

Mesut AYDIN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2021



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**DİJİTAL GÖRÜNTÜ
KORELASYONU YÖNTEMİ
İLE GERİLME VE YER
DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ**

Mesut AYDIN

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

HAZİRAN 2021





**DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU YÖNTEMİ İLE GERİLME VE YER
DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ**

Mesut AYDIN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

Mesut AYDIN tarafından hazırlanan “DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU YÖNTEMİ İLE GERİLME VE YER DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Prof. Dr. Umur Korkut SEVİM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Üye: Prof. Dr. Cahit BİLİM

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 29/06/2021

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirim, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mesut AYDIN

29/06/2021

DİJİTAL GÖRÜNTÜ KORELASYONU YÖNTEMİ İLE GERİLME VE YER
DEĞİŞTİRMELERİN BELİRLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Mesut AYDIN

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Gerilme ve yer değiştirme inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında en önemli iki parametredir. Bu parametrelerin belirlenmesinde genellikle mekanik temelli ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Teknolojinin her geçen gün biraz daha ilerlemesiyle mevcut ölçüm tekniklerine alternatif olarak yeni ölçüm teknikleri geliştirilmektedir.

Bu tez çalışmasında, inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında gerilme ve yer değiştirmelerin belirlenmesinde geleneksel ölçüm tekniklerine alternatif olarak optik temelli bir ölçüm tekniği olan dijital görüntü korelasyonu (DIC) yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla iki farklı boyutta 14 adet kiriş numunesi ve 5 adet duvar numunesi olmak üzere toplamda 19 adet numune üzerinde ölçüm yapılmıştır. Kiriş numunelerinden 7 tanesi donatılı betonarme kiriş olarak, diğer 7 tanesi donatısız olarak üretilmiştir. Kirişlerin beton karışımlarında çeşitli oranlarda (%0; %0,2; %0,4; %0,6) makro sentetik fiber lif (MSF) katkısı kullanılmıştır. Duvar numuneleri tek yüzü veya çift yüzü sıvalı ve sıvada plastik kompozit donatı (geogrid) kullanım durumuna göre çeşitli özelliklerde üretilmiştir. Üretilen kirişler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi, duvarlar üzerinde ise diyagonal yükleme deneyi uygulanmış ve numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler 1 adet geleneksel deformasyon ölçerle (LVDT- Linear variable differential transformer) ve DIC yöntemiyle ölçüm için yüksek çözünürlüklü dijital kamera ile kaydedilmiştir. LVDT ve DIC ölçümleri ile elde edilen bulgular kıyaslanarak inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında yer değiştirmelerin ölçümü için DIC yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Ayrıca yükleme deneyleri sırasında numunelerin yüzeyinde meydana gelen gerilme değişimleri DIC yöntemiyle görselleştirilmiştir. Numune yüzeylerinde oluşan çatlakların gelişimi görsel olarak analiz edilmiştir.

DIC ve LVDT ölçüm sonuçları değerlendirildiğinde, her iki yöntemle elde edilen yer değiştirme değerlerinin birbiriyle uyum içerisinde olduğu tespit edilmiştir. Numune yüzeylerinde meydana gelen gerilme değişimlerinin görselleştirilmesinde DIC yönteminin kullanılabilirliği ortaya konulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Dijital görüntü korelasyonu, kiriş, duvar, deformasyon, gerilme

Sayfa Adedi : 87

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN

DETERMINATION OF STRESS AND DISPLACEMENT WITH THE DIGITAL IMAGE CORRELATION METHOD

(M. Sc. Thesis)

Mesut AYDIN

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY

INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

June 2021

ABSTRACT

Stress and displacement are the two most important parameters in civil engineering laboratory applications. Mechanical-based measurement techniques are generally used to determine these parameters. With the advancement of technology every day, new measurement techniques are being developed as an alternative to existing measurement techniques.

In this thesis, the use of digital image correlation (DIC) method, which is an optically based measurement technique, as an alternative to traditional measurement techniques in determining stress and displacement in civil engineering laboratory applications was investigated. For this purpose, measurements were made on a total of 19 samples, 14 beam samples in two different sizes and 5 wall samples. 7 of the beam samples were produced as reinforced concrete beams, while the other 7 were produced as unreinforced. Macro synthetic fiber (MSF) additives were used in various proportions (0%; 0.2%; 0.4%; 0.6%) in the concrete mixtures of the beams. The wall samples are plastered on one side or both sides and plastic composite reinforcement (geogrid) in plaster has been produced in various properties according to the usage situation. A three-point bending test was applied on the produced beams and a diagonal loading test on the walls, and the displacements in the samples were recorded with a conventional deformation meter (LVDT-Linear variable differential transformer) and a high resolution digital camera for measurement by DIC method. By comparing the findings obtained with LVDT and DIC measurements, the usability of the DIC method for the measurement of displacements in civil engineering laboratory applications was investigated. In addition, the stress changes occurring on the surface of the samples during the loading tests were visualized by DIC method. The development of cracks on the sample surfaces was analyzed visually.

When the DIC and LVDT measurement results were evaluated, it was found that the displacement values obtained by both methods were in harmony with each other. It has been demonstrated that the DIC method can be used to visualize the stress changes occurring on the sample surfaces.

Key Words : Digital image correlation, beam, wall, deformation, strain

Page Number : 87

Supervisor : Dr. Lecturer Selçuk KAÇIN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez konusunun belirlenmesinde, araştırılması, yazımı ve deneylerin yapılması sırasında sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesi ile çalışmayı yönlendiren ve her türlü yardımı esirgemeyen danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Selçuk KAÇIN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Görüntü işleme konusunda sahip olduğu bilgi birikimi ve tecrübesiyle yardımlarını esirgemeyen hocam sayın Prof. Dr. Selahattin KOCAMAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmamızın başından sonuna kadar benimle birlikte çalışan ve her türlü yardım ve desteklerini esirgemeyen yüksek lisans öğrencisi arkadaşlarım Fatma SOYALAN ve Ezgi GÜNEŞ'e, doktora öğrencisi arkadaşım Orhan KAHRAMAN'a teşekkürü borç bilirim.

Eğitim hayatım boyunca yanımda olan, beni destekleyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME	16
3.1. Dijital Görüntü İşlemenin Amaçları.....	16
3.1.1. Görüntünün insan yorumu için fotografik bilgilerini iyileştirme.....	16
3.1.2. Görüntüyü otonom makine algısına uygun hale getirme	18
3.2. Dijital Görüntünün Oluşturulması.....	19
3.2.1. Elektromanyetik dalga spektrumu.....	19
3.2.2. Analog ve dijital sinyaller	21
3.2.3. Bilgisayarla görme	22
3.2.4. Görüntü işlemede kullanılan renk modelleri	24
3.3. Dijital Görüntü İşlemenin Kullanım Alanları	27
3.4. Dijital Görüntü Korelasyonu.....	29
3.4.1. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinin temel prensibi.....	29
3.4.2. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinde analiz sonuçlarını etkileyen parametreler	30

4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
4.1. Büyük Kirişler (BK).....	36
4.1.1. Büyük kirişlerin malzeme ve geometrik özellikleri.....	36
4.1.2. BK yükleme deney düzeneği ve DIC analizi.....	37
4.2. Küçük Kirişler (KK)	40
4.2.1. Küçük kirişlerin malzeme ve geometrik özellikleri.....	40
4.2.2. KK yükleme deney düzeneği ve DIC analizi.....	41
4.3 Duvarlar (D).....	43
4.3.1. Duvarların malzeme ve geometrik özellikleri.....	43
4.3.2. Duvar yükleme deney düzeneği ve DIC analizi.....	44
5. BULGULAR.....	48
5.1. LVDT ve DIC ölçümleri ile Bulunan Düşey Yer Değişirmelerin Kıyaslanması.	48
5.2. Yüzey Gerilme Değişimleri	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	79
6.1. Sonuç.....	79
6.2. Öneriler	81
KAYNAKLAR	82
DİZİN.....	87

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. BK numuneleri beton karışım miktarları.....	37
Çizelge 4.2. KK numuneleri beton karışım miktarları.....	41
Çizelge 4.3. 27 dm ³ derz ve sıva harcı için karışım miktarları	43
Çizelge 4.4. Duvar numuneleri sıvalı yüz ve plastik kompozit donatı durumları	44
Çizelge 5.1. BK numunelerine ait maksimum düşey yer değiştirme değerleri	48
Çizelge 5.2. KK numunelerine ait maksimum düşey yer değiştirme değerleri	49
Çizelge 5.3. D numunelerine ait maksimum düşey yer değiştirme değerleri	49

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Soğutma suyu borularının titreşimi; (a) DIC analizinden önce çekilen görüntü, (b) DIC analizi sonrası titreşen borunun tespiti	8
Şekil 2.2. Numune boyutları ve donatı yerleşimi	9
Şekil 2.3. Deneye tabi tutulan betonarme çerçeve içerisine yerleştirilmiş dolgu duvarları.....	10
Şekil 2.4. Dolgu duvar yükleme düzeneği	10
Şekil 2.5. The Black River köprüsü deney düzeneği; (a) Black River Köprüsü'nün enine kesiti enstrümantasyon kurulumu, (b) Köpük küp blokların yerleşimi .	11
Şekil 3.1. Görüntüyü keskinleştirme; (a) Orijinal görüntü (b) Keskinleştirilmiş görüntü.....	17
Şekil 3.2. Görüntüden gürültü giderme; (a) Orijinal görüntü (b) Temizlenmiş görüntü .	17
Şekil 3.3. Görüntüdeki bulanıklığı giderme; (a) Orijinal görüntü (b) Bulanıklığı giderilmiş görüntü	18
Şekil 3.4. Bir görüntüde kenarları elde etme; (a) Orijinal görüntü (b) Kenar görüntüsü	19
Şekil 3.5. Görüntü bulanıklaştırma; (a) Orijinal görüntü (b) Bulanıklaştırılmış görüntü .	19
Şekil 3.6. Foton başına enerjiye göre düzenlenmiş elektromanyetik spektrum.....	20
Şekil 3.7. Elektromanyetik spektrumda görünür bant (visible spectrum) aralığı	20
Şekil 3.8. Analog görüntünün oluşturulması, dijitalleştirilmesi, işlenmesi ve tekrar analog forma dönüştürülmesi	21
Şekil 3.9. Analog(sürekli) ve dijital(kesikli) sinyaller	22
Şekil 3.10. Fiziksel görüntünün sayısal karşılığı	22
Şekil 3.11. Farklı sayıda gri tona sahip dijital fotoğraflar	23
Şekil 3.12. Görüntünün sayısallaştırılması	24
Şekil 3.13. Işık yoğunluğuna göre gri skalası	24
Şekil 3.14. İkili renk modeli ve dijital karşılığı	24
Şekil 3.15. Gri tonlamalı renk modeli ve dijital karşılığı	25

Şekil	Sayfa
Şekil 3.16. Görüntü işlemede kullanılan RGB renk modeli; (a) Birim RGB renk küpü, (b) 24 bit RGB renk küpü	26
Şekil 3.17. Renkli görüntüdeki birincil renk bileşenlerinin dijital karşılığı	27
Şekil 3.18. Dijital görüntü işleme kullanılarak kontrol edilen bazı mamul mal örnekleri; (a) Devre kartı kontrolörü, (b) Paketlenmiş haplar, (c) Şişeler, (d) Şeffaf plastik bir üründe hava kabarcıkları, (e) Tahıl, (f) Göz içi implant görüntüsü	28
Şekil 3.19. Bazı görüntüleme örnekleri; (a) Başparmak izi, (b) Kâğıt para birimi, (c) Otomatik plaka okuma sistemi	28
Şekil 3.20. Deformasyonu izlemek için oluşturulan görüntü alt kümeleri	29
Şekil 3.21. Dijital görüntü korelasyonunda kullanılan bazı yöntem ve formülleri.....	30
Şekil 3.22. DIC analizi için yüzey numune yüzey dokusu özellikleri; (a) Uygun olmayan yüzey dokusu, (b) Uygun yüzey dokusu	31
Şekil 3.23. DIC deney düzeneği	33
Şekil 4.1. Kiriş numuneleri DIC analizi için yüzey hazırlığı; (a) Doğal kiriş yüzeyi (b) Beneklenmiş kiriş yüzeyi.....	35
Şekil 4.2. Duvar numuneleri DIC analizi için yüzey hazırlığı; (a) doğal duvar yüzeyi, (b) beneklenmiş duvar yüzeyi	35
Şekil 4.3. Büyük kiriş numune boyutları, kesiti ve donatı yerleşimi	37
Şekil 4.4. BK deney düzeneği, deplasman ölçerin ve numunenin mesnetler üzerindeki konumu.....	38
Şekil 4.5. BK yüzey görüntülerinin kaydedilmesi	38
Şekil 4.6. BK 'de DIC analizi için piksellerin metrik kalibrasyonun yapılması	39
Şekil 4.7. BK 'de DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi.....	39
Şekil 4.8. BK yüzey gerilme alanının oluşturulması	40
Şekil 4.9. Küçük kiriş boyutları ve kesiti.....	40
Şekil 4.10. KK deney düzeneği ve numunenin mesnetler üzerindeki konumu	41
Şekil 4.11. KK 'de DIC analizi için piksellerin metrik kalibrasyonun yapılması	42
Şekil 4.12. KK 'de DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. KK yüzey gerilme alanının oluşturulması	43
Şekil 4.14. Duvar imalatında kullanılan tuğla ve plastik kompozit donatı	44
Şekil 4.15. Duvar diyagonal yükleme ve yer değiştirme ölçümü deney düzeneği	45
Şekil 4.16. Duvar numunelerinin yüzey görüntülerinin kaydedilmesi	46
Şekil 4.17. Duvar numunelerinde DIC analizi için metrik kalibrasyonun yapılması	46
Şekil 4.18. Duvar numunelerinde DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi	47
Şekil 4.19. Duvar yüzey gerilme alanının oluşturulması	47
Şekil 5.1. BK-1 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	50
Şekil 5.2. BK-2 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	50
Şekil 5.3. BK-3 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	51
Şekil 5.4. BK-4 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	51
Şekil 5.5. BK-5 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	52
Şekil 5.6. BK-6 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	52
Şekil 5.7. BK-7 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	53
Şekil 5.8. KK-1 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	53
Şekil 5.9. KK-2 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	54
Şekil 5.10. KK-3 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	54
Şekil 5.11. KK-4 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	55

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. KK-5 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	55
Şekil 5.13. KK-6 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	56
Şekil 5.14. KK-7 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği	56
Şekil 5.15. D-1 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	57
Şekil 5.16. D-2 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	57
Şekil 5.17. D-3 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	58
Şekil 5.18. D-4 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	58
Şekil 5.19. D-5 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması	59
Şekil 5.20. BK-1 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	60
Şekil 5.21. BK-2 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	61
Şekil 5.22. BK-3 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	62
Şekil 5.23. BK-4 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	63
Şekil 5.24. BK-5 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	64
Şekil 5.25. BK-6 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	65
Şekil 5.26. BK-7 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	66
Şekil 5.27. KK-1 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	67
Şekil 5.28. KK-2 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	68
Şekil 5.29. KK-3 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	69
Şekil 5.30. KK-4 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	70
Şekil 5.31. KK-5 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.32. KK-6 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	72
Şekil 5.33. KK-7 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği.....	73
Şekil 5.34. D-1 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	74
Şekil 5.35. D-2 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	75
Şekil 5.36. D-3 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	76
Şekil 5.37. D-4 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	77
Şekil 5.38. D-5 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği	78



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
kN	Kilonewton
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
μm	Mikrometre
mm	Milimetre
mm^3	Milimetreküp
cm^3	Santimetreküp
dk	Dakika
t	Ton

Kısaltmalar

Açıklamalar

CCD	Charged Coupled Device
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
DIC	Digital Image Correlation
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
RGB	Red-Green-Blue

1. GİRİŞ

Bilim insanları eski zamanlardan bu yana bilimsel gözlem ve keşiflerini resim aracılığıyla kaydetmekte ve aktarmaktadır. Fakat bu resimleri başlangıçta yalnızca çizim şeklinde yapabiliyorlardı. Bu çizimlerin en dikkat çekici örneklerini Leonardo da Vinci yapmıştır. O, çalışmalarını açıklamak için çizimlere mutlak öncelik verdi. Hala bu tarz çizimler karmaşık bilimsel olayları açıklamak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu tarz çizimlerin içerikleri oluşturulurken yapılan gözlemler insan gözünün yetenekleriyle sınırlı kalmıştır (Jahne, 2004: 2).

Görüntülerin kullanımında fotoğrafın icadı bilim için ilk devrimi tetikledi. Fransız sanatçı ve kimyager Louis Daguerre tarafından 1839'da Daguerretype adlı fotografik görüntü elde etme yönteminin bulunmasıyla birlikte görüntüleri objektif bir şekilde kaydetmek mümkün oldu. Fotoğrafın icadıyla birlikte birçok bilim dalında fotoğraf nitel gözlemler ve belgelendirme için kullanıldı. Şimdi ise bilimsel devrimin ikinci aşamasını yaşıyoruz. Bu ikinci devrim fotoğrafların sayısallaştırılarak dijital forma dönüştürülmesini kapsamaktadır. Bu sayede fotoğraflar bilgisayar ortamına aktarılabilen ve fotoğraflar istenilen amaç doğrultusunda işlenebilmektedir (Jahne, 2004: 3).

Görüntü işleme doğada var olan görüntülerin optik bir alıcı vasıtasıyla alınarak bir dizi sayısallaştırma işleminden sonra bilgisayar ortamına aktarılıp burada görüntüden istenilen amaç doğrultusunda bilgi çıkarma, yorumlama işlemlerinin genel adıdır. Günümüzde bilgisayarlar nefes kesen bir hızla gelişmekte ve daha güçlü hale gelmektedir. Ayrıca gün geçtikçe ucuzlamaktadır. Böylelikle görüntü işleme için gerekli olan donanım kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bilgisayarların gelişmesine paralel olarak bilgisayarla yapılabilecek işlemler çeşitlenmekte ve bu işlemler için daha az zaman harcanmaktadır. Bu da doğa bilimlerinin tüm alanlarında görüntü işleme gibi çok boyutlu bilimsel verilerin bulunduğu dosyaların analizine imkân sağlamaktadır. Görüntü işleme giderek bilimsel verileri analiz etmek için yaygın bir araç haline gelmekte ve birçok bilim insanı için bilimsel problemlerin incelenmesinin anahtarı olmaktadır.

Görüntü işleminin son yıllarda inşaat mühendisliğinin farklı disiplinlerinde de uygulama alanı artmaktadır. Literatürde inşaat mühendisliğinin alt disiplinlerinde görüntü işlemeden

faydalanılan çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalardan bazıları ve kullanıldığı alt disiplinler şu şekilde sıralanabilir: malzeme alanında (Coster ve Chermant, 2001; Zelelew, Papagiannakis ve Masad, 2008; Moon, Falchetto ve Jeong, 2014), geoteknik alanında (Allersma, 1998; Yue, Chen ve Tham, 2003; Roncella, Scaioni ve Forlani 2004; Wang, Chang ve Markine, 2018), ulaştırma alanında (Chambon ve Moliard, 2011; Oliveira ve Correia, 2012; Fan, Wu, Lu ve Li, 2018), yapı işletmesi alanında (Zou ve Kim, 2007; Gong ve Caldas, 2010; Memarzadeh, Golparvar-Fard ve Niebles, 2013; Yang, Vela, Teizer ve Shi, 2014; Seo, Han, Lee ve Kim, 2015), hidrolik alanında (Fujita, Muste ve Kruger 1998; Kocaman, 2007; Ozmen-Cagatay ve Kocaman, 2010), mekanik alanında (Lee, Kim, Yi ve Kim, 2013; Rimkus, Podvieszko ve Gribniak, 2015; Liu, Cho, Spencer ve Fan, 2016).

Yer değiştirmelerin ve yer değiştirme gradyanlarının (gerinmeler) ölçümü, malzeme mukavemetleri veya kırılma parametreleri gibi malzeme özelliklerinin değerlendirilmesinde ve deneysel gerilme analizinde her zaman önemli bir konu olmuştur. Moiré interferometri (Post, 1983), holografî (Fottenburg, 1969) ve speckle interferometri (Wang, Chen ve Chiang, 1993) gibi optik tekniklerin makroskopik parametreleri analiz etmek için olgunlaşmış teknikler olduğu kanıtlanmıştır ve birçok farklı alanda başarıyla uygulanmıştır. Bununla birlikte, tüm interferometrik tekniklerin sistemin kararlılığı için katı gereksinimleri vardır. Dahası, saçak desenlerinin işlenmesi zahmetli ve zaman alıcıdır. Bu tekniğin kullanımındaki zorluk, birçok araştırmacının dikkatini bilgisayarlı prosedürlerin (Bastawros ve Voloshin, 1990) kullanımı doğrultusunda arttırmıştır (Hung ve Voloshin, 2003).

Son otuz yılda, temassız bir optik teknik olan dijital görüntü korelasyonu (Digital Image Correlation-DIC) yöntemi, Sutton ve diğerleri (1983, 1986, 1988, 1991); Bruck, McNeil, Sutton ve Peters, (1989) tarafından geliştirilmiştir. DIC, günümüzde deneysel mekanik alanında yaygın olarak kullanılan bir optik-sayısal tam alan yer değiştirme ölçüm yöntemi haline gelmiştir. Yöntem, bir nesnenin yüklenmesi sırasında dijital kamera ile çekilen resimler arasındaki bir karşılaştırma esasına dayanmaktadır. Yöntemin optimal kullanımı için, ilgilenilen nesne yüzeyinin boyalı beneklerle kaplanması gerekmektedir. Mekanik deneyler sırasında kaydedilen görüntüler bir bilgisayar yazılımı kullanılarak analiz edilir.

İnşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında numuneler üzerinde gerçekleştirilen mekanik deneyler sırasında numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler genellikle mekanik ölçüm temelli LVDT aletleri kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Ancak bu şekilde gerçekleştirilen ölçümlerin bazı dezavantajları vardır. Bunlar, yer değiştirme ölçümü yapılacak nokta sayısı kadar LVDT aletine ihtiyaç duyulması, ölçümlerin yalnızca noktasal olarak gerçekleştirilebilmesi, ölçü aletlerinin sisteme temas etmesiyle veya ölçüm yapmak amacıyla numune üzerinde tahribatlı çeşitli işlemler gerçekleştirilmesiyle sistemin doğal davranışının etkilenmesi olasılığı, kullanılan her ölçü aletinden alınan verilerin bilgisayara aktarılması için önemli miktarda kablolanmanın gerekmesi, ölçü aletlerinin pahalı ekipmanlar olması, deney sırasında meydana gelen herhangi bir aksaklıkta yeniden analiz imkânının olmaması şeklinde sıralanabilir. DIC yöntemi ise tahribatsız ve temassız bir ölçüm yöntemidir. DIC yöntemiyle tam alan ölçümü gerçekleştirilebilmekte, görüntü karesi içerisinde istenilen sayıda noktanın yer değiştirme değerleri hesaplanabilmekte ve deney sonrasında bile tekrar tekrar analiz yapılabilmektedir. Bu işlemler için pahalı ekipmanlara ve herhangi bir kablolama işlemine gereksinim duyulmaz. Ayrıca DIC yöntemi yük altındaki beton ve betonarme elemanlarda meydana gelen çatlakların takibi açısından da etkin bir yöntemdir. Çatlak takibi geleneksel olarak numuneye yük uygulanarak bu yük altında numunede meydana gelen çatlakların insan gözüyle takip edilmesi ve her yük artışında periyodik olarak deneyin durdurularak çatlakların sayılması ve ölçülmesi şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemle çatlak takibi, insan kaynaklı hataların oluşması (ölçüm hatası, çatlakların gözle görülemeyecek kadar küçük olması gibi), deney süresinin uzaması ve bekleme esnasında numunede yorulma kaynaklı ekstra çatlakların oluşması gibi olumsuzlukların oluşmasına sebep olmaktadır. DIC yöntemiyle çatlak takibinde ise mikron mertebesindeki çatlaklar belirlenebilmekte ve bunun için deneyin durdurulması gerekmemektedir.

Bu tez çalışmasında iki farklı yüksek lisans tez çalışması (Soyalan, 2020; Güneş, 2020) için hazırlanmış 14 adet kiriş ve 5 adet duvar numunesi olmak üzere toplamda 19 adet numune üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme sonucunda numunelerde meydana gelen yer değiştirmeler geleneksel ölçü aleti LVDT ve DIC yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Her iki yöntemle elde edilen bulgular karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Yer değiştirmelerin ölçümünde DIC yönteminin kullanılabilirliği irdelenmiştir. Ayrıca yükleme sırasında numune yüzeylerinde oluşan

gerilme değişimlerinin, çatlak oluşum ve gelişimlerinin belirlenmesinde DIC yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır.



2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Mora, Kwan ve Chan (1998), üç farklı tipte iri agrega üzerinde mekanik eleme ve dijital görüntü işleme yöntemiyle agregaların dane boyutu dağılımını belirlemeye çalışmıştır. Mekanik eleme için çeşitli boyutlarda kare göz açıklığına sahip elekler kullanılmıştır. Görüntülerin elde edilmesinde 736x574 piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kullanılmıştır. Görüntülerin analizi Leica Cambridge Ltd. tarafından üretilen *Quantimet 600* yazılımıyla yapılmıştır. Her iki yöntemle belirlenen dane boyutu dağılımları bir biri ile karşılaştırılmıştır.

Küntz, Jolin, Bastien, Perez ve Hild (2006), 1944 yılında betonarme olarak inşa edilen 23 m uzunluğunda ve 7 m genişliğindeki Saint-Marcel köprüsünün taşıyıcı kirişi üzerinde yer alan bir kesme çatlağının statik ve dinamik yükler altında değişimini, DIC yöntemiyle yerinde incelemiştir. Yükün uygulandığı konumun ve tekrar sayısının çatlak genişliğine etkileri araştırılmıştır. Çatlağın yer aldığı kiriş açıklığı 3,92 m olarak ölçülmüştür. Çatlaktaki yer değiştirmeleri incelemek için 110x130 mm² bir alandan 10 µm düzeyinde çözünürlükle yükleme altında 1024x1280 piksel çözünürlüğe sahip dijital CCD kamera ile görüntüler alınmıştır. Köprü altındaki bir çıkıntıya vidalarla sabitlenen kamera çatlak yüzeyini yaklaşık 1 m mesafeden dik açıyla çekecek şekilde konumlandırılmıştır. Çatlağın servis yükleri altında değişimini incelemek için 9 adet kamyon kullanılmıştır. Kamyonların ikisi 247,5 kN ağırlığında damperli kamyon, diğerleri 256,8 kN ağırlığındaki 10 tekerli yük kamyonu kullanılmıştır. Köprü genişliği boyunca kamyonlar değişik noktalardan geçirilmiş ve her değişik geçiş için görüntüler kaydedilmiştir. Kaydedilen dijital görüntüler çapraz korelasyon tekniği ile 32x32 piksel alt kümeler oluşturularak *Correli^{LMT}* yazılımı ile analiz edilmiştir.

Lecomte ve diğerleri (2006), DIC yöntemiyle yer değiştirmelerin hesaplanmasında numune yüzeyinde oluşturulan beneklerin ve analiz sırasında seçilen alt küme boyutlarının analiz sonuçlarına etkisini incelemiştir. Bunun için 3 farklı benek modeli oluşturulmuştur. Benek modelleri, yüzey üzerindeki noktaların yoğunluğu(noktalar arası mesafe), kontrastı ve benek boyutu yönünden farklılıklar içerecek şekilde hazırlanmıştır. Görüntüler 1024x2080 piksel çözünürlüklü CCD kamera kullanılarak çekilmiştir. Oluşturulan benek modellerinin her biri için 3 farklı boyutta alt küme oluşturulmuştur. Bu alt küme boyutları 13x13, 23x23, 33x33 piksel şeklinde seçilmiştir. DIC analizi *Matlab*

yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Her bir benek modelinin farklı alt küme boyutlarındaki yer değiştirmeleri alt küme boyutunun bir fonksiyonu olarak oluşturulmuş ve bir biri ile karşılaştırılmıştır.

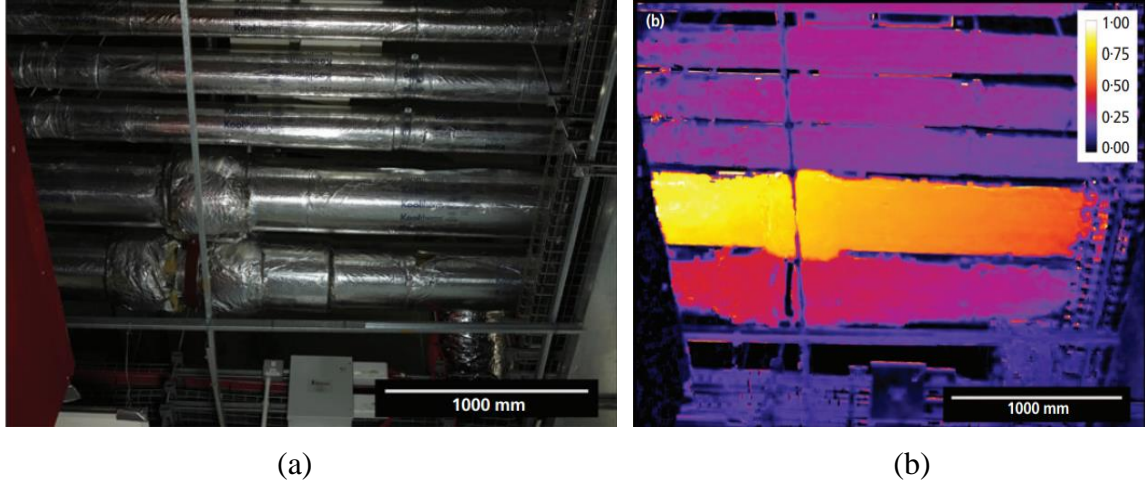
Yonayema, Kitagawa, Iwata, Tani ve Kikuta (2007), yeni imal edilmiş çelik taşıyıcı elemanlara sahip, asfalt kaplama bir köprü üzerinde dikey yer değiştirmelerin ölçümünü geleneksel ölçüm yöntemleriyle ve DIC yöntemiyle gerçekleştirmişlerdir. Köprü açıklığı 15,4 m olup genişliği 7,0 m dir. Geleneksel yöntemlerle yer değiştirme ölçümü için mekanik ölçüm temelli 5 adet deplasman transdüseri (displacement transducer) köprü altına eşit aralıklarla yerleştirilmek suretiyle kullanılmıştır. DIC analizi için kullanılacak görüntüler köprünün her iki yanına yerleştirilen 3072x2408 piksel ve 3504x2336 piksel çözünürlükteki iki farklı kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Kamera kaydı başlatılmadan önce köprü ana taşıyıcı kirişleri üzerine DIC uygulaması için gerekli olan desenler yerleştirilmiş ve deney gece gerçekleştirildiği için güçlü ışık kaynaklarıyla köprü aydınlatılmıştır. Yükleme için 20 t ağırlığındaki kargo kamyonundan faydalanılmıştır. DIC yöntemiyle ve geleneksel yöntemle yer değiştirmeler hesaplanarak bir biri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca köprü ana kirişleri yüzeyinde yükleme sırasında oluşan gerilme yığılması haritaları elde edilmiştir.

Onat (2008) çalışmasında 3 adet $10 \times 10 \times 50 \text{ cm}^3$ boyutlarındaki dikdörtgen kesitli donatısız beton kirişleri üç noktalı eğilme deneyine tabi tutarak betonun yük altındaki yer değiştirmelerini komparatör ve dijital görüntü işleme (digital image processing) teknikleriyle ölçmüştür. Kiriş deplasmanlarını belirgin olarak incelemek için kirişlerin beton karışımlarına lif ilave edilmek suretiyle çekme dayanımları arttırılmıştır. Hazırlanan kirişlerin beton sınıfını tayin etmek için 3 adet $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ boyutlarında küp numuneler oluşturulmuştur. Görüntü işleme için karelaj metodu uygulanmıştır. Numune yüzeyleri karelajlara ayrılarak üç noktalı eğilme düzeneğine yerleştirilmiş ardından hidrolik pres makinasıyla kiriş ortasından yüklenmiştir. Kiriş yer değiştirmelerini kaydetmek için 10.3 megapiksel çözünürlükte CMOS sensörlü kamera kullanılmıştır. Elde edilen görüntüler *Matlab* yazılımıyla analiz edilmiştir. Her iki yöntemle elde edilen sonuçlar bir biriyle karşılaştırmıştır.

Destrebecq, Toussaint ve Ferrier (2011), mevcut bir binadan tam ölçekli bir betonarme bir kirişin gerçek mekanik davranışının belirlenmesi için bir dijital görüntü korelasyon

tekniklerinin kullanımını ele almışlardır. Amaç servis koşullarının çatlama süreci ve kirişin eğilme davranışı üzerindeki etkisini araştırmaktır. Bu amaçla 25 yıl hizmet vermiş bir binadan bire bir ölçekte betonarme bir kiriş çıkarılarak laboratuvar ortamında dört noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Çıkarılan kiriş 784 cm uzunlukta, 16x45 cm² boyutlarında dikdörtgen en kesite sahiptir. Kirişte bulunan mevcut donatılar; boyuna donatı 4 adet 14 mm çapında çelik boy demir ve enine donatı 170 mm aralıklarla dikey olarak yerleştirilmiş 6 mm çapa sahip çelik etriye olarak tespit edilmiştir. Ayrıca mevcut kirişin basınç dayanımı ve young modülü gibi parametreleri yapılan bir dizi test ile tespit edilmiştir. Bu değerler baz alınarak kıyaslama amaçlı laboratuvar ortamında özdeş yeni kirişler üretilmiştir. Deney sırasında kiriş yüzey görüntüleri 1024x1024 piksel çözünürlüğünde CCD kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Görüntülerin DIC analizi *SeptD* yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

McCormick ve Lord (2012) DIC yönteminin sadece laboratuvar uygulamalarıyla sınırlı kalmayıp inşaat mühendisliği yapılarının yerinde tam alan deformasyon ölçümleri için de kullanması yönünde İngiltere’de bulunan Ulusal Fizik Laboratuvarı (National Physical Laboratory- NPL) bünyesinde çeşitli çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalardan bir tanesi İngiltere’nin Chiristcurch bölgesinde Stour Nehri üzerinde yer alan Tuckton Köprüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Köprü üzerindeki çatlak oluşumunu incelemek için 60 megapiksel bir kamera betonarme köprü ayağını görecektir şekilde konumlandırılmış daha sonra üzerinden geçen bir otobüs vasıtasıyla yüklenmiştir. Deney sonucunda köprü ayağının dikey yer değiştirme haritası DIC ile çıkarılmıştır. Başka bir çalışma da bir otoyol köprüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Görüntüleri kaydetmek için kamera köprüye 15 metre mesafede konuşturulmuştur. Yükleme için 32 t ağırlığında 4 adet kamyon kullanılarak değişik yük kombinasyonları oluşturulmuştur. DIC için yeterli ortam aydınlatması yapılarak görüntüler elde edilmiştir. Köprünün kademeli yer değiştirme haritaları ve yer değiştirme zaman grafikleri oluşturulmuştur. Bir diğer çalışmada NPL’de bulunan bir laboratuvarın soğutma suyu sistemini sağlayan borular (Şekil 2.1 (a)) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yan yana geçen soğutma borularından titreşen borunun tespiti için DIC yöntemi kullanılmıştır. Analiz sonucunda tespit edilen titreşen boru Şekil 2.1 (b)’deki gibi bulunmuştur.

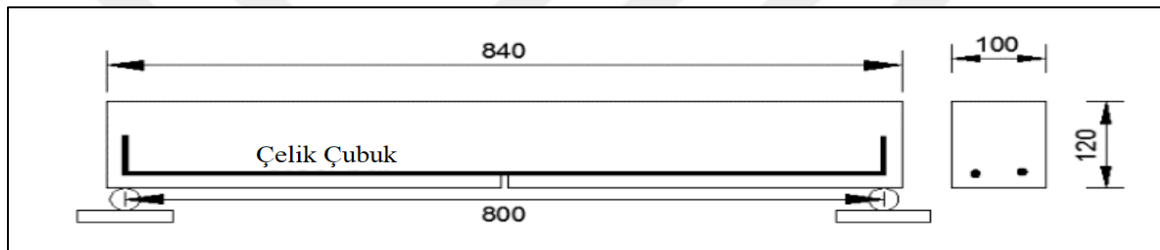


Şekil 2.1. Soğutma suyu borularının titreşimi; (a) DIC analizinden önce çekilen görüntü, (b) DIC analizi sonrası titreşen borunun tespiti (McCormick ve Lord, 2012)

Koltsida, Tomor ve Booth (2013), DIC yöntemini çalışma yükleri altında yığma kemer köprülerde meydana gelen bozulma ve yer değiştirmeleri izlemek için kullanmıştır. DIC tekniğinin gerçek alan ölçümünde kullanılabilirliğini test etmek amacıyla öncelikle laboratuvar ortamında denemeler yapılmıştır. Laboratuvar deneyleri $210 \times 100 \times 65 \text{ mm}^3$ boyutlarındaki kil tuğlalar üzerinde yapılmıştır. Tuğlalar 250 kN kapasiteli yükleme cihazında basınç testine tabi tutulmuştur. Tuğlalarda meydana gelen yer değiştirmeler mekanik ölçüm temelli LVDT aletiyle ve DIC yöntemiyle ölçülmüştür. Tuğla yüzey deseni doğal olarak gri yoğunluk dağılımına sahip olduğu için tuğlarda her hangi bir boyama işlemi yapılmamıştır. Görüntüler 14 megapiksel çözünürlüğe sahip dijital bir kamera ile alınmıştır. Kamerada temastan dolayı meydana gelebilecek titreşimleri önlemek amacıyla uzaktan kumandalı bir deklanşör sistemi kullanılmıştır. Laboratuvar testleri tamamlandıktan sonra dört açıklıklı her açıklığı 10 m genişliğe sahip bir demiryolu köprüsünde gerçek alan izlemesi yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinde olduğu gibi yine köprü üzerinde her hangi bir benekleme işlemi yapılmamış ve aynı kamera sistemi kullanılmıştır. Köprü yüklemesi için boji başına 45 t ağırlığa sahip British Rail Class 220 model tren kullanılmıştır. DIC analizi Ghent Katolik Üniversitesi Makine Mühendisliği bölümü tarafından geliştirilen *MatchID-2D* yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

Fayyad ve Lees (2014), betonarme kirişlerin kırılma ve çatlama davranışları üzerinde çelik donatı özelliklerinin etkisini DIC yöntemiyle incelemişlerdir. Ayrıca DIC yöntemiyle betonarme kirişlerin yük altında yaptıkları düşey deplasmanları ölçmüş ve kirişlerin yüzeyinde meydana gelen çatlakları görselleştirmişlerdir. Bunun için $100 \times 120 \text{ mm}^2$ dikdörtgen en kesite sahip 840 mm uzunluğunda betonarme kirişler hazırlanmıştır.

Kirişlerde donatı olarak, farklı nominal çaplara sahip nervürlü deforme çelik kullanılmış ve sadece kiriş altında 2 adet boyuna çekme donatısı olacak şekilde yerleştirilmiştir (Şekil 2.2). Donatılar çelik eye kullanılarak deforme edilmiştir. Kiriş donatıları tam deforme olmuş, yarı deforme olmuş ve deforme olmamış olarak 3 farklı tipte üretilmiştir. Kirişler 2 seri olarak hazırlanmış ve her seri eşit boyutlarda 7'şer numuneden oluşturulmuştur. İkinci test serisi deneyin sonuçlarının tekrarlanabilirliğini denetlemek için kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler üç noktalı eğilme deney düzeneğine yerleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 800 mm olarak ayarlanmış ve tam kiriş ortasında kontrollü düşey yük uygulanarak deney görüntüleri 5472x3648 piksel çözünürlüğündeki kamera ile kaydedilmiştir.



Şekil 2.2. Numune boyutları ve donatı yerleşimi (Fayyad ve Lees, 2014)

Pérez, Coppieters ve Debruyne (2015), DIC analizinde uygun gri yoğunluk dağılımı elde etmek amacıyla uygulanan boya kalınlığının analiz sonuçlarına etkisini araştırmışlardır. Bunun için 80 mm uzunluğunda SS304 çelik sacdan 8 adet kullanılmıştır. Her numune yüzeyi 8 eşit parçaya ayrılmış daha sonra 30 dakikada bir her seferinde bir parça boyanmamak şartıyla 8 kat boya uygulaması yapılmıştır. Böylelikle numune yüzeylerinde 8 farklı kalınlıkta boya tabakası oluşturulmuştur. Bir ultrasonik kalınlık ölçer kullanılarak boya katman kalınlıkları en az 10 μm , en fazla 110 μm olarak tespit edilmiştir. Boyama işlemi tamamlanan numuneler çelik çekme deneyine tabi tutulmuştur. Çekme deneyi sırasında numune yüzey görüntüleri CCD kamera kullanılarak kaydedilmiştir. Deney sırasında kaydedilen görüntüler *Match ID 3D* yazılımıyla analiz edilmiştir.

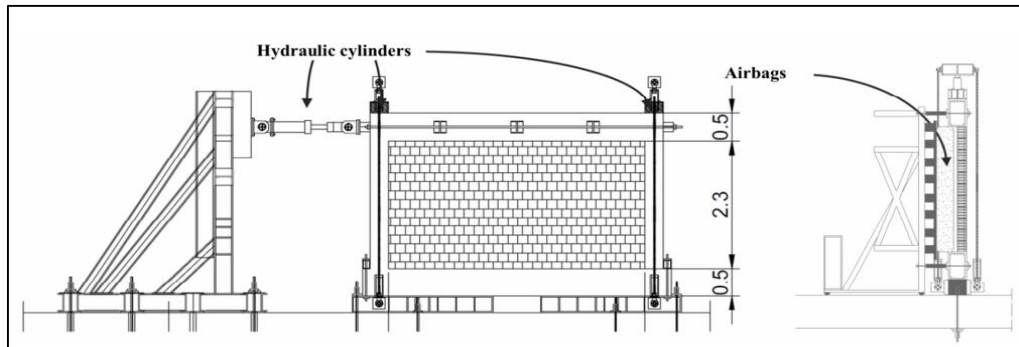
Ramos ve arkadaşları (2015), modern yapılarda önemli bir yere sahip olan dolgu duvarlarla güçlendirilmiş betonarme çerçeveler üzerinde dijital görüntü korelasyonu (DIC) yöntemini kullanarak sismik yükler altında duvarların çerçeveden ayrılma, çapraz çatlama ve duvar köşesinin çatlaması gibi davranışlarını iki boyutlu ve üç boyutlu olarak incelemiştir.

Bunun için $4,22 \times 2,30 \text{m}$ ($\sim 9,22 \text{ m}^2$) boyutlarında betonarme çerçeve içerisine yerleştirilmiş dolgu duvarlar hazırlanmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Deneye tabi tutulan betonarme çerçeve içerisine yerleştirilmiş dolgu duvarları (Ramos ve arkadaşları, 2015)

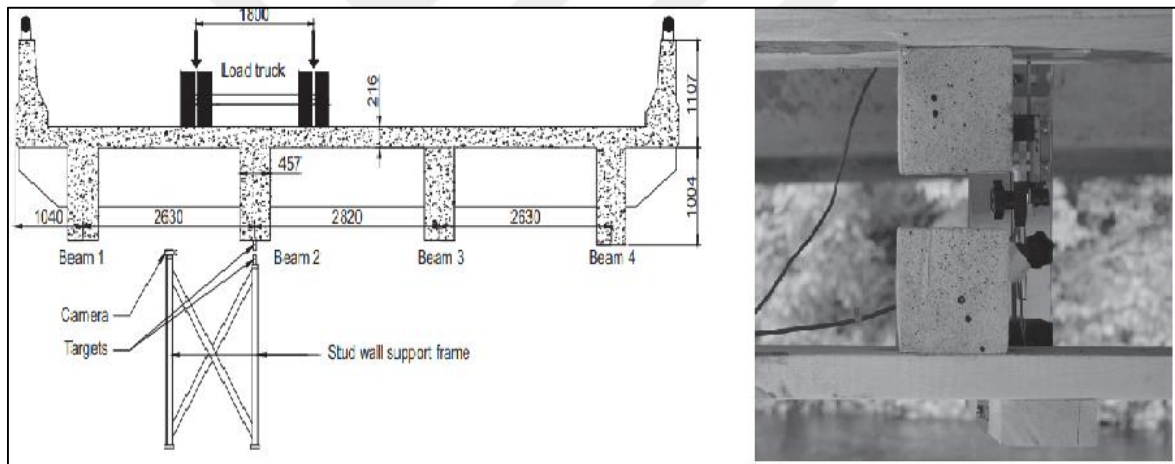
Deney düzeneğinde 3 adet hidrolik silindir kullanılmıştır. Bunlardan 2 tanesi çerçeve üzerinde baskı oluşturmak amacıyla dikey olarak, 1 tanesi kayma gerilmesi oluşturmak için yatay olarak uygulanmıştır. Ayrıca duvarın düzlem dışı devrilme ihtimaline karşı duvar arkadan hava yastıkları (airbags) ile desteklenmiştir (Şekil 2.4). Görüntüleri kaydetmek için CMOS sensörlü ve 4,1 Mega Piksel çözünürlüklü kamera kullanılmıştır. Elde edilen görüntülerin analizi için *VIC-3D* adlı ticari bir yazılım kullanılmıştır.



Şekil 2.4. Dolgu duvar yükleme düzeneği (Ramos ve arkadaşları, 2015)

Murray, Hoag, Hoult ve Take (2015), bir betonarme köprünün değişen yük seviyelerinde statik yer değiştirmelerini ve değişen araç hızlarında dinamik yer değiştirmelerini ölçmek için DIC kullanan bir saha uygulaması yapmışlardır. İki farklı kamera tarafından sağlanan DIC ölçümlerinin, hem statik hem de dinamik testler için geleneksel bir deplasman ölçerden alınan sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Deney Kanada'nın Ontario kentinde

bulunan iki açıklıklı her açıklığı 16 m olan toplam 32 m uzunluğundaki The Black River köprüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Köprü 1933 yılında inşa edilmiştir. Köprü'nün mekanik yer değiştirme ölçümleri köprü'nün altına 4 eşit aralıkta yerleştirilen LVDT'ler kullanılarak yapılmıştır. 4 LVDT'nin yerleştirildiği noktalardan ikisine kamera düzeneği kurulmuştur. Kameraların kurulumu için köprü altına tahtadan bir iskele inşa edilip kameralar bu iskelelere monte edilmiştir (Şekil 2.5 (a)). Ayrıca bir tanesi köprüde bir tanesi tahta iskelede olmak üzere iki adet küp şeklindeki köpük bloklar epoksiyle düzeneğe yapıştırılmıştır (Şekil 2.5 (b)). Küp bloklar düşeyde hizalanarak yükleme sırasında aralarındaki mesafe değişimi 18 megapiksel çözünürlüğündeki CCD kamera ile kaydedilmiştir. Statik yükleme bir treyler üzerine değişik sayılarda beton blokların yüklenmesiyle yapılmıştır. Dinamik yükleme ise bu treylerin bağlı olduğu kamyonun değişik hızlarda köprü üzerinde geçirilmesiyle sağlandı.



Şekil 2.5. The Black River köprüsü deney düzeneği; (a) Black River Köprüsü'nün enine kesiti enstrümantasyon kurulumu, (b) Köpük küp blokların yerleşimi (Murray ve arkadaşları, 2015)

Gerbo, Thrall, Smith ve Zoli (2016), soğuk bükme işlemine tabi tutulan çelik plakaların gerilme ve deformasyon değişimlerini sonlu eleman modeliyle ve DIC yöntemiyle analiz etmiş ve her iki yöntemle elde edilen sonuçları bir biri ile karşılaştırmışlardır. Denejde 18 adet 12,7 mm kalınlıktaki saç plakalar kullanılmıştır. Çeşitli genişlikteki plakalar (76,2 mm ve 203 mm), değişik açılarda (10, 20 ve 30 derece) soğuk bükme işlemine maruz bırakılmıştır. Soğuk bükme işlemi bilgisayar kontrollü makina (Computer numerical control-CNC) ile 114 mm genişlikte ve 102 mm sabit yarıçapta abkant kullanılarak gerçekleştirilmiştir. DIC analizinde kullanılacak görüntüler 2448x2050 piksel çözünürlükte 2 adet kamera ile kaydedilmiştir. Görüntü analizleri *ARAMIS DIC* programı kullanılarak

yapılmıştır. 2 boyutlu ve 3 boyutlu sonlu eleman modeli *ABAQUS* yazılımı kullanılarak oluşturulmuştur.

Santos, Pitangueira, Ribeiro ve Carrasco (2016), betonun elastisite modülünü geleneksel yöntemlerle ve DIC tekniğini kullanarak elde etmişlerdir. Bunun için 15 cm çapında 30 cm yüksekliğinde standart boyutlarda silindir beton numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin yüzeyinde $2 \times 1,5 \text{ cm}^2$ boyutlarında dikdörtgen bir alana boyalarla noktalamalar yapılmıştır. Daha sonra numuneler aksenal yüklemeye tabi tutulmuştur. Numune yüzeyinde oluşturulan küçük alanının aksenal yük altındaki yer değiştirme görüntüleri 1280x960 piksel çözünürlüğünde bir USB mikroskop(800x) kullanılarak kaydedilmiştir. Görüntülerin DIC analizi *LabVIEW* yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Diluxshan ve Mallikarachchi (2016), İnşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında deplasman ölçümünde DIC yöntemini ve klasik deformasyon ölçer kullanarak deplasman ölçümü yapmış ve her iki yöntemden elde ettiği sonuçları bir biri ile karşılaştırmışlardır. Bunun için kemik şeklinde 63,5 mm uzunluğa sahip alüminyum bir plaka kullanılmıştır. Kamera kalibrasyonunu sağlamak için karelej tekniği kullanılmıştır. Karelej için beyaz bir kâğıt üzerine $7 \times 10 \text{ mm}^2$ boyutların kareli bir dama tahtası deseni oluşturulmuştur. Her karenin kenar uzunluğu 21,79 mm'dir. Alüminyum plaka çekme testine tabi tutularak deney esnasında deformasyonlar mekanik yöntemlerle ölçülmüştür. Numune yüzey görüntüleri 20 mega piksel çözünürlüğe sahip dijital kamera ile kaydedilmiştir. Görüntülerin DIC analizi *Matlab* yazılımı ile yapılmıştır.

Deák ve Kowalik (2018), hafif kategorideki uçaklarda metal parçaları birbirine bağlamak için kullanılan cıvatalı bağlantı elemanlarının gerilme altındaki deformasyonlarını ve gerilim mekanizmalarını deneysel yöntemlerle ve dijital görüntü korelasyonu yöntemiyle incelemişlerdir. Bunun için 11 adet karbon-epoksi karışımı dikdörtgen şeklinde hazırlanmış laminant levhalar ve levhaları bir birine bağlamak için kullanılan pirinç alaşımından oluşmuş bağlantı elemanları kullanılmıştır. Deneysel çalışma *Instron 8516* otomatik hidrolik test makinası ile gerçekleştirilmiş ve analiz edilmiştir. Dijital görüntü korelasyonu için numune yüzeyinde siyah ve beyaz boyalarla benekleme işlemi yapıldıktan sonra kamera ile deney görüntüleri kaydedilmiştir. *Gom Correlate* yazılımı kullanılarak kaydedilen görüntüler analiz edilmiştir.

Bardak ve Sözen (2018), DIC yöntemi ile mobilya sektöründe kullanılan ahşap esaslı kompozitlerin su alma davranışlarını incelemiştir. Bunun için 5x5x1,8 boyutlarında yonga levha, kaplamalı yonga levha ve orta yoğunlukta lif levha numunelerinin her birinden 10'ar adet kullanılmıştır. DIC yöntemine uygun olacak şekilde numune yüzeylerinde benekler oluşturulmuş daha sonra numuneler iklimlendirme kabiniinde 20 °C sıcaklık altında ve %65 bağıl nem içeren ortama maruz bırakıldıktan sonra yine 20 °C sıcaklıktaki suya daldırılarak 2 saat bekletilmiştir. Numunelerin suya daldırılmadan önce ve suya daldırıldıktan sonra görüntüleri 1628x1236 piksel çözünürlüğe sahip CCD kamera kullanılarak kaydedilmiştir. DIC analizi *Matlab* tabanlı *Ncorr* yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Deney sonucunda ahşap numunelerin yer değiştirme davranışları elde edilmiş ve numune yüzeylerinde oluşan gerilme yığılmaları görselleştirilmiştir.

Doğan (2018), çalışmasında deprem sonrasında hasar gören kolonlarda oluşan çatlakların sayısını, genişliğini, en büyük çatlak uzunluğunu, toplam çatlak alanı ve toplam çatlak uzunluğu gibi parametreleri görüntü işleme tekniğini kullanarak belirlemiş, 2007 ve 2018 deprem yönetmeliklerine göre hasar tespiti yapmaya çalışmıştır. Bu amaçla 12 adet 350x350 mm kesit ölçülerine sahip 1800 mm yüksekliğinde betonarme kolonlar üretilmiştir. Kolonların altına 500x700x2000 mm³ boyutlarında betonarme temel imal edilerek konsol kolonlar deneye hazır hale getirilmiştir. Daha sonra kolonlar tıpkı deprem esnasında olduğu gibi tersinir yüklere maruz bırakılmıştır. Deformasyon ölçümleri için LVDT ölçüm aletlerinden ve görüntü işlemeden yararlanılmıştır. Yükleme esnasında kolonların 10 tanesinde iki yüzden, 2 tanesinde üç yüzden aynı anda görüntü alınmıştır. Görüntülerin alımı sırasında deklanşöre temas edilerek kameranın titreşmemesi için uzaktan kumandalı bir deklanşör sistemi oluşturulmuştur. Görüntülerin analizi *Matlab* yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir.

Acikgoz, DeJong ve Soga (2018), İngiltere'nin Yorkshire kentinde Leeds-Shelby güzergâhında bulunan Marsh Lane viyadüğü üzerinde yer alan çeşitli çatlakların dinamik yükler altında değişimini DIC yöntemini kullanarak incelemiştir. Viyadük'te incelenen iki kemer açıklığı 19. Yüzyılda kuzey doğu Leeds demiryolunun bir parçası olarak inşa edilmiştir. Kemer açıklığı 7,7 m, yüksekliği 2,1m genişliği 8 m dir. Viyadüğe 6 m mesafede kameralar tren geçişi esnasında çatlağın bulunduğu 20x20 cm² alana odaklanarak çatlakta meydana gelen değişimleri kaydetmiştir. Tren geçişlerinin doğu yönünde ve batı yönünde 5'er defa geçişi esnasında toplam 10 geçişte çatlak değişimleri gözlenmiştir.

Kamera olarak 2048x1088 piksel çözünürlükte 8 mm genişlikte lense sahip dijital kamera kullanılmıştır. Görüntülerin DIC analizi *Video Gauge* yazılımı kullanılmıştır.

Wang ve diğerleri (2018), Demir yolu hatlarının geçiş bölgelerinde farklı malzeme özellikleri ve yapı davranışları nedeniyle zeminde meydana gelen önemli farklı oturmaların ölçümü için alternatif yöntemler üzerinde çalışmışlardır. Bu bölgelerdeki farklı oturmaların ölçümünün daha ekonomik ve daha az iş gücü gerektiren tekniklerle yapılmasını amaçlamışlardır. Bu amaçla Hollanda'daki bir demiryolu köprü geçişinde klasik yapı sağlığı izleme sistemleri, InSAR (Satellite Synthetic Aperture Radar) sistemi ve DIC tekniğiyle ölçümler yapılmıştır. InSAR sistemi, jeodezi ve uzaktan algılamada bir radar tekniğidir ve yüzey deformasyonlarında meydana gelen milimetre düzeyindeki değişiklikleri ölçebilen bir sistemdir.

Sanal (2018), fiber lif katkılı beton kirişler üzerinde çatlak yayılımı ve lokalizasyonunu DIC tekniğini kullanarak incelemiştir. Bunun için hacimce %1,2 oranında elyaf lif içeren 100x100x500 mm boyutlarında 5 grup kiriş hazırlanmıştır. Her grup sadece içerdiği elyaf lif uzunluğu yönünden farklı (lifsiz, 6, 13, 35 ve 50mm) olup diğer özellikleri yönünden özdeş olarak hazırlanmıştır. Numuneler dört noktalı eğilme düzeneğine yerleştirilmiş ve düşey yönde 10 mm deplasman yapana kadar 0,1 mm/dk hızla yüklenmiştir. Test sırasında kiriş yüzey görüntüleri 0,15 saniyede bir fotoğraflanarak elde edilmiştir. DIC tekniği kullanılarak, kiriş yüzey çatlakları ve yayılımı görsel olarak elde edilip *ImageJ* yazılımı ile çatlak alanları hesaplanmıştır.

Yıldırım ve diğerleri (2019) inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarından biri olan tek eksenli çekme deneyinde çekmeye tabi tutulan numunelerin çoklu çatlak gelişiminin takibini ve yük altında meydana gelen birim yer değiştirmelerini geleneksel ölçüm yöntemlerini ve DIC yöntemini kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Çekme numuneleri 330 mm yüksekliğinde, 26 mm kalınlığında ve baş kısımları 60 mm, orta kısımları 30 mm genişlikte kemik şeklinde hazırlanmıştır. Numuneler, kararlı çoklu çatlak davranış göstermesi için beton karışımında yüksek çekme dayanımlı polipropilen lif (HTPP) katkısı kullanılarak mühendislik özellikleri geliştirilmiş çimento esaslı lifli kompozitler (Engineered Cementitious Composites-ECC) olarak imal edilmiştir. Yer değiştirmelerin mekanik ölçümü 4 adet geleneksel deplasman ölçer (LVDT- Linear variable differential transformer) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Optik ölçüm için numune yüzeyleri siyah-

beyaz boyalarla beneklendirilmiştir. Görüntüleri kaydetmek için 3384x2710 piksel çözünürlükte ve CCD sensörlü kamera kullanmıştır. Görüntülerin DIC analizi VIC-2D adlı ticari yazılım ile gerçekleştirilmiştir.



3. DİJİTAL GÖRÜNTÜ İŞLEME

Doğada var olan görüntülerin bir görüntü alıcı ile kaydedilmesiyle fotoğraflar oluşturulmaktadır. Bu fotoğrafların bilgisayarlar tarafından algılanabilmesi amacıyla fotoğraflar bir dizi sayısallaştırma işlemine tabi tutularak dijital forma dönüştürülür. Dijital görüntü işleme (digital image processing), dijital fotoğrafların içerisinde bir bilgisayar yardımıyla bilgi çıkarma ve yorumlama işlemlerinin genel adıdır.

3.1. Dijital Görüntü İşlemenin Amaçları

Görüntü işleme bir görüntünün doğasını değiştirmeyi içerir. Görüntü işlemenin kullanım amaçlarını; görüntünün insan yorumu için fotografik bilgilerini iyileştirmek ve görüntüyü otonom makine algısına uygun hale getirmek olarak temel anlamda iki ana kategoriye ayrılabilir (McAndrew, 2004).

3.1.1. Görüntünün insan yorumu için fotografik bilgilerini iyileştirme

İnsanlar görüntülerin keskin, net ve ayrıntılı olmasını ister. Görüntü işleme ile bir görüntünün insanlar tarafından daha iyi görülüp yorumlanmasını sağlayan görüntülerdeki ayrıntıların iyileştirilmesine yönelik bazı örnekler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Görüntülerin daha net ve temiz görünmesi için görüntülerde ayrıntıların keskinleştirilmesi işlemi yapılır. Şekil 3.1’de orijinal görüntü ve keskinleştirilmiş hali gösterilmiştir. Keskinleştirilmiş görüntünün daha net ve daha çok ayrıntı içerdiği görülmektedir.



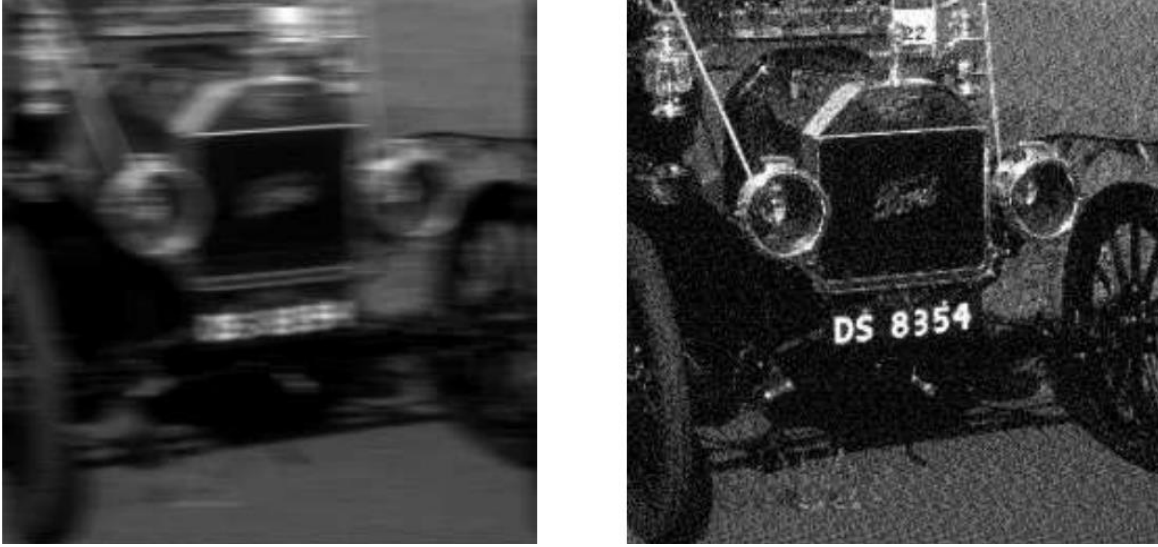
Şekil 3.1. Görüntüyü keskinleştirme; (a) Orijinal görüntü (b) Keskinleştirilmiş görüntü (McAndrew, 2004)

- Görüntülerde ‘parazit’ gidermek görüntüdeki rastgele hatalar olan gürültünün giderilmesi anlamına gelir. Veri aktarımında gürültü çok yaygın bir problemdir. Gürültünün varlığı görüntüden çıkarılan bilgileri etkileyebilir ve alınan sonuçlar istenmeyen hatalar içerebilir. Şekil 3.2’de gürültü içeren bir görüntünün orijinal hali ve gürültüden temizlenmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Görüntüden gürültü giderme; (a) Orijinal görüntü (b) Temizlenmiş görüntü (McAndrew, 2004)

- Görüntülerde bulanıklık kameranın deklanşör hızının görüntünün hızından yavaş olması durumunda meydana gelebilir. Örneğin hareket eden sporcular veya arabalar gibi hızlı nesnelerin fotoğraflarını çekerken bulanıklık sorunuyla karşılaşabiliriz. Şekil 3.3’te ayrıntıları çok az belli olan bir görüntünün bulanıklığı görüntü işleme tabi tutularak netleştirilmiş hali görülmektedir.

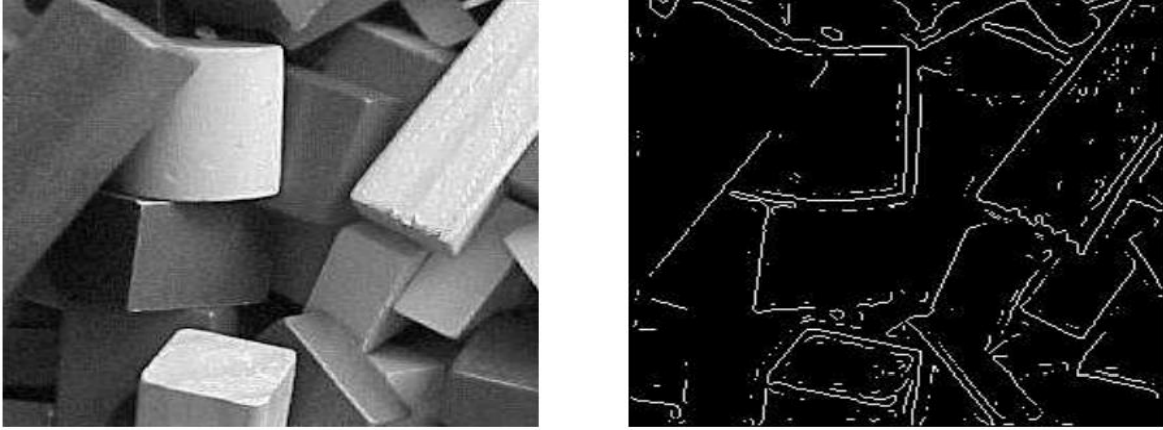


Şekil 3.3. Görüntüdeki bulanıklığı giderme; (a) Orijinal görüntü (b) Bulanıklığı giderilmiş görüntü (McAndrew, 2004)

3.1.2. Görüntüyü otonom makine algısına uygun hale getirme

Makinalarda görüntülerin sadece istenilen amaca yönelik bilgileri içermesi, görüntülerin basit ve derli toplu olması gerekmektedir. Görüntülerdeki gereksiz ayrıntıların görüntüden çıkarılmasına yönelik bazı örnekler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Ölçüm ve sayım amaçları için biz bir görüntüdeki tüm ayrıntılarla ilgileniriz. Ancak bu işlemlerin bir makineye yaptırılması söz konusu olduğunda makinenin tek ilgi konusu şekil, boyut veya renk olabilir. Örneğin içerisinde geometrik nesnelerin bulunduğu Şekil 3.4'teki görüntü ele alınırsa nesnelerin alanını ve çevresini hesaplamak için ihtiyacımız olan tek şey nesnenin kenarlarıdır. Diğer ayrıntılara gerek olmadığı için görüntü bu ayrıntılardan arındırılır. Aynı mantıkla Şekil 3.5'teki hayvanın sadece şekliyle ilgileniyorsak diğer ayrıntılara gerek yoktur ve sadece hayvanın silüetinin görünmesi yeterlidir. Diğer ayrıntılar görüntünün bulanıklaştırılması ile giderilebilir.



Şekil 3.4. Bir görüntüde kenarları elde etme; (a) Orijinal görüntü (b) Kenar görüntüsü (McAndrew, 2004)



Şekil 3.5. Görüntü bulanıklaştırma; (a) Orijinal görüntü (b) Bulanıklaştırılmış görüntü (McAndrew, 2004)

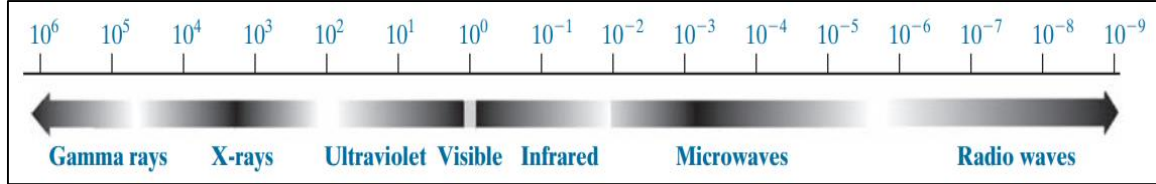
3.2. Dijital Görüntünün Oluşturulması

3.2.1. Elektromanyetik dalga spektrumu

Fotoğraflar, oluşturulurken kullanılan enerji kaynaklarına göre kategorize edilebilir. Bu enerji kaynaklarından başta geleni elektromanyetik enerji spektrumdur. Bunun dışında akustik, ultrasonik ve elektronik enerji kaynakları fotoğraf oluşturmak için kullanılan enerji kaynaklarından bazılarıdır (Gonzalez ve Woods), 2018: 23).

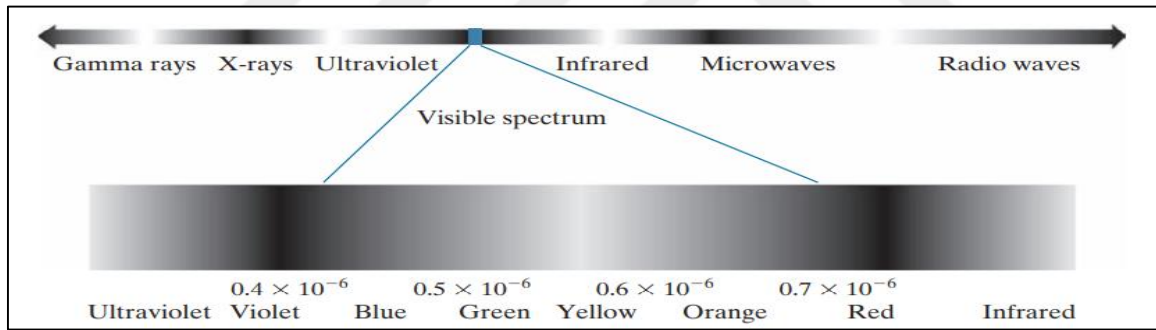
Elektromanyetik dalgalar farklı dalga boylarında yayılan sinüs dalgaları şeklinde düşünülebilir. Bu dalgaların kütlesi yoktur, ışık hızında hareket ederler ve her biri belirli bir seviyede enerji taşımaktadır. Bu enerji yığını foton olarak adlandırılmaktadır. Fotonlar

taşıdıkları enerjinin büyüklüğüne göre sınıflandırılırsa Şekil 3.6'daki elektromanyetik spektrum elde edilir. Spektrumdan da görülebileceği üzere en fazla enerjiyi gama ışınları (gamma rays) en az enerjiyi radyo dalgaları (radio waves) taşımaktadır (Gonzalez ve Woods), 2018: 24).



Şekil 3.6. Foton başına enerjiye göre düzenlenmiş elektromanyetik spektrum (Gonzalez ve Woods), 2018: 24)

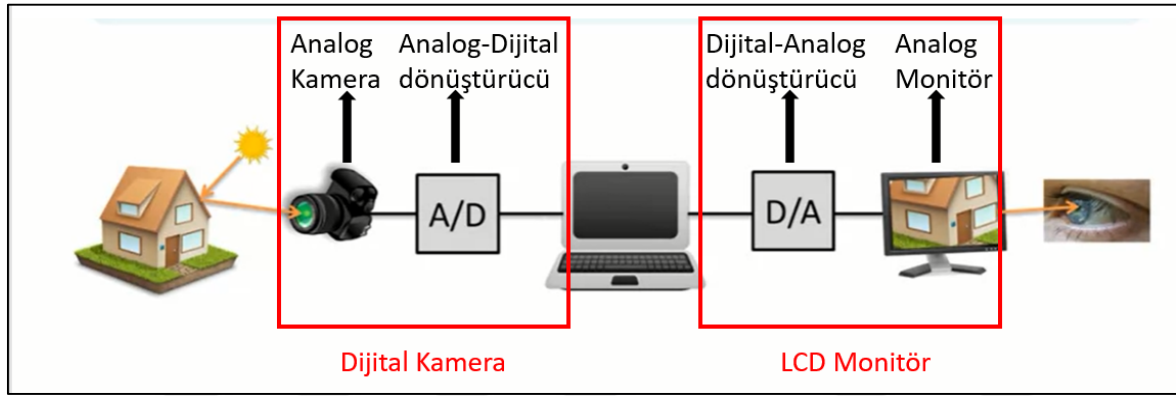
Elektromanyetik spektrum üzerinde insan gözüyle görülebilen kısma görünür bant (visible spectrum) denilmektedir. Görünür bant elektromanyetik spektrumun çok küçük bir parçasını kapsamaktadır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Elektromanyetik spektrumda görünür bant (visible spectrum) aralığı (Gonzalez ve Woods), 2018: 56)

Günümüzde kullandığımız fotoğrafların büyük bir çoğunluğu genellikle elektromanyetik enerji spektrumundaki radyasyonla oluşturulan fotoğraflardır. Özellikle X-ray ve görünür bantla oluşturulan fotoğraflardır. Işık güneş tarafından oluşturulan elektromanyetik spektrumda görünür bantta yer alan bir sinüs dalgasıdır. Güneş tarafından oluşturulan ışık dünya üzerindeki nesnelere çarparak yansır. Yansıyan bu ışınlar analog kameranın içerisindeki filmde bazı kimyasal değişikliklere yol açarak analog fotoğrafın oluşmasını sağlar. Analog fotoğrafın bilgisayara aktarılabilmesi için dijital fotoğrafa dönüştürülmesi yani sayısallaştırılması gerekmektedir. Bunun için analog-dijital dönüştürücü (sayısallaştırıcı) kullanılır. Günümüzdeki dijital kameralar analog görüntünün elde

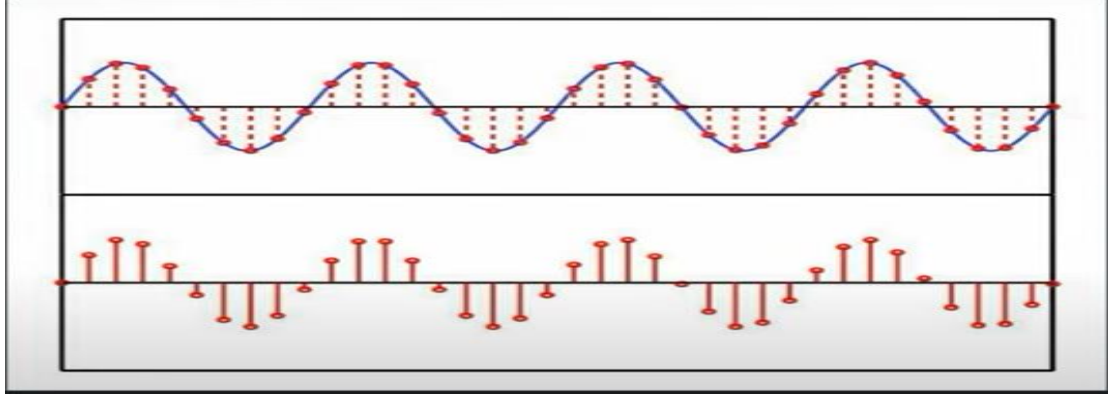
edilmesi ve dijital forma dönüştürülmesi işlemlerini aynı anda yapabilmektedir yani direkt dijital fotoğraflar oluşturulabilmektedir. Dijital forma dönüştürülen fotoğraf bilgisayar tarafından tanımlanabilir hale getirilmiş olur. Oluşturulan dijital fotoğraflar bilgisayarda istenilen amaca göre işlenir. İşlenmiş fotoğraflar tam tersi işlem adımlarına tabi tutularak önce dijital formdan analog forma dönüştürülür daha sonra analog bir monitör tarafından elektromanyetik dalgalara dönüştürülerek görüntülerin insan gözü tarafında görülebilmesi sağlanır. Yine günümüzde kullanılmakta olan LCD ekranlar sayesinde dijital-analog dönüşümü ve fotoğrafların elektromanyetik dalgalara dönüştürülmesi işlemleri tek adımda yapılabilmektedir (Şekil 3.8) (Katsaggelos, 2020).



Şekil 3.8. Analog görüntünün oluşturulması, dijitalleştirilmesi, işlenmesi ve tekrar analog forma dönüştürülmesi (Katsaggelos,2020)

3.2.2. Analog ve dijital sinyaller

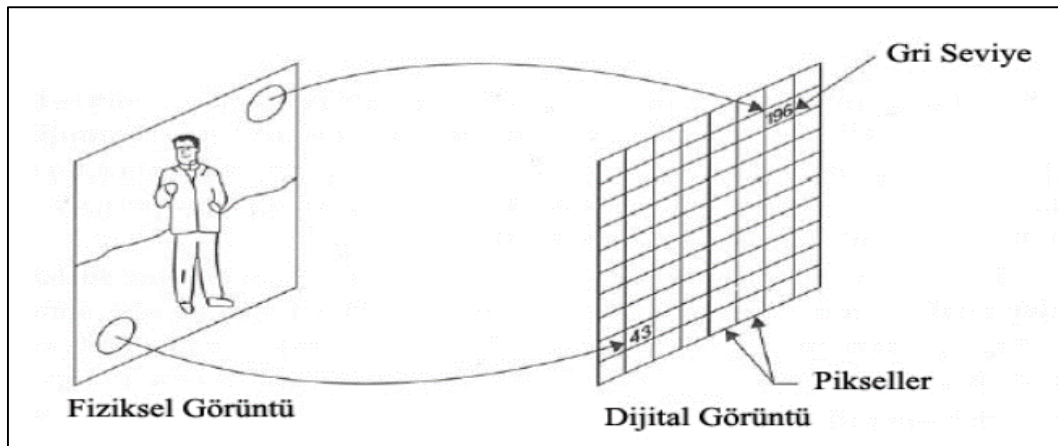
Sinyal, bir fenomen hakkında bilgi taşıyan bir fonksiyondur. Sinyaller, fiziksel bir niceliğin herhangi bir parametreye göre değişimini temsil eden bir fonksiyondur. Buradaki parametre genellikle zaman veya mesafe olmaktadır. Örneğin günlük hava sıcaklıklarının zamana göre değişimini gösteren grafik bir sinyaldir. Sinyaller analog sinyal ve dijital sinyal olmak üzere iki çeşittir. Analog sinyal ölçülen fiziksel niceliğin değişimini aralıksız olarak sürekli bir şekilde bildiren sinyallere denir. Dijital sinyaller ise ölçülen fiziksel niceliğin büyüklüğünü belirli aralıklarla bildiren sinyallerdir. Fotoğrafların oluşumunu sağlayan ışık analog(sürekli) bir sinyal olduğu için okunan ışık yoğunluğu değerleri de sürekli bir sinyaldir. Görüntünün bilgisayara aktırılabilmesi için bu sinyalin dijital sinyale dönüştürülmesi gerekmektedir. Sürekli bir sinyal sonsuz sayıda bilgi içerdiğinden dolayı görüntüdeki bu bilgileri depolamak imkânsızdır. Bu yüzden analog sinyaller belirli aralıklarla bölünerek dijital sinyale dönüştürülür (Şekil 3.9) (Katsaggelos, 2020).



Şekil 3.9. Analog (sürekli) ve dijital (kesikli) sinyaller

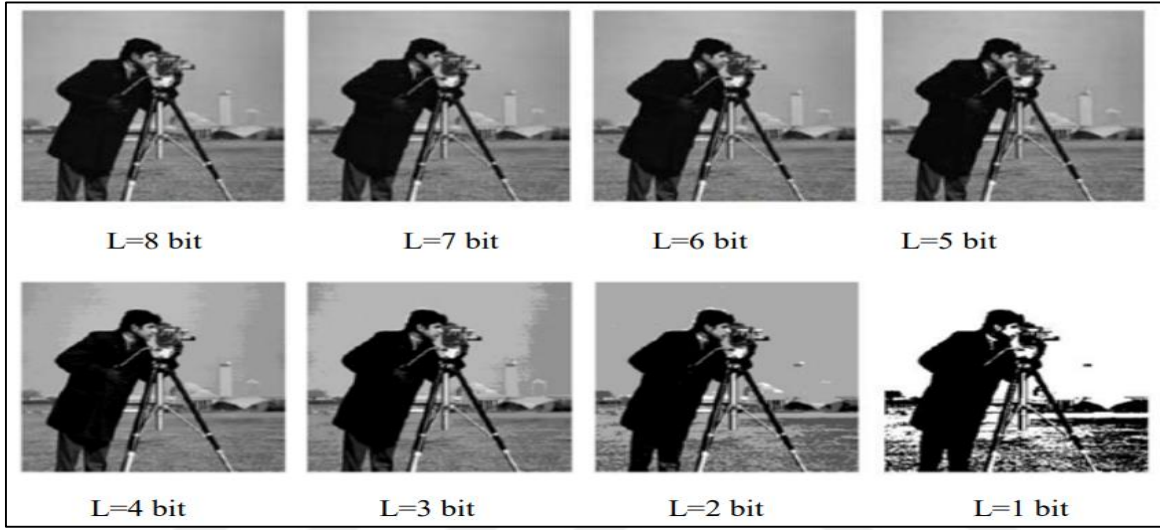
3.2.3. Bilgisayarla görme

Siyah beyaz fotoğrafları ele alırsak bu fotoğraflar ışığın yoğunluğunu gösteren 2 boyutlu bir sinyaldir. Fotoğrafların bilgisayar tarafından tanınması fotoğrafların sayısallaştırılması ile mümkündür. Fotoğraflar x ve y koordinat düzleminde $f(x,y)$ gibi 2 boyutlu bir fonksiyon olarak düşünülebilir. Bir fotoğrafın en küçük birimine piksel denir. Piksel fotoğraftaki en küçük görüntü karesidir. Bir fotoğraf yüzlerce, binlerce hatta milyonlarca pikselden meydana gelebilir. Fotoğrafları $[m \times n]$ şeklinde bir matris olarak düşünürsek m adet satır ve n adet sütun vardır dolayısıyla fotoğraf $m \times n$ adet piksel içerir. Örneğin (80×80) bir fotoğraf 1600 adet pikselden oluşur. $f(x,y)$ fonksiyonundaki x ve y değerleri ilgili pikselin matrisin hangi konumunda olduğunu gösterir. Yani bir pikselin fotoğraf içerisindeki adresidir. f ise (x,y) adresinde bulunan pikselin sahip olduğu ışık yoğunluğunu ifade eder (Şekil 3.10) (McAdrew, 2004).



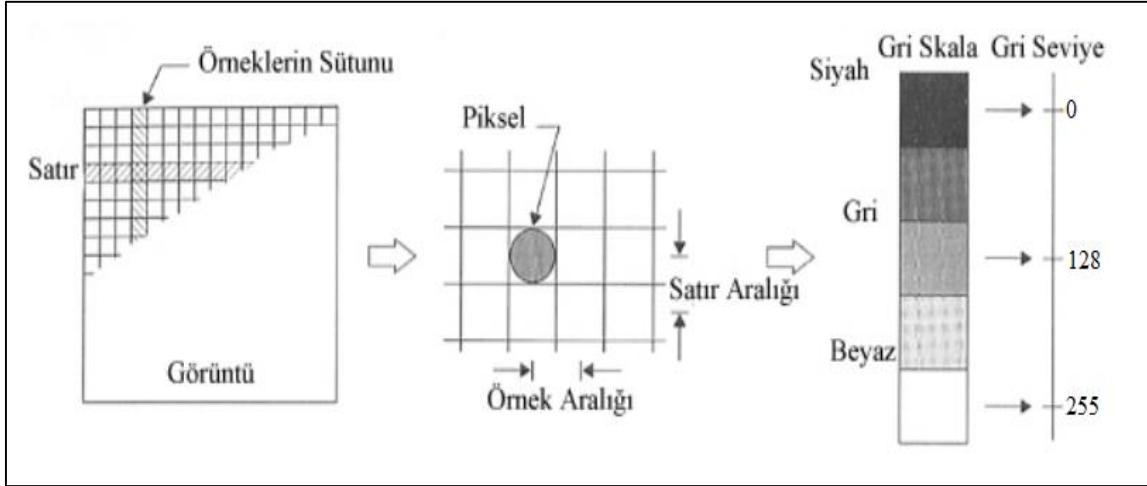
Şekil 3.10. Fiziksel görüntünün sayısal karşılığı (Çomak, 2012)

Bilgisayar sistemlerinde bit, en küçük depolama birimidir ve bit 0 ve 1 olmak üzere 2 tabanlı sayı sistemine sahiptir. 1 bitlik bir fotoğrafta bulunan her bir pikseldeki ışığın yoğunluğu 0 ve 1 sayıları ile ifade edilir. Kural olarak en az ışık yoğunluğuna sahip piksele 0 (siyah) değeri atanırken, en çok ışık yoğunluğuna sahip piksele 1 (beyaz) değeri atanır. Yani 1 bitlik bir fotoğraf yalnızca siyah ve beyaz renkten oluşur. Bit değeri arttıkça siyah ile beyaz renk arasındaki gri ton sayısı da artar (Şekil 3.11).

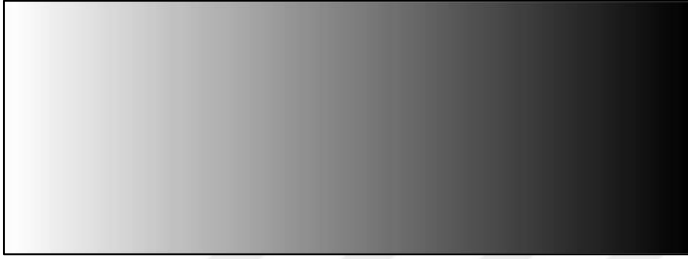


Şekil 3.11. Farklı sayıda gri tona sahip dijital fotoğraflar (Çankaya, 2013)

Pratikte kullandığımız bilgisayarlarda en küçük depolama birimi bayttır ve 1 bayt 8 bite eşittir. 1 bit iki farklı değerden (0 ya da 1) oluştuğu için 8 bit 2 üssü 8 farklı değerden yani 256 farklı değerden oluşmaktadır. Bu da 256 farklı gri tonu oluşturulması anlamına gelir. 8 bitlik bir fotoğraftaki ışık yoğunluklarının sayısallaştırılması işleminde en az ışık yoğunluğuna sahip piksele kural olarak 0 (siyah) değeri atanırken, en çok ışık yoğunluğuna sahip piksele 255(beyaz) değeri atanır. Bu iki uç değer arasındaki ışık yoğunluklarına ise gri skalasında (Şekil 3.13) ışık yoğunluğuna göre 0 ile 255 arasındaki sayılar atanır (Şekil 3.12) (McAndrew, 2004).



Şekil 3.12. Görüntünün sayısallaştırılması (Çomak, 2012)

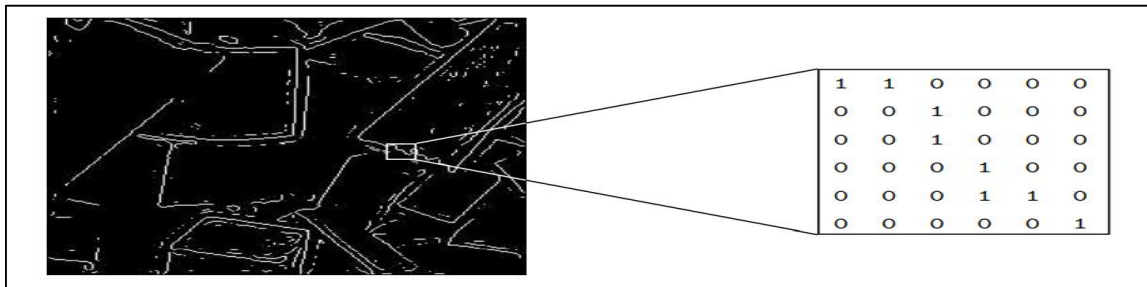


Şekil 3.13. Işık yoğunluğuna göre gri skalası (McAndrew, 2004)

3.2.4. Görüntü işlemede kullanılan renk modelleri

İkili (binary) renk modeli:

Her piksel yalnızca siyah veya beyazdır. Her piksel için yalnızca iki olası değer olduğundan piksel başına bir bit gerekir. Bu tür görüntüler depolama açısından çok verimlidir. Şekil 3.14'te ikili renk modelinden oluşan bir görsel verilmiştir ve görsel içerisindeki bir görüntü karesinin dijital karşılığı gösterilmiştir (McAndrew 2004).



Şekil 3.14. İkili renk modeli ve dijital karşılığı (McAndrew, 2004)

Gri tonlamalı renk modeli:

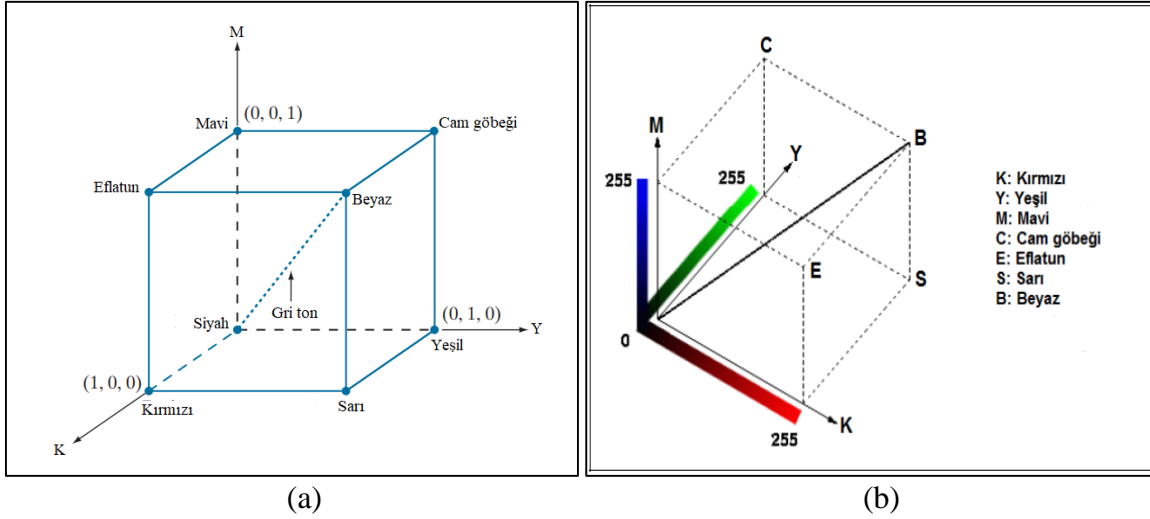
Bu modelde her renk aslında siyah ve beyazdan meydana gelmiştir. İkili renk modelinden farklı olarak gri tonlamalı görseller genel olarak 8 bitten meydana gelir. Siyah 0 değeri ile ifade edilirken beyaz 255 değeri ile ifade edilir. Işığın yoğunluğuna göre bu iki uç renk arasında 255 farklı gri tonu oluşur (Şekil 3.15) (McAndrew, 2004).



Şekil 3.15. Gri tonlamalı renk modeli ve dijital karşılığı (McAndrew, 2004)

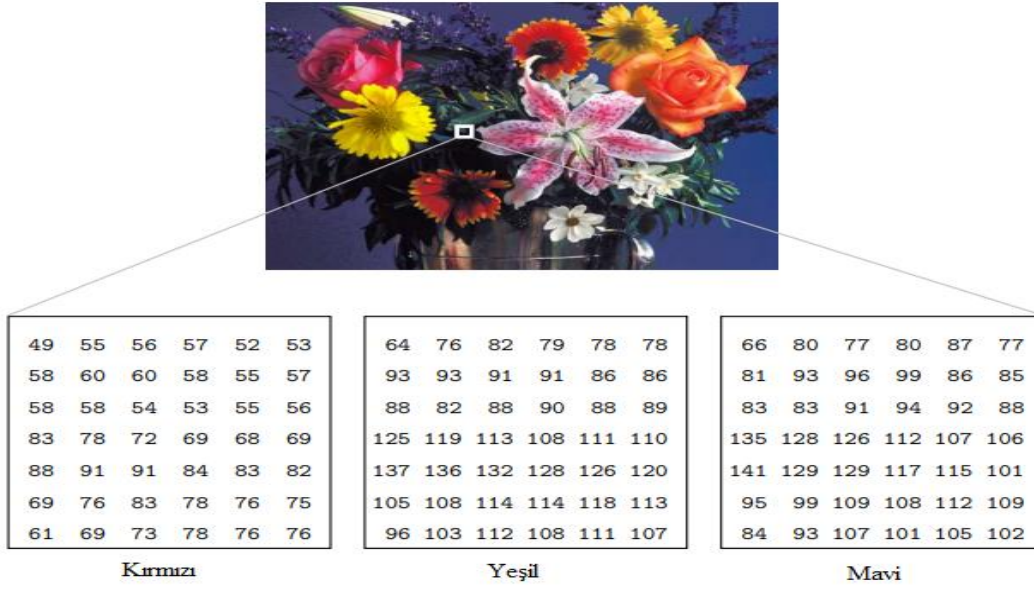
Kırmızı-Yeşil-Mavi (RGB) renk modeli:

RGB modelinde her bir renk kırmızı(red), yeşil(green) ve mavi(blue) renklerinin bileşenleri şeklinde oluşturulur. Bu model Şekil 3.16 (a)'daki gibi kartezyen koordinat sistemine dayanan bir küp şeklinde şematize edilir. Birim küpün üç köşesinde RGB renk modelinin birincil renkleri olan kırmızı, yeşil ve mavi; üç köşesinde ikincil renkler olan camgöbeği(cyan), eflatun(magenta) ve sarı(yellow); diğer iki köşesinde siyah(black) ve beyaz(white) renkleri yer alır. Siyah koordinat sisteminin başlangıcında (0,0,0) noktasında bulunurken beyaz başlangıç noktasından en uzak köşede (1,1,1) noktasında bulunur, gri tonlama ise bu iki noktayı birleştiren çizgi boyunca uzanır (Gonzalez ve Woods), 2018: 407, 408).



Şekil 3.16. Görüntü işlemede kullanılan RGB renk modeli; (a) Birim RGB renk küpü (Gonzalez ve Woods), 2018: 407) (b) 24 bit RGB renk küpü (Bilici, 2017)

Bu modeldeki farklı renkler başlangıç noktasından küp içerisindeki diğer noktalara uzanan üç bileşenli vektörler ile tanımlanır. Şekil 3.16 (a)'da gösterilen küp RGB renk modelinin anlaşılmasını kolaylaştırmak adına tüm renk değerlerinin normalleştirildiği birim küp şeklinde verilmiştir. Bu gösterimdeki tüm değerler $[0,1]$ aralığında değer alır. Karma renkli görüntüler oluşturmak için birincil renklerin farklı tonlarına ihtiyaç vardır. RGB alanında her pikseli temsil etmek için kullanılan bit sayısına piksel derinliği denir. Daha önce bölüm x(bitlerin anlatıldığı yer)'de bilgisayar sistemlerinde en küçük depolama biriminin pratikte bayt olduğu ve 1 baytın 8 bitten meydana geldiği anlatılmıştı. Dolayısıyla bilgisayardaki renkli bir görüntü kırmızı, yeşil ve mavi renklerinin her biri için 8 bitten oluşur (Şekil 3.17). Böylelikle her bir RGB pikseli 24 bit (3 görüntü düzlemi için 8'er bit) derinliğe sahip olur. Tam renkli görüntü terimi de genellikle 24 bit RGB renkli görüntüyü belirtmek için kullanılır. 24 bit RGB görüntüdeki toplam olası renk sayısı $(2^8)^3 = 16\,777\,216$ 'dır. Şekil 3.16 (b), 24 bit RGB renk küpünü göstermektedir. Dijital görüntülerde küpteki değer aralığı bit sayısı ile ölçeklendirilerek temsil edilir. Her bir birincil renk 8 bitten oluştuğu için her eksen boyunca küpün sınırları $[0,255]$ arasında olur. Örneğin beyaz küpün $[255,255,255]$ noktasında yer almaktadır (Gonzalez ve Woods), 2018: 407, 408).

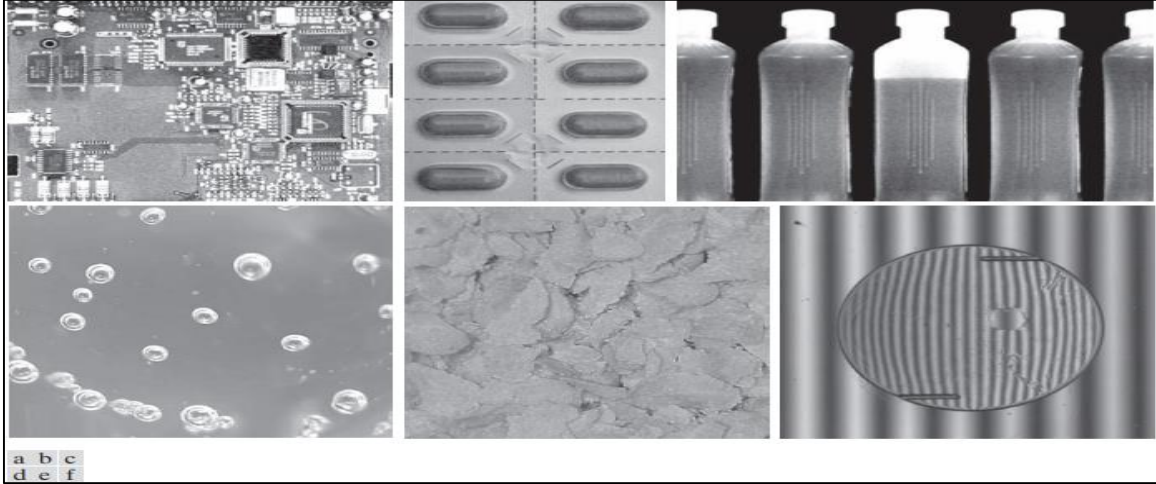


Şekil 3.17. Renkli görüntüdeki birincil renk bileşenlerinin dijital karşılığı (McAndrew, 2004)

3.3. Dijital Görüntü İşlemenin Kullanım Alanları

Görüntü işleme tekniklerinden tıpta, uzay araştırmalarında, fizikte, kimyada, biyolojide, coğrafyada, endüstriyel üretimde, savunma sanayisinde, eğitim alanında, tarımsal üretimde, mühendislik bilimlerinde, emniyet teşkilatlarında, kamu düzeninin korunmasında ve hemen hemen hayatın tüm alanlarında yararlanılmaktadır. (Çomak, 2012)

Görüntü işlemenin kullanıldığı alanlara daha özel örnekler verilecek olursa bunlardan birisi mamul malların üretiminde otomatik görsel incelemedir. Şekil 3.18’de bunlarla ilgili bazı görsel örnekler verilmiştir. Şekil 3.18 (a)’da CD-ROM sürücüsü için bir denetleyici ana kart gösterilmektedir. Tipik bir görüntü işleme görevi bu gibi ürünlerde eksik parçaları tespit etmektir. Şekil 3.18 (b)’de bir hap kabı gösterilmektedir. Hap kabındaki eksik veya deforme hapları tespit etmek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 3.18 (c)’de görüntü işlemeden dolmamış şişelerin tespit edilmesinde yararlanılmaktadır. Şekil 3.18 (d)’de içerisinde kabul edilemeyecek sayıda hava kabarcığı bulunan şeffaf plastik bir parça gösterilmektedir. Bunun gibi anormalliklerin tespit etmek ahşap ve kumaş gibi diğer ürünleri içeren endüstriyel üretimin ana temasıdır. Şekil 3.18 (e)’de bir miktar tahılın renk muayenesi sırasında içerisinde tespit edilen yanmış tahıl parçaları gösterilmektedir. Son olarak Şekil-6(f)’de bir intraoküler implantın (insan gözü için yedek lens) merkezine doğru deformasyonlar ve diğer kusurları gösterilmektedir. (Gonzalez ve Woods), 2018: 31).



Şekil 3.18. Dijital görüntü işleme kullanılarak kontrol edilen bazı mamul mal örnekleri; (a) Devre kartı kontrolörü, (b) Paketlenmiş haplar, (c) Şişeler, (d) Şeffaf plastik bir üründe hava kabarcıkları, (e) Tahıl, (f) Göz içi implant görüntüsü (Gonzalez ve Woods), 2018:34)

Şekil 3.19 bazı ek görüntü işleme örneklerini göstermektedir. Şekil 3.19 (a) bir başparmak izini göstermektedir. Parmak izlerinin görüntüleri işlenerek bir veri tabanı oluşturulur. Parmak izinin bulunması için olası eşleşmeler bilgisayar tarafından otomatik olarak veri tabanının taranmasıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.19 (b)'de bir para birimi görüntüsü yer almaktadır. Bu alandaki görüntü işleme uygulamaları paranın otomatik olarak sayılması, seri numaralarının okunması ve paranın sahte olup olmadığının öğrenilmesi amacıyla kullanılmaktadır. Görüntü işlemenin kullanıldığı alanlardan birisi de trafik izleme ve gözetleme faaliyetleri ile trafik düzeninin sağlanmasıdır. Şekil-7'de otomatik plaka okuma örneği gösterilmektedir. Görüntüdeki açık renkli dikdörtgen plaka okuma sisteminin plakayı tespit ettiği alanı, koyu renkli dikdörtgen ise plaka içeriğinin otomatik olarak okunmasının sonucunu göstermektedir (Gonzalez ve Woods), 2018: 32, 33).



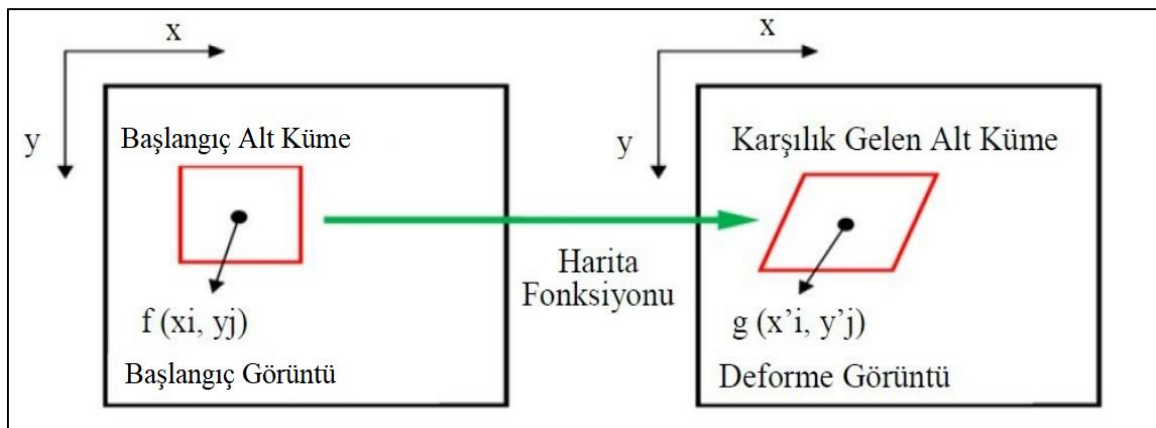
Şekil 3.19. Bazı görüntüleme örnekleri; (a) Başparmak izi, (b) Kâğıt para birimi, (c) Otomatik plaka okuma sistemi (Gonzalez ve Woods), 2018: 35)

3.4. Dijital Görüntü Korelasyonu

Dijital görüntü korelasyonu (DIC-Digital Image Correlation) özellikle mühendislik bilimleri gibi nesnelere hareketleri, gerilmeleri ve deformasyonları ile ilgilenen disiplinlerde kullanımı git gide yaygınlaşmakta olan bir görüntü işleme tekniğidir (Sutton, Orteu ve Schreier), 2009: 1). Gerilme ve yer değiştirme mühendislikte ve inşaat projelerinde kritik parametrelerdir. Bu parametrelerin ölçümü için kullanılacak tekniğin doğru sonuç vermesi, basit olması ve uygun maliyette olması istenir. DIC bu şartların sağlanması açısından ideal bir yöntemdir (McCormick ve Lord, 2010).

3.4.1. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinin temel prensibi

DIC'in temel çalışma prensibi görüntü içerisindeki düzensiz noktaların başlangıçtaki konumundan görece yer değiştirmelerinin takibine dayanmaktadır. Dijital görüntülerde en küçük görüntü karesine piksel denir. Dolayısıyla dijital bir görüntüdeki noktalar piksellerle ifade edilir. Görüntü içerisindeki pikseller belirli sayıda kümeler ayrıştırılarak alt kümeler oluşturulur. Korelasyon hesaplamaları yapılırken oluşturulan alt kümelerin alan merkezlerinin yer değiştirme vektörü oluşturularak başlangıç görüntü kümesi ve deforme olmuş görüntü kümesi arasındaki değişiklik eşleştirme yapılarak bulunur (Şekil 3.20) (Yıldırım ve diğerleri, 2019).



Şekil 3.20. Deformasyonu izlemek için oluşturulan görüntü alt kümeleri (Yıldırım ve diğerleri, 2019)

Başlangıç görüntü kümesi ve deforme olmuş görüntü kümesi arasındaki eşleştirme için kullanılan çeşitli korelasyon yöntemleri mevcuttur. İki görüntü kümesi arasındaki

farklılıkların hesaplanmasında kullanılan korelasyon yöntemi bulunan sonuçlar açısından önemli bir yere sahiptir. Bu korelasyon yöntemlerinden kare farklarının toplamı (sum of square differances-SSD), sıfır ortalamalı kare farklarının toplamı (zero-mean sum of square differances-ZSSD), normalleştirilmiş kare farklarının toplamı (normalized sum of square differances-NSSD), sıfır ortalamalı normalleştirilmiş kare farklarının toplamı (zero-mean normalized sum of square differances-ZNSSD), normalleştirilmiş çapraz korelasyon (normalized cross-correlation-NCC), mutlak farkların toplamı (sum of absolute differances-SAD) yöntemleri ve bu yöntemlerde kullanılan korelasyon formülleri Şekil 3.21'de verilmiştir. Burada; F_i : işlenen i 'nci alt kümenin başlangıç görüntüdeki gri renk skalası değerini, G_i : işlenen i 'nci alt kümenin deforme görüntüdeki gri renk skalası değerini ifade etmektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2019).

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

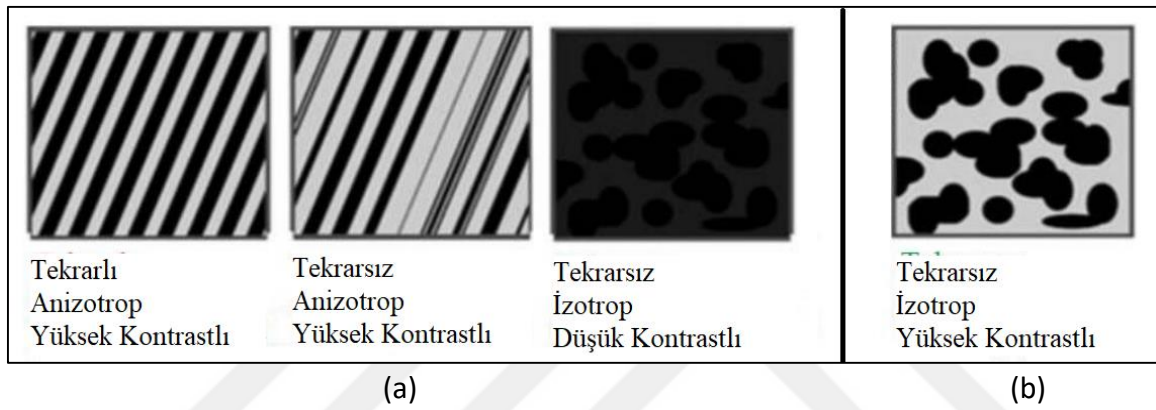
Şekil 3.21. Dijital görüntü korelasyonunda kullanılan bazı yöntem ve formülleri (Yıldırım ve diğerleri, 2019)

3.4.2. Dijital görüntü korelasyonu tekniğinde analiz sonuçlarını etkileyen parametreler

Numunenin yüzey dokusu

DIC için oluşturulan piksel bloklarının yüzey dokusu tekrarsız (desenlerin herhangi bir düzeni takip etmemesi), izotrop (tüm yönlerde tekdüze olması) ve yüksek kontrasta (yüzeyin ayırt edilebilir parlaklıkta ve renk tonunda olması) sahip özelliklerde olması

gerekmektedir (Yıldırım ve diğerleri, 2019). Çoğu durumda malzemelerin doğal yüzeyi DIC'nin uygulanması için yeterli görüntü dokusuna sahiptir (McCormick 2010). Aksi durumda görüntü alınacak yüzey DIC için siyah-beyaz boyalarla benekleme yapılarak hazırlanır. Bu işlem görüntünün alınacağı yüzeyin önce beyaz boya ile boyanıp üzerine siyah boya ile püskürtme ya da sıçratma yapılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca kontrastı artırmak için görüntüsü alınan yüzeyin arkasına siyah fon perde çekilebilir. Görüntülerin alınacağı yüzey izotrop bir görüntü oluşturmak için düz olmalı ve pürüzlerden arındırılmalıdır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. DIC analizi için yüzey numune yüzey dokusu özellikleri; (a) Uygun olmayan yüzey dokusu, (b) Uygun yüzey dokusu (Yıldırım ve diğerleri, 2019)

Deneye uygun kameranın tercih edilmesi

DIC için görüntülerin elde edilmesinde geleneksel CCD kameralar, CMOS kameralar, dijital standart tüketici kameraları, makroskop ve mikroskop, atomik veya elektron mikroskobu gibi birçok kamera çeşidi kullanılabilir (McCormick 2010). Burada deneye uygun kameranın seçilmesinde kameranın lensi, çözünürlüğü, sensörü ve fps (frame per second-saniyede alınan görüntü sayısı) değerleri deneyin özelliklerine uygun olarak seçilmelidir. Örneğin çok hızlı gerçekleşen deneylerde fps değeri yüksek olmalıdır. Çünkü DIC yöntemi ardışık görüntü karelerinin bir biri ile ilişkilendirilmesi esasına dayandığı için fps değeri düşük kameralar, hızlı gerçekleşen deneylerde iki görüntü karesi arasında kopukluklar meydana getirerek analiz sonuçlarının hatalı olmasına sebep olabilir.

Metrik kalibrasyon ve alt küme boyutları

Optik görüntüler piksel denilen görüntü karelerinden meydana gelmektedir. DIC yöntemiyle uzunluk ölçümü yapılırken görüntü içerisindeki birim piksellin metrik olarak ne kadar uzunluğa denk geldiği piksellerin metrik kalibrasyonu yapılarak ayarlanmaktadır. Bunun için görüntü içerisinde uzunluğu metrik olarak bilinen her hangi iki nokta seçilerek bu iki nokta arasındaki piksellerin metrik karşılığı analiz programlarına tanımlanır. Böylelikle görüntü karesi içerisindeki tüm pikseller girilen bu metrik uzunluk çerçevesinde ölçeklendirilir.

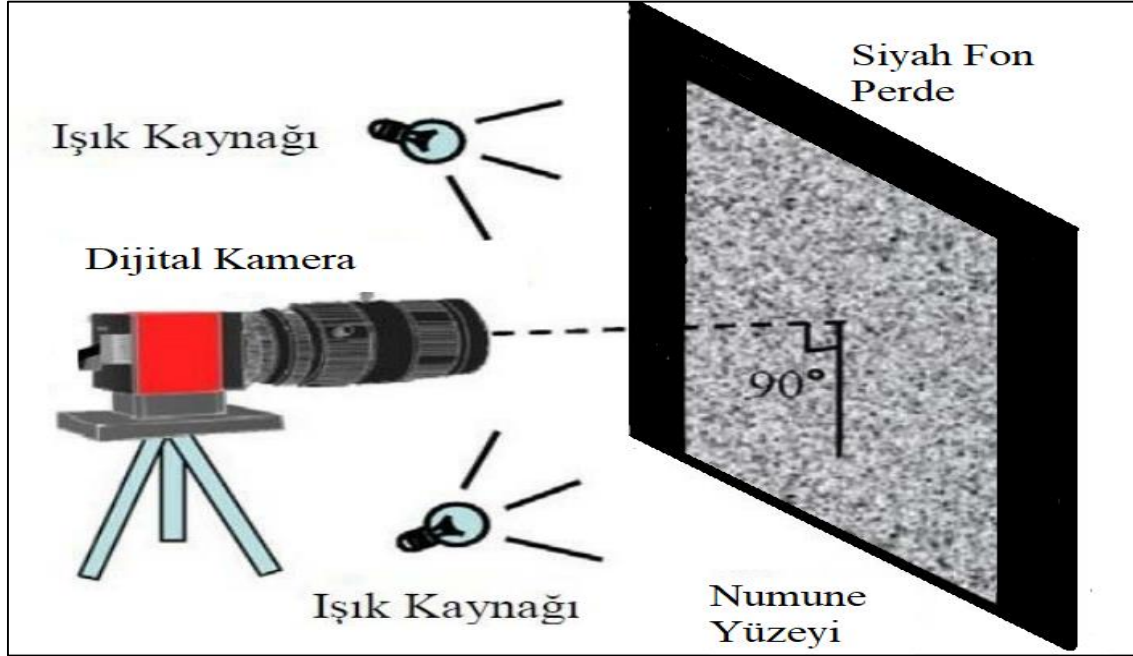
DIC yönteminde analiz sonuçlarını etkileyen bir diğer önemli parametre seçilen alt küme boyutudur. Alt küme boyutunun belirlenmesinde geçerli bir kural bulunmamaktadır. Ancak burada dikkat edilmesi gereken husus; alt küme boyutunun çok büyük seçilmesi durumunda daha uzun hesaplama süresi gerekir ve deformasyon hesaplamalarında hassasiyet azalır, alt küme boyutunun çok küçük seçilmesi durumunda ise komşu alt kümeler bir birine karışabilir ve görüntü içerisindeki noktalardan yeterince faydalanılamaz (Yıldırım ve diğerleri, 2019). Burada numune yüzeyi üzerindeki beneklerin boyutu önem arz etmektedir. Eğer numune yüzeyi genişse beneklerde nispeten daha büyük boyutlarda oluşturulur. Alt küme boyutları da buna paralel olarak nispeten daha büyük seçilir.

Deney düzeneği ve diğer parametreler

2 boyutlu DIC analizlerinde düzeneğin düzlem dışı hareketlerinin önlenmesi gerekmektedir. 2 boyutlu analizlerde düzlem dışı hareketler analiz programları tarafından düzlem içi hareketmiş gibi algılanarak yanıltıcı sonuçlar doğurabilir. Örneğin x ve y düzleminde çalışılan bir düzenekte görüntülerin alındığı yüzeyin arkaya veya öne doğru z ekseninde hareket etmesi, yüzeyin y ekseninde yukarıya veya aşağıya hareket etmesi algısını oluşturur.

Kamera kurulumunda numune yüzeyi ile kameranın lensi birbirine paralel olmalı ve kameranın odak noktası numune yüzeyinin geometrik merkezi ile aynı doğrultuda olması gerekir. DIC analizlerinde genellikle görüntülerin kaydedilmesi sırasında ekstra bir ışıklandırmaya gerek duyulmamakta, ortamdaki doğal ışık çekim için yeterli olmaktadır(McCormick ve Lord 2012). Ortam ışığının çekim için yetersiz olması

durumunda numune yüzeyindeki beneklerin kontrastı düşer. Bu da noktaların takibini zorlaştırır. Bu gibi durumlarda kamera arkasından numune yüzeyine doğru yapay bir ışık kaynağı ile aydınlatma yapılır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. DIC deney düzeneği (Yıldırım ve diğerleri, 2019)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen tüm deneyler İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde tez çalışmasına konu olan iki farklı boyutta hazırlanan kiriş numunelerinin ve özdeş boyutlarda hazırlanan duvar numunelerinin malzeme ve geometrik özellikleri verilmiştir. Ayrıca numuneler üzerinde yapılan yükleme deney yöntemleri ve yükleme sonucunda meydana gelen yer değiştirmelerin ölçümünde geleneksel LVDT ile ölçüm ve dijital görüntü korelasyonu ile ölçüm yöntemleri anlatılmıştır. Kiriş numuneleri boyutsal anlamda; boyutları büyük olan kirişler ‘‘Büyük Kiriş (BK)’’ , boyutları küçük olan kirişler ‘‘Küçük Kiriş(KK)’’ olarak adlandırılmıştır. Duvar numuneleri ise ‘‘Duvar (D)’’ olarak adlandırılmıştır.

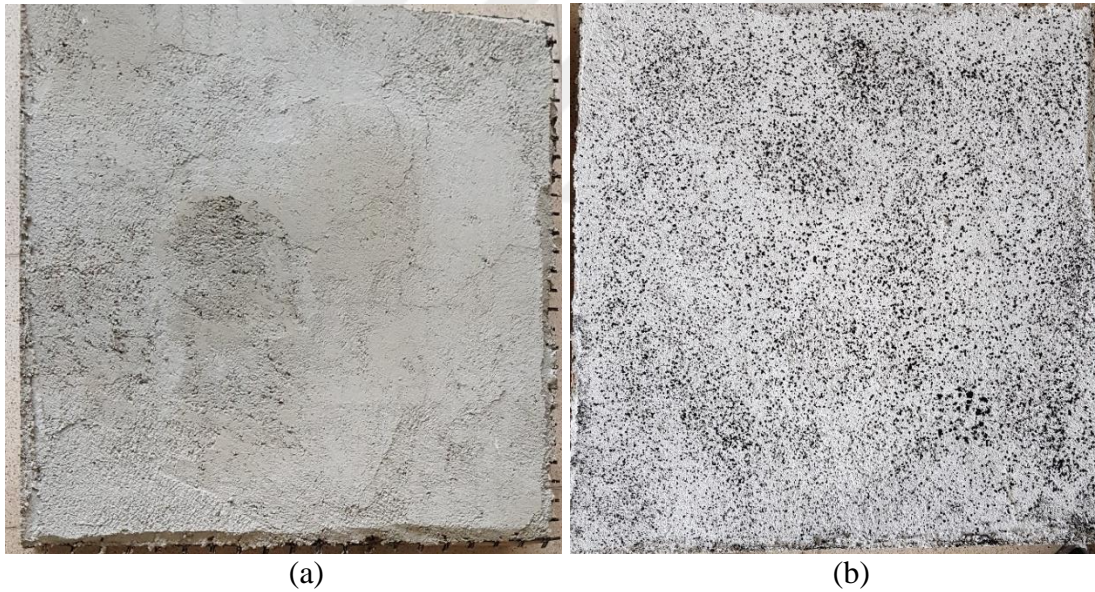
DIC yöntemiyle deformasyon ölçümü ve gerilme yığılmalarının belirlenmesinde izlenecek yol genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Numunelerin hazırlanması,
- Yükleme düzeneğinin kurulması,
- Yükleme sırasında numune yüzey görüntülerinin dijital kamera ile alınması,
- Görüntülerin bir bilgisayar yazılımı vasıtasıyla DIC analizinin gerçekleştirilmesi.

Hazırlanan tüm numunelerin kamera ile çekim yapılan yüzeyleri üzerinde DIC analizi için rastgele benekleme yapılmıştır. Bu amaçla su bazlı beyaz renkli tavan boyası ve siyah renkli yağlı boya kullanılmıştır. Numune yüzeyleri önce boya rulosu kullanılarak açıkta alan kalmayacak şekilde beyaz renge boyanmış ve 1 saat boyunca kurumaya bırakılmıştır. Daha sonra bir fırça yardımıyla siyah boya ile beyaz yüzey üzerinde rastgele benekler oluşturulmuştur (Şekil 4.1) (Şekil 4.2).



Şekil 4.1. Kiriş numuneleri DIC analizi için yüzey hazırlığı; (a) Doğal kiriş yüzeyi (b) Beneklenmiş kiriş yüzeyi



Şekil 4.2. Duvar numuneleri DIC analizi için yüzey hazırlığı; (a) doğal duvar yüzeyi, (b) beneklenmiş duvar yüzeyi

Yükleme sırasında numune yüzey görüntüleri 3840x2160 (4K) piksel çözünürlükte video kayıt yapma kapasitesine sahip bir cep telefonu kamerasıyla kaydedilmiştir. 4K videoların dosya boyutları çok yüksek olduğundan DIC analizi daha uzun sürede gerçekleşmektedir. Bu analiz süresini kısaltmak amacıyla kayıt esnasında telefonun kamera çözünürlüğü 1920x1080 (FHD) piksel olarak ayarlanmış ve videolar bu çözünürlükte kaydedilmiştir. Kameranın bir diğer önemli özelliği olan saniyede kaydedilen görüntü sayısı (frame per second-fps) değeri 60 fps' dir. Tüm numunelerde gerçekleştirilen deneyler sırasında

kamera, numune yüzeyinin kamera kadrajına sığacağı mesafede konumlandırılmıştır. Ayrıca kamera lensi, numune yüzeyinin geometrik merkezi ile aynı hizada ve yüzeye paralel olacak şekilde tripot (üç ayak) yardımıyla sabitlenmiştir. Su terazisi kullanılarak kameranın hem sağ-sol hem de ön-arka yönünde eğikliği düzenlenmiştir. Ayrıca deneyler başlamadan önce deney düzeneklerinin arkası siyah fon perdeyle kaplanmıştır. Çekimler doğal ışık koşulları altında gerçekleştirilmiş, herhangi bir yapay aydınlatma yapılmamıştır.

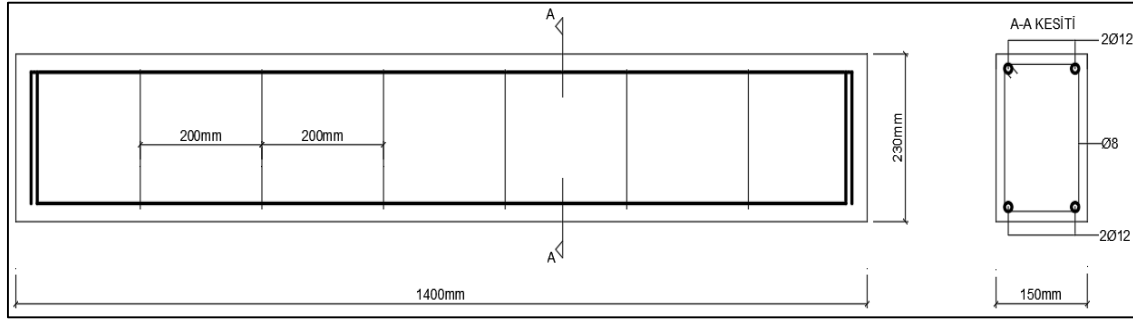
Yükleme deneyleri sırasında elde edilen görüntülerin DIC analizi *Gom Corralate* ticari yazılımı kullanılarak yapılmıştır. *Gom Correlate* yazılımı, DIC tekniği ile sisteme temas edilmeden yer değiştirmelerin ve gerilme yığılmalarının basit ve hızlı bir şekilde hesaplanmasına imkân sağlar. Ayrıca kaydedilen videolar üzerinde her hangi bir ön işleme gereksinim duyulmaz. Numune yüzeyi üzerindeki noktalardan oluşturulan alt kümelerin korelasyonunun matematiksel hesaplamalarını yazılım içerisinde gömülü halde bulunan algoritmalar sayesinde otomatik olarak hesaplar. Alt küme boyutları kullanıcı tarafından manuel olarak belirlenir. Bu çalışmada DIC analizi yapılan tüm görüntüler için alt küme boyutu 19x19 piksel seçilmiştir. Korelasyon hesaplamalarında *Gom Correlate* programının varsayılan korelasyon hesap yöntemi olan NSSD korelasyon yöntemi kullanılmıştır.

4.1. Büyük Kirişler (BK)

Büyük Kiriş numunelerinden 7 adet hazırlanmıştır. Bunlardan 3 tanesinde değişik oranlarda lif katkısı kullanılmış, 4 tanesinde lif katkısı kullanılmamıştır. Numunelerin tamamı dikdörtgen kesitli, etriyeli betonarme kiriş olarak üretilmiştir.

4.1.1. Büyük kirişlerin malzeme ve geometrik özellikleri

Büyük kirişlerin tamamı 1400 mm uzunluğunda 150x230 mm en kesite sahiptir. Kirişlerde çekme donatısı 2 Φ 12, basınç donatısı 2 Φ 12 ve etriye (enine donatı) olarak Φ 8 çapında 200 mm aralıklarla yerleştirilen S420a tipi çelik kullanılmıştır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Büyük kiriş numune boyutları, kesiti ve donatı yerleşimi

Beton karışımlarının tamamında CEM I-42,5/R tipi portland çimentosu, 0-4 mm ve 4-11 mm kırma taş agrega kullanılmıştır. Kirişler lif katkısı olarak hacimce %0, %0,2; %0,4 ve % 0,6 oranlarında değişen makro sentetik fiber lif (MSF) içermektedir. BK-1, BK-2, BK-3, BK-4 kirişleri hacimce %0, BK-5 %0,2; BK-6 %0,4; BK-7 %0,6 MSF katkısı içermektedir. Numunelerin hazırlanması sırasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.1’de sunulmuştur.

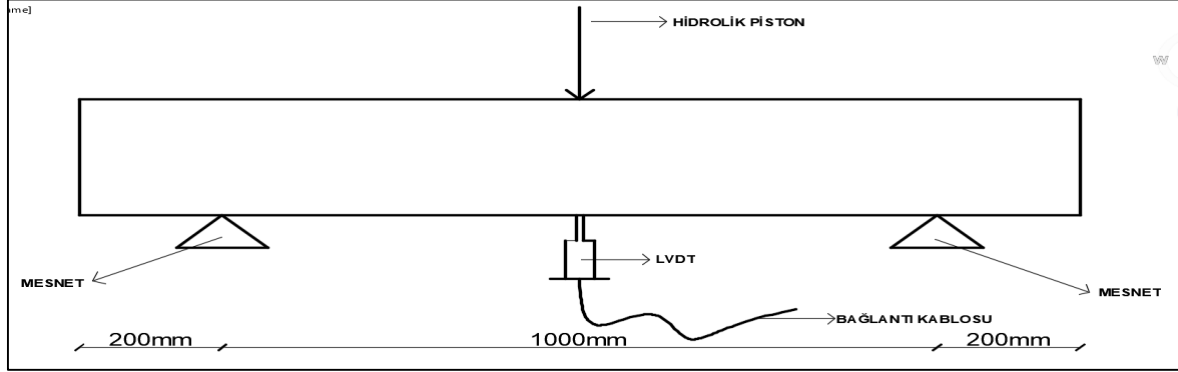
Çizelge 4.1. BK numuneleri beton karışım miktarları

Bileşen	1 m ³ beton için karışım miktarları (kg)			
	BK-1, BK-2, BK-3, BK-4	BK-5	BK-6	BK-7
Çimento	271,35	271,35	271,35	271,35
Su	135,67	135,67	135,67	135,67
0-4 mm agrega	488,42	488,42	488,42	488,42
4-11 mm agrega	325,62	325,62	325,62	325,62
MSF	0	2	4	6

4.1.2. BK yükleme deney düzeneği ve DIC analizi

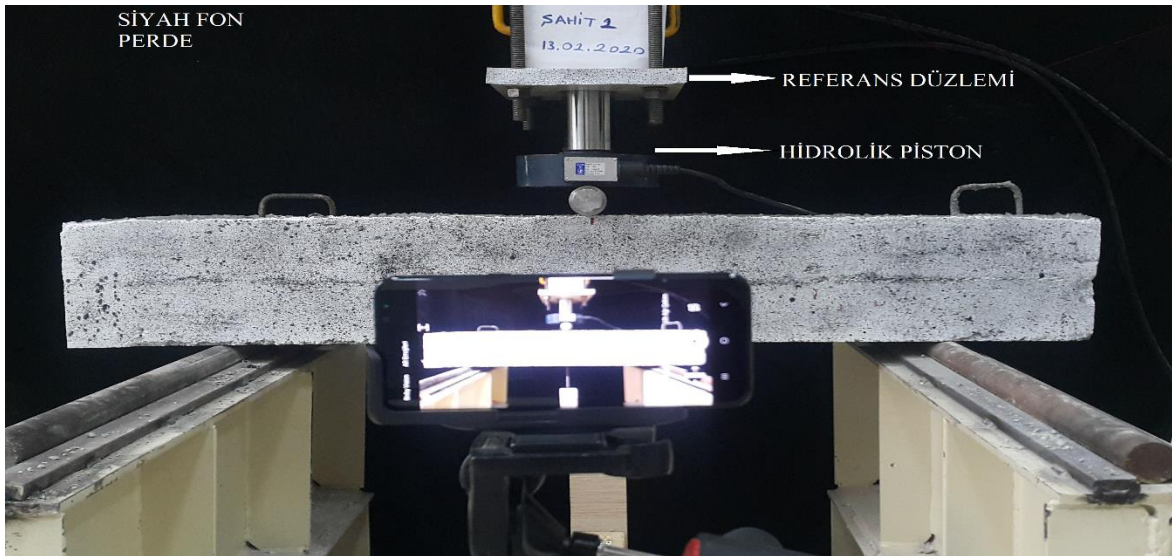
Kirişler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. Deney, kirişlerin iki hareketli mesnet üzerine yerleştirilerek açıklık ortasından 50 ton kapasiteli hidrolik piston ile yük uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Mesnetler arası mesafe 1000 mm olarak ayarlanmıştır. Kirişlerin yük karşısında zamana bağlı yaptığı düşey yer değiştirmeler kirişin alt açıklık ortasına yerleştirilen 1 adet deplasman ölçer (LVDT) ile gerçekleştirilmiştir. LVDT aletinde meydana gelen zamana bağlı yer değiştirmeler bir bağlantı kablosu yardımıyla

bilgisayara aktarılmıştır (Şekil 4.4). Böylelikle DIC yöntemiyle kıyaslanacak mekanik deformasyon ölçümleri deney sırasında elde edilmiştir.



Şekil 4.4. BK deney düzeneği, deplasman ölçer ve numunenin mesnetler üzerindeki konumu

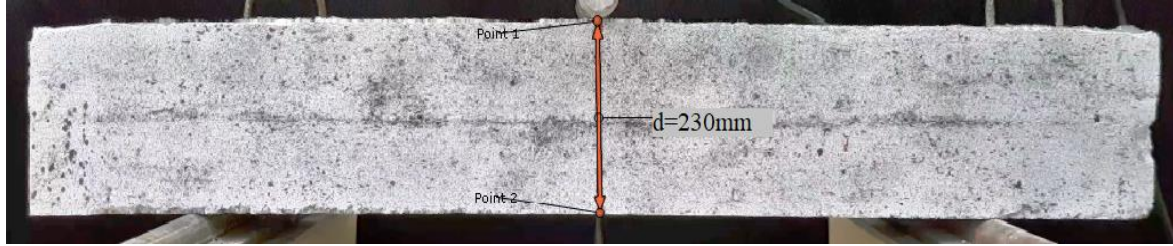
Deney sırasında yükün uygulanmaya başladığı andan kaldırıldığı ana kadar numune yüzey görüntülerinin video kaydı alınmıştır. Bu işlemden önce DIC analizi sırasında deformasyon ölçümü için sabit bir referans düzlemi oluşturulmuştur. Bunun için yükleme düzeneğindeki hidrolik pistonun sabitlendiği çelik plakanın ön yüzeyi kullanılmıştır. Plaka yüzeyine siyah beyaz boyalarla beneklenmiş bir kâğıt sabitlenmiştir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. BK yüzey görüntülerinin kaydedilmesi

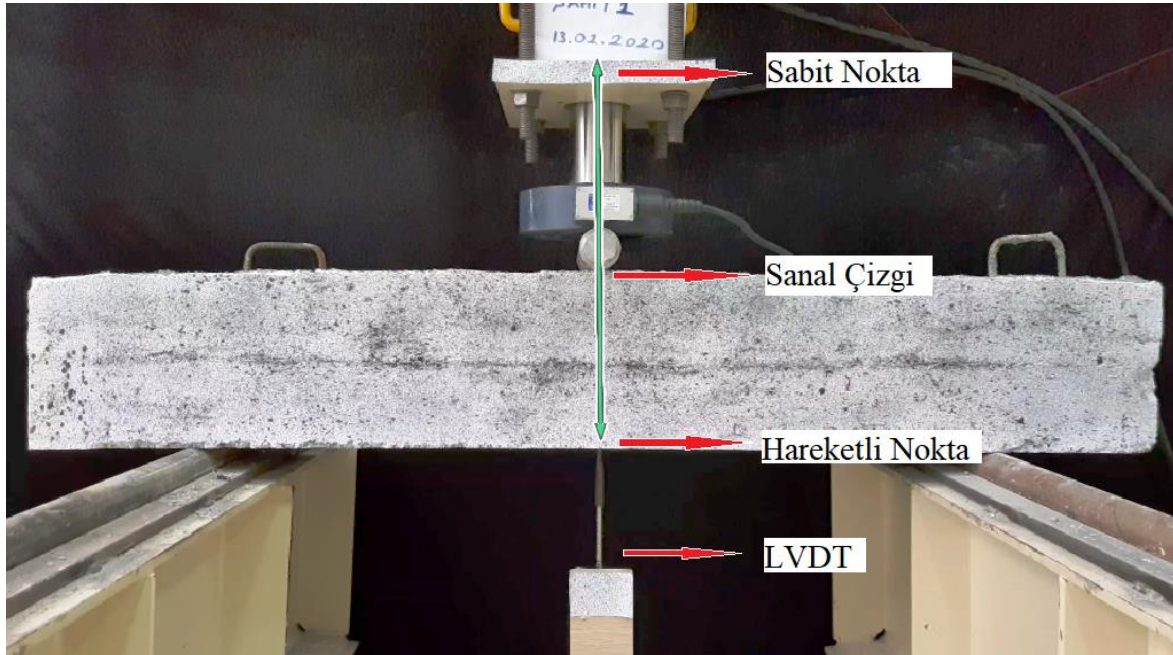
Deney sırasında kaydedilen görüntüler *Gom Correlate* programına yüklenerek DIC analizi yapılmıştır. Yer değiştirmelerin DIC yöntemiyle ölçülebilmesi öncelikle için kiriş

yüksekliği baz alınarak piksellerin metrik kalibrasyonu yapılmıştır. Bunun için programda kiriş yüksekliğini temsil eden düşey bir çizgi oluşturulmuştur. Çizgi uzunluğuna gerçekte denk gelen metrik uzunluk değeri (230mm) programa tanımlanmıştır (Şekil 4.6).



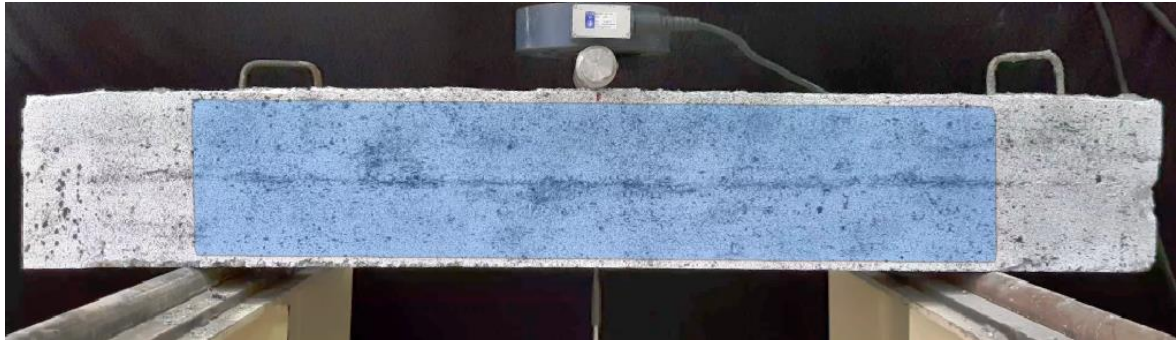
Şekil 4.6. BK 'de DIC analizi için piksellerin metrik kalibrasyonunun yapılması

Daha sonra LVDT aletinin kirişe temas ettiği nokta ile hidrolik pistonun sabitlendiği çelik plaka üzerine yapıştırılan benekleme yapılmış kâğıt üzerinde bir nokta seçilerek bir ucu sabit diğer ucu hareketli bir sanal çizgi oluşturulmuştur. Hareketli nokta, analiz sonucunda LVDT değerleri ile DIC değerlerinin karşılaştırılabilmesi amacıyla sisteme özellikle LVDT aletinin temas ettiği nokta olarak seçilmiştir (Şekil 4.7). Video kaydı süresince sanal çizgi boyundaki birim zamanda meydana gelen değişimler program tarafından otomatik olarak kaydedilmiştir. Böylelikle kirişte meydana gelen düşey yer değiştirmeler DIC yöntemiyle elde edilmiştir.



Şekil 4.7. BK 'de DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi

Gom Correlate programında DIC yöntemiyle yer değiştirmelerin ölçülmesi dışında yapılan bir diğer çalışma kiriş yüzey gerilmelerinin zamana bağlı değişimini görsel olarak haritalamak olmuştur. Bunun için kirişin etkili çalışma bölgesi olan mesnetler arasında kalan kiriş yüzeyinde bir alan oluşturulmuştur. Oluşturulan bu alan $1000 \times 230 \text{ mm}^2$ boyutlarındadır (Şekil 4.8). Alan içerisindeki gerilme değişimleri, program tarafından otomatik olarak belirlenmektedir.



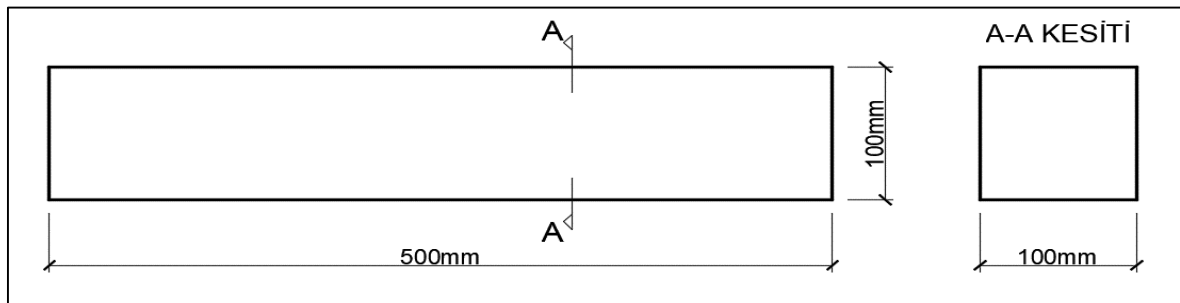
Şekil 4.8. BK yüzey gerilme alanının oluşturulması

4.2. Küçük Kirişler (KK)

Küçük kiriş numunelerinden toplamda 7 adet üretilmiştir. Numunelerde 3 değişik oranda makro sentetik fiber lif katkısı kullanılmıştır. Ayrıca kirişler kare kesite sahip donatısız beton kiriş olarak imal edilmiştir.

4.2.1. Küçük kirişlerin malzeme ve geometrik özellikleri

Küçük kirişler 500 mm uzunluğunda $100 \times 100 \text{ mm}^2$ boyutlarında kare kesitli imal edilmiştir (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Küçük kiriş boyutları ve kesiti

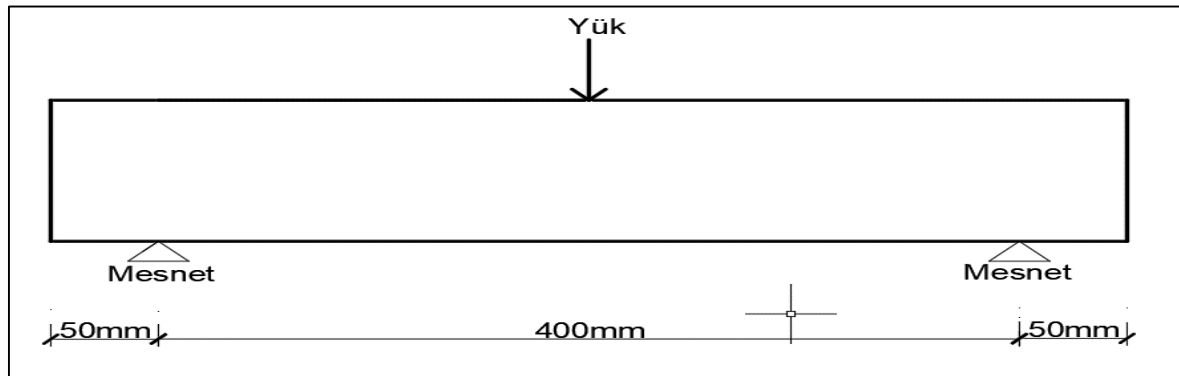
Küçük kırımların beton karışımlarında CEM I-42,5/R tipi portland çimentosu, 0-4 mm ve 4-11 mm kırma taş agrega kullanılmıştır. Kirişler lif katkısı olarak hacimce %0,2; %0,4 ve %0,6 oranlarında değişen makro sentetik fiber lif (MSF) içermektedir. KK-1 ve KK-2, kırımları hacimce %0,2; KK-3, KK-4 ve KK-5 %0,4; KK-6 ve KK-7 %0,6 MSF katkısı içermektedir. Numunelerin hazırlanması sırasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2. KK numuneleri beton karışım miktarları

Bileşen	1 m ³ beton için karışım miktarları (kg/m ³)		
	KK-1, KK-2	KK-3, KK-4, KK-5	KK-6, KK-7
Çimento	400	400	400
Su	200	200	200
0-4 mm agrega	1022,4	1022,4	1022,4
4-11 mm agrega	694,45	694,45	694,45
MSF	2	4	6

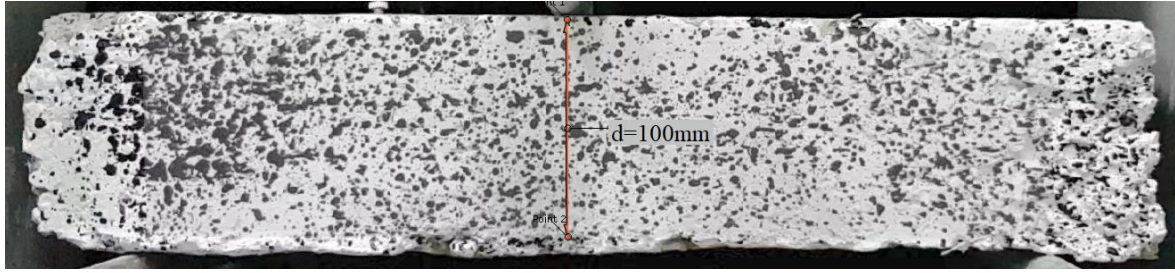
4.2.2. KK yükleme deney düzeneği ve DIC analizi

Kirişler üç noktalı eğilme deneyine tabi tutulmuştur. İki hareketli mesnet üzerine yerleştirilen kirişe açıklık ortasından yük uygulanmıştır. Mesnetler arası açıklık 400 mm olarak ayarlanmıştır. Numunelerin zamana bağlı düşey yer değiştirmelerinin ölçümü için 1 adet LVDT kullanılmıştır. Ancak deney sonrasında teknik bir arızadan dolayı LVDT aletinin çalışmadığı fark edilmiştir. Bu yüzden düşey yer değiştirmelerin mekanik ölçümü yapılamamıştır (Şekil 4.10).



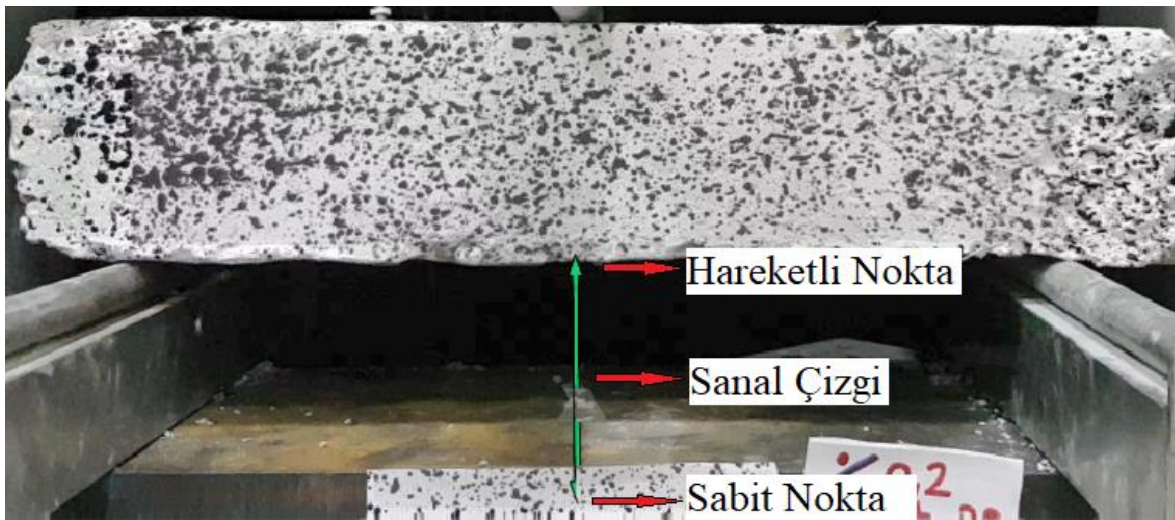
Şekil 4.10. KK deney düzeneği ve numunenin mesnetler üzerindeki konumu

DIC analizi için yükün uygulanmaya başlandığı andan kaldırıldığı ana kadar dijital kamera ile numune yüzey görüntülerinin video kaydı alınmıştır. Piksellerin metrik kalibrasyonu BK numunelerinde olduğu gibi yine kiriş yüksekliği (100mm) baz alınarak yapılmıştır (Şekil 4.11).



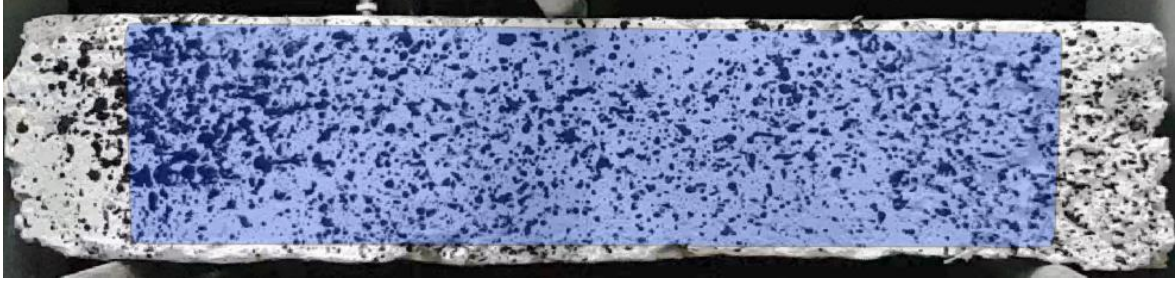
Şekil 4.11. KK 'de DIC analizi için piksellerin metrik kalibrasyonunun yapılması

DIC yöntemi ile düşey yer değiştirmelerin ölçümü için deney düzeneğinin alt tarafında bulunan çelik plaka yüzeyine benekleme yapılarak sabit referans düzlemi oluşturulmuştur. *Gom Correlate* programında bir ucu sabit referans düzlemi üzerinde, bir ucu da kiriş açıklığının orta noktası üzerinde olmak üzere sanal çizgi oluşturulmuştur. Sanal çizginin boyunda meydana gelen değişimlerden kirişlerin zamana bağlı düşey deplasmanları belirlenmiştir (Şekil 4.12).



Şekil 4.12. KK 'de DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi

Yüzey gerilme değişimlerinin DIC ile belirlenmesi için kiriş etkili çalışma bölgesi olan mesnetler arasında kalan numune yüzeyi üzerinde programda $100 \times 400 \text{ mm}^2$ lik bir alan oluşturulmuştur (Şekil 4.13).



Şekil 4.13. KK yüzey gerilme alanının oluşturulması

4.3. Duvarlar (D)

Duvar numunelerinden toplamda 5 adet hazırlanmıştır. Tüm numunelerin boyutları özdeştir. Numuneler sıva yapılan yüzey sayısına ve sıvada plastik kompozit donatı (geogrid) kullanımına göre 3 değişik tipte üretilmiştir.

4.3.1. Duvarların malzeme ve geometrik özellikleri

Numuneler $19 \times 19 \times 8,5 \text{ cm}^3$ boyutlarında yatay delikli fabrika tuğlaları kullanılarak sıva hariç kalınlığı 85mm boyu ve eni $800 \times 800 \text{ mm}^2$ boyutlarında örülmüştür (Şekil 4.14). Tuğlalar arasındaki derz harcı ve numune yüzeylerine uygulanan sıva harcı TS-EN 998-2 standardına göre hazırlanmıştır. Bu standarda göre hazırlanan sıva ve derz harcı çimento, su ve agrega karışımından oluşturulmuştur. Harcın karışımında kullanılan malzeme miktarları 27 dm^3 (1 mikser) için miktarları Çizelge 4.3’de sunulmuştur.

Çizelge 4.3. 27 dm^3 derz ve sıva harcı için karışım miktarları

Çimento	14,11 kg
Su	7,05 kg
Agrega	42,33 kg



Şekil 4.14. Duvar imalatında kullanılan tuğla ve plastik kompozit donatı

Numunelerden D-1 ve D-2 tek yüzü sıvanmış; D-3, D4 ve D-5 numunelerinin çift yüzü sıvanmıştır. Ayrıca D-1 numunesi hariç diğer tüm numunelerde plastik kompozit donatı kullanılmıştır. Çizelge 4.4'te numunelerin sıvalı yüz sayısı ve sıvada plastik kompozit donatı kullanım durumları sunulmuştur.

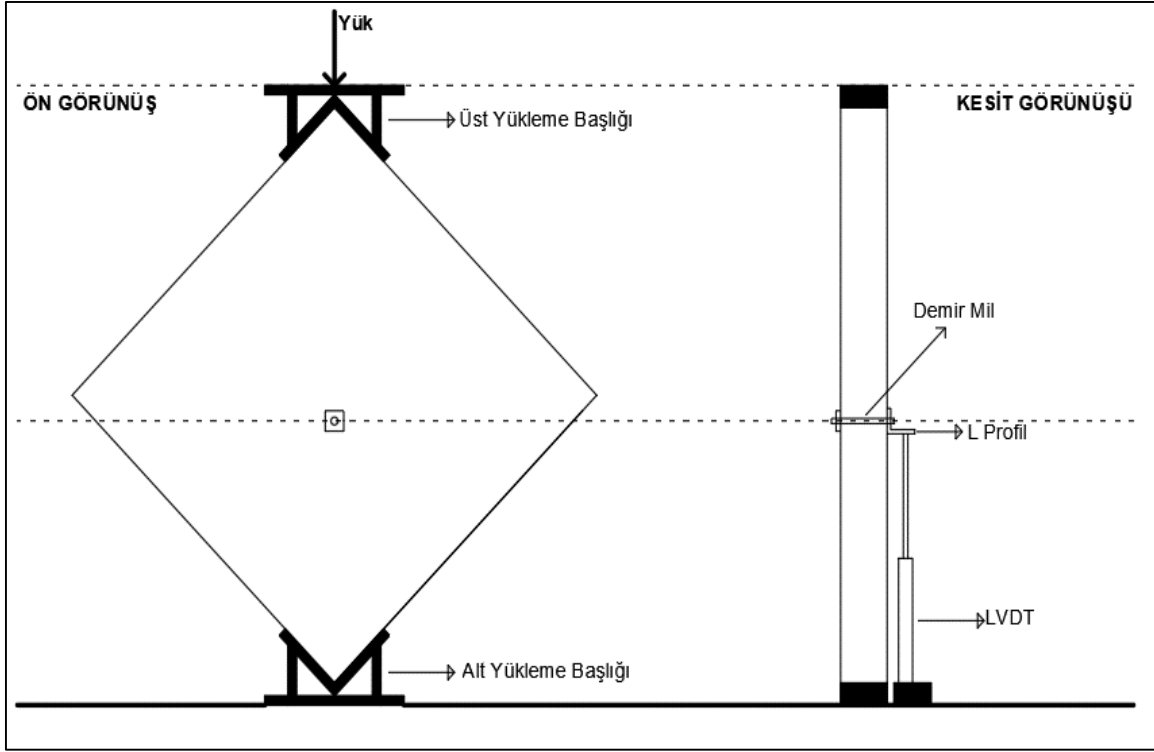
Çizelge 4.4. Duvar numuneleri sıvalı yüz ve plastik kompozit donatı durumları

Bileşen	Sıvalı yüz	Plastik kompozit donatı
D-1	Tek	Yok
D-2	Tek	Var
D-3	Çift	Var
D-4	Çift	Var
D-5	Çift	Var

4.3.2. Duvar yükleme deney düzeneği ve DIC analizi

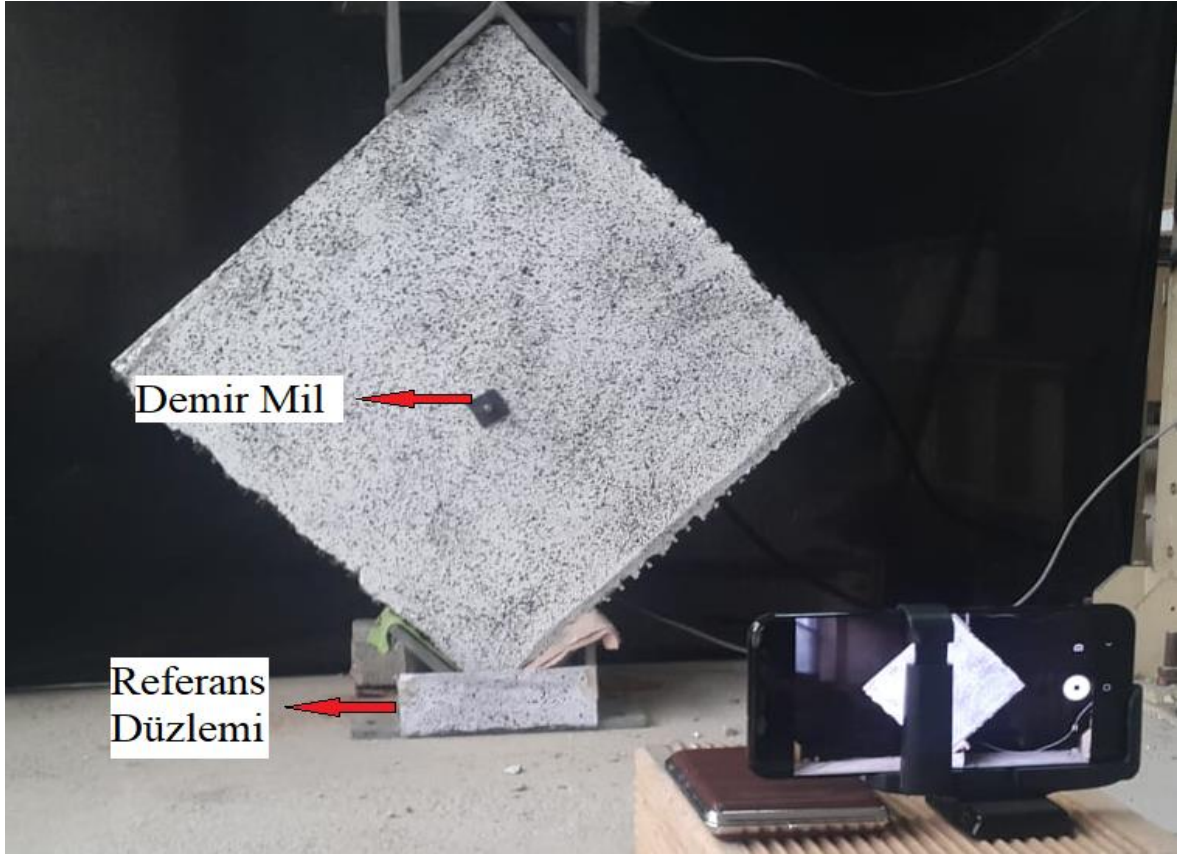
Duvarlar üzerinde diyagonal yükleme deneyi yapılmıştır. Bunun için duvar numuneleri V şekilli iki çelik plaka arasına diyagonal şekilde yerleştirilmiştir. Başlıklardan biri (alt yükleme başlığı) zeminle diğeri (üst yükleme başlığı) yük hücresiyle temas ettirilmiştir. Daha sonra 50 ton kapasiteli hidrolik pistonla üst yükleme başlığından yük verilmiştir. Numunelerde meydana gelen düşey yer değiştirmeler duvarın köşegenlerinin kesim noktasının 50 mm aşağısından açılan deliğe yerleştirilen demir mil kullanılarak ölçülmüştür. Mil duvarda açılan delikten geçirilmiş daha sonra duvarın ön yüzünden 30x30 mm boyutlarında kare flanş ve cıvata ile sıkıştırılmıştır. Duvarın arka yüzünde milin ucuna

60x60 mm² boyutlarında L profil, cıvata ile monte edilerek bir platform oluşturulmuştur. Bu platforma LVDT ölçüm aletinin ucu degecek şekilde zemine sabitlenmiştir (Şekil 4.15). Böylelikle duvarın yük altında yaptığı düşey yer değiştirmeler sırasında platformunda aynı düşey yer değiştirmeyi yapacağı varsayılmıştır. Platformda meydana gelen yer değiştirmeler deney süresince LVDT ile ölçülerek bilgisayar ortamına aktarılmıştır.



Şekil 4.15. Duvar diyagonal yükleme ve yer değiştirme ölçümü deney düzeneği

DIC yöntemi ile deformasyon ölçümü için sabit referans düzlemi alt yükleme başlığına benekleme yapılmış bir kâğıt parçasının yapıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Referans düzlemi oluşturulduktan sonra yük uygulanmaya başlanmıştır. Kamera ile yükün uygulanmaya başladığı andan kaldırıldığı ana kadar numunelerin yüzey görüntüleri kaydedilmiştir. Kamera lensinin konumu kiriş numunelerindeki gibi numune yüzeyinin geometrik merkezi ile değil, demir milin ön yüzeyde çıktığı nokta ile hizalanmıştır (Şekil 4.16). Bunun nedeni LVDT ölçümünün numunenin arka tarafından bu noktadaki yer değiştirmeleri ölçmesidir. Böylelikle her iki yöntemle elde edilecek değerlerin bir biri ile kıyaslanmasında aynı şartlar sağlanmıştır.



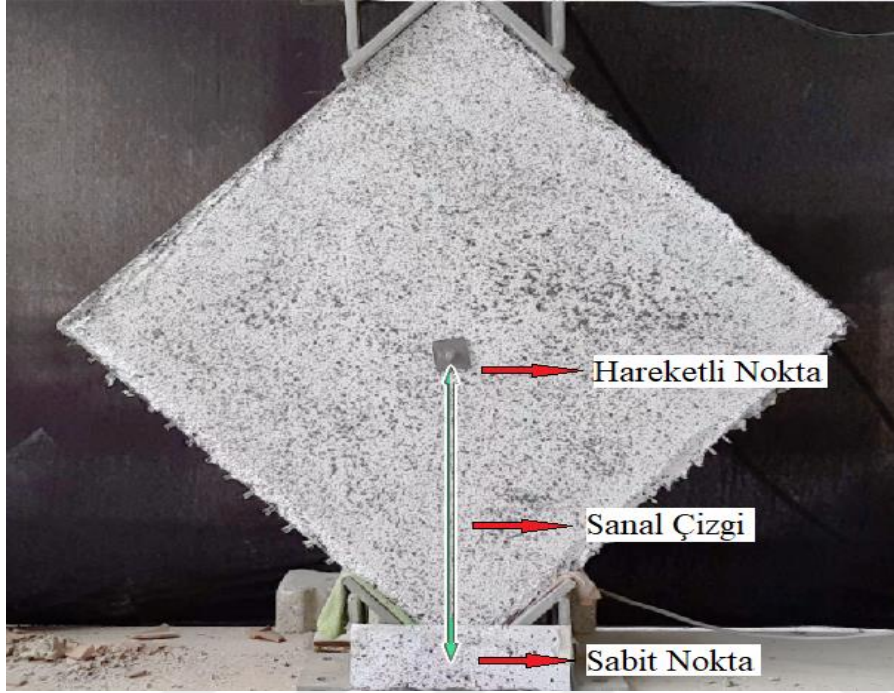
Şekil 4.16. Duvar numunelerinin yüzey görüntülerinin kaydedilmesi

Kaydedilen görüntüler programa yüklenerek piksellerin metrik kalibrasyonu yapılmıştır. Bunun için duvarın bir köşegenin uzunluğu (1131,3 mm) kullanılmıştır (Şekil 4.17).



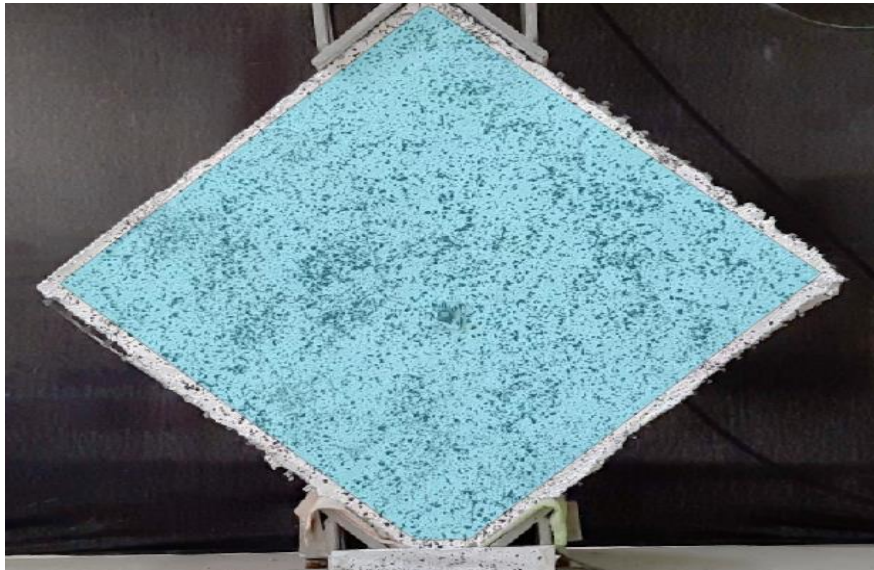
Şekil 4.17. Duvar numunelerinde DIC analizi için metrik kalibrasyonun yapılması

Daha sonra LVDT ölçümleri ile kıyaslanacak sanal çizgi oluşturulmuştur. Sanal çizginin sabit ucu alt yükleme başlığına yerleştirilen beneklenmiş kâğıt üzerinden seçilmiştir. Hareketli ucu LVDT ölçümlerinin yapıldığı demir milin ucu olarak seçilmiştir (Şekil 4.18).



Şekil 4.18. Duvar numunelerinde DIC yöntemiyle düşey yer değiştirmelerin ölçülmesi

Duvarlarda yüzey gerilme değişimlerinin DIC ile belirlenmesi için duvar yüzey alanının tamamı (800x800 mm²) seçilmiştir (Şekil 4.19).



Şekil 4.19. Duvar yüzey gerilme alanının oluşturulması

5. BULGULAR

5.1. LVDT ve DIC ölçümleri ile Bulunan Düşey Yer Değişirmelerin Kıyaslanması

Numunelerde meydana gelen maksimum düşey yer değişirmeler LVDT ve DIC ölçümleri ile elde edilmiştir. Burada maksimumdan kasıt ölçüm alınan noktanın video kayıt süresince tespit edilen en büyük yer değişirme değeridir. BK ve D numunelerine ait LVDT ve DIC ölçümleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.3 te, KK numunelerine ait DIC ölçümleri Çizelge 5.2' de sunulmuştur. Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.3'teki mutlak fark oranı değerleri hesaplanırken kullanılan formül aşağıdaki gibidir:

$$\text{Mutlak Fark Oranı} = \left[\frac{|LVDT - DIC|}{LVDT} \right] \times 100$$

BK numunelerinde LVDT ile DIC ölçümleri arasındaki en küçük mutlak fark oranı BK-1 numunesinde % 0,10 ve en büyük mutlak fark oranı BK-5 numunesinde %3,00 olarak hesaplanmıştır. BK numunelerinin tamamının mutlak fark ortalaması % 1,05 olarak bulunmuştur. Duvar numunelerinde ise en küçük mutlak fark oranı D-5 numunesinde %1,11 ve en büyük mutlak fark oranı D-4 numunesinde 5,39 olarak hesaplanmıştır. Tüm duvar numunelerinin mutlak fark oranı ortalaması % 2,81 olarak bulunmuştur. KK numunelerinin deplasman ölçümü sırasında ölçüm aletinde meydana gelen teknik arızadan dolayı LVDT ölçümleri yapılamamıştır. Yalnızca DIC ölçüm sonuçları bulunmuştur. LVDT ve DIC ölçümü yapılan toplamda 12 adet BK ve D numunelerinin mutlak fark oranı ortalaması % 1,73 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.1. BK numunelerine ait maksimum düşey yer değişirme değerleri

	Video Kayıt Süresi (sn)	Max. Düşey yer değişirmeler (mm)		Mutlak Fark Oranı (%)
		LVDT	DIC	
BK-1	35	29,31	29,34	0,10
BK-2	46	45,60	46,00	0,88
BK-3	82	16,14	16,42	1,73
BK-4	95	31,63	31,65	0,06
BK-5	28	37,62	38,75	3,00
BK-6	30	31,13	31,36	0,74
BK-7	23	16,43	16,56	0,80

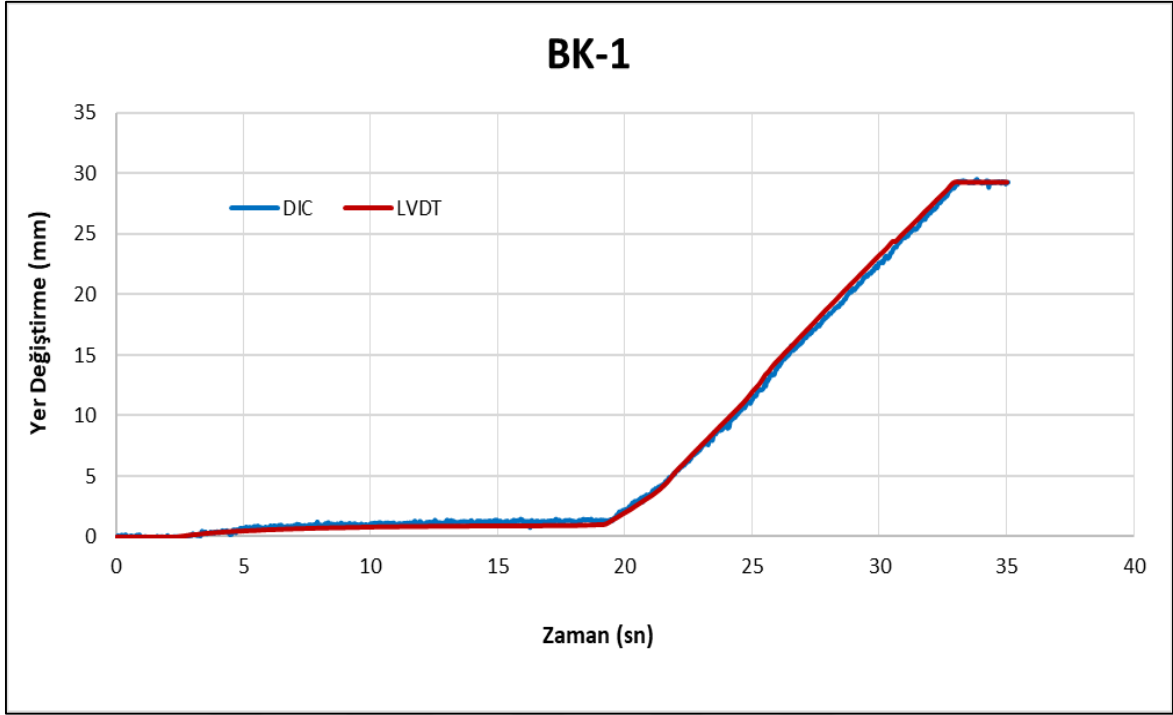
Çizelge 5.2. KK numunelerine ait maksimum düşey yer değiştirme değerleri

	Video Kayıt Süresi (sn)	Max. Düşey yer değiştirmeler (mm)
		DIC
KK-1	16	16,54
KK-2	15	19,55
KK-3	22	27,59
KK-4	31	26,49
KK-5	35	14,38
KK-6	23	22,00
KK-7	29	21,77

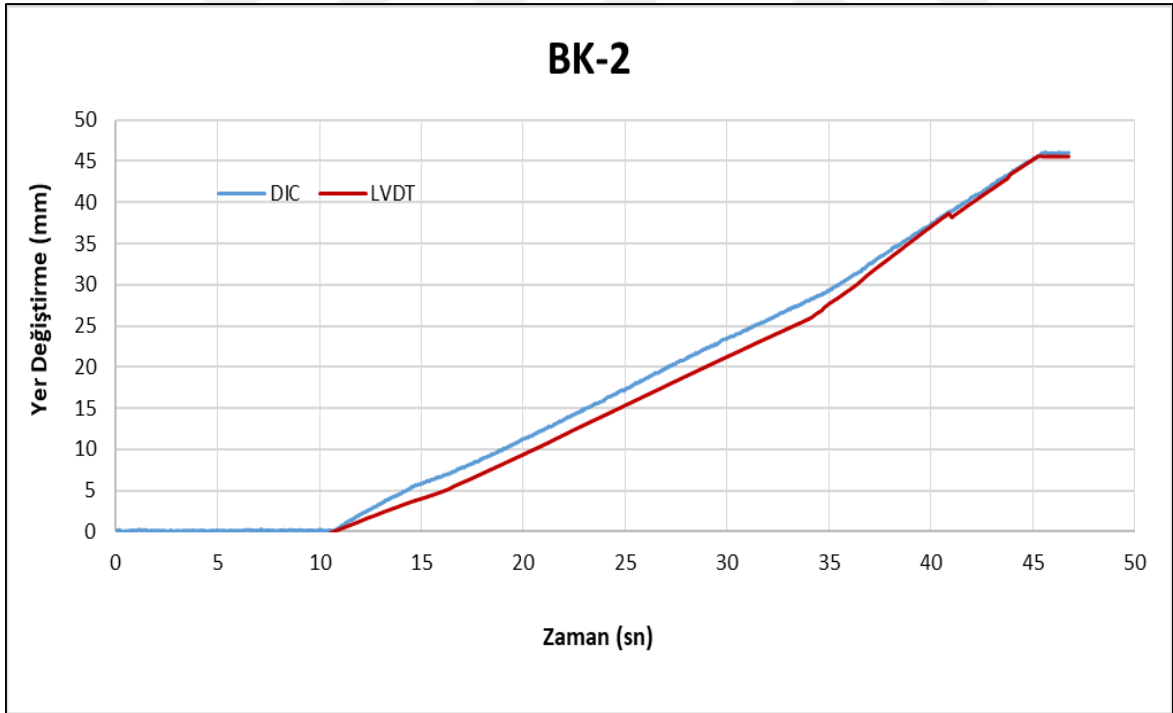
Çizelge 5.3. D numunelerine ait maksimum düşey yer değiştirme değerleri

	Video Kayıt Süresi (sn)	Max. Düşey yer değiştirmeler (mm)		Mutlak Fark Oranı (%)
		LVDT	DIC	
D-1	19	5,27	5,17	1,90
D-2	7	7,11	6,94	2,39
D-3	37	4,30	4,44	3,26
D-4	28	3,71	3,54	5,39
D-5	34	3,61	3,65	1,11

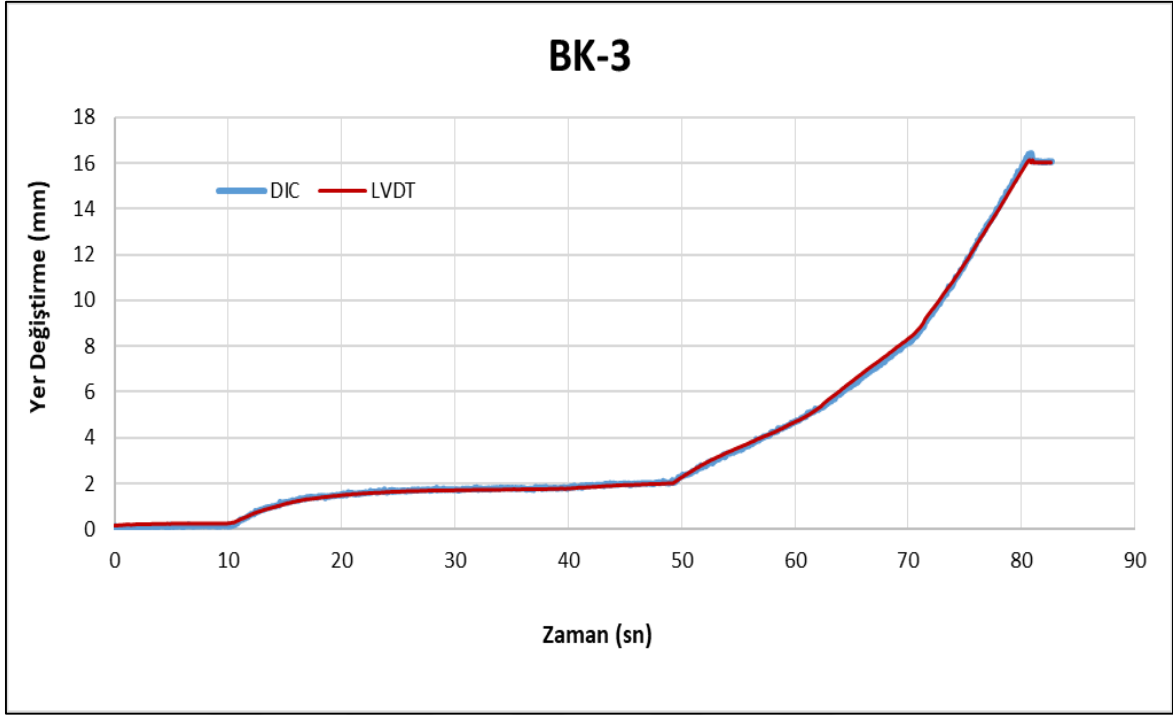
Numunelerde gerçekleştirilen LVDT ve DIC ölçüm sonuçlarına ait yer değiştirme-zaman grafikleri, BK ve D numuneleri için LVDT ve DIC ölçümlerinden ayrı ayrı elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin başlangıç noktaları birleştirilerek karşılaştırmalı olarak aynı grafik üzerinde gösterilmiştir. KK numunelerinde ise yalnızca DIC ölçümü gerçekleştirildiği için yer değiştirme-zaman grafikleri bu değerler kullanılarak oluşturulmuştur. BK numunelerine ait grafikler Şekil 5.1-5.7 'de, KK numunelerine ait grafikler Şekil 5.8-5.14'te ve D numunelerine ait grafikler Şekil 5.15-5.19'da gösterildiği gibi bulunmuştur.



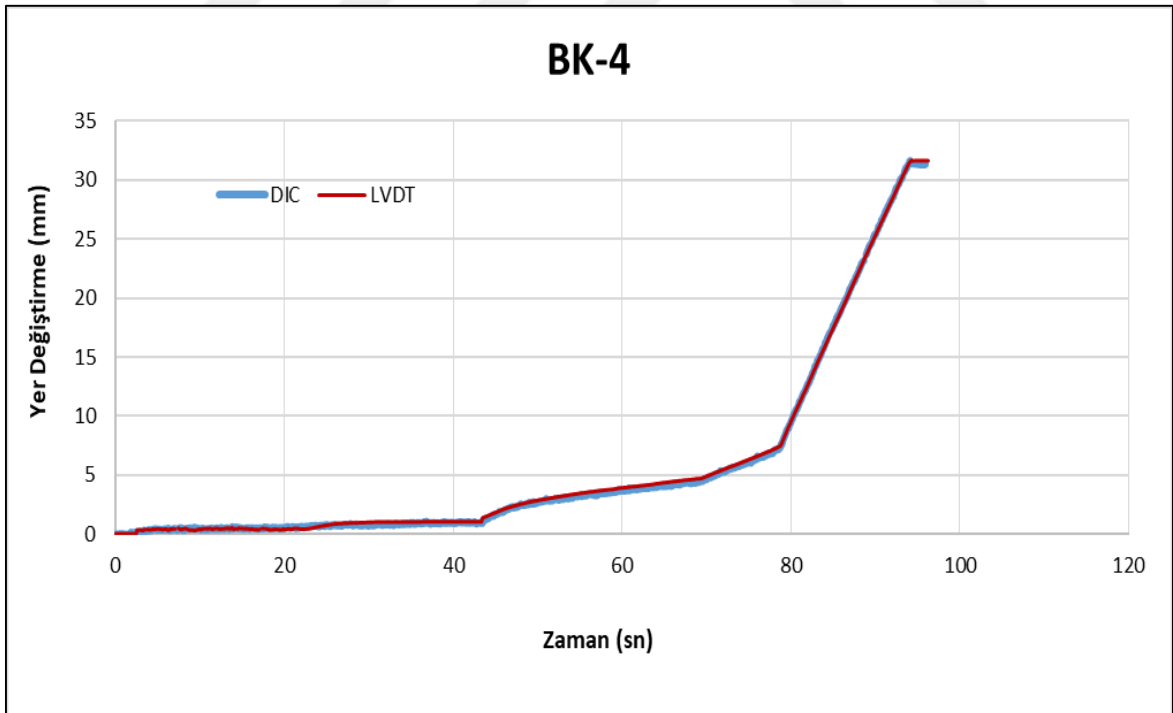
Şekil 5.1. BK-1 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



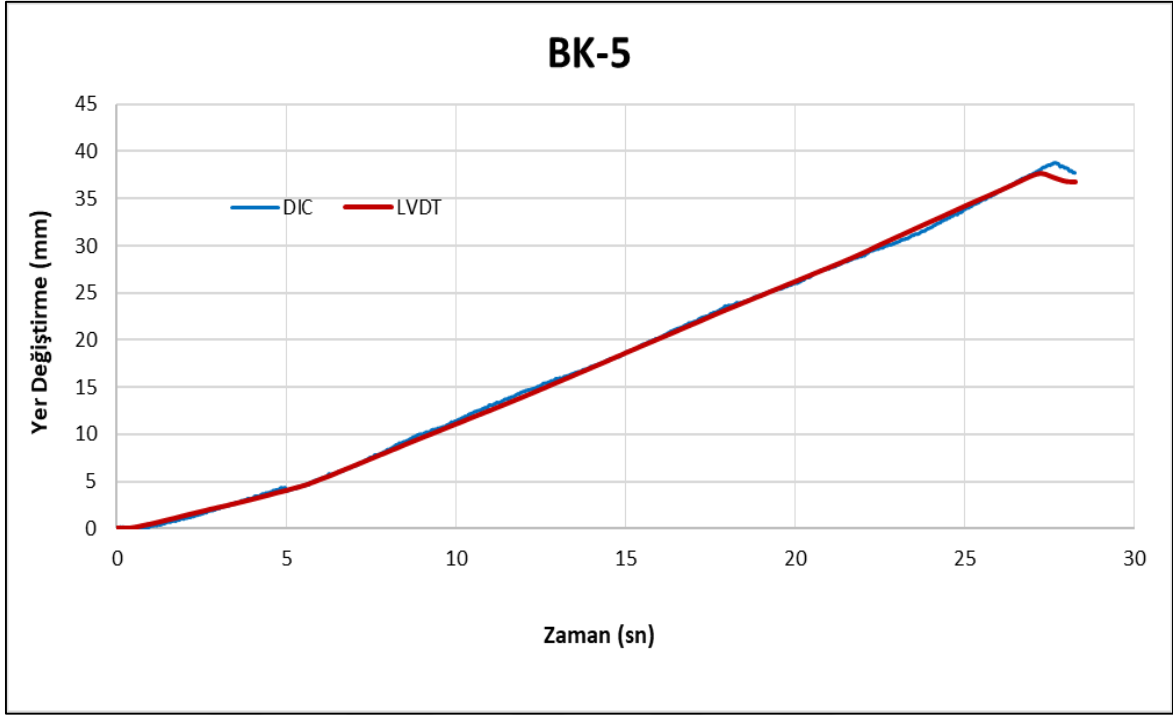
Şekil 5.2. BK-2 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



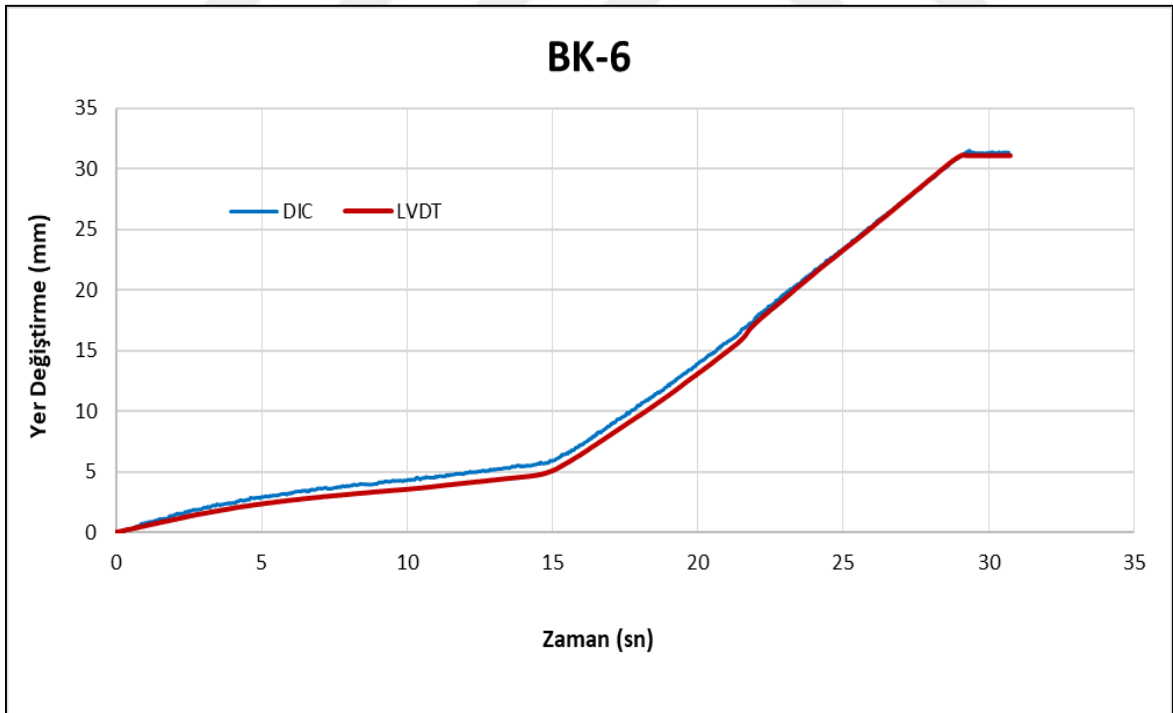
Şekil 5.3. BK-3 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



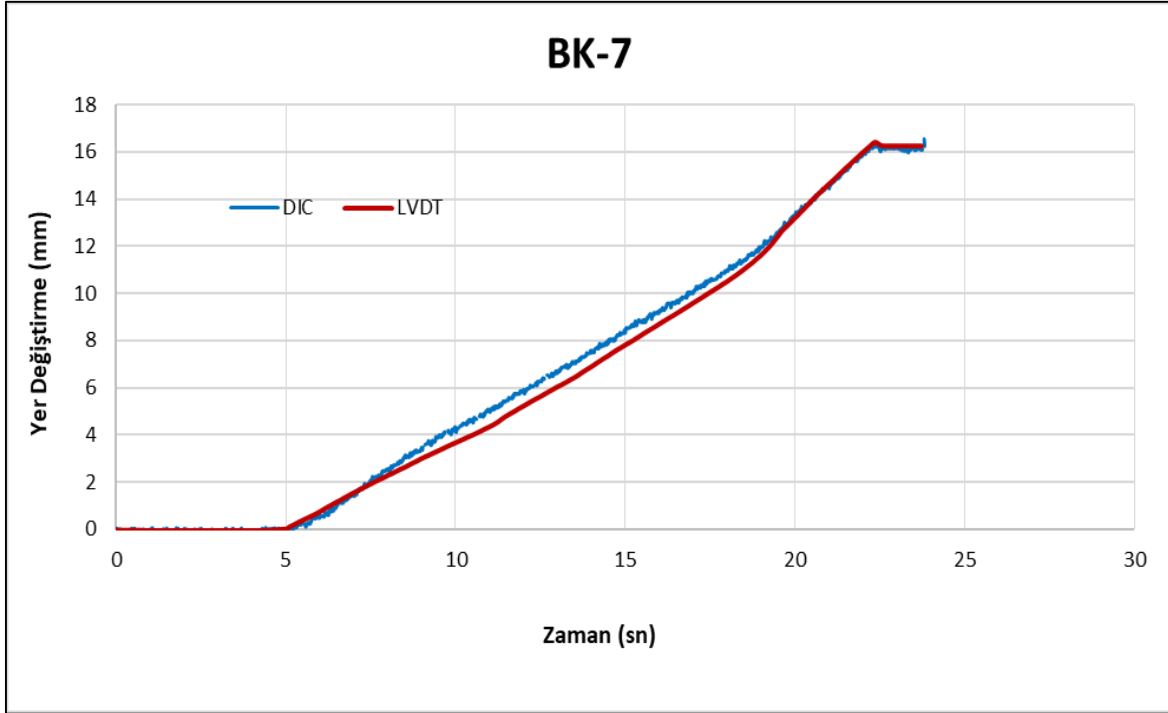
Şekil 5.4. BK-4 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



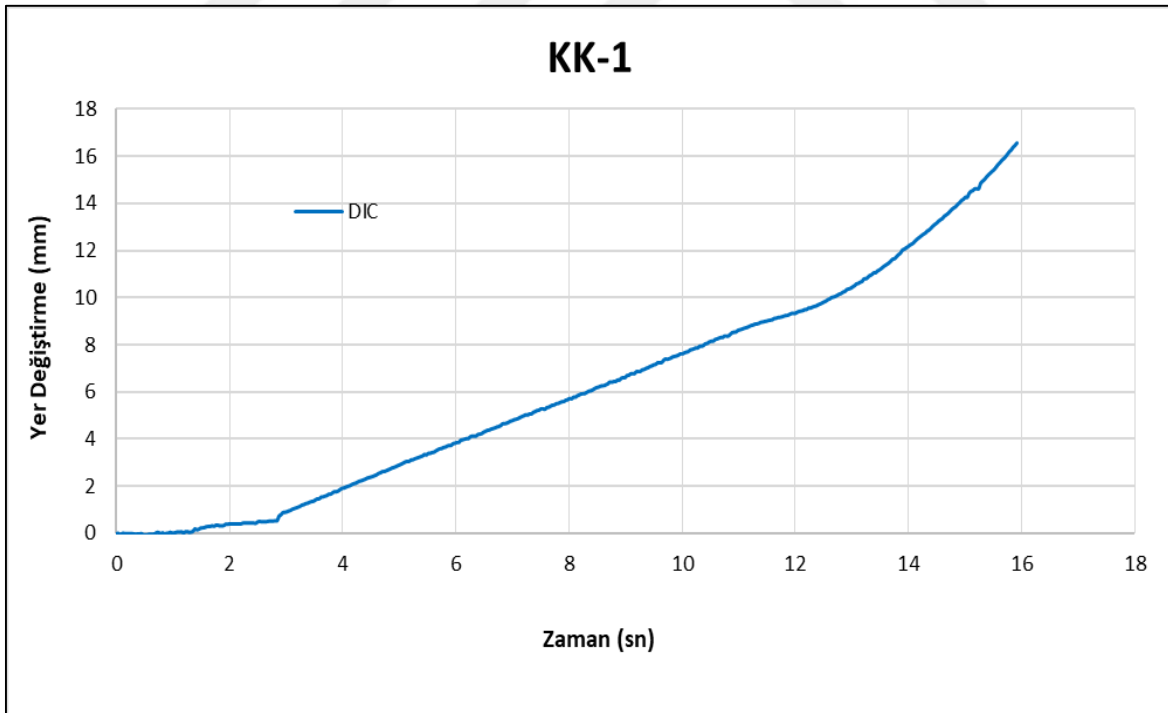
Şekil 5.5. BK-5 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



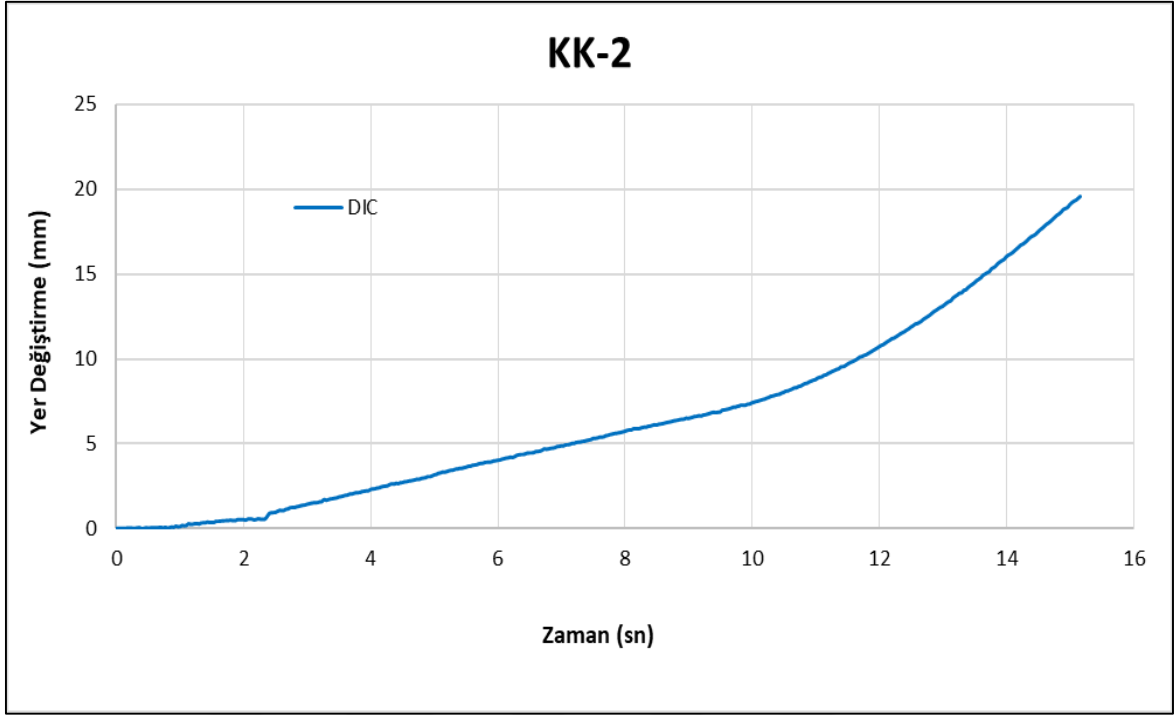
Şekil 5.6. BK-6 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



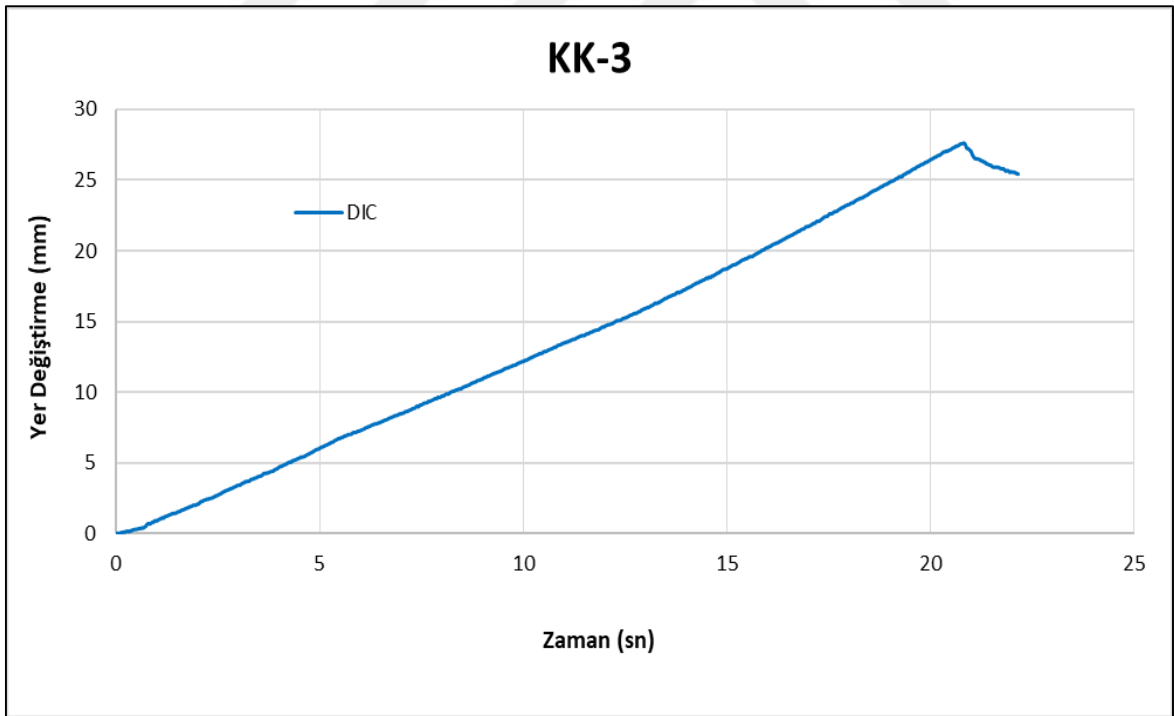
Şekil 5.7. BK-7 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



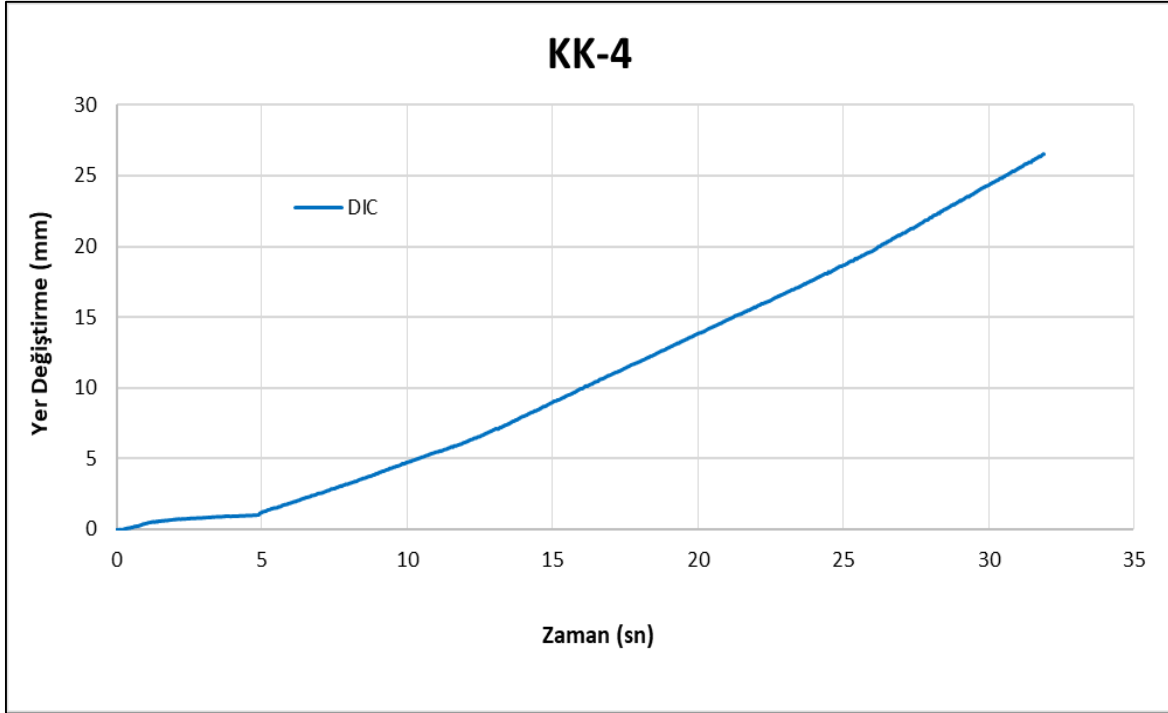
Şekil 5.8. KK-1 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



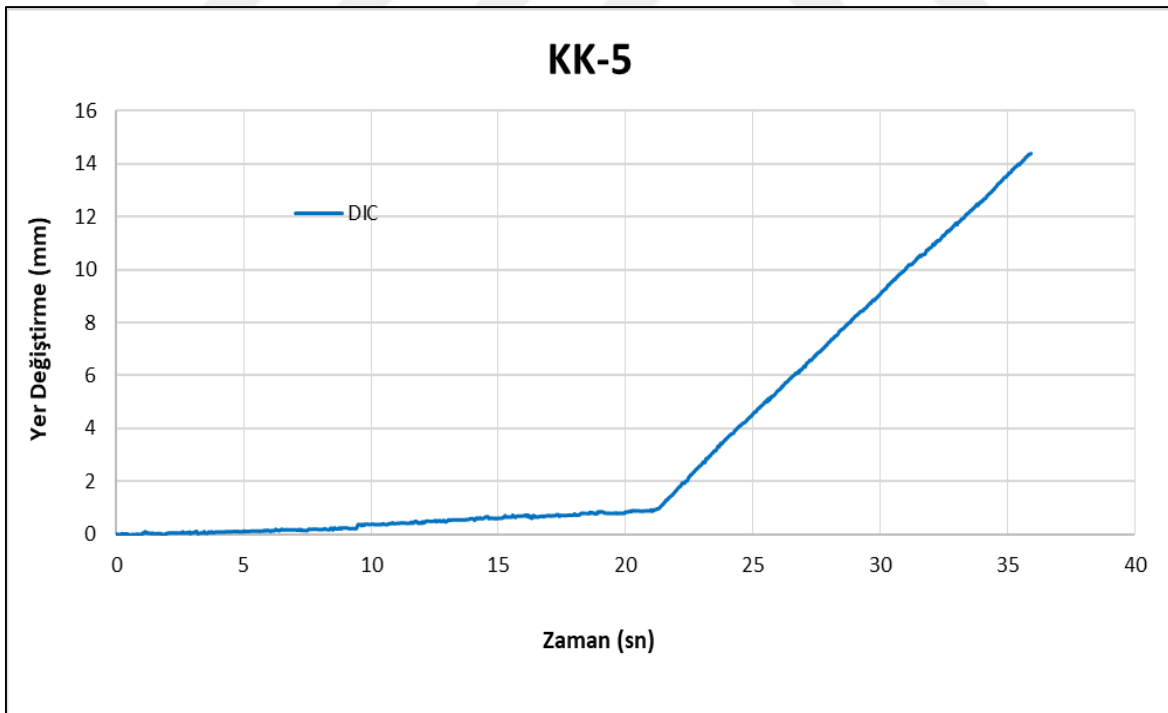
Şekil 5.9. KK-2 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



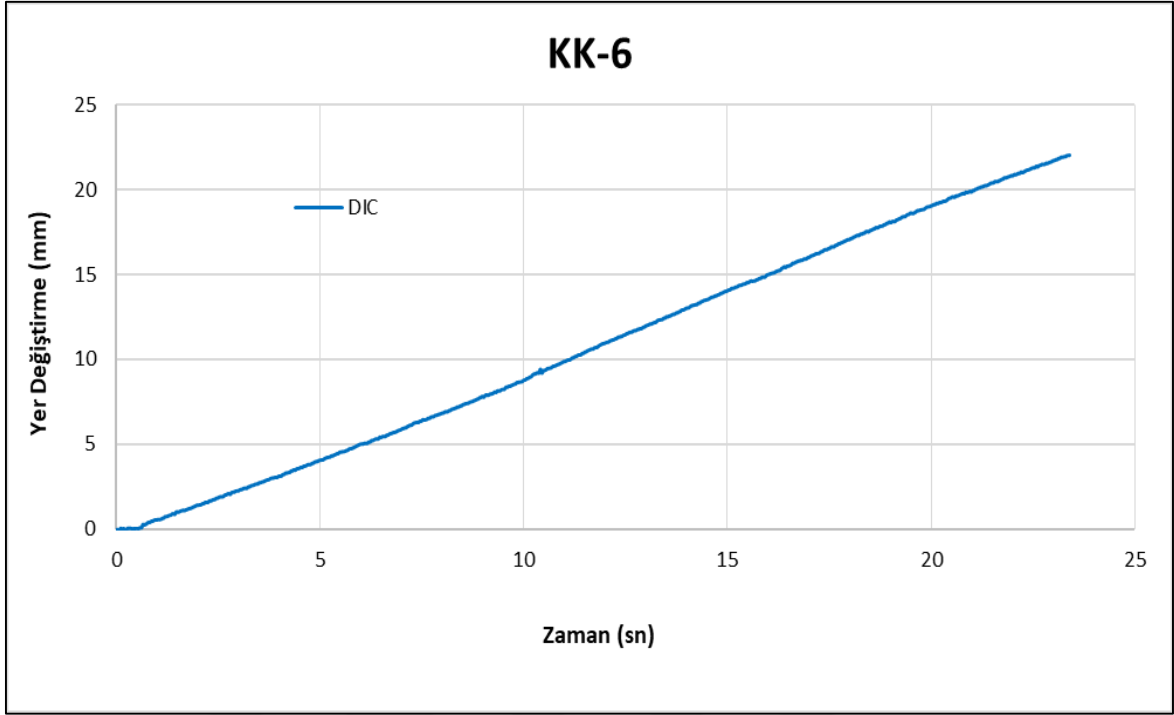
Şekil 5.10. KK-3 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



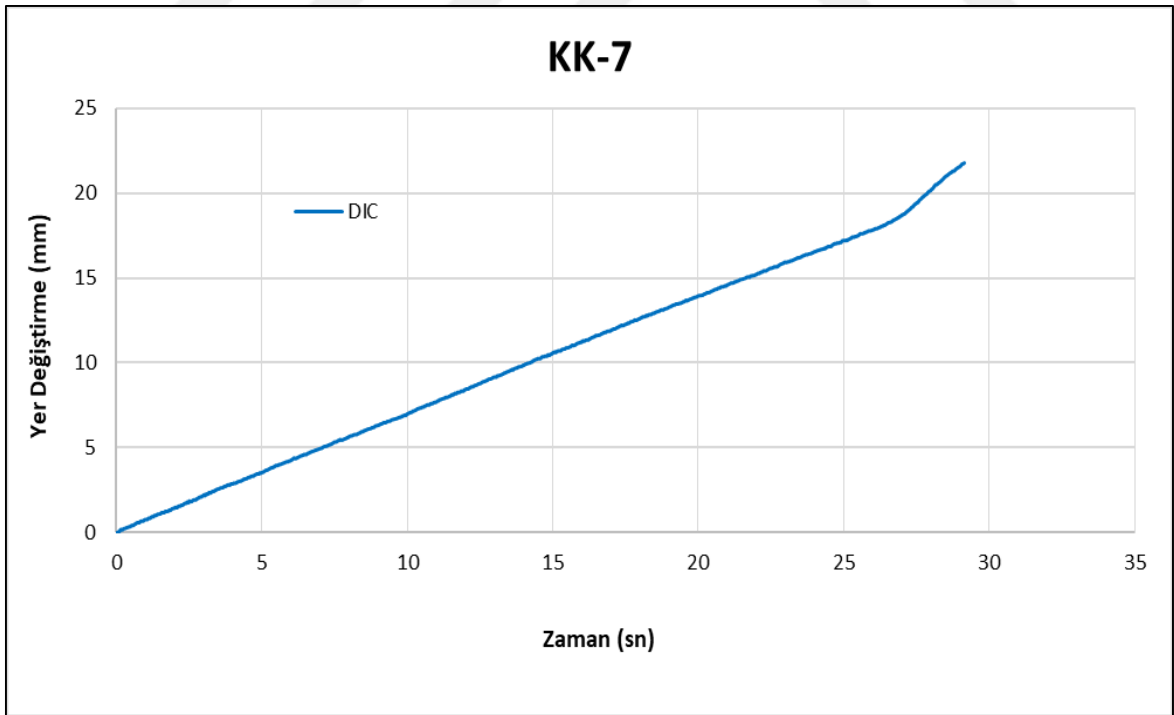
Şekil 5.11. KK-4 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



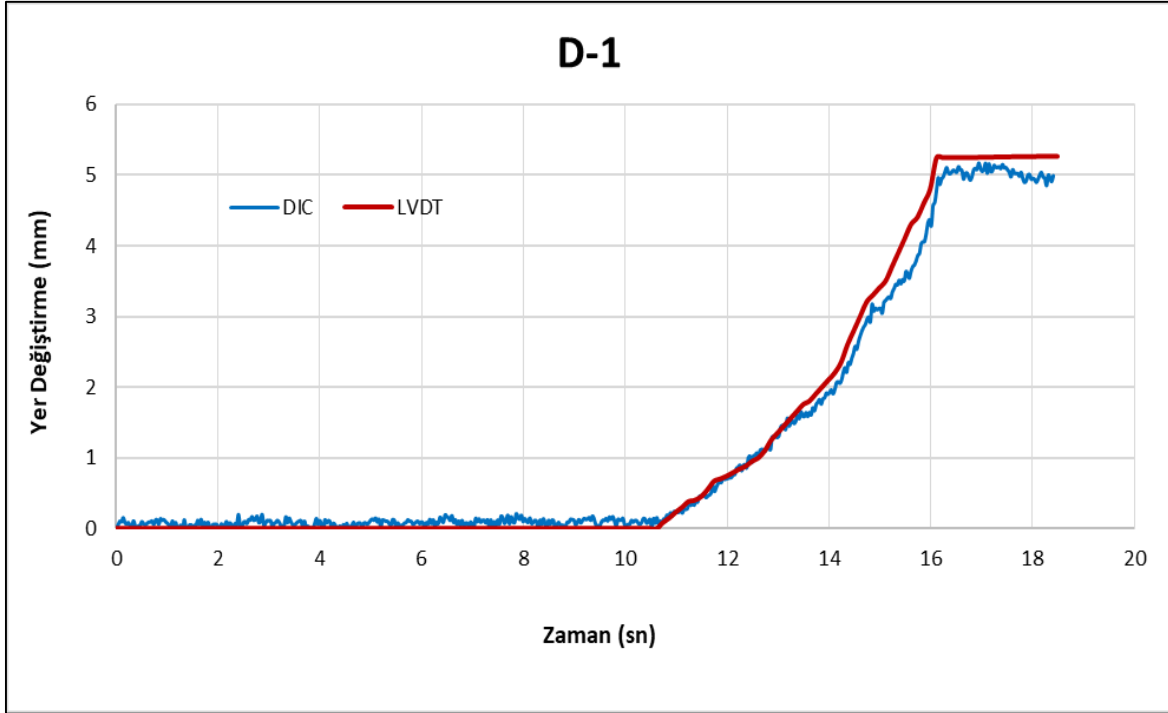
Şekil 5.12. KK-5 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



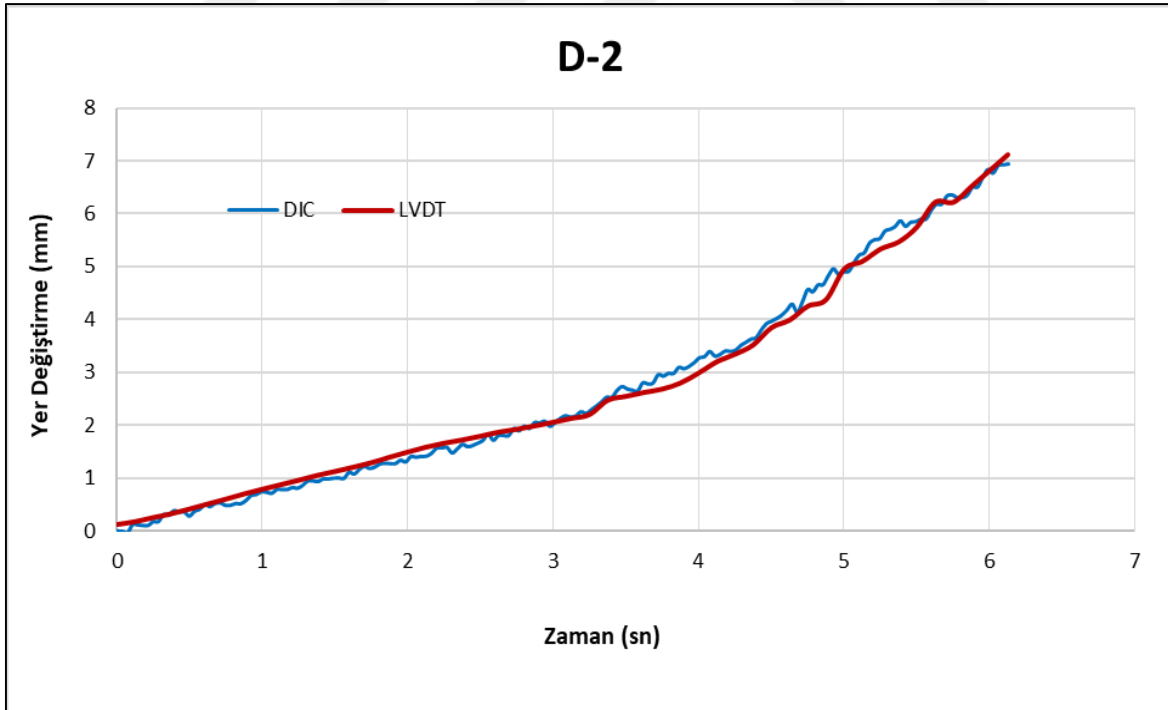
Şekil 5.13. KK-6 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



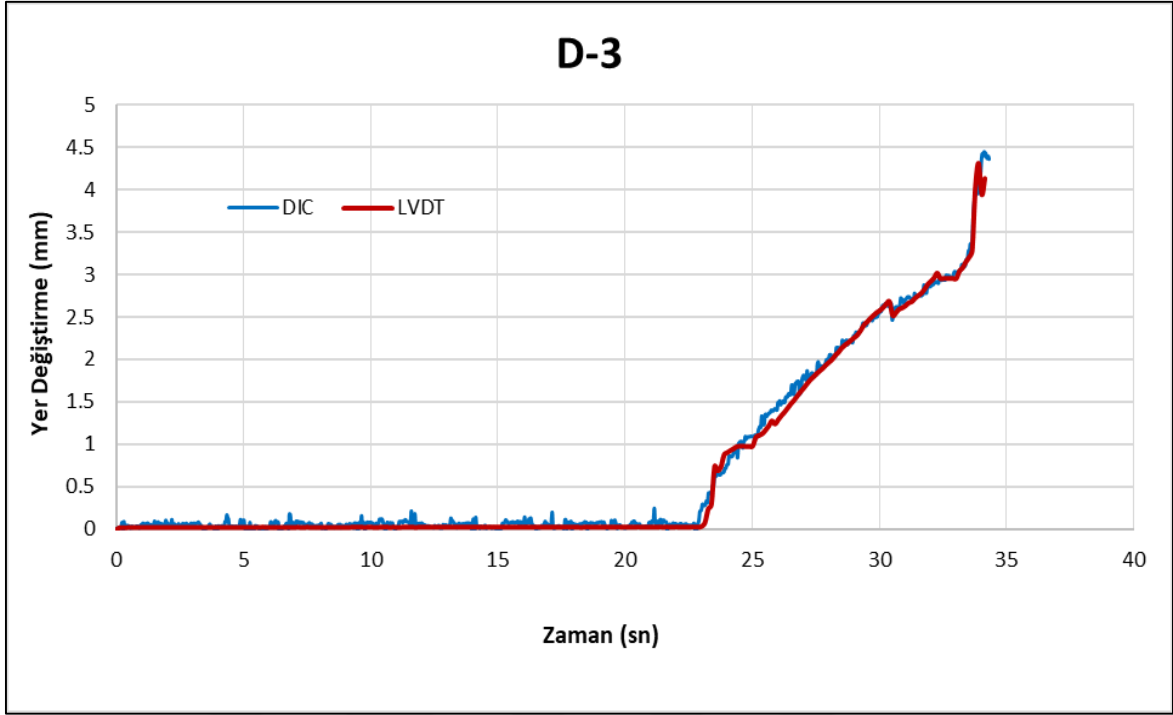
Şekil 5.14. KK-7 numunesine ait DIC ölçümünden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği



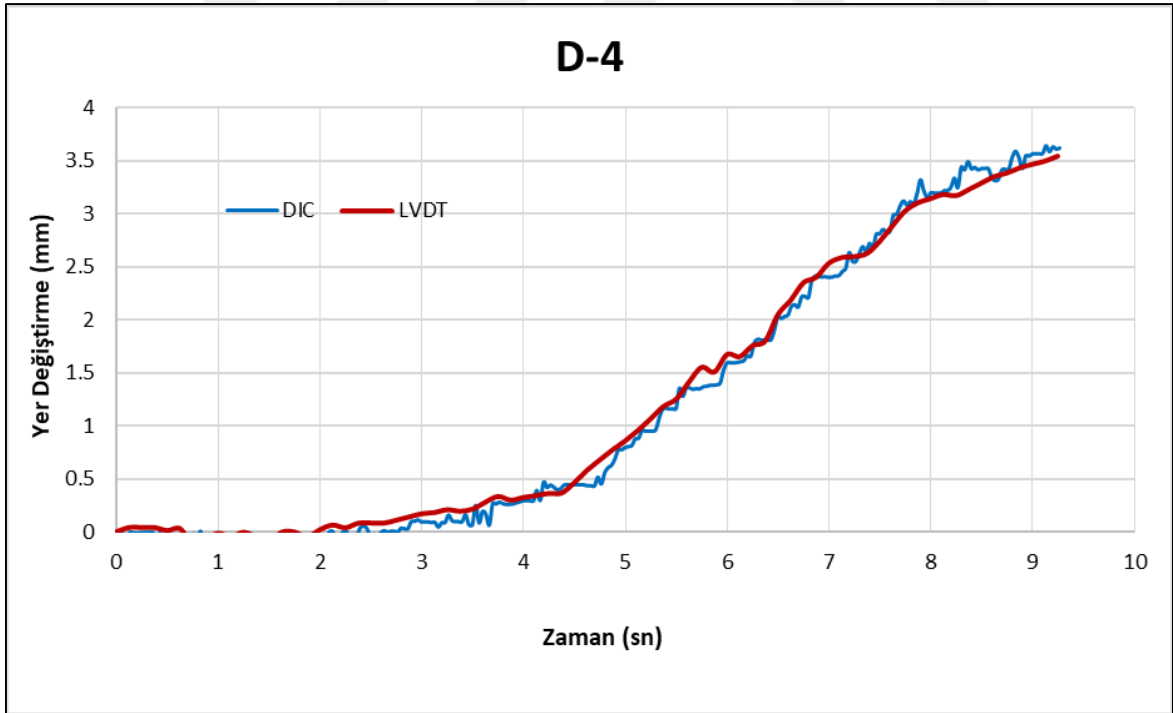
Şekil 5.15. D-1 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



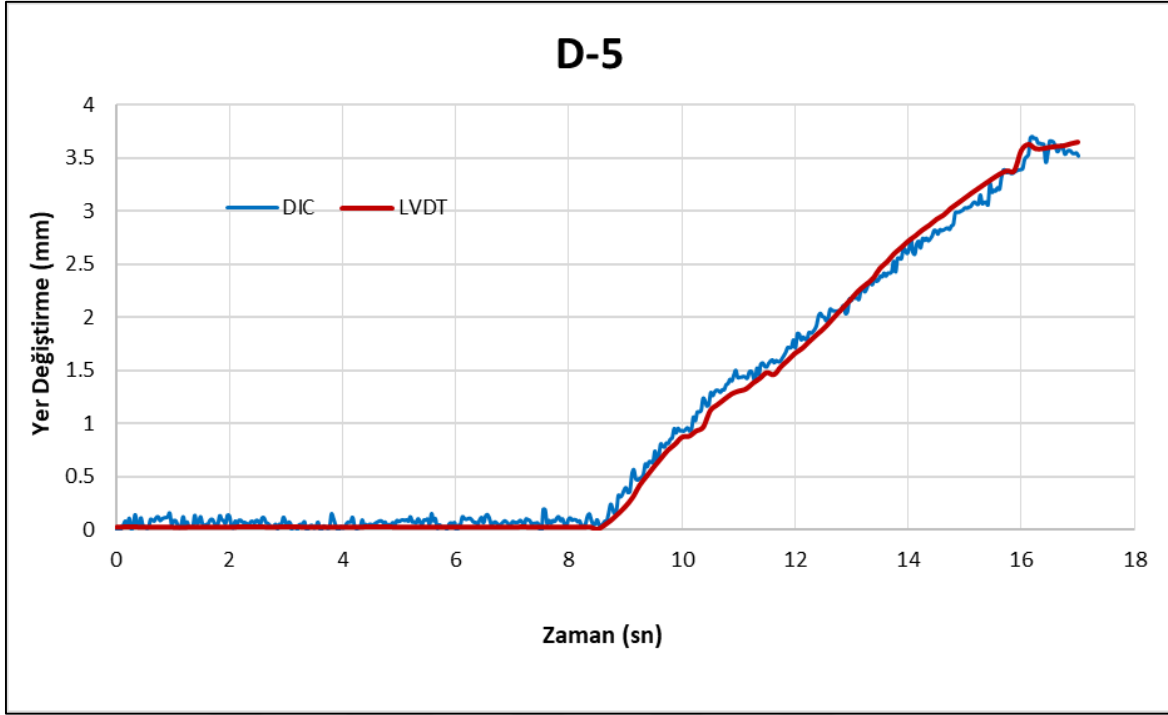
Şekil 5.16. D-2 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.17. D-3 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



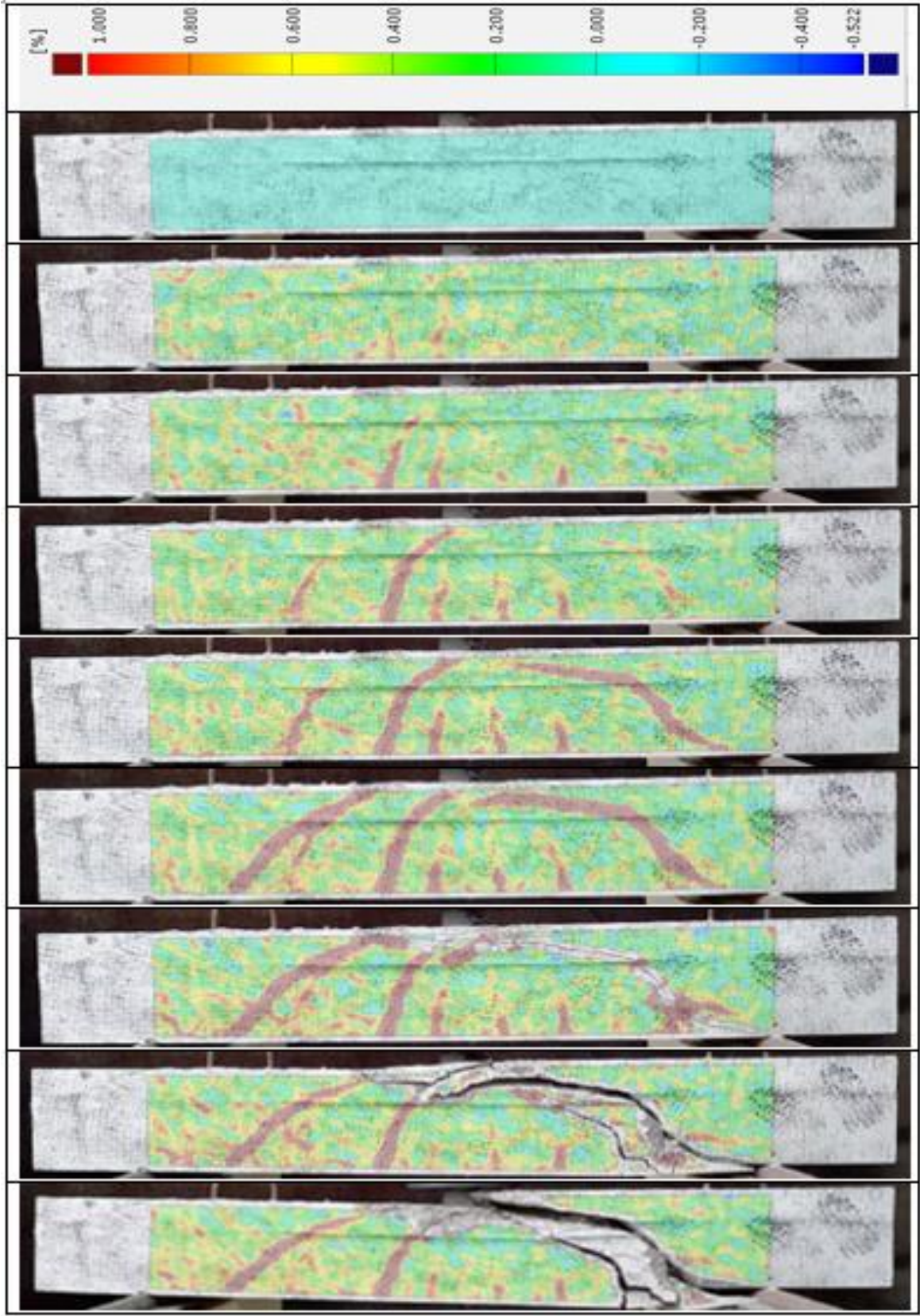
Şekil 5.18. D-4 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması



Şekil 5.19. D-5 numunesine ait LVDT ve DIC ölçümlerinden elde edilen yer değiştirme-zaman grafiklerinin karşılaştırılması

5.2. Yüzey Gerilme Değişimleri

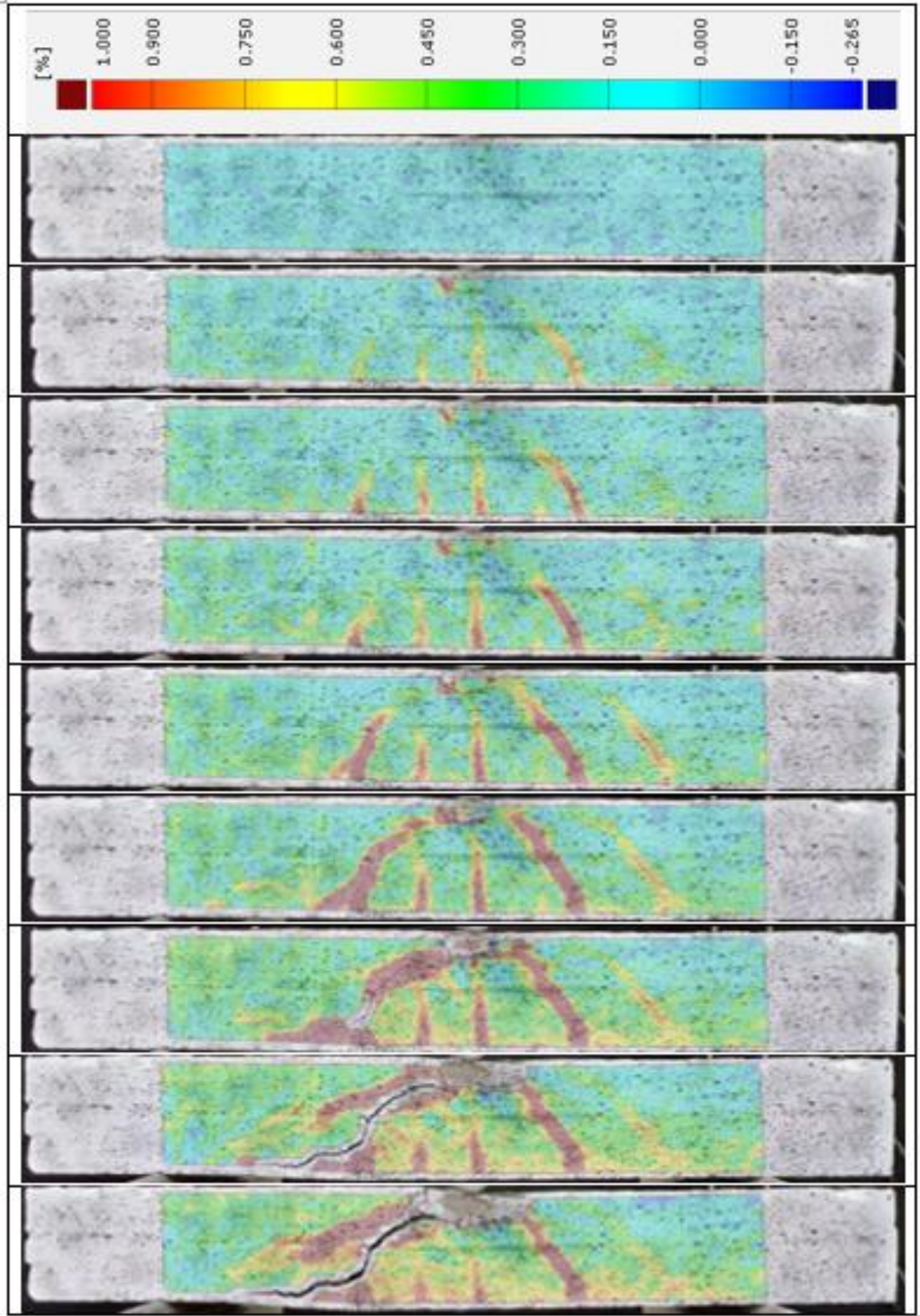
Gom Correlate yazılımı numune yüzeyindeki desen hareketlerinden yer değiştirmeleri hesaplar. Ardından bu yer değiştirmelere karşılık gelen kısmi koordinatların türevlerinden numune yüzeyinde meydana gelen gerilmeler belirlenmiş olur. Yani gerilme üzerindeki yer değiştirmelerin etkisi belirlenmiş olur. Gerilmelerin ve gerilme değişimlerinin yüzey boyunca dağılımı, analizi yapılan alan için hesaplanan bir renk ölçeği ile tanımlanır, gösterilir. Deneye tabi tutulan tüm numunelerin yüzey gerilme değişimleri DIC yöntemiyle video başlangıcından, video sonuna kadar aşamalı olarak görselleştirilmiştir. DIC analizi sonucunda elde edilen numune yüzeylerinde meydana gelen gerilmelerin aşamalı değişim görselleri ve renk ölçekleri; BK numuneleri için Şekil 5.20-5.26'da, KK numuneleri için Şekil 5.27-5.33'te ve D Numuneleri için Şekil 5.34-5.38'de gösterilmiştir.



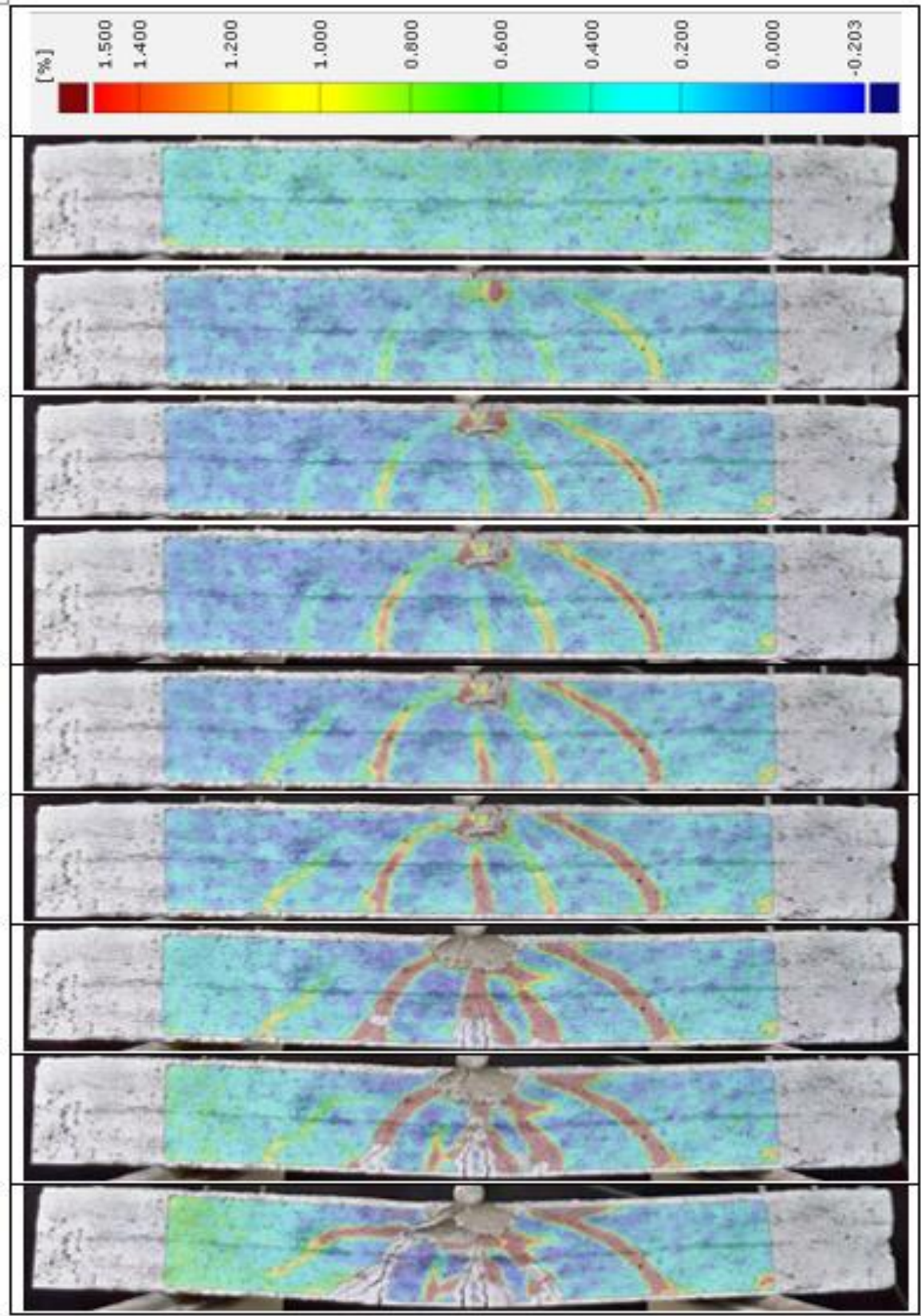
Şekil 5.20. BK-1 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



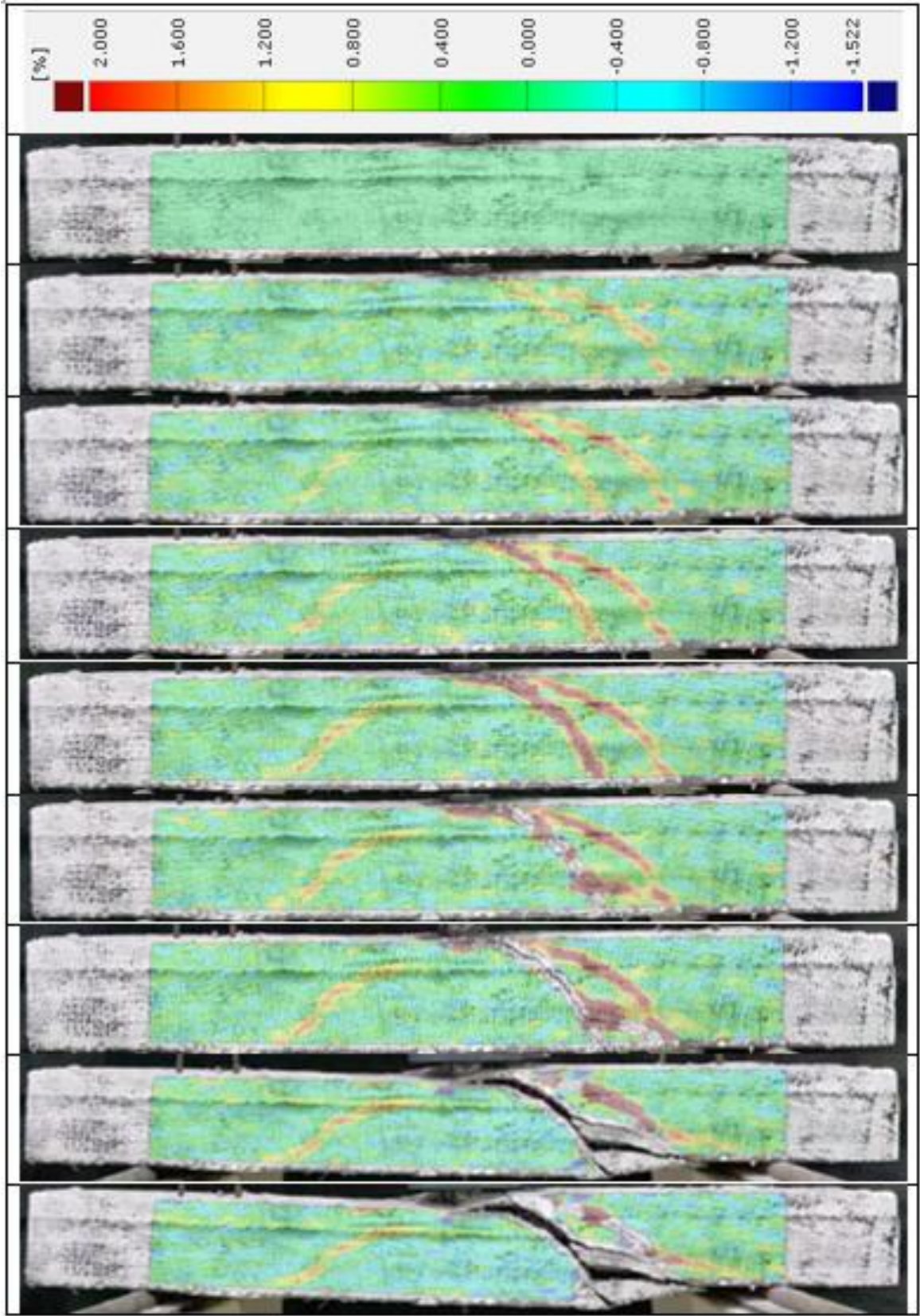
Şekil 5.21. BK-2 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



Şekil 5.22. BK-3 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



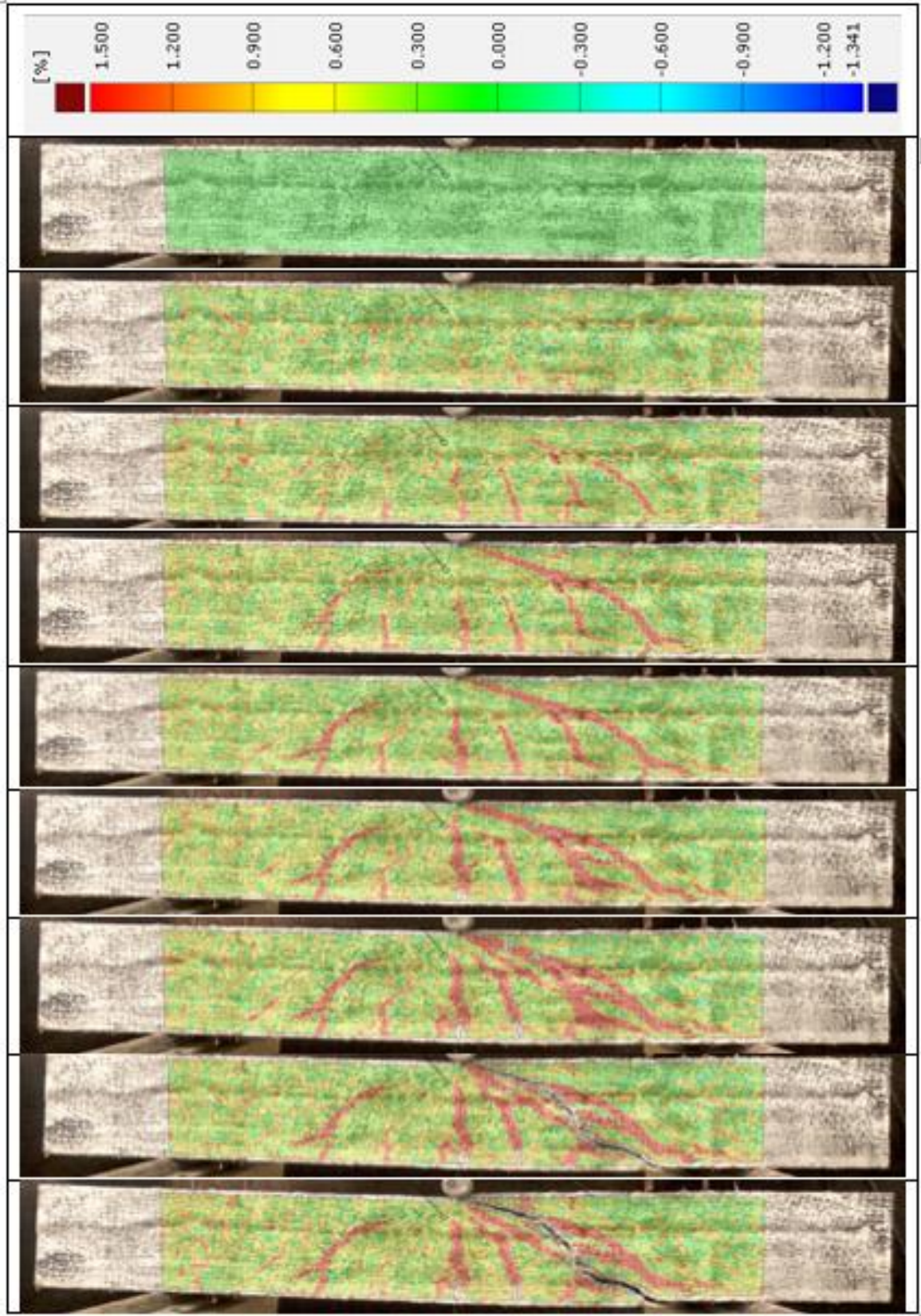
Şekil 5.23. BK-4 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



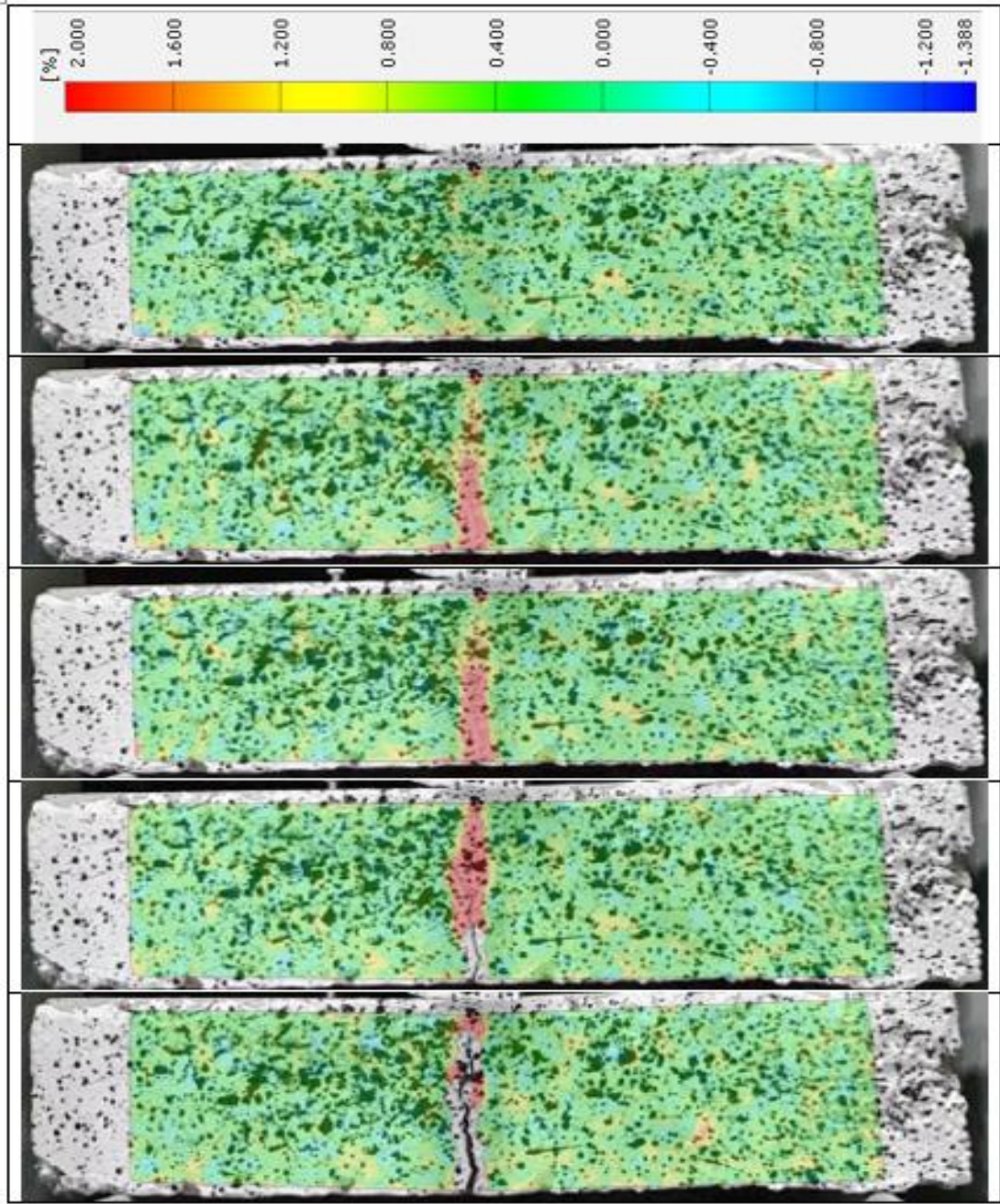
Şekil 5.24. BK-5 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçüğü



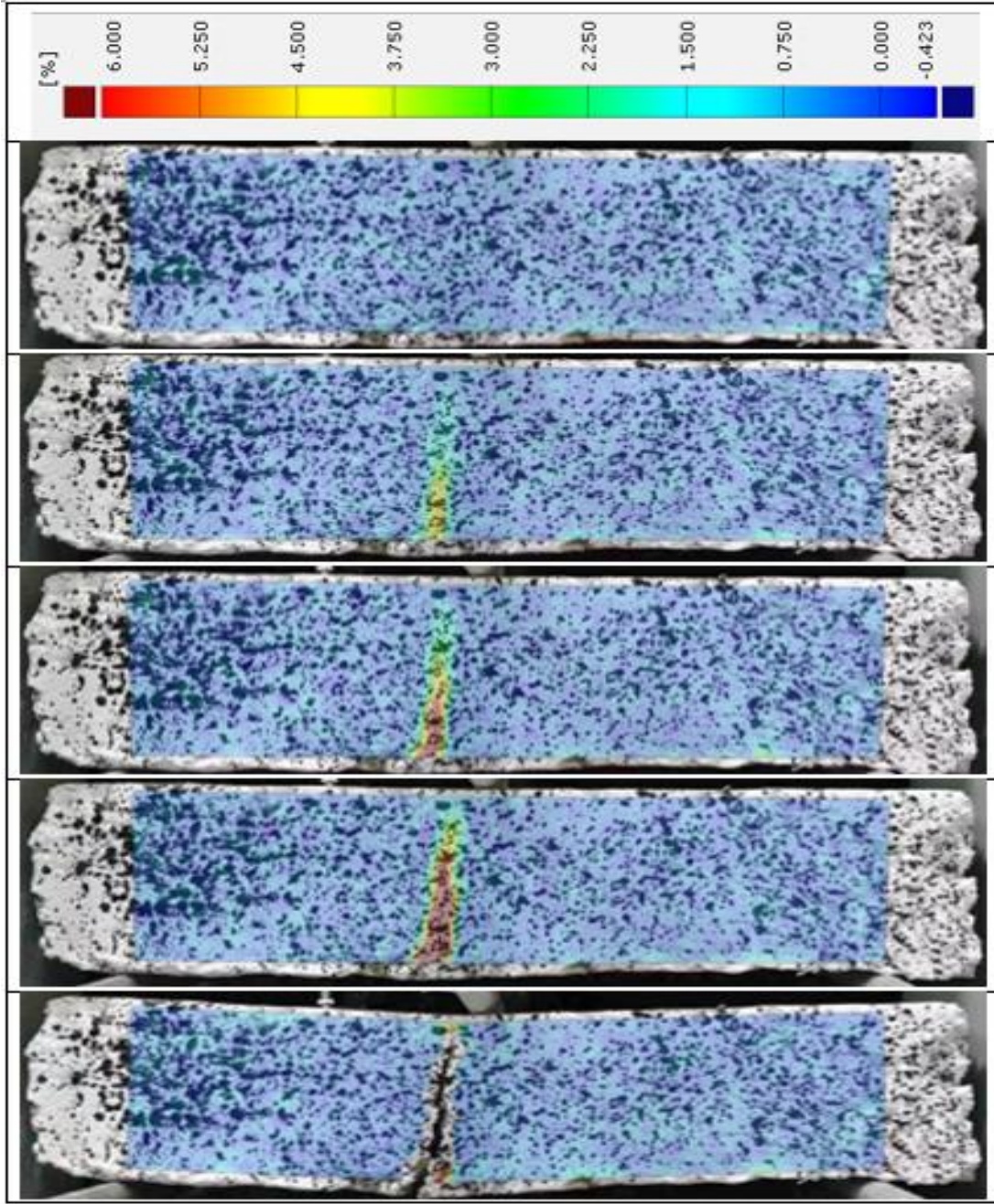
Şekil 5.25. BK-6 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçüğü



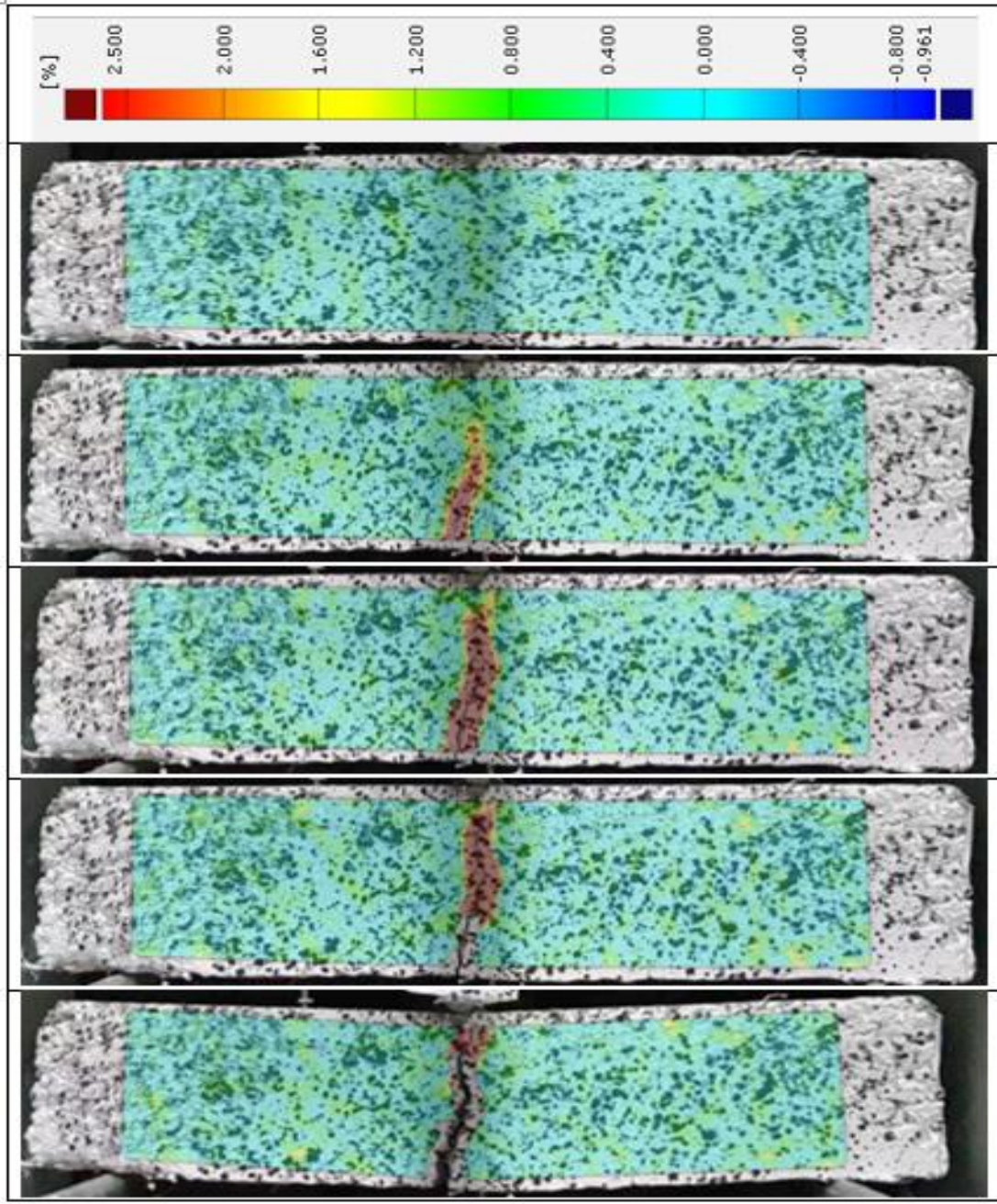
Şekil 5.26. BK-7 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



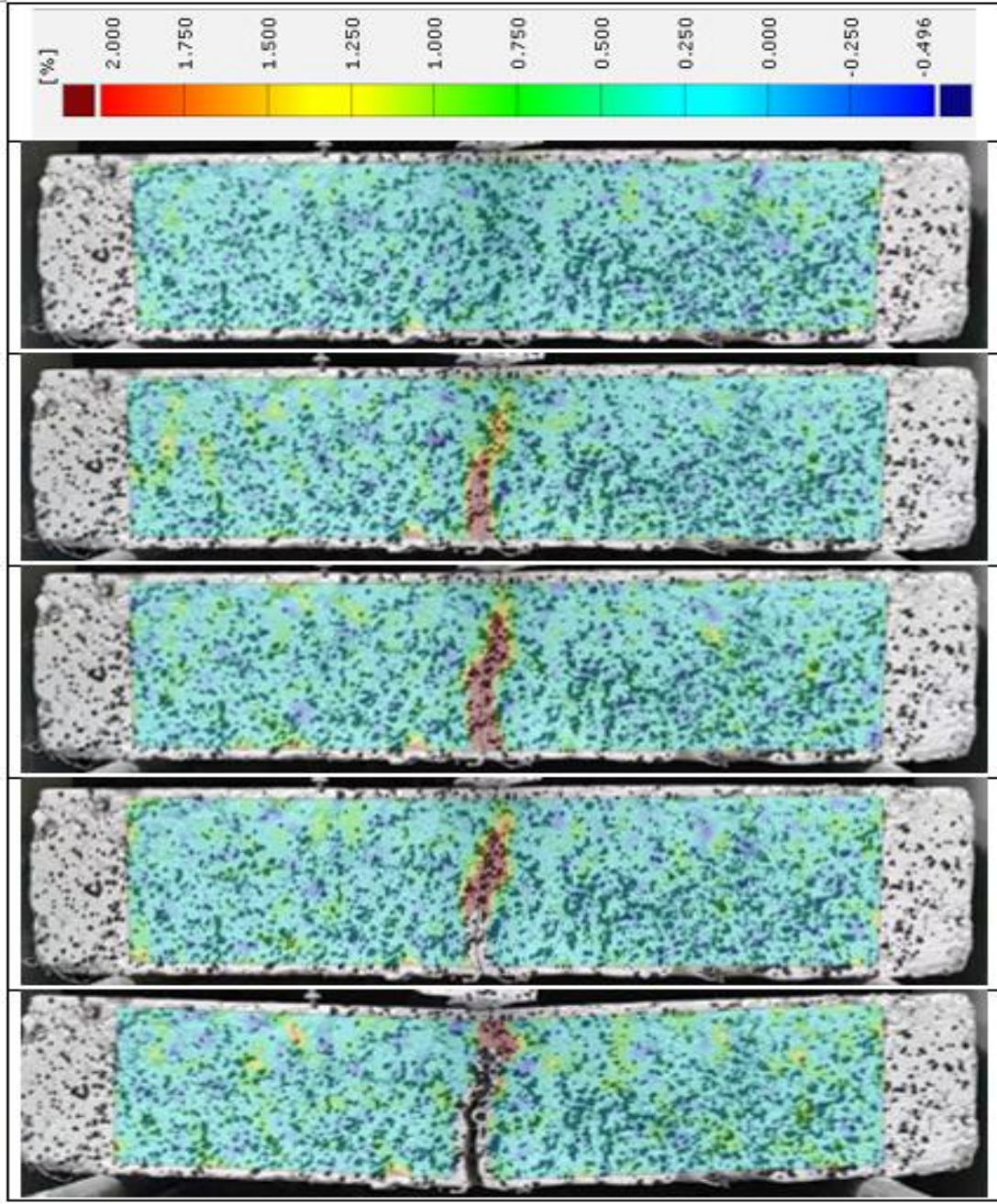
Şekil 5.27. KK-1 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



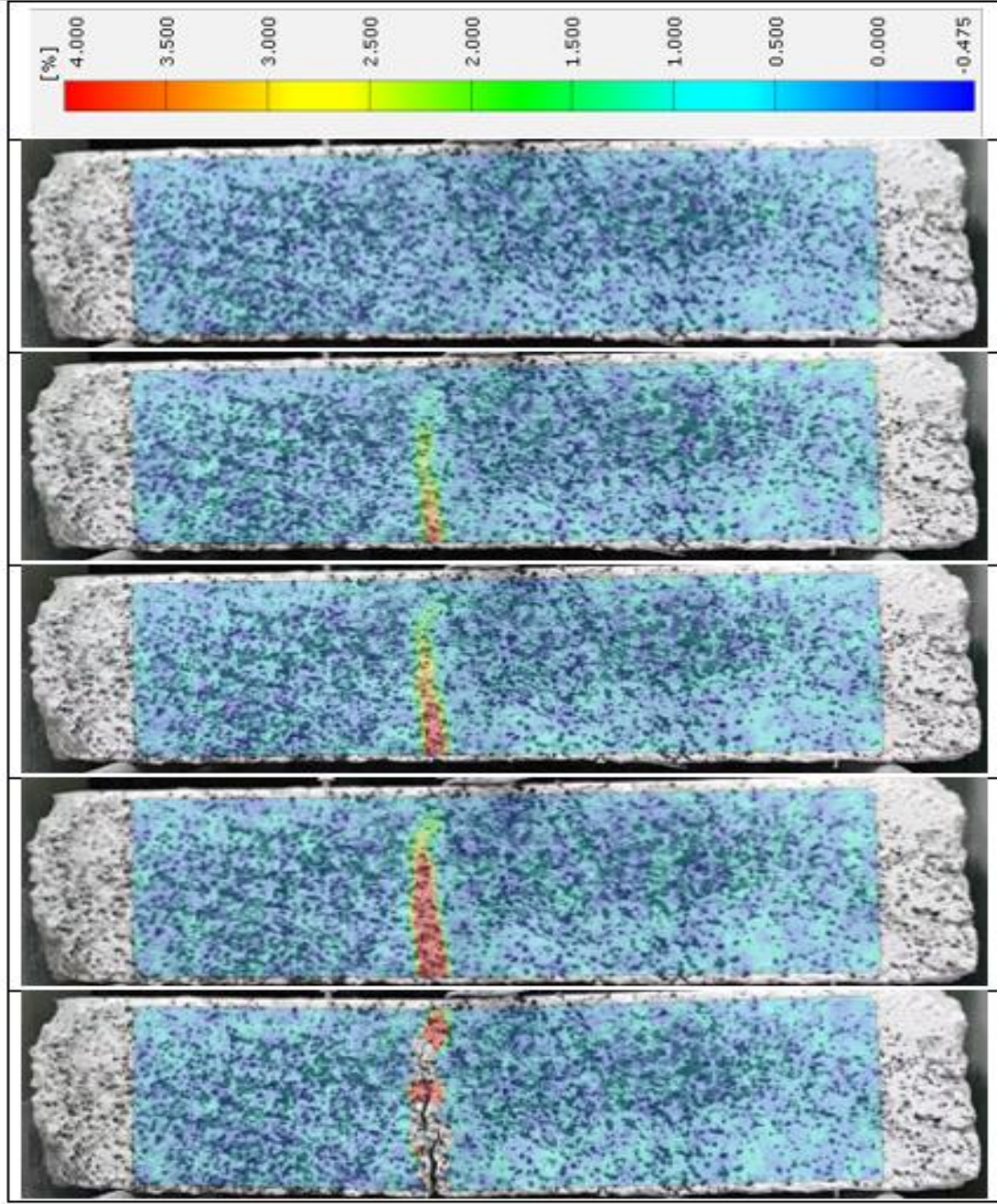
Şekil 5.28. KK-2 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



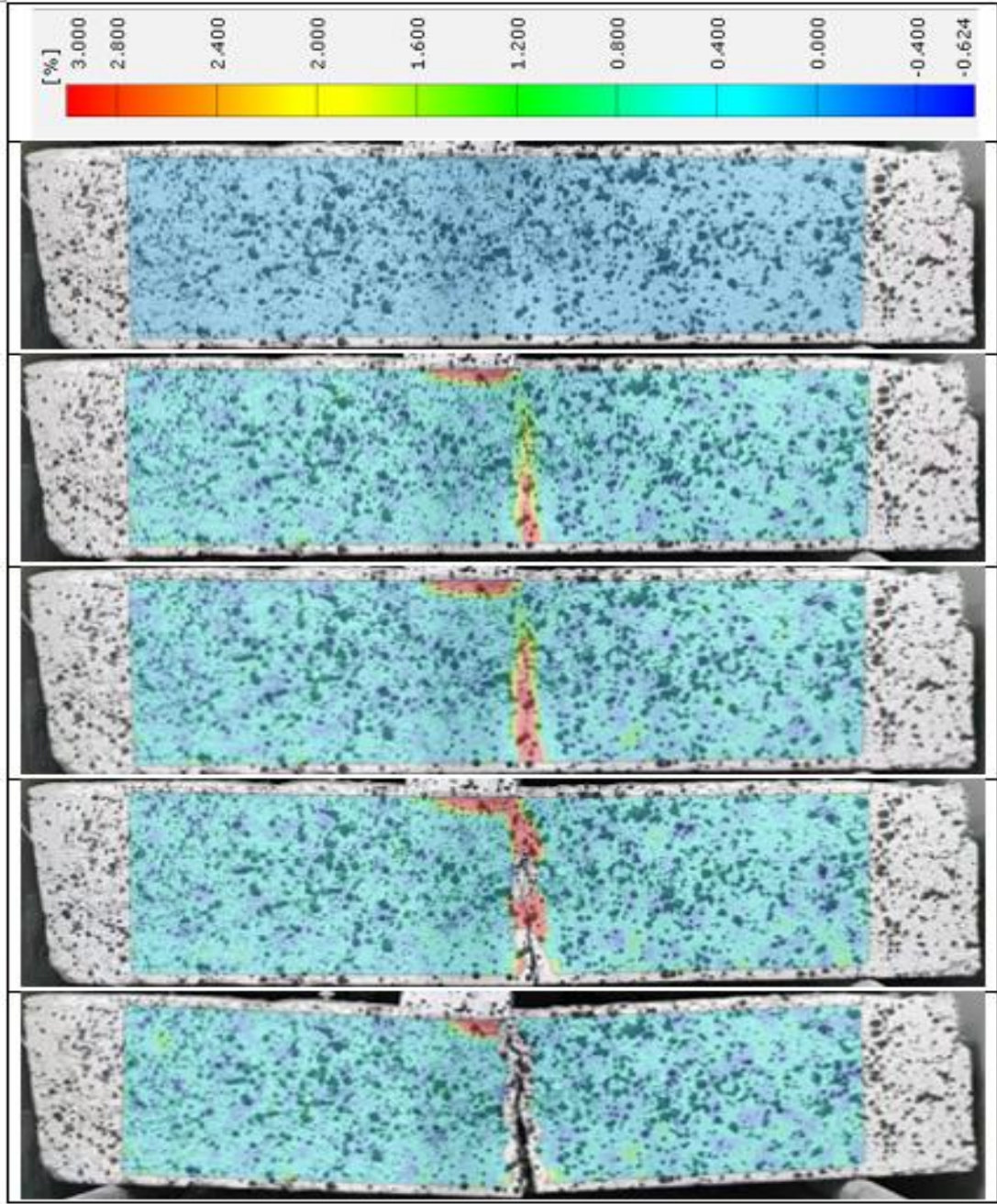
Şekil 5.29. KK-3 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



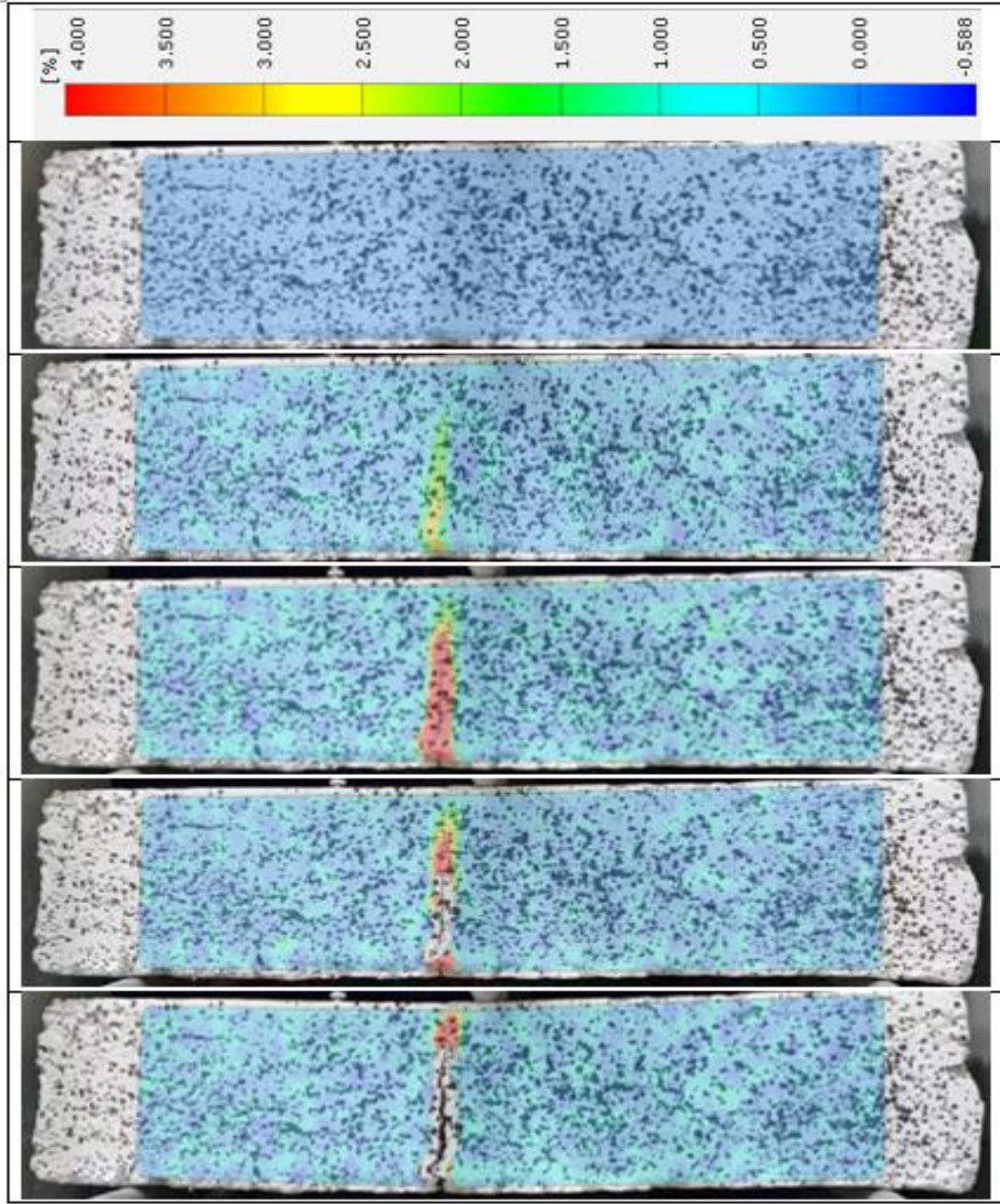
Şekil 5.30. KK-4 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



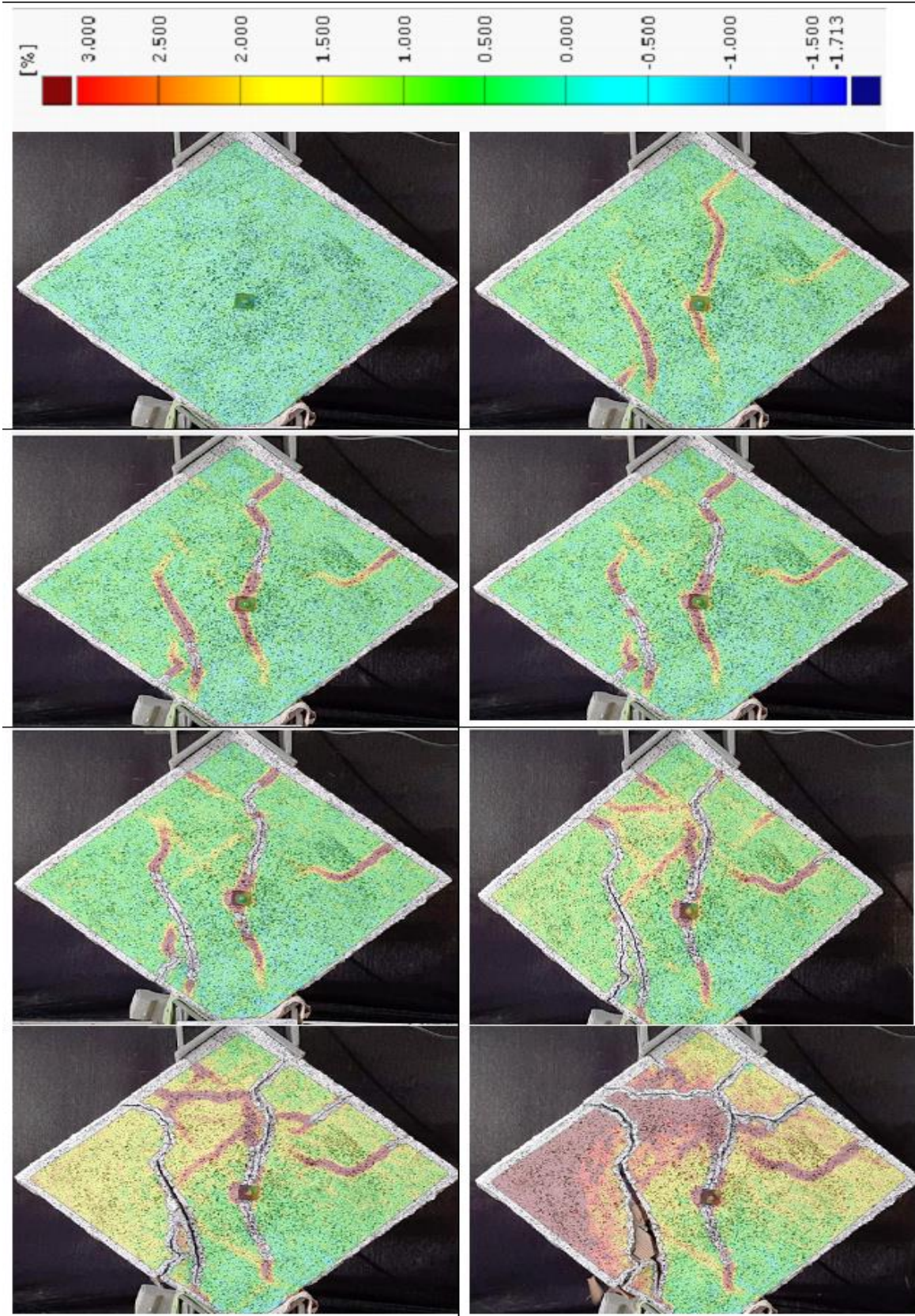
Şekil 5.31. KK-5 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



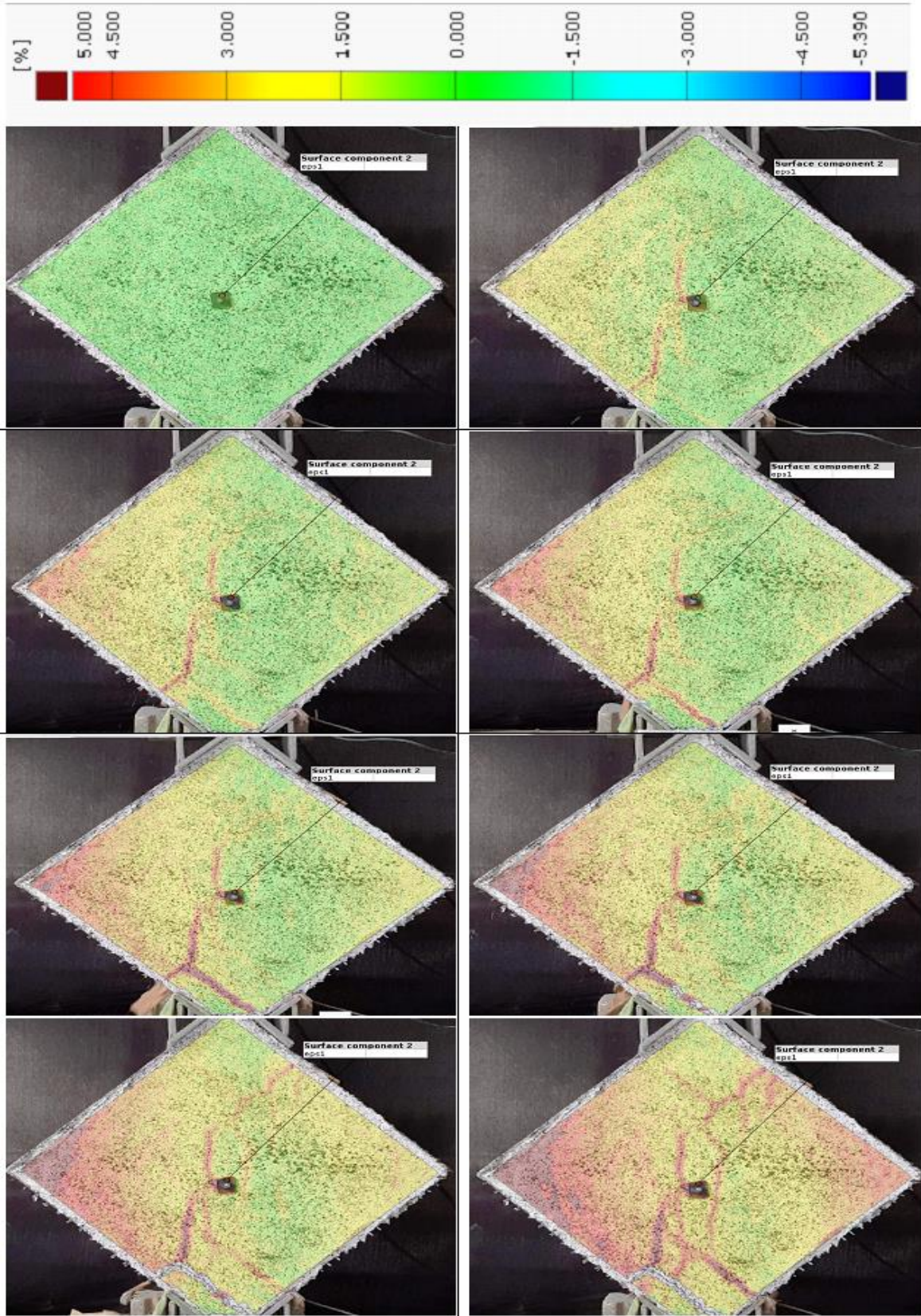
Şekil 5.32. KK-6 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



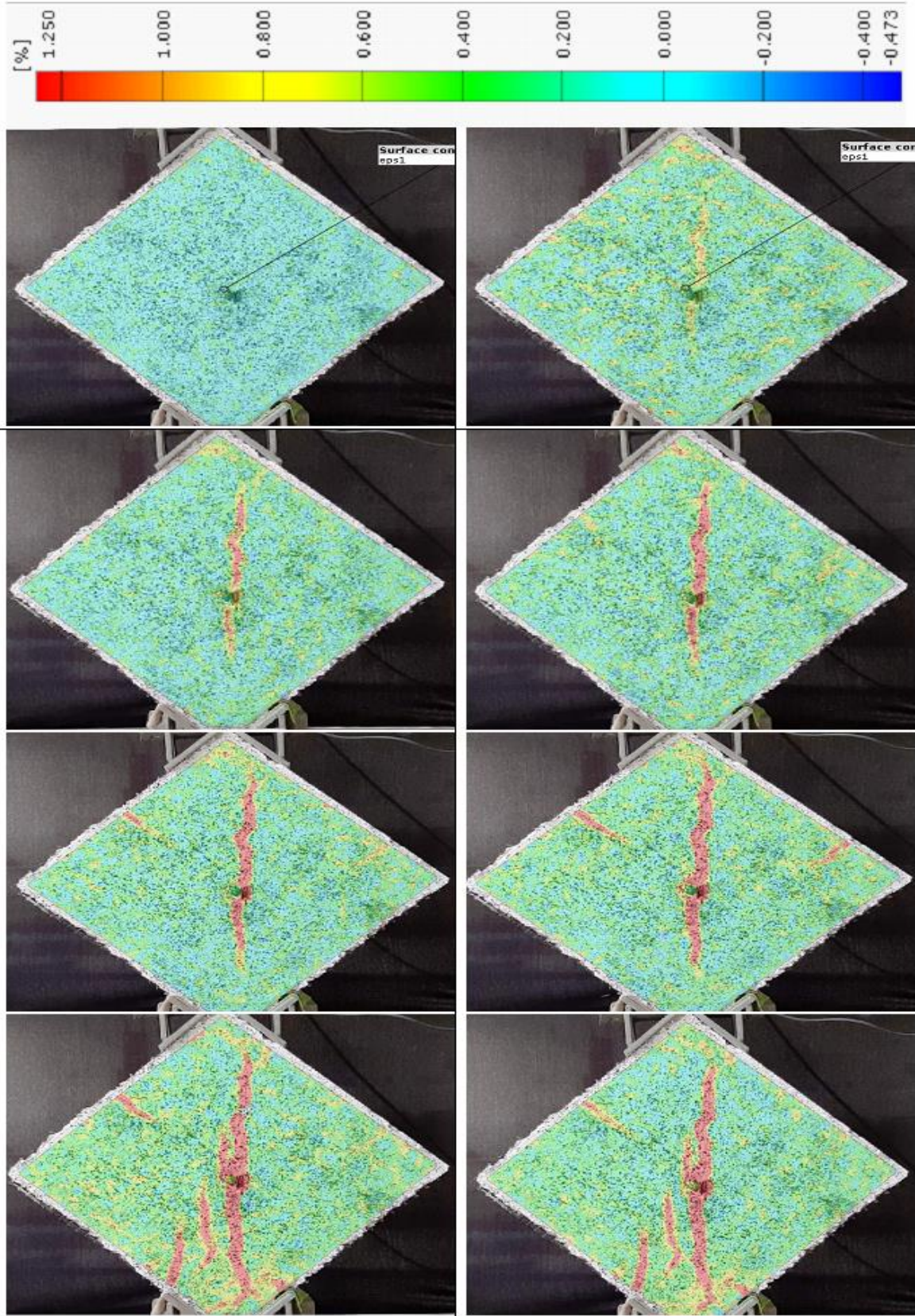
Şekil 5.33. KK-7 aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



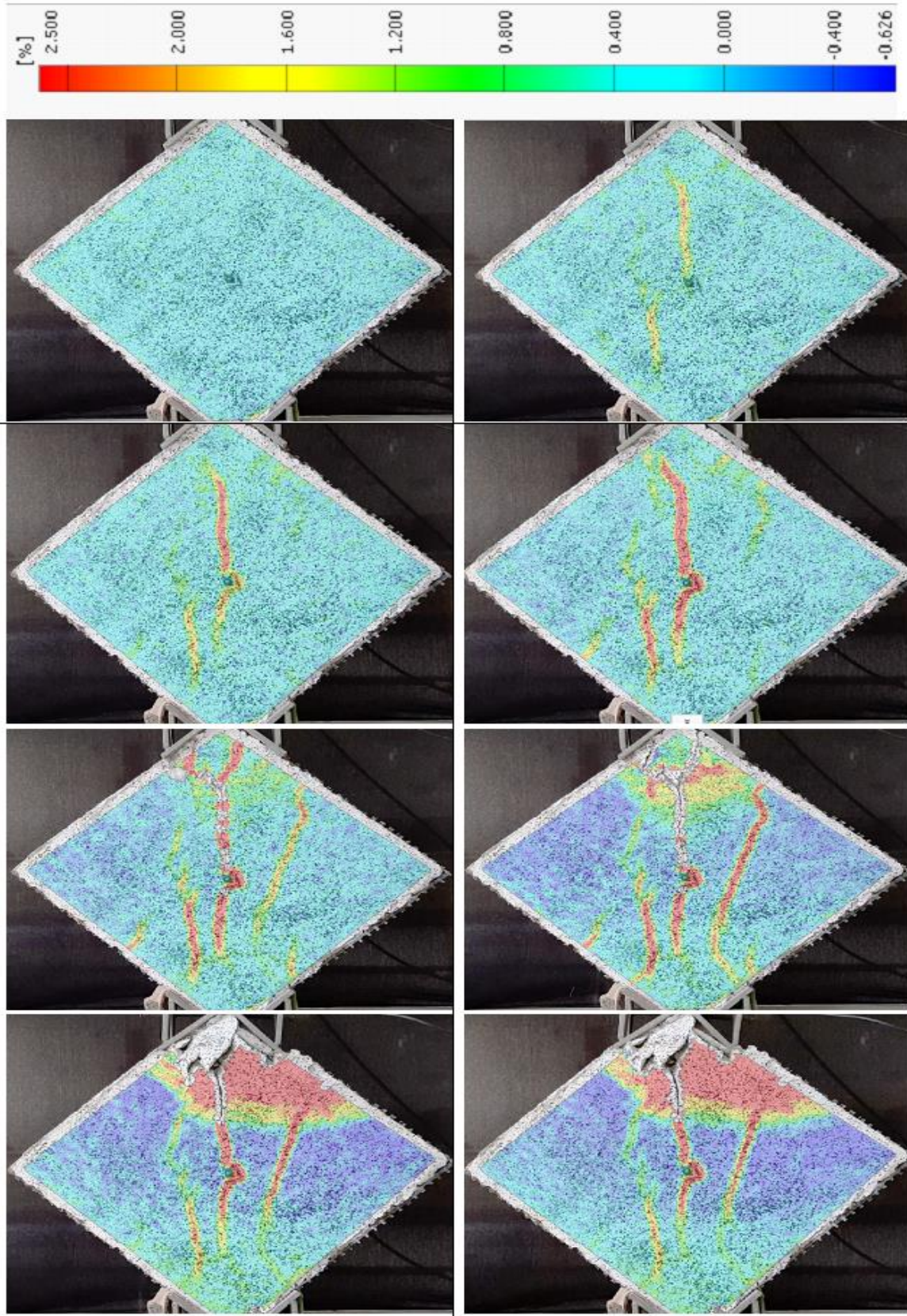
Şekil 5.34. D-1 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



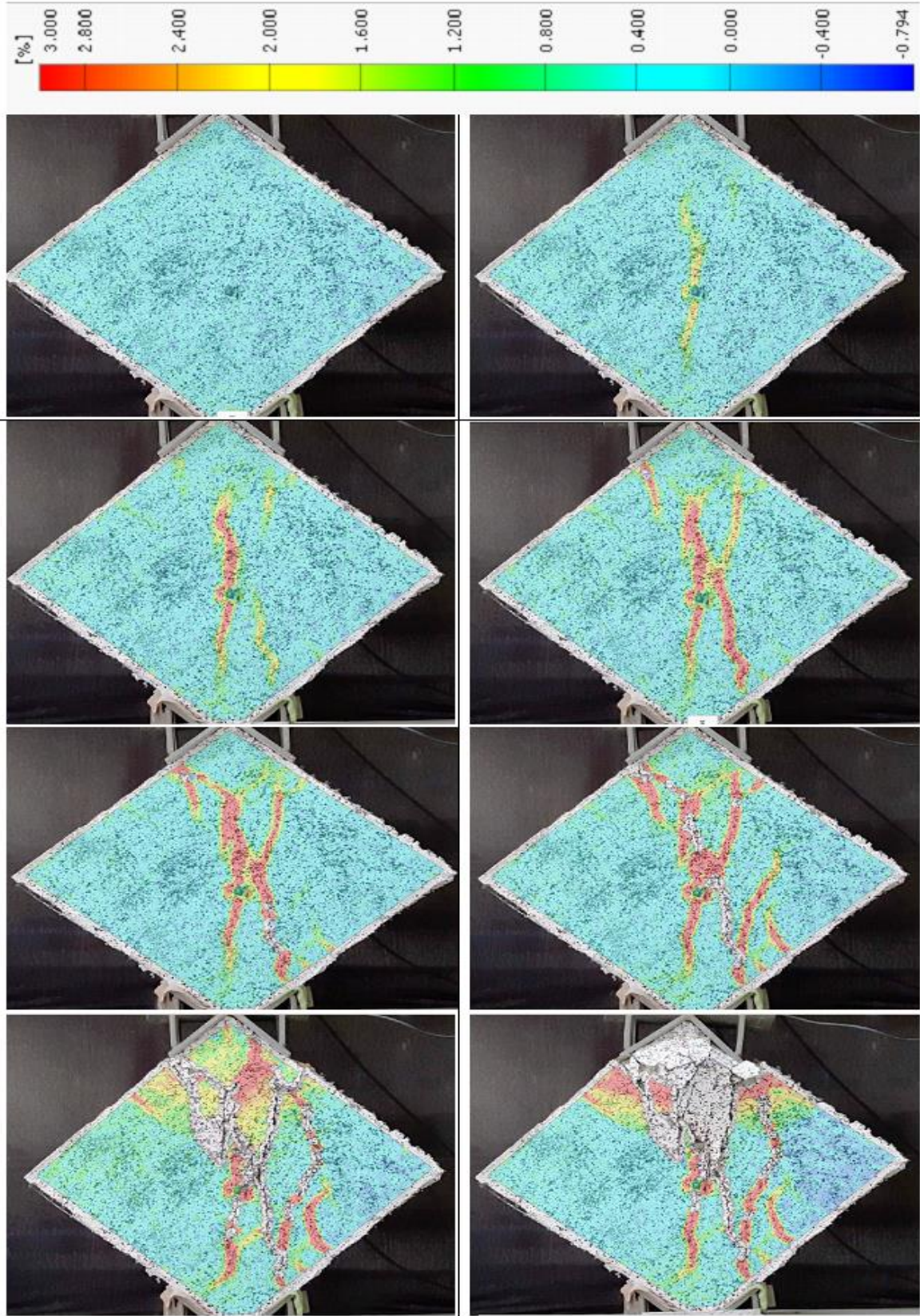
Şekil 5.35. D-2 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



Şekil 5.36. D-3 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



Şekil 5.37. D-4 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği



Şekil 5.38. D-5 numunesi aşamalı yüzey gerilme değişimi ve renk ölçeği

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Sonuç

Bu çalışmada inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında yer değiştirmelerin ölçümü ve gerilme değişimlerinin belirlenmesinde DIC yönteminin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla 19 adet numune yüzeyinde siyah-beyaz boyalarla benekleme yapılmış daha sonra numuneler üzerinde yükleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Yükleme süresince dijital bir kamera kullanılarak numune yüzey görüntülerinin video kaydı alınmıştır. 7 adet kiriş ve 5 adet duvar numunesi olmak üzere toplamda 12 adet numunenin yük altındaki yer değiştirme değerleri hem LVDT ile hem de DIC ile elde edilmiştir. 7 adet kiriş numunesinde ise yalnızca DIC ölçümü yapılmıştır. Her iki yöntemle elde edilen yer değiştirme değerleri, video kayıt süresince elde edilen en büyük deplasman değerlerinin ve yer değiştirme-zaman grafiklerinin bir biri ile karşılaştırılması şeklinde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca tüm numunelerin yüzeyinde yükleme sırasında meydana gelen gerilme değişimleri ve çatlak oluşumu görsel olarak analiz edilmiştir. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

- Üç nokta eğilme deneyine tabi tutulan BK numunelerinin LVDT ve DIC ölçümleri ile elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri kıyaslandığında en büyük mutlak fark oranı %3 gibi çok yakın bir değer olarak bulunmuştur. Ayrıca tüm BK numunelerine ait yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde LVDT ve DIC eğrilerinin yüksek oranda birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında DIC yönteminin üç nokta eğilme deneyinde yer değiştirmelerin ölçümünde alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.
- Diyagonal yükleme deneyine tabi tutulan D numunelerinin LVDT ve DIC ölçümleri ile elde edilen maksimum yer değiştirme değerleri kıyaslandığında en büyük mutlak fark oranı %5,39 gibi çok yakın bir değer olarak bulunmuştur. Ayrıca tüm D numunelerine ait yer değiştirme-zaman grafikleri incelendiğinde LVDT ve DIC eğrilerinin yüksek oranda birbiriyle uyum içerisinde olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar dikkate alındığında DIC yönteminin diyagonal yükleme deneyinde yer değiştirmelerin ölçümünde alternatif bir yöntem olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

- BK ve D numunelerinin tamamı için maksimum yer değiştirmelerin LVDT ve DIC ölçümleri arasındaki ortalama mutlak fark oranı BK numunelerinde %1,05, D numunelerinde %2,81 olarak bulunmuştur. D numunelerindeki farkın BK numunelerindeki farktan daha fazla olmasının nedeni, D numunelerinde DIC ölçümünün duvarın ön yüzünden, LVDT ölçümünün ise arka yüzünden gerçekleştirilmesi olarak düşünölmektedir. Diyagonal yükleme sırasında duvar ortasından geçirilen demir milin ön yüzündeki ucunun takip edilmesi ile DIC ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Demir milin duvarın arka yüzündeki ucuna yerleştirilen platformdan ise LVDT ölçümleri alınmıştır. Milin duvarın ön yüzünde ve arka yüzünde az da olsa farklı hareket ettiği düşünölmektedir. Bu farklı hareket sonucunda DIC ve LVDT ölçümleri arasındaki fark kiriş numunelerine oranla nispeten daha fazla bulunmuştur.
- DIC yöntemiyle BK, KK ve D numune yüzey gerilme değişimleri aşamalı olarak görselleştirilmiştir. Numunelerde henüz gözle görölebilir çatlaklar meydana gelmeden önce çatlakların oluşacağı ve yüzeyde gerilme yığılmalarının oluştuğu bölgeler kırmızı renk ile gösterilmiştir. Deneyin devamında numune yüzeylerinde kırmızı renkle işaretlenen bölgelerde gözle görölebilir çatlaklar ve kırılmalar gerçekteşmiştir. Bu da yüzey gerilmelerinin görsel olarak analiz edilmesinde DIC yönteminin etkili ve güvenilir bir yöntem olduğunu göstermektedir.
- KK numunelerinde gerçekleştirilen üç nokta eğilme deneyleri sırasında LVDT aletinin teknik bir arızadan dolayı ölçüm yapmadığı deney sonrasında anlaşılmıştır. Ancak deneyler sırasında kiriş yüzey görüntülerinin video kaydı alınmıştır. Video kayıtlarından KK numunelerinde yük altında meydana gelen yer değiştirmeler ve yer değiştirme-zaman grafikleri DIC yöntemiyle elde edilmiştir. BK ve D numunelerinden LVDT ve DIC ile elde edilen yer değiştirme değerlerinin büyük oranda uyum içerisinde olduğu göz önüne alınarak KK numunelerinin yer değiştirme değerleri başarıyla elde edilmiştir. Tesadüfen de olsa bu çalışma esnasında böyle bir aksaklığın yaşanmasına rağmen DIC yönteminin deney sonrasında bile analize imkân tanınması avantajından yararlanılmıştır.
- Yapılan tüm deneysel çalışmalar sırasında numunelerin yüzey görüntülerinin video kayıtları doğal ışık koşullarında ve standart bir cep telefonu kamerası kullanılarak alınmıştır. LVDT ve DIC ölçümlerinin uyum içerisinde olması ve yüzey gerilmelerinin başarıyla oluşturulması, DIC yöntemiyle bu tarz ölçümlerin

yapılmasında, günümüzde hemen herkeste bulunan standart bir cep telefonu kamerasının kullanılabileceğini ve deney sırasında doğal ışığın yeterli olabileceğini göstermiştir.

6.2. Öneriler

Deney sonuçlarından elde edilen bulgulara ve yapılan literatür araştırmasına göre inşaat mühendisliği laboratuvar uygulamalarında DIC yönteminin kullanımı ile ilgili öneriler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- LVDT ve DIC ile yer değiştirme ölçümleri kıyaslanırken DIC yönteminin sadece görüntü karesi içerisindeki yüzey değişimini temel alarak ölçüm yaptığı unutulmamalıdır. Kıyaslama için LVDT ölçü aletinin DIC analizinde takip edilen noktaya yerleştirilmesine dikkat edilmelidir.
- 2 boyutlu DIC analizlerinde düzlem dışı hareketlerin önlenmesi gerekir. Deney düzeneğinin bu hareketlerin oluşmasına engel olacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Aksi durumda yazılım düzlem dışı hareketi düzlem içi hareketmiş gibi algılayarak yanıltıcı sonuçların oluşmasına neden olur.
- DIC yönteminde ölçümler dijital görüntü içerisindeki pikseller temel alınarak gerçekleştirilir. Dolayısıyla piksellerin metrik kalibrasyonu önem arz etmektedir. Görüntü karesi içerisinde bulunan herhangi iki nokta arasındaki mesafenin deney düzeneğine her yeni numunenin yerleşimi sonrasında ölçülüp not alınması gerekmektedir. Analiz sırasında bu değerlere göre hassas bir kalibrasyon yapılmalıdır. Yine piksellerin kalitesinin korunması açısından video kaydı sırasında ani gölgelenmelerin oluşmasına ve kameranın titremesine neden olabilecek ortam hareketlerine (rüzgâr, insan hareketleri vs.) karşı önlem alınmalıdır.

KAYNAKLAR

- Acikgoz, S., DeJong, M. J., and Soga, K. (2018). Sensing dynamic displacements in masonry rail bridges using 2D digital image correlation. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), e2187.
- Allersma, H. G. (1998). Using imaging technologies in experimental geotechnics. In *Imaging Technologies: Techniques and Applications in Civil Engineering. Second International Conference Engineering Foundation; and Imaging Technologies Committee of the Technical Council on Computer Practices, American Society of Civil Engineers*, 1-9
- Bastawros, A. F. and Voloshin, A. S. (1990). Thermal strain measurements in electronic packages through fractional fringe moiré interferometry. *Journal of Electronic Packaging*, 112(4), 303-308.
- Bilici, S. (2017). Görüntü işleme yöntemi kullanılarak yapısal deformasyonların ölçülmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Programı*, İstanbul.
- Bruck, H. A., McNeil, S. R., Sutton, M. A. and Peters, W. H. (1989). Digital image correlation using newton-raphson method of partial differential correction. *Experimental Mechanics*, 29(3), 261-267.
- Chambon, S., and Moliard, J. M. (2011). Automatic road pavement assessment with image processing: review and comparison. *International Journal of Geophysics*. doi: 10.1155/2011/989354
- Coster, M., and Chermant, J. L. (2001). Image analysis and mathematical morphology for civil engineering materials. *Cement and Concrete Composites*, 23(2-3), 133-151.
- Çankaya, G. (2013). Görüntü işleme teknolojisi ile betonun bazı mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya.
- Çomak, B. (2012). Farklı beton sınıflarının görüntü işleme yöntemi ile mekanik özelliklerinin belirlenmesi, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Isparta.
- Bardak, T., ve Sözen, E. (2018). Yonga levha ve lif levhaların su alma davranışlarının dijital görüntü korelasyon (dgc) yöntemi ile karakterize edilmesi. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 20(3), 525-534.
- Deák, P., and Kowalik, M. (2018). Composite aircraft joint experimental testing with digital image correlation. *13th Research and Education in Aircraft Design Conference*, 13, 150-160

- Destrebecq, J. F., Toussaint, E., and Ferrier, E. (2011). Analysis of cracks and deformations in a full scale reinforced concrete beam using a digital image correlation technique. *Experimental Mechanics*, 51(6), 879-890.
- Diluxshan, A., and Mallikarachchi, H. M. Y. C. (2016). İmage based displacement measuring technique for in-plane loading. *In 7th International Conference on Sustainable Built Environment*. Earl's Regency Hotel, Kandy
- Doğan, G. (2018). Betonarme kolonların deprem sonrası hasar seviyelerinin akıllı sistem tabanlı bir yöntemle belirlenmesi, Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya
- Fan, Z., Wu, Y., Lu, J., and Li, W. (2018). Automatic pavement crack detection based on structured prediction with the convolutional neural network. *arXiv preprint arXiv:1802.02208*.
- Fayyad, T.M., and Lees, J.M. (2014). Application of digital image correlation to reinforced concrete fracture. *Procedia Materials Science*, 3, 1585-1590.
- Fottenburg, W. G. (1969). Some applications of holographic interferometry. *Experimental Mechanics*, 8, 281-285.
- Fujita, I., Muste, M., and Kruger, A. (1998). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of hydraulic Research*, 36(3), 397-414.
- Gerbo, E. J., Thrall, A. P., Smith, B. J., and Zoli, T. P. (2016). Full-field measurement of residual strains in cold bent steel plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 127, 187-203.
- Gong, J., and Caldas, C. H. (2010). Computer vision-based video interpretation model for automated productivity analysis of construction operations. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 24(3), 252-263.
- Gonzalez, R. C., and Woods, R. E., (2018). *Digital image processing* (Fourth Edition), New York: Pearson Education Limited.
- Güneş, E. (2020). Geogrid ve katkılı sıvalar ile yığma yapıların güçlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Hatay.
- Hung, P. C., and Voloshin, A. S. (2003). In-plane strain measurement by digital image correlation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 25(3), 215-221.
- İnternet: Katsaggelos, A. K., Fundamentals of digital image and video processing. *Cipec*. URL: <https://www.coursera.org/learn/digital/home/welcome>, Son Erişim Tarihi: 27.09.2020

- Jahne, B. (2004). *Practical handbook on image processing for scientific and technical applications* (Second Edition), Florida: CRC press LLC.
- Kocaman, S. (2007). Baraj yıkılması probleminin deneysel ve teorik olarak incelenmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Koltsida, I., Tomor, A., and Booth, C. (2013). The use of digital image correlation technique for monitoring masonry arch bridges. In *Proceedings of the 7th international conference on ARCH bridges – ARCH 2013*. Zagreb, Croatia
- Küntz, M., Jolin, M., Bastien, J., Perez, F., and Hild, F. (2006). Digital image correlation analysis of crack behavior in a reinforced concrete beam during a load test. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(11), 1418-1425.
- Lecompte, D., Smits, A. S. H. J. D., Bossuyt, S., Sol, H., Vantomme, J., Van Hemelrijck, D., and Habraken, A. M. (2006). Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation. *Optics and lasers in Engineering*, 44(11), 1132-1145.
- Lee, B. Y., Kim, Y. Y., Yi, S. T., and Kim, J. K. (2013). Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 9(6), 567-577.
- Liu, Y. F., Cho, S., Spencer Jr, B. F., and Fan, J. S. (2016). Concrete crack assessment using digital image processing and 3D scene reconstruction. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 30(1), 04014124.
- McAndrew, A. (2004). An introduction to digital image processing with matlab notes for scm2511 image processing. *School of Computer Science and Mathematics, Victoria University of Technology*, 264(1), 1-264.
- McCormick, N., and Lord, J. (2010). Digital image correlation. *Materials Today*, 13(12), 52-54.
- McCormick, N., & Lord, J. (2012, November). Digital image correlation for structural measurements. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Civil Engineering*, 165(4), 185-190
- Memarzadeh, M., Golparvar-Fard, M., and Niebles, J. C. (2013). Automated 2D detection of construction equipment and workers from site video streams using histograms of oriented gradients and colors. *Automation in Construction*, 32, 24-37.
- Moon, K. H., Falchetto, A. C., and Jeong, J. H. (2014). Microstructural analysis of asphalt mixtures using digital image processing techniques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 41(1), 74-86.
- Mora, C. F., Kwan, A. K. H., and Chan, H. C. (1998). Particle size distribution analysis of coarse aggregate using digital image processing. *Cement and Concrete Research*, 28(6), 921-932.

- Murray, C., Hoag, A., Hoult, N. A., and Take, W. A. (2015, March). Field monitoring of a bridge using digital image correlation. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Bridge Engineering*, 168(1), 3-12.
- Oliveira, H., and Correia, P. L. (2012). Automatic road crack detection and characterization. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 14(1), 155-168.
- Onat, M. (2008). Dijital görüntü işleme yöntemleriyle lifli beton numunelerindeki çatlakların tespit edilmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Elazığ.
- Ozmen-Cagatay, H., and Kocaman, S. (2010). Dam-break flows during initial stage using SWE and RANS approaches. *Journal of Hydraulic Research*, 48(5), 603-611.
- Pérez, J. A., Coppieters, S., and 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.
- Post, D. (1983). Moiré interferometry at VPI and SU. *Experimental Mechanics*, 23(2), 203-210
- Ramos, T., Furtado, A., Eslami, S., Alves, S., Rodrigues, H., Arêde, A., and 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.
- Rimkus, A., Podvieszko, A., and Gribniak, V. (2015). Processing digital images for crack localization in reinforced concrete members. *Procedia Engineering*, 122, 239-243.
- Roncella, R., Scaioni, M., and Forlani, G. (2004). Application of digital photogrammetry in geotechnics. In *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXth ISPRS Congress, Commission, 5*, 93-98.
- Sanal, I. (2018). Understanding global mechanical response of fiber reinforced cementitious composite beams from local fracture process. *Structural Control and Health Monitoring*, 25(8), e2202.
- Santos, A. H. A., Pitangueira, R. L. S., Ribeiro, G. O., and Carrasco, E. V. M. (2016). Concrete modulus of elasticity assessment using digital image correlation. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9(4), 587-594.
- Seo, J., Han, S., Lee, S., and Kim, H. (2015). Computer vision techniques for construction safety and health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*, 29(2), 239-251.
- Soyalan, F. (2020). Makro sentetik fiber lif kullanımının betonarme kirişlerin davranışı üzerindeki etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Hatay.

- Sutton, M. A., Wolters, W. J., Peters, W. H., Ranson, W. F. and McNeil, S. R. (1983). Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and Vision Computing*, 1(3), 133-139.
- Sutton, M. A., Cheng, M. Q., Peters, W. H., Chao Y. J. and McNeill, S. R. (1986). Application of an optimized digital correlation method to planar deformation analysis. *Image and Vision Computing*, 4(3), 143-151.
- Sutton, M. A., McNeill, S. R., Jang, J. and Babai, M. (1988). Effects of subpixel image restoration on digital correlation error. *Journal of Optical Engineering*, 27(10), 870-877
- Sutton, M. A., Turner, J. L., Bruck, H. A. and Chae, T. A. (1991). Full-field representation of discretely sampled surface deformation for displacement and strain analysis. *Experimental Mechanics*, 31(2), 168-177.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J., and Schreier, H. (2009). *Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications*. New York: Springer Science & Business Media
- Wang, H., Chang, L., and Markine, V. (2018). Structural health monitoring of railway transition zones using satellite radar data. *Sensors*, 18(2), 413.
- Wang, Y. Y., Chen, D. J. and Chiang, F. P. (1993). Material testing by computer aided speckle interferometry. *Experimental Techniques*, 17(5), 30-32.
- Yang, J., Vela, P., Teizer, J., and Shi, Z. (2014). Vision-based tower crane tracking for understanding construction activity. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 28(1), 103-112.
- Yıldırım, T., Felekoğlu, K. T., Gödek, E., Keskinateş, M., Felekoğlu, B., ve Önal, O. (2019). Çimento esaslı lifli kompozitlerin dijital görüntü korelasyonu yöntemi ile çoklu çatlak davranışının incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34(1), 479-493.
- Yoneyama, S., Kitagawa, A., Iwata, S., Tani, K., and Kikuta, H. (2007). Bridge deflection measurement using digital image correlation. *Experimental Techniques*, 31(1), 34-40.
- Yue, Z. Q., Chen, S., and Tham, L. G. (2003). Finite element modeling of geomaterials using digital image processing. *Computers and Geotechnics*, 30(5), 375-397.
- Zeilew, H. M., Papagiannakis, A. T., and Masad, E. (2008). Application of digital image processing techniques for asphalt concrete mixture images. *In The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, 119-124.
- Zou, J., and Kim, H. (2007). Using hue, saturation, and value color space for hydraulic excavator idle time analysis. *Journal Of Computing In Civil Engineering*, 21(4), 238-246

DİZİN

A

Agrega · 4, 36, 39, 42
Analog · 19, 20, 21

B

Basınç · 6, 7, 35
Betonarme · 3, 4, 6, 7, 9, 12, 35
Bit · 22, 23, 24, 25

C

CCD · 4, 6, 8, 10, 12, 14, 30
CMOS · 5, 9, 30

Ç

Çekme · 5, 8, 11, 13, 35
Çelik · 5, 6, 7, 8, 10, 35, 37, 38,
41, 43
Çatlak · 3, 4, 6, 7, 12, 13, 78, 79

D

Deformasyon · 6, 11, 12, 13, 26,
28, 31, 33
DIC · 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 14, 28, 29, 30, 31, 32,
34, 36, 37, 38, 40, 41, 47, 48,
78, 79, 80
Diyagonal · 43, 44, 75, 76
Duvar · 3, 8, 9, 33, 42, 43, 44, 45,
46, 47, 75, 76

E

Eğilme · 5, 6, 8, 13, 36, 40, 78,
79

F

Fotoğraf · 1, 13, 15, 16, 18, 19,
20, 21, 22
Fps · 30, 34

G

Gerilme · 2, 3, 5, 9, 10, 11, 12,
28, 33, 35, 38, 39, 41, 46, 58,
78, 79,
Görüntü İşleme · 1, 4, 5, 12, 15,
16, 23, 25, 26, 27, 28

K

Kamera · 2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12, 13, 14, 16, 19, 30, 31,
32, 41, 44, 78, 79, 80
Kırılma · 2, 7,
Kiriş · 3, 4, 5, 6, 7, 8, 13, 33, 34,
35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44,
78, 79

L

Laboratuvar · 3, 6, 7, 11, 13, 78,
80
Lif · 5, 12, 13, 35, 36, 39, 40

LVDT · 3, 7, 10, 12, 13, 33, 36,
38, 40, 44, 46, 47, 48, 78, 79,
80

M

Malzeme · 2, 13, 30, 33, 35, 36,
40, 4

P

Piksel · 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
12, 13, 14, 21, 22, 23, 25, 37,
41, 45, 80

R

Renk Modeli · 23,24,25
RGB · 24, 25

S

Sinyal · 20, 21
Spektrum · 18,

Y

Yer Değiştirme · 2, 3, 4, 5, 6, 7,
9, 10, 11, 12, 13, 28, 33, 35,
36, 37, 38, 40, 41, 43, 44, 47,
48, 78, 79, 80
Yükleme · 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,
10, 11, 12, 13, 33,34, 35, 36, 37,
40, 41, 43, 44, 45, 46, 78, 79



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

