

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

DİNAMİK GÖRÜNTÜLERDE MİKRO DEĞİŞİMLERİN GERÇEK ZAMANLI
ÖLÇÜLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve KESİM

HAZİRAN 2015
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İSTATİSTİK VE BİLGİSAYAR BİLİMLERİ ANABİLİM DALI

**DİNAMİK GÖRÜNTÜLERDE MİKRO DEĞİŞİMLERİN GERÇEK ZAMANLI
ÖLÇÜLMESİ**

Merve KESİM

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"YÜKSEK LİSANS (İSTATİSTİK)"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 08/05/2015
Tezin Savunma Tarihi : 12/06/2015**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN

Trabzon 2015

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalında
Merve KESİM tarafından hazırlanan

DİNAMİK GÖRÜNTÜLERDE MİKRO DEĞİŞİMLERİN GERÇEK ZAMANLI
ÖLÇÜLMESİ

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun 12 / 06 / 2015 gün ve 1604 sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof.Dr. Tahir HANALIOĞLU

Üye : Yrd.Doç.Dr. Halil İbrahim ŞAHİN

Üye : Yrd.Doç.Dr. Orhan KESEMEN

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

“Dinamik Görüntülerde Mikro Değişimlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi” isimli bu tez, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Programı’nda hazırlanmıştır.

Başta böyle bir çalışma önerisinde bulunup, tez çalışması süresince mekân ve zaman gözetmeksizin hiçbir yardımını esirgemeyerek büyük bir sabırla verdiği destek ve moral için değerli hocam ve tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN’e, bugünlere gelmemde emeği geçen tüm öğretmenlerime ve lisans eğitimimden bu yana her türlü bilgiyi ve eğitimi vererek desteklerini esirgemeyen bölüm hocalarıma ayrıca tez çalışması süresinde hiçbir yardımdan kaçınmayan arkadaşlarım Özge TEZEL, Buğra Kaan TİRYAKİ, Eda ÖZKUL ve Said AGAHİAN’a çok teşekkür ederim.

Ayrıca gerek tez süresince gerek diğer tüm sıkıntılarında hiçbir desteklerini esirgemeyen ve yanımda duran arkadaşlarım Tuğçe YAZICI, Ayşegül COŞKUN, Burak FURUNCU ve Mehmet ÜLGER’e teşekkürü bir borç bilirim.

Hayatım boyunca verdiğim her kararda arkamda duran, her türlü maddi manevi desteklerini koşulsuz ve sürekli hissettiğim tüm aile fertlerime sonsuz teşekkür ederim. Saygılarımla...

Merve KESİM

Trabzon 2015

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dinamik Görüntülerde Mikro Değişimlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.
08/05/2015

Merve KESİM

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
SEMBOLLER DİZİNİ	XIV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Malzeme	1
1.1.1. Malzeme Bilimi	2
1.1.2. Malzemelerin Şekil Değişirmesi	3
1.1.3. Malzemelerin Deformasyonu	3
1.1.4. Malzeme Kusurları	4
1.2. Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Ölçülmesi	5
1.2.1. Çekme Deneyi	6
1.2.1.1. Deneyin Yapılışı	6
1.2.2. Çekme Deneyi İçin Kullanılacak Tanımlamalar	7
1.2.2.1. Gerilme	8
1.2.2.2. Gerinme (Birim Şekil Değişirme)	8
1.2.2.3. Gerçek Şekil Değişirme.....	8
1.2.2.4. Elastisite Modülü.....	9
1.2.2.5. Orantı Sınırı	10
1.2.2.6. Elastiklik Sınırı	10
1.2.2.7. Akma Dayanımı.....	11
1.2.2.8. Çekme Dayanımı	11
1.2.2.9. Kopma Uzaması.....	11

1.2.2.10.	Kopma Büzülmesi	12
1.2.2.11.	Rezilyans.....	12
1.2.2.12.	Tokluk.....	13
1.3.	Malzemelerin Uzamalarının Ölçümü	13
1.3.1.	Dolaylı Ölçüm	13
1.3.2.	Doğrudan Ölçüm	13
1.4.	Malzeme Ölçüm Araçları	14
1.4.1.	Pistonlu Hareket Makinesi.....	14
1.4.2.	Gerinim Ölçer	14
1.4.3.	Ekstansometre (Uzanim-Ölçer)	15
1.5.	Fiziksel Değişim Ölçü Araçları	15
1.5.1.	Numune Üzerine Tutturulan (Temaslı) Ekstansometreler.....	15
1.5.2.	Temassız Ekstansometreler	16
1.5.2.1.	Lazer Ekstansometreler	16
1.5.2.2.	Optik Ekstansometreler	17
1.5.2.3.	Video Ekstansometreler.....	17
1.6.	Sayısal Görüntüler	19
1.6.1.	Sayısal Görüntü işleme	20
1.6.1.1.	Noktasal İşlemler	20
1.6.1.2.	Alansal İşlemler	21
1.6.1.3.	Konumsal Dönüşümler	21
1.6.1.4.	Katmansal İşlemler	21
1.6.1.5.	Toplamsal Dönüşümler.....	22
1.7.	Sayısal Videolar.....	22
1.7.1.	Sayısal Video İşleme	23
1.7.2.	Sayısal Videolarda Hareket Analizi.....	24
1.7.2.1.	Korelasyon Yöntemi	25
1.7.2.2.	Olasılık Yöntemi.....	27
1.7.2.3.	Fourier Dönüşümü Yöntemi	28
1.7.3.	Sayısal Görüntü Korelasyonu(DIC)	28
1.8.	Alt Gözekler.....	29
1.9.	Regresyon Analizi	30
1.9.1.	Regresyon Kavramı ve Amaçları.....	31
1.9.2.	Doğrusal Regresyon.....	32

1.10.	Bulanık C-Ortalamalar Kümeleme Algoritması.....	32
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	36
2.1.	Video Tabanlı Şekil Değişirme Ölçümü	36
2.1.1.	Şeritli Numunede Uzama Ölçümü.....	36
2.1.1.1.	Eşikleme ile Sınır Tespiti.....	38
2.1.1.2.	İç Kestirim ile Sınır Tespiti	40
2.1.1.3.	Kümeleme ile Sınır Tespiti.....	42
2.1.1.4.	Oynaklığın Giderilmesi	44
2.1.2.	Izgaralı Numunede Şekil Değişirme Ölçümü.....	45
2.2.	Örnek Deneyler.....	48
2.2.1.	Şeritli Numune İçin Uygulama Deneyi	50
2.3.	Izgaralı Numune İçin Uygulama Örneği	53
3.	BULGULAR VE SONUÇLAR.....	59
4.	ÖNERİLER.....	60
5.	KAYNAKLAR	61

ÖZGEÇMİŞ

Yüksek Lisans

ÖZET

DİNAMİK GÖRÜNTÜLERDE MİKRO DEĞİŞİMLERİN GERÇEK ZAMANLI
ÖLÇÜLMESİ

Merve KESİM

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Orhan KESEMEN
2015, 63 Sayfa

Video işleminin konularından biri olan hareket analizi bir video üzerindeki bir nesnenin ya da bir gözeğin hangi yönde ne kadar hareket ettiğinin tespiti için kullanılır. Hareket analizi sırasında bazen gözekler bir gözeğin kapladığı alandan daha az hareket edebilirler. Böyle durumlarda hareketlerin mikro düzeyde algılanması gerekmektedir. Bunun içinde gözeklerin alt gözek adı verilen ondallıklı değerlerinin tespit edilmesi ve bu alt gözeklerde gerçekleşen hareketin algılanması gerekmektedir.

Hareket analizinin kullanıldığı alanlardan biri de malzeme bilimleridir. Malzeme bilimi, biyomedikal, otomotiv, endüstriyel alanda kısaca hayatımızın her alanında büyük önem taşır. Kullandığımız her nesnenin içeriğinde kullanılan malzemenin güvenilirliği, sağlamlığı ve kullanılabilirliğini artırmak için malzeme biliminde oldukça geniş teknikler bulunmaktadır. Bu tekniklerden biri de çekme deneyidir. Çekme deneyi malzemenin gerilmesi ve kopması gibi malzemenin genel karakteristiklerinin çıkarımını sağlar. Genellikle deney videolarının üzerinde uygulanan hareket analizi alt gözeklerin bulunmasıyla yapılmaktadır. Bu işlemde genel olarak iç kestirim (interpolasyon) yöntemi kullanılır.

Bu çalışmada, çekme deneyi sırasında gerçek zamanlı alınan video görüntülerindeki alt gözeklerin üzerinde gerçekleşen mikro değişimlerin uyarlamalı doğrusal regresyon yardımıyla algılanması gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Video İşleme, Hareket Analizi, Çekme Deneyi, Alt Gözek, Uyarlamalı Doğrusal Regresyon.

Master Thesis

SUMMARY

REAL TIME MEASUREMENT OF MICRO CHANGES IN DINAMIC IMAGES

Merve KESİM

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Statistical and Computer Science Graduate Program
Supervisor: Assist. Prof. Dr. Orhan KESEMEN
2015, 63 Pages

A motion analysis which is the topics on video processing, is used for determining an object or a pixel move which direction and how far. During the motion analysis, the pixels sometimes can move less than area of a pixel. In these situations motions should be perceived at micro level. For this, pixels' decimal values which called subpixels must be determined and the motion must be detected in these sub-pixels.

Materials science is one of the areas that is used to motion analysis. Material science has great importance in every area for our life such as biomedical, automotive, industry. There are substantial techniques to increase reliability, robustness and practicableness of in the content of each using object in material science. Tensile test is one of these techniques. Tensile test make an inference about general characteristics of material such as stress and elongation at break. Generally, motion analysis which is used on test videos is performed finding of subpixels. In this process, generally interpolation method is used.

In this study, the micro level changes that are performed on subpixel taken real time videos' images during the tensile test determine using adaptive linear regression.

Key Words: Video Processing, Motion Analysis, Tensile Test, Subpixel, Adaptive Linear Regression.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Gerilmesi için yük uygulanmış malzemedeki elastik deformasyon	3
Şekil 2. Gerilmesi için yük uygulanmış malzemedeki plastik deformasyon	4
Şekil 3. Gevrek ve sünek malzemelerin kırılma davranışları; (a) gevrek malzemenin kırılması; (b) sünek malzemenin kırılması.....	4
Şekil 4. Numune ölçüleri	6
Şekil 5. Gerilme-uzama eğrisi.....	10
Şekil 6. Lazer ekstansometre ölçüm cihazı.....	16
Şekil 7. Optik Ekstansometre ölçüm cihazı (Aydemir, 2011)	17
Şekil 8. Video ekstansometre ölçüm cihazı	18
Şekil 9. Sayısal görüntü renkli gözeklerin gösterimi	19
Şekil 10. Noktasal işlemler	20
Şekil 11. Alansal işlemler	21
Şekil 12. Konumsal işlemler	21
Şekil 13. Katmansal işlemler	22
Şekil 14. Toplamsal İşlemler	22
Şekil 15. Görüntü ve videoların boyutları.....	23
Şekil 16. 4 gözekli görüntüdeki 2 numaralı gözeğin alt gözeklerinin gösterimi	30
Şekil 17. Bulanık c-ortalama algoritmasıyla üç kümeye ayrılan veri.....	35
Şekil 18. Şeritli lastik numune	37
Şekil 19. Şerit sınırlarının belirlenmesi; (a) Siyahtan-beyaza geçiş; (b) beyazdan siyaha geçiş.....	37
Şekil 20. Şeritli video görüntüsündeki genişlik yönündeki ortalama değerler; (a) Başlangıç video görüntüsü; (b) Video görüntüsündeki gözeklerin genişlik yönünde ortalama değerleri.	38
Şekil 21. Ortalama grafiğinin eşiklenmesi; (a) Eşik değeri ($T = 0.5$) olan eşikleme; (b) Eşik değeri ($T = 0.535$) olan eşikleme.	39
Şekil 22. Şerit sınırlarının belirlenmesi; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları	40

Şekil 23.	İç kesitirim ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.	41
Şekil 24.	İç kestirim ile belirlenen sınır noktaları; (a) Siyahtan-beyaza geçiş için belirlenen ilk sınırın konumu; (b) Siyahtan-beyaza geçiş için belirlenen üçüncü sınırın konumu	41
Şekil 25.	Bulanık kümeleme ile üyelik değerlerinin belirlenmesi.	42
Şekil 26.	Bulanık kümeleme ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.	43
Şekil 27.	Bulanık kümeleme ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.	43
Şekil 28.	Kirlenmiş lastik numune	45
Şekil 29.	Başlangıç ölçü konumları.....	46
Şekil 30.	Uyarlamalı doğrusal regresyon ile sınır değerlerinin tespiti; (a) İlk olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (b) ikinci olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (c) Üçüncü olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (d) Dördüncü olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu.....	48
Şekil 31.	Ölçüm için kullanılan çekme makinesi.....	49
Şekil 32.	Ölçüm için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera	49
Şekil 33.	Seçilen örneğin başlangıç durumu.....	50
Şekil 34.	Seçilen örneğin 18. çerçevedeki durumu.....	50
Şekil 35.	Seçilen örneğin 100. çerçevedeki durumu.....	50
Şekil 36.	Seçilen örneğin 200. çerçevedeki durumu.....	51
Şekil 37.	Seçilen örneğin 400. çerçevedeki durumu.....	51
Şekil 38.	Seçilen örneğin 600. çerçevedeki durumu.....	51
Şekil 39.	Seçilen örneğin 636. çerçevedeki durumu.....	51
Şekil 40.	Örnek numunedeki şeritlerin konum değişimleri.	52
Şekil 41.	Numunedeki 1. şerit ile 2. şerit arasındaki uzama miktarı	53
Şekil 42.	Çekme deneyinde 1. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	54
Şekil 43.	Çekme deneyinde 23. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	54
Şekil 44.	Çekme deneyinde 100. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	54
Şekil 45.	Çekme deneyinde 200. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	54
Şekil 46.	Çekme deneyinde 219. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	55

Şekil 47.	Çekme deneyinde 454. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	55
Şekil 48.	Çekme deneyinde 458. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	55
Şekil 49.	Çekme deneyinde 460. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü.....	55
Şekil 50.	A doğrultusundaki X ölçü konumları.....	56
Şekil 51.	B doğrultusundaki X ölçü konumları.....	56
Şekil 52.	A doğrultusundaki Y ölçü konumları.....	57
Şekil 53.	B doğrultusundaki Y ölçü konumları.....	57

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. İç kestirim yöntemiyle hassas sınır tespiti	40
Tablo 2. Üyelik değerlerinin kesişimi ile hassas sınır tespiti.....	44
Tablo 3. Şeritlerin siyahtan-beyaza geçiş konumları	52
Tablo 4. Ondalıklı X ölçü değerleri.....	58
Tablo 5. Ondalıklı Y ölçü değerleri.....	58

SEMBOLLER DİZİNİ

L_0	:	Numuneni başlangıç boyu
L	:	Güncel boy
L_k	:	Kopmadan önceki son boy
δL	:	Uzamadaki değişim
A_0	:	Başlangıçtaki kesit alanı
A_k	:	Kopmadan önceki kesit alanı
P	:	Uygulanan çekme kuvveti
σ	:	Gerilme
e	:	Gerinme
ε	:	Gerçek şekil değiştirme
E	:	Elastisite modülü
σ_a	:	Akma dayanımı
σ_ζ	:	Çekme dayanımı
$KU(\%)$:	Yüzde kopma uzaması
$KB(\%)$:	Yüzde kopma büzülmesi
U_R	:	Rezilyans
T	:	Eşik değeri
DIC	:	Sayısal Görüntü Korelasyonu

1. GENEL BİLGİLER

Son zamanlarda büyük gelişmeler gösteren bilişim teknolojileri hayatın birçok noktasında kolaylıklar getirmiştir. Sayısal kameraların gelişmesiyle birlikte hareketli görüntüler gerçek zamanlı bir şekilde incelenmeye başlandı. Uygulama alanları giderek genişleyen sayısal kameralar, ev ve iş güvenliği; insansız hava uçakları ile sınır denetimi; trafikte hız ve ışık kurallarının denetlenmesi; bitki ve hayvanların gelişiminin doğada gerçek zamanlı incelenmesi; sürücüsüz araçların kullanımı; otomasyon sistemlerinde aksaklıkların giderilmesi; sanayi üretiminde hata oranı düşük ürün üretilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Gelecek yıllarda bu uygulama alanlarının giderek artacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada, malzemelerin (demir, çelik, alüminyum, beton, plastik, kauçuk, elyaf, sünger, tuğla, sunta, ağaç, kâğıt, karton gibi) fiziksel özelliklerini ölçmek için kullanılan çekme, eğme ve sıkıştırma gibi deneylerde, mikro değişimlerin ölçülmesi için video işleme teknikleri üzerinde durulmuştur.

Günümüzde, yapılaşmadan sanayiye birçok alanda değişik malzemeler kullanılmaktadır. Yollar, köprüler, binalar, barajlar, fabrikalar gibi yapılarda; aletler, otomobiller, uçaklar, tanklar gibi makinelerde daha sağlam, daha esnek, daha dayanıklı birçok yeni malzeme türü ortaya çıkmaktadır. Kullanılan bu malzemeler ya yeni ortaya çıkmakta ya da malzemelerin fiziksel özellikleri iyileştirilmektedir. Geliştirilen bu malzemelerin değişik koşullardaki dayanımlarının ölçülmesi için yapılan deneyler malzemenin kalitesini ortaya koymaktadır.

1.1. Malzeme

Genel olarak her alanda kullanılacak doğal ya da yapay olarak üretilmiş maddelere malzeme denir. Malzemeler çeşitli bağlarla birbirine bağlanmış atomlardan oluşmaktadır. Malzemelerin yapısal özelliklerini bu atomların özellikleri (dizilişi, aralarındaki bağ çeşidi vb.) belirler. Malzemeler içyapılarına göre 4 ana grupta sınıflandırılmışlardır (URL-1, 2015; Savaşkan, 1999).

1. Metalik Malzemeler: Üretim sanayisinde oldukça sık kullanılan metaller ve bu metallerin diğer elementlerle (metal, ametal) homojen olarak karıştırılarak elde

edilen alaşımlarından oluşmaktadır. Bakır, demir gibi metallerle çelik, pirinç, gibi alaşımlar bu gruba örnek gösterilebilir.

2. Seramik-Cam Malzemeler: Bir veya birden fazla metalin, metal olmayan elementlerle oluşturdukları inorganik bileşiklerdir. Cam, tuğla porselen gibi malzemeler bu gruba örnek gösterilebilir.
3. Organik Malzemeler: Karbonun metal olmayan elementlerle oluşturduğu büyük moleküllü organik bileşiklerdir. Yapay organik malzeme ve doğal organik malzeme olmak üzere iki gruba ayrılırlar. Doğal organik malzemelere örnek olarak ağaç, deri verilebilirken, genelde plastik olarak adlandırılan yapay organik malzemelere poliester, polivinilklorür (PVC) ve teflon örnek gösterilebilir.
4. Karma veya Kompozit Malzemeler: Yukarıda anlatılan üç ana grubun çok farklı olan özelliklerini bir ölçüde tek malzemede toplamak amacıyla aynı veya değişik gruptan malzemelerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir. Örnek olarak betonarme (beton+çelik), sert metaller (metal + seramik) verilebilir.

Bu sınıfların yanı sıra yarı-iletkenler, bio-malzemeler, yumuşak materyaller (sıvı kristaller, kolloidler), akıllı malzemeler, elektrokromik malzemeler, nano malzemeler gibi malzeme sınıfları da bulunmaktadır (URL-1, 2015).

1.1.1. Malzeme Bilimi

Malzeme bilimi, malzemelerin genel yapısını, mukavemetini, atomik yapılarını, üretim biçimlerini inceleyen bilim dalıdır. Büyük ölçüde katı hal fiziğine (katı cisimlerin atom yapısını inceleyen bilim, metal veya malzeme fiziği olarak da adlandırılır) dayanır ve bu bilim dalıyla çeşitli mühendislik alanları arasında bir köprü oluşturur (Savaşkan, 1999).

Gelişen teknoloji, yeni maddelerin üretilmesi ve maddelerin iyileştirilmesiyle birlikte malzemelerin kullanılmasında değişimler olmaktadır. Yani bir malzemenin yerini diğer bir malzeme alabilmektedir. Malzemelerin iyileştirilmesi, malzemenin dayanıklılığını ve güvenilirliğini arttırmakla sağlanmaktadır. Bunun için malzeme kusurlarının ve malzeme üzerinde uygulanacak testlerle malzeme kullanımı sırasında oluşabilecek deformasyonunun azaltılması gerekmektedir.

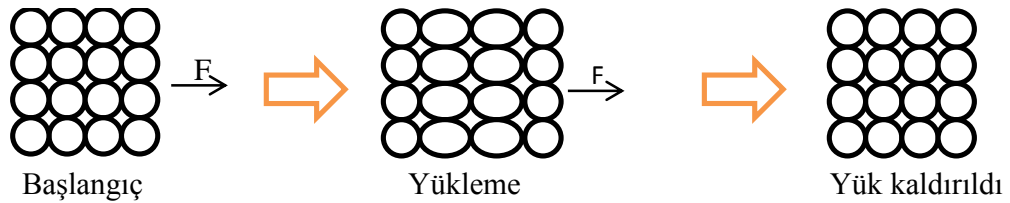
1.1.2. Malzemelerin Şekil Değiştirilmesi

Malzemelere dış kuvvetlerin ya da çeşitli fiziksel ve kimyasal etkilerin uygulanması sebebiyle malzemenin üzerinde boyut ve açısal olarak meydana gelen fiziksel değişimlerdir. Şekil değiştirme yapı mühendisliği bakımından çok önemli bir kavramdır.

1.1.3. Malzemelerin Deformasyonu

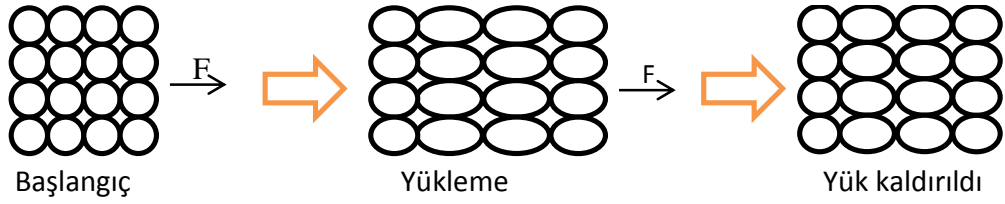
Malzemeler maruz kaldığı gerilim sonucunda şekil değiştirirler. Bu şekil değiştirmelere malzemelerin deformasyonu adı verilir. Verilen kuvvetin büyüklüğüne göre iki tür deformasyon bulunmaktadır (Savaşkan, 1999).

1. Elastik Deformasyon: Uygulanan küçük bir kuvvet sona erdikten sonra malzeme ilk şekline geri dönüyorsa bu şekil değişimine elastik deformasyon denir. Bu şekil değiştirme malzemenin atomları arasında herhangi bir bağın hasar görmesine veya kopmasına neden olmaz. Sadece atomlar arasındaki mesafenin bir miktar değişimine neden olmaktadır. Kuvvet ortadan kalktığında aralarındaki mesafe tekrar aynı seviyeye gelmektedir.



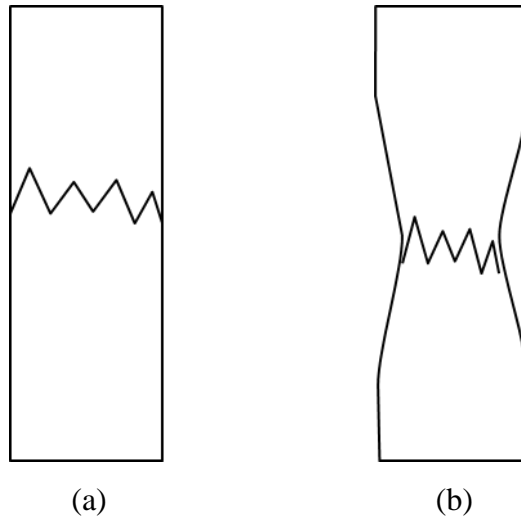
Şekil 1. Gerilmesi için yük uygulanmış malzemedeki elastik deformasyon

2. Plastik Deformasyon: Uygulanan kuvvet sonucunda malzeme üzerinde meydana gelen kalıcı şekil değişimine plastik deformasyon denir. Atomlar arasındaki bağların geri dönüşü olmayacak şekilde hasar görmesine neden olur.



Şekil 2. Gerilmesi için yük uygulanmış malzemedeki plastik deformasyon

Yüksek kuvvet uygulandığında plastik şekil değiştirmeye elverişli olmayan (plastik deformasyon göstermeden kırılan veya kopan) malzemeye gevrek malzeme, plastik şekil değiştirmeye elverişli olan malzemeye ise sünek malzeme denir. Sünek malzemeler kuvvet altında kopmadan önce büzülürler. Fakat gevrek malzemelerde böyle bir büzülme söz konusu değildir (Savaşkan, 1999).



Şekil 3. Gevrek ve sünek malzemelerin kırılma davranışları; (a) gevrek malzemenin kırılması; (b) sünek malzemenin kırılması

1.1.4. Malzeme Kusurları

Malzemelerin her bir içyapısında büyük ya da küçük kusurlara sahiptir. Atomların arasında bulunan bu kusurlara yapı kusurları adı verilir. Çeşitli kuvvetlerin etkisiyle malzemede meydana gelen kırılma, kopma gibi sonuçlarda genellikle malzeme üzerinde bulunan bu malzeme kusurları etkilidir. Kusurlar malzemelerin o noktada dayanıklılık gösterememesine ve kopmasına neden olurlar.

Malzeme kusurlarının aşağıdaki çeşitleri bulunmaktadır (Savaşkan, 1999).

1. Noktasal Kusurlar: Boyutsuz kusurlardır. Malzemenin atomları arasında boş atom yerinin olması, ya da fazla atom olması gibi kusurlar bunlara örnek verilebilir.
2. Çizgisel Kusurlar: Bir boyutlu kusurlardır. Malzemenin yapısının iki bölümü arasında yapı düzeni bozulmuş bir bölge bu kusurlara örnek gösterilebilir.
3. Yüzeysel Kusurlar: İki boyutlu kusurlardır. Aynı yapıya sahip fakat farklı yönlere yönelmiş bölgelerden oluşan kusurlar bu kusurlara örnek gösterilebilir.
4. Hacimsel kusurlar: Üç boyutlu kusurlardır. Malzemelerde yaygın olarak görülürler. Genellikle malzemenin üretilmesi ve şekillendirilmesi sırasında meydana gelirler. Malzeme üretilirken malzeme yapısında bulunmaması gereken farklı türden bir maddenin malzemeye katılması bu kusurlara örnek olarak verilebilir.

1.2. Malzemenin Mekanik Özelliklerinin Ölçülmesi

Malzeme bilimi, her geçen gün daha da önemli hale gelen disiplinler arası bir bilim dalıdır. Günümüzde her alanda kullandığımız malzemelerin, güvenilirliğini, kullanılabilirliğini, sağlamlığını arttırmak giderek önem kazanmaktadır. Malzemelerin bu özellikleri kazanabilmesi için de malzemelerin mekanik özelliklerinin ayrıntılı ölçümünün yapılması gerekmektedir. Bu ölçümler malzemenin hangi koşullara ne kadar dayanabileceği, malzemenin ne tür şekiller alabileceği konusunda bilgiler verir. Mekanik biliminin bir alt kolu olan malzemelerin mekanik özelliklerini inceleyen bilim dalına da mukavemet bilimi denir. Mukavemet bilimi, malzemelere uygulanan dış etkiler nedeniyle malzemede oluşacak sonuçları, malzemenin göstereceği davranışları inceler. Mukavemet bilimi;

1. Çekme/Basma
2. Sertlik
3. Darbe
4. Kırılma
5. Yorulma
6. Sürünme

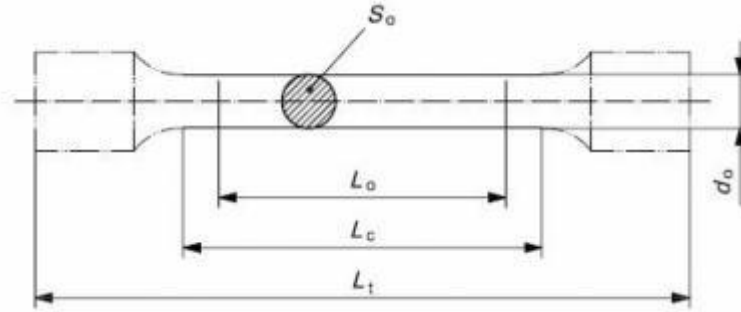
gibi konuları incelemektedir. Bu konuların her birinin çeşitli malzemeler üzerinde incelenmesi, malzeme yapısının bilinmesi ve sınıflandırılması için büyük önem taşır (URL-6, 2015).

1.2.1. Çekme Deneyi

Malzemelerin kuvvet ve şekil değiştirme yönünden dayanıklılığını ölçen en basit test çekme deneyidir. Çekme deneyinde malzemenin bir kesiti çekme cihazına bağlanır ve uçlarından artan bir kuvvete bağlı kalarak kesit kopana kadar çekilir. Çekme deneyinin amacı; malzemelerin kuvvet altında elastik ve plastik özelliklerinin çıkarımını yapmaktır. Yapılan bu çıkarımlar sonucunda malzemelerin sınıflandırılması da yapılabilmektedir.

1.2.1.1. Deneyin Yapılışı

Çekme deneyi sırasında kullanılacak materyalin hazırlanması için belli standartlar bulunmaktadır. Türk standartlarında TS 138 A, B, C, D, E ve F olmak üzere altı numune tipi bulunur. Numune tipi büyük ölçüde malzemenin biçimine göre seçilir. Çalışmada kullanılan TS 138 A numune tipi Şekil 4’de verilmektedir (Savaşkan, 1999).



Şekil 4. Numune ölçüleri

Burada d_0 numunenin çapını; L_0 ölçü uzunluğunu; L_c inceltmiş kısmın uzunluğunu; L_t numunenin toplam uzunluğunu göstermektedir.

Hazırlanan materyal, çekme deneyini yapacak olan makinenin çenelerine yerleştirilir ve materyal çenelere sıkıştırılır. Deney sırasında materyali çekmek için çenelerden biri hareket ettirilerek materyale artan kuvvet uygulanır. Materyal kopana kadar

çekme işlemine devam edilir. Kopma anına kadar hem kuvvet hem de uzama miktarı kayıt edilir. Aynı zamanda materyalin önünde bulunan yüksek çözünürlüklü kamera sayesinde materyalin üzerindeki değişim bilgisayara gerçek zamanlı olarak aktarılır (URL-7, 2015).

Çekme deneyi sırasında önce düşük kuvvetle başlanır. Zaman içinde kuvvet giderek artırılır. Düşük kuvvet seviyelerinde malzemenin uzaması kuvvetle doğru orantılı olarak artmaktadır. Bu zaman diliminde malzeme elastik bir davranış gösterir. Diğer bir deyişle kuvvet kaldırıldığında malzeme eski uzunluğuna geri döner. Bu uzama miktarı bir σ_a noktasına kadar devam eder. Doğrusal olarak değişen gerilme-uzama değişimi bu noktadan sonra doğrusal olmayan bir eğriye dönüşür. Ancak elastik davranış devam eder fakat bu noktada plastik davranışta başlar. Daha sonra kuvvet kaldırıldığında deformasyon belli bir oranda kalıcı olur. σ_a noktasında malzeme plastik davranış ile birlikte akmaya başlar. Akan malzeme sertleşmeye başlar. Buna deformasyon sertleşmesi denir. Bu akma süresince kuvvet artırılırsa en yüksek gerilme noktasına (σ_{max}) ulaşılır. Bu noktada malzemenin bazı bölgelerinde daralmalar oluşmaya başlar. Bu duruma malzemenin boyun vermesi denir. Boyun verme de malzemenin deformasyon sertleşmesine uğramasına sebep olur ve malzeme daha fazla gerilimler alabilir; ancak boyun bölgesinde kesit alanı daraldığından taşıyabileceği net kuvvet azalır. Numune genellikle kontrolsüz bir şekilde K noktasına ulaşır ve kopar. Kuvvet-uzama eğrisinin altında kalan alan o numuneyi bozunuma uğratmak için gereken enerjiye eşit olup; tokluk adı verilir. Kuvvet-uzama eğrisi daha sonra yeniden ölçeklendirilir. Uzamalar malzemenin ilk uzunluğuna bölünerek birim-uzamaya çevrilir. Aynı şekilde kuvvet numunenin ilk kesit alanına bölünerek gerilme hesaplanır ve dikey eksen tekrar ölçeklendirilir. Malzeme kopana kadar önemli miktarda deformasyona uğradıysa *sünek*, az deforme olmuşsa *gevrek* yapıya sahip olduğu söylenir (Askeland ve Phulé, 2006; Beer vd., 1992)

Çekme deneyi sonucunda malzemenin orantı sınırı, elastiklik sınırı, akma sınırı ve çekme dayanımı gibi mukavemet değerleri ile kopma uzaması, kopma büzülmesi, tokluk ve süneklik değerleri belirlenir.

1.2.2. Çekme Deneyi İçin Kullanılacak Tanımlamalar

Konunun daha iyi anlaşılması her şeyden önce terimlerin doğru anlaşılmasıyla mümkündür. Çekme deneyi ile ilgili tanımlamalar alt bölümlerde verilmiştir.

1.2.2.1. Gerilme

Kesitin birim alanına uygulanan kuvvettir. σ sembolü ile ifade edilir (URL-11, 2015; URL-3, 2015).

$$\sigma = \frac{P}{A_0}, (N/mm^2) \quad (1)$$

Burada P değeri uygulanan çekme kuvvetini (yükünü) A_0 değeri de başlangıçtaki kesit alanı olarak tanımlanır.

1.2.2.2. Gerinme (Birim Şekil Değişirme)

Gerinme materyalin boyunda meydana gelen uzama miktarının materyalin ilk uzunluğuna oranı olarak tanımlanır (URL-11, 2015; URL-3, 2015).

$$e = \frac{\delta L}{L_0} \quad (2)$$

1.2.2.3. Gerçek Şekil Değişirme

Deney sırasında ölçü boyu sürekli değişmektedir. Ölçü boyu, deneyin herhangi bir anında L iken, δL gibi sonsuz küçük bir uzama sonunda birim şekil değiştirmedeki artış $\frac{\delta L}{L}$ olacaktır. Bu bakımdan, L_0 başlangıç boyu L değerini alıncaya kadar meydana gelen toplam gerçek şekil değişirme;

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{\delta L}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir. ε logaritmik veya tabii şekil değişirme olarak da alınır ve $L > L_0$ olduğu için pozitiftir. Bu durumda birim şekil değişirme denklemi

$$\frac{L}{L_0} = 1 + e \quad (4)$$

şeklinde yazılıp gerçek şekil değiştirme denklemine taşınırsa,

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (5)$$

bulunur. Küçük e değerleri yani elastik şekil değişimi için,

$$\ln(1 + e) \cong e \quad (6)$$

alınabileceğinden

$$\varepsilon \cong e \quad (7)$$

kabul edilir. e'nin büyük değerleri için ε ve e arasındaki fark hızla artar (URL-11, 2015; URL-3, 2015).

1.2.2.4. Elastisite Modülü

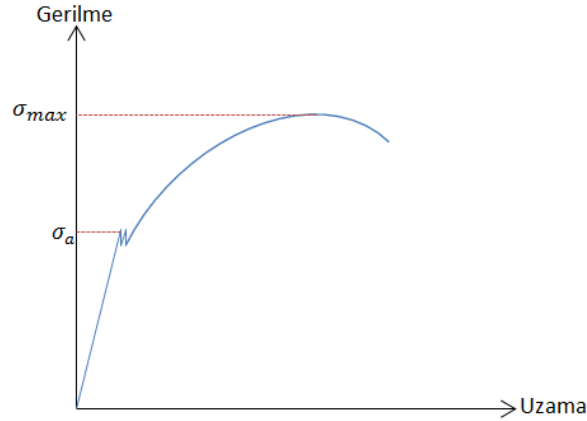
Elastisite modülü, iki atom arasındaki bağ kuvveti olarak tanımlanmaktadır ve malzemenin kuvvet altında elastik şekil değiştirmesinin ölçüsüdür. Elastisite modülü malzemeye ait karakteristik bir özelliktir. Kimi kaynaklarda Young modülü (katsayısı) olarak da geçer. Gerilimin birim şekil değiştirmeye bölünmesinden bulunur (URL-7, 2015; Rho vd., 1993; URL-6, 2015).

$$E = \frac{\sigma}{e} = \frac{\frac{P}{A_0}}{\frac{\delta L}{L_0}} \quad (8)$$

Malzemeye kuvvet uygulandığında, malzemede meydana gelen uzamalar elastik sınırlar içinde gerilmelerle orantılıdır. Buna ‘‘Hooke Kanunu’’ adı verilmektedir. Matematiksel olarak Hooke Kanunu;

$$\sigma = E \cdot e \quad (9)$$

şeklinde gösterilir. Kullanılan malzemenin elastiklik modülü sabit kabul edilir (URL-11, 2015). Gerinmenin çok yükselmesi durumunda Hooke kanunu geçersizdir. Bu kanun tipik bir gerilme-gerinme diyagramında sadece elastik gerilme bölgesi için geçerlidir.



Şekil 5. Gerilme-uzama eğrisi

Bir malzemenin elastiklik modülü ne kadar büyükse, o malzemenin elastik şekil değiştirmeye karşı direnci de o ölçüde büyük olur (Şekil 5) (URL-11, 2015).

1.2.2.5. Orantı Sınırı

Gerilme-birim uzama diyagramında Hooke kanunu geçerli olduğu doğrusal kısmı sınırlayan gerilme değeridir (Savaşkan, 1999).

1.2.2.6. Elastiklik Sınırı

Elastiklik sınırı, elastik deformasyonu meydana getiren en yüksek gerilme değeridir. Yani malzemeye uygulanan kuvvet sona erdiğinde plastik deformasyon meydana getirmediği en yüksek değerdir. Genelde orantı sınırı ile eşit kabul edilirler.

1.2.2.7. Akma Dayanımı

Akma dayanımı, çekme kuvveti sabit olmasına rağmen plastik deformasyonun arttığı yani malzemenin elastik deformasyondan çıkarak plastik deformasyona geçtiği gerilme değeridir.

$$\sigma_a = \frac{F_a}{A_0} \quad (10)$$

burada F_a akma kuvvetini ; A_0 malzemenin ilk kesit alanını vermektedir.

1.2.2.8. Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, malzemenin kopuncaya kadar dayanabildiği en yüksek çekme gerilmesidir.

$$\sigma_{\zeta} = \frac{F_{maks}}{A_0} \quad (11)$$

F_{maks} : Malzemeye uygulanan en yüksek çekme gerilmesi

Kuvvet değeri bu F_{maks} değerine ulaşıncaya kadar malzeme numunesinin alanı kuvvet arttıkça daralır. Kuvvet bu değere ulaştığında numune en çok deformasyon olan yerden kopar.

1.2.2.9. Kopma Uzaması

Kopma uzaması, uygulanan kuvvetle beraber malzeme numunesinin boyunda meydana gelen en yüksek plastik uzama oranıdır. Malzeme numunesi koptuktan sonra kopan parçalar bir araya getirilerek malzemenin boyu ölçülür ve numune boyunda meydana gelen uzama miktarı bulunur. Malzeme numunesinin boyundaki değişim miktarı

$$\delta L = L_k - L_0 \quad (12)$$

eşitliği ile bulunur. Bu eşitlikte L_k numunenin kopmadan önceki son boyu, L_0 numune kesitinin ilk boyu olarak alınır.

Kopma uzaması ise ;

$$KU(\%) = \frac{\delta L}{L_0} * 100 \quad (13)$$

eşitliği ile elde edilir. Kopma uzaması malzemenin sünekliğini vermektedir. Malzemede akma ve çekme dayanımı arttıkça malzemenin sünekliği azalmaktadır Bu nedenle gevrek malzemeler genellikle kopma uzaması göstermezler.

1.2.2.10.Kopma Büzülmesi

Kopma büzülmesi, uygulanan kuvvetle beraber malzeme numunesinin genişliğinde meydana gelen en yüksek büzülme(daralma, boyun verme) oranıdır. Kopma büzülmesi

$$KB(\%) = \frac{A_0 - A_k}{A_0} * 100 \quad (14)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada A_0 : Numunenin ilk kesit alanını, A_k : Numunenin kopma anındaki yüzey alanını vermektedir. Kopma büzülmesi de kopma uzaması gibi sünekliğin bir göstergesidir.

1.2.2.11.Rezilyans

Malzemenin yalnız elastik şekil değiştirmesi için harcanan enerji veya elastik olarak şekil değiştirdiğinde absorbe ettiği enerjiyi, şekil değişimini yapan kuvvetin kaldırılması ile geri vermesi özelliğine rezilyans denir. Rezilyans,

$$U_R = \frac{\sigma_{el} * \epsilon_{el}}{2} \quad (15)$$

eşitliği ile ifade edilir. Kuvvet sonlandığında depolanan enerji geri verilir.

1.2.2.12. Tokluk

Tokluk, plastik deformasyona başlayan malzemenin kopuncaya kadar depoladığı enerjidir. Malzemenin kopmaya karşı direnci olarak da tanımlanabilir. $\sigma - \varepsilon$ eğrisinin altında kalan alanı hesaplanarak

$$\int_0^{\varepsilon_k} \sigma d\varepsilon \quad (16)$$

eşitliği yardımı ile bulunur. Burada ε_k : malzeme kopuncaya kadar meydana gelen en yüksek şekil değiştirme miktarıdır.

1.3. Malzemelerin Uzamalarının Ölçümü

Malzeme üzerine uygulanan testler malzemelerde çeşitli deformasyonlar meydana getirmektedir. Deformasyon iki ya da daha fazla nokta arasında yer değiştirmenin ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bu yer değiştirme ise noktalar arasındaki sıkışma ya da uzamalar ile meydana gelmektedir. Katı malzemelere yük uygulandığında noktalar arasında meydana gelen bu yer değiştirmeleri ölçmek için uzama ölçüm cihazları kullanılmıştır (Drouin ve Sibille, 1981).

Malzemelerin uzamalarının ölçümü iki şekilde yapılabilmektedir (Aydemir, 2011).

1.3.1. Dolaylı Ölçüm

Bu ölçüm türünde numunedeki şekil değişimi miktarına hareketli tablanın değişimi ile karar verilir. Bu da ancak yüksek deformasyon ve uzamaların olduğu yerlerde kullanışlı olabilmektedir.

1.3.2. Doğrudan Ölçüm

Numune üzerindeki şekil değişimi miktarı çeşitli yollarla direkt olarak ölçülür. Böylece daha hassas ölçümler elde edilmektedir. Bu ölçümler için bazı özel cihazlar üretilmiştir. Doğrudan ölçüm, ilgili standartlara uyum sağlamak istendiği, elastik

deformasyonun ve çenelerdeki hareketlerin önemli olduğu kısacası ayrıntılı bilgi alınmak istenen tüm ölçümlerde kullanılmalıdır.

1.4. Malzeme Ölçüm Araçları

Geçmişten günümüze çekme veya basma gibi test makinelerinde oldukça az gelişim olmuşken, uzama ölçülmesi için birçok araç üretilmiştir. En eski makinelerde, makinenin hareketli tablasının yer değiştirme miktarı bir ip aracılığı ile kaleme aktarılıyor; uzama değeri kalemin çizdiği grafikten belirleniyordu. Daha sonra malzeme üzerindeki uzamaların ölçümleri için birçok çeşitli araç geliştirilmiştir.

Bunlardan bazıları şu şekilde verilebilir (Motra vd., 2014; Viveiros ve Lin, 2006; Davis, 2004).

1.4.1. Pistonlu Hareket Makinesi

Bu teknik basitçe yük zamanın bir fonksiyonuyken pistonun hızını takip etmektir. Sistem 250kN'luk elektromanyetik test düzeneği, $\pm 0.08\%$ kuvvet, $\pm 0.5\%$ deformasyon ve 0.001mm yer değiştirme doğruluğuna sahip yüksek aralıkta piston hızını sağlayabilir. Numunedeki gerilme, deformasyon miktarı ya da uzama hesaplanabilir. Baskı levhasının yer değiştirmesi, numunenin yer değiştirmesi olarak düşünüldüğünde, gerilme altında tüm yükün ortaya çıkarttığı bir hatadan söz edilebilir. Bu da test sonuçlarında önemli farklılıklar oluşturabilmektedir.

1.4.2. Gerinim Ölçer

Bu yöntem uzama ölçümü için sık kullanılan araçlardan biridir. Yüksek derecede başarısı, düşük ücret ve kolay kullanımı mevcuttur. Ancak bu yöntem sıklıkla yanlış kullanıma ve ölçüm belirsizliğine neden olan bir yaklaşımı vardır. Bu belirsizlikler ölçümlerin büyük olması ve ölçüm sisteminden kaynaklanan belirsizliklerdir. Ölçüm sisteminde oluşan sistematik hatalar sistemin genel başarısı üzerinde doğrudan etkilidir.

1.4.3. Ekstansometre (Uzanım-Ölçer)

ASTM (American Society for Testing and Materials) standartlarında, uzamaların ölçülmesi için uzanım-ölçer kullanımı tavsiye edilmektedir. Yöntem yüksek başarı sağlamaktadır ve daha hassas uzama ölçümleri gerçekleştirmektedir. Ayrıca ekstansometreler, test esnasında çenelerin içerisinde kalan malzemenin akması ve ölçüm mesafesi dışarısında meydana gelebilen deformasyonlar gibi nedenlerle oluşan uzamaların etkisini de ortadan kaldırmaktadır.

Çekme testleri sırasında kullanılan bu yöntemlerden verilerin sağlıklı şekilde alınarak, hassas uzama ölçümü ve standartlara uygun olmasını sağlamak için uzama ölçümleri sırasında ekstansometreler kullanılır. Bu çalışmada da malzemenin çekme testinde ölçümler için ekstansometre kullanılmıştır.

1.5. Fiziksel Değişim Ölçü Araçları

Numune üzerine kolları aracılığı ile tutturularak ölçüm alan cihazlara ekstansometre adı verilmektedir. Ölçülen büyüklüğe göre ekstansometreler aşağıdaki şekilde gruplandırılabilirler (Aydemir, 2011).

1. Uzama ölçerler
2. Genişlik ölçerler
3. Deformasyon ölçerler
4. Çatlak açıklığı ölçerler

Ekstansometreler numuneye bağlantı şekillerine göre 2 gruba ayrılırlar (Aydemir, 2011; URL-5, 2015).

1.5.1. Numune Üzerine Tutturulan (Temaslı) Ekstansometreler

Temaslı ekstansometrelerin kolları numuneye doğrudan temas ederek uzama ölçümü yaparlar. Çekme, basma ve alternatif yükleme testleri için kullanılabilirler.

- a. Sensör kollu ekstansometreler
- b. Ataçlı (clip-on) ekstansometreler, genelde düşük uzamalı plastik veya metal malzemelerde kullanılırlar.
- c. Basma ve eğme ekstansometreleri
- d. Çatlak açıklığı ölçen ekstansometreler

Temaslı ekstansometrelerin dezavantajı cihaz numuneye temas ettiği için numuneye hasar verebilir bu da ölçümde hatalara neden olabilmektedir.

1.5.2. Temassız Ekstansometreler

Temassız ekstansometreler, numuneye temas etmeksizin çeşitli yollarla numunede meydana gelen yer değişimlerini ölçen ekstansometre çeşitleridir. Numuneye temas etmediklerinden dolayı hasar oluşturma riski yoktur. Çok uzayan, bükülen, dokunma hassasiyeti gösteren ve çok elastik malzemelerin testlerinde temaslı ekstansometrelerin kullanımı sakıncalı ve problemlili olabilmektedir. Bu tür malzemelerin uzama değerlerinin dokunmadan hassas bir şekilde ölçülebilmesi için geliştirilmişlerdir. Fakat bu ekstansometreler çeşitlerine göre maliyetli olabilmektedirler (URL-4, 2015).

1.5.2.1. Lazer Ekstansometreler

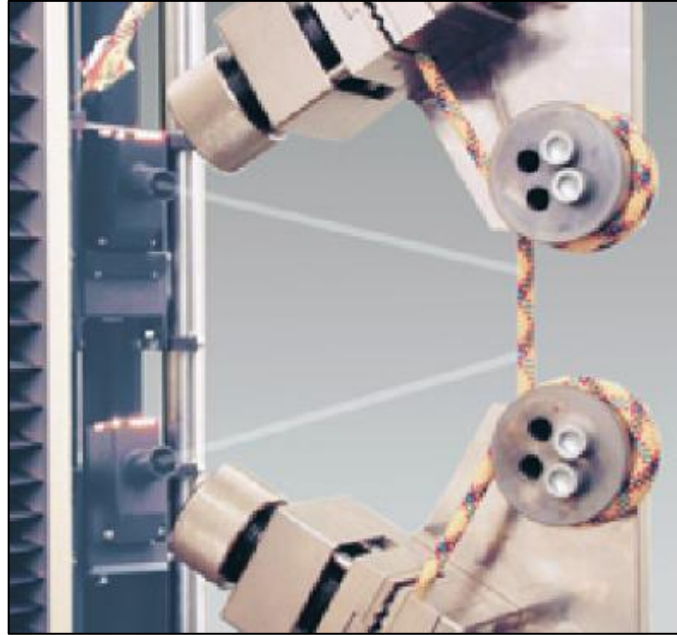
Lastik ve elastomer malzemelerde sıklıkla kullanılan lazer ekstansometerler özel bir sistem ile malzeme üzerine gönderilen ışık, malzeme üzerinden yansıdığında başka bir mercek tarafından toplanır. Numune üzerinden yansıyan ışık ile işaretçilerden yansıyan ışığın dalga boyu farkına göre işaretleri takip eder ve uzama değerini eş zamanlı olarak bilgisayara aktarır (Şekil 6). Malzeme üzerine herhangi bir deformasyona neden olmaması problemsiz olarak çalışması en büyük avantajıdır (Aydemir, 2011).



Şekil 6. Lazer ekstansometre ölçüm cihazı

1.5.2.2. Optik Ekstansometreler

Malzeme üzerine standartlarda belirtilen aralıkta veya bağımsız olarak iki adet yansıtıcı noktalar (2mm) yapıştırılır. Optik aydınlatma sayesinde numuneden yansıyan ışığın takip edilmesi prensibi ile çalışır. Test işlemi başladığında ekstansometre otomatik veya manuel olarak harekete geçer. 6 mm tarama alanı sayesinde markalar rahatlıkla tespit edilir ve tüm test boyunca her iki markanın pozisyonu ile markalar arasındaki mesafe takip edilerek aynı anda uzama değerleri tespit edilir. Optik aydınlatmanın malzeme üzerine 5° ila 45° arasında gönderilmesi yeterlidir. Bu sayede numune, üzerinden yansıtacak ve test sonuçlarını etkileyecek ışık kümesinden etkilenmez. Ayrıca entegre sinyal tanımlayıcı sayesinde etraftaki daha yüksek ışık kümelerinin elenmesini sağlar. Yüksek çözünürlük ve ölçme hassasiyeti sağlar.



Şekil 7. Optik Ekstansometre ölçüm cihazı
(Aydemir, 2011)

1.5.2.3. Video Ekstansometreler

Video ekstansometre her tür plastik, metal, lastik, folyo ve bileşik malzeme testlerinde şekil değişimlerini temassız ve yüksek hassasiyette ölçebilmektedir. Metallerde çok hassas ölçüm gerektiren, kesit daralması değerlerinin saptanması ve EN 10002-1 normuna göre çekme testlerinde fiziksel değerlerin hesaplanması konusunda çok

başarılıdır. Malzeme cinsine göre kullanılan video kameranın çözünürlüğünü seçmek mümkündür. Malzeme üzerinden alınan görüntü, resim şeklinde dijital olarak işlenir. Test sırasındaki değişim bir işlemci tarafından değerlendirilerek uzama ölçümleri yüksek hassasiyette bilgisayara gönderilir ve değerlendirilerek eş zamanlı olarak grafiğe ve sonuçlara yansıtılır. Çevre ve malzemeye bağlı olarak yüzeyler farklı bir yansıma yaratmak için fosforlu bir kalem ile işaretlenir. L_0 boyu bu işaretli bölgede otomatik olarak tespit edilir. Ölçme sırasında yakalanan yüzey alanının büyüklüğü objektife bağlı olarak değişebilir. Çözünürlük ve ölçme hassasiyeti görüntünün tamamında çok yüksektir. Hem uzama hem kesit daralmasını aynı anda ölçebilir. Test parçasının kopma anı yakalanabilmektedir (Aydemir, 2011).



Şekil 8. Video ekstansometre ölçüm cihazı

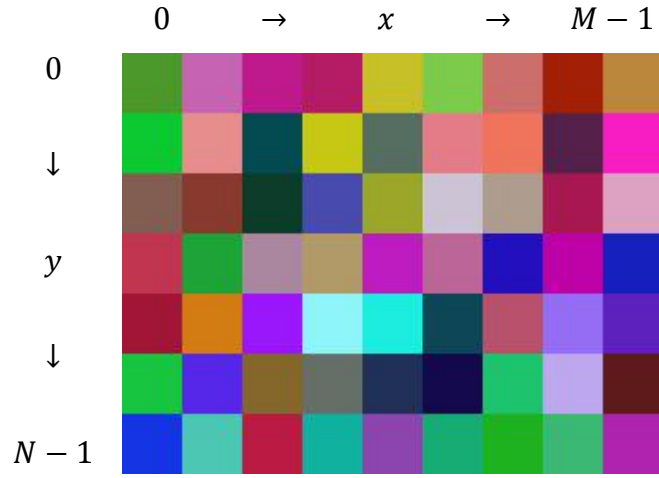
Kullanım kolaylığı, hassas ölçümleri ve maliyetinin daha az olması nedeniyle video ekstansometreler diğer temassız ekstansometrelere göre daha sık kullanılmaktadır. Bu çalışmada da video ekstansometre aracılığıyla deney yapılmıştır.

Video ekstansometre kullanılırken deney sırasında alınan görüntüler bilgisayara aktarılır ve burada çeşitli video işleme teknikleri kullanılarak malzeme üzerinde meydana

gelen değişimler ölçülür. Bu çalışmada video üzerinde uygulanan teknikler üzerinde durulmuştur.

1.6. Sayısal Görüntüler

Görüntüler çeşitli kaynaklardan yayılan ışığın canlılardaki görme duyusu tarafından algılanarak elektriksel sinyale çevrilmesiyle oluşurlar. Görme sisteminin yaptığı bu olaydan esinlenilerek günümüzde birçok elektronik cihaz tarafından gerçek dünyadan görüntüler alınabilmekte ve bu görüntüler sayısallaştırılarak bilgisayar ortamına aktarılabilir. Bilgisayar ortamına aktarılan bu sonlu sayıda elemandan oluşan görüntülere sayısal görüntü adı verilir. Sayısal görüntüler en az iki boyutlu matris şeklinde gösterilmektedirler. Bu matriste satır ve sütunların kesiştiği her bir değere gözek adı verilmektedir. N satır M sütundan oluşan bir sayısal görüntüde $N \times M$ tane gözek bulunur. Sayısal görüntülerdeki gözeklerin şekilsel gösterimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Sayısal görüntü renkli gözeklerin gösterimi

İki boyutlu görüntü matrisi, matematiksel olarak $I(x,y)$ fonksiyonu biçiminde gösterilir (Eşitlik 17). Burada her x ve y ikilisi tek bir gözeğin konumunu, I ise gözeğin o konumdaki yoğunluk değerini göstermektedir (Gonzalez vd., 2004).

Sayısal görüntülerin koordinat sistemi görüntünün sağ üst köşesi olan $(0,0)$ noktasından başlayarak aşağıya doğru en büyük satır sayısı olan $(N - 1)$ 'e ve sağa doğru en büyük sütun sayısı olan $(M - 1)$ 'e kadar artarak devam eden sistemdir (Burger ve Burge, 2009).

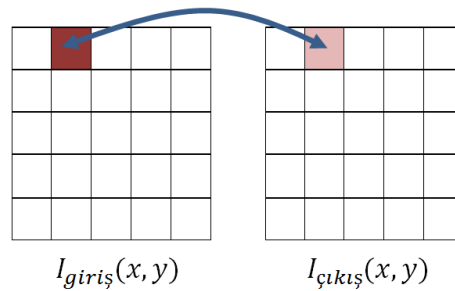
$$I(x, y) = \begin{bmatrix} I(0,0) & I(1,0) & \cdots & I(M-1,0) \\ I(0,1) & I(1,1) & \cdots & I(M-1,1) \\ \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ I(0,N-1) & I(1,N-1) & \cdots & I(M-1,N-1) \end{bmatrix} \quad (17)$$

1.6.1. Sayısal Görüntü İşleme

Bilgisayar ortamında sayısal hale gelmiş görüntüler üzerinde çeşitli matematiksel işlemler uygulanabilir. Bu işlemler sonucunda yeni bir görüntü elde edilir. Görüntü üzerinde yapılan bu işlemlerin tümüne görüntü işleme denir. Görüntü işleme yöntemleri görüntünün elde edilmesi, sayısallaştırılması, bölütlenmesi, iyileştirilmesi, sınıflandırılması, kaydedilmesi ve yeniden çağrılması gibi birçok yöntemi kapsar. Görüntü işleme genel olarak şu işlemler üzerinde yoğunlaşır:

1.6.1.1. Noktasal İşlemler

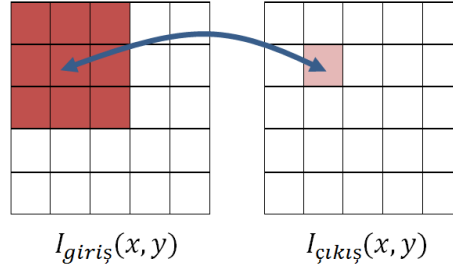
Giriş görüntüsündeki her bir gözeğin tek tek işleme sokularak çıkış görüntüsündeki gözüklerin tek tek elde edilmesine noktasal işlemler denir. Ele alınan her bir gözük çıkış görüntüsündeki tek bir gözeğe karşılık gelmektedir.



Şekil 10. Noktasal işlemler

1.6.1.2. Alansal İşlemler

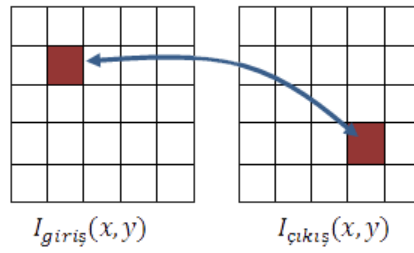
Giriş görüntüsünden seçilen belli bir gözek bölgesine matematiksel işlem uygulanarak çıkış görüntüsünde tek bir gözek değerinin elde edilmesi işlemlerine alansal işlemler denir.



Şekil 11. Alansal işlemler

1.6.1.3. Konumsal Dönüşümler

Giriş görüntüsündeki gözeklerin taşınarak konum değiştirmesi sonucunda çıkış görüntüsünün elde edilmesi işlemine konumsal dönüşümler denir. Görüntüyü döndürme, öteleme bu işlemlerden bazılarıdır. Konumsal dönüşümler videolardaki hareket algılamanın tabanını oluşturmaktadır.

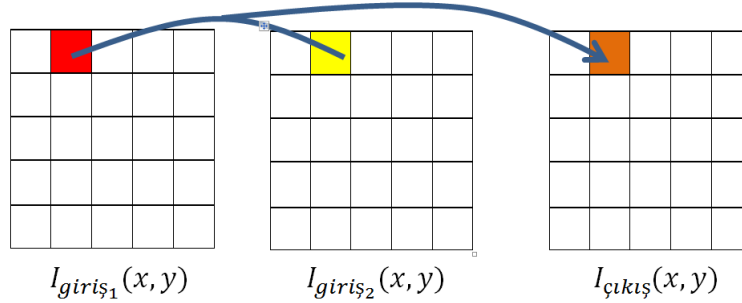


Şekil 12. Konumsal işlemler

1.6.1.4. Katmansal İşlemler

Bu işlemlerde iki giriş görüntüsü bulunmaktadır. Bu iki giriş görüntüsündeki aynı koordinatlara sahip gözeklerin bir matematiksel işleme uğrayarak çıkış görüntüsündeki tek

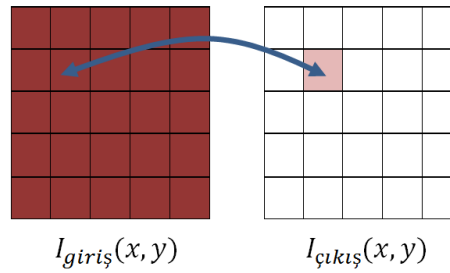
bir gözeğin elde edilmesi işlemlerine katmansal işlemler denir. Bu işlem çeşidi video işleme tekniklerinin temelini oluşturmaktadır.



Şekil 13. Katmansal işlemler

1.6.1.5. Toplamsal Dönüşümler

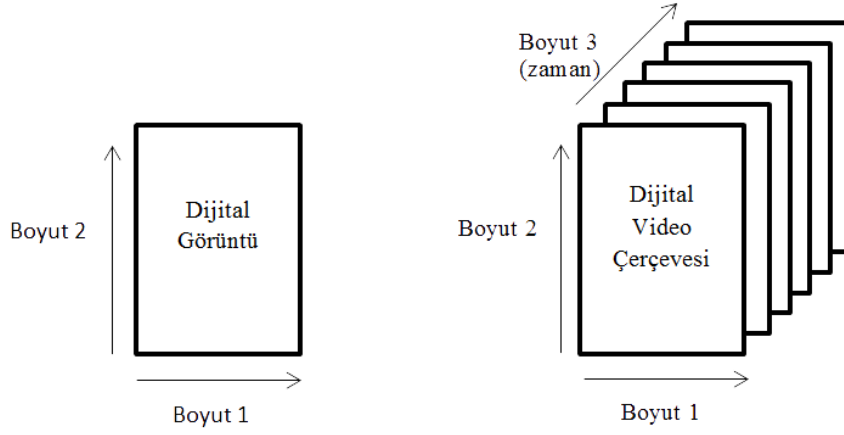
Giriş görüntüsündeki tüm gözeklerin bir çekirdek fonksiyonu ile çarpılarak toplanmasıyla çıkış görüntüsündeki tek bir gözeğin elde edilmesi işlemine toplamsal dönüşüm denir.



Şekil 14. Toplamsal İşlemler

1.7. Sayısal Videolar

Videolar sayısal görüntülerin derlenmiş hareketli dizileridir. Yani, videolar görüntülerin çoklu hali olarak düşünülebilir. Görüntüler üç boyutlu uzaydan oluşmaktayken videolar dört boyutlu uzaya sahiptir (Şekil 15). Görüntülerdeki üç boyutun ikisi nokta koordinatları diğer boyut ise renk derinliğiyken, videolarda boyutlardan ikisini nokta koordinatları birini renk derinliği diğer boyutu ise zaman oluşturmaktadır (Bovik, 2010).



Şekil 15. Görüntü ve videoların boyutları

Görüntüler bilgisayar ortamına aktarıldıklarında matematiksel olarak $I(x, y)$ fonksiyonu şeklinde iki boyutlu olarak ifade edilirler. Burada x ve y tek bir gözeğin konumunu göstermektedir. Fakat videolarda bu fonksiyona üçüncü bir boyut olarak zaman eklenir. Videolar bilgisayar ortamında matematiksel olarak $I(x, y, t)$ fonksiyonuyla ifade edilirler.

Alınan görüntülerde noktaların koordinatlarını kayıt etmek önemlidir. Çünkü sayısal görüntü işleme ve video işleme oldukça veri içeren çalışmalardır. Koordinatları kayıt etmek bu çalışmalar sırasında hesaplama ve depolamayı en aza indirmek açısından büyük önem taşır (Böcekçi, 2011).

Videolar görüntülerin peşi sıra birbirini takip etmesinden oluşmaktadır. Buradaki her bir görüntü videonun en küçük birimi olan çerçeveleri (frame) oluşturmaktadır. Videoların bir saniyesinde bulunan çerçeve sayısı kamera sistemine bağlıdır.

1.7.1. Sayısal Video İşleme

Video işleme, çeşitli kamera sistemleriyle elde edilerek bilgisayar ortamına aktarılan sayısal videolar üzerinde çeşitli iyileştirmeler yapmak veya videonun özelliklerini çıkarmak için yine aynı ortamda yapılan sayısal işlemlerdir. Günümüzde video işleme bilgisayar bilimleri konuları arasında en önemli konulardan biridir.

Video işleme tekniklerinin uygulanması sırasında videolar bilgisayar ortamında çerçevelere yani alt görüntülere ayrılır ve uygulanacak işlemler her bir çerçeveye uygulanır.

İki tür video işleme tekniği vardır:

1- Gerçek zamanlı video işleme

Gerçek zamanlı video işleme kamera görüntüyü kayıt ederken aynı zamanda video üzerinde video işleme tekniklerinin uygulanarak sonuçların elde edilmesidir. Başka bir deyişle videonun kayıt edilmesi sırasında gecikme olmadan tam kalitede video bilgilerinin bilgisayar ortamında elde edilmesidir.

2- Durağan zamanlı video

Herhangi bir zamanda kayıt edilmiş olan bir videonun bilgisayar ortamına aktarılarak üzerinde video işleme tekniklerinin uygulanmasıdır.

Video işleme;

- Zaman-uzamsal örnekleme,
- Analog ve sayısal video sinyallerinin işlenmesi,
- Hareket analizi,
- Nesne tespiti ve takibi,
- Gürültü azaltma,
- Görüntü düzeltme,
- Metin bulma,
- Nesnelerin kenar ve köşelerinin tespiti

gibi birçok konuyu kapsamaktadır.

1.7.2. Sayısal Videolarda Hareket Analizi

Video işlemenin hareket analizi konusu, video ekstansometre aracılığıyla bilgisayar ortamına aktarılan sayısal görüntü dizisi üzerinde yapılacak işlemlerinin tabanını oluşturmaktadır. Videolar üzerindeki hareket analizi peşi sıra gelen görüntülerdeki her bir gözeğin hareketinin takip edilmesiyle yapılmaktadır. Bunun için ilk görüntüden başlayarak görüntüler her seferinde bir görüntü kayacak şekilde ikişer olarak alınır. Peş peşe gelen her iki görüntüdeki gözeklerin konumlarının ne kadar değiştiği belirlenir ve kayıt edilir. Bu işlem son görüntüye kadar devam eder. Görüntü dizisindeki hareket matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikte gösterilmektedir.

$$I(x, y, t) = I(x + u, y + v, t + \delta t) \quad (18)$$

Bu eşitlikteki (u, v) , konum olarak (x, y) nin yer değiştirme miktarını vermektedir. δt ise peş peşe gelen görüntüler arasındaki değişen zamanı vermektedir. Eşitlik 18'deki (u, v) 'ye Eşitlik 19'daki gibi zamansal yönde türev alınarak Eşitlik 20'deki kısıtlama denklemi tanımlanır.

$$u = \frac{dx}{dt}, v = \frac{dy}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} u + \frac{\partial I}{\partial y} v + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (20)$$

Eşitlik 20'deki konumsal ve zamansal türev normal görüntü hızının tahminini sağlar.

Hareket analizi mekanik deneylerde cisimlerin yüzeylerindeki hareketinin (yer değiştirmesinin) belirlenmesinde kullanılır. Görüntü dizisi üzerinde hareket analizi için pek çok algoritma geliştirilmiştir. Ancak bu algoritmalarından pek azı mekanik deneylerden elde edilen görüntü dizilerindeki yer değiştirmeler için kullanılabilir. Genel olarak en yaygın kullanılan algoritmalar;

- Korelasyon yöntemi
- Olasılık yöntemi
- Fourier dönüşüm yöntemi

şeklinde tanımlanabilir (Clocksin vd., 2002).

Video ekstansometre ile temassız şekilde yapılan mekanik deneyler üzerinde bu yöntemler kullanılarak elde edilen yer değiştirme ve gerilim miktarı, gerilimölçer ve pistonlu hareket makinesi gibi eski ölçme araçlarının elde ettiği sonuçlardan çok daha duyarlıdır. Ayrıca daha hassas sonuçlar elde etmektedir.

1.7.2.1. Korelasyon Yöntemi

Korelasyon, iki değişken arasındaki ilişkinin gücünün ölçüsünü ve yönünü belirtir. Görüntüler bilgisayar ortamına aktarıldığında değişken olarak alındığından görüntüler arasındaki ilişki korelasyon yardımıyla bulunabilmektedir. Görüntüler arasında oluşan korelasyon iki görüntü arasındaki mesafeden kaynaklanmaktadır. Korelasyon yöntemi, iki görüntü arasındaki gözek farklılıklarının tespit edilmesi için yaygın olarak kullanılan bir

yöntemdir. Yöntem yüzey deformasyonlarının bulunması için oldukça iyi bir yaklaşımdır (Clocksin vd., 2002).

Yöntemde verilen her iki I_1 ve I_2 görüntüsü için korelasyonu bulunacak $N \times N$ 'lik bölgeyi tanımlamak için etkin gözeğin komşuluğu,

$$n = \left\lfloor \frac{N-1}{2} \right\rfloor \quad (21)$$

eşitliği ile tanımlanır. Her iki bölgede bulunan gözekler arasındaki karesel Öklid uzaklığı

$$d^2(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n (I_1(x, y) - I_2(x+u, y+v))^2 \quad (22)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte I_1 görüntüsünde bulunan merkez gözekler olan (x, y) ile I_2 görüntüsünde bulunan $(x+u, y+v)$ merkez gözekleri eş gözeklerdir. (u, v) gözeklerin hareket etme miktarıdır. Burada $d^2(u, v)$ fonksiyonu genişletildiğinde;

$$d^2(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n (I_1^2(x, y) - 2I_1(x, y)I_2(x+u, y+v) + I_2^2(x+u, y+v)) \quad (23)$$

elde edilir. Bu fonksiyondaki $\sum I_1^2(x, y)$ terimi sabit bir terimdir. Aynı şekilde $\sum I_2^2(x+u, y+v)$ terimi de yaklaşık olarak sabit bir terim olarak alınır, kalan terimler çapraz korelasyonu verir. Aşağıdaki Eşitlik 24'te görüntüler arasındaki yer değişimini hesaplayan korelasyon fonksiyonu gösterilmektedir.

$$c(u, v) = \sum_{x=-n}^n \sum_{y=-n}^n I_1(x, y)I_2(x+u, y+v) \quad (24)$$

Korelasyon yöntemi popülerliğini korumasına rağmen bazı dezavantajları bulunmaktadır. Bu dezavantajlar aşağıdaki şekilde verilebilir (Clocksin vd., 2002):

- Görüntülerin parlak olduğu bölümlerinde korelasyon yüksek değerler verebilir.

- Korelasyon seçilecek bölgenin boyutuna bağlı olarak değişebilmektedir.
- Görüntünün tamamındaki değişim sabit değildir.
- Yöntem, Affine dönüşümü ve rotasyon için duyarsızdır.

İlk üç dezavantaj nedeniyle $c(u, v)$ korelasyon fonksiyonunu standartlaştırılır. Standartlaştırmanın bir yolu korelasyonun ilgili bölgelerin biri ya da hepsindeki gri seviyelerin toplamalarına bölünmesidir.

$$c'(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y I_1(x, y) I_2(x + u, y + v)}{\sum_x \sum_y I_1(x + u, y + v)} \quad (25)$$

Ya da bu fonksiyonun alternatifi olarak aşağıdaki fonksiyon verilmiştir.

$$c'(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y I_1(x, y) I_2(x + u, y + v)}{\sqrt{\sum_x \sum_y I_1^2(x, y) \sum_x \sum_y I_2^2(x + u, y + v)}} \quad (26)$$

Diğer bir standartlaştırma yöntemi merkezleştirilmiş korelasyon katsayılarının kullanılmasıdır.

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_x \sum_y (I_1(x, y) - \bar{\mu}_1)(I_2(x + u, y + v) - \bar{\mu}_2)}{\sqrt{\sum_x \sum_y (I_1(x, y) - \bar{\mu}_1)^2 \sum_x \sum_y (I_2(x + u, y + v) - \bar{\mu}_2)^2}} \quad (27)$$

Eşitlik 27'de $\bar{\mu}_1$ I_1 görüntüsündeki ilgili bölgenin ortalama gözetek değeri, $\bar{\mu}_2$ I_2 görüntüsündeki ilgili bölgenin ortalama gözetek değerini vermektedir. Merkezleştirilmiş korelasyon değeri $[-1, 1]$ aralığında bir değere sahip olmaktadır. Bu yöntem literatürde dijital görüntü korelasyonu adı altında da geçmektedir.

1.7.2.2. Olasılık Yöntemi

Standartlaştırılmış korelasyon $[0, 1]$ değerleri arasında bir değer almaktadır. Bu nedenle standartlaştırılmış korelasyon değeri korelasyonun olasılığı olarak tanımlanabilir. Olasılık yönteminde görüntüler üzerinde seçilen R bölgesindeki θ kadar yer değiştirmenin güçlü şekilde tahmin edilmesi için Bayes çerçevesi formüle edilmiştir. Olasılık yönteminin

temel amacı numune üzerinde meydana gelen yer değişim olan bölgelerin olasılığını arttırarak bu bölgeleri tespit etmektir (Clocksin vd., 2002).

1.7.2.3. Fourier Dönüşümü Yöntemi

Çerçevelerin peş peşe gelen görüntüleri hızlı Fourier dönüşümüne(FFT) tabi tutulur. Görüntülere uygulanan dönüşüm sonucunda elde edilen FFT oranlarının maksimum tepe noktalarının koordinatları hesaplanır. Daha sonra ters Fourier dönüşümü uygulanır ve yer değiştirme vektörü elde edilir. Bu hesaplama uzaysal çapraz korelasyonun frekans alanına eşdeğerdir. Oldukça verimli sonuçlar elde edilir. Her çerçevedeki yer değiştirmenin büyüklüğünü ve yönünü gösteren (u, v) değerlerinin vektörleri birleştirilir. (Bastawros ve McManuis, 1998).

Bu çalışmada yer değiştirme algoritmaları arasından en avantajlı ve en sık kullanılan dijital görüntü korelasyonu yöntemi kullanılmıştır.

1.7.3. Sayısal Görüntü Korelasyonu(DIC)

Görüntü korelasyonu alanındaki ilk çalışma 1950'li yılların başlarında Gilbert Hobrough (1919–2002) tarafından iki fotoğrafın çeşitli analog görünümünün birbiriyle karşılaştırılarak bazı özelliklerinin çıkarılmasıyla yapılmıştır. 1961 yılında Hobrough tarafından görüntüleri eşleştirerek korelasyonundan konumsal bilgisi elde eden bir araç tasarlanmıştır. 1960 ve 1970 yılların gelmesiyle birlikte yapay zeka araştırmacıları tarafından oldukça ilgi görmüş ve robot geliştirme araştırmalarında kullanılmaya başlanmıştır. 1986 yılında Yamaguchi tarafından noktalı lazer kullanılarak düz dönüşümleri tespit etmek için doğrusal sensör geliştirilmiştir (Sutton vd., 2009).

DIC algoritması sıralı görüntüler üzerindeki yer değiştirmelerin ölçülmesi için kullanılan bir algoritmadır. Aynı zamanda bu algoritma mekanik deneyler sırasında alınan görüntüler üzerinde de kullanılabilir. Materyalin çekilmesi, döndürülmesi, sıkıştırılması, çatlaması gibi testler sırasında materyal yüzeyinde meydana gelen değişimleri karakterize eder. Bu algoritma genel olarak tüm hareket algılama algoritmaları içinde en etkili algoritmadır (Gruenwald vd., 2015).

DIC algoritmasının en yaygın kullanıldığı yer optik farelerin yer değiştirmesinin ölçülmesidir. Bunun yanında otomotiv, havacılık, biyomekanik, endüstriyel gibi alanlarda

oldukça geniş uygulamaları vardır. Otomotiv sektöründe askeri makinelerinden ağır sanayi makinelerinin çalışmalarını, sıcaklıklarını test etmek için kullanılır. Otomotiv alanında 3D DIC algoritması, 3 boyutlu gerilimleri ölçmek için sıklıkla kullanılmaktadır. Havacılık sektöründe bu algoritma, kuş veya havada bulunan parçacıklarla çarpışmalar sırasında oluşabilecek yapısal hasarların test edilmesi için kullanılır. Böylece daha güvenilir malzeme üretilir. Biyomekanik sektöründe DIC algoritması, daha çok kasların hareketlerinin saptanması için kullanılır. Buradaki deneyler canlı dokular üzerine uygulandığı için verilerin hızlı bir şekilde yakalanması gerekmektedir. DIC algoritması bu konuda da yeterli gelmektedir. Endüstriyel alanda DIC metodu materyallerin karakteristiklerinin çıkarımı için kullanılmaktadır. Metallerin dinamik olarak yüksek basınçlı olarak sıkıştırılması ve hızlı bir şekilde verilerin alınması, elastik materyallerin gerdirilmesi, bu sırada oluşan gerilimin ölçülmesi aynı zamanda materyalin kopma zamanları ve dayanma noktalarının belirlenmesi gibi birçok test için bu algoritma uygundur (URL-2, 2015; URL-12, 2015).

DIC algoritması çapraz korelasyon ve diferansiyel tekniklerinden meydana gelmiştir. Video görüntüleri bilgisayar ortamında çerçeveler olarak alınmaktadır. DIC algoritması için ilk iki çerçeve alınır. Bu çerçeveler üzerinde belirlenen gözeklerin belli bir çevresindeki gözekler seçilir. Bir sonraki çerçeve içindeki aynı konumdaki gözekler arasında korelasyon hesaplanır. Gözekler arasındaki korelasyon değerinin maksimum olduğu gözekler, yer değiştirmenin olduğu gözekleri belirtmektedir.

Görüntüler arasındaki korelasyonun bulunmasının, yer değiştirme noktasının seçilen çevrenin dışına çıkması ya da korelasyonun maksimum noktasının bulunmasının zaman alması gibi bazı dezavantajları bulunmaktadır. Böyle dezavantajları yok edilmesi ya da etkinliğinin azaltılması için görüntüler üzerinde alt gözek kullanımı oldukça yaygın bir yöntemdir. Böylece korelasyon alanı büyüdüğünden daha etkili sonuçlar elde edilebilmektedir (Clocksin vd., 2002).

1.8. Alt Gözekler

Alt gözekler, bir görüntüdeki normal gözek değerini aşan gözek değerleridir. Alt gözek değerleri sayısal olarak tam sayı gözek değerlerinin yanında virgülden sonra gelen değerlerle gösterilirler. Alt gözeklerin görüntü üzerindeki gösterimi Şekil 16'da verilmiştir.

0		1	
20	210	211	3
	212	213	
22	23		

Şekil 16. 4 gözekli görüntüdeki 2 numaralı gözeğinin alt gözeklerinin gösterimi

Hareket analizinde bütün olmayan bir uzunluğun yer değiştirmesi ölçülürken, önemsiz ölçüde küçük olan yerlerde modelleme yapmak gerekir. Bunu başarmak içinde alt gözeklerin tespit edilmesi gerekmektedir. Alt gözeklerin tespit edilmesinde genel olarak interpolasyon yöntemleri kullanılmaktadır (Clocksin vd., 2002).

1.9. Regresyon Analizi

Regresyon analizi en geniş anlamda değişkenler arasındaki ilişki ve bağlantıların araştırılmasıdır. Değişken sayısı tek olduğunda istatistiksel hesaplamalar ortalama, oran, değişim ölçüleri, örnekleme ya da örnekleme ilişkin aralık tahminleri ve hipotez testleri üzerine yoğunlaşır. İncelenen değişkenler birden çok ise bu bağlantısal açıklama ve önceden tahmin kavramları üzerinde analiz yapmaya imkan verir. İlişkili değişkenler arasındaki karşılıklı ilgiyi bağlantısal olarak açıklama, ilişkinin biçim yardımı ile verilerden açıklanan değişkeni önceden tahmin etme, bir değişkenin değerini diğer değişken ya da değişkenler yardımı ile oluşturulan model kullanılarak önceden hesaplayabilmeyi ifade eder.

1.9.1. Regresyon Kavramı ve Amaçları

Sözlük anlamı ile regresyon, bir şeyi başka bir şeye bağlama biçimidir. Bilimsel anlamıyla bir değişken ile bir başka değişken ya da birden fazla değişken arasında bağıntı kurma işini ve biçimini anlatır.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \Rightarrow 1 \text{ tane} \quad (28)$$

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_p X_p \Rightarrow p \text{ tane} \quad (29)$$

Örneğin, buğday verimi gübre miktarı ile doğrusal olarak açıklanabilir mi? Açıklanabilir ise gübre miktarını 1 kg arttırmakla buğday verimi ne kadar artmış olur? Belirli bir gübre miktarına karşılık gelen ortalama gelir nedir?

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \Rightarrow \text{gübre} \quad (30)$$

Bireylerin harcamalarında görülen toplam değişimin yüzde kaçı geliriyle açıklanır? 2012 yılının petrol tüketiminin ne olacağı tüketim miktarının zamana göre değişiminden tahmin edilebilir mi? Tahmin edilirse ne kadar güvenilirdir?

Regresyon, doğrusal regresyon ve doğrusal olmayan regresyon olmak üzere ikiye ayrılır. Regresyon, değişkenler arasındaki ilişkinin fonksiyonel şeklini, bağımlı bağımsız değişken denklemi olarak göstermekle kalmaz, değişkenlerden birinin değeri bilindiğinde diğeri hakkında kestirim yapılmasını sağlar (URL-13, 2015).

Regresyon yönteminin ilk şekli en küçük kareler prensibidir ve ilk olarak Adrien Marie Legendre tarafından 1805’de ortaya atılmıştır. Bunu hemen takiben 1809’da C.F.Gauss aynı yöntemi açıklamıştır. Regresyon terimi ise 19. yüzyılda İngiliz istatistikçisi Francis Galton tarafından bir biyolojik inceleme için ortaya atılmıştır. Galton bu çalışmalarında ‘regresyon’ kavramını ve yöntemini de geliştirmiştir. Zamanla bu terimin kavram ve yöntemi ile Galton'un konusu arasında tüm ilişki yok olmuştur ve günümüzde regresyon terimi doğrusal bağlantı bulunması ve eğri uydurma ile eş anlama gelmektedir (URL-13, 2015).

1.9.2. Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon bir bağımlı değişken(y) ve bir ya da daha fazla bağımsız değişken arasındaki ilişkiyi modellemek için kullanılan yöntemdir. Eğer tek bağımsız değişken varsa “Basit Doğrusal Regresyon” iki ve daha fazla bağımsız değişken varsa “Çoklu Doğrusal Regresyon” adı verilmektedir.

Verilen $\{y, x_1, \dots, x_i\}_{i=1}^n$ veri setinde, bağımlı değişken y ve bağımsız değişkenler vektörü x_i arasındaki ilişkinin doğrusal olduğu varsayılır. Bu doğrusal ilişki;

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \varepsilon \quad (31)$$

ile ifade edilir. Buna çoklu regresyon denklemi denir. Burada $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ bilinmeyenlerine regresyon katsayıları denir. Tek bağımsız değişkenin olduğu durumda ilişki;

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 \quad (32)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denkleme de basit doğrusal regresyon denklemi denir.

1.10. Bulanık C-Ortalama Kümeleme Algoritması

Kümeleme, verileri özelliklerine göre alt gruplara ayıran bir tekniktir. Bulanık c-ortalama (FCM) kümeleme algoritması, bulanık kümeleme tekniklerinden en iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bulanık c-ortalama kümeleme algoritması 1973 yılında Dunn tarafından ortaya atılmış ve 1981’de Bezdek tarafından geliştirilmiştir (Höppner vd., 2000). Bulanık c-ortalama algoritması amaç fonksiyonu temelli bir metottur ve verilerin birden fazla kümeye farklı üyelik dereceleriyle ait olabilmesi prensibine dayanır. Bulanık mantık prensibi gereği bu üyelik dereceleri $[0,1]$ arasında değişen değerler almaktadır ve bir verinin tüm kümelere ait üyelik derecelerinin toplamı bir olmalıdır. Nesne hangi küme merkezine yakın ise o kümeye ait olma üyeliği diğer kümelere ait olma üyeliğinden daha büyük olacaktır.

D -boyutlu bir Euclidean uzayında N örnekten oluşan bir $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ veri kümesinin verildiğini varsayalım ($x_i \in R^D$). Öbekleme, bu veri kümesinin, küme

merkezleri $\{v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_c\}$ olan c tane alt kümeye ayrılması işlemidir. Veri kümesini alt kümelere ayırırken istenen optimal kriter amaç fonksiyonunu minimize etmektir. Algoritma, en küçük kareler yönteminin genellemesi olan aşağıdaki amaç fonksiyonunu öteleyerek minimize etmek için çalışır (Höppner vd., 2000).

$$J_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^c \mu_{ij}^m \|x_i - v_j\|^2 \quad (33)$$

Burada m değeri bulanıklaştırma parametresidir $1 < m < \infty$ aralığında değerler alabilmektedir ama genelde değeri 2 olarak seçilmektedir. μ_{ij} ise i . elemanın j . öbekteki üyelik değeridir ve (34-36) eşitliklerindeki koşulları sağlamak zorundadır (Bezdek, 1981).

$$\mu_{ij} \in [0,1], \quad \forall i, j \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^c \mu_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (35)$$

$$0 < \sum_{i=1}^N \mu_{ij} < N, \quad \forall j \quad (36)$$

Fuzzy c-ortalama kümeleme algoritması (FCM) (Bezdek, 1981) basit bir yöntem olmasının yanı sıra, tüm bulanık kümeleme yöntemlerin içerisinde hala en yaygın kullanıma sahip olan bir yöntemdir. Temel olarak k-ortalama algoritmasına çok benzemekle beraber bulanık c-ortalamanın, k-ortalamadan en önemli farkı verilerin her birinin sadece bir sınıfa dahil edilme zorunluluğunun olmamasıdır (Işık ve Çamurcu, 2010). Bulanık c-ortalama kümeleme algoritması aşağıdaki gibi verilebilmektedir (Tezel, 2014).

Algoritma 2: Bulanık C-Ortalama Kümeleme Algoritması

Adım 1: Verileri (x_i) , önceden belirlenen öbek sayısını $c \in [2, N)$, bulanıklaştırma parametresini $(m > 0)$ ve durdurma kriterini $(\varepsilon > 0)$ algoritmaya giriş verileri olarak ver.

Adım 2: Başlangıç üyelik değerlerini $\mu^{(0)} = [\mu_{ij}]$, $[0,1)$ aralığında düzgün dağılımdan rastgele olarak belirle, çevrim sayacını bire ($t = 1$) eşitle.

Adım 3: t . çevrimini başlat,

Adım 4: Yeni üyelik değerlerini kullanarak öbek merkezlerini (37) eşitliği yardımıyla hesapla,

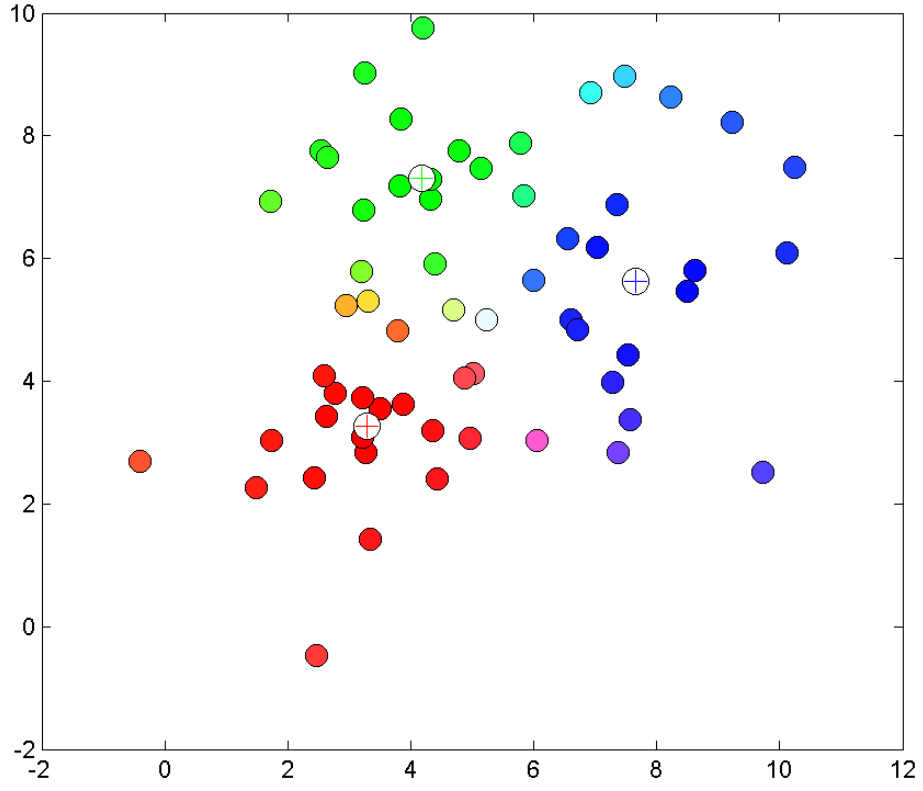
$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m x_i}{\sum_{i=1}^N \mu_{ij}^m}, \quad (j = 1, 2, \dots, c) \quad (37)$$

Adım 5: Üyelik değerlerini (38) eşitliği yardımıyla güncelleştir,

$$\mu_{ij} = \left(\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|x_i - v_j\|}{\|x_i - v_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right)^{-1} \quad (38)$$

Adım 6: (39) eşitsizliği sağlanıyorsa dur, yoksa t değerini bir artır ve Adım 3.'e giderek yeni çevrimi başlat,

$$\|\mu^{(t)} - \mu^{(t-1)}\| < \varepsilon \quad (39)$$



Şekil 17. Bulanık c-ortalama algoritmasıyla üç kümeye ayrılan veri

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bilişim alanında yaşanan gelişmeler şimdiye kadar analog olarak yapılan birçok işin sayısal ortama aktarılmasına neden olmuştur. Örneğin, otomobil üretiminde işçiler yerine otomatik sistemlerin geçmesi; tırpanlı buğday biçiminin yerine biçerdöverlerin geçmesi, daktilo yerine bilgisayarların geçmesi, mektup yerine e-postaların geçmesi, bekçiler yerine güvenlik kameralarının geçmesi, trafik polisleri ve istihbarat elemanlarının yerine mobese kameralarının geçmesi gibi yüzlerce farklı alan sayılabilir. Dolayısıyla bu çalışmada şimdiye kadar uzama ölçer ile yapılan bir ölçüm yüksek çözünürlüklü video kameralar ile yapılabilmesi için değişik yaklaşımlar geliştirilmiştir.

2.1. Video Tabanlı Şekil Değiştirme Ölçümü

Malzemelerin fiziksel özelliklerinin tespitinde yaygın olarak hidrolik çekme makineleri kullanılmaktadır. Çekme deneyinde malzemenin uzama miktarı mekanik uzama ölçerler (extensometer) ile yapılmaktadır. Öte yandan günümüzde yaygın diğer bir ölçme tekniği ise video uzama ölçerdir. Bu ölçme tekniği özellikle yüksek çözünürlüklü video kameraların gelişmesiyle birlikte yaygınlaşmaya başlamıştır. Video ölçerde kameranın farklı konumlarda olması gözetim cinsinden uzaklık ölçümlerinde farklılık gösterecektir. Bu işlem için önerilen iki farklı yaklaşım şeritli numune üzerine yapılan ölçüm ile rastgele kırletilmiş (ızgaralı) numune üzerine yapılan ölçümdür.

Bu çalışmada lastik numune örnek olarak kullanılmıştır.

2.1.1. Şeritli Numunede Uzama Ölçümü

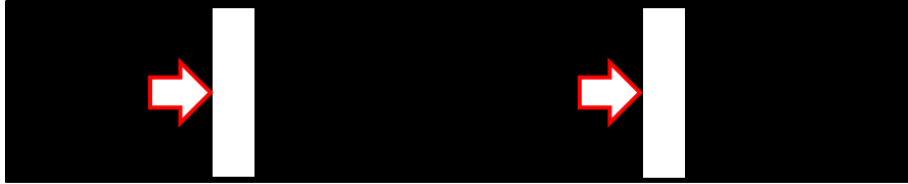
Şeritli numune üzerine numune renginin zıt renginde en az iki şerit çekilir (Şekil 18). Şeritler genelde daksil veya boya gibi malzemelerle yapılmaktadır. Bu şeritler arasındaki uzaklık mekanik olarak ölçülerek (L_0) değeri belirlenir.



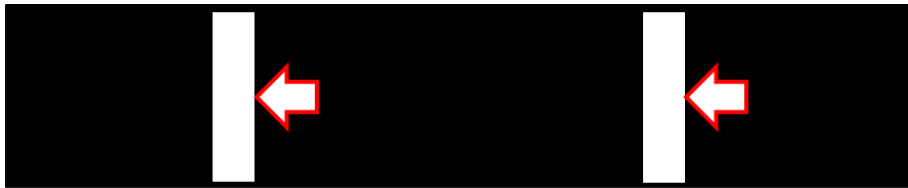
Şekil 18. Şeritli lastik numune

İstenirse ikiden çok şerit çekilerek numunenin değişik bölgelerindeki göreceli uzama miktarları ölçülebilir.

Video görüntülerindeki göreceli uzama miktarının belirlenebilmesi için numune üzerine çizilen şeritlerin her görüntüden sonra konumlarının belirlenmesi gerekir. Ancak şeritlerin genişlikleri birim genişlikte olmadığı için şerit genişliğinin sağ veya sol sınır çizgisi referans olarak seçilebilir. Video görüntüleri gri tonlarda olduğundan numune görüntüleri ya siyaha yakın gri tonda ya da beyaza yakın gri tonlarda olmaktadır. Bu durumda şeritler beyaz numunelerde siyah, siyah numunelerde beyaz renginde olmaktadır. Her iki durumda da şeritlerin sol ve sağ sınırlarını belirlemek için siyahtan-beyaza veya beyazdan-siyaha geçiş (Şekil 19) gibi bir yaklaşım kullanıldığında şerit sınırları bulunabilmektedir.



(a)



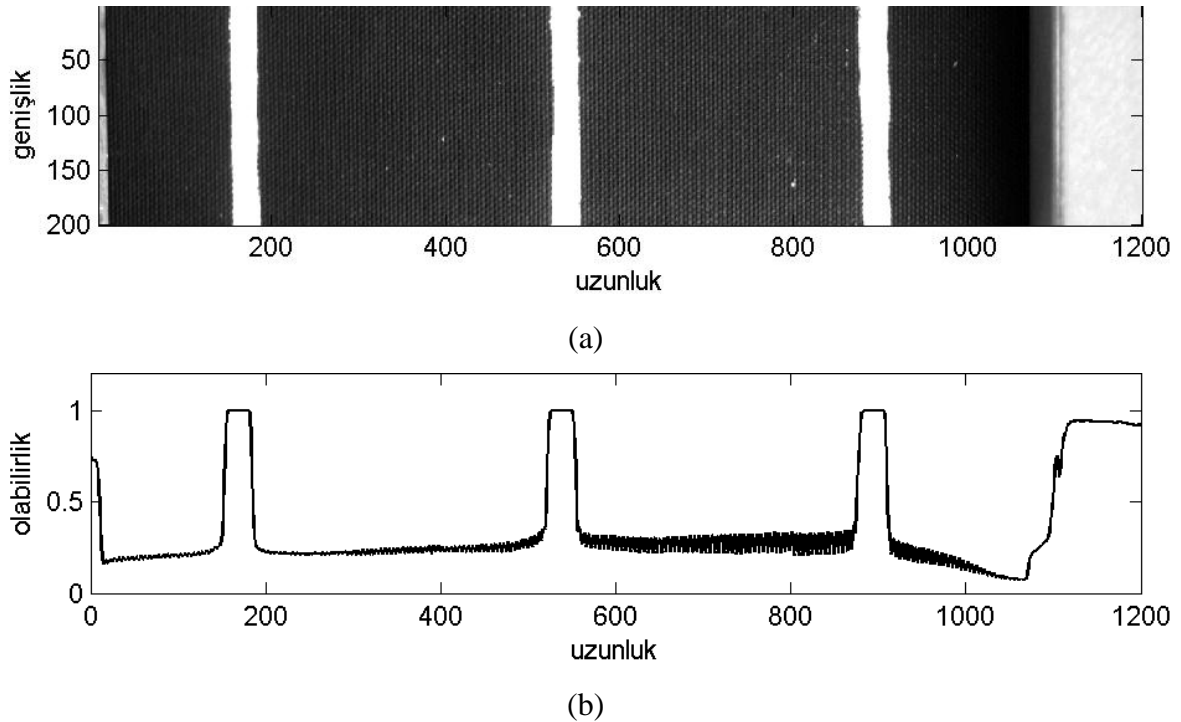
(b)

Şekil 19. Şerit sınırlarının belirlenmesi; (a) Siyahtan-beyaza geçiş; (b) beyazdan siyaha geçiş.

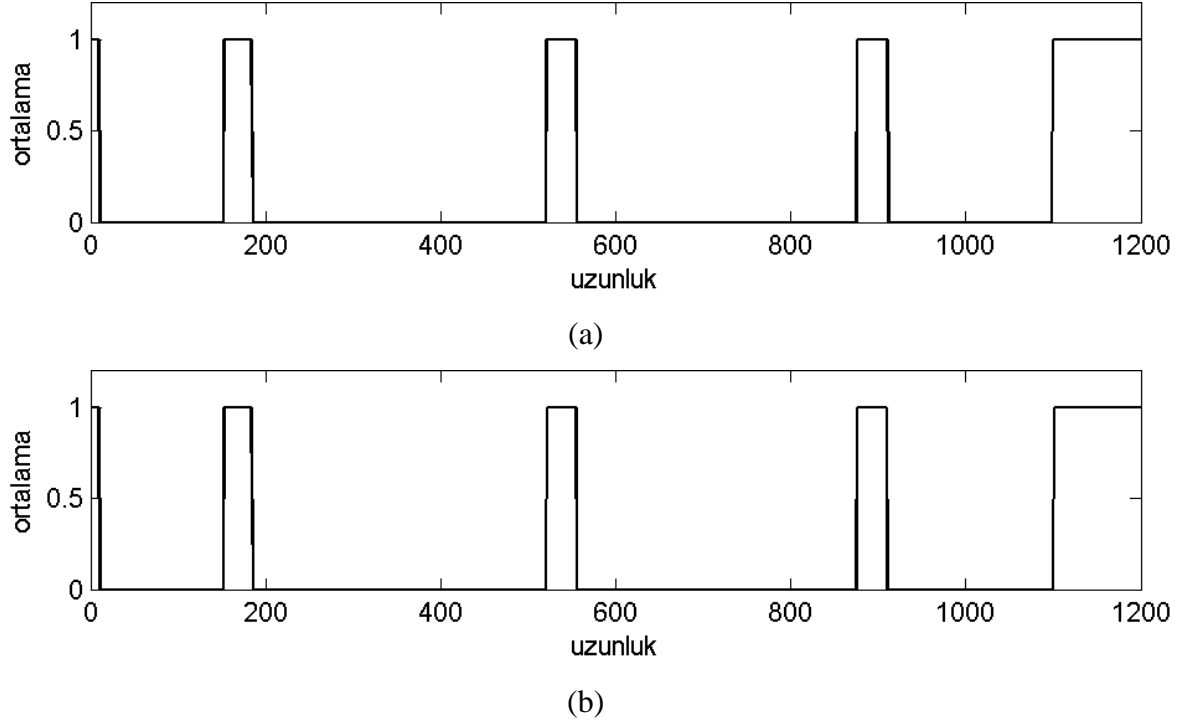
2.1.1.1. Eşikleme ile Sınır Tespiti

Şerit sınırlarının belirlenebilmesi için numunenin video görüntüsü (Şekil 20(a)) genişlik yönünde ortalama renk değeri hesaplanırsa Şekil 20(b)'deki grafik elde edilir. Video görüntüsünün sol ve sağ kısımlarındaki çekme makinesinin çenelerinin görüntüsü görülmektedir. Bu çene görüntüleri ortalama grafiğinde bir şerit gibi davranarak yüksek bir ortalama değer göstermektedir.

Ortalama grafiğindeki ortalama değerleri grafikte görüldüğü gibi iki değer etrafında toplanmaktadır. Sıfıra yakın olan değerler numunenin arka plan görüntüsünü temsil ederken bire yakın olanlar şerit görüntüsünü temsil etmektedir. Dolayısıyla bu iki değer kümesini birbirinden ayırt etmek için kümeleme algoritmaları tercih edilebilir. Ya da daha basit bir yaklaşımla en büyük değer ile en küçük değerın ortalaması alınarak bir eşik değeri belirlenip bu değere göre bir eşikleme yapılabilir. Daha da basit olan yaklaşım eşik değeri $T = 0.5$ seçilerek yapılan eşiklemedir (Şekil 21).



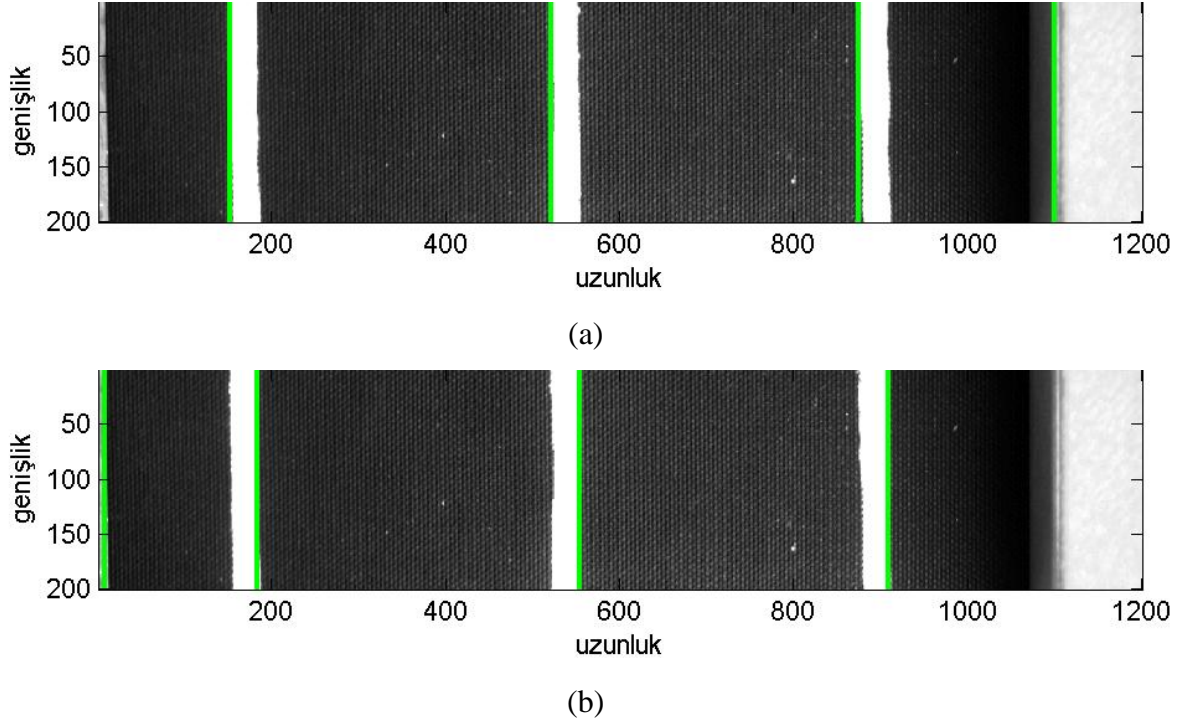
Şekil 20. Şeritli video görüntüsündeki genişlik yönündeki ortalama değerler; (a) Başlangıç video görüntüsü; (b) Video görüntüsündeki gözleklerin genişlik yönünde ortalama değerleri.



Şekil 21. Ortalama grafiğinin eşiklenmesi; (a) Eşik değeri ($T = 0.5$) olan eşikleme; (b) Eşik değeri ($T = 0.535$) olan eşikleme.

Ortalama değerinin eşiklenmesiyle elde edilen ortalama değerler dizisinde sıfırdan-bire geçiş aynı zamanda siyahtan-beyaza geçişi temsil etmektedir. Aynı şekilde birden-sıfıra geçiş beyazdan-siyaha geçişi temsil etmektedir. Sıfırdan-bire geçiş noktalarının belirlenip video görüntüsü üzerindeki görünümü (Şekil 22(a)) gösterilmiştir. Aynı şekilde birden-sıfıra geçiş noktalarının belirlenip video görüntüsü üzerindeki görünümü (Şekil 22(a)) gösterilmiştir.

Şeritli numune ölçümü sadece boyuna değişim için uygun çözümler vermektedir. Bu yöntemin enine daralmada veya genişlemede doğrusal olmayan bir değişimden dolayı uygun olmayacağı düşünülmektedir.



Şekil 22. Şerit sınırlarının belirlenmesi; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları

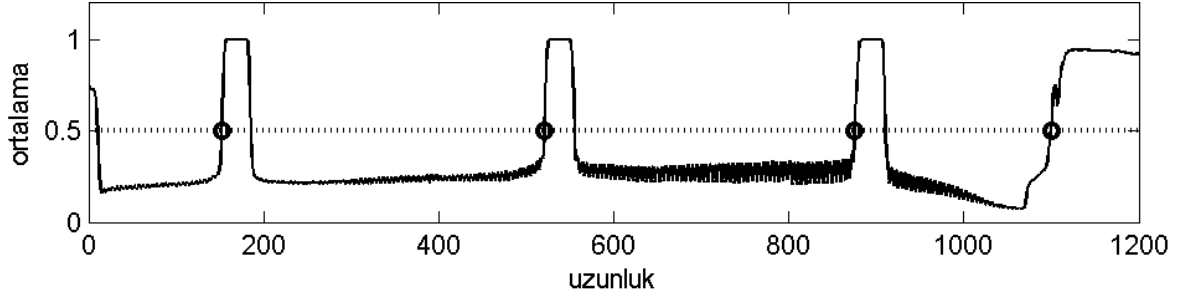
2.1.1.2. İç Kestirim ile Sınır Tespiti

Şekil 20(b)'deki ortalama değerleri ($T = 0.5$) yatay eşik doğrusunun kestiği x (uzunluk) konumları iç kestirim (interpolasyon) yöntemleri (Keys, 1981) kullanılabilir. Burada doğrusal iç kestirim tekniği tercih edilmiştir. Bu tekniğe göre iki farklı renk geçişinin sınırları Tablo 1'de 1/10000 hassasiyetinde gösterilmiştir.

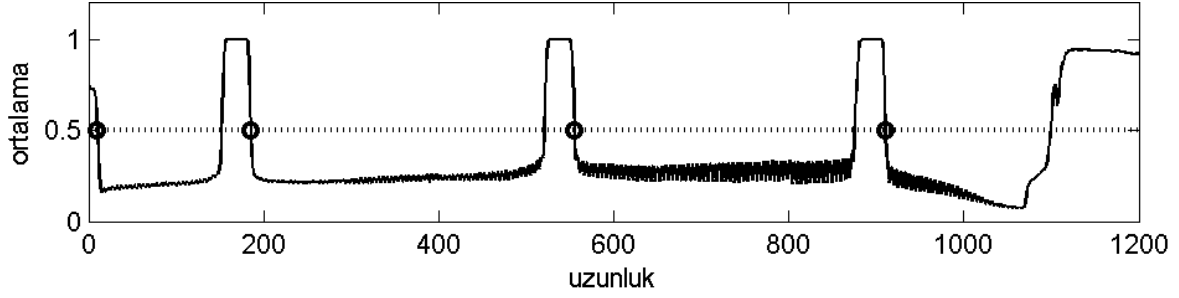
Tablo 1. İç kestirim yöntemiyle hassas sınır tespiti

Siyahtan-Beyaza	Beyazdan-Siyaha
152,2676	9,8006
520,9663	184,8550
875,2540	554,7918
1099,5039	910,0658

Bulunan bu sınırlar ortalama değerler üzerinde ayrı ayrı yuvarlak daireler ile gösterilmiştir (Şekil 23).

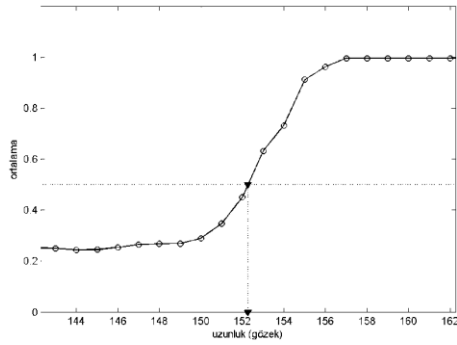


(a)

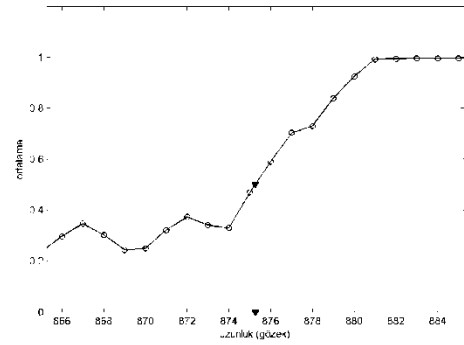


(b)

Şekil 23. İç kestirim ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.



(a)



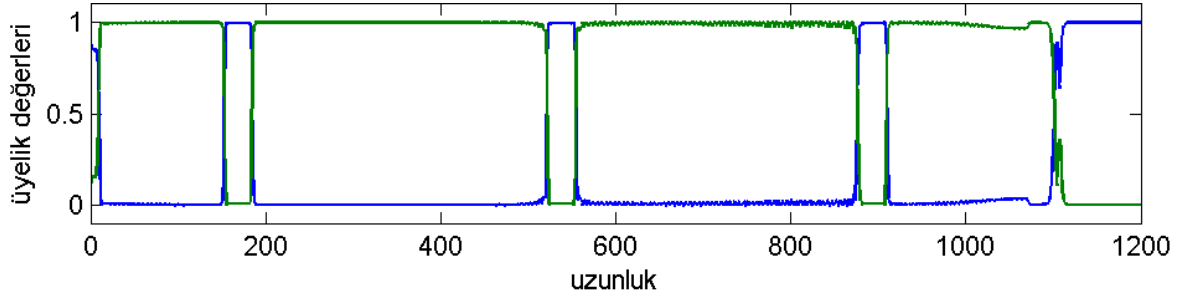
(b)

Şekil 24. İç kestirim ile belirlenen sınır noktaları; (a) Siyahtan-beyaza geçiş için belirlenen ilk sınırın konumu; (b) Siyahtan-beyaza geçiş için belirlenen üçüncü sınırın konumu

Sayısal görüntülerde gözet konumları tam sayılar ile gösterilmektedir (Gonzalez ve Woods, 2002). Ancak iç kestirim tekniği ile bulunan bu sınırlar, ondalıklı basamağa sahip olduklarından bunların alt-gözet değerleri olduğu anlamına gelmektedir. Alt-gözetler ile ölçümlerde istenilen hassasiyet elde edilmektedir. Ancak video görüntüleri herhangi bir hareket olmasa bile küçük değişimler göstermektedir. Bu değişimler özellikle ışık yetersizliklerinde açık bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu küçük değişimler kumlama gürültüsü olarak isimlendirilmektedir.

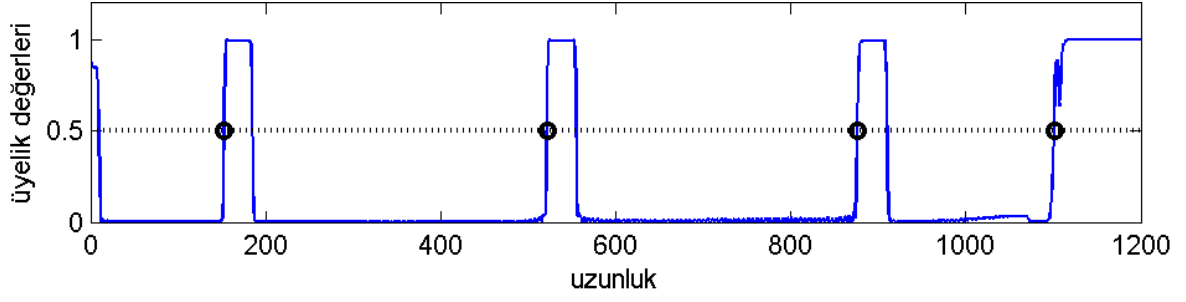
2.1.1.3. Kümeleme ile Sınır Tespiti

Şekil 20(b)'deki ortalama değerleri iki kümeli bulanık c-ortalama kümeleme algoritması yardımıyla her gözek noktasının üyelik değerleri bulunmuştur (Şekil 25). Bulunan bu üyelik değerlerinin kesiştiği x (uzunluk) konumları doğrusal iç kestirim (interpolasyon) yöntemi (Keys, 1981) ile tespit edilmiştir. Öte yandan bulanık kümeleme algoritması ile iki kümeye bölünen verilerin üyelik eğrilerinin birbirini kestiği noktalar (35) eşitliğine göre üyelik değerlerinin 0,5 değerine karşılık gelen noktalardır. Bu durumda herhangi bir üyelik eğrisi ile $y = 0,5$ doğrusunun kesiştiği nokta sınır olarak alınabilir (Şekil 26 ve Şekil 27).

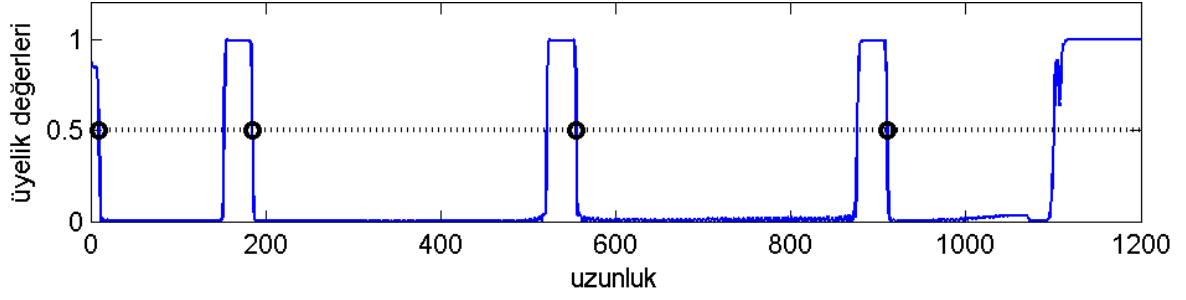


Şekil 25. Bulanık kümeleme ile üyelik değerlerinin belirlenmesi.

Şekil 26'de birinci kümenin üyelik değerlerine göre bir sınır tespiti yapılırken, Şekil 27'da ikinci kümenin üyelik değerlerine göre bir eşikleme yapılmıştır.

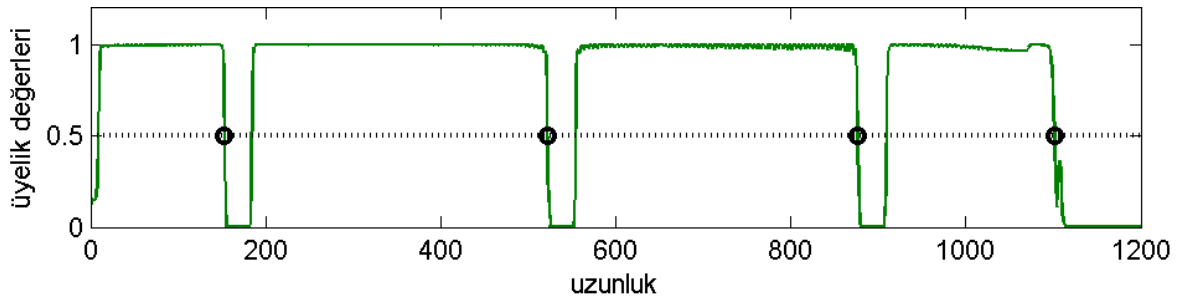


(a)

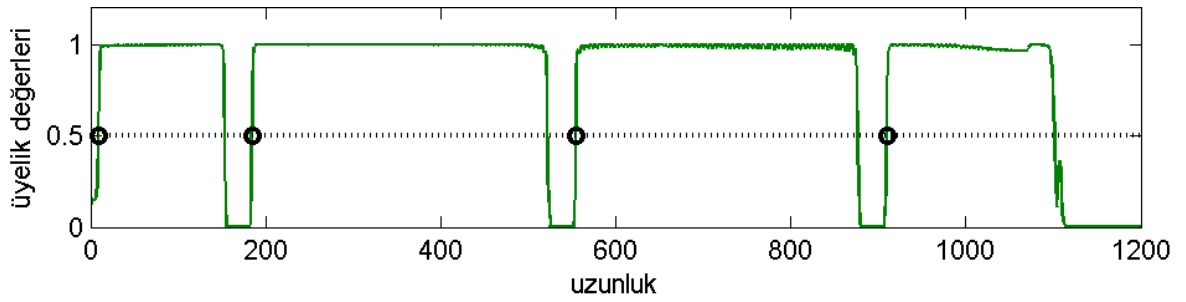


(b)

Şekil 26. Bulanık kümeleme ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.



(a)



(b)

Şekil 27. Bulanık kümeleme ile sınır değerlerinin tespiti; (a) Siyahtan-beyaza geçiş sınırları; (b) Beyazdan-siyaha geçiş sınırları.

İki kümenin üyelik değerlerine göre yapılan sınır tespitleri aynı sonucu vermektedir. Geçiş bölgesine göre iki farklı renk geçişinin sınırları Tablo 2’de 1/10000 hassasiyetinde gösterilmiştir.

Tablo 2. Üyelik değerlerinin kesişimi ile hassas sınır tespiti

Siyahtan-Beyaza	Beyazdan-Siyaha
152,7144	9,0268
521,4941	184,4451
875,9499	554,4388
1100,9175	909,5689

2.1.1.4. Oynaklığın Giderilmesi

Şeritli numunelerde yapılan uzama ölçümlerinde, video görüntüleri yetersiz ışık oranına sahip olduğundan kumlanma etkisi göstermektedir. Kumlanma etkisi görüntülerdeki rastgele gürültülerin oluşturduğu farklılıklardır. Bu farklılıklar gerçek görüntüde herhangi bir değişiklik olmasa bile video görüntüsünde değişikliğe neden olmaktadır. Bu ise hassas olan sınır değerlerinin değişmesine neden olur.

Kumlanma sorununu çözmek için video görüntülerinin zamansal boyutta kısım (tercihen 10 çerçeve) ortalamasının alınması rastgele gürültüleri azaltacaktır (40).

$$I'(x, y, t_i) = \sum_{j=i-10}^i I(x, y, t_j) \quad (40)$$

Ancak bu durumda da son çerçevedeki değişim ortalamadan dolayı hassas bir biçimde ölçülemeyecektir. Soruna başka bir açıdan yaklaşılsa ağırlıklı ortalama daha iyi bir yaklaşım gibi görülebilir. Bu durumda son çerçevenin ağırlığı yüksek olurken önceki çerçevelerin ağırlığı giderek düşmelidir. Bu ağırlıklandırma için,

$$I'(x, y, t_i) = \frac{\sum_{j=i-10}^i I(x, y, t_j) e^{a(t_i-t_j)}}{\sum_{j=i-10}^i e^{a(t_i-t_j)}} \quad (41)$$

biçiminde üstel bir fonksiyon seçilebilir. Bu fonksiyondaki a değeri ağırlıklandırma katsayı olarak verilebilir.

Öte yandan görüntüde gürültüleri bastırmak yerine sınır noktalarındaki oynaklığın giderilmesi daha az işlem hacmi ve daha doğru bir sonuç vermesi beklenmektedir. Bunun için sınır noktalarının kısa zaman dilimlerinde doğrusal değişim gösterdiği varsayılmaktadır. Ayrıca kamera tarafından alınan görüntülerin eşit zaman dilimlerinde örneklendiği de kabul edilmektedir. Bu durumda i . çerçevenin sınır değişimi kendisinden önceki 10 çerçevenin sınır noktalarına göre doğrusal regresyona sokularak hesaplanabilir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken bir nokta, sınır değerlerinin tutulması için iki ayrı dizi gerekmesidir. Birinci dizi değeri çerçevelerden elde edilen oynak sınır değerini tutarken, diğeri kararlı sınır değerini tutmaktadır. Regresyon işlemi her defasında oynak değerler yardımıyla yapılmaktadır. Kararlı sınır değerlerinde ise sistem tarafından şeritlerin konum bilgisi saklanmaktadır. Bu işlem sayesinde kararlı sınır konumları daha hassas ve güvenilir sonuçlar vermektedir.

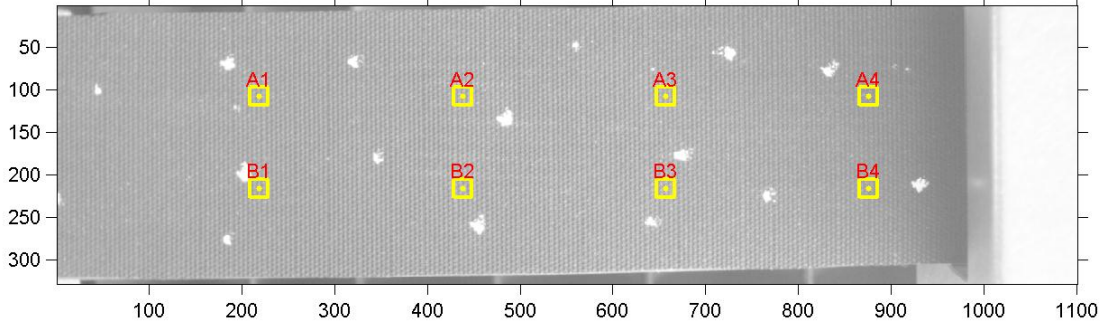
2.1.2. Izgaralı Numunede Şekil Değiştirme Ölçümü

Şeritli numunede uzama ölçümlerinin birçok eksikliği söz konusudur. Bu eksikliklerin en önemlisi şeritli numunedeki ölçümlerde sadece boyuna değişim ölçülürken, enine değişimin doğrusal olamayan değişimini ölçmekte yetersiz kalmasıdır. Bu durumda şeritli numune yerine izgaralı numune ölçümleri tercih edilmiştir. Bu ölçümlerde numunenin yüzeysel değişimi ele alınarak incelenmektedir. Yüzeysel değişim kamera sisteminde net okunmuyorsa görüntü çözünürlüğü artırılabilir. Bazı durumlarda ise numune yüzeyi tekdüze bir görüntüye sahip olabilir. Bu yüzeysel değişim okunmasını engeller. Bu durumda numunenin yüzeyi herhangi bir madde ile kirletilir (Şekil 28).



Şekil 28. Kirletilmiş lastik numune

Kirletilmiş numunenin çekme işleminden önce video görüntüsü üzerinde sayısal ızgaralama ile başlangıç ölçü noktalarının konumu belirlenir (Şekil 29). Her ölçü konumu en yönünde alfabetik, uzunluk yönünde ise sayısal olarak etiketlenmiştir (A1, B1, ...).



Şekil 29. Başlangıç ölçü konumları

Başlangıç ölçü konumları belirlendikten sonra çekme işlemi yapılarak her yeni çerçevede bu konumlar güncellenir. Güncelleme işleminin gerçekleştirilmesi için her ölçü noktasının bir sonraki çerçevede hangi konuma taşındığının belirlenmesi gerekir. Bu işlemi gerçekleştirmek için ölçü noktasının yeni çerçevede kendisi de dahil komşuluklarına bakılır. Bakılan gözleklerden hangisi ölçü noktasındaki gözlek değerine yakınsa o nokta yeni nokta olarak alınır. Ancak birebir renk değerlerinin karşılaştırılması çoğu zaman yanlış sonuçlar verebilir. Dolayısıyla bu sorunu çözmek için ölçü noktasının n komşuluğundaki gözlekler ile bir sonraki çerçevedeki ölçü noktası komşuluklarındaki gözleklerin karşılaştırılması gerekir. Bu işlem için iki ayrı yöntem kullanılabilir. Bunlar hata kareleri ile korelasyon katsayılarıdır. Hata kareleri,

$$d^2(i, j) = \sum_{u=-n}^n \sum_{v=-n}^n (I_1(x+u, y+v) - I_2(x+u+i, y+v+j))^2, \quad (42)$$

$$i, j = -m, \dots, m$$

eşitliği ile verilmektedir. Burada n hesaplama komşuluğunu verirken, m arama komşuluğunu vermektedir. Aynı şekilde korelasyon katsayılarına göre arama yapılırsa,

$$\gamma(i, j) = \frac{\sum_u \sum_v (I_1(x+u, y+v) - \bar{\mu}_1)(I_2(x+u+i, y+v+j) - \bar{\mu}_2)}{\sqrt{\sum_u \sum_v (I_1(x+u, y+v) - \bar{\mu}_1)^2 \sum_x \sum_y (I_2(x+u+i, y+v+j) - \bar{\mu}_2)^2}} \quad (43)$$

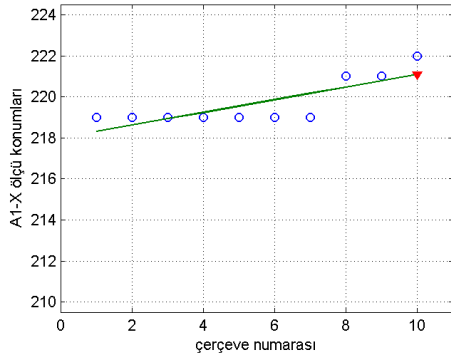
$$i, j = -m, \dots, m$$

eşitliği elde edilir. Bu eşitlikteki elde edilen tüm korelasyon katsayılarının en büyüğünün bulunduğu indise (\hat{i}, \hat{j}) göre yeni konumlar,

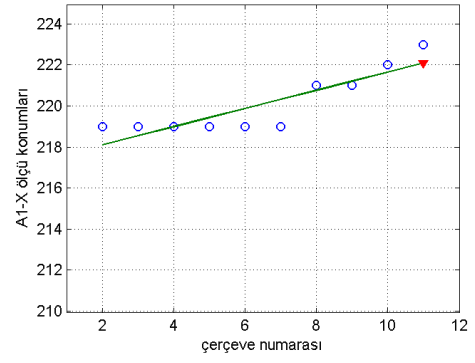
$$\hat{x} = x + \hat{i} \quad ve \quad \hat{y} = y + \hat{j} \quad (44)$$

biçiminde bulunur. Izgaralı yöntemde ölçü noktalarının konumunu belirlerken kullanılan komşuluk sayısı çekme aletinin hızına ve zamansal örnekleme oranına bağlı olarak değiştirilebilir.

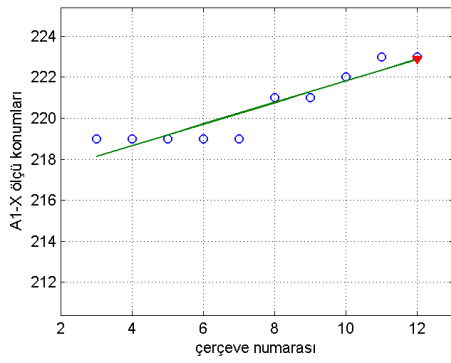
Bu çalışmada hassasiyetinden dolayı korelasyon katsayıları tercih edilmiştir. Korelasyon katsayıları yöntemine göre elde edilecek tüm konumlar gözek cinsinden tam sayılar olacaktır. Ancak gerçekte sürekli bir değişim gösteren yer değiştirmeler kamera çözünürlüğünden dolayı kesikli olarak alınmaktadır. Kamera çözünürlüğünü aşmak için gözek tabanlı ondalıklı ölçü konumları bulmasının gerekir. Bu durumda ölçü noktalarının kısa zaman dilimlerinde doğrusal değişim gösterdiği kamera tarafından alınan görüntülerin eşit zaman dilimlerinde örneklendiği varsayılmaktadır. Dolayısıyla k. çerçevedeki bir ölçü noktasının değişimini kestirmek için kendisinden önceki 10 çerçevedeki hesaplanan ölçü konumları doğrusal regresyona sokularak şimdiki ölçü noktasının konumu belirlenir. Yalnız burada dikkat edilmesi gereken nokta, ölçü konumlarının tutulması için iki ayrı dizi gerekmesidir. Birinci dizi değeri çerçevelerden elde edilen tam sayılı konumlar olurken, diğeri regresyon ile hesaplanan ondalıklı değerlerdir. Regresyon işlemi her tam sayılı konumlar ile yapılmaktadır. Bu işlem ile ölçü konumları daha hassas bir değerde hesaplanabilmektedir.



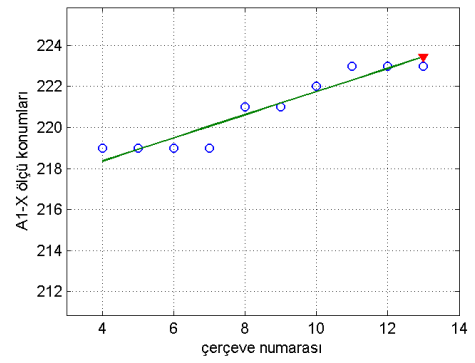
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 30. Uyarlamalı doğrusal regresyon ile sınır değerlerinin tespiti; (a) İlk olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (b) ikinci olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (c) Üçüncü olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu; (d) Dördüncü olarak seçilen 10 çerçeve için uygulanan regresyon doğrusu

2.2. Örnek Deneyler

Uygulama örneği olarak lastik bir numune seçilmiştir. Bu numune ile Besmak Laboratuvar ve İnşaat Test Makineleri şirketinin protip olarak ürettiği maksimum 400kg kuvvete sahip bir çekme deney aleti yardımıyla gerçekleştirilmiştir.



Şekil 31. Ölçüm için kullanılan çekme makinesi

Video işleme için ise Allied Visions firmasının Stingray F-201 model kamerası (Şekil 32) kullanılmıştır. Kameranın maksimum çözünürlüğü 1624×1234 'dür.

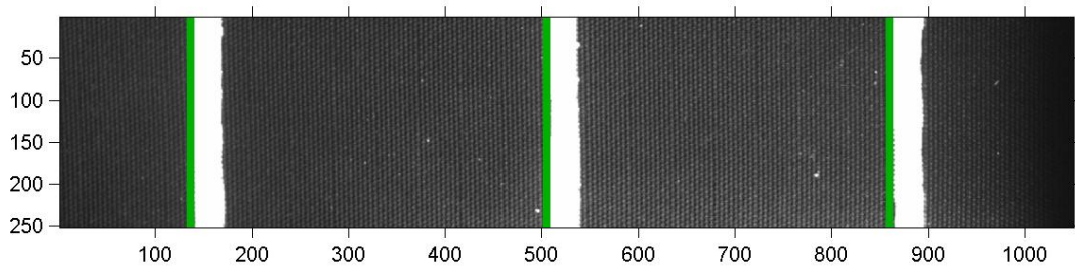


Şekil 32. Ölçüm için kullanılan yüksek çözünürlüklü kamera

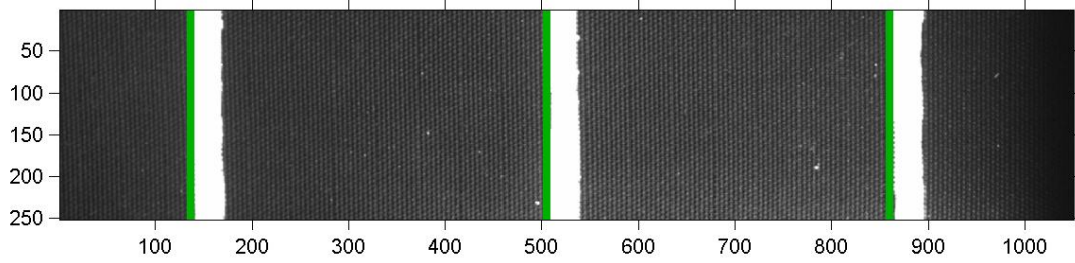
Gözetek cinsinden ölçülen uzunlukların santimetre cinsine çevrilmesi için oranlama tekniği kullanılmıştır. Örneğin başlangıç konumunda 50 gözetek 1 santimetreye karşılık gelen numune için 200 gözetek uzama tespit edilmişse numunenin 4 santimetre uzadığı anlamına gelmektedir.

2.2.1. Şeritli Numune İçin Uygulama Deneyi

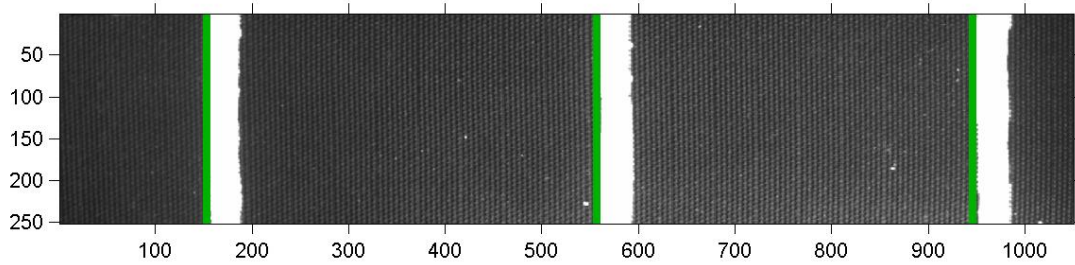
Seçilen numunenin başlangıç durumu Şekil 33'de verilmiştir. Numune üzerinde toplam üç tane beyaz şerit çizilmiş ve bu şeritlerin siyahtan-beyaza geçiş sınırlarının (yeşil çizgiler) konumları Tablo 3'te verilmiştir. Çekme test makinesi çalışmadığı için 18. çerçeveye kadar bir hareket söz konusu değildir (Şekil 34). Daha sonraki 100, 200, 400, 600 ve 636. çerçevelerdeki değişimler Tablo 3'te verilmiş ve Şekil 29-38'te gösterilmiştir. 636. çerçeveden sonra numunede kopma meydana gelmiştir.



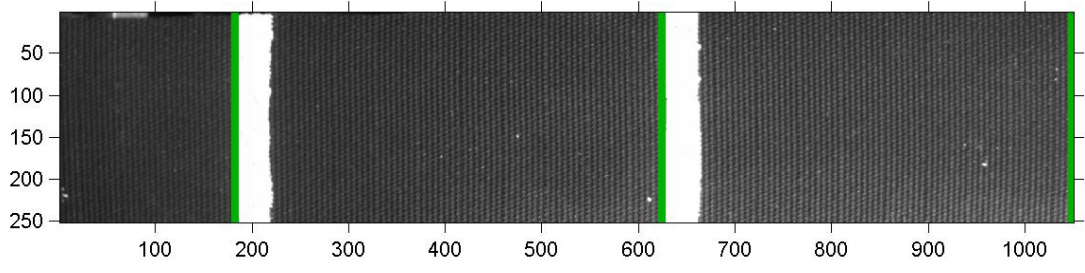
Şekil 33. Seçilen örneğin başlangıç durumu



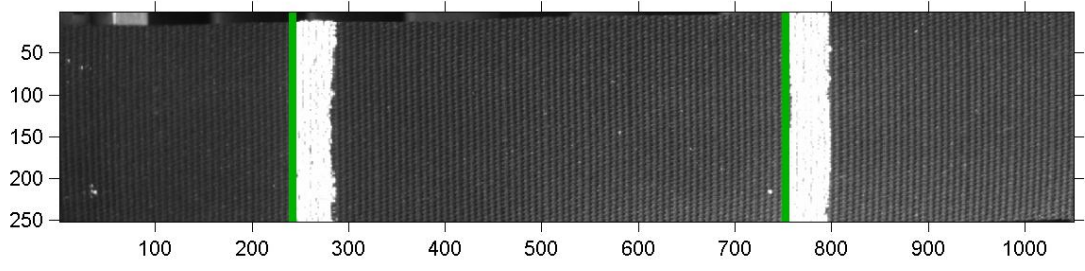
Şekil 34. Seçilen örneğin 18. çerçevedeki durumu



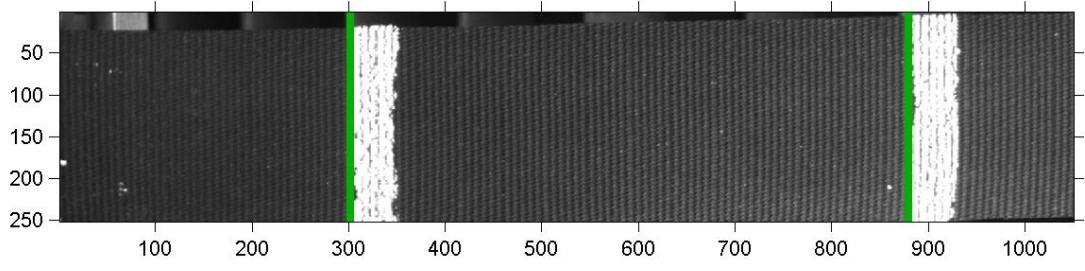
Şekil 35. Seçilen örneğin 100. çerçevedeki durumu



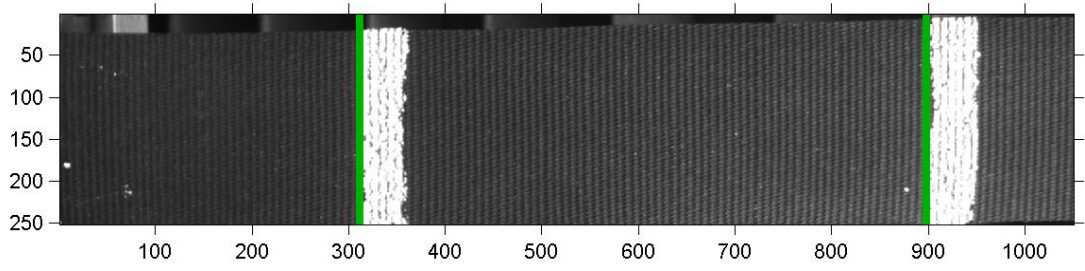
Şekil 36. Seçilen örneğin 200. çerçevedeki durumu



Şekil 37. Seçilen örneğin 400. çerçevedeki durumu



Şekil 38. Seçilen örneğin 600. çerçevedeki durumu

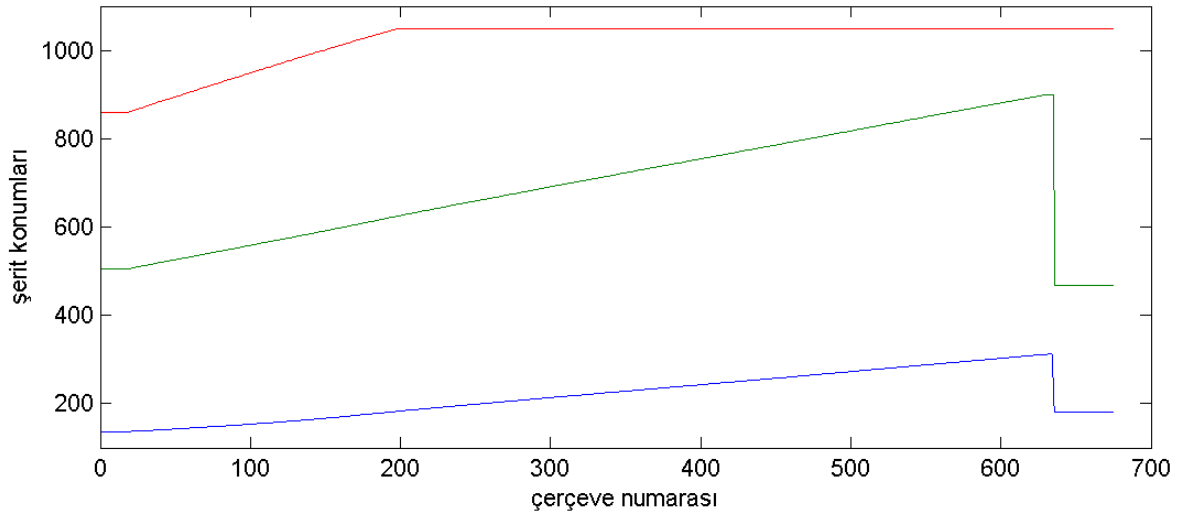


Şekil 39. Seçilen örneğin 636. çerçevedeki durumu

Tablo 3. Şeritlerin siyahtan-beyaza geçiş konumları

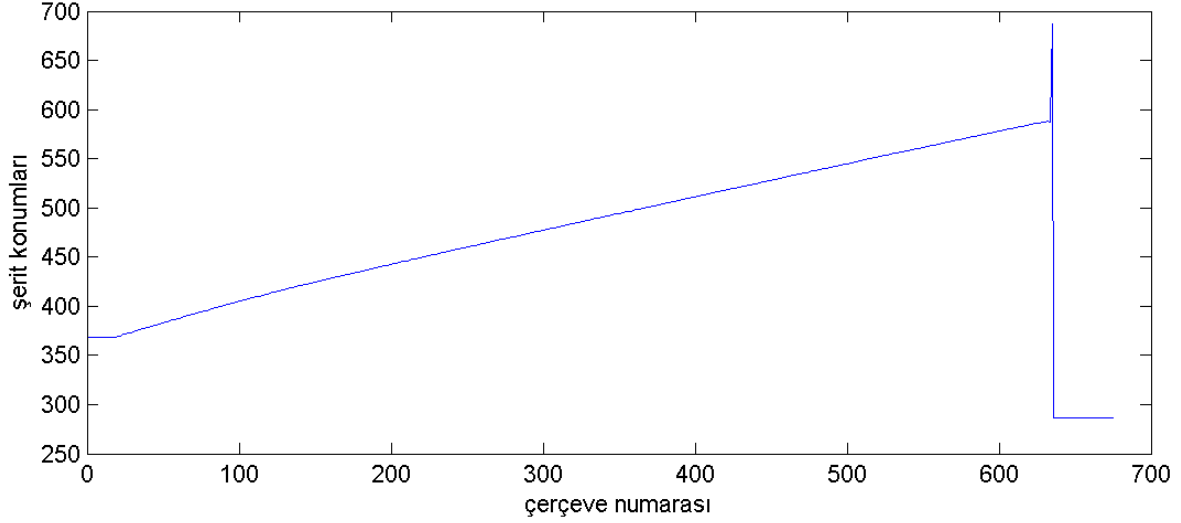
Çerçeve numarası	1.Şeritin konumu	2.Şeritin konumu	3.Şeritin konumu
1	137,2252	505,5982	860,3164
18	137,1779	505,5747	860,3574
100	153,6319	558,6449	949,1232
200	183,3622	625,8474	1049,4172
400	243,1298	754,3262	1049,4172
600	302,9414	881,1140	1049,4172
636	311,6755	898,7058	1049,4172

Örnek numunedeki şeritlerin tüm çerçevelerdeki değişimi Şekil 40'ta verilmiştir. Şekil 40'a göre başlangıçta hareket yokken 18. çerçeveden sonra doğrusal bir hareket meydana gelmiştir. 200. çerçeveden sonra sondaki şerit kameranın açısından çıktığı için hareketsiz olarak algılanmıştır. 636. çerçeveden sonra numune koptuğundan gerilen numune eski konuma gelmeye çalışmıştır.



Şekil 40. Örnek numunedeki şeritlerin konum değişimleri.

Numunedeki 1. şerit ile 2. şerit arasındaki uzama miktarı Şekil 41'de verilmiştir. Bu grafikte uzamanın doğrusal bir yapıda gerçekleştiği söylenebilir.

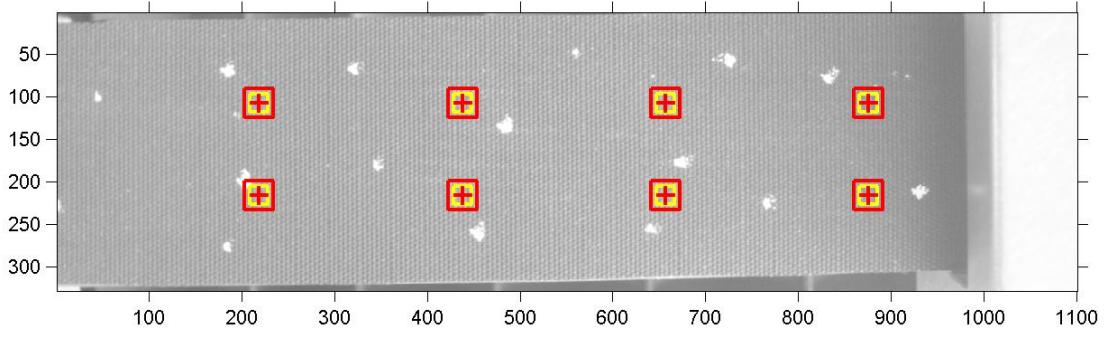


Şekil 41. Numunedeki 1. şerit ile 2. şerit arasındaki uzama miktarı

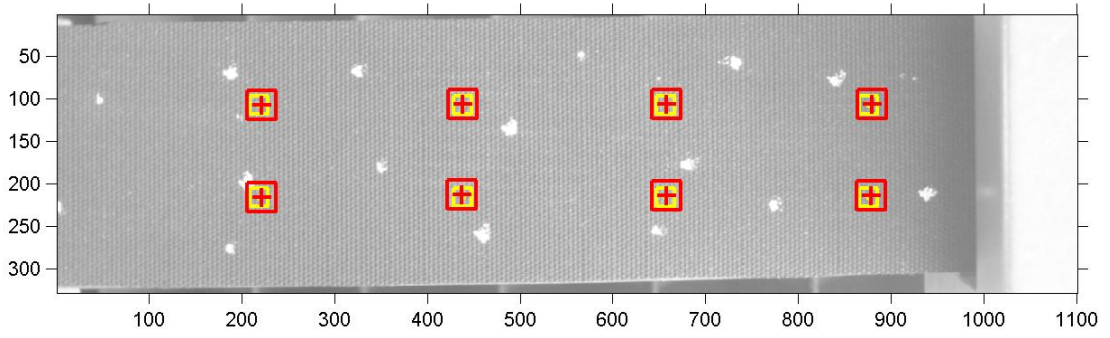
2.3. Izgaralı Numune İçin Uygulama Örneği

Izgaralı numune örneği şeritli numune örneğinde olduğu gibi lastik bir numune olarak alınmıştır. Numune üzerinde başlangıçta 2 satır 4 sütun olmak üzere eşit uzaklıklarda 8 ölçü noktası belirlenmiştir. Bu noktaların her çerçevedeki konumları güncellenerek kopma anına kadar olan değişim kayıt edilmiştir (Şekil 40-47).

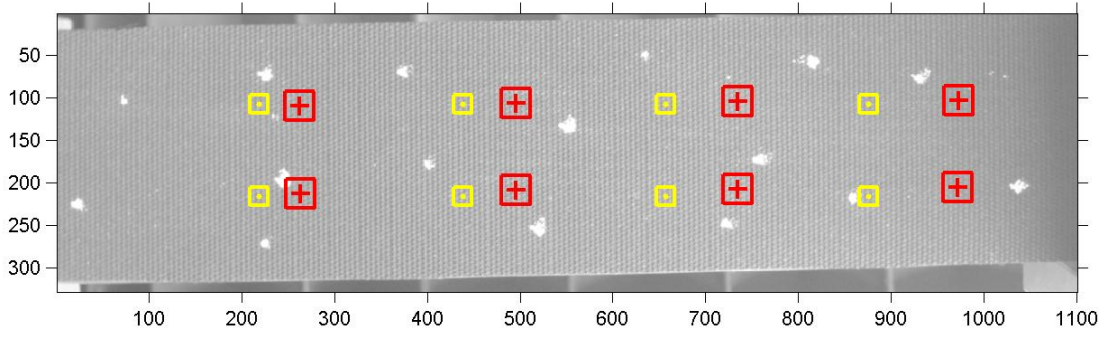
Şekil 42'de başlangıç ölçü konumları ve değişen ölçü konumları üst üste gösterilmiştir. Şekil 43'te çekme işlemi başlamış ve başlangıç ölçü konumları ile güncel ölçü konumları farklılaşmaya başlamıştır. Şekil 44'de 100. çerçeveye gelinmiş ve başlangıç ile ölçü noktaları birbirlerinden oldukça uzaklaşmıştır. Aynı zamanda numune çenelerin konumdan dolayı yukarı doğru kaymıştır. Buna rağmen görüntünün enine daralması güncel ölçü noktalarının başlangıç noktalarına göre birbirine yaklaştığı görülmektedir. Şekil 45'te 200. çerçevede son ölçü noktaları sağ sınıra yaklaşmıştır. Şekil 46'da son ölçü noktaları sınırı geçtiği için hesaplanmamıştır. Şekil 47'de (750,0) konumu dolaylarında numunede bir açılma gözlenmiştir. Şekil 48'de açıklık iyice belirginleşmiş ve kopmaya yaklaştığının sinyallerini vermektedir. Son olarak Şekil 49'da kopma işlemi korelasyon sonuçlarını eşik değerine kadar düşürdüğü için kayıt işlemi durdurulmuş ve deney sonuçlandırılmıştır.



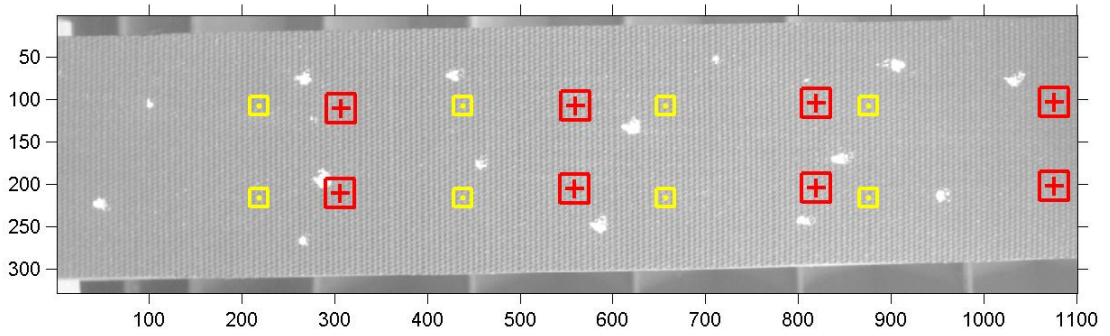
Şekil 42. Çekme deneyinde 1. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü



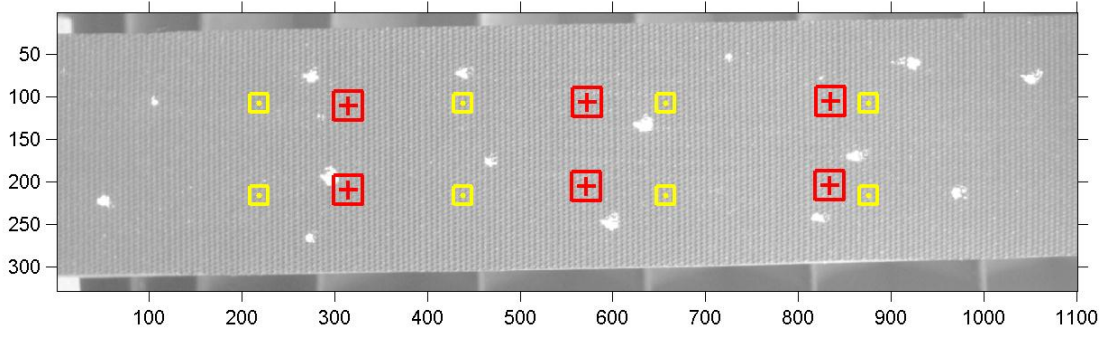
Şekil 43. Çekme deneyinde 23. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü



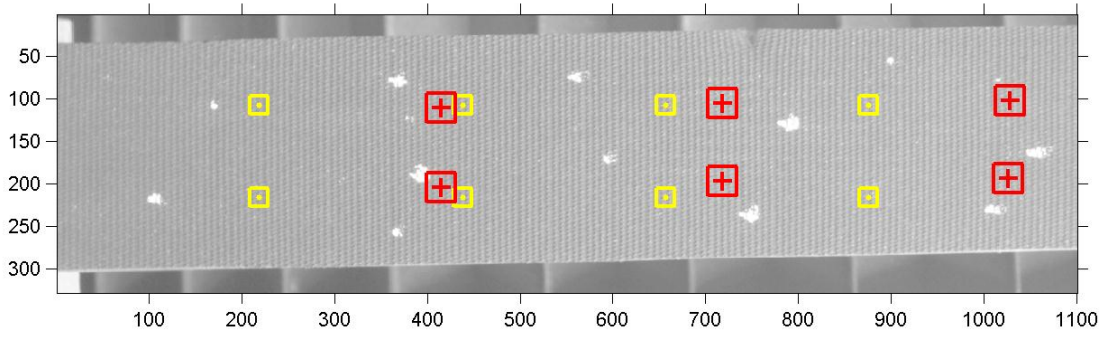
Şekil 44. Çekme deneyinde 100. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü



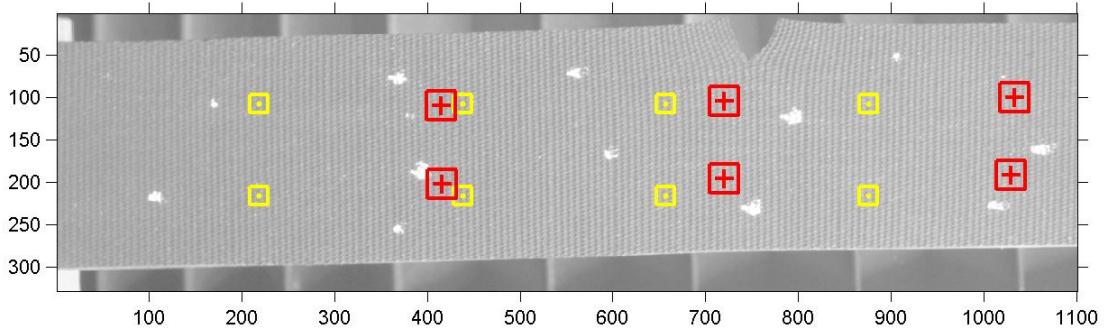
Şekil 45. Çekme deneyinde 200. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü



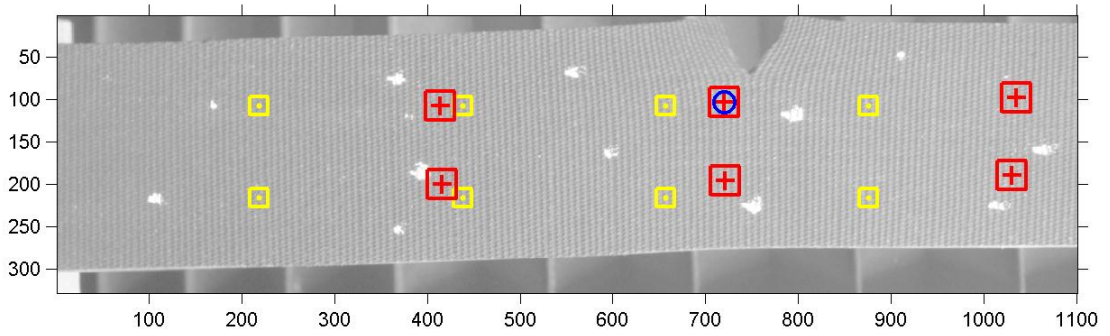
Şekil 46. Çekme deneyinde 219. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü



Şekil 47. Çekme deneyinde 454. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü

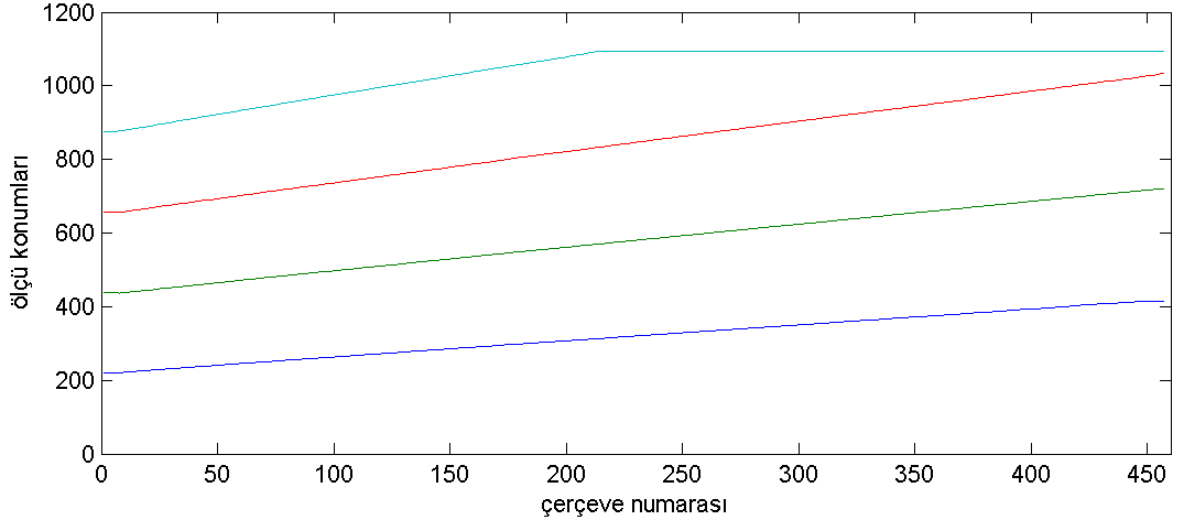


Şekil 48. Çekme deneyinde 458. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü

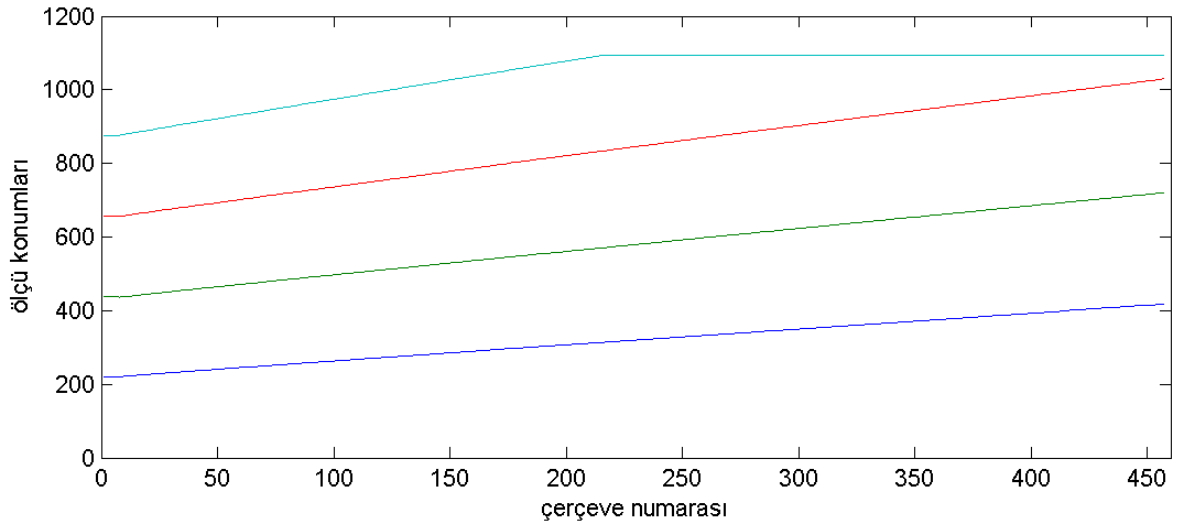


Şekil 49. Çekme deneyinde 460. çerçeve ve ölçü konumlarının görünümü

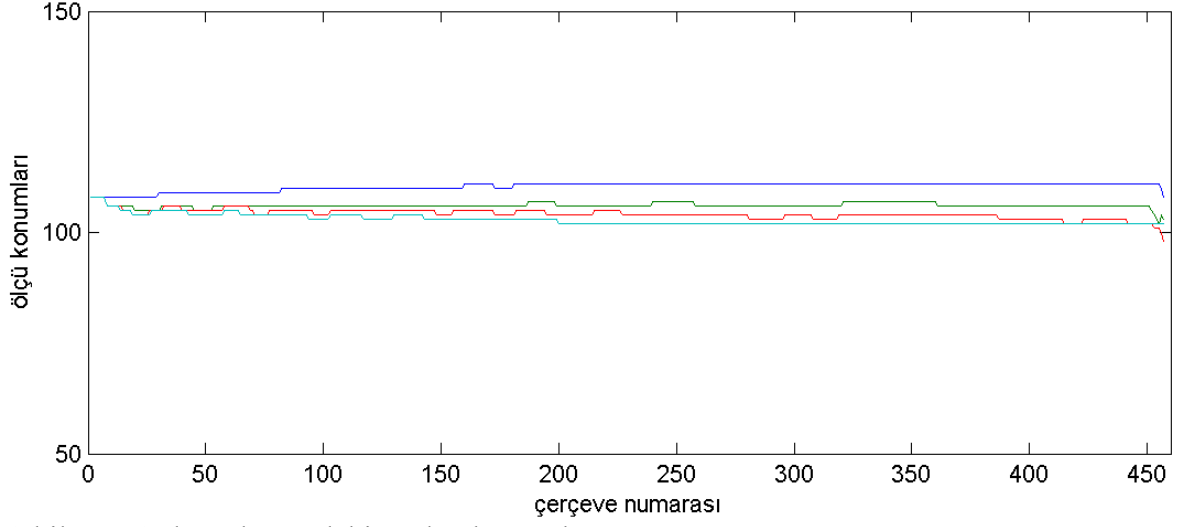
Çekme deneyi sonucunda elde edilen ölçü noktalarının konumları tam sayılı değerlerden oluşmaktadır. Bu değerlerin grafikleri Şekil 50-Şekil 53’de verilmektedir.



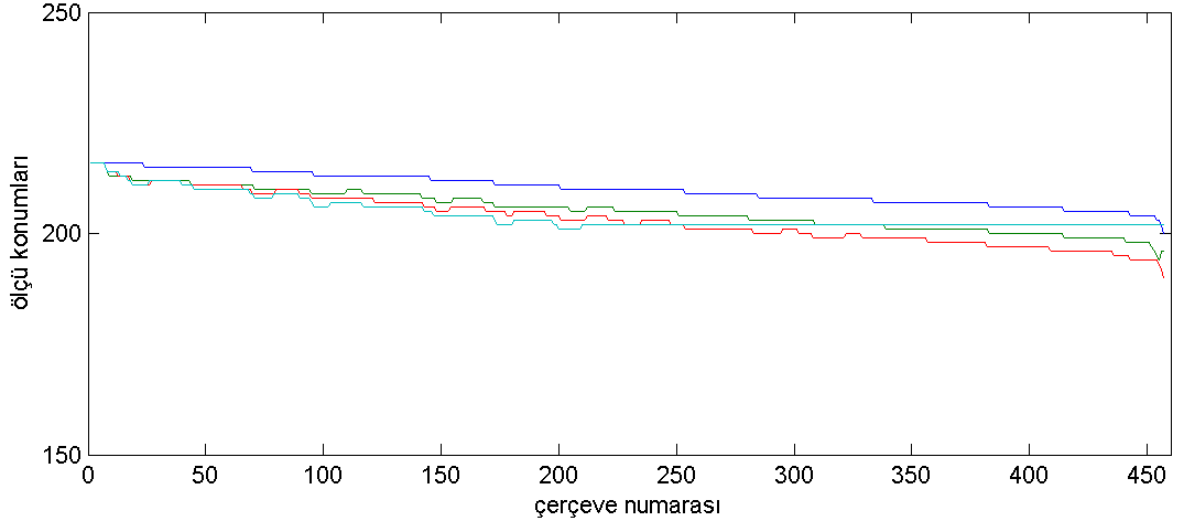
Şekil 50. A doğrultusundaki X ölçü konumları



Şekil 51. B doğrultusundaki X ölçü konumları



Şekil 52. A doğrultusundaki Y ölçü konumları



Şekil 53. B doğrultusundaki Y ölçü konumları

Ölçüm sonucunda elde edilen tam sayılı ölçüm konumları regresyon işleminden sonra ondalıklı ölçü değerlerine dönüşmektedir. Tablo 4'te ondalıklı X ölçü değerlerinden bazıları verilmektedir. Tablo 5'de ise ondalıklı Y ölçü değerlerinden bazıları verilmektedir.

Tablo 4. Ondalıkli X ölçü değerleri

Çerçeve numarası	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
1	219	219	438	438	657	657	876	876
23	228,182	228,182	445,945	446,364	669,727	669,945	892,345	892,345
100	263,109	263,473	497,055	497,073	736,127	736,418	975,273	974,000
200	307,327	307,091	561,182	560,709	820,709	820,418	1078,345	1078,000
219	318,473	318,236	577,036	576,727	841,818	841,364	1094,000	1094,000
454	415,327	415,109	717,945	716,673	1028,000	1024,945	1094,000	1094,000
458	415,418	416,127	719,909	719,364	1030,945	1027,891	1094,000	1094,000
460	416,800	416,291	720,473	720,800	1033,727	1029,818	1094,000	1094,000

Tablo 5. Ondalıkli Y ölçü değerleri

Çerçeve numarası	A1	B1	A2	B2	A3	B3	A4	B4
1	108	216	108	216	108	216	108	216
23	108,000	216,000	104,945	211,818	103,673	210,564	103,818	210,545
100	110,000	212,818	106,000	208,745	103,818	207,745	102,727	205,564
200	111,000	211,000	106,364	206,000	103,745	203,745	102,655	201,782
219	111,000	210,000	106,000	206,236	105,182	204,236	102,000	202,000
454	111,000	203,855	106,000	198,000	102,000	193,855	102,000	202,000
458	111,000	203,364	103,091	195,091	101,127	193,655	102,000	202,000
460	109,673	201,618	102,564	194,909	99,491	191,800	102,000	202,000

3. BULGULAR VE SONUÇLAR

Şeritli numune uzama ölçümlerinin uygulamasında çekme makinesinin çenesinin renginin şerit rengi ile aynı olması bunların da birer şerit gibi algılanmasına neden olmaktadır. Bu durumda video kamarası sadece numune bölgesine odaklandırılırsa sorun çözülür. Bu seferde uzama sırasında numunenin şeritlerinden bazılarının kamera açısının dışına çıkması durumunda ölçüm eksikliği sorununun yaşanmasına neden olmaktadır. Sorunu çözmek için numune boyu uzun ve şeritler hareketsiz çeneye yakın çizilmelidir.

Video ölçümlerinde önemli bir diğer sorun ise kumlanma etkisidir. Özellikle video çekimleri sırasında yetersiz çevre ışıkları ile çekim yapıldığından görüntüde kumlanma biçiminde rastgele gürültülerin görülmesi hesaplanan hassas şerit sınırlarının oynaklığına neden olmaktadır. Sorunu çözmek için kısmi doğrusal regresyon kullanılmıştır.

Şeritli numune ölçümlerinde zamana göre eşit miktarlarda çekilen bir numune doğrusal bir yer değiştirme göstermiştir (Şekil 40). Kopma anında elastik malzeme eski konumuna geri dönmeye çalıştığından dolayı 636. çerçeveden sonra konum grafiğinde ani bir düşme gerçekleşmiştir. Bu nokta temel alınarak kopma anı rahatlıkla kestirebilir.

Tablo 3'te şeritlerin başlangıç ve bitiş konumları arasındaki farkların değişik olması hareketli çeneye yakınlık ile ilişkilidir. Hareketli çeneye yakın olan birikimli hareketten dolayı daha çok hareket etmektedir.

Izgara yöntemiyle yapılan çekme deneyinde Şekil 48 ve Şekil 49'daki grafikler aynı X konumuna yerleştirildiğinden benzer grafikleri vermiştir. Aynı şekilde ölçü konumlarının Y değerleri Şekil 50 ve Şekil 51'de verilmiştir. Aynı Y konumuna yerleştirilen ölçü noktaları numunenin yatay ekseninin üstüne kaydığı için zaman içinde değerinde küçülme meydana gelmiştir. Ancak Şekil 51'deki küçülmenin daha büyük olmasının nedeni numunenin zaman içinde incelendiğini göstermektedir.

4. ÖNERİLER

Bu çalışmada şeritli numunedeki ve ızgaralı numunedeki değişimler ölçülmüştür. Bu değişimler yardımıyla göreceli değişim miktarı ölçülüp malzemenin fiziksel özellikleri tespit edilmiştir. Bu ölçümlerde enine daralmanın kesitinin hesaplanması söz konusu olduğunda iki boyutlu konum bilgisi kullanan bir kameranın yetersiz kaldığı gözlenmiştir. Dolayısıyla ikinci bir kamera ile paralel bir şekilde kayıt alınıp kesit alanı daha doğru bir şekilde hesaplanabilir.

Video ölçümlerinde sorun oluşturabilecek önemli bir konu ışık oranının yetersiz olduğu durumlardır. Işık oranını belli bir seviyenin üzerine çıkarmak için kullanılan lensin yanı sıra bir ışıklandırma aparatı da video sistemine eklenebilir.

Izgaralı numunelerdeki değişimlerin ölçülmesinde kullanılan numune görüntüsünün algılanarak yapılan ölçümde kamera çözünürlüğü çok önemli bir yer tutmaktadır. Yakın çekim desteği ve yüksek çözünürlüklü kameraların bu ölçmelerin başarımını oldukça artıracığı düşünülmektedir.

Bazen ızgaralı numune ölçümünde numunenin yüzeyi pürüzsüz bir biçimde olabilir. Bu durumda numune yüzeyi değişik malzemelerle kirletilebilir ve rastgele boyanabilir. Böylelikle oluşan ayrımlılık ölçüm başarımını artıracaktır.

Izgaralı ölçüm deneyinde tam sayılı ölçü konumları regresyon işlemine tabii tutularak daha hassas sonuçlar elde edilmektedir. Ancak burada regresyona sokulacak değeri iyi seçmek gerekir. Çok yüksek seçilirse eğrisel bir değişimin olması durumunda hatanın büyümesine, düşük olması durumunda ise yavaş değişen ölçüm sonucunda yanlış değerler vermesine neden olur. Optimal sayıyı belirlemek için bir çalışma yapılabilir.

5. KAYNAKLAR

- Askeland, D. R. ve Phulé, P. P., 2006. The Science and Engineering of Materials, Thomson.
- Aydemir, B., 2011. Ekstansometre Cihazlarının Seçimi ve Kullanımı Hakkında Önemli Hususlar, Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi, 7, 4, 73-82.
- Bastawros, A. ve McManuis, R., 1998. Use of Digital Image Analysis Software to Measure Non-Uniform Deformation in Cellular Aluminum Alloys, Experimental Techniques, 35–37.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T. ve Mazurek, D., 1992. Mechanics of materials, McGraw Hill.
- Bezdek, J. C., 1981. Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms, Plenum Press, New York.
- Bovik, A. C., 2010. Handbook of Image and Video Processing, Academic Press.
- Bovik, A. C., 2010. Handbook of Image and Video Processing, Academic Press.
- Böcekçi, V. G., 2011. Video İşleme Yöntemi ile Hassas Yerdeğişimi Tespiti, Doktora Tezi, Elektronik Bilgisayar Eğitimi .
- Burger, W. ve Burge, M. J., 2009. Principles of Digital Image Processing, Springer, London. UK.
- Clocksın, W. F., Quinta Da Fonseca, J., Withers, P. J. ve Torr, P. H. S., 2002. Image Processing Issues in Digital Strain Mapping, Proceedings of SPIE., 384-395.
- Davis, J. R., ed., 2004. Tensile testing, ASM international.
- Drouin, G. ve Sibille, J. 1981. “Extensometer.” U.S. Patent No. 4,294,015.
- Gonzalez, R. C., Wood, R. E. ve Eddins, S. L., 2004. Dijital Image Processing Using MATLAB, Pearson Prentice Hall, New Jersey. USA.
- Gonzalez, R. C. ve Woods, R. E., 2002. Digital Image Processing, Prentice-Hall Publishing, New Jersey. USA.
- Höppner, F., Klawonn, F., Kruse, R. ve Runkler, T., 2000. Fuzzy Cluster Analysis, John Wiley&Sons, Chichester.

- Işık, M. ve Çamurcu, A. Y., 2010. K-means ve Aşırı Küresel C-means Algoritmaları ile Belge Madenciliği, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 1-18.
- Keys, R., 1981. Cubic convolution interpolation for digital image processing, Acoustics Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on, 29, 6, 1153-1160.
- Motra, H. B., Hildebrand, J. ve Dimmig-Osburg, A., 2014. Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel, Engineering Science and Technology, an International Journal, 17, 4, 260-269.
- Otsu, N., 1979. A threshold Selection Method From Gray-Level Histogram, 9, 1, 62-66.
- Rho, J. Y., Ashman, R. B. ve Turner, C. H., 1993. Young's modulus of trabecular and cortical bone material: ultrasonic and microtensile measurements, Journal of biomechanics, 26, 2, 111-119.
- Savaşkan, T., 1999. Malzeme bilgisi ve muayenesi, Derya Kitabevi, Trabzon.
- Sutton, M. A., Orteu, J. J. ve Schreier, H., 2009. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: basic concepts, theory and applications., Springer Science & Business Media.
- Tezel, Ö., 2014. Yönel Verilerin Kümelenmesinde Bulanık C-Ortalamlar Algoritması, Yüksek Lisans Tezi, KTU, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Viveiros, M. ve Lin, Z. C., 2006. Comparison of a Video Extensometer Over a Clip-on Extensometer and Crosshead Motion as a Strain Measurement Technique for Testing Nitinol Specimens, Proceedings of the 2006 International Conference on Shape Memory and Supere.
- Gruenwald, J., On, T., Rogers, E. ve Ta, P. 2015. Digital Image Correlation. <http://phongta.com/aero/fracture/report.pdf>. 14 Nisan 2015.
- URL-1, Mazleme. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Malzeme> 15 Mart 2015.
- URL-2, Correlated Solutions. <http://www.correlatedsolutions.com>. 29 Mart 2015.
- URL-3. Çekme Deneyi. Malzeme Laboratuvarı. http://www2.bayar.edu.tr/muhendislik/malzeme/dersler/malzeme_lab/%C3%A7ekme.pdf. 06 Nisan 2015.
- URL-4, Kutlu Mümessilik Ltd. Şti. Zwick/Roell Türkiye Temsilcisi. <http://www.kutlultd.com.tr> 12 Nisan 2015.
- URL-5, Extensometers and extension measurement - a core Zwick competence. <http://www.zwick.com/en/products/extensometers.html> 12 Nisan 2015.
- URL-6. Malzemenin Mekanik Özellikleri. <http://www.abdullahdemir.net/wp-content/uploads/2013/05/Malzemelerin-Mekanik-Ozellikleri.pdf>. 12 Mart 2015.

- URL-7. Tahribatlı Malzeme Muayenesi Deneyi.
http://www.ktu.edu.tr/dosyalar/14_03_00_bf8b7.pdf. 12 Mart 2015.
- URL-8, Çekme gerilmesi.http://tr.wikipedia.org/wiki/%C3%87ekme_gerilmesi. 12 Mart 2015.
- URL-9, Çekme Deneyi.http://www.mansuroglu.com/kou/deneyler/deney_cekme.pdf.12 Mart 2015.
- URL-10. Çekme Deneyi.
<http://www.konya.edu.tr/dosyalar/bolum/insaatmuhendisligi/editor/DersSayfalar/i/MalzBil/2Cekme.pdf>, 12 Mart 2015
- URL-11. Deneysel Gerilme Analizi - Eğme Deneyi.
<http://muhendislik.sdu.edu.tr/assets/uploads/sites/146/files/2012-13-gerilme-analizi-deney-foyu-28092012.pdf>, 16 Nisan 2015
- URL-12. Digital Image Correlation. Wikipedia.
http://en.wikipedia.org/wiki/Digital_image_correlation, 13 Mart 2015
- URL-13. Regresyon Analizi. http://tr.wikipedia.org/wiki/Regresyon_analizi, 17 Şubat 2015

ÖZGEÇMİŞ

Merve KESİM, 19 Nisan 1991 tarihinde Düzce'nin Akçakoca ilçesinde doğdu. İlköğrenimini Akçakoca Atatürk İlköğretim Okulu'nda, ortaöğrenimini ise Düzce Arsal Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Fakültesi, İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri bölümünden mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstatistik ve Bilgisayar Bilimleri Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. Ulusal ve uluslararası birçok sempozyum ve kongrede yayınlanmış bildirileri bulunmaktadır.