edilmiş ve hem kamera hem de tripodlar üzerinde bulunan su terazileri yardımıyla hizalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Kameraların sahip olduğu uzaktan yönetim yazılımı sayesinde, çekme deneyi süresince her 5 saniyede 1 görüntü alınacak şekilde programlama yapılarak deney süresince görüntü alımı gerçekleştirilmiştir.

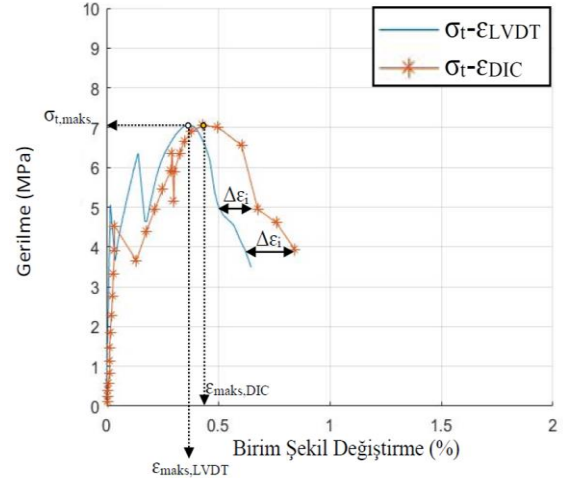


Şekil 3. Cihaz önüne konumlandırılmış DIC sistemi

2.4 Görüntülerin analizi ve deney parametrelerinin belirlenmesi

Deneyler süresince alınan görüntülerin analizinde Vic-2D yazılımı kullanılmıştır. Yazılım, başlangıç aşamasında seçilen inceleme alanı için desen kalitesine göre uygun gördüğü bir alt küme boyutunu kullanıcıya önermektedir. Analizlerde analiz adım/alt küme boyutu aralığı oranı yaklaşık %20 olacak şekilde alt küme boyutu 83x83 piksel ve analiz adım aralığı 17 piksel seçilerek ilk analizler gerçekleştirilmiştir. Ardından yazılımda tanımlı olan ve yaygın olarak kullanılan vektörel yer değiştirme hesabı için farkların kareleri toplamı (Sum of Squared Differences (SSD)) ve şekil değiştirme hesabı için ise Lagrange formülasyonları kullanılarak birim şekil değiştirme (ϵ_{DIC}) ve yerel deformasyon hesaplamaları gerçekleştirilmiştir [1].

Yükleme süresince çekme cihazından elde edilen σ_t gerilme verileri ile ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC} değerleri kullanılarak σ_t - ϵ_{LVDT} ve σ_t - ϵ_{DIC} olmak üzere iki adet gerilme-şekil değiştirme eğrisi çizdirilmiştir. Parametrelerin belirlenme yöntemini açıklamak amacıyla çalışma kapsamında incelenen bir numuneye ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi temsili olarak Şekil 4'te sunulmuştur. Söz konusu eğriler üzerinden numunelere ait en büyük çekme gerilmesi ($\sigma_{t,maks}$) değeri tespit edilmiştir. $\sigma_{t,maks}$ 'a karşılık gelen ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC} değerleri belirlenerek numune birim şekil değiştirme kapasitesi $\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4. Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi

σ_t - ϵ_{LVDT} ve σ_t - ϵ_{DIC} eğrileri arasındaki fark her bir ϵ_{LVDT} 'ye karşılık gelen ϵ_{DIC} değerinin çıkartılıp mutlak değeri alınmak suretiyle hesaplanmıştır (Denklem 1). Elde edilen tüm değerler toplanarak birikmiş hata ϵ_{bh} terimi olarak ifade edilmiştir (Denklem 2).

$$\Delta \epsilon_i = |\epsilon_{LVDT,i} - \epsilon_{DIC,i}| \quad (1)$$

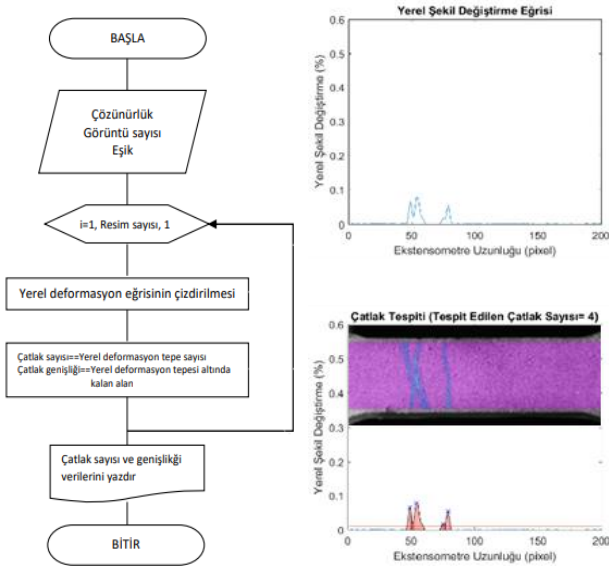
$$\epsilon_{bh} = \sum_0^i \Delta \epsilon_i \quad (2)$$

Alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerinin hesaplanan ϵ_{DIC} ve ϵ_{bh} 'ye etkisini incelemek amacıyla, ϵ_{bh} değerinin en yüksek olduğu (LVDT ile DIC'den analizlerinden alınan birim şekil değiştirme değerleri arasındaki farkın en fazla olduğu) numune belirlenerek kullanılmıştır. İlk olarak analiz adım aralığı sabit tutularak alt küme boyutu değişiminin etkisi 7 farklı alt küme boyutu (sub) (23, 43, 63, 83, 103, 123, 143) kullanılarak tekrarlanan analizlerle incelenmiştir. Ardından alt küme boyutu sabit tutularak 7 farklı analiz adım aralığı (ste) (5, 9, 13, 17, 21) için DIC analizleri tekrarlanmıştır.

2.5 Çatlak karakterizasyonu

Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda, DIC analizlerinde numune yüzeyinde çatlağın oluşmasıyla ortaya çıkan yerel birim deformasyonlar aracılığıyla çatlak sayısı ve genişliğinin belirlenmesine yönelik çalışmalar mevcuttur [9, 11]. Bu çalışmalarda, oluşan her bir yerel birim deformasyonun oluşan bir çatlağı temsil ettiği, yerel birim deformasyon eğrisi altında kalan alanın da çatlak genişliği ile ilişkilendirildiği belirtilmektedir. Bu kapsamda incelenen alt küme boyutu ve adım aralığı değerlerinde, numune yüzeyine yerleştirilen sanal ekstensometreden alınan yerel birim deformasyon ($\epsilon_{maks,yerel}$) verileri çatlak karakterizasyonunda kullanılmıştır. Çatlak karakterizasyonunun sağlanması amacıyla literatür taramalarında gözlemlenen yöntemler dikkate alınarak MATLAB tabanlı bir çatlak takip algoritması hazırlanmıştır. Çatlak sayısı ve genişliğinin hesaplanmasına dair uygulanan yöntem akış diyagramı

olarak Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada; çözünürlük verisi DIC uygulamasından alınan mikron cinsinden piksel başına düşen uzunluğu, görüntü sayısı mekanik deney süresince çekilen görüntü sayısını, eşik ise DIC analizlerinde oluşan yer değiştirmelerin yerel deformasyon (çatlak) olarak nitelendirilebilmesi için belirlenen en küçük şekil değiştirme değerini belirtmektedir.



Şekil 5. Çatlak sayısı ve genişliğinin hesaplanmasına dair uygulanan yöntem akış diyagramı (analiz görüntüleri yöntemin açıklanması için detaylı incelemeye yapılan numuneye ait olup kullanılan alt küme ilk analizlerden elde edilen analiz görüntülerinden alınmıştır.)

Çatlak karakterizasyonu kapsamında yapılan hesaplamalarda numunenin yük taşıma kapasitesine karşılık gelen birim şekil değiştirme kapasitesi anındaki ($\epsilon_{maks,DIC}$) ortalama çatlak genişliği ve çatlak sayıları kullanılarak, gerçeğe en yakın çatlak sayısı ve çatlak genişliği verilerinin hesaplanabilmesi için seçilmesi gereken en uygun alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerlerinin tespiti hedeflenmiştir.

ECC, kompoziti oluşturan matristen birkaç yüz kat daha fazla deforme olduğundan, matrisin birim şekil değiştirmesi, ECC'nin genel birim şekil değiştirmesine çok az katkıda bulunur. Bu nedenle, ECC'nin genel deformasyonunun yalnızca çatlak açıklığı ile ilgili olduğu düşünülebilir ve ortalama çatlak genişliği, en büyük çekme gerilmesinde ölçülen gerilme deformasyonunun ortalama çatlak sayısına bölünmesiyle hesaplanabilir (Denklem 3) [16]:

$$w = \frac{\Delta l}{n} \quad (3)$$

Burada w: ortalama çatlak genişliğini, Δl : şekil değiştirme kapasitesi anındaki uzama, n: çatlak sayısını ifade etmektedir. Söz konusu yöntem, literatürde yalnızca en büyük çekme gerilme değeri için kullanılabilmektedir. Bunun sebebi, mekanik deneyler sonucunda elde edilen çatlak sayısının bu değerden sonra artmayacağıdır

düşünülmesi ve mekanik deneyler sonrasında numune üzerinden sayılarak tespit edilmesidir. Ancak, DIC yöntemi ile elde edilen çatlak sayıları sayesinde mekanik yükleme boyunca LVDT'ler ile elde edilen uzama miktarları o andaki çatlak sayısına bölünerek ortalama çatlak genişlikleri alternatif olarak mekanik yükleme süresince de elde edilebilir. Bu nedenle son olarak, seçilen numune için yükleme süresince ortalama çatlak genişliğinin değişimi hem LVDT uzama değerleri aracılığıyla Zhou vd. [16] tarafından kullanılan yöntemle hem de DIC analizleri süresince alınan veriler üzerinden MATLAB aracılığıyla hesaplanarak kıyaslamalı olarak değerlendirilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

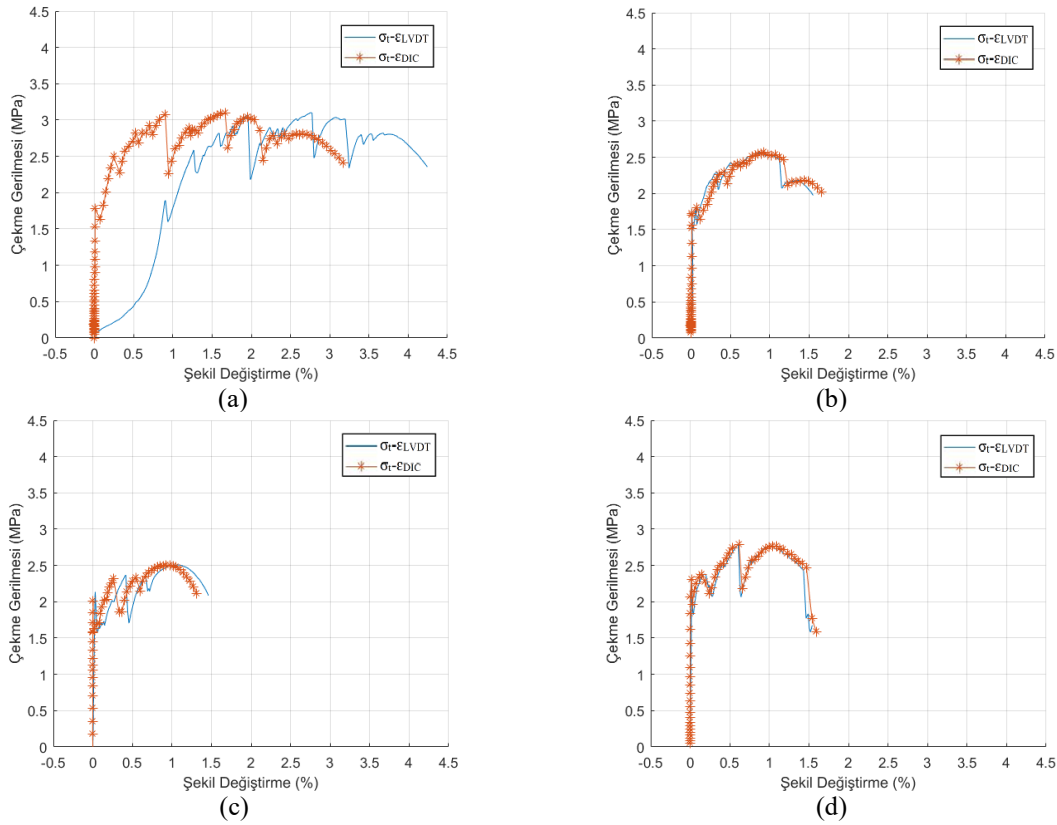
3.1 $\sigma_{I-E_{LVDT}}$ ve $\sigma_{I-E_{DIC}}$ eğrileri

Çekme deneyinden elde edilen σ_t ve ϵ_{LVDT} değerleri kullanılarak çizdirilen $\sigma_{I-E_{LVDT}}$ eğrileri ile hesaplanan ϵ_{DIC} değerleri kullanılarak çizdirilen $\sigma_{I-E_{DIC}}$ eğrileri Şekil 6'da sunulmuştur.

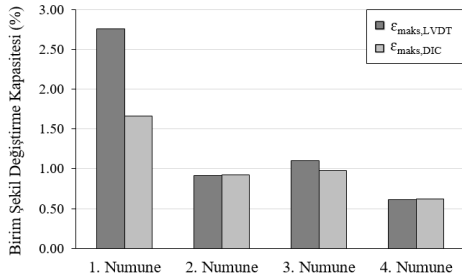
Gerilme-şekil değiştirme eğrileri incelendiğinde 2, 3 ve 4 numaralı numunelere ait $\sigma_{I-E_{LVDT}}$ ve $\sigma_{I-E_{DIC}}$ eğrilerinin birbiriyle yakın olduğu görülmektedir. 1 numaralı numune ise belirgin bir sapmanın olduğu tespit edilmiştir. 1 numaralı numune, çekme deneyi öncesinde uygulanan önyüklemeye yeterli seviyede uygulanamamış, bu duruma bağlı olarak deney esnasında gerçekleşen mesnet oturması ve numunenin yük almaya başlaması süresince, LVDT'lerden aslında numune üzerinde oluşmayan yanıltıcı şekil değiştirmeler okunmuştur. Ancak, söz konusu bu yanıltıcı şekil değiştirme değerleri DIC analizlerinde görülmemektedir. DIC ile yapılan deformasyon analizlerinde, şekil değiştirme hesabının yalnızca numune yüzeyinden yapılmasına bağlı olarak bu tür yanıltıcı deformasyonların oluşumu engellenmiştir. Bu durum, DIC yönteminin LVDT'ye kıyasla bir avantajı olarak kabul edilebilir. Özellikle ECC gibi lifli kompozitlerde çoklu çatlak davranışını arttırmanın temel yöntemlerinden birisi de matris kırılma tokluğunu düşürmektir [17]. Göreceli olarak zayıf bir matris tasarımıyla üretilen ECC numunelerin deneylerinde yeterli önyüklemeye seviyesinin bilinmemesine bağlı olarak tahmini değerlerle gerçekleştirilebilecek aşırı önyüklemeye numunenin deney öncesinde çatlamasına ve malzeme kaybına neden olabilir. Diğer taraftan, temkinli olarak gerçekleştirilebilecek düşük seviyelerdeki önyüklemeler de yanıltıcı şekil değiştirmelerin oluşmasına neden olabilir. Yukarıda bahsedilen senaryolar dikkate alındığında, DIC yönteminin kullanıldığı ve önyüklemenin yapılmadığı bir prosedürün geleneksel deformasyon ölçme tekniklerine kıyasla daha doğru sonuçların elde edilmesine yardımcı olacağı düşünülebilir.

3.1 Birim şekil değiştirme kapasitesi ve birikmiş hata verilerinin değerlendirilmesi

Her bir numune için belirlenen birim şekil değiştirme kapasiteleri ($\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$) belirlenerek Şekil 7'de sunulmuştur. 1 numaralı numune $\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$ arasındaki farkın yetersiz önyüklemeye bağlı olarak fazla olduğu görülmektedir. Ancak, bu fark 2, 3 ve 4 numaralı numuneler için sırasıyla %1.11, %11.39 ve %1.38 olarak hesaplanmıştır.

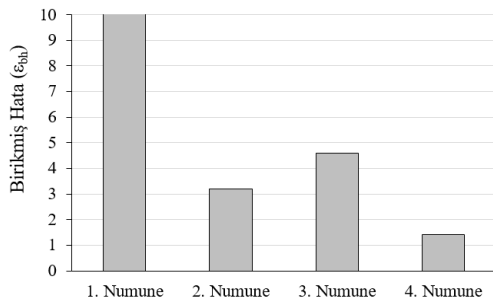


Şekil 6. σ_t - ϵ_{LVDT} eğrileri ile σ_t - ϵ_{DIC} eğrileri (a) 1. Numune (b) 2. numune (c) 3. numune (d) 4. numune



Şekil 7. $\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$ verilerinin kıyaslanması

Birikmiş hata değerleri Şekil 8’de sütun grafik olarak verilmiştir. Birikmiş hata değerlerinin, yetersiz önyüklemeye uygulanmasına bağlı olarak 1. numune %90 mertebelerinde olduğu görülmektedir. 2, 3 ve 4 numaralı numunelerde ise sırasıyla %1.42, %4.59 ve %3.18 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuçlar, birim şekil değiştirme kapasiteleri ile de benzerlik göstermektedir.



Şekil 8. Birikmiş hata değerleri

3.1 Alt küme boyutu ve analiz adım aralığının DIC sonuçlarına etkisi

Önceki bölümlerde alınan sonuçlar incelendiğinde, yeterli önyüklemenin yapıldığı numuneler içerisinde hem $\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$ arasındaki farkın hem de birikmiş hata verilerinin en fazla olduğu numunenin 3 numaralı numune olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, alt küme ve analiz adım aralığı değişiminin etkisi hatanın en fazla olduğu bu numune üzerinde detaylı olarak incelenecektir.

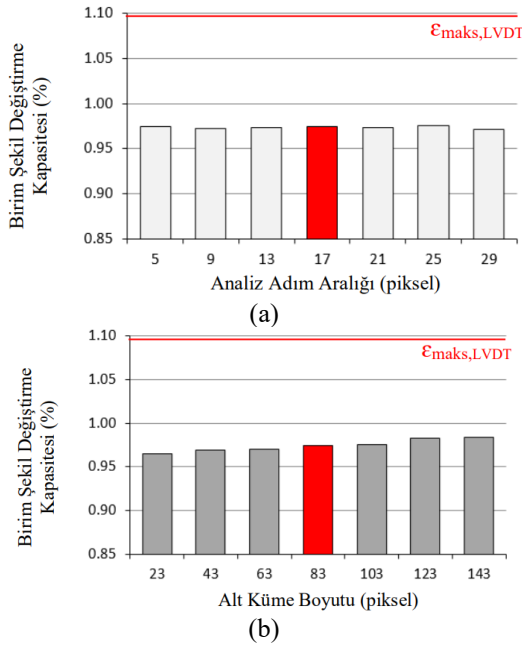
3.1.1 $\epsilon_{maks,DIC}$ ve birikmiş hata hesaplamalarına etkisi

DIC ile hesaplanan birim şekil değiştirme kapasitesinin alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerleri ile değişimi Şekil 9’da sunulmuştur. Şekil 9a’da alt küme boyutu önerilen 83x83 piksel değerinde sabit tutulurken analiz adım aralığı değerleri değişmektedir. Şekil 9b’de ise analiz adım aralığı değeri 17 piksel değerinde sabit tutulurken alt küme boyutu değiştirilmektedir. Alt küme boyutunun sabit tutularak analiz adım aralığının değiştirilmesiyle $\epsilon_{maks,DIC}$ değerinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir (Şekil 9a). Alt küme boyutunun artırıldığı durumda da benzer şekilde belirgin bir değişiklik gözlenmezken, $\epsilon_{maks,DIC}$ değerinin $\epsilon_{maks,LVDT}$ değerine yaklaşma eğiliminde olduğu söylenebilir (Şekil 9b). Ancak, bu durumun büyük alt küme seçiminde gerçekleştirilen analiz sayısının daha az olmasına bağlı olduğu düşünülmektedir.

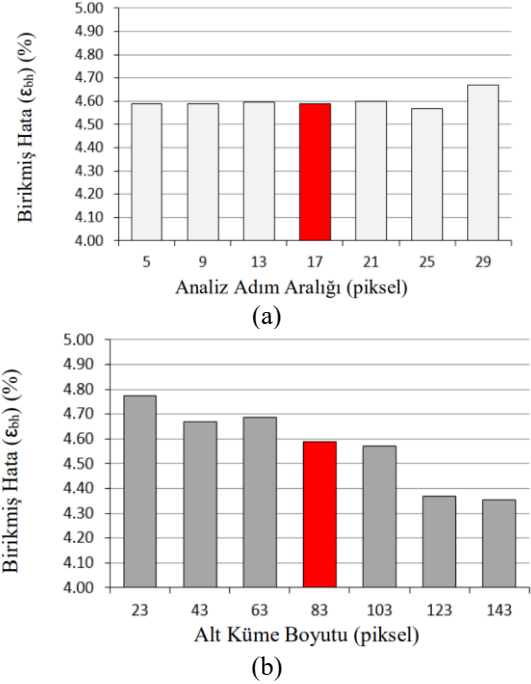
Birikmiş hata verisinin alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerleri ile değişimi Şekil 10’da sunulmuştur. Söz konusu verilere göre, adım aralığı değişiminin birikmiş hata

değerine belirgin bir etkisi olmadığı söylenebilir (Şekil 10a). Ancak, sabit analiz adım aralığı değerinde seçilen alt küme boyutu arttıkça birikmiş hata değerinin giderek azaldığı görülmektedir (Şekil 10b). Daha önceden belirtildiği üzere birikmiş hata değeri, ϵ_{LVDT} ve ϵ_{DIC} değeri arasındaki fark olarak tanımlanmıştır. Bu durumda, sabit analiz adım aralığında alt küme boyutu arttıkça DIC ile hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerinin LVDT ölçümleriyle ile hesaplanan birim şekil değiştirme değerlerine yakın sonuçların elde edilmesinde olumlu sonuç verdiği söylenebilir.

Yıldırım vd. [18] tarafından yapılan bir çalışmada iki farklı yöntem kullanılarak DIC ile LVDT arasındaki ölçüm farklılıkları hata yüzdesi açısından incelenmiştir. Ancak, bu yöntemlerden bir tanesi yalnızca çekme dayanımına karşılık gelen birim şekil değiştirme değerlerini dikkate alırken diğer yöntem de LVDT ve DIC ile elde edilen birim şekil değiştirme verileri lineer korelasyon kurularak kıyaslanmıştır. Söz konusu çalışmada altküme boyutunun yanı sıra aydınlatma koşulları, çözünürlük koşulları ve korelasyon yöntemi gibi parametrelerin de etkisi incelenmektedir. Üç farklı altküme boyutu değişiminin incelendiği söz konusu çalışmada, altküme boyutu arttıkça $\epsilon_{maks,DIC}$ değerinin $\epsilon_{maks,LVDT}$ değerlerine yaklaştığı ve ϵ_{DIC} ve ϵ_{LVDT} arasındaki korelasyonlar incelendiğinde de eğrilerin artan altküme boyutuna bağlı olarak daha fazla örtüştüğü sonucu rapor edilmiştir. Söz konusu durum, bu bölümde elde edilen sonuçları destekler niteliktedir. Ayrıca, incelenen birikmiş hata (ϵ_{bh}) tanımlaması eğriler arasındaki toplam farkın nicel olarak ölçülebilirliğini artırarak Yıldırım vd. [18] tarafından rapor edilen çalışma sonuçlarını da desteklemektedir.



Şekil 9. Birim şekil değiştirme kapasitesinin alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerleri ile değişimi; (a) Sabit alt küme boyutu-değişken analiz adım aralığı, (b) Değişken alt küme boyutu-sabit analiz adım aralığı



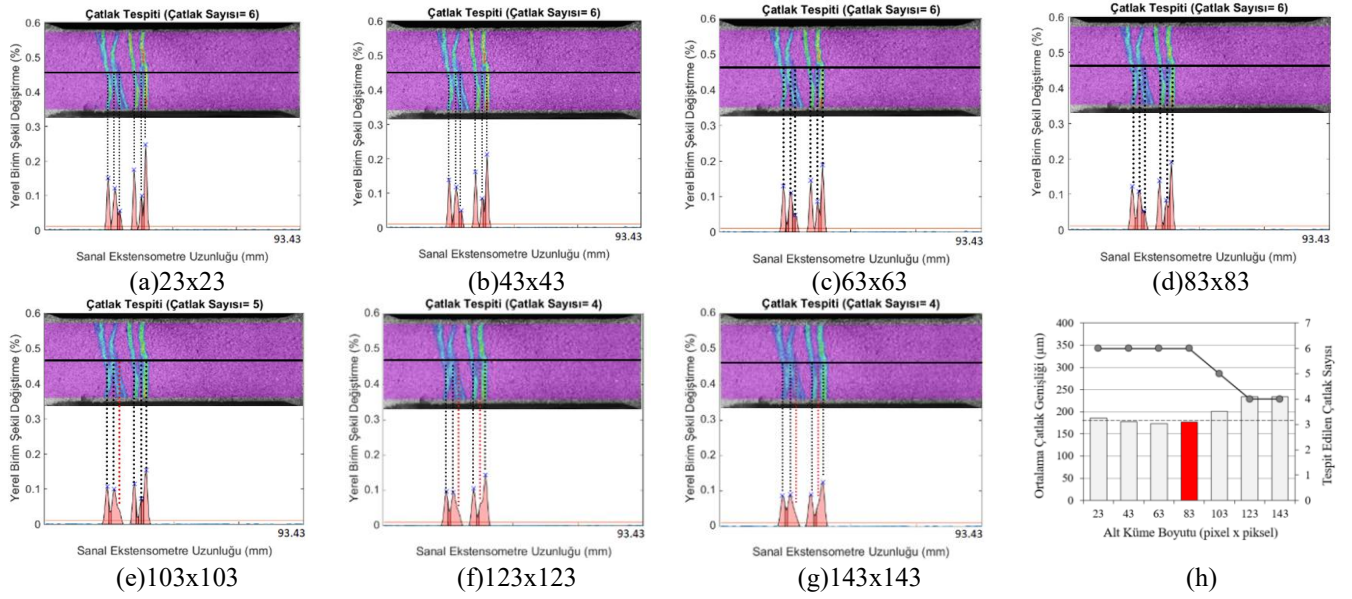
Şekil 10. Birikmiş hatanın (ϵ_{bh}) alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değerleri ile değişimi; (a) Sabit alt küme boyutu-değişken analiz adım aralığı, (b) Değişken alt küme boyutu-sabit analiz adım aralığı

3.1.2 Alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değişiminin çatlak karakterizasyonuna Etkisi

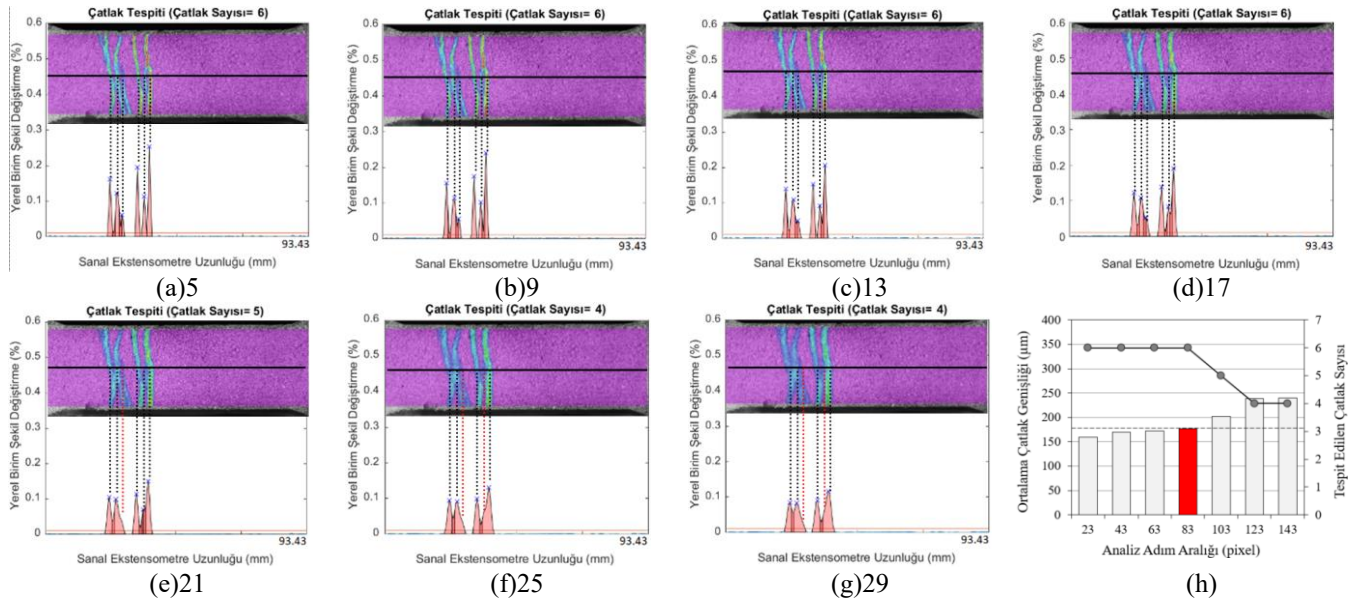
Alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değişimine bağlı olarak yerel birim şekil değiştirmelerde ve çatlak parametrelerinde (sayı ve genişlik) oluşan farklılıklar sırasıyla Şekil 11 ve Şekil 12’de sunulmuştur.

Alt küme boyutu değişimine bağlı olarak sabit tutulan analiz adım aralığı değerinde alt küme boyutunun artışına bağlı olarak yerel birim şekil değiştirme değerlerinin (tepe yüksekliklerinin) giderek azalma eğiliminde olduğu ve birbirine yakın mesafede oluşan çatlakların analiz sonrasında tek bir çatlak olarak görünmeye başladığı tespit edilmiştir. Söz konusu durum, daha belirgin bir şekilde gösterilmek amacıyla en büyük ve en küçük alt küme boyutlarındaki (sırasıyla Şekil 11a ve Şekil 11g) renk haritaları kullanılarak Şekil 13’te sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde, DIC yazılımı tarafından önerilen alt küme boyutu değerine kadar çatlak sayısı ve genişliği değerlerinde belirgin bir değişkenlik görülmemiştir. Ancak, önerilen alt küme boyutundan daha büyük bir değerin seçilmesi durumunda, alt küme boyutu arttıkça ortalama çatlak genişliği değerleri giderek arttığı ve tespit edilebilen çatlak sayılarının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 11h).

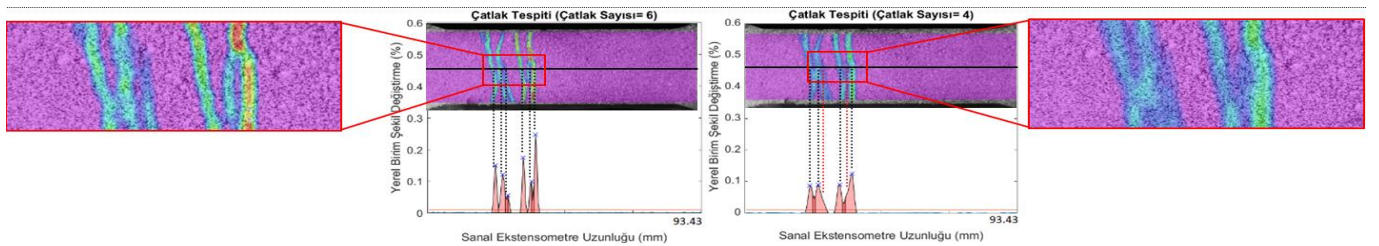
Analizler, alt küme boyutu 83x83 piksel değerinde sabit tutularak analiz adım aralığının değiştirilmesiyle tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 12’de sunulmuştur. Bir önceki değerlendirmelerle benzer şekilde, analiz adım aralığının artmasıyla yine birbirine yakın mesafede oluşan yerel birim deformasyonların (çatlakların) tek bir yerel birim deformasyon (çatlak) olarak görünmeye başladığı tespit edilmiştir (Şekil 12e-Şekil 12f). Ayrıca, önerilen alt küme boyutundan daha büyük bir değerin seçilmesi



Şekil 11. Alt küme boyutu değişimine bağlı olarak çatlak parametrelerinin değişimi (a)23x23 (b)43x43 (c)63x63 (d)83x83 (e)103x103 (f)123x123 (g)143x143 (h) Çatlak sayısı ve genişliği değişimi (kesikli çizgi Zhou vd. [16] yöntemi ile hesaplanan ortalama çatlak genişliğini belirtmektedir).



Şekil 12. Analiz adım aralığı değişimine bağlı olarak çatlak parametrelerinin değişimi (a)5 (b)9 (c)13 (d)17 (e)21 (f)25 (g)29 (h) Çatlak sayısı ve genişliği değişimi (kesikli çizgi Zhou vd. [16] yöntemi ile hesaplanan ortalama çatlak genişliğini belirtmektedir).



Şekil 13. Alt küme boyutunun artmasına bağlı olarak yerel birim şekil değiştirme değerlerinin (tepe değerlerinin) değişimi ve çatlakların birleşmesi

durumunda da yine analiz adım aralığı değeri arttıkça ortalama çatlak genişliği değerlerinin giderek arttığı ve tespit edilebilen çatlak sayılarının azaldığı belirlenmiştir (Şekil 12h).

Genel olarak alt küme boyutu ve analiz adım aralığı değeri küçüldükçe hesaplanan çatlak genişliklerinin giderek azaldığı ya da korunduğu, çatlak tespitinde daha doğru sonuçların elde edildiği görülmektedir. Kıyaslama yapılan Zhou vd. [16] yönteminde yapılan kabullerden bir tanesi de oluşan tüm deformasyonların yalnızca numune üzerinde açılan çatlaklar tarafından oluşturulduğudur. Ancak, teorikte yapılan bu kabulün, gerçekte ihmal edilen matris deformasyonlarını ve mekanik deneyler süresince meydana gelen ölçüm hatalarını (yetersiz önyükleme, çenelerde meydana gelen oturma deformasyonları, LVDT'lerin numune yüzeyinden kayması vb.) içerdiği de dikkate alınmalıdır. Bu durum, düşük ön yüklemeye sonucunda oluşan gerilme-şekil değiştirme eğrilerinde gözlemlenmiş ve DIC'nin LVDT'ye kıyasla bu tür hataları telafi edebilme yeteneği olduğu gösterilmiştir (Şekil 6a). Dolayısıyla, söz konusu yöntemle hesaplanan çatlak genişliği verilerinin gerçekte olduğundan yüksek değerler alabileceği açıktır. Sonuç olarak, Zhou vd. [16]'ya kıyasla küçük analiz adım aralığı değerlerinde elde edilen göreceli olarak daha düşük olan çatlak genişliği verilerinin gerçeğe daha yakın sonuçlar verdiği düşünülmekte ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinde elde edilen sonuçlarla da desteklenmektedir.

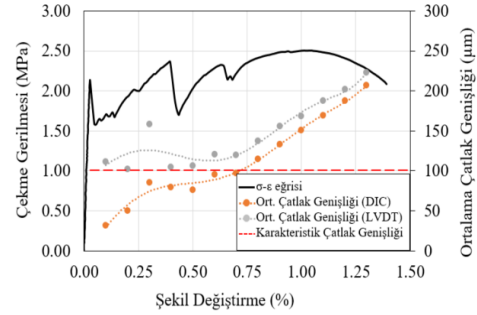
3.1.3 Çatlak genişliklerinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi de dikkate alınarak kıyaslanması

Bir önceki bölümde edinilen bilgiler dikkate alınarak, önerilen alt küme boyutu (83x83 piksel) ve en düşük analiz adım aralığı (5 piksel) kombinasyonunda gerilme-şekil değiştirme-çatlak genişliği grafikleri hem MATLAB algoritmasıyla DIC yöntemiyle hesaplanan ortalama çatlak genişlikleri hem de Zhou vd. [16] yöntemi ile LVDT uzama değerleri alınarak hesaplanan ortalama çatlak genişlikleri kullanılarak hazırlanmış ve Şekil 14'te sunulmuştur.

Hazırlanan MATLAB algoritmasıyla DIC yöntemiyle hesaplanan çatlak genişliklerinin, Zhou vd. [16]'da kullanılan yöntemle hesaplanan çatlak genişliklerine kıyasla tüm şekil değiştirme değerlerinde daha düşük olduğu görülmektedir. Bu durum bir önceki bölümde tartışılan kabul varsayımının çatlak genişliklerini fazla gösterdiği hakkındaki teoriyi desteklemektedir. DIC yöntemiyle hesaplanan çatlak genişliklerinin, verilerin doğrudan numune yüzeyinden elde edilmesine bağlı olarak gerçeğe daha yakın olduğu söylenebilir. Bu durum, özellikle çatlak sayısının göreceli olarak daha düşük olduğu erken birim şekil değiştirme seviyelerinde daha belirgindir. Şekil 16 incelendiğinde, LVDT ve DIC ile hesaplanan çatlak genişliklerinin %0.4 birim şekil değiştirme değerinden sonra birbirine daha yakın olarak elde edildiği, öncesinde ise LVDT'ler aracılığıyla hesaplanan çatlak genişliklerinin DIC aracılığıyla elde edilen çatlak genişliklerine kıyasla belirgin olarak daha fazla olduğu görülmüştür.

ECC'nin karakteristik özelliklerinden bir tanesi de ortalama çatlak genişliğinin 100 µm seviyelerinde olmasıdır.

LVDT'ler aracılığıyla hesaplanan çatlak genişliklerinin tüm şekil değiştirme seviyelerinde kritik 100 µm sınırının üstünde olduğu görülmüştür. Bu durum özellikle henüz numune üzerinde tek bir çatlak bulunduğunda %0.1 şekil değiştirme anında olası değildir. DIC ile hesaplanan çatlak genişliklerinde ise %0.7 birim şekil değiştirme değerine kadar ortalama çatlak genişliklerinin 100 µm sınırının altında olduğu görülmektedir. Bu sınır üstünde ise numune üzerinde yeni bir çatlak oluşmaması artık oluşan mevcut çatlakların genişleyeceği anlamına gelmektedir.



Şekil 14. Gerilme-şekil değiştirme-çatlak genişliği grafikleri

4 Sonuçlar

DIC analizlerinde kullanılan temel parametrelerden olan alt küme boyutu ve analiz adım aralığının çekme yüklemesi altındaki ECC'lerin şekil değiştirme ölçümlerine ve çatlak karakterizasyonuna etkisi geleneksel yöntemlerle kıyaslanarak irdelenmiştir. Sonuçta, yetersiz ön yüklemeye koşullarında yapılan deneylerde DIC analizleriyle hesaplanan şekil değiştirme değerleri kullanılarak çizdirilen σ_{f-ECC} eğrilerinin σ_{f-LVDT} eğrilerine kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Analiz adım aralığı sabit tutularak alt küme boyutu değiştirildiğinde artan alt küme boyutuna bağlı olarak birikmiş hata değerlerinin azaldığı ve ϵ_{LVDT} ile ϵ_{DIC} değerlerinin birbirine daha yakın değerler aldığı; benzer şekilde $\epsilon_{maks,LVDT}$ ve $\epsilon_{maks,DIC}$ değerleri açısından da daha yakın sonuçlar elde edildiği görülmüştür. Alt küme boyutunun sabit tutularak analiz adım aralığının değiştirilmesi ile birikmiş hata ve birim şekil değiştirme kapasitesi değerlerinde belirgin bir değişiklik olmamıştır.

Çatlak karakterizasyonu açısından ise, DIC yazılımı tarafından önerilen ya da önerilenden daha düşük bir alt küme boyutu değeri kullanımının hem çatlak sayısının hem de çatlak genişliklerinin doğru tespitinde kullanılabilir olduğu görülmüştür. Ancak, analiz süresinin daha kısa tutulması ve zamanın daha verimli kullanılması açısından önerilen alt kümenin seçimi daha uygun görülmüştür. Farklı yazılımların kullanılması durumunda, herhangi bir alt küme boyutunun önerilmemesi halinde, seçilecek alt küme boyutunun zaman ve analiz doğruluğu kriterleri de dikkate alınarak düşük mertebelerde seçilmesi akılcı bir başlangıç olacaktır.

Literatürden alınarak uygulanan ortalama çatlak genişliği hesabı yöntemine kıyasla, DIC aracılığıyla hesaplanan çatlak genişliklerinin daha doğru sonuçlar içerdiği ve küçük analiz adım aralığı değerlerinde elde edilen göreceli olarak daha

düşük olan çatlak genişliği verilerinin gerçeğe daha yakın olduğu düşünülmektedir. DIC'nin sağladığı destekleyici görsel içerikler, mevcut yöntemlere kıyasla DIC'yi daha güvenilir kılmaktadır.

Sonuç olarak, mevcut literatürde eksikliği görülen, ECC'nin hem deformasyon hem de çatlak analizinin eş zamanlı ve doğru bir şekilde yapılabilmesi için, geniş bir alanı mikron mertebesinde inceleyebilecek bir takip sistemi DIC tabanlı olarak hazırlanan bir MATLAB algoritması ile elde edilmiştir. Hazırlanan bu prosedürün, yeni teknolojik gelişimler ve farklı algoritmalarda daha da geliştirilebileceği düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma doktora tezi kapsamında hazırlanmış olup, tez kapsamında kullanılan cihazlar için TÜBİTAK'a (proje no:115R012) teşekkürlerimizi sunarız.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %15

Kaynaklar

- [1] M. A. Sutton, J.J. Ortu, and H. Schreier, Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications. Springer Science & Business Media, 2009.
- [2] A. Hedayat and S. Ashur, Digital image correlation and its application in an undergraduate civil engineering materials laboratory, US: Fort Wayne, 2015.
- [3] B. Pan, H. Xie, Z. Wang, K. Qian and Z. Wang, Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. Optics Express, 16 (10), 7037-7048, 2008. <https://doi.org/10.1364/OE.16.007037>
- [4] N. Mashiwa, T. Furushima and K. Manabe, Novel non-contact evaluation of strain distribution using digital image correlation with laser speckle pattern of low carbon steel sheet. Procedia Engineering, 184, 16-21, 2017. <https://doi.org/10.1016/bj.proeng.2017.04.065>
- [5] S. W. Khoo, S. Karuppanan and C. S. Tan, A review of surface deformation and strain measurement using two-dimensional digital image correlation. Metrology and Measurement Systems, 23 (3), 461-480, 2016. <https://doi.org/10.1515/mms-2016-0028>
- [6] V. C. Li, Can concrete be bendable?. American Scientist, 100 (6), 484-493, 2012.
- [7] J. I. Choi, B. Y. Lee, R. Ranade, V. C. Li and Y. Lee, Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite. Cement and Concrete Composites, 70, 153-158, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.04.002>
- [8] B. Felekoğlu, K. Tosun-Felekoğlu and E. Gödek, A novel method for the determination of polymeric micro-fiber distribution of cementitious composites exhibiting multiple cracking behavior under tensile loading. Construction and Building Materials, 86, 85-94, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.094>
- [9] M. Ohno and V. C. Li, A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. Construction and Building Materials, 57, 163-168, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.005>
- [10] Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC). JSCE: 1-88, Japan, 2008.
- [11] B. Felekoğlu and M. Keskinates, Multiple cracking analysis of HTPP-ECC by digital image correlation method. Computers and Concrete, 17 (6), 831-848, 2016. <http://dx.doi.org/10.12989/cac.2016.17.6.831>
- [12] M. Mahal, T. Blanksvärd, B. Täljsten and G. Sas, Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams. Engineering Structures, 105, 277-288, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.10.017>
- [13] Y. Ding, K. Q. Yu, J. T. Yu and S. L. Xu, Structural behaviors of ultra-high performance engineered cementitious composites (UHP-ECC) beams subjected to bending-experimental study. Construction and Building Materials, 177, 102-115, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.122>
- [14] K. Q. Yu, J. T. Yu, J. G. Dai, Z. D. Lu and S. P. Shah, Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. Construction and Building Materials, 158, 217-227, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.040>
- [15] A. Tambusay, B. Suryanto and P. Suprobo, Digital image correlation for cement-based materials and structural concrete testing. Civil Engineering Dimension, 22 (1), 6-12, 2020. <https://doi.org/10.9744/ced.22.1.6-12>
- [16] J. Zhou, S. Qian, M. G. Sierra Beltran, G. Ye, K. van Breugel and V. C. Li, Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. Materials and structures, 43(6), 803-814, 2010. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9549-0>
- [17] S. Wang and V. C. Li, Tailoring of pre-existing flaws in ECC matrix for saturated strain hardening. Fracture Mechanics of Concrete Structures, 1005-1012, 2004.
- [18] T. Yıldırım, M. Keskinates, E. Gödek, K. Tosun Felekoğlu, B. Felekoğlu, O. Önal, Strain analysis of multiple cracking fiber reinforced composites by digital image correlation: Evaluation of parameter effects. Teknik Dergi, 31(1), 2020. <https://doi.org/10.18400/tekderg.397681>

