

**DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU**  
**TEKNİĞİNİN YAPI MALZEMELERİNİN YÜK**  
**ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜNDE**  
**KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Tarık YILDIRIM**

**Temmuz, 2018**  
**İZMİR**

**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU  
TEKNİĞİNİN YAPI MALZEMELERİNİN YÜK  
ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜNDE  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Yapı Malzemesi Anabilim Dalı**

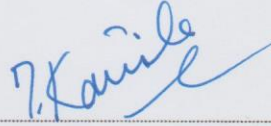
**Tarık YILDIRIM**

**Temmuz, 2018**

**İZMİR**

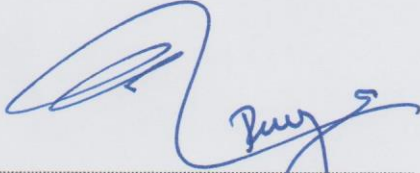
## YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

TARIK YILDIRIM, tarafından DOÇ. DR. KAMİLE TOSUN FELEKOĞLU yönetiminde hazırlanan “DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU TEKNİĞİNİN YAPI MALZEMELERİNİN YÜK ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



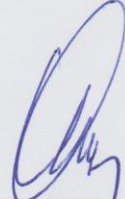
Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU

Yönetici



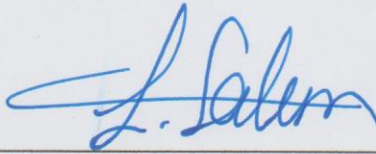
Prof. Dr. Kambiz RAMYAR

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Okan ÖNAL

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Latif SALUM

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

## TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarım sırasında bilgilerini benden esirgemeyen ve beni her zaman motive eden danışmanım Sayın Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte yol göstericim olan, bilgi ve deneyimlerini her daim paylaşarak farklı bakış açısı kazanmamı sağlayan, her anlamda desteğini hissettiren değerli hocam Sayın Prof. Dr. Burak FELEKOĞLU'na teşekkürlerimi sunarım. Bilgi ve deneyimlerini paylaşarak çalışmalarına destek olan hocam Sayın Doç. Dr. Okan ÖNAL'a teşekkür ederim.

Çalışmalarımda her zaman desteğini hissettiğim, her konuda gece gündüz demeden sorularıma cevap veren ve fikir paylaşımında bulunan, motivasyona ihtiyacım olduğunda pozitif düşünmemi sağlayan çalışma arkadaşım Öğr. Gör. Eren GÖDEK'e çok teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Muhammer KESKİNATEŞ, İnş. Müh. Mert TATARCA ve İnş. Müh. Ceren DUYAL'a teşekkür ederim.

Çalışma süresince bilişim konusunda destek olan Müh. Emine BAŞALAN'a, Sultan AKTİN'e ve tüm şartlarda her daim yanımda olan Okan AKIN'a çok teşekkür ederim. Bugüne kadar üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime ve yanımda olan dostlarıma teşekkürlerimi sunuyorum.

115R012 kodlu proje kapsamında sürdürülmüş olan yüksek lisans tez çalışmama verdikleri destek ve sundukları imkânlardan dolayı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na ve laboratuvar imkânlarından yararlandığım Dokuz Eylül Üniversitesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Güler yüzü ve pozitif enerjisi ile yanımda olan, danıştığım konularda güzel fikirlerini benimle paylaşan, yoğun ve stresli zamanlarımda her zaman anlayışlı olan, yeri geldiğinde fedakârlık gösteren sevgili nişanlım Begüm ÇAKAR'a çok teşekkür ederim.

Son olarak her daim yanımda olan, ilgi ve desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme, annem Aysel YILDIRIM, kardeşlerim Yasemin YILDIRIM, Tayfun YILDIRIM ve Mert YILDIRIM’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Lisansüstü eğitime beni teşvik eden babam Yavuz YILDIRIM’a bu süreçteki tüm desteklerinden dolayı çok teşekkür ediyorum.

Tarık YILDIRIM



**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU TEKNİĞİNİN YAPI  
MALZEMELERİNİN YÜK ALTINDA ŞEKİL DEĞİŞİMİNİN ÖLÇÜMÜNDE  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI  
ÖZ**

Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Kompozitler (ECC) çoklu çatlama ve yalancı deformasyon sertleşmesi davranışı gösteren ve böylece geleneksel lifli kompozitlere kıyasla düktilitesi geliştirilmiş yapı malzemeleridir. Dijital görüntü korelasyonu metodu (DIC), matematik ve görüntü işleme tabanlı yeni bir temassız ölçüm yöntemidir. Benek yoğunluğu, aydınlatma koşulları ve analiz parametreleri (altküme boyutu, adım aralığı vb.) gibi çeşitli parametreler ölçüm hesaplamalarını etkilemektedir. Bu tezde, DIC parametrelerinin ECC'nin çekme birim şekil değiştirme ölçümlerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, çimento esaslı bir matris ve yüzde 2 oranında yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) kullanılarak ECC örnekleri hazırlanmıştır. Örneklere; benekleme yoğunluğu (yoğun/seyrekle), aydınlatma etkisi (kontrollü/kontROLSÜZ) ve çözünürlük (yüksek/düşük) parametreleri de dikkate alınarak çekme deneyleri uygulanmıştır. Örneklerin birim şekil değiştirme değerleri, örneğin 4 köşesine yerleştirilen ekstensometreler ve DIC analizleri ile hem mekanik hem de dijital olarak hesaplanmıştır. DIC hesaplamalarında, altküme boyutu ve adım aralığı kombinasyonlarının birim şekil değiştirme ölçümlerine etkisi de ayrıca incelenmiştir. En düşük hata oranını sağlayan örneklerin çatlak özellikleri de görsel ve dijital olarak incelenmiştir.

Örnekler ortalama 2,75 MPa çekme dayanımı ve yüzde 3,38 birim şekil değiştirme göstermiştir. Farklı DIC adım aralıklarında; ortalama birim şekil değiştirmeler  $(0,5 \cdot \text{altküme}) \cdot (1/4)$ ,  $(0,5 \cdot \text{altküme}) \cdot (2/4)$ ,  $(0,5 \cdot \text{altküme}) \cdot (3/4)$  ve  $(0,5 \cdot \text{altküme}) \cdot (4/4)$  için sırasıyla yüzde 3,74, 3,67, 3,62 ve 3,54 olarak hesaplanmıştır. Belirtilen yöntemlere göre en az hata oranına sahip test koşulları şu şekilde belirlenmiştir; seyrek benekleme, kontrollü aydınlatma ve yüksek çözünürlük. Bu örneklerde, göz ile sayma yöntemiyle gözlenemeyen çatlaklar DIC yöntemiyle başarılı bir şekilde ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışma DIC'nin

doğru analiz parametreleri seçilirse geleneksel deformasyon ölçüm yöntemlerinden üstün olduğunu göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler, dijital görüntü korelasyonu, ECC, DIC, çoklu çatlak davranışı, HTPP



# **INVESTIGATION OF THE APPLICABILITY OF DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD FOR MEASURING THE DEFORMATION OF CONSTRUCTION MATERIALS UNDER LOAD**

## **ABSTRACT**

Engineered Cementitious Composites (ECC) are construction materials exhibiting multiple cracking and pseudo strain hardening behavior and therefore, enhanced ductility when compared to conventional fiber reinforced composites. Digital image correlation method (DIC) is a recently developed non-contact measurement method based on math and image processing. Various parameters such as speckle density, illumination condition and analysis parameters (subset size, step size etc.) affect the measurement calculations. In this thesis, the effect of DIC parameters on the tensile strain measurements of ECC was investigated. For this purpose, ECC specimens were prepared by using a cement based matrix and 2 percent of high tenacity polypropylene (HTPP) fiber. Tensile tests were applied to specimens by taking the speckle density (coarse/fine), the effect of illumination (controlled/uncontrolled), and the resolution (high/low) parameters into account. Strain values of specimens were calculated both mechanically and digitally by using 4 extensometers placed at each corner of specimen and by DIC analysis, respectively. In DIC calculations, the effect of subset and step size combination to the strain measurement was also investigated. Crack properties of specimens providing the lowest strain error rate were also investigated both visually and digitally.

The specimens exhibited average tensile strength of 2.75 MPa and average strain of 3.38 percent. In different step size of DIC;  $(0.5 \times \text{subset}) \times (1/4)$ ,  $(0.5 \times \text{subset}) \times (2/4)$ ,  $(0.5 \times \text{subset}) \times (3/4)$  and  $(0.5 \times \text{subset}) \times (4/4)$  the average strain values were calculated as 3.74, 3.67, 3.62 and 3.54 percent, respectively. Test conditions having the least error rate according to the methods specified were determined as; fine speckle, controlled illumination and high resolution. In these specimens, cracks that cannot be observed by eye counting method successfully detected by DIC method. In conclusion; this study demonstrated the superiority of DIC over traditional

deformation measurement methods when the correct analysis parameters are selected.

**Keywords:** Engineered cementitious composites, digital image correlation, ECC, DIC, multiple cracking behavior, HTPP



## İÇİNDEKİLER

|                                                                                          | Sayfa        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| YÜKSEK LİSANS TEZİ SINAV SONUÇ FORMU .....                                               | ii           |
| TEŞEKKÜR .....                                                                           | iii          |
| ÖZ .....                                                                                 | v            |
| ABSTRACT .....                                                                           | vii          |
| ŞEKİLLER LİSTESİ .....                                                                   | xii          |
| TABLolar LİSTESİ.....                                                                    | xv           |
| <br><b>BÖLÜM BİR - GİRİŞ .....</b>                                                       | <br><b>1</b> |
| 1.1 Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Çimento Esaslı Kompozitler (ECC)..             | 2            |
| <br><b>BÖLÜM İKİ - DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU (DIC) .....</b>                           | <br><b>5</b> |
| 2.1 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Gelişimi .....                                | 5            |
| 2.2 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Temel Prensipleri.....                        | 8            |
| 2.3 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Parametreleri .....                           | 11           |
| 2.3.1 Numune Hazırlanması ve Benekleme .....                                             | 11           |
| 2.3.2 Görüntü Alımı .....                                                                | 13           |
| 2.3.2.1 Fotoğraf Makinesi ve Kamera .....                                                | 14           |
| 2.3.2.2 Işık .....                                                                       | 18           |
| 2.3.3 Alt Küme ve Analiz Adım Aralığı Boyutu .....                                       | 19           |
| 2.3.4 Korelasyon Yöntemi.....                                                            | 21           |
| 2.3.5 Yazılım ve Donanım .....                                                           | 24           |
| 2.4 DIC Metodunun Çoklu Çatlak Davranışı Gösteren Kompozitler Üzerinde<br>Kullanımı..... | 26           |

## **BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMALAR..... 32**

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1 Kullanılan Malzemeler .....                                                                | 32 |
| 3.1.1 Çimento .....                                                                            | 32 |
| 3.1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu.....                                                         | 33 |
| 3.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif.....                                             | 34 |
| 3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı .....                                              | 34 |
| 3.2 Karışım Oranları Ve Hazırlanan Örnekler .....                                              | 35 |
| 3.2.1 Numunelerin Beneklendirilmesi.....                                                       | 37 |
| 3.3 Sistemik Deney Programı ve Deneyler .....                                                  | 38 |
| 3.4 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                                  | 41 |
| 3.5 DIC Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                             | 43 |
| 3.6 Gerçek LVDT ve DIC (sanal LVDT) Sonuçlarının Kıyaslanmasında<br>Kullanılan Yöntemler ..... | 45 |
| 3.7 Çatlak Analizi Yöntemi.....                                                                | 48 |

## **BÖLÜM DÖRT - DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR ..... 51**

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1 Kompozitlerin Çekme Dayanımları ve Birim Deformasyon Kapasiteleri ..                           | 51 |
| 4.2 Kompozitlerin İncelenenecek Yüzey Alanlarının Benek Histogramlarının<br>Tanımlanması .....     | 53 |
| 4.3 Kompozitlerin DIC ile Elde Edilen Birim Deformasyon Kapasiteleri.....                          | 55 |
| 4.4 Maksimum Gerilme Noktasına Göre Birim Şekil Değiştirmelerin<br>Kıyaslanması .....              | 56 |
| 4.5 Maksimum Gerilme Noktasına Kadar Tüm Birim Şekil Değiştirme<br>Değerlerinin Kıyaslanması ..... | 57 |
| 4.6 Çözünürlüğün Hata Oranlarına Etkisi Üzerine Değerlendirilmeler .....                           | 58 |

|                                                                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.7 Aydınlatmanın Hata Oranlarına Etkisi Üzerine Değerlendirilmeler .....                                                          | 59        |
| 4.8 DIC Yöntemi ile Çatlak Analizi .....                                                                                           | 60        |
| 4.9 DIC Yönteminde Çatlak Analizi ve Birim Şekil Değiştirme için Optimum<br>Analiz Adım Aralığının Belirlenmesi .....              | 63        |
| <b>BÖLÜM BEŞ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>                                                                                       | <b>65</b> |
| 5.1 Sonuçlar.....                                                                                                                  | 65        |
| 5.2 Öneriler.....                                                                                                                  | 67        |
| <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                                              | <b>68</b> |
| <b>EKLER.....</b>                                                                                                                  | <b>79</b> |
| EK-A : DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile<br>kıyaslanması .....                                 | 79        |
| EK-B : Maksimum gerilme noktasına göre birim şekil değiştirmelerin ( $\epsilon_{LVDT}$ ve<br>$\epsilon_{DIC}$ ) kıyaslanması ..... | 87        |
| EK-C: LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması                                                          | 89        |
| EK-D: AFSCIHR Serisi için Elde Edilen Çatlak Analizi Sonuçları .....                                                               | 97        |

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa

|            |                                                                                                                                                                 |    |
|------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 1.1  | Çekme gerilmesi altında yalın beton ve mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlerin birim şekil değiştirme-çatlak genişliği grafiği ..... | 2  |
| Şekil 2.1  | DIC yöntemi ile deplasman analizi yapılan taş duvar örneği.....                                                                                                 | 7  |
| Şekil 2.2  | DIC analizi yapılan SEM görüntüsü örneği .....                                                                                                                  | 7  |
| Şekil 2.3  | Beneklendirilmiş silindir numunenin 3D-DIC ile incelenmesi.....                                                                                                 | 8  |
| Şekil 2.4  | DIC'nin temel prensibi; referans görüntüdeki referans alt küme ve deforme görüntüdeki hedef alt küme .....                                                      | 9  |
| Şekil 2.5  | Çatlaklardan dolayı yer değiştirmeleri korelasyon ile hesaplanamayan bazı bölgeler .....                                                                        | 10 |
| Şekil 2.6  | a) DIC yöntemi için uygun olmayan desen türleri, b) ideal benekleme..                                                                                           | 11 |
| Şekil 2.7  | Yüzeyi beneklendirilmiş taş duvar ve DIC analiz sonucu .....                                                                                                    | 12 |
| Şekil 2.8  | Rastgele benekleme .....                                                                                                                                        | 12 |
| Şekil 2.9  | Rastgele benekleme yöntemleri a) stampa, b) airbrush (boya tabancası), c)sprey ile benekleme .....                                                              | 13 |
| Şekil 2.10 | Beneklenmiş görüntü elde etmek için tipik DIC sistemi.....                                                                                                      | 14 |
| Şekil 2.11 | Diyafram Açıklık Değerleri .....                                                                                                                                | 17 |
| Şekil 2.12 | Netlenen cismin uzaklığı .....                                                                                                                                  | 17 |
| Şekil 2.13 | Objektifin odak uzaklığı.....                                                                                                                                   | 18 |
| Şekil 2.14 | CCD ve CMOS sensörler .....                                                                                                                                     | 18 |
| Şekil 2.15 | (a) Deformasyon öncesi ekran görüntüsü, (b) deformasyon öncesi bellek görüntüsü.....                                                                            | 22 |
| Şekil 2.16 | (a) Deformasyon sonrası ekran görüntüsü, (b) deformasyon sonrası bellek görüntüsü.....                                                                          | 23 |
| Şekil 2.17 | Betonarme kiriş örnek üzerinde beneklendirme ile eğilme yüklemesi sonucu elde edilen $\epsilon_x$ $\epsilon_y$ ve von mises birim deformasyon alanları.....     | 27 |
| Şekil 2.18 | Numune üzerindeki çatlak gelişimi ile DIC görüntülerindeki örtüşme ..                                                                                           | 28 |

|            |                                                                                                                                                                                        |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.19 | Nihai çatlak görüntüleri yukarda olan üç tip numune için yüklemeleri boyunca elde edilen verilerle oluşturulmuş yükleme- çatlak açıklığı diyagramı.....                                | 29 |
| Şekil 2.20 | DIC yöntemi ile elde edilen çizgisel deformasyonlar .....                                                                                                                              | 30 |
| Şekil 3.1  | Hobart mikser .....                                                                                                                                                                    | 36 |
| Şekil 3.2  | Çekme numunesi kalıbı ve boyutları.....                                                                                                                                                | 36 |
| Şekil 3.3  | a) Numunelerin spiral taşı ile düzeltilmesi, b) yüzeyde görülen fazla liflerin yakılması, c) yüzeyin beyaz spre y boya ile boyanması.....                                              | 37 |
| Şekil 3.4  | Spre y boya ile benekleme metodu .....                                                                                                                                                 | 38 |
| Şekil 3.5  | DIC yöntemine uygun numune hazırlanması.....                                                                                                                                           | 38 |
| Şekil 3.6  | a) Doğrudan çekme cihazı, b) düzeneğe yerleştirilmiş numune .....                                                                                                                      | 40 |
| Şekil 3.7. | Çekme deneyi cihazı ve görüntü analiz ekipmanları .....                                                                                                                                | 40 |
| Şekil 3.8  | İlk çatlak gerilmesi değ erinin tespiti .....                                                                                                                                          | 42 |
| Şekil 3.9  | Maksimum gerilme, birim şek il değ iştirme ve tokluk kapasitesinin belirlenmesi .....                                                                                                  | 43 |
| Şekil 3.10 | VIC-2D yazılımında DIC parametrelerinin uygulanması ve elde edilmesi aş amaları.....                                                                                                   | 44 |
| Şekil 3.11 | Alt küme boyutu ve analiz adım aralığı belirlenme ş eması .....                                                                                                                        | 45 |
| Şekil 3.12 | ACSCIHR-1 kodlu numunenin LVDT ve DIC verileri ile elde edilmiş gerilme-birim deformasyon grafi ğ i ve 15 görüntüde bir görüntüsü alınmış deformasyon haritaları.....                  | 46 |
| Şekil 3.13 | AFSCIHR-1 numunesi $\sigma$ - $\epsilon$ diyagramında maksimum gerilmeye ( $\sigma_{mak}$ ) karş ılık gelen birim şek il değ iştirmeler ( $\epsilon_{LVDT}$ ve $\epsilon_{DIC}$ )..... | 47 |
| Şekil 3.14 | AFSCIHR-1 numunesi LVDT ve DIC'nin tüm birim şek il değ iştirme verilerinin kıyaslanması .....                                                                                         | 48 |
| Şekil 3.15 | DIC yöntemi ile ilk çatlak tespiti .....                                                                                                                                               | 49 |
| Şekil 3.16 | AFSCIHR2-31/4 numunesi için numune üzerine çizilen sanal LVDT yardımıyla çatlak sayısı ve geniş liğ inin belirlenmesi .....                                                            | 50 |
| Şekil 4.1  | Çekme dayanımındaki değ iş im .....                                                                                                                                                    | 52 |
| Şekil 4.2  | LVDT Çekme birim deformasyon kapasitesindeki değ iş im .....                                                                                                                           | 52 |
| Şekil 4.3  | Numunelerin incelenen yüzey alanı renk histogramları.....                                                                                                                              | 54 |
| Şekil 4.4  | DIC çekme birim deformasyon kapasitelerindeki değ iş im .....                                                                                                                          | 55 |

|            |                                                                                                                            |    |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 4.5  | DIC'nin LVDT'ye kıyasla mutlak hata farkları .....                                                                         | 58 |
| Şekil 4.6  | a) Düşük çözünürlük, b) yüksek çözünürlük (örn: ACSCIHR1 numunesi)<br>.....                                                | 59 |
| Şekil 4.7  | Kontrollü aydınlatma yapılan numunelerin gri renk skalası histogramları<br>.....                                           | 60 |
| Şekil 4.8  | Kontrollü aydınlatma yapılmayan numunelerin gri renk skalası<br>histogramları.....                                         | 60 |
| Şekil 4.9  | AFSCIHR serisi için ortalama çatlak genişliği grafiği .....                                                                | 62 |
| Şekil 4.10 | AFSCIHR2 numunesini $DIC(0,5*alt\ küme)*(1/4))$ ile $DIC(0,5*alt\ küme)*(4/4)$ analizleri çatlak sayıları kıyaslaması..... | 63 |
| Şekil 4.11 | Birim deformasyon kapasitesi ile çatlak sayıları için elde edilen hata<br>oranları .....                                   | 64 |

## TABLolar LİSTESİ

|                                                                                                           | Sayfa |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 2.1 DIC yönteminde kullanılan temel korelasyon hesaplamaları .....                                  | 22    |
| Tablo 2.2 DIC analizi ile hesaplanan çatlak genişliği dağılımları.....                                    | 30    |
| Tablo 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları.....             | 33    |
| Tablo 3.2 Öğütölmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları .....                    | 33    |
| Tablo 3.3 Yöklek çekme dayanımlı polipropilen lif özellikleri .....                                       | 34    |
| Tablo 3.4 AdvaFlow 375N karakteristik özellikleri.....                                                    | 34    |
| Tablo 3.5 Matrisin karışım oranları.....                                                                  | 35    |
| Tablo 3.6 Numunelerin isimlendirilmesinde kullanılan notasyonlar .....                                    | 39    |
| Tablo 3.7 Hazırlanan numunelerin isimlendirme sistemi ve açıklamaları .....                               | 39    |
| Tablo 3.8 Kamera özellikleri .....                                                                        | 41    |
| Tablo 4.1 32 adet numune için elde edilen mekanik deney sonuçları.....                                    | 51    |
| Tablo 4.2 LVDT ve DIC yöntemlerinden elde edilen çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişimler ..... | 56    |
| Tablo 4.3 Maksimum gerilme noktasına göre LVDT ve DIC birim şekil değiştirmeleri kıyaslama sonuçları..... | 56    |
| Tablo 4.4 Tüm Birim Şekil Değiştirme Değerlerine göre LVDT ve DIC kıyaslama sonuçları .....               | 57    |
| Tablo 4.5 AFSCIHR serisi için çatlak analizi sonuçları.....                                               | 61    |

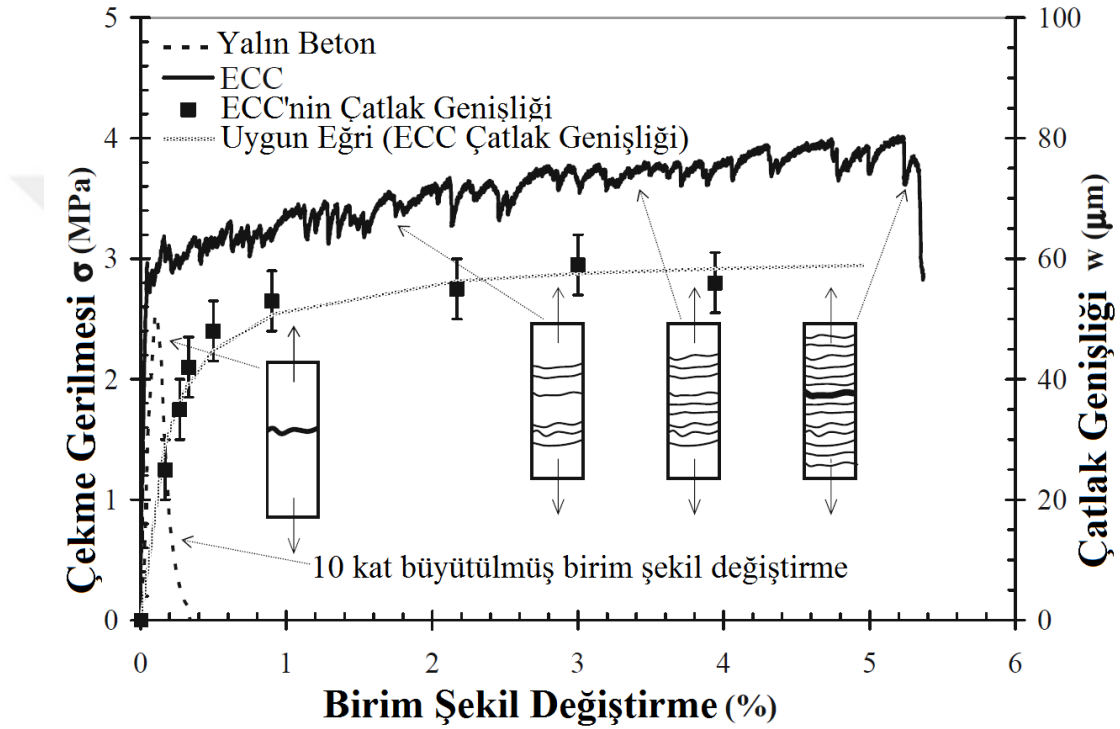
## BÖLÜM BİR

### GİRİŞ

Beton, yapısı gereği, yalın halde yarı gevrek bir davranış göstermektedir. Bu nedenle, betonun çekme dayanımı genellikle betonarme hesaplarda ihmal edilecek kadar düşüktür. Yalın betonun çekme birim deformasyon kapasitesi yaklaşık %0,01 seviyelerindedir (Wang ve Li, 2006). Şekil 1.1’de yalın beton için çekme gerilmesi ile birim deformasyon ilişkisi (kesikli çizgiler) görülmektedir. Ayrıca, beton gibi çimento esaslı bu tür yapı malzemelerinde göçme davranışı tek çatlak açılması, hızlı bir şekilde ilerlemesi ve ani şekilde yük taşıma kapasitesini kaybetmesi şeklinde görülmektedir. Günümüzde betonu çekme ve eğilme etkilerine karşı güçlendirmek için çelik, cam ya da karbon esaslı sürekli donatılardan ya da çeşitli özelliklere sahip süreksiz liflerden faydalanılmaktadır. İçerisinde toplam hacmin belirli bir oranı kadar süreksiz lif içeren betonlar günümüzde lifli beton olarak adlandırılmaktadır. Fakat bu tür özel betonlarda lif dozajı işlenebilirlik problemi nedeniyle genellikle sınırlı seviyede kalmaktadır. Lif dozajının yetersiz olması durumunda da ilk çatlak sonrasında ancak çatlağın kontrollü bir şekilde genişlemesi sağlanmakta ve deformasyon yumuşaması davranışı gözlenmektedir.

Mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitler (Engineered Cementitious Composites-ECC) Kuzey Amerika’da MIT ve Michigan Üniversitesinde Prof. Dr. Victor Li ve grubu tarafından araştırılmaya başlanmış ve ilk teorik temelleri 90’lı yıllarda atılmıştır (Li ve Kanda, 1998; Keoleian, Kendall, Lepech ve Li, 2006). ECC tasarımında, hacimce yalnızca %2 oranında lif kullanımı ile uygun bir lif-matris aderansı sağlanarak çoklu çatlak davranışı elde edilebilmektedir (Zhou ve diğer., 2010). Buna bağlı olarak malzeme, yalancı deformasyon sertleşmesi davranışı göstermekte ve yalnızca enerji yutma kapasitesi değil aynı zamanda yük taşıma ve deformasyon kapasiteleri de arttırılabilmektedir. Şekil 1.1’de mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlere bir örnek verilmiştir. Şekil 1.1’deki örnekten görüldüğü üzere, çekme birim deformasyon kapasitesi önemli ölçüde artmıştır (Li, Mishra ve Wu, 1995; Weimann ve Li, 2003). Bu tür yüksek düktiliteli kompozitlerin çatlak genişlikleri ortalama

65µm ve çekme birim deformasyon kapasitesi %2,5-4 seviyelerine kadar çıkabilmektedir (Li, 2002; Weimann ve Li, 2003). Çok sayıda mikronize çatlağın oluşmasıyla, ECC örneklerindeki çatlak genişliği 80 µm'nin altında kontrol edilebilir. Geleneksel betonda oluşan çok daha geniş ve tekil çatlaktan farklı olarak, bu tür mikronize çatlaklar malzeme bünyesine su veya zararlı iyonların geçişlerini zorlaştırırlar ve hatta kendiliğinden onarım sağlayabilirler (Lu, Li ve Leung, 2018).



Şekil 1.1 Çekme gerilmesi altında yalın beton ve mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı kompozitlerin birim şekil değiştirme-çatlak genişliği grafiği (Weimann ve Li, 2003)

### 1.1 Mühendislik Özellikleri Geliştirilmiş Çimento Esaslı Kompozitler (ECC)

ECC; çekme, eğilme ve kesme yüklemeleri altında çoklu çatlak davranışı gösterebilen, yüksek süneklığe ve tokluğa sahip bir yapı malzemesidir (Sherir, Hossain ve Lachemi, 2016; Li, 2012). ECC, çimento esaslı bir matristir ve genellikle mikro boyutlu çeşitli polimerik lifler kullanılarak üretilmektedir (Dhawale ve Joshi, 2013). Ancak, lifin tipi, boyutu vb. özelliklerin belirli bir kistası yoktur, örneğin; Toreks marka burgulu çelik lifler ile de ECC'nin çoklu çatlak davranışı elde

edilebilmektedir (Naaman, 2003). ECC'nin matris fazında çimentonun yanı sıra uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli mineral katkılardan, silis ve kireçtaşı tozu ( $<200 \mu\text{m}$ ) gibi inert malzemelerden de ekonomik açıdan avantaj sağlaması, hidrasyon ısını düşürmesi gibi sebeplerle yararlanılmaktadır (Zhou ve diğer., 2010). Lif olarak genellikle hacimce %2 oranını aşmayacak şekilde poli-etilen (PE), poli-vinil alkol (PVA), yüksek dayanımlı poli-propilen (HTPP) veya aramid (Kim, Park ve Kim, 2018) lifler tercih edilmektedir (Felekoğlu, Tosun-Felekoğlu, Ranade, Zhang ve Li, 2014). Lif dozajı, hem işlenebilirlik hem de maliyet parametreleri dikkate alınarak çoklu çatlak davranışının sağlandığı minimum oranda tutulmalıdır.

Matris dayanımı, lif dayanımı, lif boyutu ve geometrisi ile matris-lif arasındaki aderansı etkileyen lif yüzey özellikleri gibi parametreler ECC tasarımında dikkate alınmaktadır (Li ve Maalej, 1996). ECC'nin gösterdiği düktil özelliğin temel nedeni, matris içerisinde çok sayıda ve tüm kesitlere dağılmış halde bulunan polimerik mikro lifler sayesinde gösterdiği kararlı çoklu çatlama ve yalancı deformasyon sertleşmesi davranışdır (Li, 1993). Kompoziti oluşturan matris, lif ve lif-matris aderans özelliklerine bağlı olarak çoklu çatlak davranışı oluşturmak için mikro-mekanik bir model geliştirilmiştir. 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 (Li, 1993). 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. Dayanım kriteri aynı zamanda matris bünyesindeki kusur yapısı ve dağılımından etkilenmektedir (Lu, Li ve Leung, 2018). Bu iki kriterin sağlanması durumunda; ilk çatlak sonrasında açılan kesitte lifler homojen dağılımda ve uygun miktarda ise, ayrıca lif-matris arasındaki aderans da yeterli seviyede ise lifler gerilmeyi kesitin diğer bölgelerine de rahatlıkla aktarabilmektedir. Böylece kesitin diğer bölgelerindeki daha küçük kusurlar da aktive olarak yeni çatlaklar oluşma şansı bulmaktadır. Oluşan her yeni çatlak çekme birim deformasyon kapasitesine katkıda bulunmaktadır. Çatlak sayısı ile birim deformasyon kapasitesi arasında belirli bir ilişki vardır. Çatlak sayısı ne kadar fazla

olursa, çekme birim deformasyon kapasitesi de o kadar artmaktadır. Bu aşamada çatlak genişliklerinin 100µm'den düşük olması da durabilite açısından önem kazanmaktadır.

ECC'nin yük taşıması sırasında oluşan çatlakların karakterizasyonu; gelişiminin takip edilmesi ve bölgesel olarak ölçülmesi ile mümkündür (Ohno ve Li, 2014). Klasik deformasyon ölçme yöntemlerinde ECC'nin ilk çatlak dayanımlarının belirlenmesi için kullanılan yöntemler her zaman sağlıklı sonuç vermemektedir. Genellikle gerilme-birim şekil değiştirme 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. ECC'nin çatlak analizinin bütünüyle yapılabilmesinde geleneksel ölçüm yöntemleri (noktasal sensörler, çatlak genişliğini ölçen mikro-sensörler vb.), çok sayıda mikro boyutlu kararlı çatlağın örneğin kesiti üzerinde rastgele oluşması nedeniyle yetersiz kalmaktadır. Her bir çatlağın yük altındaki genişleme davranışını incelemek, hem açılan çatlakların kesit üzerinde nerede oluşacağını bilinememesi, hem de çok sayıda sensör gerektirmesi nedeniyle uygulamada da 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 (Felekoğlu ve Keskinates, 2016).

Son yıllarda, deneysel çalışmalarda özellikle malzeme davranışının karakterizasyonu için dijital görüntü korelasyon (digital image correlation – DIC) tekniklerinin kullanımı önemli ölçüde artmıştır. Bu sistem temassız bir şekilde incelenecek tüm alan üzerindeki, yer değiştirme, birim şekil değiştirme ölçümlerini ve çatlak takibini kolay ve hızlı bir şekilde analize imkân vermektedir (Pérez, Coppieters ve Debruyne, 2015).

## **BÖLÜM İKİ**

### **DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU (DIC)**

Dijital görüntü korelasyonu yöntemi (DIC), bir numuneye belirli bir deformasyon/gerilme uygulanmadan önce ve uygulandıktan sonra çekilen bir çift dijital görüntüyü kullanarak, matematiksel olarak tanımlı fonksiyonlar yardımıyla “yer değiştirme vektör alanının” tahmini esasına dayanır (Wang ve Cuitiño, 2002). Numunenin 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 (Mguil-Touchal, Morestin ve Brunei, 1997). Referans (deforme olmamış) ve deforme olmuş örnek yüzeyinden alınan görüntüler üzerindeki “küçük piksel grupları” veya “alt kümeler” arasında eşleştirme yapılırken maksimum korelasyonun yakalanması hedeflenir (Hild, Raka, Baudequin, Roux ve Cantelaube, 2002).

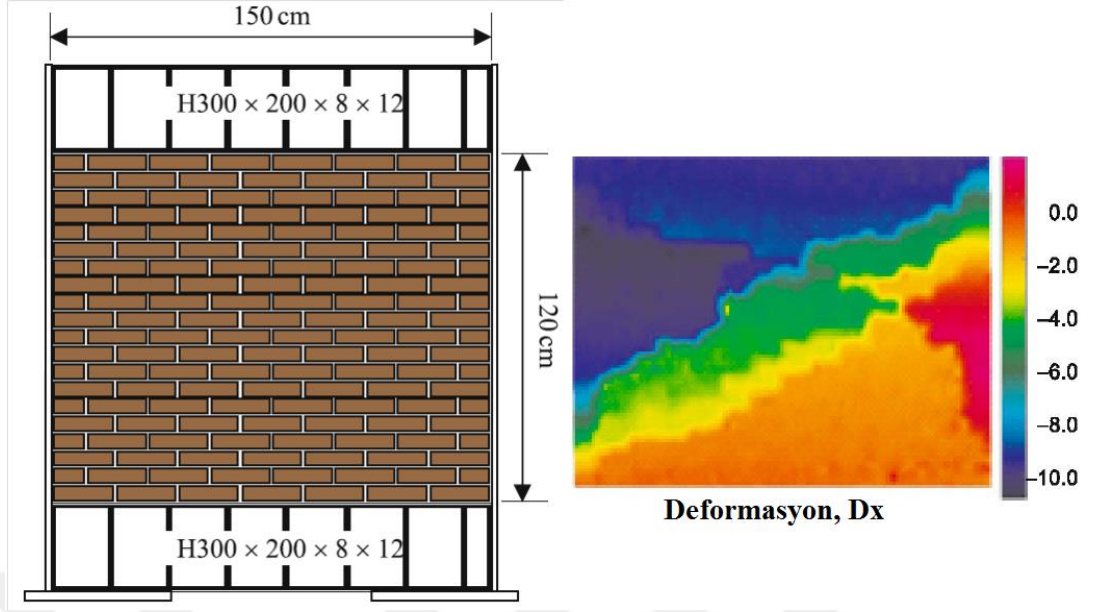
#### **2.1 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Gelişimi**

Dijital görüntü korelasyonu yöntemi 80’li yıllarda 2 boyutlu (yüzeysel – in plane) yer değiştirme ve birim deformasyonların dijital görüntülerden hesaplanması amacıyla geliştirilmeye başlanmıştır. Bu konuda ilk çalışanlar, Yamaguchi (1981); Peters ve Ranson (1982) ve Güney Carolina Üniversitesi’nden Sutton ve diğer. (1983)’dir. Aslında dijital görüntü korelasyonu yönteminin çıkışında, akışkanların akma davranışlarının incelenmesinde kullanılan tanecik hızı görüntüleme (digital particle image velocimetry – PDIV) tekniklerinden esinlenilmiştir (Hild ve diğer., 2002; Hild ve Roux, 2006).

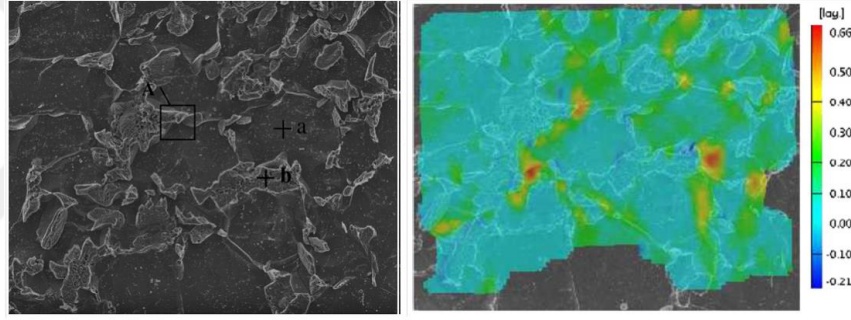
Gelişen bilgisayar teknolojisi ile çok sayıda ve yüksek çözünürlükteki görüntünün analizi mümkün olmakta, bu nedenle katılardaki göreceli olarak çok daha az olan deformasyon miktarı da dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile belirlenebilmektedir (Roux, Rethore ve Hild, 2009). Özellikle katı cisim mekaniğinde 2 boyutlu şekil

değiştirme problemlerinin çözümü için gerekli parametrelerin tespitinde kullanılmıştır. 2 rijit cisim yer değiştirme ( $u$ ,  $v$ ) ve 4 uzaysal yer değiştirme gradyanı ( $u_x$ ,  $u_y$ ,  $V_x$ ,  $V_y$ ) olmak üzere 6 bilinmeyen, çeşitli görüntü korelasyonu yöntemleriyle tespit edilebilmektedir.

Araştırmacılar metaller, plastikler, ahşap, sünger, seramik ve kâğıt gibi malzemelerin çekme yükü altında deformasyon davranışını incelemek için 2D-DIC ile çalışmalar yapmıştır (Sutton, Orteu ve Schreier, 2009). İncelencek örneğin fiziksel boyutları metrelerce olabileceği gibi (çerçeve dolgu duvar, taş duvar) (Şekil 2.1), mikron mertebesinde de olabilir (taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları) (Şekil 2.2) (Hild ve Roux, 2006). Şekil 2.1’de taş duvarın depreme dayanıklılığını ölçmek için tekrarlı yükleme deneyi yapılmıştır (Tung, Shih ve Sung, 2008). Şekil 2.2’de ise yerinde çekme deneyi yapılan numuneden alınmış SEM görüntüleri DIC ile analiz edilmiştir (Kang, Ososkov, Embury ve Wilkinson, 2007). Çok yüksek deformasyonlarda ve dönme değerlerinde hassasiyet azalmakta ve hata bir miktar artmaktadır. Abanto-Bueno ve Lambros (2002)’ye göre %20 birim deformasyona ve  $10^\circ$  dönmeye kadar hata ihmal edilebilir seviyelerdedir. Ayrıca 1990’ların sonlarından itibaren kompozit ve beton üzerinde meydana gelen hasar oluşumlarını (çatlak) incelemek için de 2D-DIC uygulanmıştır. Son yıllarda, 2D-DIC ile ilgili çalışmalarda dünya çapında bir artış vardır (Sutton, Orteu ve Schreier, 2009). 2D-DIC yönteminin kullanılmaya başlanmasından itibaren, donanım (kamera, bilgisayar, ışık kaynağı vb.) ve yazılımlarda sürekli modifikasyon ve iyileştirmeler yaşanmıştır. 2D-DIC yöntemi düzlemsel deformasyona sahip malzemelerin mekanik tepkisini karakterize etmek için önemli bir yöntem olmaya devam etmektedir (Sutton, Yan, Tiwari, Schreier ve Orteu, 2008).

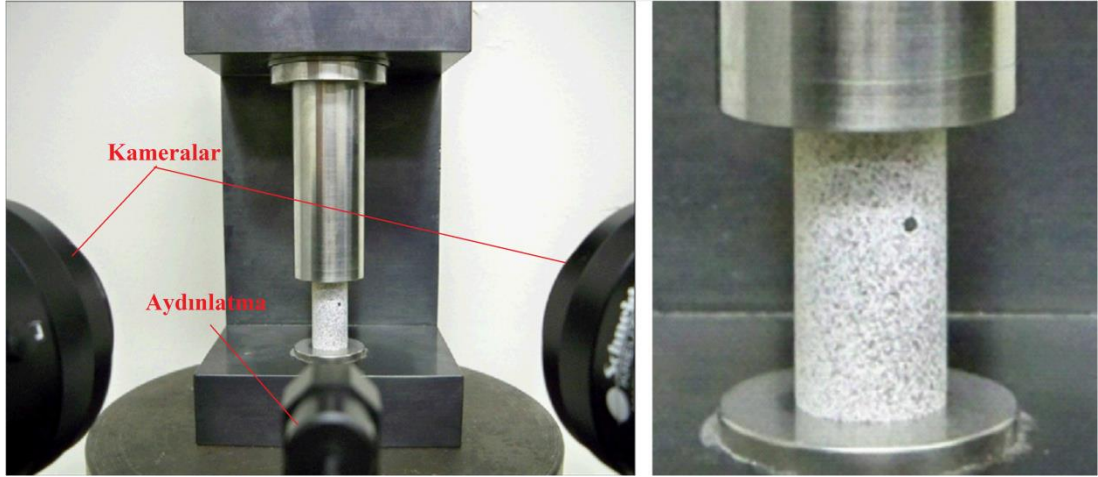


Şekil 2.1 DIC yöntemi ile deplasman analizi yapılan taş duvar örneği (Tung, Shih ve Sung, 2008)



Şekil 2.2 DIC analizi yapılan SEM görüntüsü örneği (Kang, Ososkov, Embury ve Wilkinson, 2007)

Katı cisim yüzeyinde yükleme altında meydana gelen yer değiştirme vektörleri ve deformasyon alanları dijital görüntü korelasyonu yöntemiyle pratik bir şekilde tespit edilebilir. 1999’da dijital görüntü korelasyonunun 3 boyutlu versiyonu da çift kamera kullanılarak geliştirilmiştir (Bay, Smith, Fyhrie ve Saad, 1999). Bu yöntemle üçüncü boyuttaki şekil değişimlerinin de ölçülmesi mümkündür. Yapı güvenliğinin takibine yönelik belirli periyotlarla kameralar yardımıyla alınan görüntüler 3D-DIC yöntemi ile işlenerek, olası aktif deformasyonlar henüz küçük mertebelerde iken fark edilebilir (Chen, Jin ve Meng, 2007). Aynı zamanda 3D-DIC numune yüzeyinin düz olma zorunluluğunu da ortadan kaldırmıştır. Silindirik örnekler de 3D-DIC ile incelenebilmektedir (Heinz ve Wiggins, 2010) (Şekil 2.3).

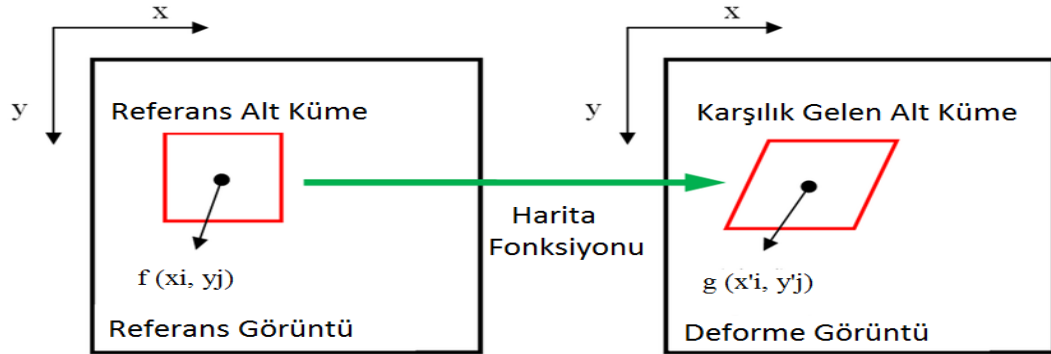


Şekil 2.3 Beneklendirilmiş silindir numunenin 3D-DIC ile incelenmesi (Heinz ve Wiggins, 2010)

## 2.2 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Temel Prensipleri

DIC yönteminde hedef görüntüdeki bir noktayı tanımlamak için pikseller kullanılır (Şekil 2.4) (Liang, Yin, Liu, Mo ve Wang, 2015; Liu ve diğer., 2015; Gu, 2015). DIC yönteminin kullanılabilmesi için mekanik deney öncesinde numune yüzeyi beneklendirilmelidir. DIC yönteminde deformasyona uğrayan numunenin iki adet beneklenmiş görüntüsünün deforme olmamış (referans görüntü) ve deforme olmuş (test durumu) halleri kaydedilip, rastgele gri seviyesi yoğunluk dağılımları kullanılarak analiz edilmektedir (Pan, Xie, Wang, Qian ve Wang, 2008; Pierré, Passieux, Périé, Bugarin ve Robert, 2016). Referans görüntüsü (deforme olmamış örneğin deney başlangıcındaki ilk görüntüsü) üzerinde analiz yapılacak bölge alansal olarak seçilerek alt küme denilen uygun boyutlarda kare pencerelere bölünür. Seçilen her bir referans alt küme görüntüsü deforme olmuş görüntüdeki olası tüm alt kümelerle çapraz korelasyonlanmaktadır (Liu ve diğer., 2015; Gu, 2015; Mudassar ve Butt, 2015; Su, Zhang, Xu ve Gao, 2016). Referans görüntüsünde test edilen ilgili bölgedeki (Region of Interest-ROI) fiziksel noktaların çevresi  $N \times N$  piksellerinde kare alt küme olarak seçilir ve deforme olmuş görüntüde hesaplanmış korelasyon katsayısının maksimum değerini hedefleyerek ilgili konumlarını bulmak için kullanılır (Gu, 2015). Şekil 2.4'te  $f(x_i, y_j)$  referans görüntüdeki  $(x_i, y_j)$  konumundaki bir pikselin gri skala değeri ve  $g(x'_i, y'_j)$  ise deforme görüntünün  $(x'_i, y'_j)$  konumundaki gri skala değeridir. Yaygın olarak alt-küme şekil fonksiyonları olarak adlandırılan

$(x_i, y_j)$ 'den  $(x'_i, y'_j)$ 'ye kadar haritalama fonksiyonları, alt kümenin yer değiştirmesini ve bozulmasını açıklamaktadır.

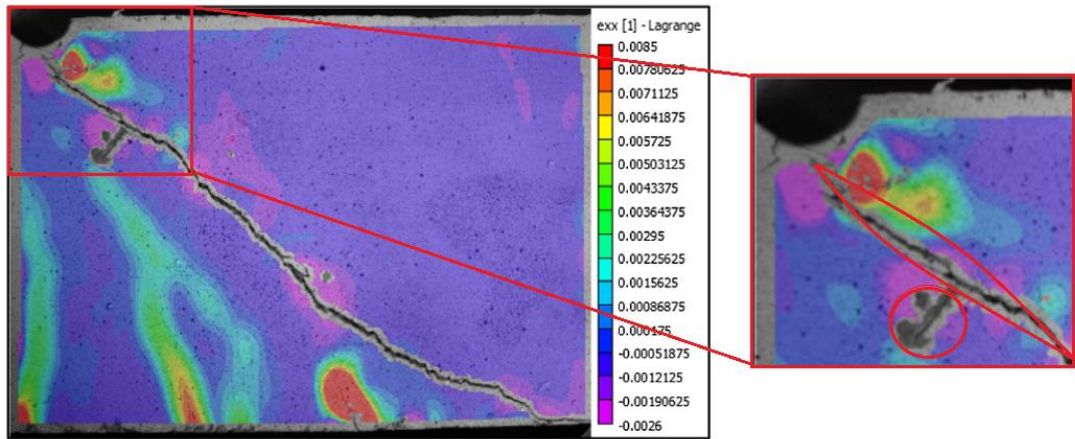


Şekil 2.4 DIC'nin temel prensibi; referans görüntüdeki referans alt küme ve deforme görüntüdeki hedef alt küme (Gonzáles, Rodrigues, Meggiolaro ve Freire, 2016)

DIC yönteminde deney süresince örneklerin yüzey görüntülerini kaydetmek ve dijital formda depolamak amacıyla video kameralar ya da fotoğraf makineleri kullanılır. Bu yöntemde çizgiler, noktalar ve rastgele diziler dâhil birçok desen yardımıyla tüm yüzey alanındaki deformasyonu ve/veya hareket ölçümlerini elde etmek için görüntü analizi gerçekleştirilmektedir. DIC yöntemi deformasyonu ölçerken görüntü yüzeydeki değişimler ile de paralel sonuçlar sunar (Aparna, Chaitanya, Sriniva ve Rao, 2015). Son yıllarda, 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 faktörden etkilenmektedir. Bu kriterlerin analiz sonuçlarına etkileri birçok araştırmacı tarafından yapılan farklı çalışmalarla incelenmiş ve optimize edilmeye çalışılmıştır (Liang ve diğer., 2015). 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 (Ramos ve diğer., 2015).

DIC yönteminin avantajlarının yanı sıra bir takım dezavantajları da mevcuttur. İlk olarak; hasar gören alanlardaki (çatlaklar) alt kümeler tanımlanırken, piksellerin gri renk kodları yazılım tarafından eşit olarak algılanmaktadır. Hasarlı alanların yakınındaki pikseller üzerinde hesaplama yapılırken analiz sonuçları bu durumdan etkilenmektedir (Liang ve diğer., 2015). 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 (Sutton ve diğer., 2009) (Şekil 2.5). Ancak alt küme boyutu ve adım aralığı parametreleri değiştirilerek geniş çatlaklar etrafındaki yer değiştirmeleri de ölçmek mümkündür. Bununla birlikte, ışık kontrolünün sağlanamadığı durumlarda hata oranı kontrast düşüşünden dolayı artmaktadır. Zemin titreşimleri gibi dış etkenlerin bulunması da ölçülen verilerin sağlıklı elde edilebilmesini olumsuz yönde etkileyebilir. Kameranın hareket etmesinden dolayı kamera başlangıç kalibrasyon parametrelerinin yeniden kurulmasını gerektirebilir (Ramos ve diğer., 2015). DIC analiz sonuçlarını etkileyecek bu parametrelerin incelenmesi ve uygulamaya bağlı olarak optimize edilmesi şarttır.

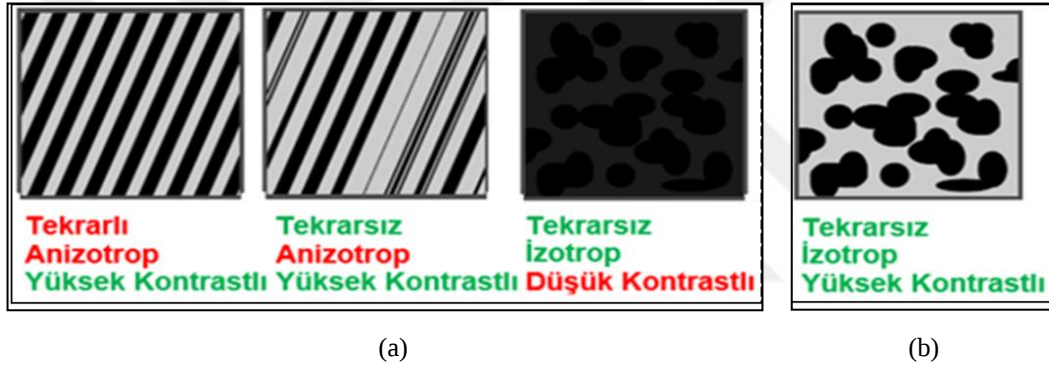


Şekil 2.5 Çatlaklardan dolayı yer değiştirmeleri korelasyon ile hesaplanamayan bazı bölgeler (Gali ve Subramaniam, 2017)

## 2.3 Dijital Görüntü Korelasyonu Yönteminin Parametreleri

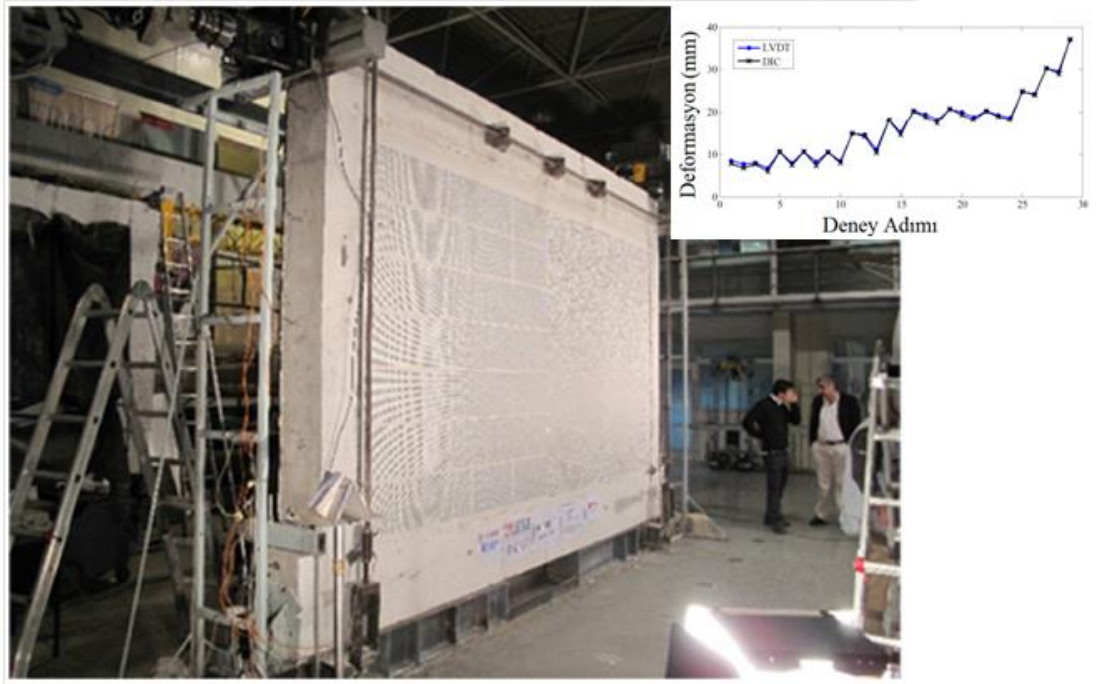
### 2.3.1 Numune Hazırlanması ve Benekleme

DIC ile incelenecek numunenin doğal bir rastgele dağılmış yüzey dokusu yoksa malzeme yüzeyine yapay rastgele benekleme uygulanmalıdır. Benekler, farklı bir arka plan renginde belirli bir rengin ayırt edilebilir özellikleri olarak tanımlanır. Buradaki amaç, oluşturulan her bir alt kümenin benzersiz desene sahip olmasını sağlamaktır (Mehdikhani ve diğer., 2016; Xu, 2014). Numune yüzeyi tekrarsız, izotrop ve yüksek kontrastlı olduğunda, benzersiz alt kümelerin oluşma ihtimali artarak gerçeğe daha yakın analiz sonuçlarının alınması sağlanmaktadır (Şekil 2.6) (Correlated Solutions, 2009; Xu, 2014).

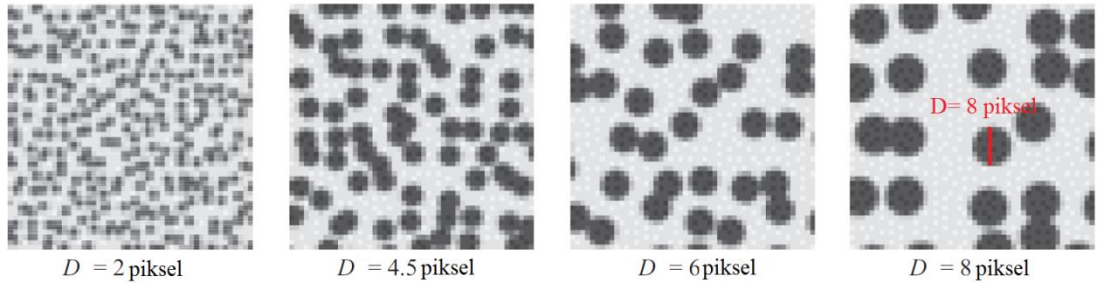


Şekil 2.6 a) DIC yöntemi için uygun olmayan desen türleri, b) ideal benekleme (Correlated Solutions, 2009)

Ramos ve diğer., (2015)'in yaptığı bir çalışmada, taş duvar yüzeyine beyaz mürekkep tabaka uygulandıktan sonra poli-vinil klorür (PVC) şablon (stampa) kullanılarak bağımsız noktalarla benekleme yapılmıştır. Yapılan analiz sonrasında DIC ve deformasyon ölçerler arasında iyi bir korelasyon elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada DIC'nin pratik ve güvenilir bir yöntem olduğu doğrulanmıştır (Şekil 27). Ayrıca, analiz edilecek görüntüde benek başına düşen piksel sayısının 3-8 arasında olması önerilmektedir (Correlated Solution, 2016a; Zhou ve Goodson, 2001; Hua ve diğer., 2011) (Şekil 2.8).

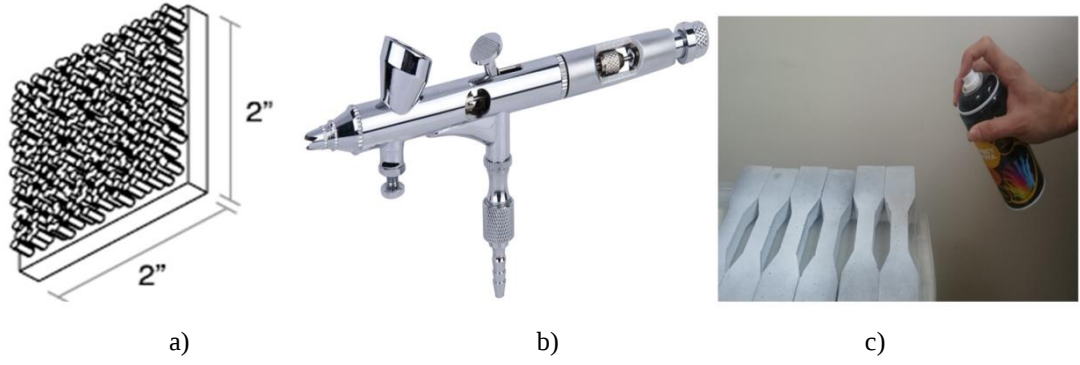


Şekil 2.7 Yüzeyi beneklendirilmiş taş duvar ve DIC analiz sonucu (Ramos ve diğer., 2015)



Şekil 2.8 Rastgele benekleme (Mazzoleni, Matta, Zappa, Sutton ve Cigada, 2015)

En iyi ve en yaygın desen uygulaması yüksek derecede rastgelelik içeren desenleme yöntemleridir. Rastgele bir desenin oluşturulmasında boya tabancası (airbrush), sprej ile püskürtme, damgalama (stampa) gibi yöntemler kullanılabilir (Şekil 2.9) (Bomarito, Hochhalter ve Cannon, 2016). Benek tabanlı desen kalite ölçümlerini tanımlamanın diğer bir yaygın yöntemi, desen içindeki beneklerin özelliklerine dayanır. Genellikle bu ölçümler beneklerin boyut dağılımına, şekline ve boşluk miktarına bağlı olarak değişiklik gösterir. Bu tür kalite ölçümleri, bir model geliştirmek için sprej-boyama veya boya tabancası gibi bir teknik kullanırken geçerlidir ve modelin kalitesini değerlendirmeye olanak sağlar (Bomarito, Hochhalter, Ruggles ve Cannon, 2017).



Şekil 2.9 Rastgele benekleme yöntemleri a) stampa, b) airbrush (boya tabancası), c) spreyle benekleme

Rastgele yapılan beneklemenin pek çok açıdan avantajı vardır. Bunlardan biri numune büyük deformasyonlar gösterirken korelasyonun takip edilebilmesidir (Khoo, Karuppanan ve Tan, 2016). Alternatif bir yaklaşım ise optimum boyutlu kümelerin değil, küçük alt kümelerin kullanılması ve küme içerisindeki bilgilerin optimize edilmesidir (Wu, Kong, Li ve Zhang, 2016). Benekleme üzerine literatürde bulunan öneriler görünüşte rastgelelik içeren beneklemeyi tavsiye etmekte ve numune için tasarlanmış özel bir beneklemeyi tercih etmemektedir. Bunların sonucu olarak deneysel çalışmalarda elde edilen hiçbir yaklaşım benekleme deseni ile ilgili genel bir fonksiyon sunmamaktadır (Bomarito ve diğer., 2016). Numuneler üzerindeki beneklemeleri sayısallaştırmak için daha fazla araştırma yapılmalıdır, bu sayede benekleme türü ve boyutu deneysel çalışmalar ile kontrol edilip optimize edilebilir (Lecompte ve diğer., 2006).

### 2.3.2 Görüntü Alımı

Yüzey deformasyonlarının ölçümünde düzeneğin hazırlanmasına oldukça özen gösterilmelidir. Özellikle ışık ve kameranın durumları ile konumları konusunda gerekli özenin gösterilmesi, elde edilecek görüntülerin analizinde daha sağlıklı veriler alınmasını sağlayacaktır. 2D-DIC kullanımı sırasında beneklenmiş görüntülerin sağlıklı elde edilebilmesi için de bazı gereklilikler bulunmaktadır. Bu gereklilikler;

- a) Numune yüzeyi düz olmalı,

- b) Düzlem dışı deformasyonlar ihmal edilecek kadar küçük olmalı,
- c) Kamera ve numune yüzeyi birbirlerine paralel olmalı

şeklinde sıralanabilir (Şekil 2.10) (Liang ve diğer., 2015; Liu ve diğer., 2015)



Şekil 2.10 Beneklenmiş görüntü elde etmek için tipik DIC sistemi (Liu ve diğer., 2015)

Numune kameranın optik aksları hizasında olmalıdır. Sonrasında tüm gerilme uygulaması boyunca belirli zaman aralıklarında seri çekimler yapılmalı, görüntü alımında eksiklik olmamasına dikkat edilmelidir. Ölçüm doğruluğu deney sırasında çekilen görüntülerin kalitesine bağlıdır ve görüntülerde geometrik bozulma olmamalıdır (Hedeyat ve Ashur, 2015). Bunun nedeni çözünürlüğün piksellerden meydana gelmesi ve piksel miktarı değişiminin numune yüzeyinde temsil edilebilecek alanı etkilemesidir (Khoo ve diğer., 2016). DIC'nin çalışma prensibinde de değinildiği gibi görüntüdeki her piksel görüntüsü 0 (siyah) ve 1 (beyaz) arasında olduğu varsayılan bir gri tonlama (yoğunluk) değerine sahiptir. Görüntü kalitesi ve gri renk değeri görüntünün bit derinliğinden etkilenmektedir (Bomarito ve diğer., 2016).

### 2.3.2.1 Fotoğraf Makinesi ve Kamera

Fotoğraf makinası üç boyutlu bir sahneyi iki boyutlu bir düzleme indirgeyen, optik prensiplerle çalışan bir alettir; analog veya dijital (sayısal) olabilir. Fotoğraf, belgelenmek istenen objeden yansıyan ışığın duyarlı yüzey üstüne düşmesi ve duyar

katmanı üstünde sabitlenmesi işidir. Fotoğraf makinesinde, belgelenmek istenen objeden yansıyan ışık; objektife ulaşır ve odaklanır, sonra, hemen objektifin içinde bulunan ve adına diyafram denen diske ulaşır. Bu diskin aracılığıyla gelen ışığın şiddeti ayarlanabilmektedir. Diyafram diskinin ortasında bulunan dairesel açıklığı ayarlanabilen bir delik sayesinde ışık şiddeti kullanıcı tarafından ayarlanmaktadır. Objektifte toplanan ve odaklanan ışık diyaframdan geçerek örtücüye ulaşır. Örtücü perde çekim sırasında önceden seçilen bir süre boyunca açık kalarak, ışığın sensör üzerine düşmesini sağlar.

DIC yönteminin doğruluğunu etkileyen bir diğer parametre de kamera özellikleridir. Dijital kamera sensörü, ışığı elektronlara dönüştürür. Elektronlar daha sonra analogdan dijitale (A/D) dönüştürücü kullanarak sayılır ve bit olarak ifade edilen bir çözünürlüğe sahip olur. Tüm dijital kameralar belirli sayıda çözünürlük bitlerine sahiptir. En yaygın olarak kullanılanlar, 8, 12 ve 14 bit'lik olanlarıdır. Bu tür kameralar, analog elektrik sinyalinin 256 sayımla (8 bit), 4096 sayımla (12 bit) veya 16384 sayımla (14 bit) belirli bir çözünürlükte dijital bir sinyal haline dönüştürebilmektedir (Reu, 2014).

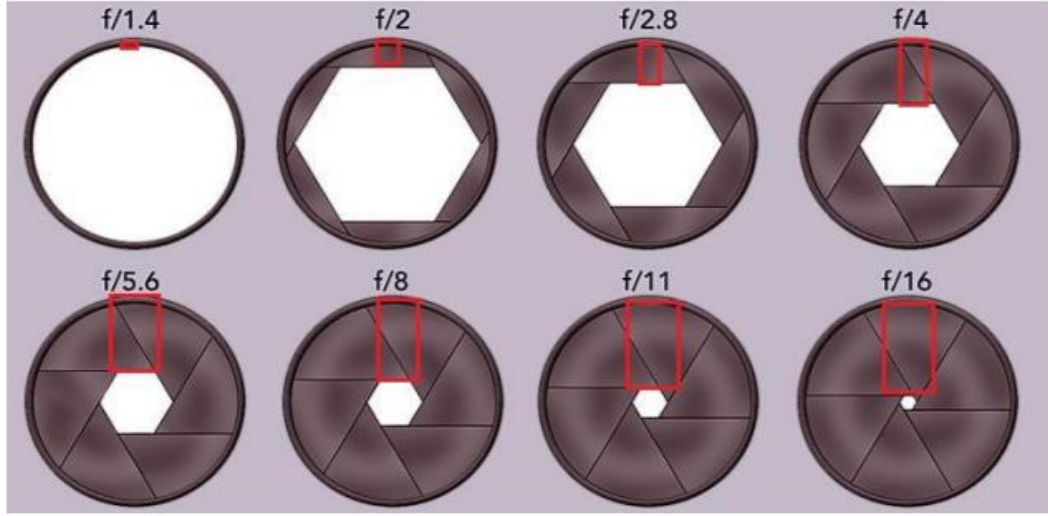
DIC yönteminde görüntüleri elde etmek için kullanılan fotoğraf makinesinin bazı özelliklerine dikkat edilmelidir. Lens, çözünürlük ve sensör başlıca önemli özelliklerdendir. Özellikle sensörler fotoğraf kalitesini etkilemektedir. En yaygın olan sensör türleri CCD (Charged Coupled Device) çift geçirgenli aygıt ve CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) tamamlayıcı yarı-iletken metal oksittir (Magnan, 2003; Blanc, 2001). 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 noktacılarından oluşur. Son derece minyatür görüntüleme sistemlerine dayalı CMOS görüntü sensörü teknolojisi düşük maliyetli görsel tasarım ve multimedya uygulamalı CCD'ye rakip olarak ortaya çıkmıştır (Litwiller, 2001). Yüksek hızlı olayları yakalamak için yeterli miktarda görüntü karesi sağlayabilecek CMOS kamera kullanılmalıdır (Fossum, 1997). CMOS sensörlerin ışığa karşı duyarlılıkları CCD sensörler kadar iyi değildir (Litwiller, 2001). CMOS kameralar da belirli seviyede kaliteli görüntü vermektedir

ancak CCD kameralara kıyasla kalitesi düşüktür bu yüzden yüksek hassasiyetli ölçümlerde CCD kamera kullanılması önerilmektedir (Hain, Kähler ve Tropea, 2007). CCD fotoğraf makinesindeki görüntü kalitesi mevcut ışık yoğunluğuna bağlıdır (Krstulović-Opara, 2015). DIC yönteminde gürültü oranı düşük sinyale (signal to ratio-SNR) sahip fotoğraf makinaları kullanıldığında yer değiştirme ölçüm hataları en aza iner. CCD fotoğraf makinesinin CMOS fotoğraf makinesine göre daha iyi SNR'ye sahip olduğu belirtilmektedir (Gao, Yao, Xia ve Li, 2015).

Fotoğraf özelliklerini etkileyen hususlardan biri de net alan derinliğidir. Net alan derinliği, üzerinde odaklama yapılan cismin önünde ve arkasında oluşan netlik sahasıdır. Optik kuralları gereği, fotoğrafın en net kısmı netlemi yapılan düzlemdir. Bu düzlemde size doğru yaklaştıkça ve sizden uzaklaştıkça netlik de azalır. Fotoğrafta "net" olarak algılanan bölüme net alan derinliği denir. Net alan derinliği birden fazla faktöre bağlıdır. Bunlar (çekilen fotoğraf hep aynı kadrada olduğu varsayıldığında);

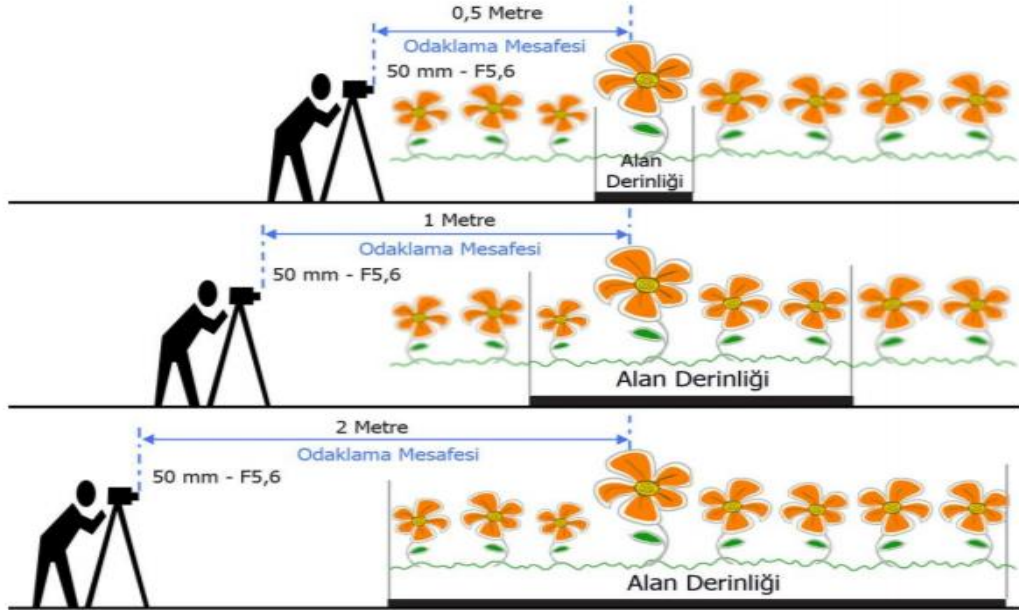
- a) Objektifin diyafram açıklığı (ne kadar açık o kadar az net alan derinliği)
- b) Netlenen cismin uzaklığı (ne kadar yakın o kadar az net alan derinliği)
- c) Kullanılan objektifin odak uzaklığı (ne kadar yüksek o kadar az net alan derinliği)
- d) Kullanılan makinenin sensör boyutu (ne kadar büyük o kadar az net alan derinliği)

**a)** Nesneden yansıyan ışınların ne kadar yoğunlukta ve şiddette aynanın üzerine geleceğini kontrol eden sisteme diyafram denir. Diyafram f değeri ile ifade edilir. f 1.0 – f 1.2 – ... – f16 gibi değerler alır. Bu değerler Şekil 2.11'de gösterilmiştir. Her değer artışında makineye giren ışık miktarı bir önceki miktarın yarısına iner. Yani sayı büyüdükçe diyafram açıklığı azalır. Aşağıdaki resimde de görüldüğü gibi düşük f değerlerinde diyafram bıçaklarının açıklığından dolayı içeri daha fazla ışık girmektedir (Aktaş ve Aslanova, 2015).



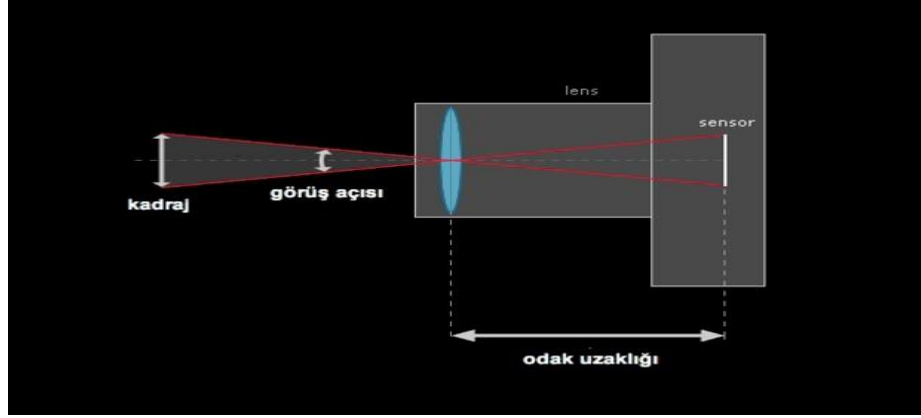
Şekil 2.11 Diyafram Açıklık Değerleri (Aktaş ve Aslanova, 2015)

b) Netlenen cisim uzaklığı; kamera cisme yaklaştıkça daha kısa net alan derinliği, kamera uzaklaştıkça daha uzun net alan derinliği elde edilmektedir (Şekil 2.12).



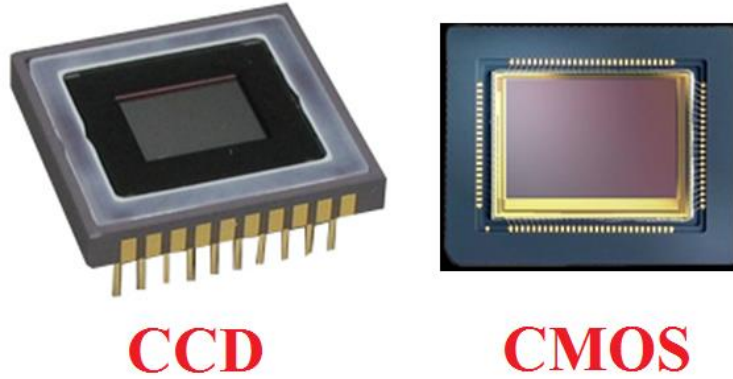
Şekil 2.12 Netlenen cismin uzaklığı

c) Objektife gelen ışık belirli bir noktada toplanır ve bu noktayla sensör arasındaki uzaklığa odak uzaklığı adı verilir. Üretilen lensler odak uzaklığına göre adlandırılır ve milimetre cinsinden ifade edilir. Aynı odak uzunluğunda numuneye yaklaştıkça alan derinliği azalır ve çekim yapmak çok zor hale gelir, uzaklaştıkça da tam tersi alan derinliği artar (Şekil 2.13).



Şekil 2.13 Objektifin odak uzaklığı

**d)** Sensörler, fotoğraf kalitesini etkilediğinden önemlidir. SLR (Single-lens reflex), objektifi değiştirilebilen filmlı makinelere ve DSLR (Digital single-lens reflex), yine objektifi değiştirilebilen dijital makinelere verilen isimdir. SLR fotoğraf makinelerindeki sensörler fiziksel olarak kompakt makinelere nazaran çok daha büyüktür. Sensörün büyük olması doğal olarak fotoğraf makinesinin de büyümesi anlamına gelir. Sensör çeşitleri Şekil 2.14’de gösterilmiştir.



Şekil 2.14 CCD ve CMOS sensörler

### 2.3.2.2 Işık

Fotoğrafı etkileyen bir diğer önemli öge ışıktır. Işık atomik titreşimlerden türeyen, kaynağından çıktıktan sonra çeşitli yönlerde doğru yayılan, aynı zamanda insan gözünü etkileyen bir çeşit “enerji” dir. Çeşitli araçlarla elektrik enerjisine veya mekanik enerjiye dönüşebilir. Işığın geliş yönü, numunenin aydınlatılmasında çok önemlidir. Yapay ışık kaynağı numune yüzeyinde farklı konum ve yönlerde farklı aydınlatma durumları ortaya çıkartmaktadır (Kanburoğlu, 2004).

Aydınlatma, kaliteli DIC ölçümleri oluşturmak için önemli bir bileşendir. Ölçüm kalitesi doğrudan görüntü kalitesi ile ilgilidir. Kaliteli bir görüntünün eldesi, mekanik deneyler esnasında numune yüzeyinin tüm alanını kapsayan üniform ve uygun bir aydınlatmanın kullanılması ile mümkün olmaktadır (Haddadi ve Belhabib, 2008). Bunun için en ideal ışıklandırma yanal ışıklandırmadır. Yanal ışıklandırma doku ve formu belirginleştirmek için genellikle 45 derecelik açı ile numune üzerine her iki taraftan yansıtılan ışıklandırma yöntemidir.

Uygun bir ışıklandırma ve benekleme yapılmasının ortak amacı, dijital görüntüde yüksek kontrastlı düşük gürültülü (noise) benek deseni oluşturmaktır. Işığın mükemmel bir görüntü yaratmada benek deseni kadar önemli olduğu bilinmelidir (Ramos vd., 2015). Deney sırasında kontrast için beyaz ve siyah bölgeler arasındaki görüntünün sayımlarını gözlemleyerek genel bir yorum yapılabilir. Görüntü histogramı, görüntüde bulunan bu sayımların aralığını göstererek kontrastın uygunluğunun bir göstergesi olacaktır (Reu, 2014).

### ***2.3.3 Alt Küme ve Analiz Adım Aralığı Boyutu***

DIC yönteminde elde edilen görüntülerin işlenmesi sırasında analiz sonucunu etkileyen parametrelerin başında alt küme boyutu ve analiz adım aralığı gelmektedir. Alt kümenin temel rolü benekleme desenine bağlı olarak iki bölge arasındaki benzerliği karakterize etmektir. Alt küme seçimi analizin doğruluğu ve süresi açısından önemlidir. Tek bir nokta yerine bir alt kümeyi seçmenin nedeni, kare bir alt kümenin, gri seviyesi değerinin tek bir noktayla karşılaştırıldığında daha tanımlanabilir olmasıdır (Hedayat ve Ashur, 2015). Analiz 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 (Haddadi ve Belhabib, 2008; Cooreman, Lecompte, Sol, Vantomme ve Debruyne, 2008). DIC analizinde, alt küme boyutu yerel referansın ve hedef alt kümelerinin boyutlarını belirtir. Aralarında lokal benzerlik aranır. Alt kümeler yeterli sayıda benzersiz ve tanımlanabilir özelliklere sahip olduğunda, doğru ve güvenilir bir yer değiştirme sonucu elde edilmektedir (Mashiwa, Furushima ve Manabe, 2017).

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 gerektirmektedir. Lokal farklılıkları gözlemlemekte avantajlı değildir. Çok küçük alt küme boyutu ise yetersiz sayıda özellik içerir ve görüntü içerisinde diğer alt kümelerden ayırt ederken zorlanmalar başlar. Bu nedenle küçük alt küme boyutu güvenilir bir korelasyon sağlamayabilir (Khoo ve diğer., 2016). Belirli bir boyuttan sonra alt küme boyutunun artması ölçüm kalitesinin somut bir şekilde gelişeceği anlamına gelmez (Haddadi ve Belhabib, 2008). Bu durumda, referans resimle en iyi eşleşmeyi sağlayacak alt küme boyutu seçiminin yapılan benekleme ile doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Alt küme boyutuna bağlı olarak daha çok bilgi içeren alt kümelerin (büyük alt küme) rastgelelik hatasına daha az maruz kaldığı görülmüştür (Bomarito ve diğer., 2016). Son yıllarda yapılan çalışmalarda, analiz açısından ideal alt küme boyutu olarak 31x31 – 51x51 piksel kümeleri arasında önerilmektedir (Khoo ve diğer., 2016; Bomarito ve diğer., 2016; Zhang, Jin, Ma ve Meng, 2003).

Uygun bir analiz adım aralığı seçimi, sınırlı sayıdaki 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 (noise) duruma gelir. Bu nedenle amaçlanan uygulamaya yönelik olarak alt küme boyutunun yanı sıra analiz adım aralığı da optimize edilmelidir (Haddadi ve Belhabib, 2008). Yapılan bir çalışmada, deformasyon değişkenliğini azaltmak için, analiz adım aralığının en az 1 piksel ile başlanması ve analiz için seçilen alt küme boyutunun  $\frac{1}{2}$ 'sine eşit ya da küçük olması önerilir. Ayrıca, analiz adım aralığı boyutu ne kadar küçükse, deplasman veri noktalarının sayısının o kadar artacağı ve korelasyon hesaplama süresinin de bir o kadar uzun olacağı unutulmamalıdır (Cooreman ve diğer., 2008; Reu, 2012; Ke, Schreier, Sutton ve Wang, 2011).

### 2.3.4 Korelasyon Yöntemi

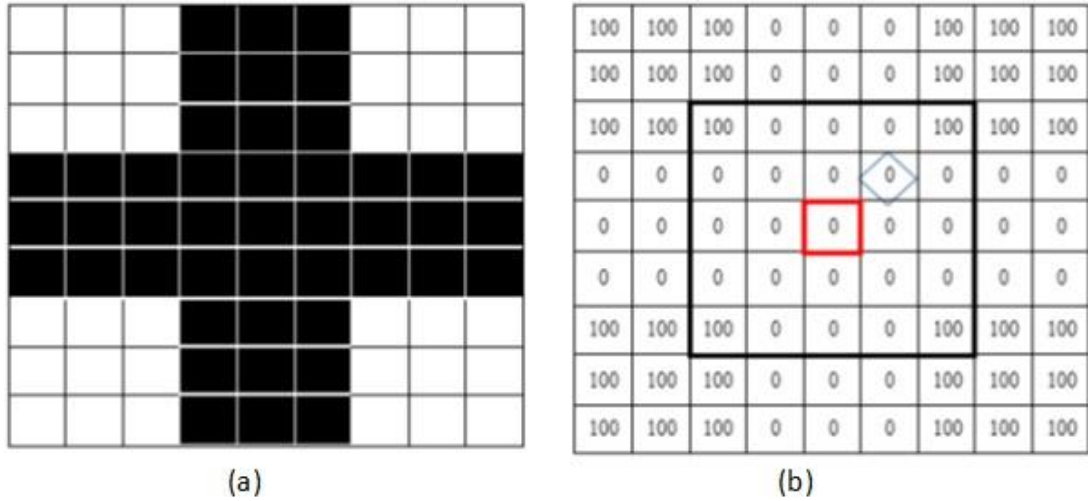
DIC’de deformasyon analizi için kullanılan çeşitli korelasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bu korelasyon yöntemleri referans ve deforme olmuş görüntü arasındaki benzerliklerin hesaplanmasında oldukça kritik bir öneme sahiptir. Araştırmacılar tarafından korelasyon kriteri için kare farklarının toplamı (sum of squared differences-SSD), normalleştirilmiş çapraz korelasyon (normalized cross-correlation-NCC) gibi çeşitli korelasyon hesaplamaları önerilmiştir (Liang ve diğer., 2015). Tablo 2.1’de korelasyon hesaplamalarında kullanılan SSD, 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 (Sutton ve diğer., 2009). SSD ve SAD yöntemi deforme olmuş alt kümedeki tüm değişikliklerden etkilenmektedir (Pan, 2011). Ayrıca, SSD aydınlatma değişikliklerinden etkilendiği için genellikle tavsiye edilmez (Correlated Solutions, 2016b). NSSD ve NCC yöntemi deforme olmuş alt küme yoğunluk değişikliklerinden etkilenmemektedir (Pan, 2011). NSSD yöntemi aydınlatmadan da etkilenmez ve genellikle en iyi sonuç kombinasyonunu sunar (Correlated Solutions, 2016b). ZNSSD yöntemi, deforme olmuş alt küme yoğunluk değişikliklerinden ve yer değiştirmelerden etkilenmez (Pan, 2011). Işık yoğunluğundan etkilenmeyen bu yöntem özel durumlarda gerekli olabilir. Ancak, NSSD seçeneğinde olduğu gibi daha fazla kombinasyonu bir araya getirmede (sonuç üretme) başarısız olabilir (Correlated Solutions, 2016b).

DIC farklı yoğunluktaki desenleri eşleme yöntemi (korelasyon) bir örnekle açıklanacaktır. Deformasyon öncesi deney numunesi üzerinde kamera ile elde edilmiş 9x9 piksellik görüntüde siyah (benek ifade eder) ve beyaz (benek olmadığını ifade eder) pikseller olduğunu düşünelim (Şekil 2.15). Beyaz piksellerin gri seviyesi 100 ve siyah pikselleri gri seviyesi 0’dır. Görüntü bir doğal tamsayılar matrisidir (Correlated Solutions, 2009; Aparna ve diğer., 2015).

Tablo 2.1 DIC yönteminde kullanılan temel korelasyon hesaplamaları (Sutton ve diğer., 2009)

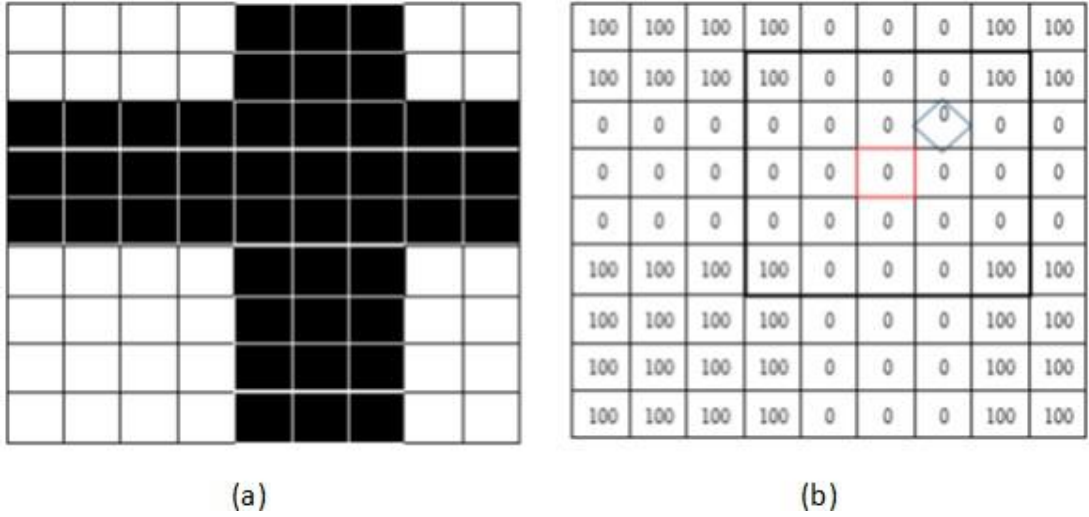
| Yöntem | Korelasyon hesaplama formülü                                                                                                                                               |
|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------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

\*Burada;  $F_i$ : taranan  $i$ 'ninci alt kümenin referans görüntüdeki gri renk skalası değerleri,  $G_i$ : taranan  $i$ 'ninci alt kümenin deforme görüntüdeki gri renk skalası değerleri,  $\bar{F} = \frac{\sum F}{n}$ ,  $\bar{G} = \frac{\sum G}{n}$ ,  $\bar{F}_i = F_i - \bar{F}$  ve  $\bar{G}_i = G_i - \bar{G}$  olarak tanımlanmaktadır (Sutton ve diğer., 2009).



Şekil 2.15 (a) Deformasyon öncesi ekran görüntüsü, (b) deformasyon öncesi bellek görüntüsü (Correlated Solutions, 2009; Aparna ve diğer., 2015)

Deney numunesini Şekil 2.16'da görüldüğü gibi birer basamak sağa ve yukarıya gittiğini varsayalım.



Şekil 2.16 (a) Deformasyon sonrası ekran görüntüsü, (b) deformasyon sonrası bellek görüntüsü (Correlated Solutions, 2009; Aparna ve diğer., 2015)

İki görüntüyü ilişkilendirmek için Şekil 2.15 ( $n_1$ , 1x1 matrisli alt küme) ve Şekil 2.16 ( $n_2$ , 1x1 matrisli alt küme) üzerindeki tüm piksel değerlerinin aynı olduğu 5x5 boyutlu matris alt kümeleri eşleştirilir. Korelasyon yöntemi olarak kare farklarının toplamı (Sum of Squared Differences-SSD) denklemi kullanılmış ve aşağıda gösterilmiştir (Formül 2.1).

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i,j=-\frac{n}{2}}^{\frac{n}{2}} (I(x + i, y + j) - I'(x + u + i, y + v + j))^2 \quad (2.1)$$

C: Korelasyon fonksiyonu,

x, y: referans görüntüdeki koordinat değerleri,

u, v: x ve y koordinatlarındaki yer değiştirmeler,

n: alt küme boyutu ( kullandığımız örnek için 5)

$n/2$ : bir tam sayı alınmalı

I ve I' deformasyon öncesi ve sonrası görüntü

$x+i, y+i$ : deformasyon öncesi görüntü piksel değerleri,

$x+i+u, y+i+v$ : deformasyon sonrası görüntü piksel değerleri,

Şekil 2.15 ve Şekil 2.16'dan alınan  $n_1$  ve  $n_2$  alt kümelerinin piksel değerlerine korelasyon uygulanmıştır. Korelasyon yöntemini uygulamak için  $x=5, y=5, u=1$  (x yönündeki yer değiştirmesi),  $v=1$  (y yönündeki yer değiştirmesi),  $n=5$  (alt küme boyutu),  $n/2$  değeri 2 (tam sayı değeri) alınmıştır.

Korelasyon fonksiyonuna bu verileri uygularsak;

$$\begin{aligned}
 C(5, 5, 1, 1) &= \sum_{i,j=(-2)}^{n/2} (I(5 + i, 5 + j) - I'(5 + u + i, 5 + v + j))^2 \\
 &= (100-100)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (100-100)^2 \\
 &\quad + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 \\
 &\quad + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 \\
 &\quad + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 \\
 &\quad + (100-100)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (0-0)^2 + (100-100)^2 \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

en küçük kareler farkı 0 olarak hesaplanmıştır. Bu korelasyon belirlenen alt kümedeki tüm benekler takip edilene kadar birçok kez uygulandıktan sonra sona erecektir. En iyi korelasyon en küçük kareler farkı ile ulaşılan minimum değerdir (Aparna ve diğer., 2015).

### 2.3.5 Yazılım ve Donanım

Piyasada dijital görüntü korelasyon yönteminin analizi için bir çok ticari markanın hem yazılım hem de donanım sistemleri ayrı ayrı veya paket olarak mevcuttur. Bunlar; GOM-ARAMIS, INSTRON-DIC Replay, LAVISION, TRILION, DANTEC DYNAMIC, Correlated Solutions VIC-2D, OPTECAL vb. yazılım ve donanım sistemleridir.

GOM; malzeme özelliklerine göre temassız ölçüm yapabilen, 2D-3D deformasyon ölçümü, gerilme testleri, yüksek sıcaklık ve yüksek hız ölçümleri, sonlu eleman simülasyon doğrulaması ve gerçek zamanlı ölçüm yapabilen çekme cihazı, ekstansometreler gibi mevcut cihazlarla entegre olabilen bir dijital görüntü analiz sistemidir. GOM Almanya merkezli GOM Correlate Software yazılım sistemidir (ARAMIS, 2004).

INSTRON-DIC Replay; iki boyutlu bir nesnenin yüzeyindeki tüm yüzey gerilmelerini ve yer değiştirmeleri, eksenel gerilmeyi ( $\epsilon_{yy}$ ), eksenel yer değiştirmeyi ( $dy$ ), enine gerilmeyi ( $\epsilon_{xx}$ ), deplasmanı, kesme gerilmesini, maksimum ve minimum

normal gerilme gibi parametreleri görselleştiren bir sistemdir. Otomatik veya sabit ölçekleme, veri noktalarının konumları için ekran kılavuz çizgileri, ham görüntüleri gizleme ve görüntüleme seçenekleri mevcuttur. Paket sistem başka cihazlara gerek kalmadan INSTRON donanımları aracılığıyla temassız ölçüm yapılabilmektedir. DIC Replay ABD merkezli INSTRON firmanın sistemidir (INSTRON, 2017).

LAVISION; Strain Master denilen dijital görüntü korelasyon yöntemini kullanan bir ürüne sahiptir. Strain Master; malzeme davranışını inceleyen, hızlı ve yüksek doğrulukta sonuçlar veren, temassız ölçüm yapabilen, bilgisayarda bulunan arayüz programıyla kolayca kullanılabilen bir sistemdir. Ham verileri sonradan işleyebilmeye elverişli, ekstensometreler kullanılarak birim şekil değiştirmeyi ölçebilen, yazılım paketiyle analiz ve veri kontrolü yapabilen, 2D ve 3D olarak kullanılabilen bir sistemdir. Malzemelerde çatlak büyüme analizi ve çatlak gelişim takibi yaparak çatlak uzunluğunu ve çatlak açıklığını rapor edebilmektedir. LAVISION bir Alman firmasıdır (LAVISION, BT).

TRILION; temassız ölçüm yapabilen, deney sonrasında analiz yapabilen, şekil, pozisyon, yer değiştirme ve birim şekil değiştirme bilgilerini veren bir sistemdir. ARAMIS yazılımını kullanmaktadır. Büyük sensörler sayesinde az pikselle iyi kalitede görüntü elde etmeyi sağlar. Yüksek çözünürlüklü kamera veya fotoğraf makinasına ve yüksek ışık hassasiyetine sahiptir. TRILION bir ABD firmasıdır (TRILION, 2013).

DANTEC DYNAMICS; temassız ölçüm yapabilen, eş zamanlı ve tüm yüzey alanı üzerinde korelasyon yapabilen, elde ettiği birim şekil değiştirme ve yer değiştirmeyi görüntü üzerinde anında veren bir görüntüleme sistemine sahiptir. ISTR4D arayüzü ile çalışır ve yüksek çözünürlüklü grafikleri elde eder. Grafikler ile görüntüyü aynı anda görüntüleyebilmektedir. DANTEC DYNAMICS bir Danimarka firmasıdır (DANTEC DYNAMICS, 2015).

CORRELATED SOLUTIONS VIC-2D; incelenecek numunenin tüm yüzey alanında, X ve Y koordinatlarında meydana gelen yer değiştirmeleri (deplasmanları)

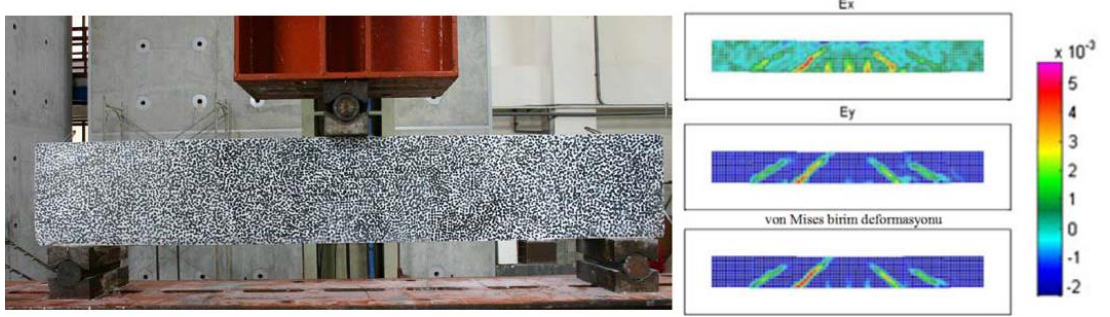
dijital görüntü korelasyonu yöntemiyle ölçerek, birim şekil değiştirme sensörü ve majör/minör şekil değiştirmelerin ( $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$ ) korelasyon ile elde edilmesini sağlayan, temassız ölçüm yapabilen, mekanik deneyle eş zamanlı çalışabilen, ham verileri sonradan işleme özelliği olan bir VIC-2D ve 3D yazılıma sahiptir. CORRELATED SOLUTIONS ABD merkezli yazılım programı firmasıdır (Correlated Solution, 2016a)

OPTECAL; Optecal Windows 7/8/10 x64 tabanlı işletim sistemleri ile uyumlu, genel dijital kameralar ile (Canon, Nikon, Sony DSRL vb.) elde edilen görüntüler üzerinde çalışılabilen, sıkıştırılmış ve bilimsel olarak kullanılan resim formatlarını (JPEG, TIFF, BMP vb.) analiz edebilen bir yazılımdır. İncelenecek numuneler üzerindeki benekleme boyutunu en az 4 piksel hassasiyetinde ölçebilmekte ve U, V,  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{xy}$ , Von Misses ve Tresca birim şekil değiştirme analizlerini yapabilmektedir. OPTECAL ABD merkezli bir yazılım programıdır (OPTECAL, 2015).

#### **2.4 DIC Metodunun Çoklu Çatlak Davranışı Gösteren Kompozitler Üzerinde Kullanımı**

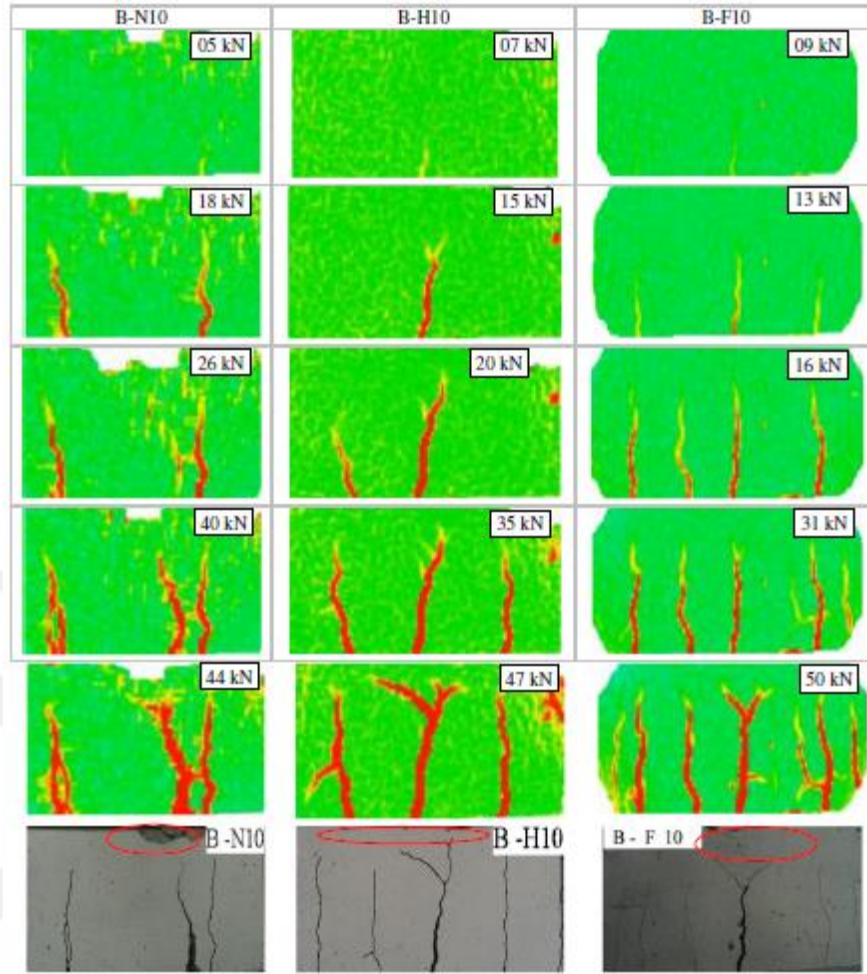
DIC yöntemi günümüzde çeşitli boyutlarda, geniş açıklıklı yükleme durumunda ve betonarme elemanlarda oluşan çatlakların izlenmesi için kullanılmaktadır (Shih ve Sung, 2013; Mahal, Blanksvärd, Täljsten ve Sas, 2015) (Şekil 2.17). Ayrıca, DIC başlangıç çatlaklarını (ilk çatlaklar) bulmada duyarlıdır ve bunun için deneyin durmasını gerektirmez (Mahal ve diğer., 2015). Böylece, oluşan çatlaklar mikron boyutlarında iken tespit edilerek, çatlak ilerlemesi hassas bir şekilde takip edilebilmektedir (Hild ve diğer., 2002; Roux ve Hild, 2009). 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. Karelaj 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 videosunu da oluşturmak mümkün olmaktadır (Besnard, Guérard, Roux ve Hild, 2011).



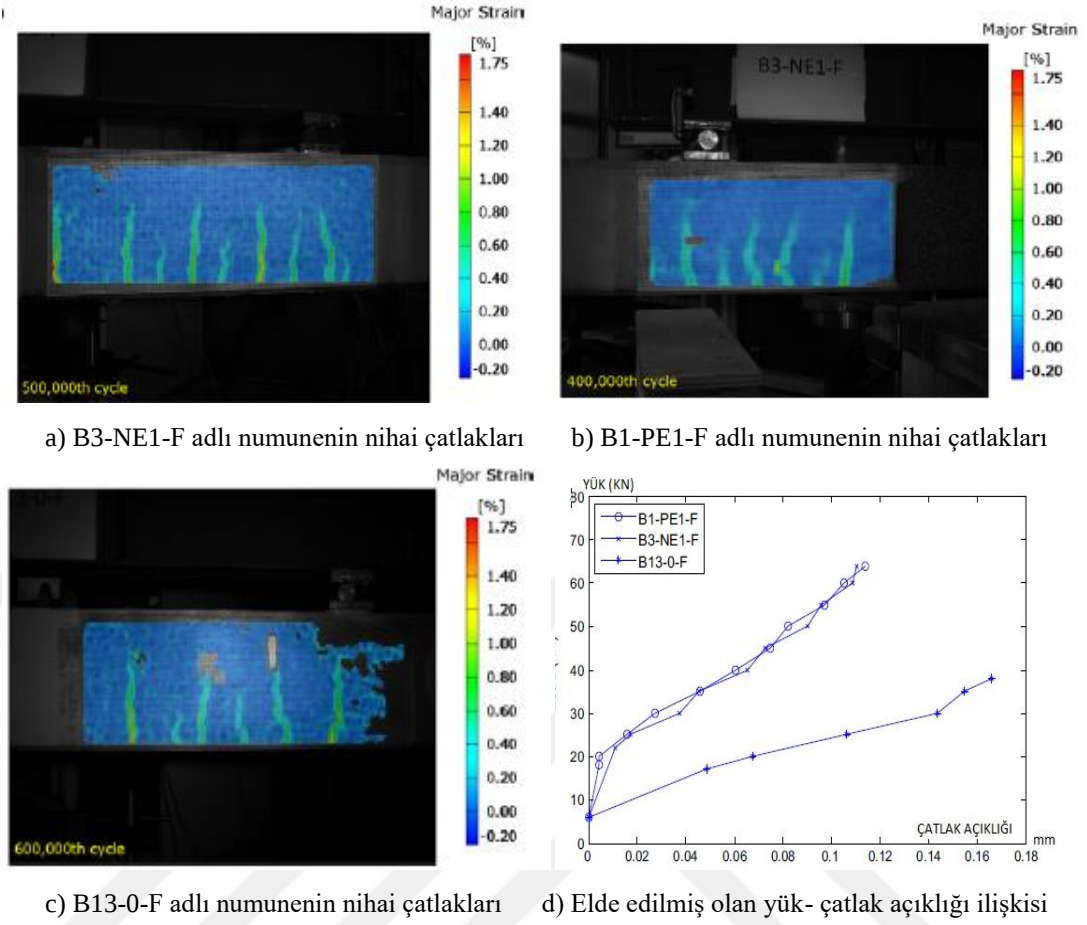
Şekil 2.17 Betonarme kiriş örnek üzerinde beneklendirme ile eğilme yüklemesi sonucu elde edilen  $\epsilon_x$ ,  $\epsilon_y$  ve Von Mises birim deformasyon alanları (Shih ve Sung, 2013)

Çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitler üzerinde, ilk çatlak sonrasında oluşacak olan her bir yeni çatlağın kesitteki konumunu belirlemede DIC yönteminden yararlanılabilir. Son yıllarda yapılan çeşitli çalışmalarda, çoklu çatlak davranışı gösteren çimentolu kompozitlerin çatlak analizlerinin yapılması ve incelenmesinde bu yöntemden faydalanılmıştır. Hamrat ve diğer. (2016) normal dayanımlı, yüksek dayanımlı ve lifle donatılmış yüksek dayanımlı kompozitler ile üretilmiş kirişlerin çatlak davranışlarının DIC yöntemiyle incelenmesi üzerine çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalarda çatlak gelişiminin takibi ve çatlak genişliğinin ölçümü amacıyla DIC yöntemi kullanılmış ve numune üzerindeki çatlaklar ile DIC görüntülerinin uyumlu olduğu görülmüştür (Şekil 2.18).



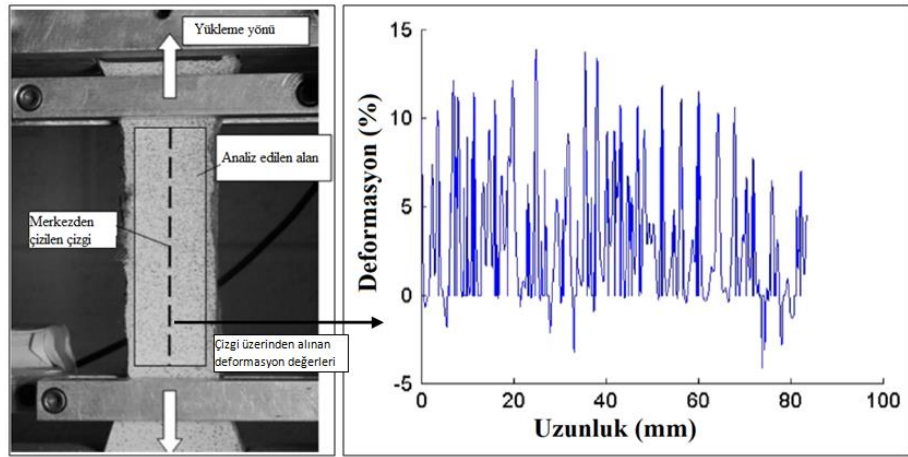
Şekil 2.18 Numune üzerindeki çatlak gelişimi ile DIC görüntülerindeki örtüşme (Hamrat ve diğer., 2016)

Deformasyon sertleşmesi ve dolayısıyla çoklu çatlak davranışı gösteren kompozitler (ECC) ile üretilmiş kirişler üzerinde yapılan eğilme deneylerinde, oluşan yatay deformasyonlar DIC ve LVDT ile ölçülüp kıyaslanarak uyumlu oldukları gözlemlenmiştir (Mahal, Blanksvärd, Täljsten ve Sas, 2015). Aynı zamanda DIC yöntemi çatlak açıklığı -yük ve sehim- yük arasındaki ilişkiyi gözlemek için de kullanılmıştır (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 Nihai çatlak görüntüleri yukarıda olan üç tip numune için yüklemeleri boyunca elde edilen verilerle oluşturulmuş yükleme- çatlak açıklığı diyagramı (Mahal ve diğer., 2015)

Çatlakların gelişiminin incelenmesinin yanı sıra, çatlak sayısını ve genişliğini belirlemek ve bu verileri kullanarak istatistiksel analizlerini yapmak mümkündür (Vanlanduit, Vanherzeele, Longo ve Guillaume, 2009). Ohno ve Li (2014), çekme gerilmesi altında çoklu çatlak davranışı gösteren mühendislik özellikleri geliştirilmiş polimerik lif katkılı geopolimer kompozitleri incelemiştir. Bu çalışmada %4-5 çekme birim deformasyon kapasitesine sahip geopolimer kompozitlerde 20 mikrondan büyük çatlakları DIC yöntemi ile tespit ederek kompozitin çatlak doygunluğuna ulaştığı gösterilmiştir (Şekil 2.20). Çatlak sayısı ve genişliği incelenen örneğin merkezinde eksene dik olarak çizilen bir çizgi yardımıyla çizgisel deformasyonlar kaydedilmiştir. Deformasyonların temel kaynağının çatlak oluşumu olarak kabul edildiği çalışmada, çizgi üzerindeki ani deformasyon değişimlerinden çatlak sayıları ve genişlikleri tespit edilmiştir (Tablo 2.2).



Şekil 2.20 DIC yöntemi ile elde edilen çizgisel deformasyonlar (Ohno ve Li, 2014)

Tablo 2.2 DIC analizi ile hesaplanan çatlak genişliği dağılımları (Ohno ve Li, 2014)

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

Felekoğlu ve Keskinates (2016) tarafından yapılan bir diğer çalışmada hem gerçek hem de sanal LVDT değerlerinin birbirine yakın olduğu, yerel deformasyonların ve deformasyon yoğunlaşma bölgelerinin belirlenmesinde DIC yönteminin kullanılabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca istenen birim şekil değiştirme seviyelerinde kompozit çatlak sayısı ve çatlak genişliği değerlerinin DIC'den elde edilen verilerle belirlenebileceği gösterilmiştir.

DIC'nin getirdiği en önemli avantajlardan birisi de kompozitte 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, Lin, Zhang ve Li (2015)'nin yaptığı çalışmalarda ECC'nin ilk çatlak dayanımının ve yerinin tespitinde DIC yöntemi kullanılmış ve verilerin sonradan işlenebilme özelliğini kullanarak kompozitlerin çatlak genişlikleri tespit edilmiştir. ECC'nin

farklı sıcaklıklardaki mekanik davranışının incelendiği çalışmada, sıcaklık değerinden bağımsız olarak DIC yöntemi ile tespit edilen çatlak genişliklerinin 120  $\mu\text{m}$  civarında olduğu bulunmuştur (Yu ve diğer., 2015).



## **BÖLÜM ÜÇ**

### **DENEYSEL ÇALIŞMALAR**

Bu tez çalışması kapsamında, hacimce %2 oranında yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) kullanılarak hazırlanan kemik şeklindeki çimento esaslı kompozitlere tek eksenli çekme deneyi uygulanmıştır. Deney sırasında numunelerin çekme yüklemesi altındaki deformasyonları, numunenin etrafına yerleştirilen 4 adet geleneksel deformasyon ölçer (LVDT) ile kaydedilmiştir. Ayrıca DIC tabanlı bir kamera sistemiyle önceden beneklendirilmiş numune yüzeylerinin yerel deformasyon ve çatlak analizi yapılmıştır. LVDT ve DIC yöntemleri ile elde edilen bulgular kıyaslanarak, DIC tekniğindeki değişkenlerin (benek yoğunluğu, aydınlatma, çözünürlük ve analiz adım aralığı) kompozitlerin birim uzama davranışının incelenmesindeki etkileri ve bu yöntemin kullanılabilirliği tartışılmıştır. Ayrıca seçilen bir seride (AFSCIHR) kompozitlerin çoklu çatlak davranışı DIC verileri yardımıyla çatlak histogramları oluşturularak incelenmiştir.

### **3.1 Kullanılan Malzemeler**

#### **3.1.1 Çimento**

Deneysel çalışmada Çimentoş'tan temin edilen CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun üretici tarafından beyan edilen kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 CEM I 42,5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri, basınç dayanımları

| Kimyasal Analiz                | Basit Oksit Oranları (%) | Basınç Dayanımı (MPa)            |       |
|--------------------------------|--------------------------|----------------------------------|-------|
| SiO <sub>2</sub>               | 18,57                    | 2 günlük                         | 27,2  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,95                     | 7 günlük                         | 39,9  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,11                     | 28 günlük                        | 49,30 |
| CaO                            | 63,94                    | Özgül ağırlık                    | 3,09  |
| MgO                            | 0,98                     | Özgül Yüzey (m <sup>2</sup> /kg) | 337   |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,37                     | 90µm elek üstü (%)               | 0,7   |
| K <sub>2</sub> O               | 0,75                     | 45µm elek üstü (%)               | 19,3  |
| SO <sub>3</sub>                | 3,07                     | Hacim sabitliği (mm)             | 0,5   |
| Kızdırma Kaybı                 | 3,57                     |                                  |       |
| Klor                           | 0,006                    |                                  |       |
| Çözünmeyen Kalıntı             | 0,21                     |                                  |       |
| Serbest CaO                    | 1,03                     |                                  |       |
|                                |                          |                                  |       |

### 3.1.2 Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Kompozitlerin hazırlanmasında kullanılan öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu (YFC), Adana Çimento'dan temin edilmiş olup, YFC'nin üreticiden alınan kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun kimyasal ve fiziksel analiz sonuçları

|                      |                                    |                                    |                    |                    |                     |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| SiO <sub>2</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%)            | MgO (%)            | SO <sub>3</sub> (%) |
| 39,98                | 11,06                              | 0,77                               | 32,95              | 10,26              | 0,34                |
| S <sup>-2</sup> (%)  | Cl <sup>-</sup> (%)                | CaO+MgO /SiO <sub>2</sub> (%)      | Kızdırma kaybı (%) | P.A.İ* (%)         | Rutubet (%)         |
| 0,39                 | 0,0075                             | 1,08                               | 2,34               | 95                 | 0,1                 |
| Özgül Ağırlık        | Özgül Yüzey (m <sup>2</sup> /g)    | 90µm elek üstü (%)                 |                    | 45µm elek üstü (%) |                     |
| 2,87                 | 550                                | 0                                  |                    | 0,4                |                     |

P.A.İ\* = Pozolanik aktivite indeksi

### 3.1.3 Yüksek Çekme Dayanımlı Polipropilen Lif

Yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (High Tenacity Polypropylene-HTPP) Brezilya’da Brasilit firması tarafından ticari olarak üretilmektedir. HTPP liflerin üreticiden temin edilen fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.3’te verilmiştir. Ayrıca HTPP lifler alkali dayanıklılığı yüksek ve hidrofob yüzey özelliğine sahip liflerdir (Ikai, 2010).

Tablo 3.3 Yüksek çekme dayanımlı polipropilen lifin özellikleri

|                         |      |
|-------------------------|------|
| Özgül Ağırlık           | 0,91 |
| Uzunluk (mm)            | 10   |
| Çap ( $\mu\text{m}$ )   | 12   |
| Elastisite Modülü (GPa) | 6    |
| Çekme Dayanımı (MPa)    | 850  |
| Kopma Uzaması (%)       | 21   |

### 3.1.4 Süper Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı

Deneysel çalışmada ADVA FLOW 375 N prefabrik beton için erken yüksek dayanım sağlayan süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Bu katkı, yüksek oranda işlenebilme, güçlü su azaltma ve erken yüksek dayanım gelişimi istenen beton karışımlarının üretimi için uygun olan, yüksek oranda su azaltıcı ve süper akışkanlaştırıcı sınıfına giren (TS EN 934-2) polikarboksilat esaslı bir beton katkısıdır. Üretici firma tarafından beyan edilen genel özellikleri Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4 AdvaFlow 375N karakteristik özellikleri

|                           |                                        |
|---------------------------|----------------------------------------|
| İçeriği                   | Modifiye sentetik karboksilat polimeri |
| Yapı                      | Homojen, sıvı                          |
| Yoğunluk (20 °C)          | 1,065 g/cm <sup>3</sup>                |
| pH (20 °C)                | 4,0                                    |
| Toplam klorür miktarı (%) | <0,10M,                                |
| Suda çözünen klorür (%)   | <0,10M,                                |
| Alkali miktar (%)         | <7,0M,                                 |
| Önerilen dozaj            | Toplam çimento miktarının %0,5-%2,0’si |

### 3.2 Karışım Oranları Ve Hazırlanan Örnekler

Deneysel çalışmalar kapsamında hazırlanan örneklerde lif olarak yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif, matris fazında ise öğütülmüş yüksek fırın cürufu, Portland çimentosu, su ve süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Tez kapsamında incelenen parametreler birim uzama ölçümü ve çatlak analizi olduğu için tek bir kompozit türü ile çok sayıda numune (her koşul için 4 adet numune olmak üzere toplam 32 adet numune) üzerinde çalışılmıştır. Numunelerin hazırlanması sırasında kullanılan malzeme miktarları Tablo 3.5’te sunulmuştur. Hazırlanan örneklerin su/bağlayıcı (S/B) oranı 0,31, su/çimento (S/Ç) oranı 1,10 ve puzolan/çimento (P/Ç) oranı 2,5 olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.5 Matrisin karışım oranları

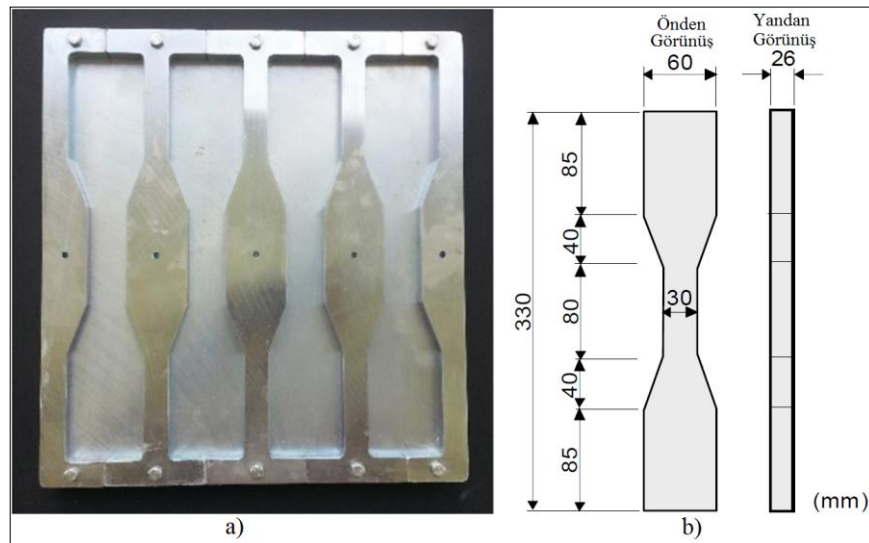
| Bileşenler                   | Çimento | Yüksek Fırın Cürufu | Su  | Süper akışkanlaştırıcı | HTPP lif |
|------------------------------|---------|---------------------|-----|------------------------|----------|
| Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> ) | 424     | 1059                | 466 | 2                      | 18       |

Karışımlar hazırlanırken 40 lt kapasiteli zemin tipi Hobart mikser kullanılmıştır (Şekil 3.1). Hobart mikser üç farklı devirde karıştırma hızına (56, 104, 185 dev/dak) sahiptir. Numuneler, Hobart mikserde karışım hacmi 4 dm<sup>3</sup> 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 liflerin tüm matrise homojen şekilde dağıtılabilmesi amacıyla süper akışkanlaştırıcı katkı ilave edilip 3 dakika daha karıştırılmıştır.



Şekil 3.1 Hobart mikser (Kişisel arşiv, 2016)

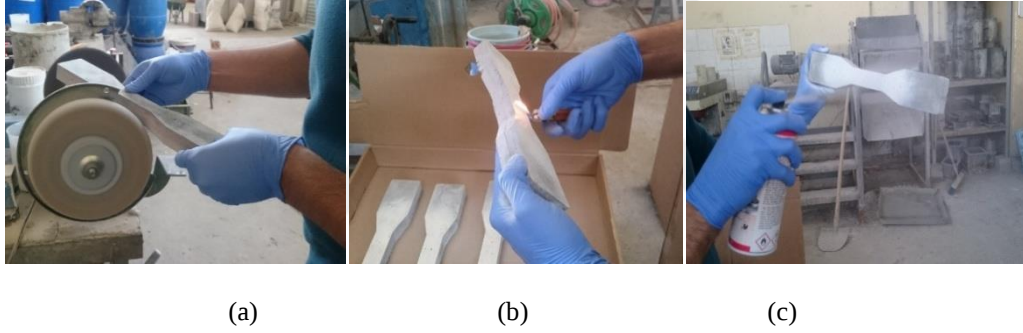
Hazırlanan matris karışımı 26 mm kalınlığında kemik şeklindeki çekme kalıplarına doldurulmuştur. Taze haldeki karışımdan örnek alımı sırasında kullanılan kalıplar, Japon İnşaat Mühendisleri Topluluğu'nun yüksek performanslı lifli kompozitler üzerine çıkartmış olduğu öneri kitabı (JSCE, 2008)'de belirtilen ölçülere uygun olarak yaptırılmıştır (Şekil 3.2). Taze harcın sıkışması için kısa süreli dış vibrasyon uygulanmıştır. Örnekler kalıba alındıktan 2 gün sonra kalıplardan sökülmüş ve kür havuzuna konularak 28 gün boyunca  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 'deki kirece doymun suda saklanmıştır. 28 gün sonunda kürden çıkarılan örnekler 1 gün havada kurutulmuş, ardından çekme deneyleri yapılarak gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.2 Çekme numunesi kalıbı ve boyutları (a)Kişisel arşiv, 2016; b)JSCE, 2008)

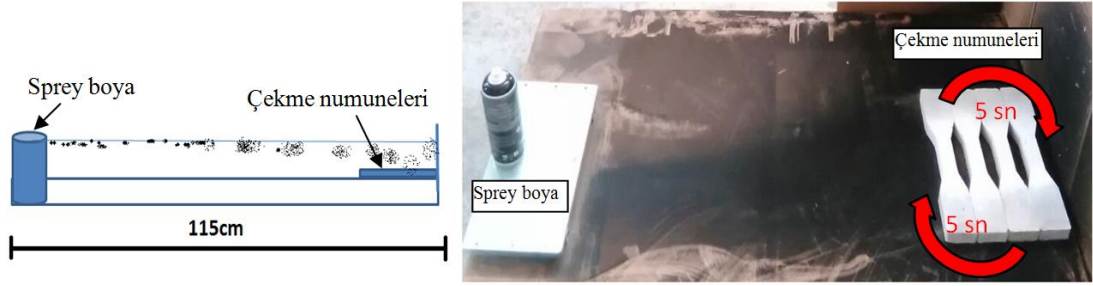
### 3.2.1 Numunelerin Beneklendirilmesi

Kalıptan çıkarılan çekme numuneleri DIC sistemi için hazırlanırken ayrıtları çekme çenelerine uygun bir oturma düzlemi sağlamak amacıyla zımparalanmıştır (Şekil 3.3a). Benekleme yapılmadan önce analiz edilecek numunenin yüzeyi benekleme işlemine hazır hale getirilmelidir. Numune kenarlarında oluşacak pürüzler ve numune yüzeyindeki lifler benekleme ve analiz sırasında hatalara neden olabilir. Numune yüzeyindeki liflerin ölçüm hatasına yol açmaması için, numunenin analiz yapılacak yüzeyinde fazlalık olan lifler yakılarak temizlenmiştir (Şekil 3.3b). Daha sonra beyaz bir spreyci boya ile yüzey tamamen boyanmıştır (Şekil 3.3c). Bu işlem beneklenmenin kalitesi açısından önemlidir. Oluşacak siyah benekler, beyaz ve pürüzsüz bir yüzeyde tarama sırasında daha net belli olmaktadır. Yukarıda sıralanan işlemlerin sonunda numune yüzeyi benekleme işlemine hazır hale gelir.



Şekil 3.3 a) Numunelerin spiral taşı ile düzeltilmesi, b) yüzeyde görülen fazla liflerin yakılması, c) yüzeyin beyaz spreyci boya ile boyanması (Kişisel arşiv, 2016)

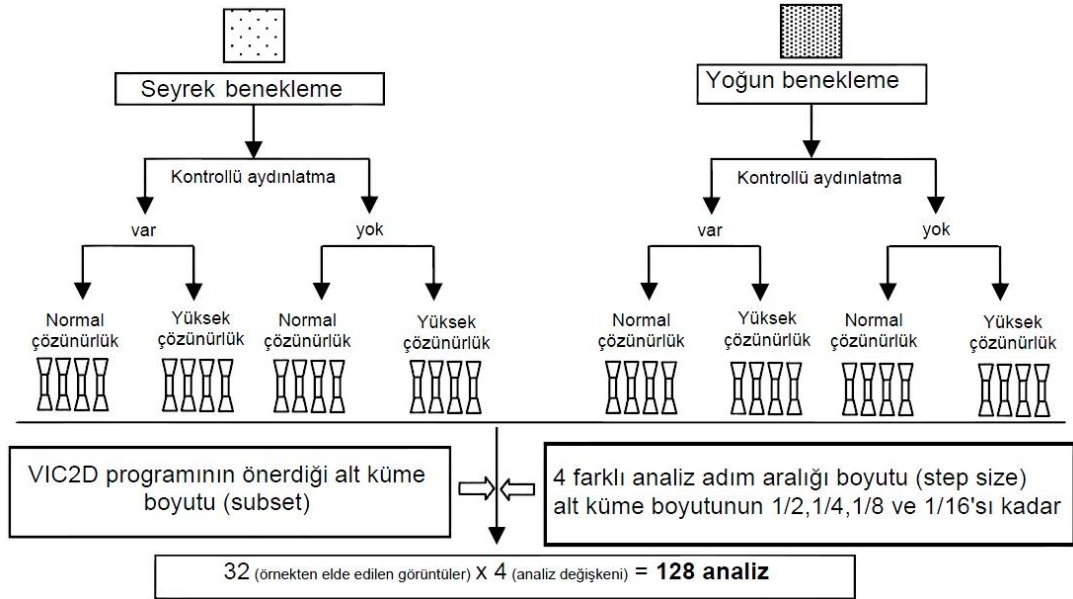
Örneklerin DIC yöntemiyle analiz edilebilmesi amacıyla örnek yüzeyinde rastgele benekleme yapılmıştır. Bu amaçla siyah renkli spreyci boya kullanılmıştır. Arka planı beyaz boya ile hazırlanmış örnekler üzerine siyah spreyci boya ile 115 cm mesafeden karşı yüzeye doğru 5 sn numunenin bir yanından, 5 sn öteki yanından olmak üzere toplamda 10 sn boya püskürtülmüştür. Püskürtme alanının altına (85-115 cm uzaklıktaki bölgeye) numuneler koyularak beneklendirme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.4).



Şekil 3.4 Sprey boya ile benekleme metodu (Kişisel arşiv, 2016)

### 3.3 Sistematiik Deney Programı ve Deneyler

DIC yöntemini kullanmak üzere araştırılması planlanan parametrelere bağılı olarak numunelerin hazırlanma sistematiği şematik olarak Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5 DIC yöntemine uygun numune hazırlanması

Elde edilen beneklendirilmiş numuneler, Şekil 3.5'te sunulan sistematiik deney programı dikkate alınarak kodlanmış ve her bir numune için VIC-2D yazılımının önerdiği alt küme boyutu ile DIC analizlerine başlanmıştır. Numune isimlendirmelerinde kullanılan notasyonlar Tablo 3.6'da numune isimlendirmeleri de her bir numune için ayrı ayrı Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3.6 Numunelerin isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar

|                  |                                      |                                              |
|------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>A matrisi</b> | YFC 1,10-2,5- %2 HTPP                |                                              |
| <b>FS</b>        | Seyrek Benek                         | ( <b>F</b> ine <b>S</b> peckle)              |
| <b>CS</b>        | Yoğun Benek                          | ( <b>C</b> oarse <b>S</b> peckle)            |
| <b>CI</b>        | Kontrollü Aydınlatma var             | ( <b>C</b> ontrolled <b>I</b> llumination)   |
| <b>UI</b>        | Kontrollü Aydınlatma yok             | ( <b>U</b> ncontrolled <b>I</b> llumination) |
| <b>HR</b>        | Yüksek Çözünürlük (2710x3384 piksel) | ( <b>H</b> igh <b>R</b> esolution)           |
| <b>LR</b>        | Düşük Çözünürlük (1354x1692 piksel)  | ( <b>L</b> ow <b>R</b> esolution)            |

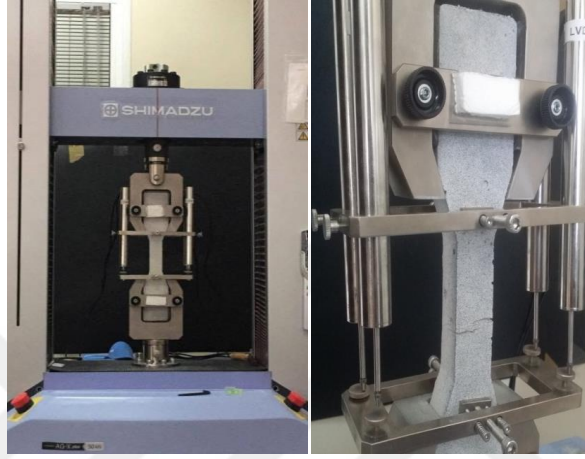
Tablo 3.7 Hazırlanan numunelerin isimlendirme sistemi ve açıklamaları

| <b>Numune Kodlama</b> | <b>Numune İsimleri</b>                                               |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------|
| A-FS-CI-HR            | A matrisi - Seyrek Benek-Kontrollü Aydınlatma var- Yüksek Çözünürlük |
| A-FS-CI-LR            | A matrisi - Seyrek Benek-Kontrollü Aydınlatma var- Düşük Çözünürlük  |
| A-FS-UI-HR            | A matrisi - Seyrek Benek-Kontrollü Aydınlatma yok- Yüksek Çözünürlük |
| A-FS-UI-LR            | A matrisi - Seyrek Benek-Kontrollü Aydınlatma yok- Düşük Çözünürlük  |
| A-CS-CI-HR            | A matrisi - Yoğun Benek- Kontrollü Aydınlatma var- Yüksek Çözünürlük |
| A-CS-CI-LR            | A matrisi - Yoğun Benek -Kontrollü Aydınlatma var- Düşük Çözünürlük  |
| A-CS-UI-HR            | A matrisi - Yoğun Benek-Kontrollü Aydınlatma yok- Yüksek Çözünürlük  |
| A-CS-UI-LR            | A matrisi - Yoğun Benek- Kontrollü Aydınlatma yok- Düşük Çözünürlük  |

Çekme deneylerinde 50KN kapasiteli SHIMADZU çekme cihazı yardımıyla 0,5 mm/dk uzama hızında deneyler gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.6). SHIMADZU çekme cihazı kendisiyle entegre bir bilgisayardaki Trapezium yazılımında oluşturulan metot doğrultusunda kumanda edilmiştir.

Doğrudan çekme deneyi, numunenin düzeneğe doğru yerleştirilmemesi kaynaklı istenmeyen gerilmelere maruz kalabilir (burulma, bölgesel basınç gibi). İstenmeyen gerilmeleri önlemek için numunenin düzeneğe sabitlenmesine özen gösterilmiştir. 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 numuneye sabitlenerek elde edilen değerlerin ortalaması alınarak belirlenmiştir (Şekil 3.6b). LVDT'lerin yerleştirilmesi sırasında

tümünün aynı düzlemde olmasına ve yeterli miktarda sıkıştırılmış olmasına özen gösterilmiştir. Bunun için metre ve üç eksenli su terazisinden faydalanılmıştır. LVDT'ler numaralandırılarak alınan verilerin hangisine ait olduğunun kontrol edilebilir olması sağlanmıştır. Şekil 3.7'de gösterilen analiz görüntüsü üzerine 3 adet çizgisel sanal ekstensometre (sanal LVDT) çizilerek elde edilen birim şekil değiştirmelerin ortalaması 4 adet gerçek LVDT ortalaması ile kıyaslanmıştır.



Şekil 3.6 a) Doğrudan çekme cihazı, b) düzeneğe yerleştirilmiş numune (Kişisel arşiv, 2016)



Şekil 3.7. Çekme deneyi cihazı ve görüntü analiz ekipmanları (Kişisel arşiv, 2016)

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. Görüntülerden elde edilen birim uzamalar zaman parametresi

dikkate alınarak gerçek LVDT'ler ile eşleştirilmiştir. Görüntülerin çekiminde 8 bit mono kamera (Tablo 3.8) ile LED ve halojen ışıklar kullanılmıştır. Görüntülerin  $\mu\text{m}/\text{piksel}$  karşılıkları yüksek çözünürlük için  $38 \mu\text{m}/\text{piksel}$  ve düşük çözünürlük için  $76 \mu\text{m}/\text{piksel}$  olarak kaydedilmiştir. Elde edilen görüntülerin analizleri ise çekme deneyi sonrasında VIC-2D isimli ticari bir yazılım kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Ayrıca NSSD korelasyon  $\left( \frac{\sum F_i G_i}{\sum G_i^2} G_i - F_i \right)^2$  yöntemi kullanılmıştır. Bu korelasyon yöntemi VIC-2D programının varsayılan ayarıdır ve aydınlatma seviyesinden etkilenmediği beyan edilmiştir (Correlated solutions, 2016b). Korelasyon yöntemi belirlenen alt kümede tüm analiz bölgeleri için uygulandıktan sonra sona ermektedir. Korelasyon değerleri, en küçük kareler yönteminin normalize edilerek elde edilen değerleridir. En iyi korelasyon NSSD ile ulaşılan ve sıfıra en yakın olan değer olarak tanımlanmıştır.

Tablo 3.8 Kamera özellikleri

|                         |                                     |
|-------------------------|-------------------------------------|
| 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                               |

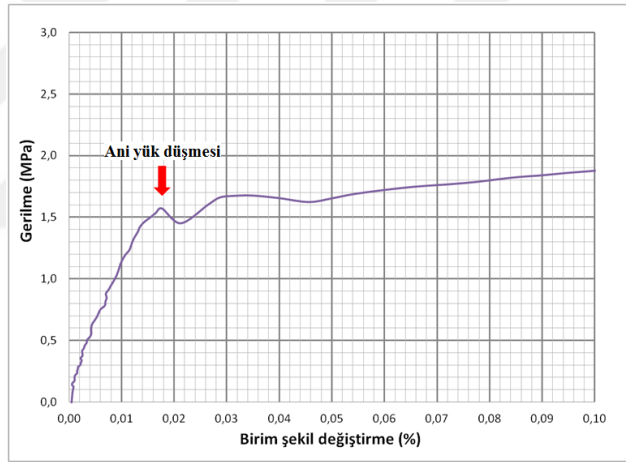
### 3.4 Deney Parametrelerinin Belirlenmesi

Deneysel çalışmalar kapsamında hem mekanik deneyler hem de DIC yöntemiyle elde edilen veriler kullanılarak kompozitlerin gerilme-birim şekil değiştirme (BŞD) eğrileri çizdirilmiştir. Bu eğriler kullanılarak ilk çatlak ve çekme dayanımları, birim şekil değiştirme kapasitesi ve tokluk kapasitesi değerleri hesaplanmıştır. İlk çatlak

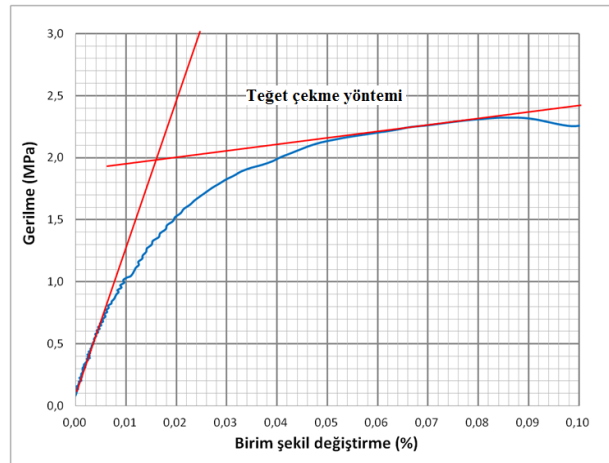
gerilmesi, gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin doğrusallığın bozulduğu ilk nokta olarak tanımlanmakta ve iki farklı yöntem kullanılarak belirlenmektedir (Tosun-Felekoglu ve Felekoglu, 2013);

-Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinde net bir yük düşüşü gözleniyorsa, düşüş noktasından hemen önceki yük değeri ilk çatlak gerilmesi olarak adlandırılır (Şekil 3.8a).

-Gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerinde net bir yük düşüşü gözlenmeden doğrusallık eğrisel olarak bozuluyor ise, eğrinin doğrusal bölgelerine teğet olacak şekilde iki düz çizgi çizilir. Teğetlerin kesiştiği noktanın gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi üzerindeki izdüşümü ilk çatlak gerilmesi olarak kabul edilir (Şekil 3.8b).



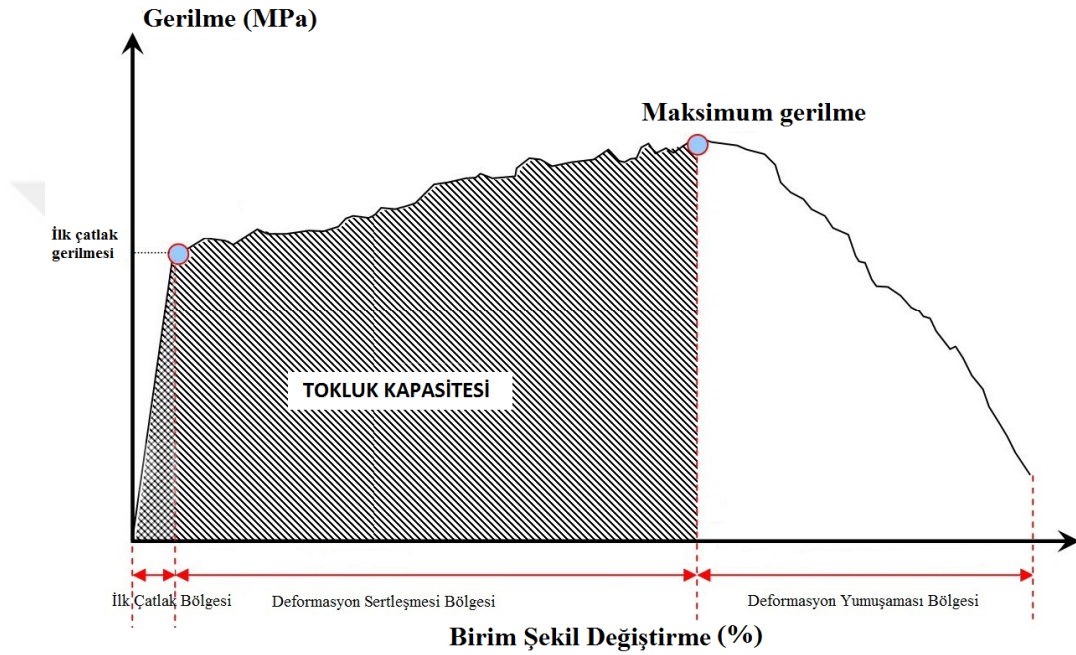
a)



b)

Şekil 3.8 İlk çatlak gerilmesi değerinin tespiti

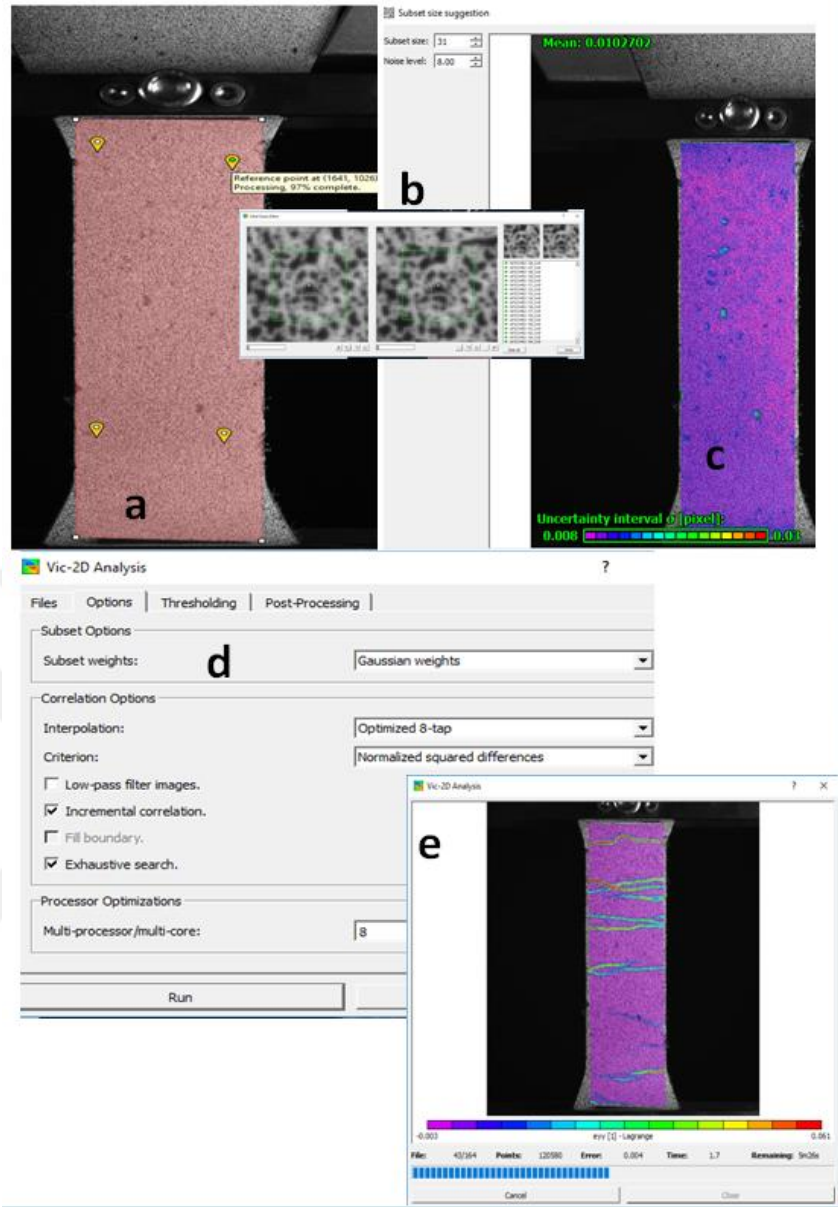
Gerilme-birim şekil değiştirme üzerinde gerilme artışının artık devam etmediği ve düşüşe geçtiği nokta ise maksimum çekme gerilmesi (çekme dayanımı) olarak belirlenmektedir. Bu noktaya karşılık gelen birim şekil değiştirme değeri de kompozitin birim şekil değiştirme kapasitesi olarak adlandırılmaktadır. Kompozitlerin enerji yutma kapasitesi ise çekme gerilmesi değerine kadar gerilme-birim şekil değiştirme eğrisinin altında kalan alan olarak tanımlanmaktadır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Maksimum gerilme, birim şekil değiştirme ve tokluk kapasitesinin belirlenmesi

### 3.5 DIC Analiz Parametrelerinin Belirlenmesi

Şekil 3.10'da VIC-2D yazılımı ile DIC parametrelerinin belirlenmesi ve verilerin elde edilme yöntemi gösterilmiştir. Öncelikle analiz yapılacak bölge seçilmiş ve analizin başlaması, aynı zamanda referans noktası alabilmesi için başlangıç noktaları belirlenmiştir (area of interest-AOI) (Şekil 3.10a). Belirlenen başlangıç noktalarının çatlakların üzerine gelmemesine özen gösterilmiştir (Şekil 3.10b). Analizde yazılımın seçili bölge için tavsiye ettiği alt küme boyutu kullanılmıştır (Şekil 3.10c).



Şekil 3.10 VIC-2D yazılımında DIC parametrelerinin uygulanması ve elde edilmesi aşamaları

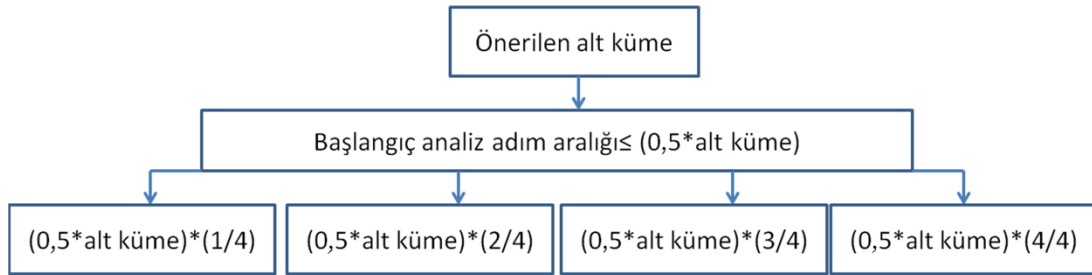
VIC-2D yazılımına bağlı analiz parametreleri sabit olarak tüm numunelerin analizlerinde aynı olacak şekilde uygulanmıştır. Bunlar; eşleşen alt kümedeki piksellerin ağırlıklandırma şekli için Gauss ağırlık özelliği, alt piksel doğruluğu için gri alanları sürekli bir eğri ile temsil eden 8.dereceden bir eğri enterpolasyonu, korelasyon kriteri olarak ışıktan daha az etkilenen normalleştirilmiş kareler farkları (NSD- normalized square differences (Formül 3.1)), her bir görüntüyü bir önceki görüntü ile korelasyonlayan artımlı korelasyon özelliği (incremental correlation) ve daha ayrıntılı arama (exhaustive search) özelliğidir (Şekil 3.10d). Analiz

tamamlandıktan sonra deformasyon haritaları ve alansal birim deformasyon değerleri ( $\epsilon_{yy}$ ) (Formül 3.2) elde edilmiş, veriler Excel'e aktararak grafikler oluşturulmuştur (Şekil 3.10e).

$$NSSD \rightarrow \sum \left( \frac{\sum FiGi}{\sum Gi^2} Gi - Fi \right)^2 \quad (3.1)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Analizlerde alt küme boyutu olarak, her bir örneğin ilk görüntüsü programda analiz edilerek programın önerdiği alt küme boyutu kullanılmıştır. Önerilen alt küme boyutları beneklendirme, ışıklandırma ve çözünürlük değişkenlerine bağlı olarak 17x17-37x37 piksel arasında değişmiştir. Başlangıç adım aralığı ise alt küme boyutunun yarısı olarak seçilmiş (Reu, 2012; Ke vd., 2011; Cooreman vd., 2008) ve adım aralığı değerleri bu değer (1/4, 2/4, 3/4 ve 4/4) katları olacak şekilde belirlenmiştir. Bir örnek olarak, alt küme boyutu ve analiz adım aralığının belirlenmesi aşamaları şematik olarak Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



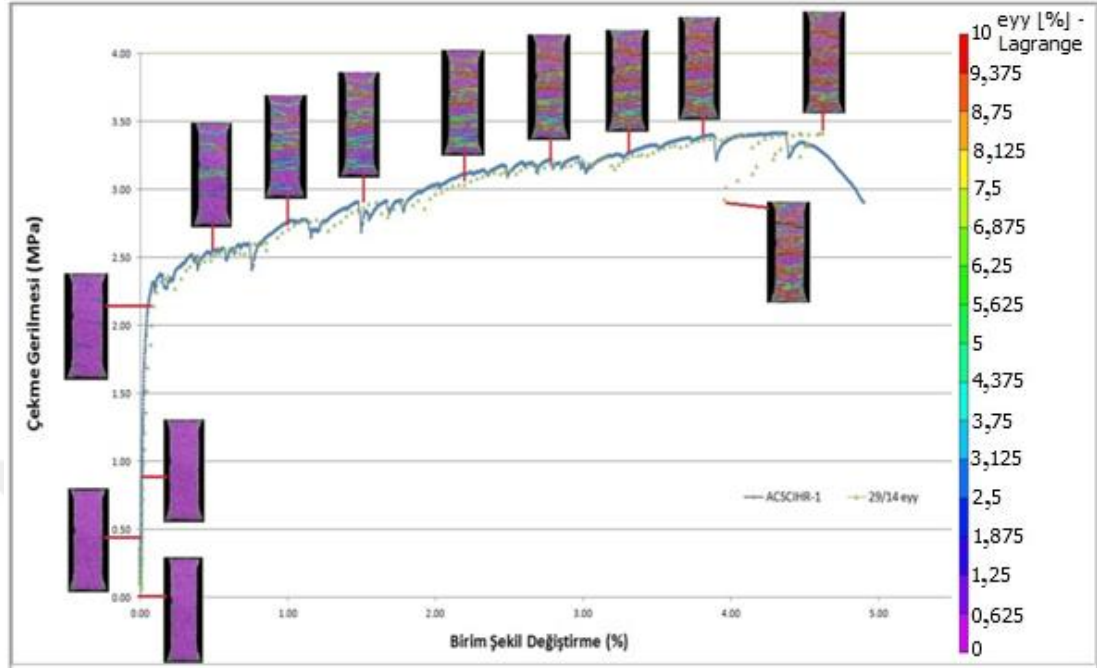
Şekil 3.11 Alt küme boyutu ve analiz adım aralığı belirlenme şeması

### 3.6 Gerçek LVDT ve DIC (sanal LVDT) Sonuçlarının Kıyaslanmasında Kullanılan Yöntemler

Mekanik deneyler ve DIC yöntemi kullanılarak her bir numune için elde edilen  $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{yy}$  verileri ile her bir numune için  $\sigma$ - $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\sigma$ - $\epsilon_{yy}$  eğrileri çizdirilmiştir.

LVDT ve DIC yöntemi ile elde edilen verilerle tüm numuneler için gerilme-birim şekil değiştirme eğrileri oluşturulmuş ve EK-A'da verilmiştir. ACSCIHR-1 kodlu numune için karşılaştırmalı LVDT ve DIC grafiği elde edilmiştir (Şekil 3.12). 15

görüntüde bir elde edilmiş  $\epsilon_{yy}$  deformasyon haritalarının lokal deformasyonları %0-5 arasında ölçeklendirilmiştir.



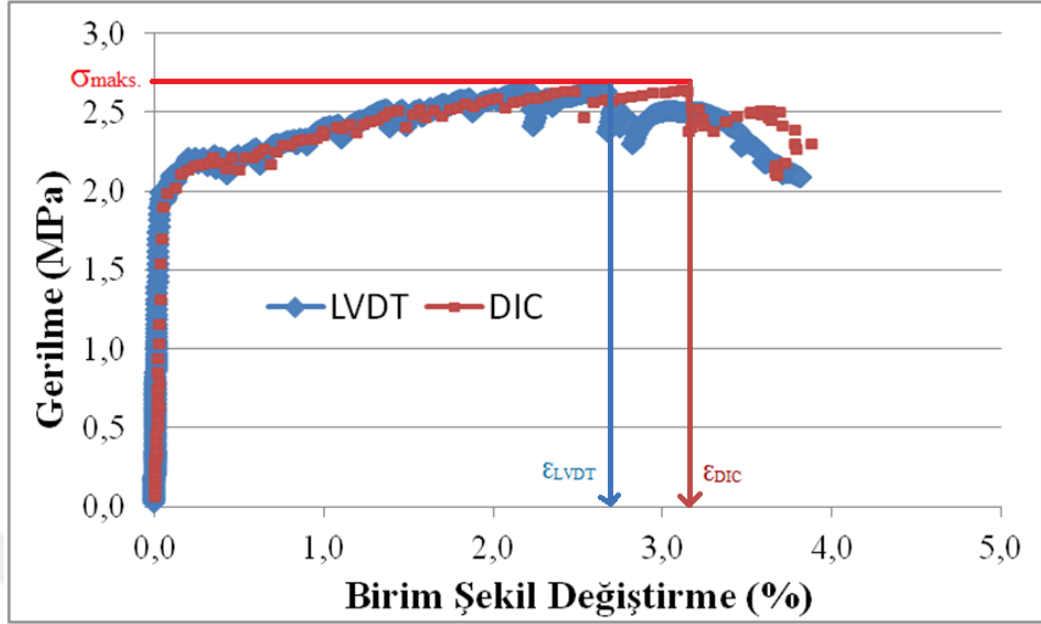
Şekil 3.12 ACSCIHR-1 kodlu numunenin LVDT ve DIC verileri ile elde edilmiş gerilme-birim deformasyon grafiği ve 15 görüntüde bir görüntüsü alınmış deformasyon haritaları

Mekanik deneylerden elde edilen veriler (LVDT) ve DIC yöntemi kullanılarak elde edilen analiz sonuçları kullanılarak her bir numune için  $\epsilon_{LVDT}$  (4 adet LVDT'nin ortalaması),  $\epsilon_{DIC}$  (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. Bu yöntemler;

1. yöntem,  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye ( $\sigma_{mak}$ ) karşılık gelen birim şekil değiştirmelerin ( $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{DIC}$ ) kıyaslanmasıdır (Şekil 3.13). Bu yöntemde  $\epsilon_{LVDT}$  değerleri mutlak doğru kabul edilmiş ve  $\epsilon_{DIC}$  değerleri,  $\epsilon_{LVDT}$  değerlerinin yüzdesi olarak ifade edilmiştir ( $(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100$ ) (Formül 3.3). Bu metoda göre aşağıda gösterilen üç farklı durum ortaya çıkabilmektedir.

$$\begin{aligned}
 (\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 &= 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT} \text{ (Mükemmel ölçüm*)} & (3.3) \\
 (\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 &> 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analizinin fazla ölçmesi)} \\
 (\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100 &< 100 \rightarrow \epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analizinin eksik ölçmesi)}
 \end{aligned}$$

\*DIC yöntemi ile sanal LVDT'lerin gerçek LVDT'ler ile aynı ölçümü yapması



Şekil 3.13 AFSCIHR-1 numunesi  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye ( $\sigma_{maks}$ ) karşılık gelen birim şekil değiştirmeler ( $\epsilon_{LVDT}$  ve  $\epsilon_{DIC}$ )

2. yöntem ise  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında maksimum gerilmeye kadar her bir gerilme değerindeki LVDT ve DIC'nin birim şekil değiştirme değerlerini kıyaslama metodudur. Bu yöntemde eksenel sistemde düşey ekseninde  $\epsilon_{LVDT}$  yatay ekseninde  $\epsilon_{DIC}$  verileri olacak şekilde eğri çizdirilmiş ve elde edilen eğrinin doğrusal denklemi elde edilmiştir (Şekil 3.14) (Formül 3.4). Bu denkleme göre;

$$y = a + b.x \rightarrow \epsilon_{DIC} = a + b.\epsilon_{LVDT} \quad (3.4)$$

$$b=1 \rightarrow \epsilon_{DIC} = \epsilon_{LVDT} \text{ (Mükemmel ölçüm*)}$$

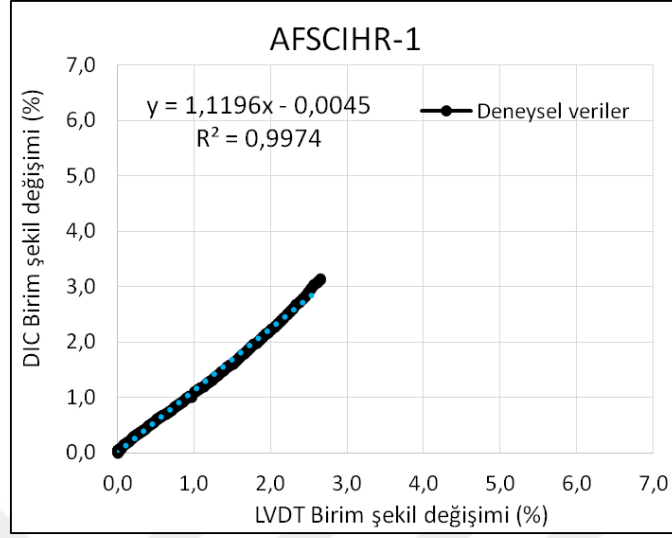
$$b>1 \rightarrow \epsilon_{DIC} > \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analizinin fazla ölçmesi)}$$

$$b<1 \rightarrow \epsilon_{DIC} < \epsilon_{LVDT} \text{ (DIC analizinin eksik ölçmesi)}$$

\*DIC yöntemi ile sanal LVDT'lerin gerçek LVDT'ler ile aynı ölçümü yapması

denklemdaki b değeri 1'e ne kadar yakın olursa,  $\epsilon_{DIC}$  ile  $\epsilon_{LVDT}$  verileri birbirine o kadar yakın olacağı için değerlendirmeler yapılırken b değerleri dikkate alınmıştır. 2. yöntemde, 1. yöntemden farklı olarak  $\sigma$ - $\epsilon$  diyagramında  $\sigma_{maks}$ 'tan sonra çatlak yapısı, kararlı çatlak durumundan (steady state crack) kararsız çatlak durumuna (Griffith

type crack) dönüştüğü için  $\sigma_{\text{mak}}$ ‘dan sonraki kısımlar hata hesaplamalarında dikkate alınmamıştır.



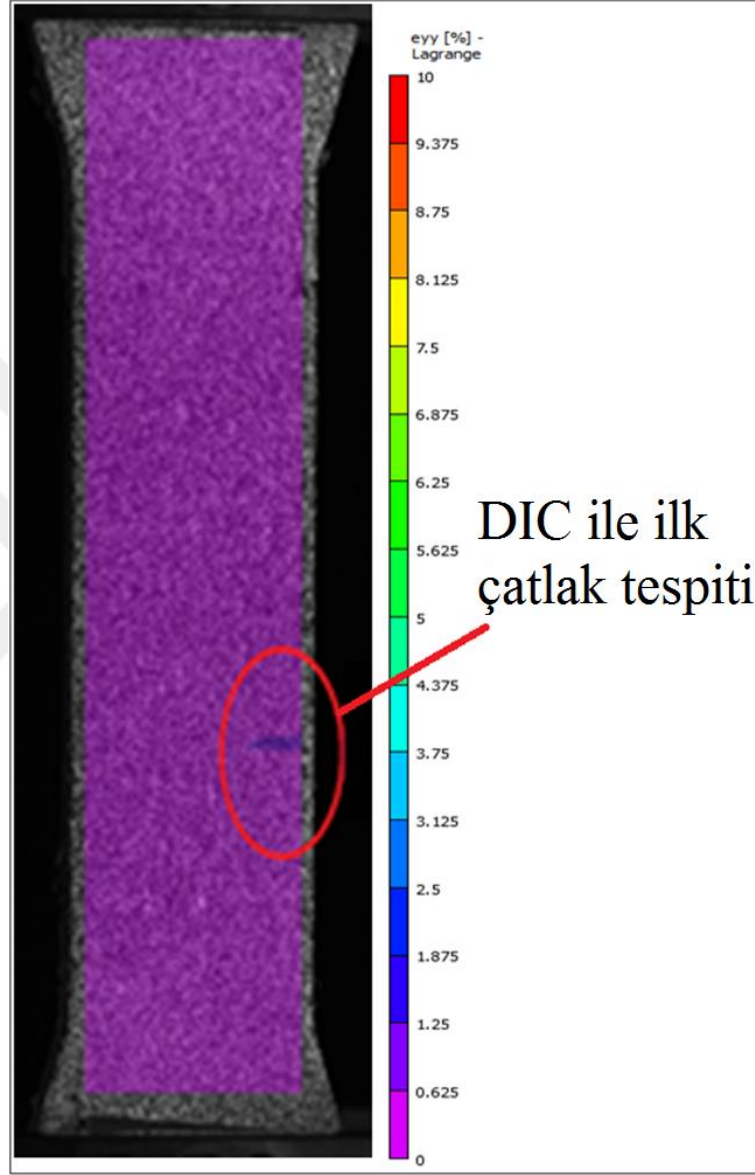
Şekil 3.14 AFSCIHR-1 numunesi LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin karşılaştırılması

### 3.7 Çatlak Analizi Yöntemi

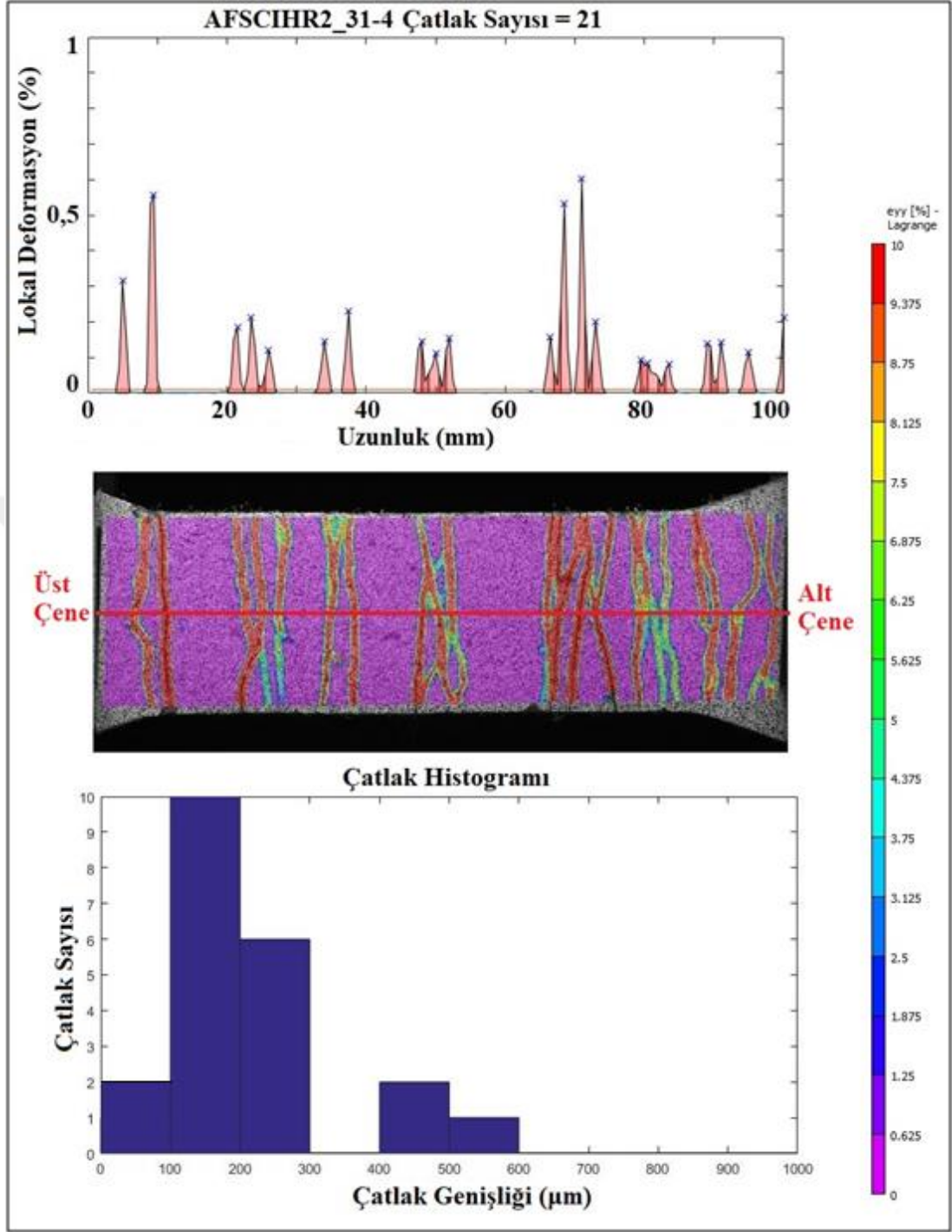
VIC-2D yazılımı ile elde edilen görüntüler analiz edildikten sonra deformasyon haritaları her bir görüntü için oluşturulabilmektedir. Elde edilen bu haritalar yardımıyla numune üzerindeki ilk çatlak henüz mikron mertebelerindeyken tespit edilebilmektedir. 'y' eksen yönündeki değişimleri gösteren lokal deformasyonlar  $\epsilon_{yy}$  olarak elde edilmiştir ve renklendirilmiştir (mor: deforme olmamış bölge, kırmızı: maksimum deforme olmuş bölge) (Şekil 3.15).

DIC analizi sonucunda elde edilen deformasyon haritaları ve verileri yardımıyla çatlak gelişimi takibi de yapılabilmektedir. Bu amaçla seçilen bir seride (AFSCIHR) VIC-2D yazılımı ile analiz bölgesinin orta bölgesine çekme yönü doğrultusunda sanal bir çizgi çizilerek buradaki lokal deformasyonlar belirlenmiştir. VIC-2D yazılımında elde edilen deformasyon verileri, oluşturulan bir MATLAB algoritması yardımıyla işlenmiştir. Bu lokal deformasyonlardaki ani değişimler (pik noktalar) numunenin çatladığının göstergesi ve her bir pik değer altında kalan alan ise çatlak genişliği olarak kabul edilebilir (Ohno ve Li, 2014). Numune üzerine yerleştirilen bu sanal LVDT yardımıyla maksimum yük anındaki görüntü üzerinden çatlak genişliği,

sayısı ve çatlak gelişim takibi ile deformasyon haritaları oluşturulmuştur. Şekil 3.16'da AFSCIHR2 numunesi için deformasyon haritası, çatlak sayısı ve çatlak genişliği değerleri gösterilmiştir.



Şekil 3.15 DIC yöntemi ile ilk çatlak tespiti



Şekil 3.16 AFSCIHR2-31/4 numunesi için numune üzerine çizilen sanal LVDT yardımıyla çatlak sayısı ve genişliğinin belirlenmesi

## BÖLÜM DÖRT

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

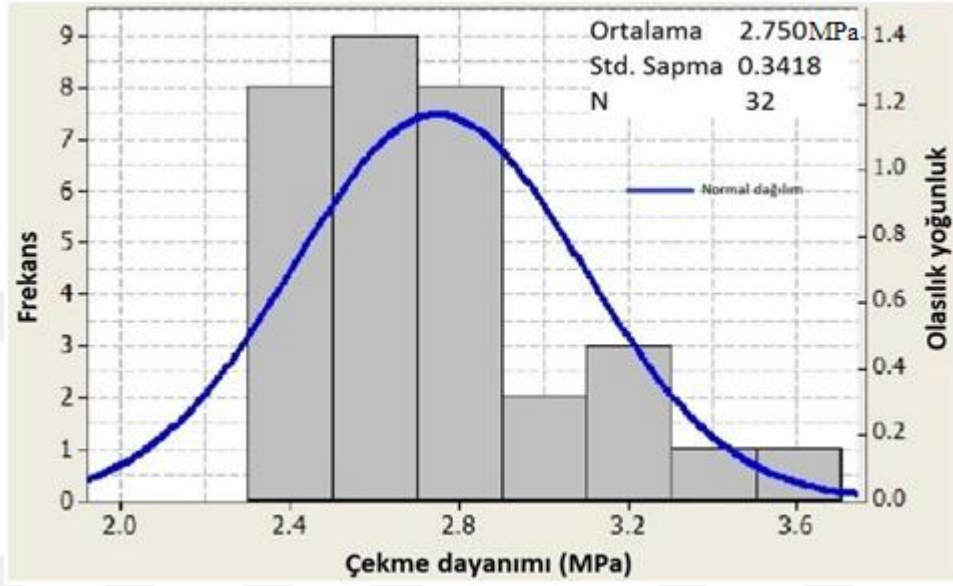
#### 4.1 Kompozitlerin Çekme Dayanımları ve Birim Deformasyon Kapasiteleri

Çalışmalar kapsamında incelenen 32 numunenin gerçek LVDT’ler kullanılarak elde edilen mekanik deney sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir.

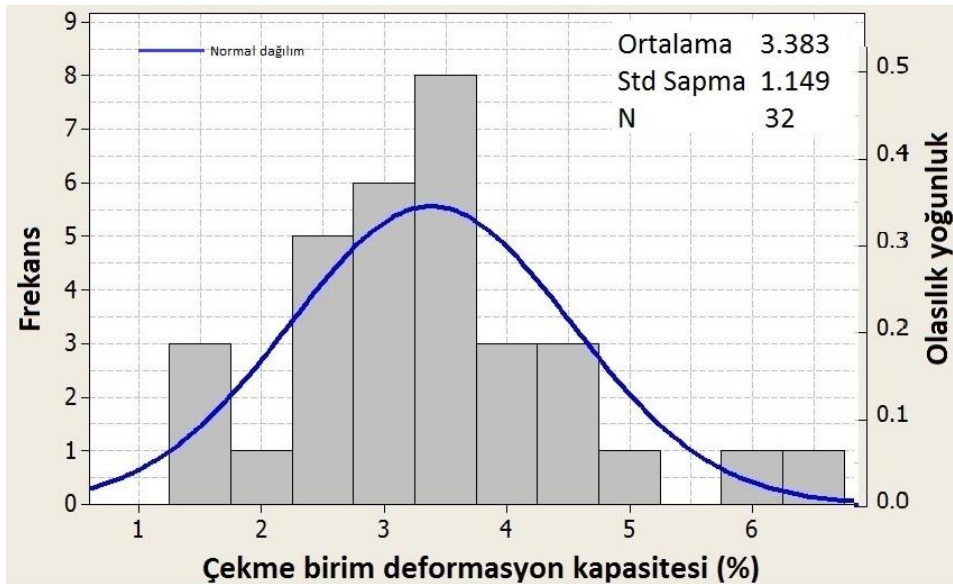
Tablo 4.1 32 adet numune için elde edilen mekanik deney sonuçları

| NUMUNE İSMİ     | Mak. Gerilme (MPa) | Çekme Birim Deformasyon Kapasitesi (%) | İlk Çatlak Gerilmesi (MPa) | İlk Çatlak BŞD (%) | Tokluk (N.mm) |
|-----------------|--------------------|----------------------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| AFSCIHR-1       | 2,64               | 2,65                                   | 1,43                       | 0,0183             | 6020,6        |
| AFSCIHR-2       | 3,04               | 4,20                                   | 1,22                       | 0,0172             | 11122,0       |
| AFSCIHR-3       | 3,19               | 3,77                                   | 1,49                       | 0,0186             | 9548,6        |
| AFSCIHR-4       | 3,01               | 3,40                                   | 1,01                       | 0,0160             | 9071,3        |
| AFSCILR-1       | 2,79               | 2,29                                   | 1,38                       | 0,0164             | 5522,6        |
| AFSCILR-2       | 2,89               | 4,20                                   | 1,40                       | 0,0169             | 10492,6       |
| AFSCILR-3       | 2,55               | 3,59                                   | 1,29                       | 0,0161             | 7113,5        |
| AFSCILR-4       | 2,31               | 3,43                                   | 1,46                       | 0,0143             | 6625,8        |
| AFSUIHR-1       | 2,81               | 2,06                                   | 0,84                       | 0,0115             | 5484,3        |
| AFSUIHR-2       | 3,18               | 2,98                                   | 1,40                       | 0,0148             | 8529,7        |
| AFSUIHR-3       | 2,30               | 3,45                                   | 1,19                       | 0,0222             | 6429,3        |
| AFSUIHR-4       | 2,88               | 4,68                                   | 1,32                       | 0,0175             | 10390,9       |
| AFSUILR-1       | 2,83               | 3,55                                   | 1,26                       | 0,0161             | 7793,9        |
| AFSUILR-2       | 2,57               | 1,68                                   | 1,10                       | 0,0165             | 3734,8        |
| AFSUILR-3       | 2,76               | 2,89                                   | 1,28                       | 0,0195             | 6520,6        |
| AFSUILR-4       | 2,52               | 3,10                                   | 1,16                       | 0,0154             | 6403,8        |
| ACSCIHR-1       | 3,42               | 4,37                                   | 1,39                       | 0,0168             | 12576,3       |
| ACSCIHR-2       | 2,42               | 1,66                                   | 0,96                       | 0,0174             | 3811,8        |
| ACSCIHR-3       | 2,61               | 3,07                                   | 1,13                       | 0,0236             | 6703,1        |
| ACSCIHR-4       | 2,33               | 2,66                                   | 0,97                       | 0,0177             | 5216,6        |
| ACSCILR-1       | 2,89               | 3,44                                   | 0,92                       | 0,0118             | 8322,2        |
| ACSCILR-2       | 2,65               | 4,35                                   | 0,73                       | 0,0146             | 9604,0        |
| ACSCILR-3       | 2,34               | 3,18                                   | 0,87                       | 0,0083             | 5969,0        |
| ACSCILR-4       | 2,38               | 2,38                                   | 0,80                       | 0,0224             | 4495,2        |
| ACSUIHR-1       | 3,30               | 3,32                                   | 0,91                       | 0,0146             | 8742,8        |
| ACSUIHR-2       | 2,68               | 3,36                                   | 1,46                       | 0,0221             | 7227,5        |
| ACSUIHR-3       | 2,47               | 2,65                                   | 1,32                       | 0,0163             | 5537,8        |
| ACSUIHR-4       | 2,69               | 6,43                                   | 1,18                       | 0,0289             | 13481,0       |
| ACSUILR-1       | 2,40               | 1,27                                   | 1,01                       | 0,0145             | 2988,5        |
| ACSUILR-2       | 3,68               | 5,96                                   | 1,60                       | 0,0242             | 19478,4       |
| ACSUILR-3       | 2,60               | 3,07                                   | 1,14                       | 0,0172             | 6759,9        |
| ACSUILR-4       | 2,88               | 5,19                                   | 1,23                       | 0,0166             | 11399,4       |
| <b>Ortalama</b> | <b>2,75</b>        | <b>3,38</b>                            | <b>1,18</b>                | <b>0,0173</b>      | <b>7909,9</b> |

Çekme dayanımları ile LVDT çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişim histogramları Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de sunulmuştur. Çekme dayanımı verilerinin ortalama, standart sapma ve değişkenlik katsayısı değerleri sırasıyla 2,75MPa, 0,34MPa ve %12,4’dür. Çekme birim deformasyon kapasitelerinin ortalama ve standart sapma değerleri sırasıyla %3,38 ve %1,149’dur. Ortalama tokluk değeri 7909,9 N.mm’dir.



Şekil 4.1 Çekme dayanımındaki değişim

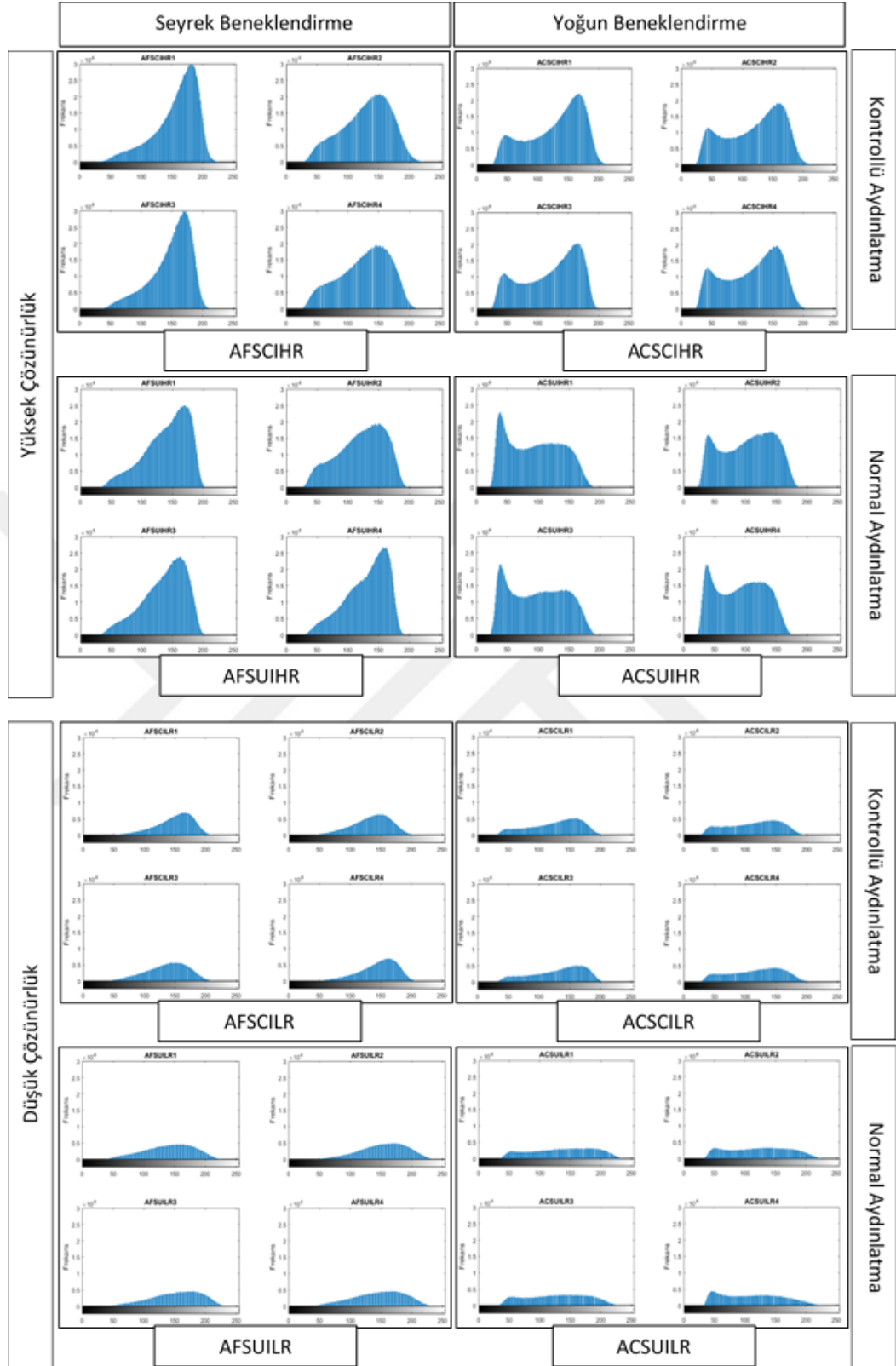


Şekil 4.2 LVDT Çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişim

#### 4.2 Kompozitlerin İncelenenecek Yüzey Alanlarının Benek Histogramlarının Tanımlanması

Çekme deneyi sırasında alınan görüntüler, her bir inceleme kriteri değişiminden (çözünürlük, aydınlatma ve beneklendirme) etkilenecek farklılık gösterecektir. Bu farklılığa bağlı olarak numunelerin DIC yöntemi ile analizinde de değişkenliklerin olması beklenmektedir. Bu nedenle, tüm numunelerin çekme deneyi sırasında alınan ilk görüntüleri kullanılarak her bir numune için renk histogramları elde edilmiştir (Şekil 4.3).

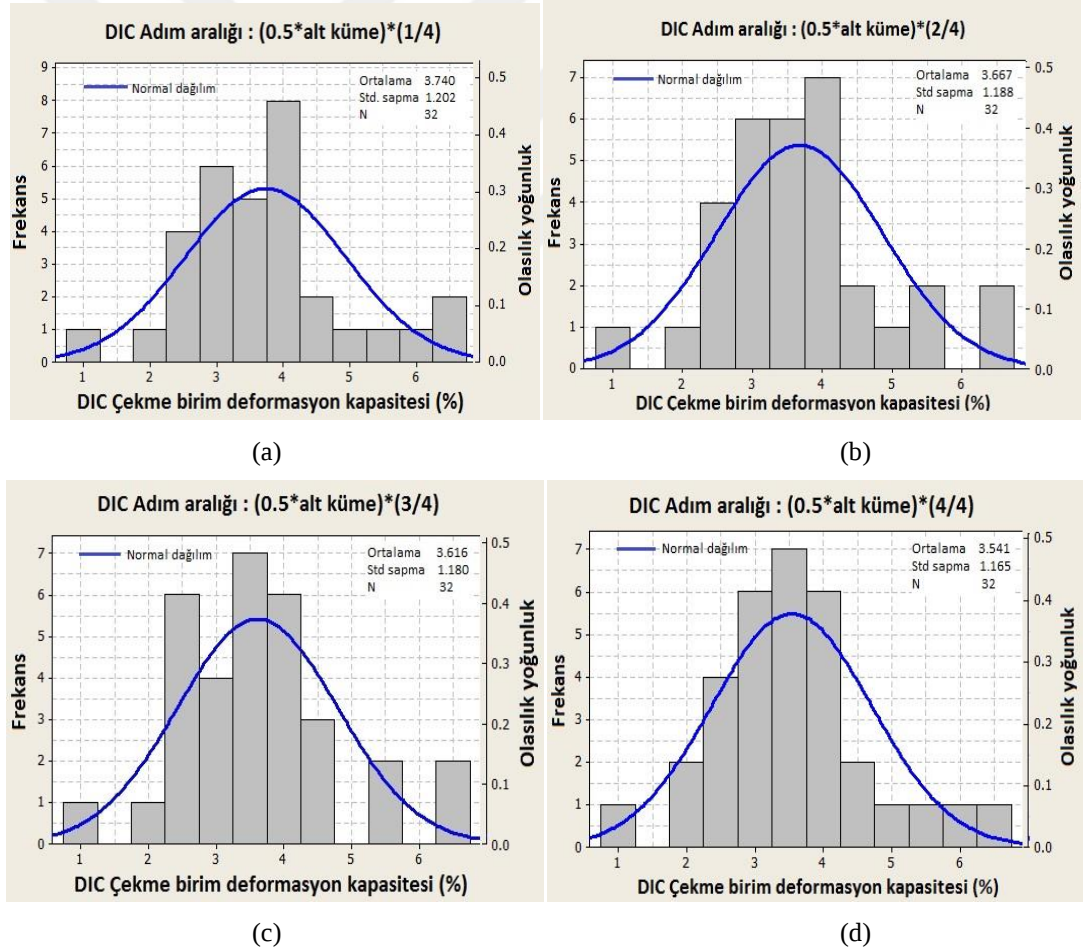
Yüksek çözünürlüklü (0,026 piksel/ $\mu\text{m}$ ) görüntülerde, düşük çözünürlüklü (0,013 piksel/ $\mu\text{m}$ ) görüntülere kıyasla daha fazla sayıda piksel bulunması nedeniyle, yüksek ve düşük çözünürlüklü görüntülerin histogramlarının altında kalan alanlarda belirgin bir seviye farklılığı bulunmaktadır. Sayısal olarak incelendiğinde yüksek çözünürlükte 2 milyon piksel bulunurken, düşük çözünürlükteki piksel değeri 500 bin mertebelerindedir. Seyrek beneklendirilen numunelerde benek gri seviyesinin 150 mertebelerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Yoğun beneklendirilen örneklerde ise benek gri seviyesinin 50 ve 150 mertebelerinde yoğunlaştığı, kontrollü aydınlatma durumunda 150 seviyesinde yoğunlaşmanın daha fazla olduğu ancak normal aydınlatma durumunda yoğunlaşmanın 50 seviyesine yöneldiği tespit edilmiştir.



Şekil 4.3 Numunelerin incelenen yüzey alanı renk histogramları

### 4.3 Kompozitlerin DIC ile Elde Edilen Birim Deformasyon Kapasiteleri

Analizi yapılan 32 adet numune görüntüsünün (benek yoğunluğu, aydınlatma ve çözünürlük parametreleri değiştirilmiş) DIC çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişimleri Şekil 4.4'te görülmektedir. Gerçek LVDT ve DIC yöntemleri ile elde edilen çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişimler; ortalama, standart sapma ve değişkenlik katsayısı Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Buna göre; DIC verilerinin ortalama ve standart sapma değerleri gerçek LVDT değerlerine göre büyük iken, değişkenlik katsayıları değerleri daha küçüktür. DIC'de adım aralığının artmasıyla ortalama ve standart sapma verilerinde bir miktar azalma görülürken, değişkenlik katsayısı değerlerinde ise bir miktar artış tespit edilmiştir.



Şekil 4.4 DIC çekme birim deformasyon kapasitelerindeki değişim

Tablo 4.2 LVDT ve DIC yöntemlerinden elde edilen çekme birim deformasyon kapasitesindeki değişimler\*

| Birim Şekil Değiştirme ölçüm metodları | Ortalama (%) | Standart sapma(%) | Değişkenlik katsayısı(%) |
|----------------------------------------|--------------|-------------------|--------------------------|
| Gerçek LVDT                            | 3,383        | 1,149             | 33,96                    |
| DIC (0,5*alt küme)*(1/4)               | 3,740        | 1,202             | 32,14                    |
| DIC (0,5*alt küme)*(2/4)               | 3,667        | 1,188             | 32,40                    |
| DIC (0,5*alt küme)*(3/4)               | 3,616        | 1,180             | 32,63                    |
| DIC (0,5*alt küme)*(4/4)               | 3,541        | 1,165             | 32,90                    |

\*32 adet numuneden elde edilen ortalama değerlerdir.

#### 4.4 Maksimum Gerilme Noktasına Göre Birim Şekil Değiştirmelerin Kıyaslanması

Tepe noktalarına göre değerlendirme sonuçları incelenip 8 farklı durum için analizler yapılmıştır. Her bir durum için 4 farklı numune ve her bir alt küme için 4 farklı adım aralığında incelemeler yapılmış ve sonuçlar EK-B’de verilmiştir. Farklı 8 durum için elde edilen ortalama değerlendirme sonuçları Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.3 Maksimum gerilme noktasına göre LVDT ve DIC birim şekil değiştirmeleri kıyaslama sonuçları

| Satır No | Numune Kodu | Numune İsimleri                                                       | $(\epsilon_{DIC} / \epsilon_{LVDT}) \times 100$ |
|----------|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 1        | AFSCIHR     | Seyrek benek (FS), Kontrollü aydınlatma (CI), Yüksek çözünürlük (HR)  | 106,4                                           |
| 2        | AFSCILR     | Seyrek benek (FS), Kontrollü aydınlatma (CI), Düşük çözünürlük (LR)   | 117,1                                           |
| 3        | AFSUIHR     | Seyrek benek (FS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Yüksek çözünürlük (HR) | 112,4                                           |
| 4        | AFSUILR     | Seyrek benek (FS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Düşük çözünürlük (LR)  | 114,1                                           |
| 5        | ACSCIHR     | Yoğun benek (CS), Kontrollü aydınlatma (CI), Yüksek çözünürlük (HR)   | 117,1                                           |
| 6        | ACSCILR     | Yoğun benek (CS), Kontrollü aydınlatma (CI), Düşük çözünürlük (LR)    | 111,9                                           |
| 7        | ACSUIHR     | Yoğun benek (CS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Yüksek çözünürlük (HR)  | 105,6                                           |
| 8        | ACSUILR     | Yoğun benek (CS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Düşük çözünürlük (LR)   | 112,8                                           |

\*Her bir değer 16 sayısal değer (4 farklı numune ve her alt küme için 4 farklı adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

Bu yöntemle belirlenen hata oranları %1,3 ile %17,1 arasında değişmektedir. Tablo 4.3'ten elde edilen en düşük hatanın seyrek benek, kontrollü aydınlatma ve yüksek çözünürlük (AFSCIHR) koşullarında elde edildiği görülmektedir.

#### 4.5 Maksimum Gerilme Noktasına Kadar Tüm Birim Şekil Değiştirme Değerlerinin Kıyaslanması

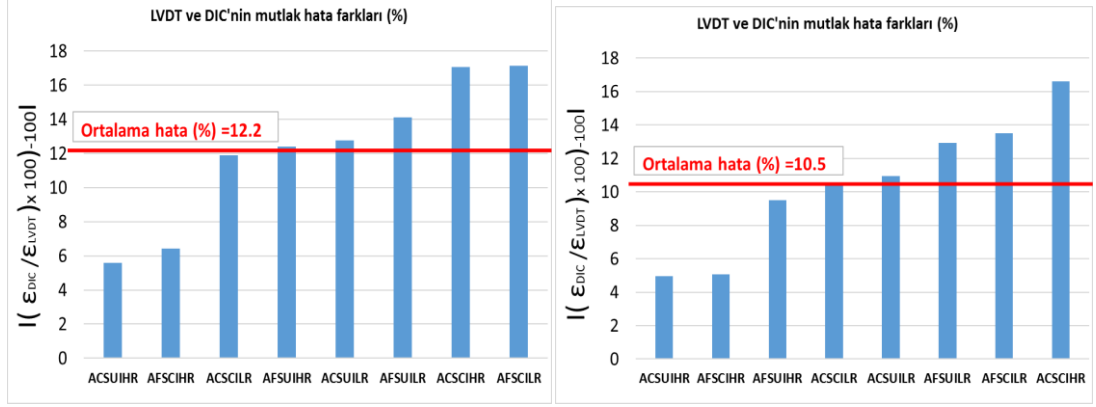
Tüm noktaların hatalarının birlikte değerlendirildiği ikinci yöntemde 8 farklı durum için analizler yapılmıştır. Her bir durum için 4 farklı numune ve her bir alt küme için 4 farklı adım aralığında incelemeler yapılmış ve sonuçlar EK-C'de verilmiştir. 8 farklı durum için elde edilen ortalama değerlendirme sonuçları Tablo 4.4'te verilmiştir. Bu yöntemle belirlenen hata oranları %2 ile %13,1 arasında değişmektedir.

Tablo 4.4 Tüm Birim Şekil Değiştirme Değerlerine göre LVDT ve DIC kıyaslama sonuçları

| Satır No | Numune Kodu | Numune İsimleri                                                       | b*100 |
|----------|-------------|-----------------------------------------------------------------------|-------|
| 1        | AFSCIHR     | Seyrek benek (FS), Kontrollü aydınlatma (CI), Yüksek çözünürlük (HR)  | 105,1 |
| 2        | AFSCILR     | Seyrek benek (FS), Kontrollü aydınlatma (CI), Düşük çözünürlük (LR)   | 113,5 |
| 3        | AFSUIHR     | Seyrek benek (FS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Yüksek çözünürlük (HR) | 109,5 |
| 4        | AFSUILR     | Seyrek benek (FS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Düşük çözünürlük (LR)  | 112,9 |
| 5        | ACSCIHR     | Yoğun benek (CS), Kontrollü aydınlatma (CI), Yüksek çözünürlük (HR)   | 116,6 |
| 6        | ACSCILR     | Yoğun benek (CS), Kontrollü aydınlatma (CI), Düşük çözünürlük (LR)    | 110,4 |
| 7        | ACSUIHR     | Yoğun benek (CS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Yüksek çözünürlük (HR)  | 105,0 |
| 8        | ACSUILR     | Yoğun benek (CS), Kontrolsüz aydınlatma (UI), Düşük çözünürlük (LR)   | 110,9 |

\*Her bir değer 16 sayısal değer (4 farklı numune ve her alt küme için 4 farklı adım aralığı) ortalamasını ifade etmektedir.

1. ve 2. yöntem genel olarak kıyaslanacak olursa, bu yöntemlere ait DIC'nin LVDT'ye kıyasla (%) olarak farkını gösteren grafikler Şekil 4.5'te gösterilmiştir. Buna göre 1. yöntemde ortalama %12,2, 2. yöntemde ise ortalama %10,5 farkın (hatanın) olduğu görülmüştür.



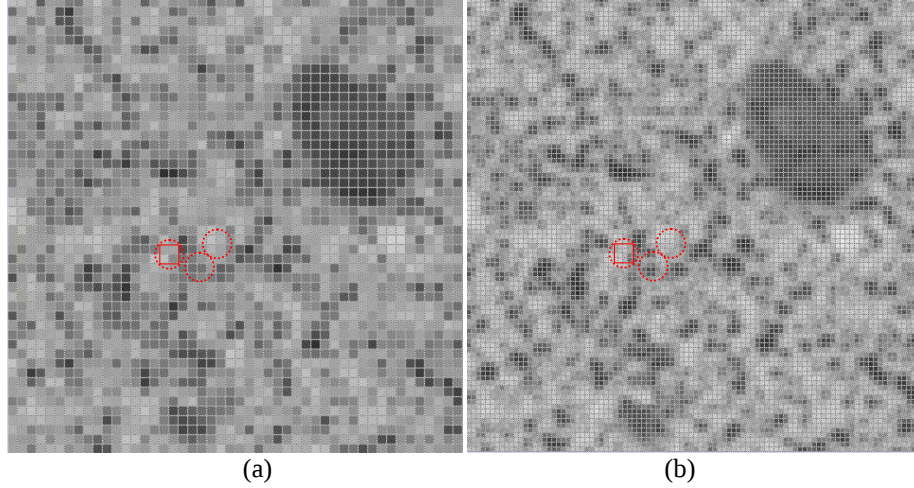
(a) Maksimum gerilme noktasına göre

(b) Tüm birim şekil değiştirme değerlerine göre

Şekil 4.5 DIC'nin LVDT'ye kıyasla mutlak hata farkları

#### 4.6 Çözünürlüğün Hata Oranlarına Etkisi Üzerine Değerlendirilmeler

Bölüm 4.2'de bulunan Şekil 4.3'teki histogramlardan düşük çözünürlüklü numunelerden elde edilen veri (piksel) sayısının yüksek çözünürlüğe oranla daha düşük olduğu net bir şekilde görülebilmektedir. Elde edilen veri sayısı düşük çözünürlük için dörtte bir oranındadır. Söz konusu oran Şekil 4.6'da kırmızı renkle işaretlenen bölgelerle gösterilmiştir. Bu sonuçtan yola çıkılarak, elde edilen verilerin (DIC analizlerinde kullanılan veri noktalarının) yüksek çözünürlüklü görüntülerde düşük çözünürlüklü görüntülere kıyasla 4 kat daha fazla olduğu söylenebilir. Deformasyon sınırlı bir bölgeden başlayan ve yayılım gösteren lokâl bir olgudur. Lokâl deformasyon doğrudan hasar başlangıcı ve gelişimi ile ilgili olduğundan yüksek çözünürlüklü görüntü, deformasyonu tespit etmek için bir ihtiyaçtır (Yang, Sun, Nagarajaiah, Bachilo ve Weisman, 2017). Görüntü çözünürlüğündeki artış ile analizlerdeki hata oranlarının azaltılması mümkündür (Chu, Ranson ve Sutton, 1985). Bu kapsamda, lokâl deformasyondaki küçük gelişimlerin tespiti için yüksek çözünürlüklü ölçümler daha hassas sonuçlar verecektir. Deneysel çalışmalar kapsamında elde edilen hata oranları incelendiğinde de (Tablo 4.2 ve Tablo 4.6) düşük çözünürlüklü numune analizlerinde çoğunlukla hata oranının daha fazla olduğu görülmektedir.



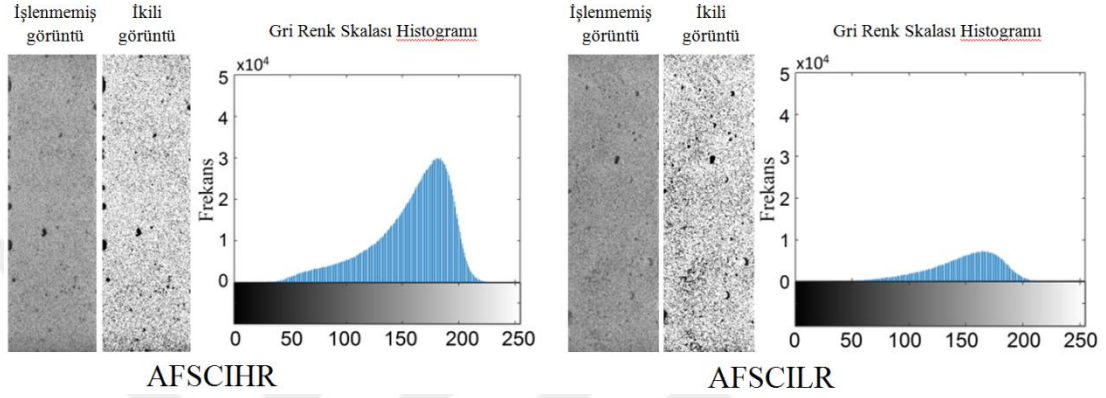
Şekil 4.6 a) Düşük çözünürlük, b) yüksek çözünürlük (örn: ACSCIHR1 numunesi)

#### 4.7 Aydınlatmanın Hata Oranlarına Etkisi Üzerine Değerlendirilmeler

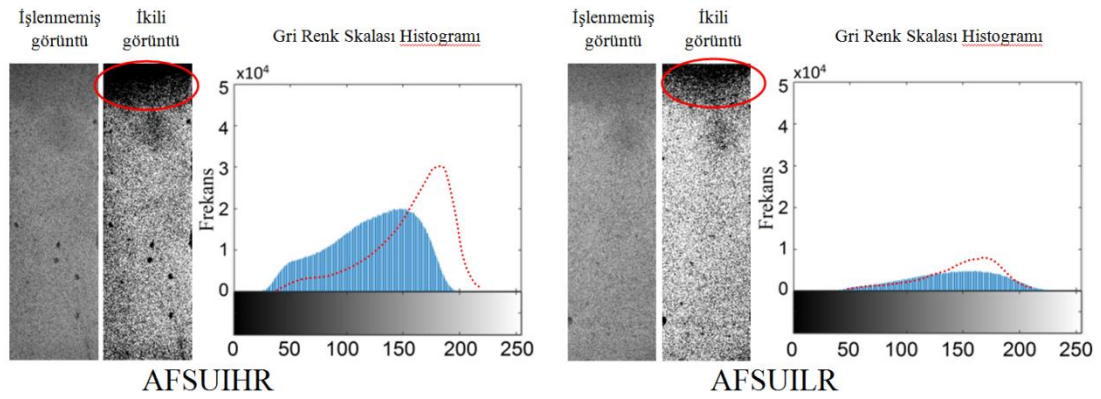
Üretilen seyrek benekli numunelerden temsili 4 tanesi (iki tanesi kontrollü aydınlatma yapılan; diğer ikisi kontrollü aydınlatma yapılmayan) üzerinde bir dizi ilave incelemeler gerçekleştirilmiştir. Analiz edilecek bölgelerin gri renk skalalarına ait histogramlar yazılan bir MATLAB algoritması aracılığıyla elde edilmiştir (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). Ayrıca, beneklerin daha belirgin görülmesi amacıyla bu bölgelere ait ikili (binary) görüntüler oluşturulmuştur. İkili görüntüler elde edilirken, gri renk skalasının medyan değeri (127) referans alınarak bu değerden küçük ve büyük değerler sırasıyla 0'a ve 255'e ötelenmiştir. İkili görüntü sisteminde 0 değeri siyahı 255 değeri ise beyazı temsil etmektedir. Analiz sonuçlarına göre, kontrollü aydınlatmanın yapılmadığı durumda siyah renk değerinin daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun temel nedeni kontrolsüz aydınlatma durumunda oda lambasının yukarıda olması nedeniyle numune yüzeyinde meydana gelen gölgelerdir. Oluşan gölgelenmenin, analizde yazılım tarafından hata payını artırıcı ek benekler gibi algılandığı MATLAB algoritması yardımıyla elde edilen ikili görüntüler yardımıyla ispatlanmıştır (Şekil 4.8).

Numunelerde kontrollü aydınlatma sağlandığında, yapay gölgelenmelerin olmadığı ve kontrastın daha belirgin olduğu elde edilen histogramlarda görülmektedir (Şekil 4.7). Kontrolsüz aydınlatma ortamında (oda ışığında) elde

edilmiş görüntülerde ise numune üzerinde gölgelenmelerin oluşması gri ton değerlerinin daha fazla görüldüğü bir histograma neden olmuştur (Şekil 4.8). Diğer taraftan düşük çözünürlükte alınan görüntülerle aydınlatma kontrolünün belirgin bir faydası olmamıştır. Çünkü düşük çözünürlükte alınan görüntülerde zaten analiz verisi kısıtlı olduğu için hata oranı baştan yüksektir.



Şekil 4.7 Kontrollü aydınlatma yapılan numunelerin gri renk skalası histogramları



Şekil 4.8 Kontrollü aydınlatma yapılmayan numunelerin gri renk skalası histogramları

#### 4.8 DIC Yöntemi ile Çatlak Analizi

Yapılan çalışmada 32 adet numune içerisinde en düşük hata oranını veren seri olan seyrek benek, kontrollü aydınlatma ve yüksek çözünürlük (AFSCIHR) ile çatlak analizi yapılmıştır. Çatlak analizi yapılan numunelerin MATLAB çıktıları EK-D'de sunulmuştur. 4 farklı adım aralığında analizleri tamamlanan numunelerin deformasyon haritaları, çatlak sayıları ve genişlikleri Tablo 4.5'te gösterilmiştir.

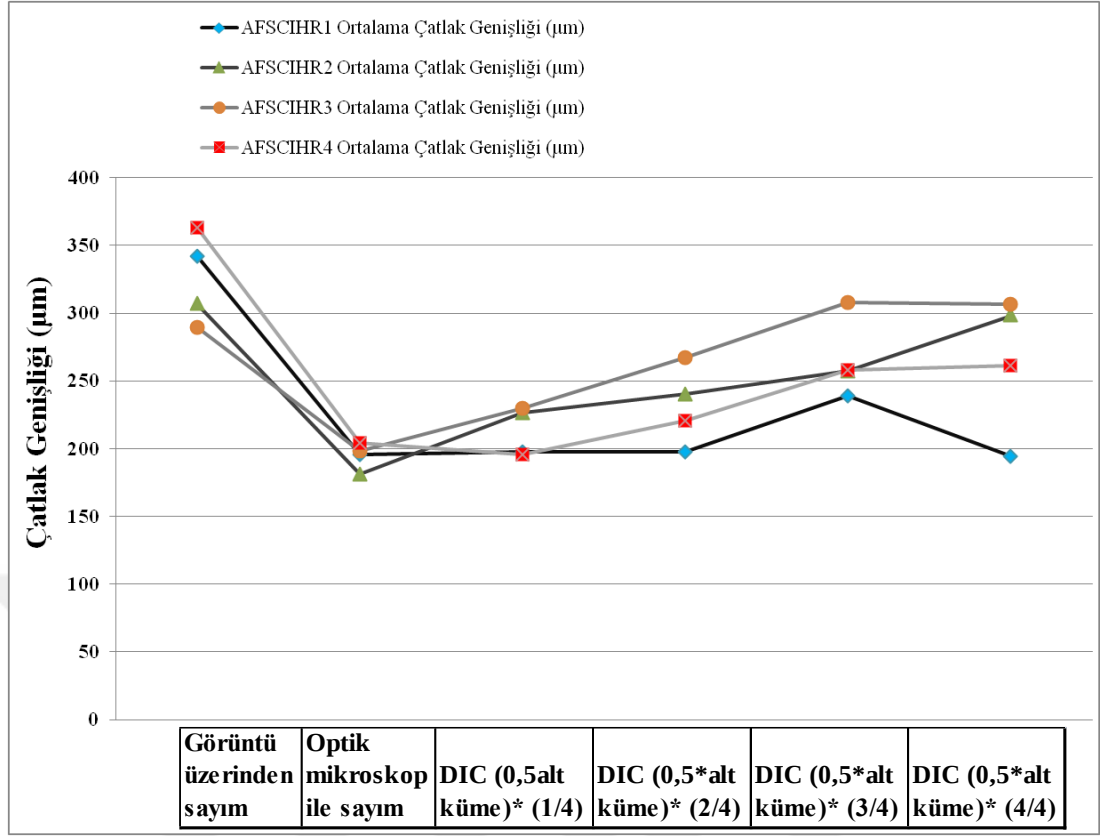
Seçilen numunelerin maksimum gerilmedeki fotoğrafları kullanılarak çatlak sayıları görüntü işleme programı ile manuel olarak (göz ile sayım) belirlenmiştir. Ayrıca 250 kat büyütme özelliğine sahip optik el mikroskobu ile de çatlak sayıları elde edilmiştir. Fotoğraf üzerinden ve optik mikroskop ile yapılan çatlak analizinde kullanılan toplam çatlak genişliğı ortalama bir değer olup 4 adet LVDT’den elde edilen uzama değerinin ortalamasıdır. Ortalama atlak genişliğı ise 4 Adet LVDT’den elde edilen uzama değerlerinin çatlak sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir. VIC-2D yazılımında elde edilen veriler kullanılarak; bu amaçla bir MATLAB algoritması yardımıyla çatlak sayıları ve genişlikleri numune üzerindeki sanal LVDT kullanılarak elde edilmiştir. Fotoğraf üzerinden ve optik mikroskopla elde edilen ortalama çatlak genişliğı ile MATLAB’ten elde edilen ortalama çatlak genişliğı kıyaslanmıştır (şekil 4.9).

Tablo 4.5 AFSCIHR serisi için çatlak analizi sonuçları

| Numune Adı |                                | Görüntü üzerinden sayım* | Optik mikroskop ile sayım* | DIC (0,5alt küme)* (1/4) | DIC (0,5*alt küme)* (2/4) | DIC (0,5*alt küme)* (3/4) | DIC (0,5*alt küme)* (4/4) |
|------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| AFSCIHR1   | atlak Sayısı                  | 8                        | 14                         | 17                       | 15                        | 12                        | 10                        |
|            | Toplam atlak Genişliğı (μm)   | 2736                     | 2736                       | 3355                     | 2966                      | 2869                      | 1945                      |
|            | Ortalama atlak Genişliğı (μm) | 342                      | 195                        | 197                      | 198                       | 239                       | 194                       |
| AFSCIHR2   | atlak Sayısı                  | 13                       | 22                         | 21                       | 20                        | 19                        | 15                        |
|            | Toplam atlak Genişliğı (μm)   | 3990                     | 3990                       | 4758                     | 4802                      | 4893                      | 4475                      |
|            | Ortalama atlak Genişliğı (μm) | 307                      | 181                        | 227                      | 240                       | 258                       | 298                       |
| AFSCIHR3   | atlak Sayısı                  | 13                       | 19                         | 17                       | 14                        | 12                        | 12                        |
|            | Toplam atlak Genişliğı (μm)   | 3762                     | 3762                       | 3907                     | 3740                      | 3696                      | 3680                      |
|            | Ortalama atlak Genişliğı (μm) | 289                      | 198                        | 230                      | 267                       | 308                       | 307                       |
| AFSCIHR4   | atlak Sayısı                  | 9                        | 16                         | 19                       | 16                        | 13                        | 11                        |
|            | Toplam atlak Genişliğı (μm)   | 3268                     | 3268                       | 3716                     | 3525                      | 3356                      | 2872                      |
|            | Ortalama atlak Genişliğı (μm) | 363                      | 204                        | 196                      | 220                       | 258                       | 261                       |

\*Toplam atlak genişliğı için 4 adet LVDT’den elde edilen uzama değerleri ortalaması kullanılmıştır.

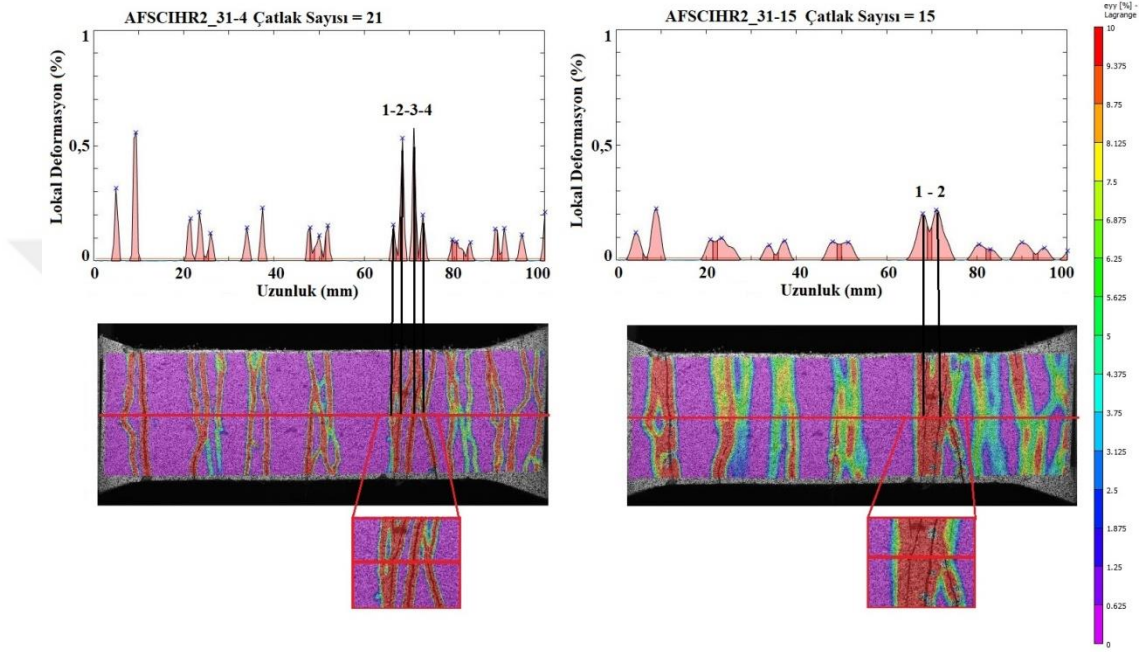
\*\* Ortalama atlak genişliğı ise 4 Adet LVDT’den elde edilen uzama değerlerinin çatlak sayısına bölünmesi ile elde edilmiştir.



Şekil 4.9 AFSCIHR serisi için ortalama çatlak genişliği grafiği

Görüntü üzerinden bulunan çatlak sayıları optik mikroskop ile elde edilen çatlak sayılarından yaklaşık %40 daha az sayılmıştır. Görüntü üzerinde göz ile çatlak sayımı çok dar çatlakların analizinde hatalara neden olabilmektedir. Optik mikroskop ile DIC analizleri kıyaslandığında en küçük analiz adım aralığında benzer sonuçlar elde edildiği söylenebilir. Tablo 4.5 incelendiğinde DIC analizinde adım aralığı arttıkça çatlak sayılarında azalma olduğu görülmektedir. AFSCIHR2 numunesinin en küçük analiz adım aralığında (DIC(0,5\*alt küme)\*(1/4)) ve en büyük analiz adım aralığında (DIC(0,5\*alt küme)\*(4/4)) elde edilen analiz görüntüleri incelendiğinde sanal LVDT (kırmızı çizgi) üzerindeki çatlak sayısında toplamda 6 adet azalma olduğu görülmektedir (Şekil 4.10). 31\*31 piksel alt küme boyutunda ve sırasıyla 4, 8, 11, 15 piksel analiz adım aralıklarıyla analiz edilen AFSCIHR2 numunesindeki çatlak sayısının analiz adım aralığı artışıyla azalması incelenmiştir. Belirlenen yerel çatlak bölgesi incelendiğinde 31\*31 piksel alt küme ve 4 piksel analiz adım aralığındaki analizinde seçilen bölgede 4 adet çatlak bulunurken, analiz adım aralığının arttığı 31\*31 piksel alt küme ve 15 piksel analiz adım aralığındaki

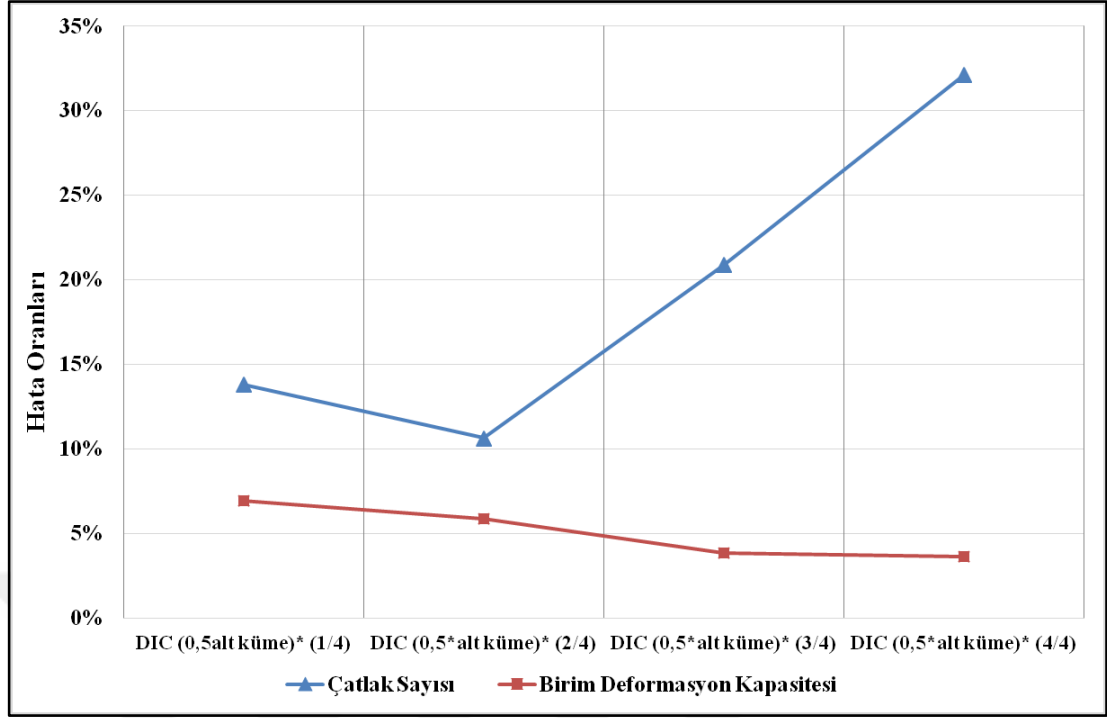
analizinde 2 adet çatlakla düşmektedir. Bu durum analiz adım aralığı arttığında çatlak sayısında azalma (gerçekte aynı çatlak sayısında küçük çatlakların tek bir çatlakmış gibi görünmesi) olduğunun bir göstergesidir. Tespit edilen çatlak sayısının azalması da ortalama çatlak genişliğinin artmasına neden olmaktadır. Çünkü çatlakların genişlikleri birleşmelerine rağmen program tarafından tespit edilebilmektedir



Şekil 4.10 AFSCIHR2 numunesini DIC(0,5\*alt küme)\*(1/4)) ile DIC(0,5\*alt küme)\*(4/4) analizleri çatlak sayıları kıyaslaması

#### 4.8 DIC Yönteminde Çatlak Analizi ve Birim Şekil Değiştirme için Optimum Analiz Adım Aralığının Belirlenmesi

AFSCIHR serisi için çatlak analizi ve birim deformasyon kapasitesi sonuçlarını elde edilmiştir. Gerçek LVDT ile DIC analizleri kıyaslanarak elde edilen hata oranları incelendiğinde birim deformasyon kapasitesi için genellikle analiz adım aralığı arttıkça hata oranları azalmaktadır. Çatlak analizinde ise genellikle analiz adım aralığı azaldıkça manuel ölçümle daha tutarlı sonuçlar elde edilmektedir. Bu nedenle hem birim deformasyon kapasitesi hem de çatlak analizi sonuçları için optimum analiz parametrelerini belirlenmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.11 Birim deformasyon kapasitesi ile çatlak sayıları için elde edilen hata oranları

Şekil 4.11 incelendiğinde DIC (0,5\*alt küme)\*(2/4) analiz parametresi optimum değer olarak görülmektedir. Bu değer analiz adım aralığının değerinin alt küme boyutunun % 25'i olması gerektiğini ifade etmektedir. Birim deformasyon kapasitesi için yapılan DIC analizlerinde büyük adım aralığında çalışmak gerçek LVDT ile daha tutarlı sonuçlar vermektedir. Ancak çatlak analizinde bu durum gerçekleşmemektedir. Hem birim deformasyon kapasitesi hem de çatlak analizi sonuçlarının inceleneceği bir çalışmada optimum analiz parametreleri ile çalışmak daha tutarlı olacaktır.

## BÖLÜM BEŞ

### SONUÇLAR VE ÖNERİLER

#### 5.1 Sonuçlar

DIC analizini etkileyen önemli parametreler; benekleme metodu, alt küme boyutu, analiz adım aralığı, korelasyon metodu, aydınlatma ve kamera özellikleridir. 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; deformasyon değerleri, çatlak sayıları ve çatlak genişlikleri hesaplanabilmektedir. Tez kapsamında, deformasyon analizi ve çatlak haritalama çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Deformasyon analizinde DIC yöntemi ile gerçek LVDT sisteminden elde edilen sonuçlar farklı yöntemlerle kıyaslanarak elde edilen hatalar neticesinde numune; benekleme, aydınlatma, çözünürlük ve analiz parametreleri açısından kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

1) DIC analizleri için kullanılan 32 adet numunenin gerçek LVDT cihazları ölçümüyle elde edilen ortalama çekme birim deformasyon kapasitesi %3,38'dir. DIC'nin farklı adım aralıklarında;  $(0,5 \cdot \text{alt küme}) \cdot (1/4)$ ,  $(0,5 \cdot \text{alt küme}) \cdot (2/4)$ ,  $(0,5 \cdot \text{alt küme}) \cdot (3/4)$  ve  $(0,5 \cdot \text{alt küme}) \cdot (4/4)$  için ortalama çekme birim deformasyon kapasiteleri sırasıyla %3,74, %3,67, %3,62 ve %3,54'tür. Ortalama çekme birim deformasyon kapasiteleri dikkate alındığında DIC analiz sonuçlarının gerçek LVDT'ye göre hata oranları %5-11 aralığındadır. Ayrıca 32 adet numunenin ortalama çekme dayanımı 2,75 MPa'dır

2) Örnekleri birim deformasyon farklılıklarından bağımsız hale getirecek hata analiz yöntemleri değerlendirilmiş ve bunun sonucunda 2 (iki) yöntem önerilmiştir.

3) Bölüm 3.6'da tarif edilen 1. ve 2. yöntem kıyaslanacak olursa; DIC verilerinin LVDT verilerine göre 1. yöntemde %12,2, 2. yöntemde ise %10,5 oranında farklılıklar gösterdiği belirlenmiştir.

4) 1. ve 2. yöntemde DIC ile elde edilen birim şekil değişimi değerleri çoğunlukla LVDT'ye kıyasla bir miktar daha fazladır. 1. ve 2. yöntemdeki değerlerin (Tablo 4.3 ve Tablo 4.4) çoğunluğunun 100'den fazla olması bu durumun göstergesidir. Bu durum, DIC analizlerinde çok fazla veri tarandığından kümülatif olarak hata birikmesinden kaynaklanmış olabilir.

5) Çözünürlük etkisi göz önüne alındığında 1. ve 2. yöntemde yüksek çözünürlük etkisi altında daha az hata elde edilmiştir (numunelerin %75'de bu durum görülmüştür).

6) Adım aralığı etkisi incelendiğinde; deformasyon kıyaslamasında hem 1. yöntemde hem de 2. yöntemde adım aralığı büyüdükçe (alt küme boyutunun yarısına eşit büyüklükteki adım aralığı boyutu) daha küçük hatalar elde edilmiştir.

7) Seyrek benek, kontrollü aydınlatma ve yüksek çözünürlük şartlarında gerçekleştirilen deneyler; hem 1. hem de 2. yöneme (sırasıyla % 6,4 ve 5,1) göre en az hata oranına sahip deney şartlarıdır. Ayrıca yoğun benek, kontrolsüz aydınlatma ve yüksek çözünürlük şartlarında da hem 1. hem de 2. yöntemde % 5,6 ve % 5 hata oranı elde edilmiştir.

8) AFSCIHR serisi için elde edilen çatlak sayısı ve genişliği açısından, en küçük analiz adım aralığına sahip (  $(0,5 * \text{alt küme}) * (1/4)$  ) DIC ölçümü ve optik mikroskop ile ölçüm değerleri birbirlerine oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Optik mikroskop çatlak sayımında ortalama çatlak sayısı 18 ve DIC analizi için en küçük adım aralığında ortalama 19 olarak bulunmuştur. Ortalama çatlak genişliği optik mikroskop ölçümü ile  $195\mu\text{m}$  ve en küçük analiz adım aralığına sahip (  $(0,5 * \text{alt küme}) * (1/4)$  ) DIC yöntemi ile  $212\mu\text{m}$  olarak hesaplanmıştır. Bazı örneklerde görüntü üzerinde göz ile sayım yöntemiyle gözlenemeyen çatlakların DIC yöntemi ile tespit edilebildiği ispatlanmıştır. Bu durum DIC'nin doğru analiz parametreleri seçilirse geleneksel deformasyon ölçüm yöntemlerinden üstünlüğünü ortaya koymaktadır.

## 5.2 Öneriler

Benekleme çalışması her zaman DIC analizleri açısından belirleyici bir etken olmuştur. Bu nedenle benek desenini üretiminin nasıl sağlandığı önemlidir. Halen benekleme yöntemi ile ilgili belirli bir standart geliştirilmemiştir. Benekleme metodları olan spreyci boya, boya tabancası ve stampa ile çok sayıda deney yapılarak standartlaştırılmalı ve sayısallaştırılmalıdır.

Aydınlatma etkisini daha iyi incelemek için ışık etkisi sayısallaştırılarak analiz sonuçlarına etkisi incelenmelidir.

3. boyutta oluşabilecek deformasyonlar (out-of plane) ve dönmeleri 2D-DIC ile analiz etmek güçtür. Bu nedenle 2 kameralı sistem olan 3D-DIC sistemine geçilerek 3 boyutlu deformasyon analizlerine geçilmelidir.

## KAYNAKLAR

- Abanto-Bueno, J., Lambros J. 2002. "Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation." *Engineering Fracture Mechanics*, 69, 1695-1711.
- Aktaş, T., & Aslanova (2015). G. Damar tanıma sistemi için ışık kaynağı geliştirme. *Electronic Journal of Vocational Colleges*, 210-218.
- Aparna, M. L., Chaitanya, G., Srinivas, K., & Rao, J. A. (2015). Fatigue testing of continuous gfrp composites using digital image correlation (DIC) technique a review. *Materials Today: Proceedings*, 2(4), 3125-3131.
- ARAMIS v5.3.0 (2004). *User Manuel*. 15 Haziran 2016, <http://www.gom.com/index.html>.
- Bay, B.K., Smith, T.S., Fyhrie, D.P., Saad, M. (1999). Digital volume correlation: Three dimensional strain mapping using X-ray tomography. *Experimental Mechanics*, 39(3), 217–226.
- Besnard, G., Guérard, S., Roux, S., & Hild, F. (2011). A space–time approach in digital image correlation: Movie-DIC. *Optics and Lasers in Engineering*, 49(1), 71-81.
- Blanc, N. (2001). CCD versus CMOS—has CCD imaging come to an end? In: Fritsch, D., Spiller, R. (Eds.), *Photogrammetric Week 01*. Wichmann, 131–137.
- Bomarito, G. F., Hochhalter, J. D., & Cannon, A. H. (2016). Image Correlation Pattern Optimization for Micro-Scale In-Situ Strain Measurements. 8.SEM International Congress, Orlando-FL-United States.
- Bomarito, G. F., Hochhalter, J. D., Ruggles, T. J., & Cannon, A. H. (2017). Increasing accuracy and precision of digital image correlation through pattern optimization. *Optics and Lasers in Engineering*, 91, 73-85.

- Chen, J., Jin, G., Meng, L. (2007). “Applications of Digital Correlation Method to Structure Inspection”. *Tsinghua Science and Technology Journal*, 12(3), 237-243.
- Cooreman, S., Lecompte, D., Sol, H., Vantomme, J., & Debruyne, D. (2008). Identification of mechanical material behavior through inverse modeling and DIC. *Experimental Mechanics*, 48(4), 421-433.
- Correlated Solutions (2016a). *VIC-2D, Testing Guide, Reference Manuel*. 15 Kasım 2016, <http://correlatedsolutions.com/>.
- Correlated Solutions (2016b). *VIC-2D users’ manual*. 15 Kasım 2016 <http://correlatedsolutions.com/>.
- Correlated Solution (2009). *Digital Image Correlation: Overview of principles and Software*, University of South Carolina, SEM workshop.
- Chu, T. C., Ranson, W. F., & Sutton, M. A. (1985). Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics. *Experimental mechanics*, 25(3), 232-244.
- DANTEC DYNAMICS (2015). New Istra4D release for Digital Image Correlation (DIC). 15 Haziran 2016, <http://www.dantecdynamics.com/>.
- Dhawale, A. W., & Joshi, V. P. (2013). Engineered cementitious composites for structural applications. *International journal of application or Innovation in Engineering & Management*, 2, 198-205.
- Felekoglu, B., Tosun-Felekoglu, K., Ranade, R., Zhang, Q., & Li, V. C. (2014). Influence of matrix flowability, fiber mixing procedure, and curing conditions on the mechanical performance of HTPP-ECC. *Composites Part B: Engineering*, 60, 359-370.
- Felekoglu, B., & Keskinates, M. (2016). Multiple cracking analysis of HTPP-ECC by digital image correlation method. *Computers and Concrete*, 17(6), 831-848.

- Fossum, E. R. (1997). CMOS image sensors: Electronic camera-on-a-chip. *IEEE transactions on electron devices*, 44(10), 1689-1698.
- Gali, S., & Subramaniam, K. V. (2017). Investigation of the dilatant behavior of cracks in the shear response of steel fiber reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 152, 832-842.
- Gao, G., Yao, W., Xia, K., & Li, Z. (2015). Investigation of the rate dependence of fracture propagation in rocks using digital image correlation (DIC) method. *Engineering Fracture Mechanics*, 138, 146-155.
- Gu, G. (2015). A comparative study of random speckle pattern simulation models in digital image correlation. *International Journal for Light and Electron Optics*, 126(23), 3713-3716.
- Güleç ve Tulun (1997). Physico-Chemical and Petrographical Studies of Old Mortars and Plasters of Anatolia. *Cement and Concrete Research*, Vol. No. 2, pp 227-234.
- González, G. L. G., Rodrigues, L. D., Meggiolaro, M. A., & Freire, J. L. F. (2016). Strains in Shallow and Deep Notches Using Two DIC Algorithms. *In Advancement of Optical Methods in Experimental Mechanics*, 3, 281-294.
- Haddadi, H., & Belhabib, S. (2008). 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.
- Hain, R., Kähler, C. J., & Tropea, C. (2007). Comparison of CCD, CMOS and intensified cameras. *Experiments in fluids*, 42(3), 403-411.
- Hamrat, M., Boulekbache, B., Chemrouk, M., & Amziane, S. (2016). 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.

- Hedayat, A., & Ashur, S. (2015). Digital image correlation and its application in an undergraduate Civil Engineering Materials Laboratory.
- Heinz, S. R., & Wiggins, J. S. (2010). Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation. *Polymer Testing*, 29(8), 925-932.
- Hild, F., Raka, B., Baudequin, M., Roux, S., & Cantelaube, F. (2002). Multiscale displacement field measurements of compressed mineral-wool samples by digital image correlation. *Applied Optics*, 41(32), 6815-6828.
- Hild, F., & Roux, S. (2006). Digital image correlation: from displacement measurement to identification of elastic properties—a review. *Strain*, 42(2), 69-80.
- Hua, T., Xie, H., Wang, S., Hu, Z., Chen, P., & Zhang, Q. (2011). Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation. *Optics & Laser Technology*, 43(1), 9-13.
- Ikai, S., Reichert, J. R., Rodrigues, A. V., & Zampieri, V. A. (2010). Asbestos-free technology with new high toughness polypropylene (PP) fibers in air-cured Hatschek process. *Construction and Building Materials*, 24(2), 171-180.
- INSTRON (2017). *DIC Replay, 2D Digital Image Correlation Software*. 3 Ocak 2018, <http://www.instron.com.tr/>.
- JSCE (2008). “Recommendations For Design And Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites With Multiple Fine Cracks (HPRCC).” JSCE: 1-88. *Japan Society Of Civil Engineers*, Japan.
- Kanburoğlu Ö. (2004). *A'dan Z'ye Fotoğraf*. İstanbul, Türkiye, Say Yayınları.
- Kang, J., Ososkov, Y., Embury, J. D., & Wilkinson, D. S. (2007). Digital image correlation studies for microscopic strain distribution and damage in dual phase steels. *Scripta Materialia*, 56(11), 999-1002.

- Ke, X. D., Schreier, H. W., Sutton, M. A., & Wang, Y. Q. (2011). Error assessment in stereo-based deformation measurements. *Experimental mechanics*, 51(4), 423-441.
- Keoleian, G., Kendall, A., Lepech, M., and Li, V. C. (2006). Guiding the Design and Application of New Materials for Enhancing Sustainability Performance: Framework and Infrastructure Application. *Proceedings, Materials Research Society*, 895.
- Khoo, S. W., Karuppanan, S., & Tan, C. S. (2016). A review of surface deformation and strain measurement using two-dimensional digital image correlation. *Metrology and Measurement Systems*, 23(3), 461-480.
- Kim, S. G., Park, J. K., & Kim, D. J. (2018). Direct tensile responses of aramid fiber reinforced cementitious composites and textile reinforced cementitious composites with 3D spacer fabric at high strain rates. *Construction and Building Materials*, 168, 232-243.
- Krstulović-Opara, L., Surjak, M., Vesenjāk, M., Tonković, Z., Kodvanj, J., & Domazet, Ž. (2015). Comparison of infrared and 3D digital image correlation techniques applied for mechanical testing of materials. *Infrared physics & technology*, 73, 166-174.
- LAVISION (BT). *Strain Master*. 15 Haziran 2016, <http://www.lavision.de/en/>.
- Lecompte, D., Smits, A., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., & Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and lasers in Engineering*, 44(11), 1132-1145.
- Li, V. C. (1993). 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.

- Li, V.C., Mishra, D.K., & Wu H.C. (1995), "Matrix Design for Pseudo Strain-Hardening Fiber Reinforced Cementitious Composites". *Materials and Structures*, 586-595
- Li, V. C., & Maalej, M. (1996). Toughening in cement based composites. Part II: Fiber reinforced cementitious composites. *Cement and Concrete Composites*, 18(4), 239-249.
- Li, V. C., & Kanda, T. (1998). Innovations Forum: Engineered cementitious composites for structural applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.
- Li, V. C. (2002). Advances in ECC research. *ACI Special Publications*, 206, 373-400.
- Li, V. C. (2012). Can concrete be bendable?. *American Scientist*, 100(6), 484-93.
- Liang, Z., Yin, B., Liu, H., Mo, J., & Wang, S. (2015). Displacement measurement of specimen surfaces with damaged areas by digital image correlation. *Measurement*, 76, 183-188.
- Liu, X. Y., Li, R. L., Zhao, H. W., Cheng, T. H., Cui, G. J., Tan, Q. C., & Meng, G. W. (2015). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy. *International Journal for Light and Electron Optics*, 126(23), 4206-4211.
- Litwiller, D. (2001). Ccd vs. cmos. *Photonics spectra*, 35(1), 154-158.
- Lu, C., Li, V. C., & Leung, C. K. (2018). Flaw Characterization And Correlation With Cracking Strength In Engineered Cementitious Composites (ECC). *Cement And Concrete Research*, 107, 64-74.
- Magnan, P. (2003). 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(1-3), 199-212.
- Mahal, M., Blanksvärd, T., Täljsten, B., & Sas, G. (2015). Using digital image correlation to evaluate fatigue behavior of strengthened reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 105, 277-288.
- Mashiwa, N., Furushima, T., & Manabe, K. (2017). 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.
- Mazzoleni, P., Matta, F., Zappa, E., Sutton, M. A., & Cigada, A. (2015). Gaussian pre-filtering for uncertainty minimization in digital image correlation using numerically-designed speckle patterns. *Optics and Lasers in Engineering*, 66, 19-33.
- Mehdikhani, M., Aravand, M., Sabuncuoglu, B., Callens, M. G., Lomov, S. V., & Gorbatiikh, L. (2016). Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation. *Composite Structures*, 140, 192-201.
- Mguil-Touchal, S., Morestin, F., & Brunei, M. (1970). Various experimental applications of digital image correlation method. *WIT Transactions on Modelling and Simulation*, 17.
- Mudassar, A. A., & Butt, S. (2015). Improved Digital Image Correlation method. *Optics and Lasers in Engineering*, 87, 156-167.
- Naaman, A. E. (2003). Engineered Steel Fibers With Optimal Properties For Reinforcement Of Cement Composites. *Journal Of Advanced Concrete Technology*, 1(3), 241-252.
- Ohno, M., & Li, V. C. (2014). A feasibility study of strain hardening fiber reinforced fly ash-based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 57, 163-168.

Optecal (2015). *Tutorials*. 15 Haziran 2016, <http://www.optecal.com/>.

Pan, B., Xie, H., Wang, Z., Qian, K., & Wang, Z. (2008). Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns. *Optics express*, 16(10), 7037-7048.

Pan, B. (2011). Recent progress in digital image correlation. *Experimental Mechanics*, 51(7), 1223-1235.

Pérez, J. A., Coppieters, S., & Debruyne, D. (2015). Influence of the paint coating thickness in digital image correlation experiments. *World Acad Sci Eng Technol Int J Comput Electr Autom Control Inf Eng*, 9, 1626-1630.

Peters, W. H., & Ranson, W. F. (1982). Digital imaging techniques in experimental stress analysis. *Optical engineering*, 21(3), 427-31.

Pierré, J. E., Passieux, J. C., Périé, J. N., Bugarin, F., & Robert, L. (2016). Unstructured finite element-based digital image correlation with enhanced management of quadrature and lens distortions. *Optics and Lasers in Engineering*, 77, 44-53.

Ramos, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., ... & Moreira, P. M. G. P. (2015). 2D and 3D Digital Image Correlation in Civil Engineering—Measurements in a Masonry Wall. *Procedia Engineering*, 114, 215-222.

Reu, P. (2012). Stereo-Rig Design: Creating the Stereo-Rig Layout—Part 1. *Experimental Techniques*, 36(5), 3-4.

Reu, P. (2014). Speckles and their relationship to the digital camera. *Experimental Techniques*, 38(4), 1-2.

Roux, S., Réthoré, J., & Hild, F. (2009). 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.

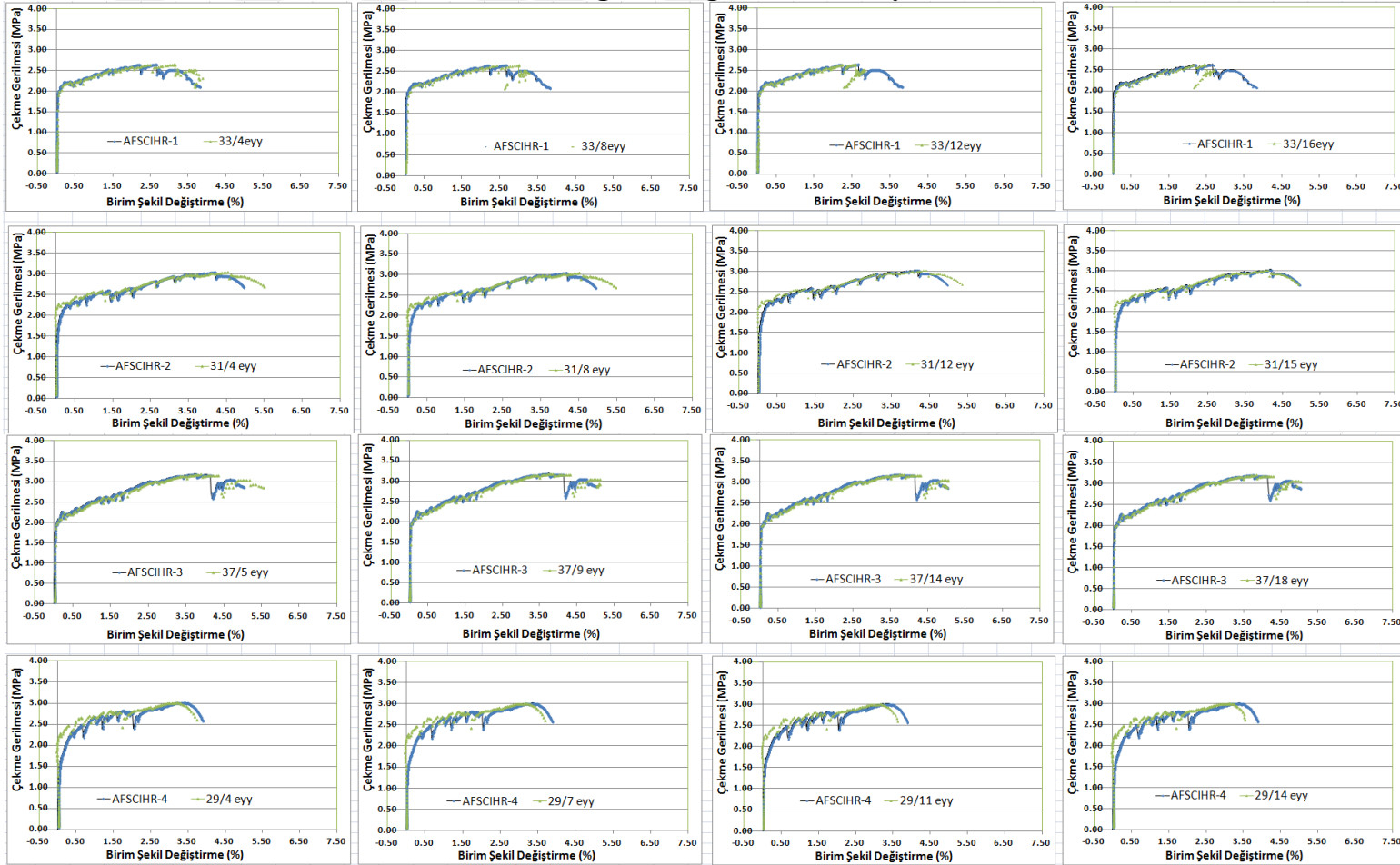
- Sherir, M. A., Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2016). MAT-731: Mechanical & Durability Properties Of Engineered Cementitious Composites With Different Aggregates. *CSCE Annual Conference*, London-England.
- Shih, M. H., & Sung, W. P. (2013). Application of digital image correlation method for analysing crack variation of reinforced concrete beams. *Sadhana*, 38(4), 723-741.
- Su, Y., Zhang, Q., Xu, X., & Gao, Z. (2016). Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors. *Optics and Lasers in Engineering*, 86, 132-142.
- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F., & McNeill, S. R. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*, 1(3), 133-139.
- Sutton, M. A., Yan, J. H., Tiwari, V., Schreier, H. W., & Orteu, J. J. (2008). The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements. *Optics and Lasers in Engineering*, 46(10), 746-757.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., & Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. Springer Science & Business Media.
- Tosun-Felekoglu, K., & Felekoglu, B. (2013). Effects of fibre hybridization on multiple cracking potential of cement-based composites under flexural loading. *Construction and Building Materials*, 41, 15-20.
- TRILION (2013). *Digital Image Correlation Theory Presentation*. 15 Haziran 2016, <https://www.slideshare.net/trilionqualitysystems/dic-presentation-26759932>.
- TS EN 934-2 (2002). Kimyasal Katkılar–Beton, Harç ve Şerbet İçin–Bölüm 2: Beton Katkıları–Tarifler ve Özellikler, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme. *Türk Standartları Enstitüsü*.

- Tung, S. H., Shih, M. H., & Sung, W. P. (2008). Development of digital image correlation method to analyse crack variations of masonry wall. *Sadhana*, 33(6), 767-779.
- Turner, D. Z. (2014). Peridynamics-Based Digital Image Correlation Algorithm Suitable for Cracks and Other Discontinuities. *Journal of Engineering Mechanics*, 141(2), 04014115.
- Vanlanduit, S., Vanherzeele, J., Longo, R., & Guillaume, P. (2009). A digital image correlation method for fatigue test experiments. *Optics and Lasers in Engineering*, 47(3-4), 371-378.
- Wang, S., & Li, V. C. (2006). High-early-strength engineered cementitious composites. *Materials Journal*, 103(2), 97-105.
- Wang, Y., & Cuitiño, A. M. (2002). Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14), 3777-3796.
- Weimann, M. B., & Li, V. C. (2003). Hygral Behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC)/Vergleich der hygrischen Eigenschaften von ECC mit Beton. *Restoration of Buildings and Monuments*, 9(5), 513-534.
- Wu, R., Kong, C., Li, K., & Zhang, D. (2016). Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement. *Experimental Mechanics*, 56(5), 833-843.
- Wu, Z., Rong, H., Zheng, J., Xu, F., & Dong, W. (2011). An experimental investigation on the FPZ properties in concrete using digital image correlation technique. *Engineering Fracture Mechanics*, 78(17), 2978-2990.
- Xu, H. (2014). *Application of Visual Imaging Correlation-2D to Strain Measurement*. Rochester Institute of Technology.
- Yamaguchi, I. (1981). A laser-speckle strain gauge. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 14(11), 1270.

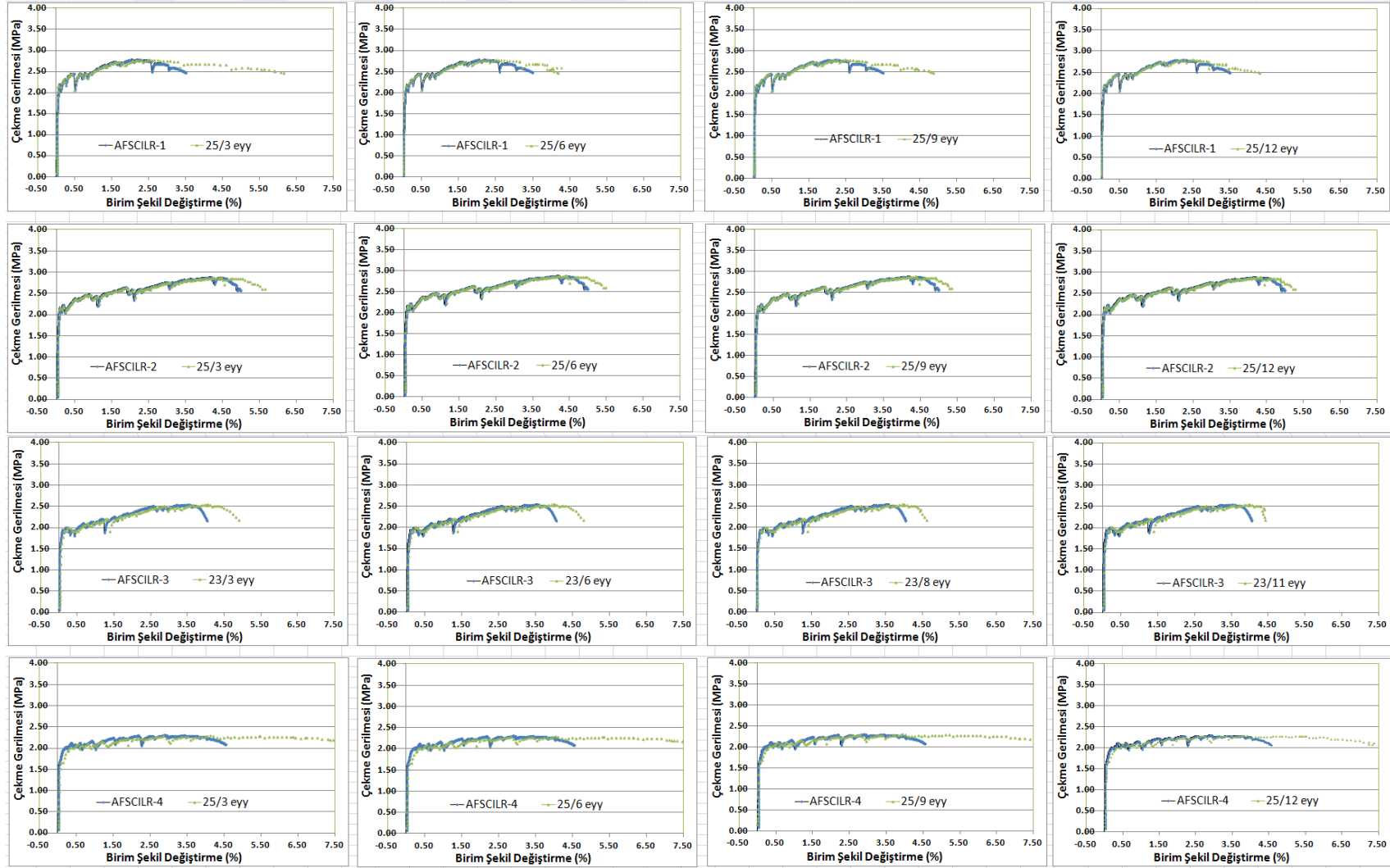
- Yang, Y., Sun, P., Nagarajaiah, S., Bachilo, S. M., & Weisman, R. B. (2017). Full-field, high-spatial-resolution detection of local structural damage from low-resolution random strain field measurements. *Journal of Sound and Vibration*, 399, 75-85.
- Yu, J., Lin, J., Zhang, Z., & Li, V. C. (2015). Mechanical performance of ECC with high-volume fly ash after sub-elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 99, 82-89.
- Zhang, J., Jin, G., Ma, S., & Meng, L. (2003). Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement. *Optics & Laser Technology*, 35(7), 533-542.
- Zhou, J., Qian, S., Beltran, M. G. S., Ye, G., van Breugel, K., & Li, V. C. (2010). Development of engineered cementitious composites with limestone powder and blast furnace slag. *Materials and Structures*, 43(6), 803-814.
- Zhou, P., & Goodson, K. E. (2001). Subpixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation. *Optical Engineering*, 40(8), 1613-1621.

## EKLER

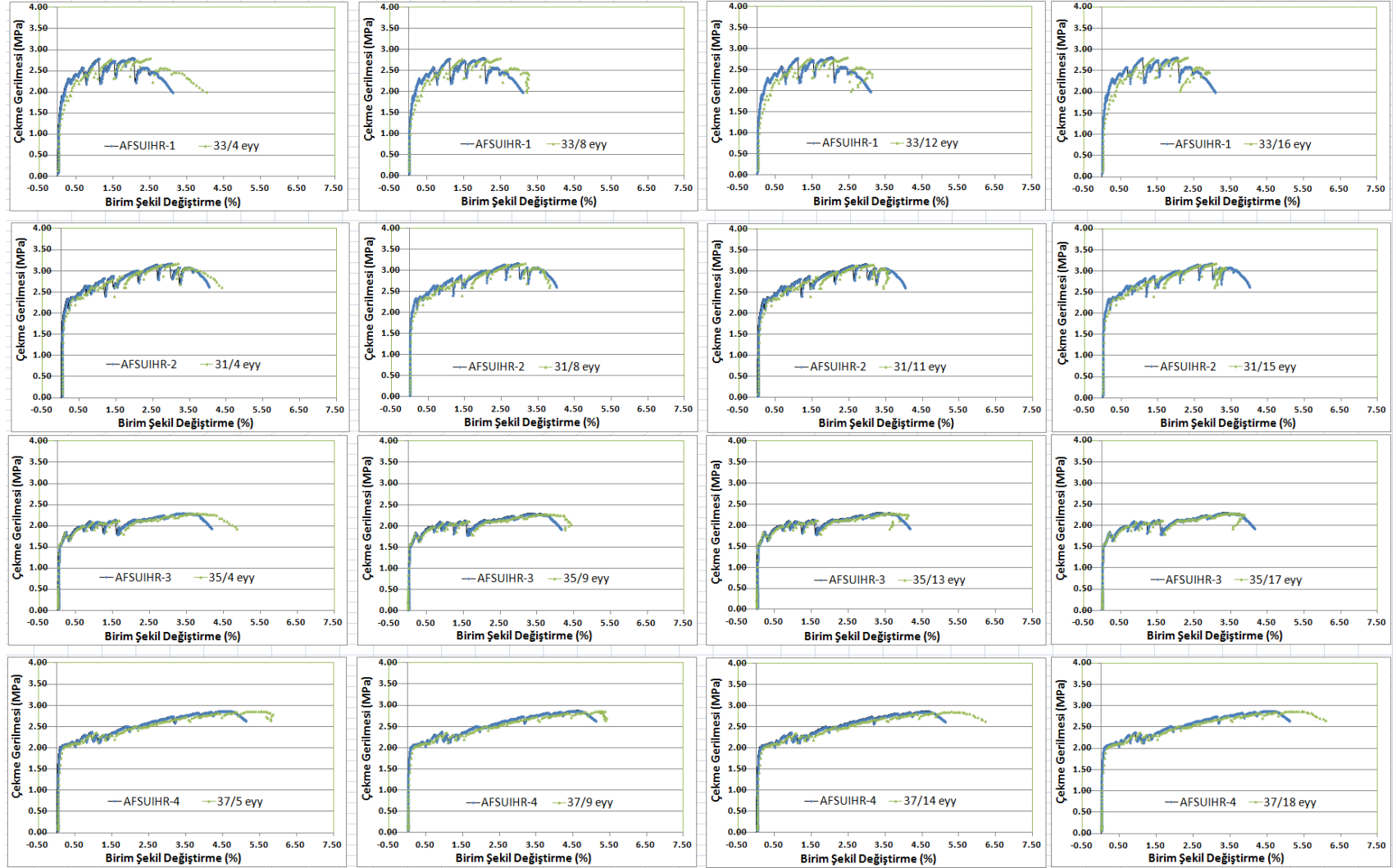
### EK-A: DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



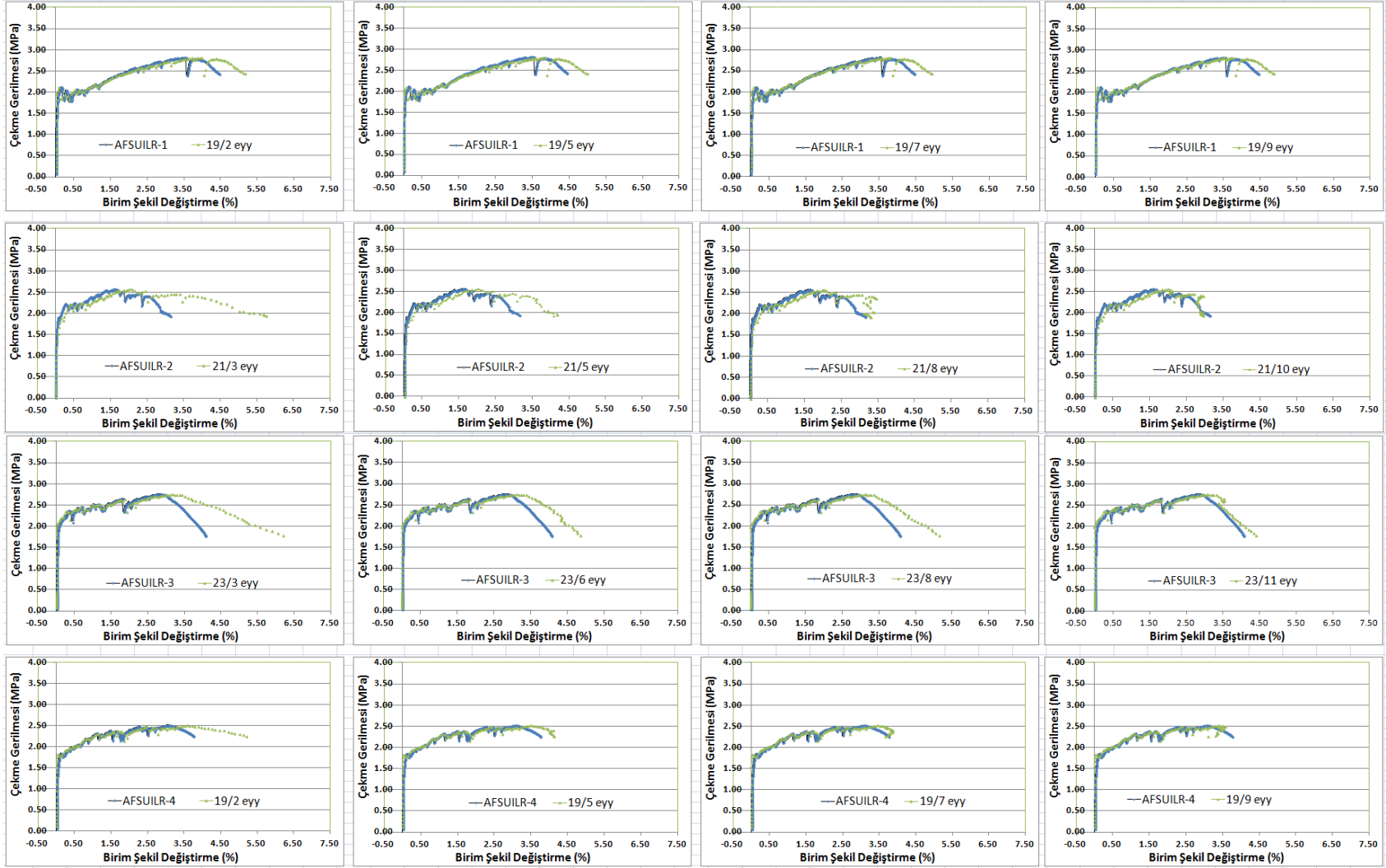
Şekil A.1 AFSCIHR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



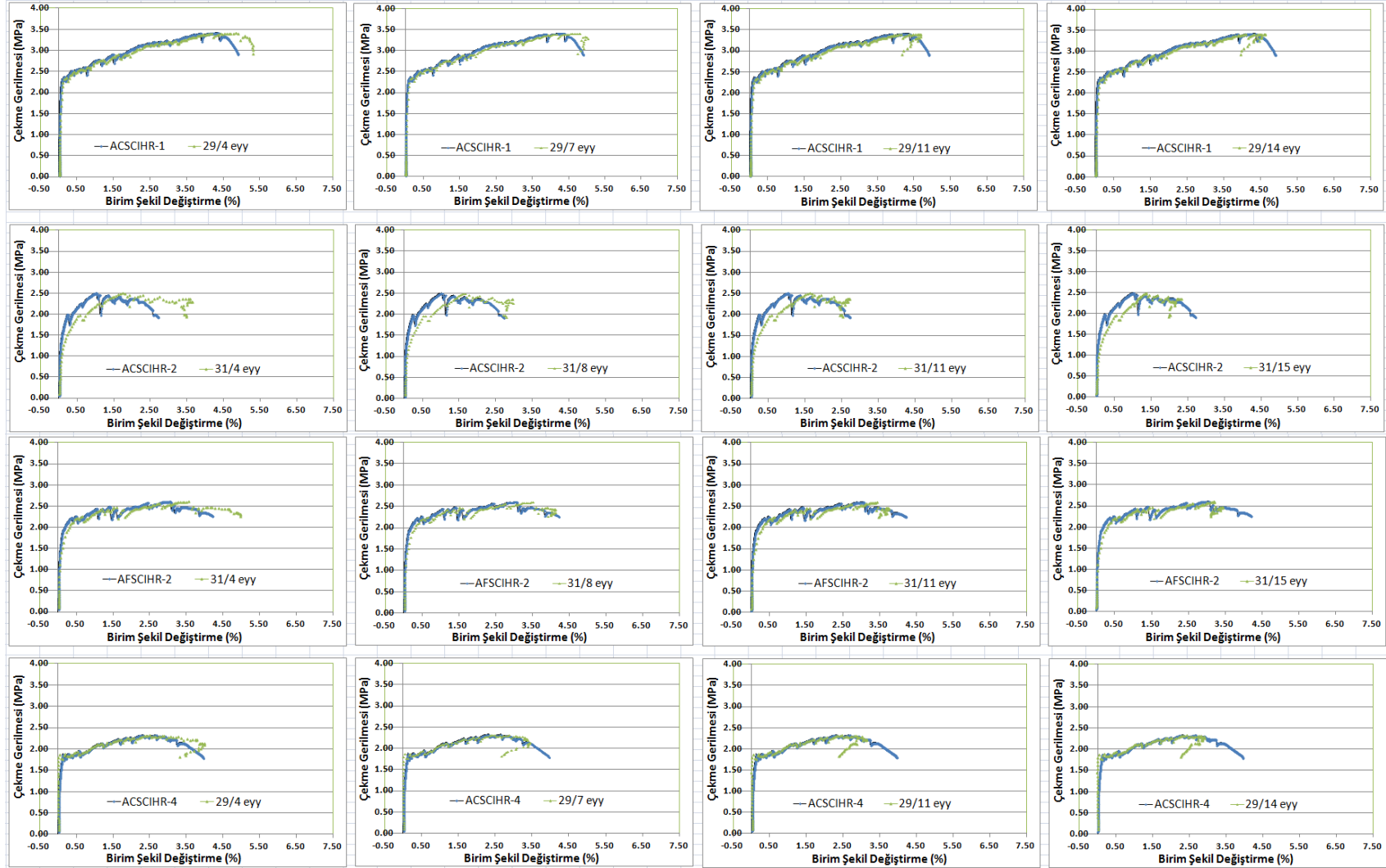
Şekil A.2 AFSCILR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



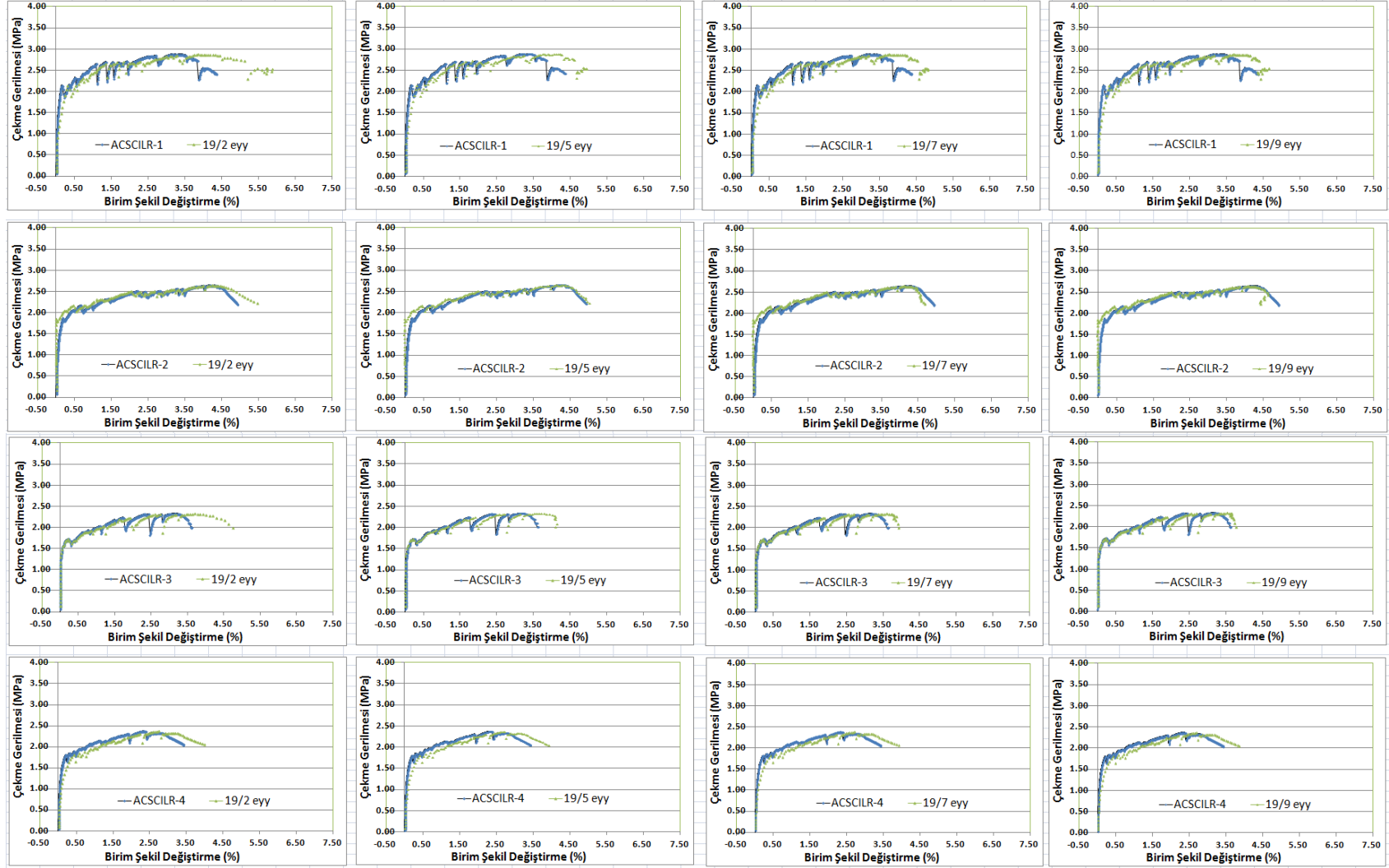
Şekil A.3 AFSUIHR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



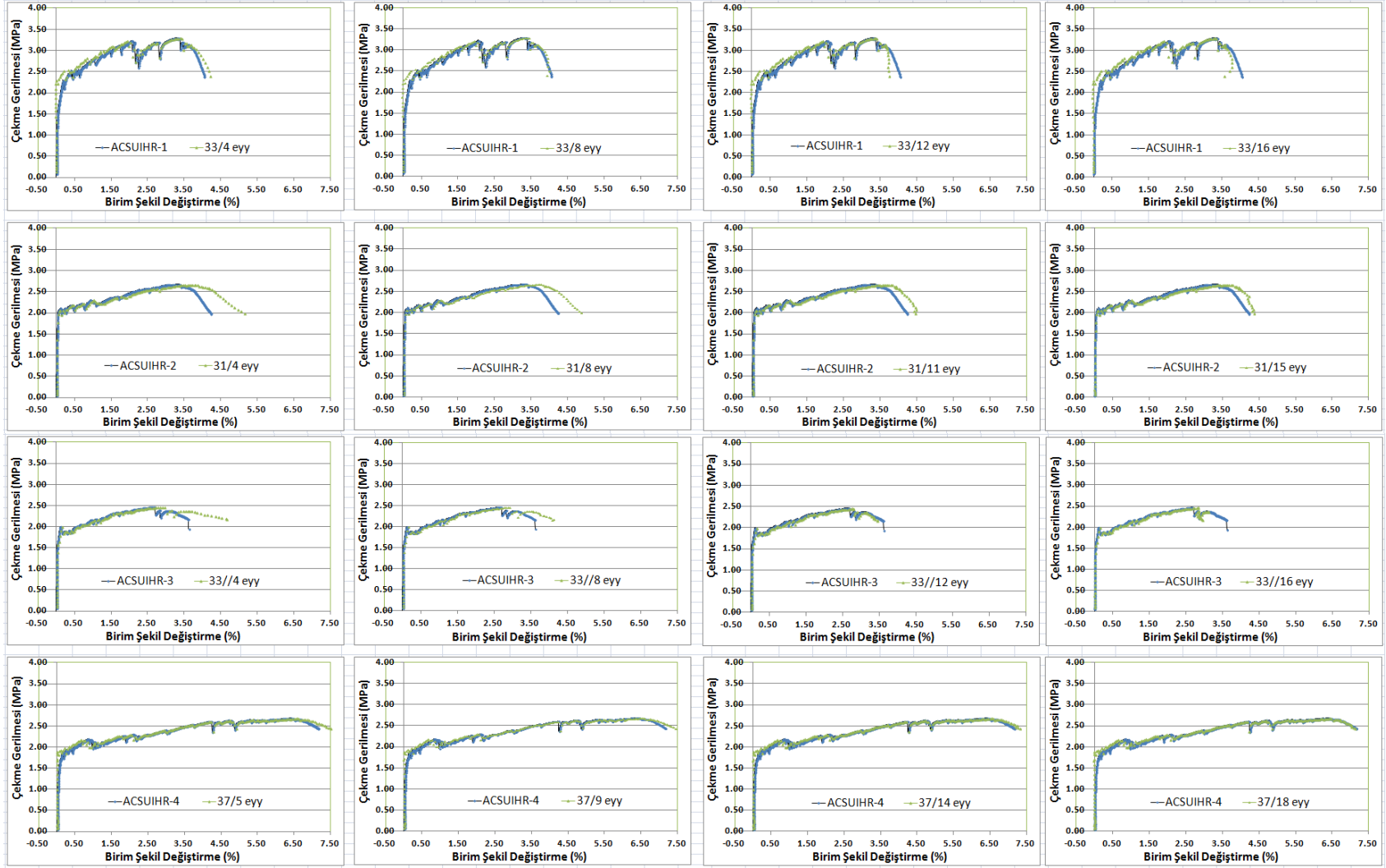
Şekil A.4 AFSUILR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



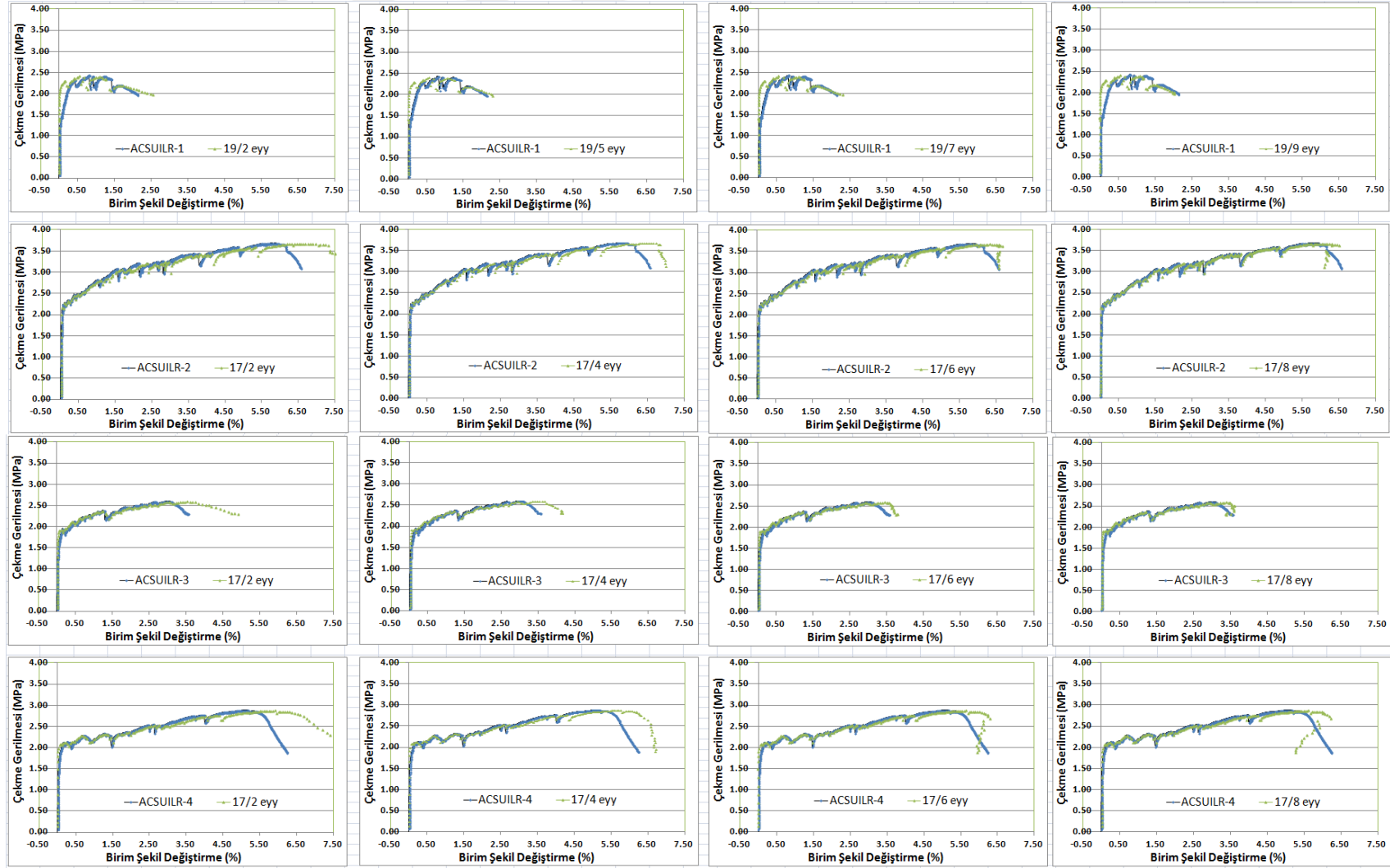
Şekil A.5 ACSCIHR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması



Şekil A.6 ACSCILR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması

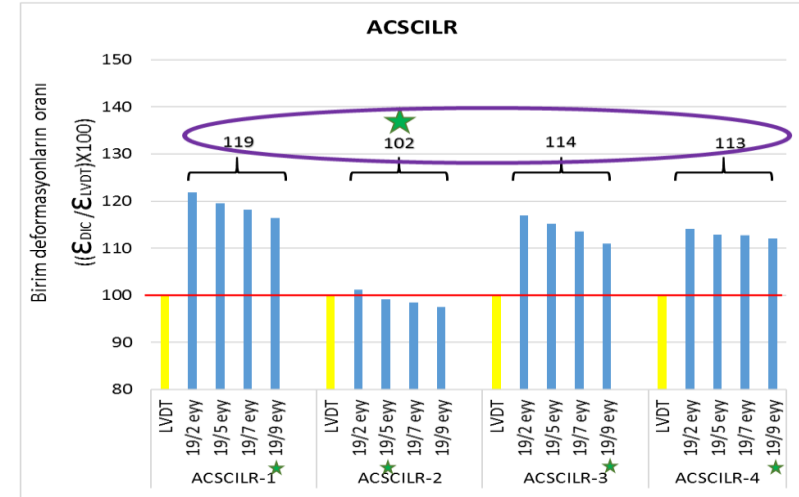
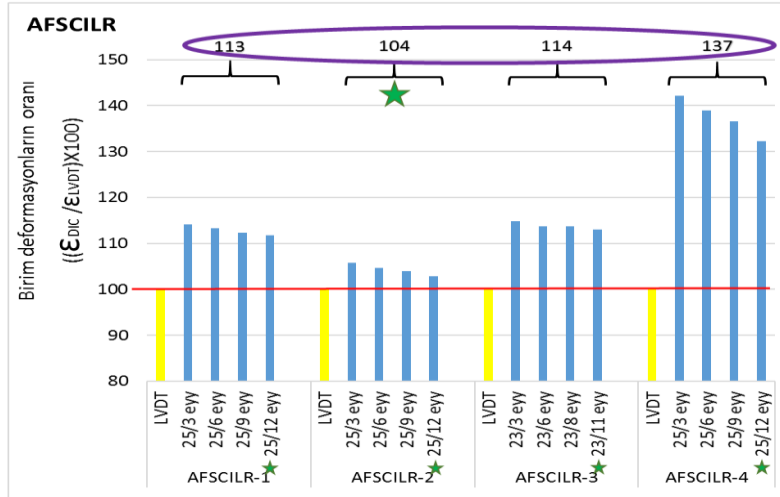
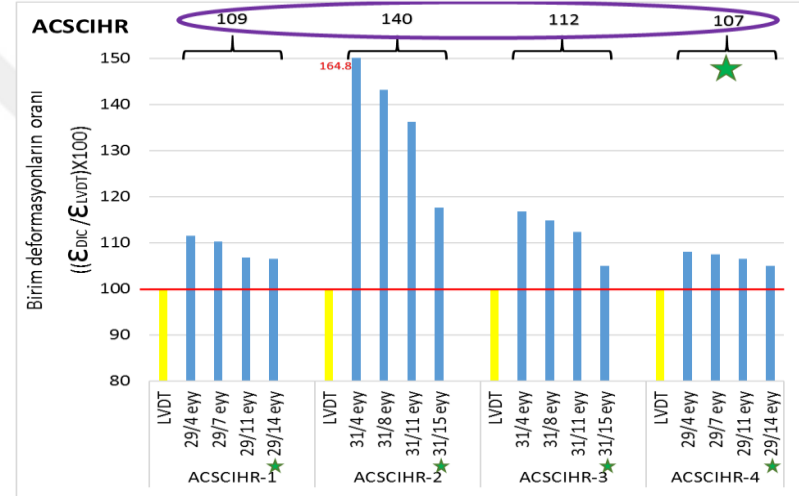
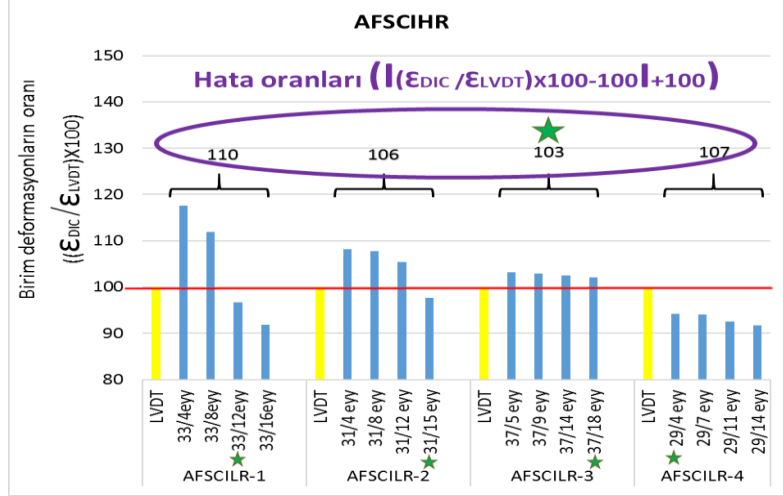


Şekil A.7 ACSUIHR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması

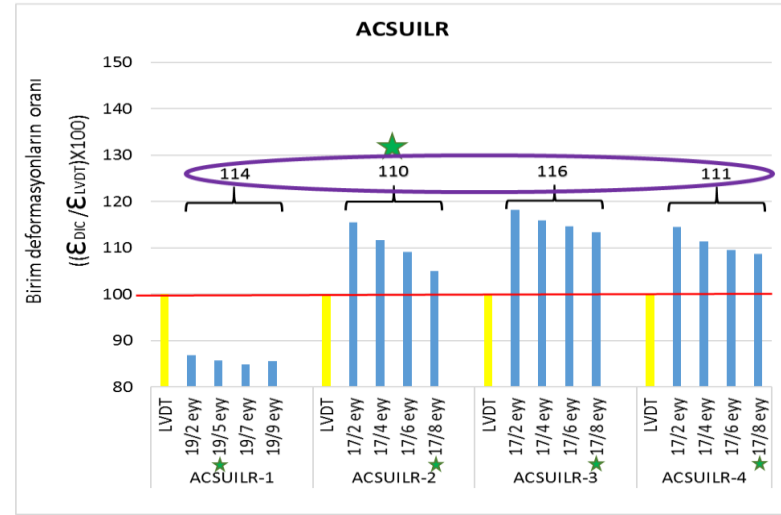
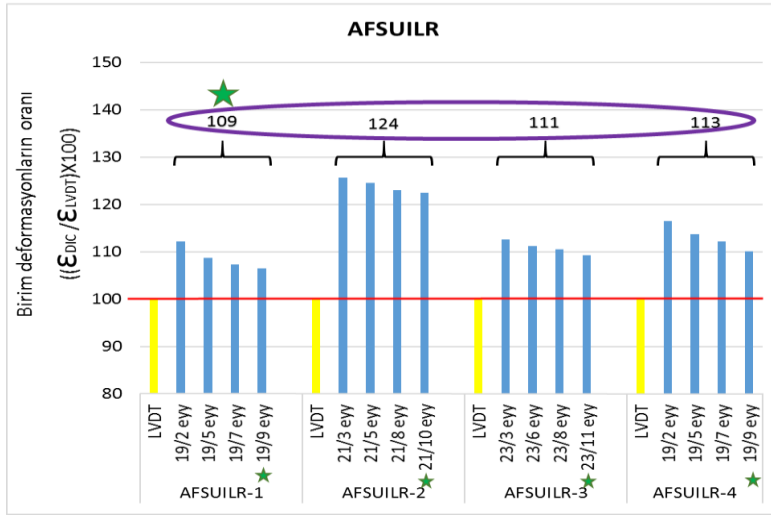
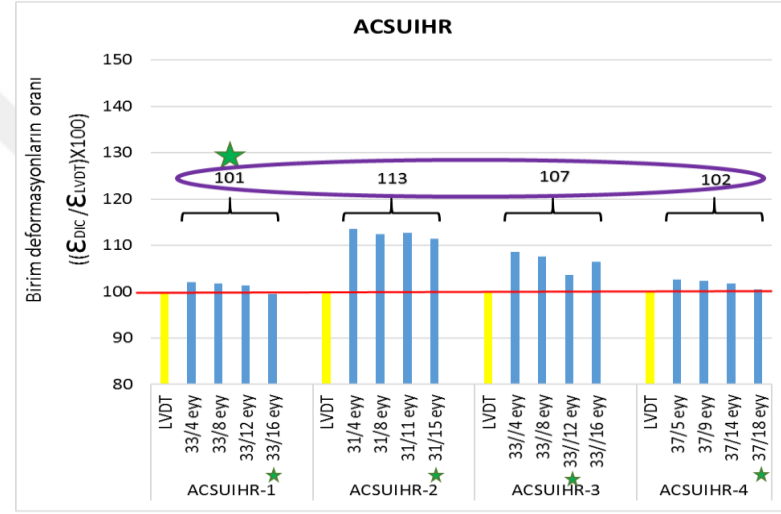
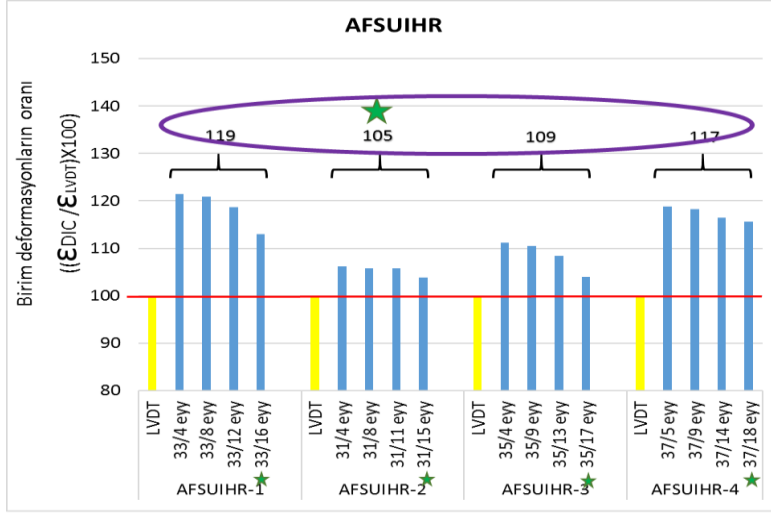


Şekil A.8 ACSUILR kodlu numunelerin DIC ve LVDT verilerinin Gerilme-Birim Şekil Değiştirme grafikleri ile kıyaslanması

## EK-B: Maksimum gerilme noktasına göre birim şekil değiştirmelerin ( $\epsilon_{LVDT}$ ve $\epsilon_{DIC}$ ) kıyaslanması

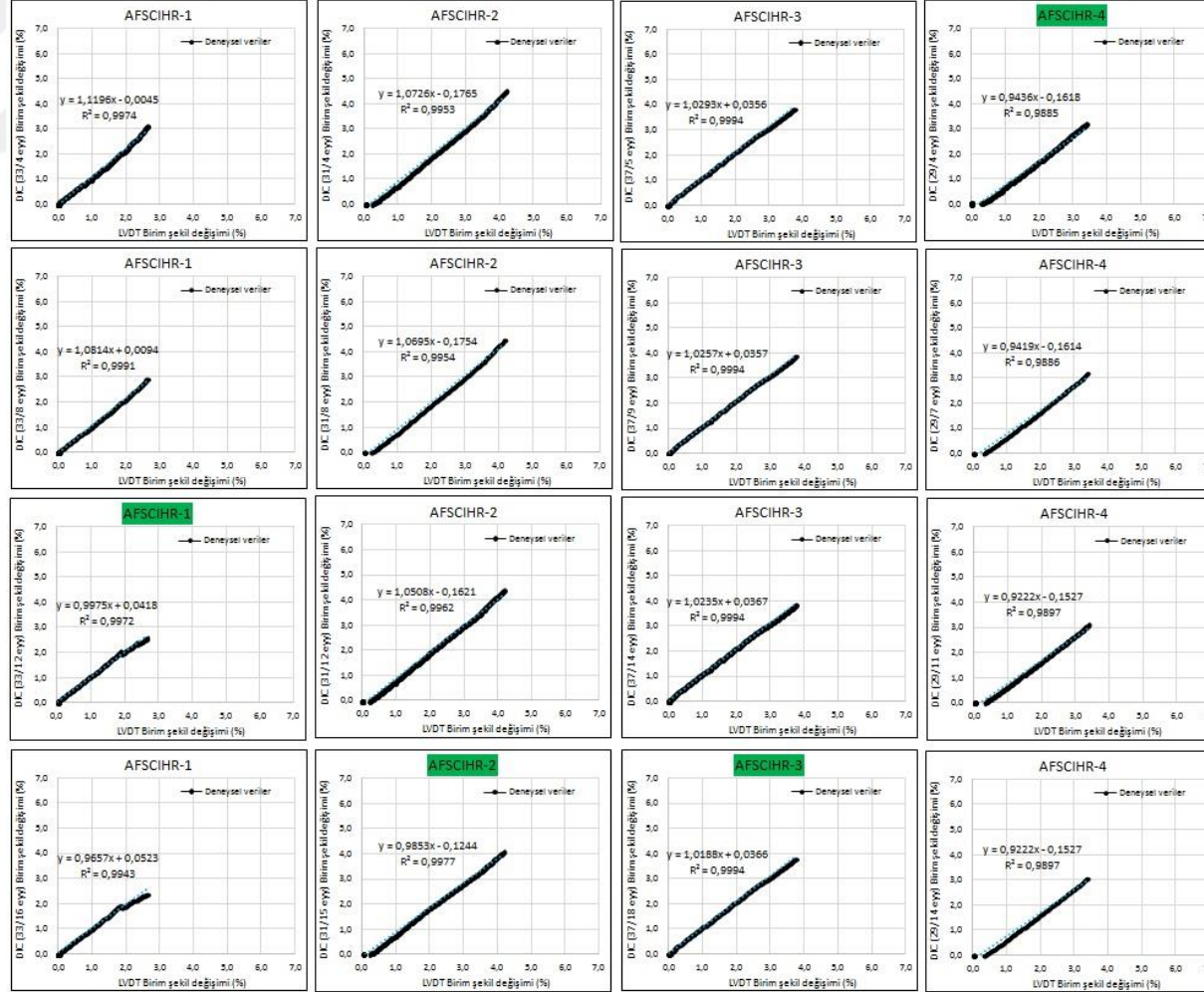


\*Hata oranları  $I(\epsilon_{LVDT} / \epsilon_{DIC}) \times 100 - 100 + 100$  formülü ile her bir numune için hesaplanıp, 4 numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

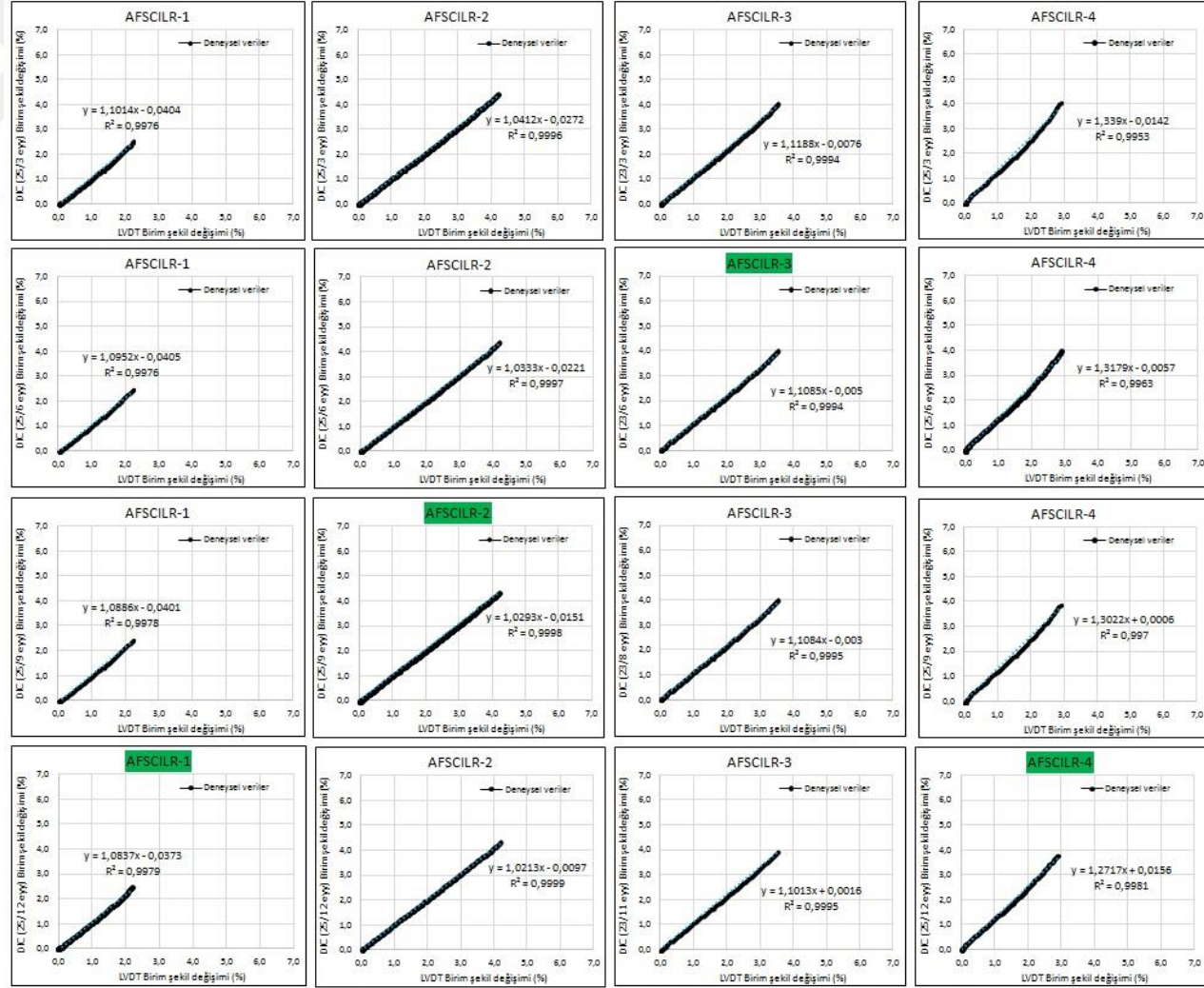


\*Hata oranları  $I(\epsilon_{LVDT} / \epsilon_{DIC}) \times 100 - 100 + 100$  formülü ile her bir numune için hesaplanıp, 4 numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

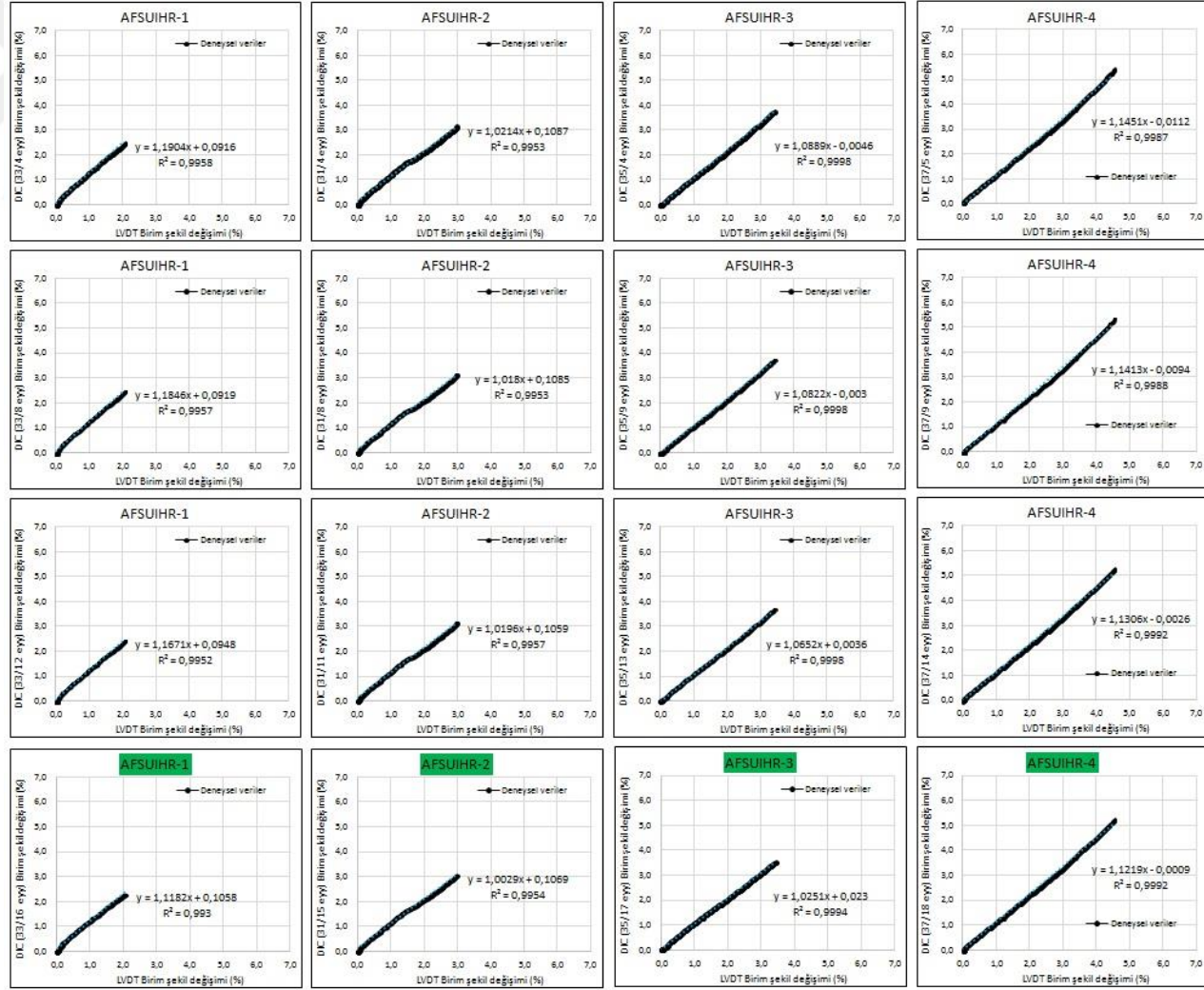
## EK-C: LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



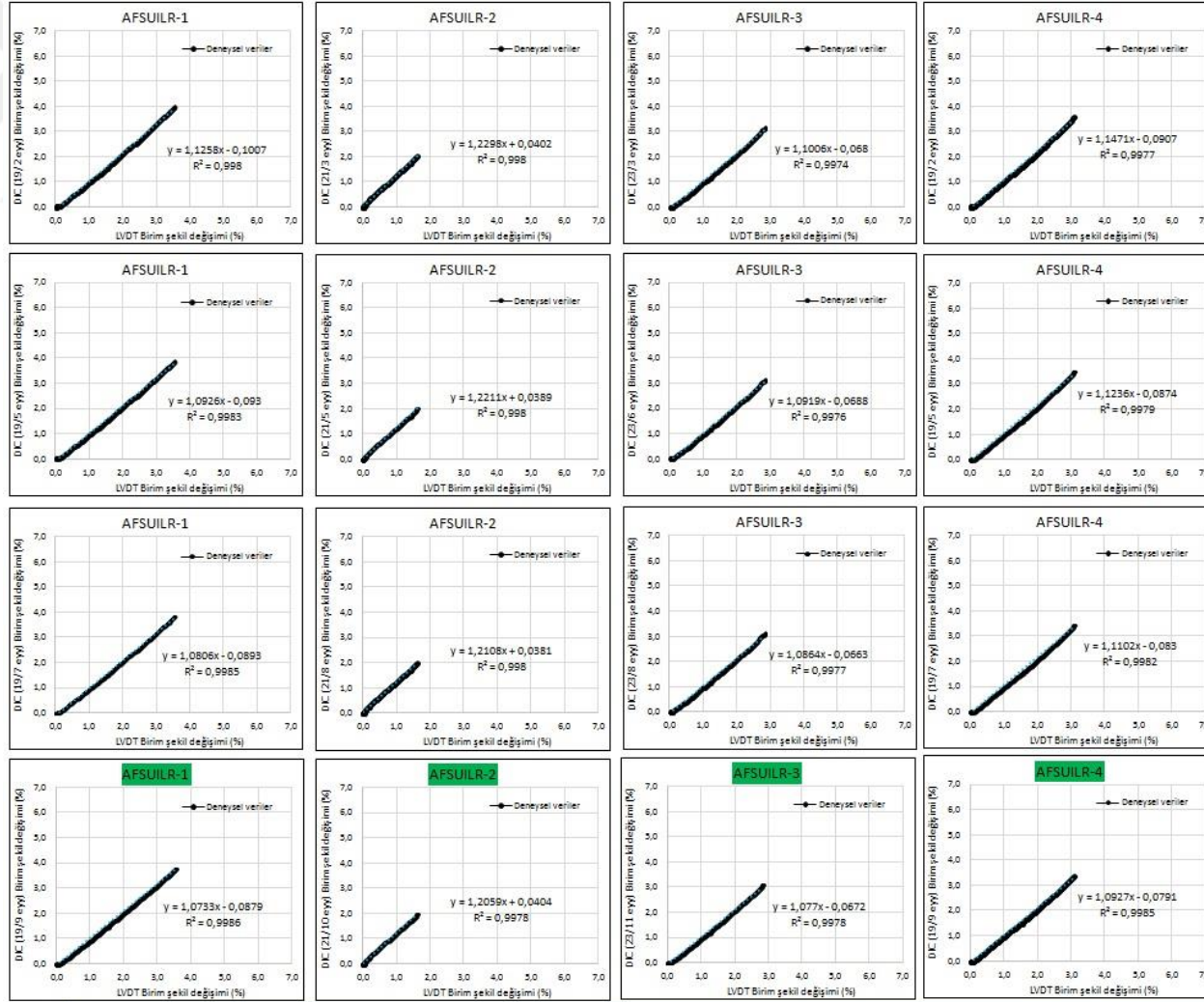
Şekil C.1 AFSCIHR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



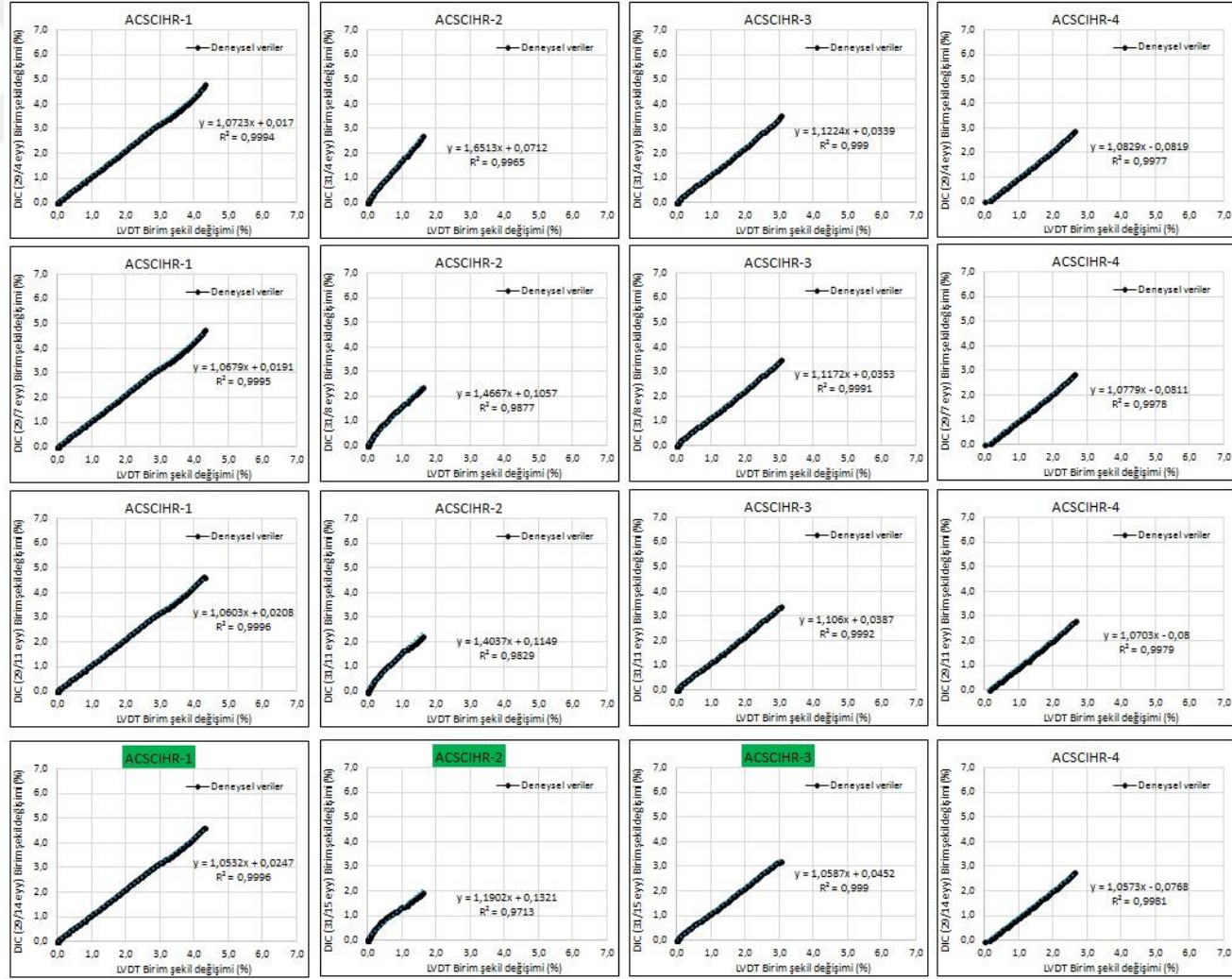
Şekil C.2 AFSCILR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



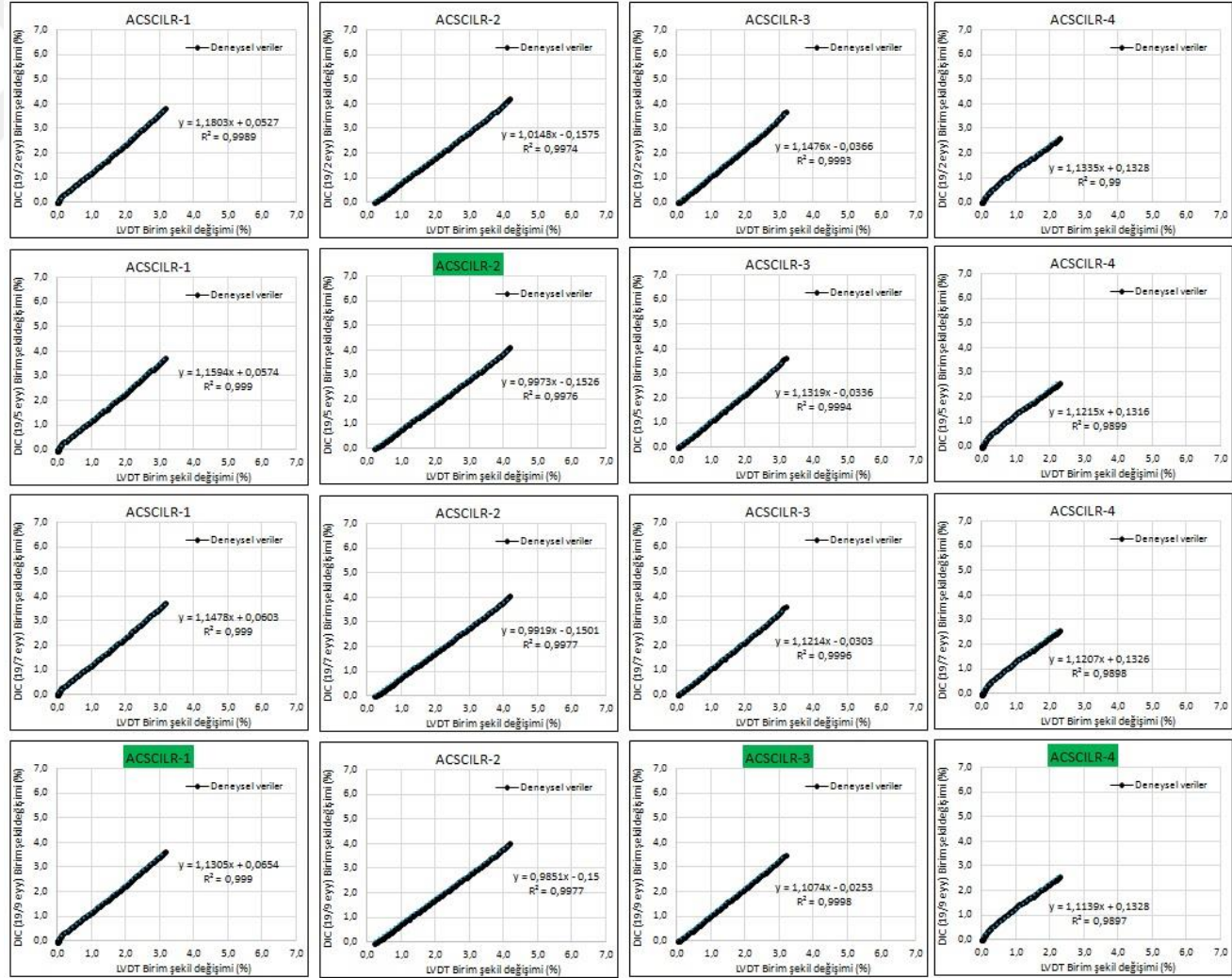
Şekil C.3 AFSUIHR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



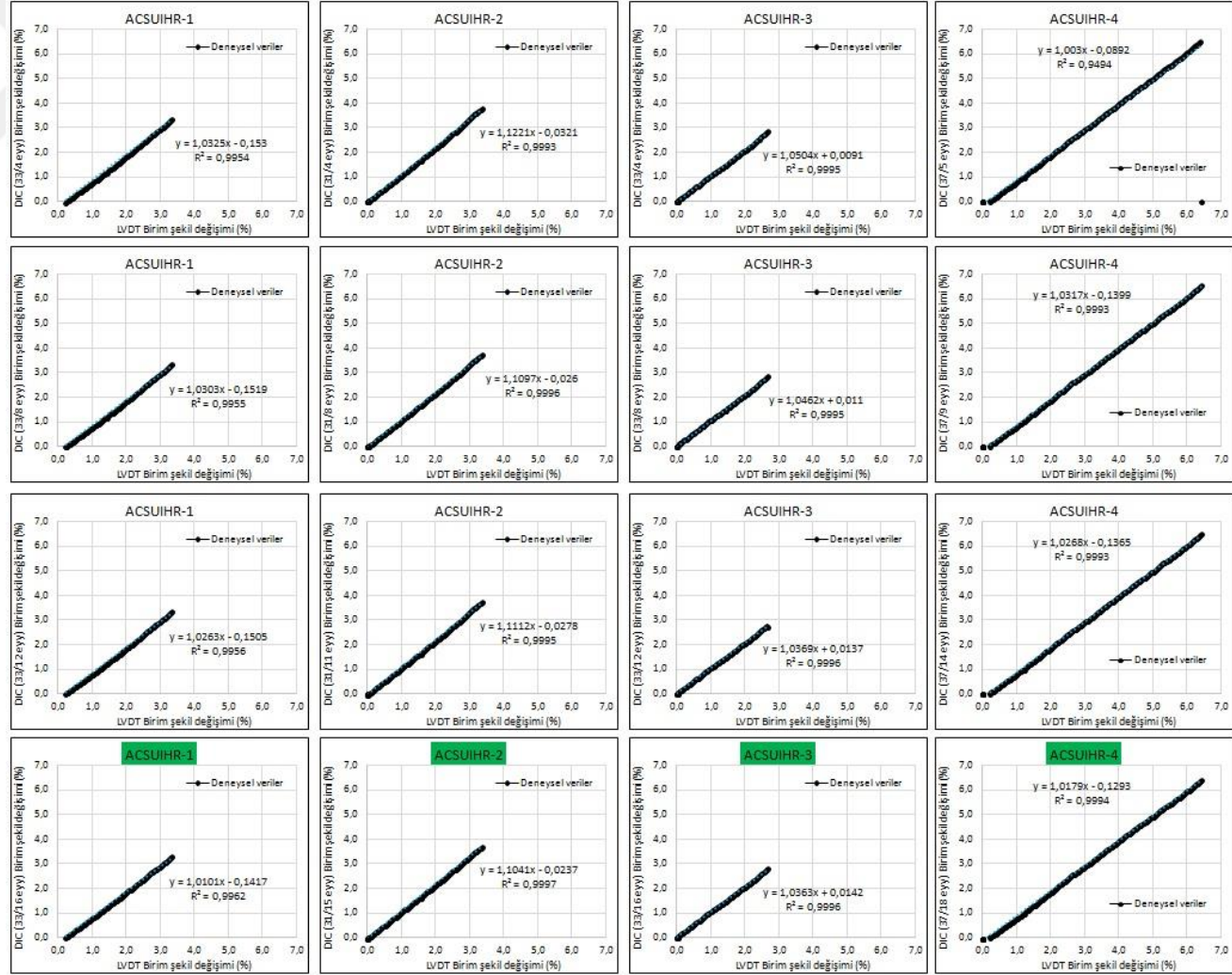
Şekil C.4 AFSUILR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



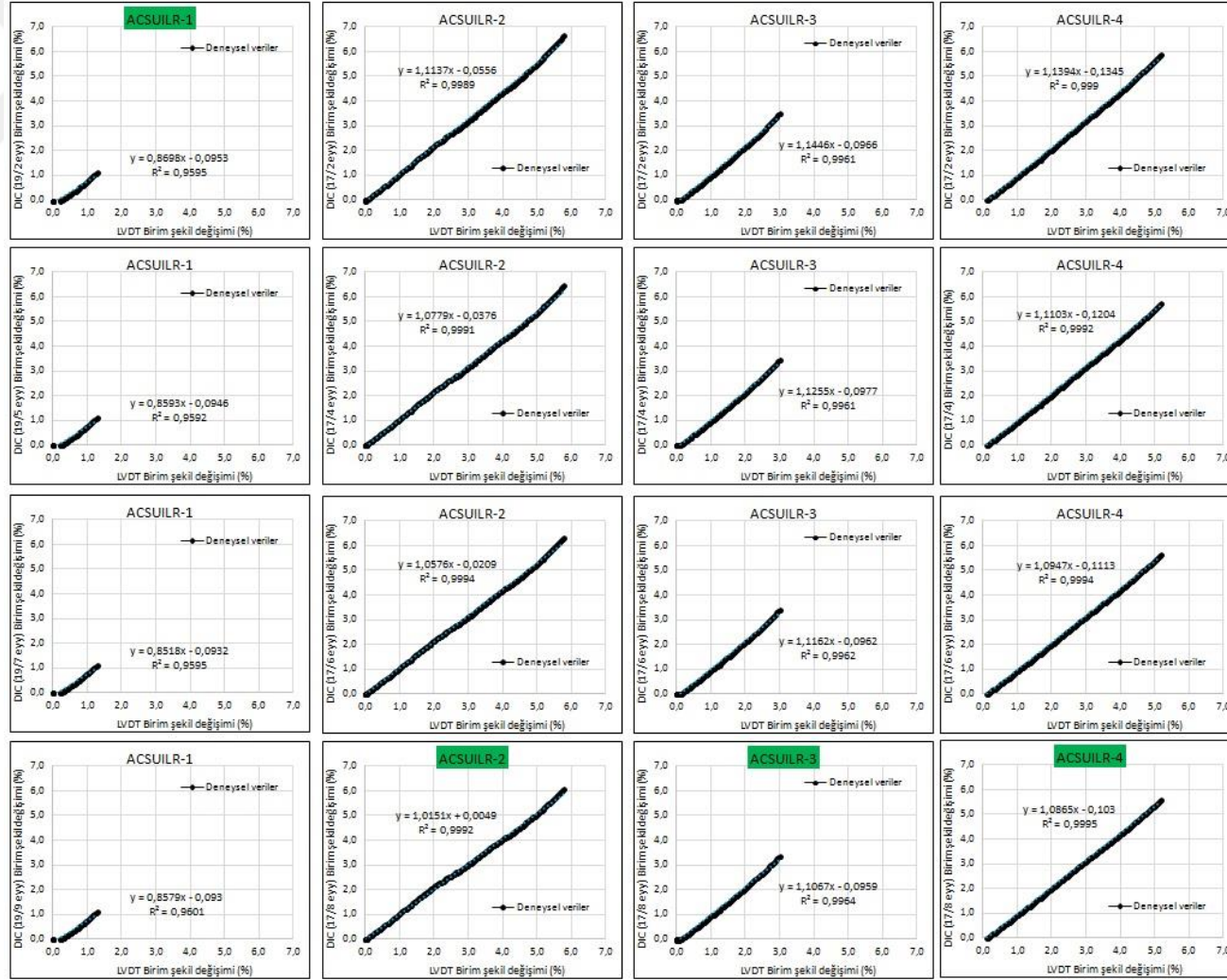
Şekil C.5 ACSCIHR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması



Şekil C.6 ACSCILR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değışirme verilerinin kıyaslanması

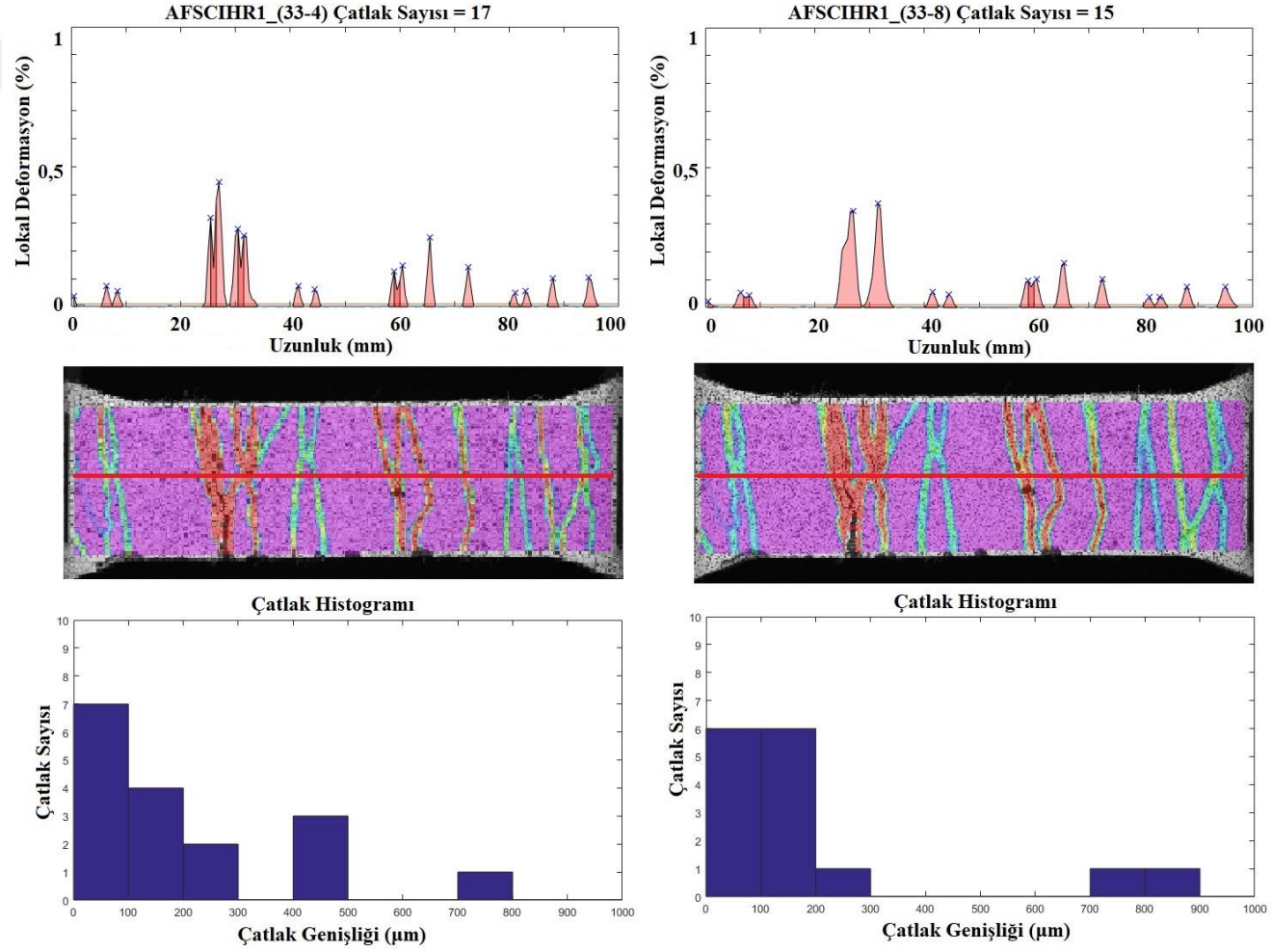


Şekil C.7 ACSUIHR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması

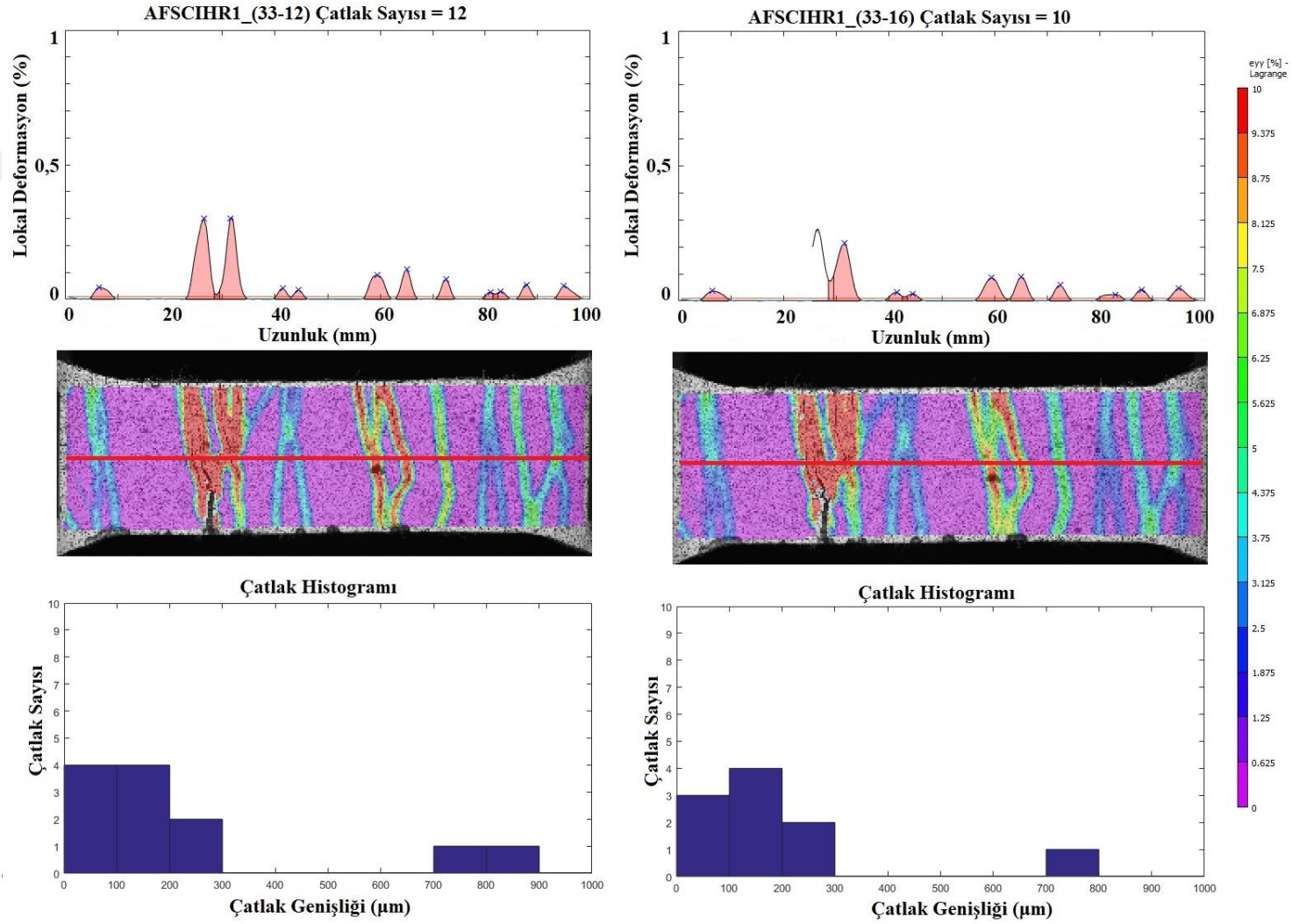


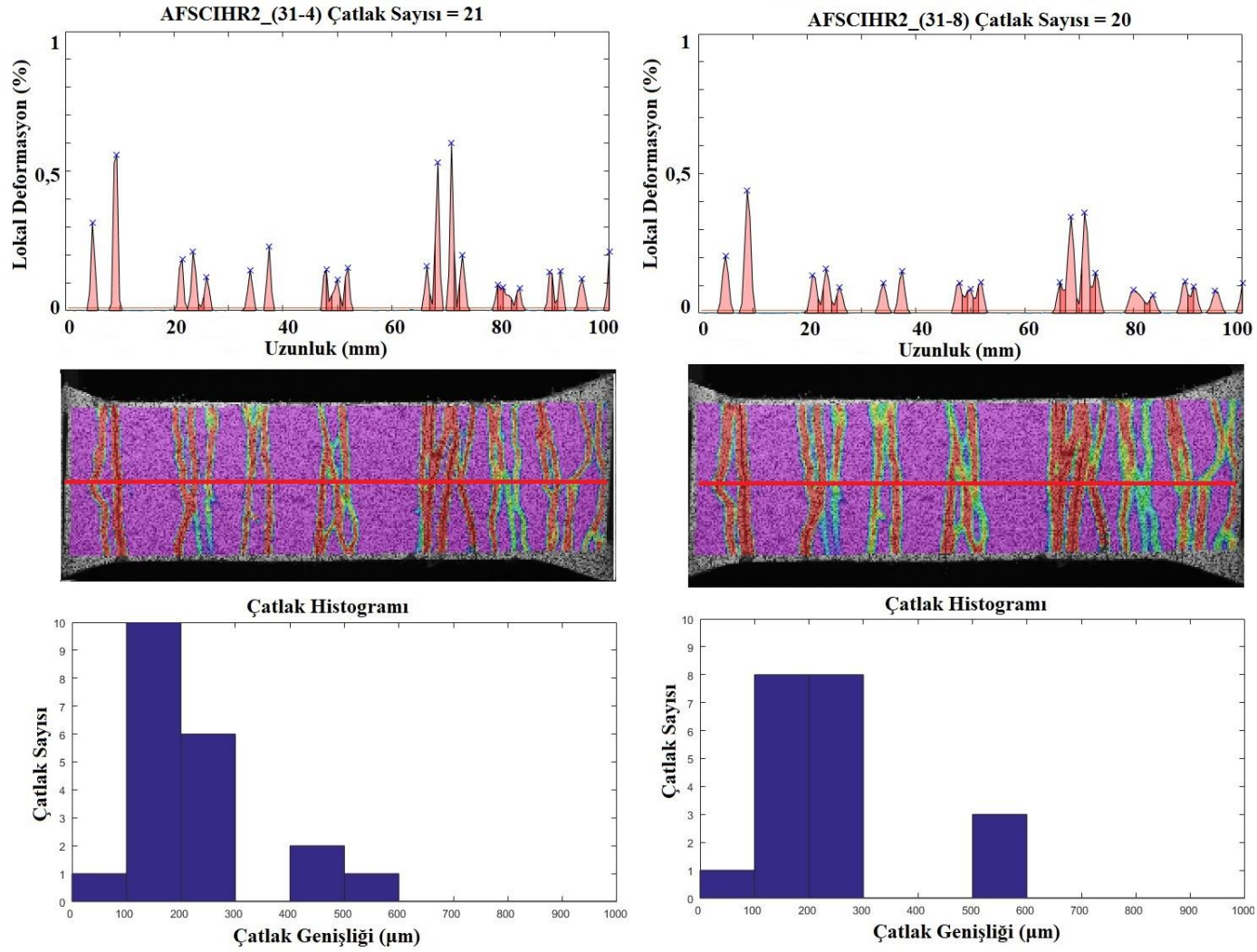
Şekil C.8 ACSUILR kodlu numunelerin LVDT ve DIC'nin tüm birim şekil değiştirme verilerinin kıyaslanması

## EK-D: AFSCIHR Serisi için Elde Edilen Çatlak Analizi Sonuçları

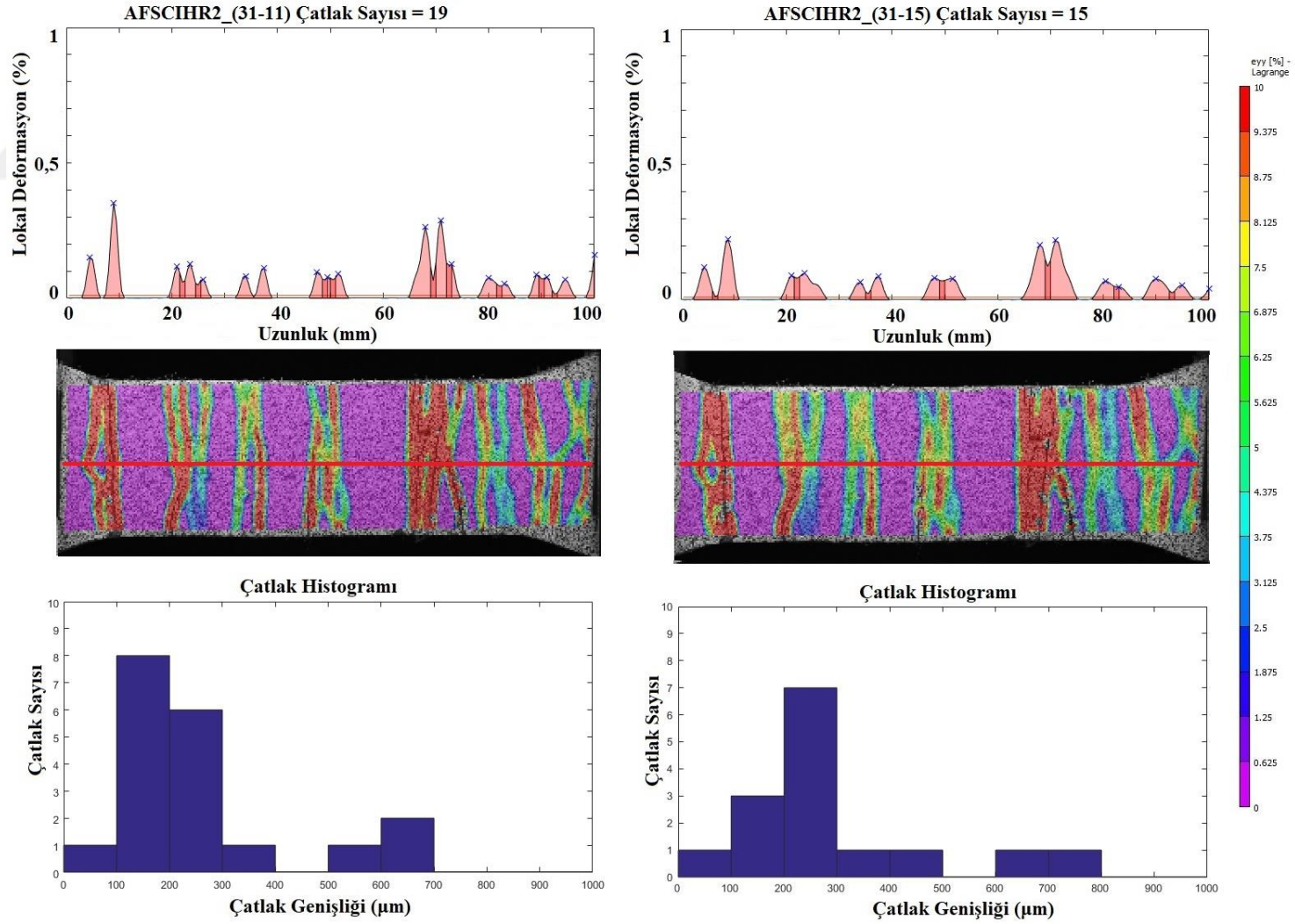


Şekil D.1a AFSCIHR1 numunesi 33-4 ve 33-8 çatlak analizi sonuçları

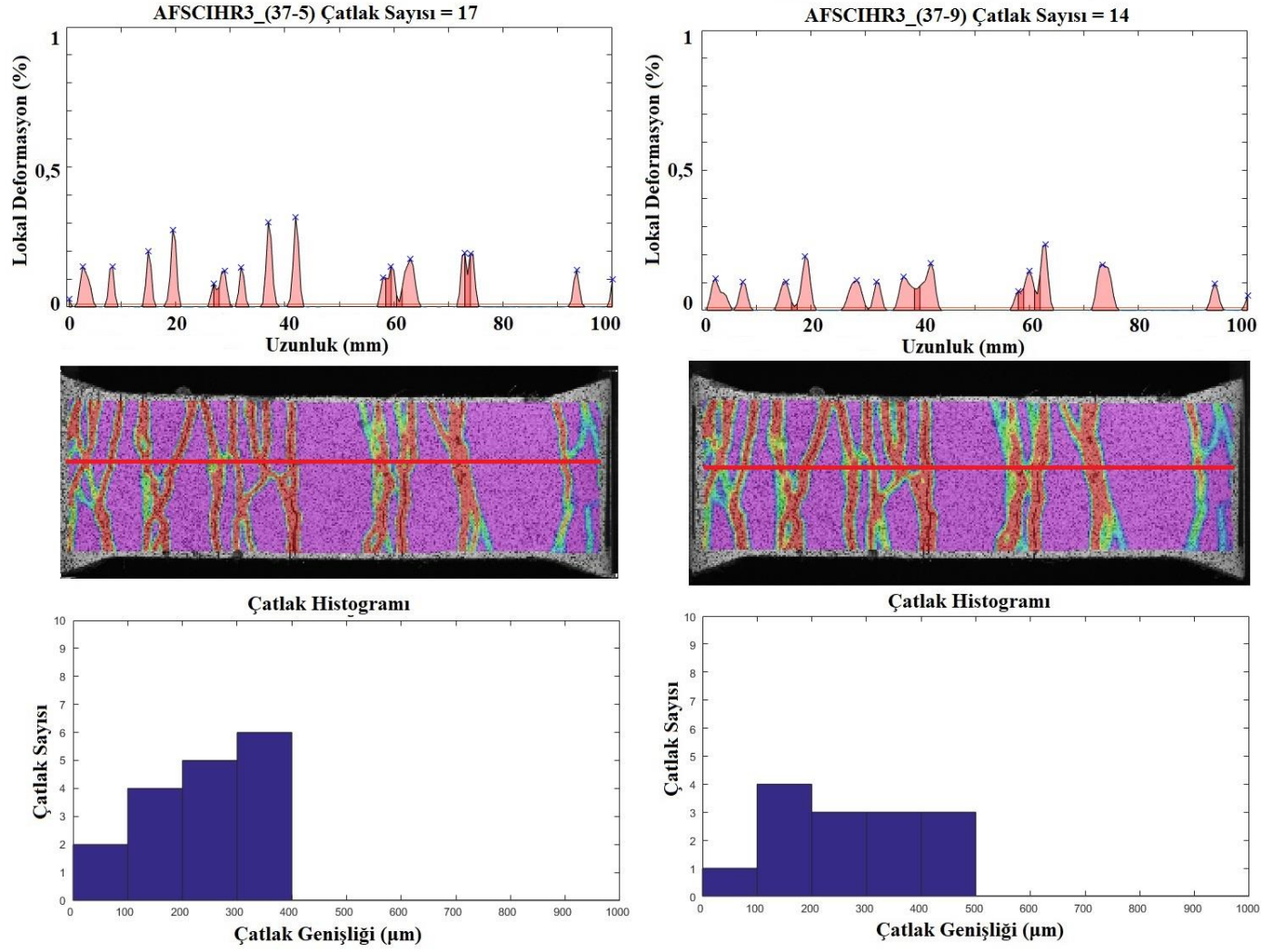




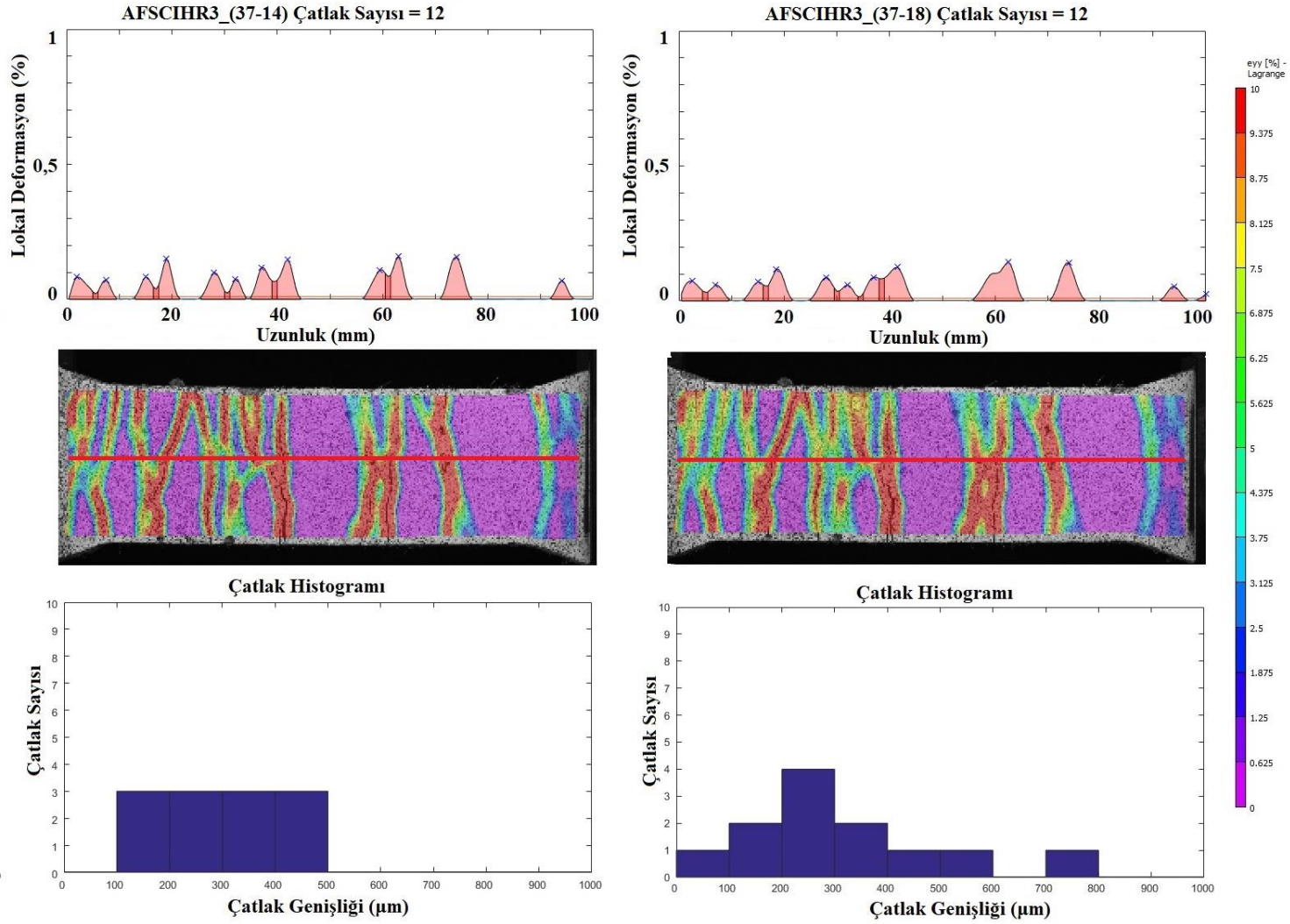
Şekil D.2a AFSCIHR2 numunesi 31-4 ve 31-8 çatlak analizi sonuçları



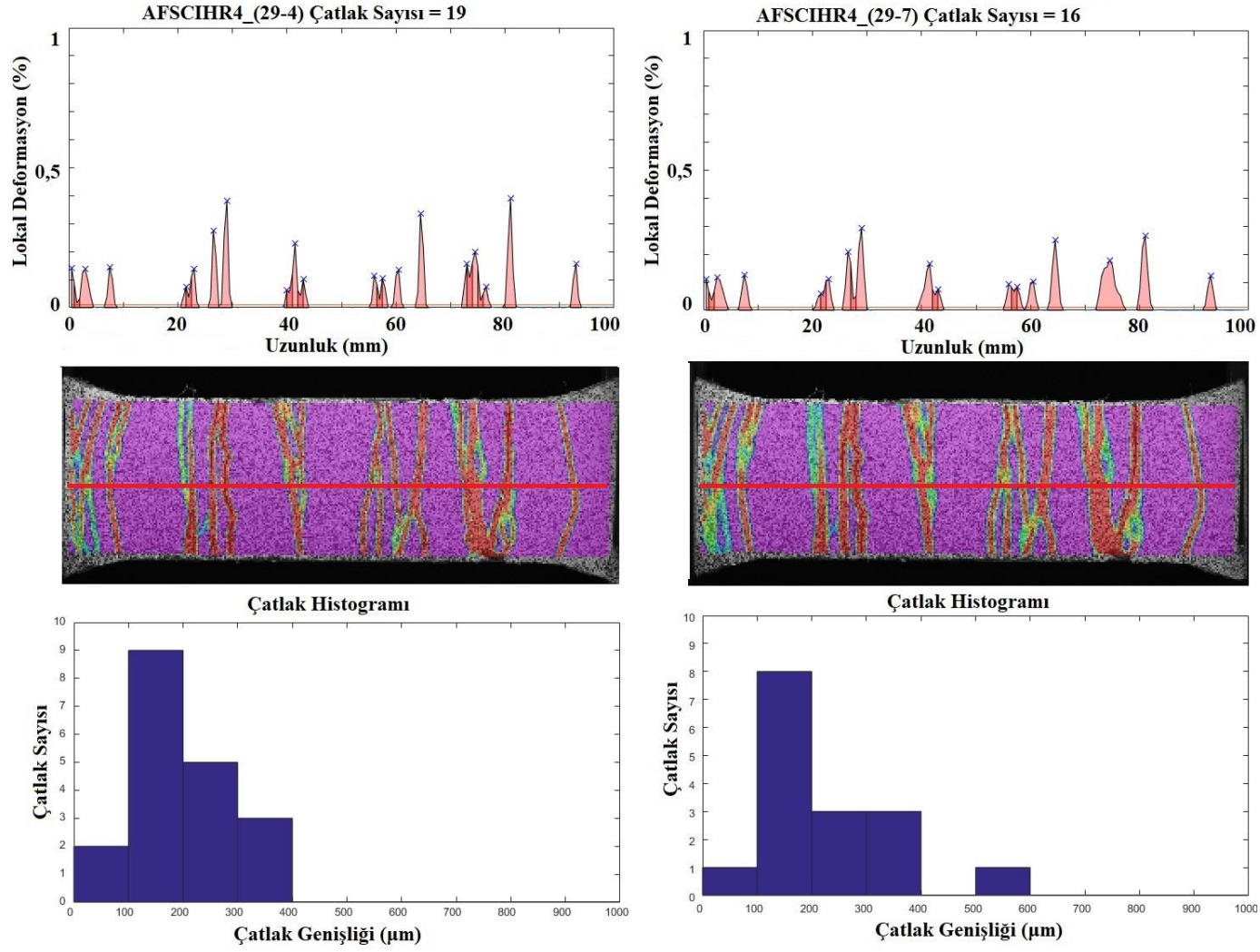
Şekil D.2b AFSCIHR2 numunesi 31-11 ve 31-15 çatlak analizi sonuçları



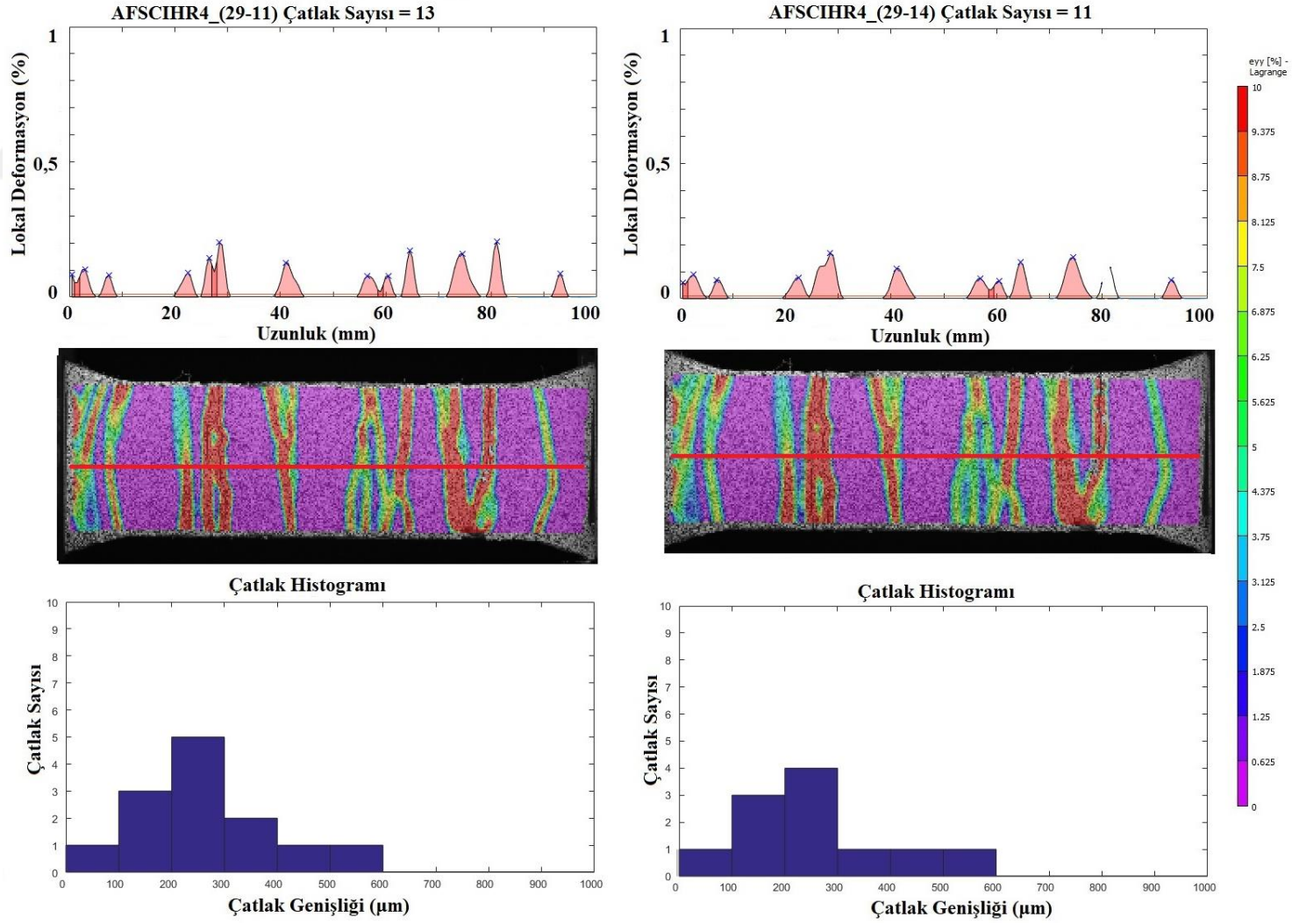
Şekil D.3a AFSCIHR3 numunesi 37-5 ve 37-9 çatlak analizi sonuçları



Şekil D.3b AFSCIHR3 numunesi 37-14 ve 37-18 çatlak analizi sonuçları



Şekil D.4a AFSCIHR4 numunesi 29-4 ve 29-7 çatlak analizi sonuçları



Şekil D.4b AFSCIHR4 numunesi 29-11 ve 29-14 çatlak analizi sonuçları