

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**BİLGİSAYARLI GÖRMEYE DAYALI EYLEYİCİ ELEKTROAKTİF POLİMERİN  
HAREKET ANALİZİ VE OOSİTE UYGULANAN KUVVETİN HESAPLANMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Bilgisayar Mühendisi Mustafa Hakan BOZKURT**

**OCAK - 2016  
TRABZON**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce**

**Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /**

**Tezin Savunma Tarihi : / /**



**Tez Danışmanı :**

**Trabzon**



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

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

**Jüri Üyeleri**

**Başkan :**

**Üye :**

**Üye :**

**Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ**

**Enstitü Müdürü**

## ÖNSÖZ

Teknolojinin sunduğu imkânlar arttıkça, insanların yetenekleriyle kısıtlı olan işlerin daha kontrollü ve daha az hata ile yapılabilmesi için hassas duyarlı malzemelerin, insan yeteneklerinden bağımsız olarak kontrollü bir şekilde kullanılabilmesi gündeme gelmektedir. Bu çalışmada da, elle yapılan mikroenjeksiyon sisteminin otomatikleştirilmesi için elektroaktif polimer esaslı bir düzeneğin bilgisayarla görmeye dayalı kontrolüne çalışılmıştır. Bu amaçla, elektroaktif polimerin üzerine düşürülen değişen gerilimle hareketlerinin incelenmesine ve mikropipetin oosit hücre duvarına yaptığı kuvvetin tahmin edilmesine çalışılmıştır.

Çalışmalarında, danışmanlığımı üstlenen, Yrd. Doç. Dr. Eyüp GEDİKLİ ve Prof. Dr. Murat EKİNCİ 'ye teşekkür ederim. Elektroaktif polimer malzemesi ve düzeneği konusunda yardım aldığım Doç. Dr. Mehmet İTİK ve Arş. Gör. Mustafa Y. COŞKUN 'a ve mikroenjeksiyon görüntülerini bizimle paylaşan Loke May Kew 'e teşekkür ederim. Ayrıca destek ve yardımları için eşime; başta anne ve babam olmak üzere tüm aileme ve arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mustafa Hakan BOZKURT

Trabzon 2016

## **TEZ ETİK BEYANNAMESİ**

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Bilgisayarlı Görmeye Dayalı Eyleyici Elektroaktif Polimerin Hareket Analizi Ve Oosite Uygulanan Kuvvetin Hesaplanması” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Eyüp GEDİKLİ ‘nin sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuarlarda 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. 04/01/2016

M. Hakan BOZKURT

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ .....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET .....	VIII
SUMMARY .....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	X
TABLolar DİZİNİ.....	XII
SEMBOLLER DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş .....	1
1.2. Literatür Araştırması.....	2
1.3. Gürültü Filtreleri.....	6
1.4. Nesne Bölütleme.....	7
1.4.1. Eşikleme Tabanlı Yöntemler.....	7
1.4.1.1. Otsu Eşikleme Yöntemi .....	8
1.4.1.2. Uyarlamalı (Adaptif) Yerel Eşikleme .....	9
1.4.1.3. K-Ortalama Yöntemi .....	10
1.4.2. Sınır Tabanlı Yöntemler.....	10
1.4.2.1. Gradyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri (Roberts, Prewitt, Sobel).....	10
1.4.2.2. Laplasyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri.....	11
1.4.2.3. Canny Kenar Belirleme Yöntemi .....	11
1.4.3. Aktif Kontur Yöntemi.....	11
1.4.4. Matematiksel Morfoloji .....	12
1.5. Nesne Belirleme ve İlgi Alanının Belirlenmesi .....	13
1.5.1. Hough Dönüşümü .....	14
1.5.1.1. Hough Dönüşümü ile Doğru Bulma .....	14
1.5.1.2. Hough Dönüşümü ile Daire Bulma .....	15
1.5.2. Sınır İzleme .....	17
1.5.3. Bağlantılı Bileşen Etiketleme .....	18

1.6.	Öznitelik Çıkarımı .....	18
1.6.1.	Değişmez Momentler .....	19
1.6.2.	En Küçük Kareler Yöntemi ile Eğri Uydurma .....	21
1.7.	Nesne Sınıflandırma .....	22
1.7.1.	Yapay Sinir Ağları .....	22
1.7.1.1.	Yapay Sinir Ağları İçin Nöron Modelleme .....	23
1.7.1.2.	Yapay Sinir Ağ Topolojileri .....	24
1.7.1.3.	Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme Yöntemleri .....	25
1.7.2.	K En Yakın Komşuluk (KNN) Yöntemi ile Sınıflandırma .....	26
1.7.2.1.	Öklit Mesafesi .....	27
1.8.	Elektroaktifpolimer .....	28
1.9.	Mikroenjeksiyon İşlemi .....	29
1.9.1.	Mikroenjeksiyon Hücre Zarı Mekanığı .....	30
1.9.1.1.	Biyozar (Hücre Zarı) Nokta Yükleme Modeli .....	30
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME .....	35
2.1.	Elektroaktif Polimer Hareketlerinin İncelenmesi ve Üzerindeki Elektrik Geriliminin Tahmini .....	35
2.1.1.	Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Bölütleme .....	36
2.1.1.1.	Otsu Eşikleme Yöntemi ile Bölütleme .....	37
2.1.1.2.	Adaptif (Uyarlamalı) Eşikleme Yöntemi ile Bölütleme .....	37
2.1.1.3.	Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Bölütleme Yöntemlerinin Kıyaslanması .....	38
2.1.1.4.	Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Matematiksel Morfoloji .....	38
2.1.2.	Elektroaktif Polimer Nesnesinin Çıkarılması .....	40
2.1.3.	Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Özellik Çıkarımı .....	40
2.1.4.	Elektroaktif Polimer Gerilim Sınıflandırma .....	41
2.1.4.1.	Elektroaktif Polimer Gerilim Tahmini Sonuçları .....	41
2.2.	Mikroenjeksiyon İşleminde Hücre Üzerine Uygulanan Kuvvetin Tahmini .....	49
2.2.1.	Mikroenjeksiyon İşleminde Görüntü Bölütleme .....	50
2.2.1.1.	Gradyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri .....	51
2.2.1.2.	Laplasyan Tabanlı Kenar Bulma (LoG Yöntemi) .....	53
2.2.1.3.	Canny Kenar Bulma Yöntemi .....	55
2.2.1.4.	Aktif Kontur Modeli (Snake) .....	57
2.2.1.5.	K-Ortalama ile Nesne Bölütleme .....	59
2.2.1.6.	Otsu Eşikleme Yöntemi .....	59
2.2.1.7.	Adaptif Eşikleme Yöntemi .....	59

2.2.1.8.	Mikroenjeksiyon Bölütleme Sonuçlarının Kıyaslanması .....	63
2.2.1.9.	Mikroenjeksiyon Görüntülerinde Morfolojik İşlemler .....	66
2.2.2.	Oosit ve Mikropipetin Belirlenmesi ve Takibi.....	68
2.2.3.	Hücre Sınırlarındaki Değişimin İzlenmesi ve Hücreyi Delen Mikropipetin Durdurulması.....	71
2.2.3.1.	Hücre Üzerine Uygulanan Kuvvetin Hesaplanması .....	75
3.	SONUÇLAR .....	79
4.	ÖNERİLER .....	81
5.	KAYNAKÇA .....	82
ÖZGEÇMİŞ		



Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

BİLGİSAYARLI GÖRMEYE DAYALI EYLEYİCİ ELEKTROAKTİF POLİMERİN  
HAREKET ANALİZİ VE OOSİTE UYGULANAN KUVVETİN HESAPLANMASI

Mustafa Hakan BOZKURT

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Eyüp GEDİKLİ  
2016, 86 Sayfa

Bilgisayarla görme, güvenlik, sağlık gibi pek çok alanda sistemlerin akıllılaştırılmasında kullanılmaktadır. Bu çalışmada da, mikroenjeksiyon işlemleri için mikropipetle hücre üzerine uygulanan kuvvetin tahmini ve eyleyici olarak kullanılması hedeflenen elektroaktif polimerin bilgisayarla görmeye dayalı incelenmesi yapılmıştır.

Mikroenjeksiyon işlemi, elektriksel akımla hareket ettirilebilen elektroaktif polimer malzemesi mikropipetin eyleyicisi olarak kullanılabilir. Bu yaklaşımda, elektroaktif polimer hareketlerinin kontrolü için sabit kameradan alınan görüntülerde elektroaktif polimer malzemenin farklı elektrik akımlarındaki hareketleri incelenmiştir. Öznitelik çıkarma amacıyla eğri uydurma ve değişmez momentler kullanılmıştır. Öznitelikler danışmanlı olarak eğitilen yapay sinir ağları ve en yakın komşuluk yaklaşımlarıyla sınıflandırılmıştır. Mikroenjeksiyon işlemi en önemli unsur oosit duvarlarına minimum hasarı vermektir. Bu nedenle mikropipetin oosit zarına uyguladığı kuvvetin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, gerçek mikroenjeksiyon görüntülerinde, biyozar nokta yükleme model yaklaşımı ile kuvvet tahmini yapılmıştır. Otomatik mikroenjeksiyon düzeneğinde, bu yaklaşımlar kullanıldığında kontrollü enjeksiyon işlemi yapılabilecek, mikropipetin oosite daha az zarar vermesi sağlanabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Bilgisayarla görme, yapay sinir ağları, biyozar nokta yükleme modeli, mikroenjeksiyon, elektroaktif polimer malzemesi

Master Thesis

SUMMARY

COMPUTER VISION BASED MOTION ANALYSIS OF ACTUATOR ELECTRO-  
ACTIVE POLYMER AND COMPUTING THE FORCE USED ON OOCYTE

Mustafa Hakan BOZKURT

Karadeniz Technical University  
The Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Computer Engineering Graduate Program  
Supervisor: Asst.Prof. Eyüp GEDİKLİ  
2016, 86 Pages

Computer vision is applied to develop more intelligent systems in widely areas, such as security and medical. In this study, force which applied on a cell has been computed and electroactive polymer which aimed to be actuator has been analyzed, for microinjection operation, based computer vision.

In a microinjection process electroactive polymer material which move with electrical current, can be used as an actuator for micropipette. In this approach, electroactive polymer material's movements under different electrical currents have been analysed. To extract the polymer shape features, curve fitting and invariant moments have been used. Features are classified with artificial neural networks and nearest neighbor approaches. The most important factor in a microinjection operation is to cause minimum damage on oocyte membrane. Therefore, the control of the force applied on a cell by micropipette is necessary. For this purpose force estimation with biomembrane point-load model has been made on real microinjection images. The use of these approaches in a microinjection mechanism, controlled injection operation can be made and it can be ensure to cause minimum damage on oocyte.

**Key Words:** Computer vision, artificial neural networks, biomembrane point load model, microinjection, electroactive polymer material

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa No

Şekil 1.	Elektroaktif polimer ile mikroenjeksiyon işlemi düzeneği .....	3
Şekil 2.	Elektroaktif polimer ile gerçekleştirilen mikroenjeksiyon görüntüleri .....	3
Şekil 3.	Hough dönüşümü kartezyen uzay .....	14
Şekil 4.	Parametre uzayında kesişimler .....	15
Şekil 5.	Hough dönüşümü ile daire bulma.....	16
Şekil 6.	Saat yönünde sınır izleme sonucu belirlenen pikseller .....	17
Şekil 7.	İkili görüntü(solda) ve etiketleme sonrası elde edilen gruplar (sağda).....	19
Şekil 8.	Noktalara uydurulmuş fonksiyon eğrisi örneği .....	21
Şekil 9.	Genel nöron yapısı.....	23
Şekil 10.	Hata geri yayımlı öğrenme yapısı .....	26
Şekil 11.	İki boyutlu düzlemde $k=3$ için knn sınıflandırması için bulunan en yakın elemanlar .....	27
Şekil 12.	Elektroaktif polimer ile örnek kısaç yapısı .....	28
Şekil 13.	Konjuge iyonik elektroaktif polimer yapısı .....	29
Şekil 14.	Mikropipet tarafından uygulanan kuvvet sonucu girintilenmiş hücre yapısı...31	
Şekil 15.	Yerel girintide kuvvet dengesi .....	32
Şekil 16.	(a) 0.1v ve (b) 0.5v için örnek görüntüler .....	36
Şekil 17.	Otsu eşikleme sonrası elektroaktif polimer görüntüsü (a) 0.1v (b) 0.5v .....	37
Şekil 18.	Adaptif eşikleme sonrası elektroaktif polimer görüntüsü (a) 0.1v (b) 0.5v.....	38
Şekil 19.	Bölütleme sonuçları karşılaştırması (a)0.1v orijinal görüntü (b)0.5v orijinal görüntü (c)0.1v otsu eşikleme (d)0.5v otsu eşikleme (e) 0.1v adaptif eşikleme (f) 0.5v adaptif eşikleme sonuçları.....	39
Şekil 20.	Mikropipet olmayan durumda hücrenin görüntüleri. (a)işlenmemiş görüntü, (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü.....	51
Şekil 21.	Mikropipetin hücreye kuvvet uygulamaya başladığı durumda hücrenin görüntüleri (a) işlenmemiş görüntü , (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü.....	52
Şekil 22.	Mikropipetin hücreyi delmeye başladığı durumda hücrenin görüntüleri. (a) İşlenmemiş görüntü , (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü .....	53

Şekil 23.	Log yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(c) ve (e) orijinal görüntüler. (b),(d) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları.....	54
Şekil 24.	Canny yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(c) ve (e) orijinal görüntüler. (b),(d) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları.....	56
Şekil 25.	Canny işleminden önce bir gauss filtresi uygulandığı duruma ait karşılaştırma .....	57
Şekil 26.	Aktif kontur modeli yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları .....	58
Şekil 27.	K-Ortalama yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a), (b) ve (c) orijinal görüntüler. (d), (e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları .....	60
Şekil 28.	Otsu eşikleme yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları .....	61
Şekil 29.	Adaptif eşikleme yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları .....	62
Şekil 30.	Örnek mikroenjeksiyon görüntüsü üzerinde farklı bölütleme yöntemlerinin kıyaslanması.....	64
Şekil 31.	Alan açma işleminin bölütlenmiş görüntüler üzerindeki etkisi.....	67
Şekil 32.	Farklı video konumlarından alınan görüntülerde hough dönüşümü ile hücre konumunun bulunması.....	69
Şekil 33.	Farklı video zamanlarında mikropipet ve oositlerin belirlenmesi.....	70
Şekil 34.	Hücre sınırının yakınlaştırılmış gösterimi .....	71
Şekil 35.	Farklı video konumlarından görüntüler üzerinde sınır izleme işlemi sonuçları.....	72
Şekil 36.	Uzaklık ölçülerine göre değişkenlerin belirlenmesi (a) gürültü kaynaklı girinti, (b) girinti durumundaki noktalar.....	74
Şekil 37.	Mikropipet tarafından uygulanan kuvvet sonucu girintilenmiş hücre yapısı...	76
Şekil 38.	Belirlenen sonuçlara ait (a)belirlenen kuvvet, (b)girinti derinliği, (c)girinti çapı, grafikleri .....	78

## TABLolar DİZİNİ

### Sayfa No

Tablo 1.	Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması .....	42
Tablo 2.	Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması.....	44
Tablo 3.	Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması .....	44
Tablo 4.	Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması .....	45
Tablo 5.	Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin, knn ile sınıflandırılması.....	46
Tablo 6.	Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin knn ile sınıflandırılması.....	47
Tablo 7.	Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin, knn ile sınıflandırılması.....	47
Tablo 8.	Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin knn ile sınıflandırılması.....	48

## SEMBOLLER DİZİNİ

CCD	Yükten bağımlı aygıt (Charge Coupled Device )
DNA	Deoksiribo Nükleik asit (Deoxyribonucleic acid)
IPMC	İyonik Polimer Metal Bileşimi (Ionic Polymer Metal Composite)
KNN	K En yakın komşuluk (K Nearest Neighbor)
LOG	Laplas ve Gauss filtrelerini içeren yöntem (Laplacian of Gaussian)
PVDF	Polivinilden florit (polyvinylidene flüoride)
SSD	Farkların kareleri toplamı (sum of squared differences)
YSA	Yapay Sinir Ağları

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Bilgisayarlı görü; yapılan işleri kolaylaştırmak ve etkinleştirmek adına kamera görüntülerinin işlendiği, analiz edildiği ve bu görüntülerden anlamlı verilerin elde edilmeye çalışıldığı yapay zekâ konularından biridir. Bilgisayarlı görü, işlem ya da hareket kontrollerinden[1], olayların izlenmesine[2]; veri sınıflandırmadan[3], insan bilgisayar etkileşimine[4] kadar farklı alanlarla ilgilenir. Günümüzde bilim ve sanayide bilgisayarla görmeye dayalı pek çok ürün geliştirilmiştir. Bu tez çalışmasında, uzaktan mikroenjeksiyon uygulamalarında, elektroaktif polimerin kontrolünün bilgisayarla görmeye dayalı olarak yapılması amacıyla, polimer hareketlerinin analizi ve hücre duvarına uygulanan kuvvetin tahmini yapılmıştır.

Mikroenjeksiyon, en genel anlamda bir hücre içerisine dışarıdan bir maddenin yerleştirilmesi, olarak ifade edilebilir. Bu işlemin hassas bir şekilde gerçekleştirilmesi, işlemin başarısı açısından önemlidir. Mikroenjeksiyonun bir bilgisayar yardımıyla gerçekleştirilmesi, işlemin daha kontrollü olmasını sağlayacaktır. Böylece, işlem sırasında hücrede oluşacak hasar azaltılabilecek; enjeksiyon başarısı artırılabilir.

Elektroaktif polimer; yapay kas olarak bilinen, kontrol, hareket gibi çalışmalarda kullanılan bir malzemedir. Elektroaktif polimerler üzerine güç uygulandığında yüksek deformasyonu kaldırabilirler [5]. Güç kalktığında elektroaktif polimer güç uygulanmadan önceki şekline, yeniden dönmektedir. Elektroaktif polimerlerin kullanıldığı çalışmalara örnek olarak sensör, mini pompa ve mikro-nano manipülasyon uygulamaları gösterilebilir [6-8]. Literatürde çok çeşitli kullanım şekilleri bulunmakla birlikte, elektroaktif polimerlerin en çok tercih edildiği alanlar robotik biliminde yapay kas oluşturma olduğundan, sık sık yapay kaslar olarak da adlandırılmaktadırlar[5].

Bu tez çalışmasında; elektroaktif polimerin, mikroenjeksiyon sisteminde mikropipet denilen mikroenjeksiyon iğnesinin harekete geçirilmesi hedeflenmiştir. Böyle bir sistem için elektroaktif polimerdeki ve oositteki yani yumurta hücresindeki değişimler bilgisayarlı görü yardımıyla incelenmiştir. Bu yöntem mikroenjeksiyon işleminin kontrollü ve otomatik şekilde gerçekleştirilmesinde kullanılabilir.

Bu çalışma iki ana kısımdan oluşmaktadır: İlk olarak elektroaktif polimer hareket videoları çekilerek, farklı gerilim değerlerindeki elektroaktif polimer şekillerinden üzerlerindeki gerilimler tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca elektroaktif polimer uç noktasının takip edilmesi sağlanmıştır. İkinci olarak hücre zarına kontrollü giriş için hücre zarının izlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla mikroenjeksiyon görüntülerinde hücre zarı üzerindeki kuvvetin tahmini yapılmıştır. Ayrıca iğne hücre zarını yarıp içerisine girdiğinde işlemin durdurulması gerekmektedir. Bu amaçlarla hücre zarının ve üzerindeki kuvvetin izlendiği hücre içerisine iğnenin girmesiyle işlemi durduran çalışmalar yapılmıştır.

## 1.2. Literatür Araştırması

Elektroaktif polimerler ile ilgili ilk çalışmalar 1880 yıllarında görülmektedir. 1880 'de Roentgen tarafından yapılan çalışma[9] ile bir tarafı sabit, diğer tarafına kütle tutturulmuş kauçuk bir bant üzerine elektrik alanı uygulanıp, bandın mekanik tepkisi incelenmiştir. Elektroaktif polimerlerin geliştirilmesi ve kullanılması ise daha ileriki yılların araştırma konuları olmuştur. 2005 yılında yayınlanmış olan Chen ve arkadaşlarının çalışmasında, elektroaktif polimerin karakterizasyonu, hareketlerinin incelenmesi ve kontrollü incelenmiştir[10]. Bu çalışmada Chen ve arkadaşları yarı-statik IPMC (Ionic polymer metal composite) hareketlerini modellemeyi hedeflemişlerdir. 2014 yılında Kruusamäe ve arkadaşları iyonik-polimer elektroaktif çalıştırıcılar hakkında bir inceleme yapmışlardır [11]. Sancak ve İtik 2015 yılında, mikro manipülasyon uygulamalarında kullanılması için elektroaktif eyleyicilerin nesnelere uygulayacağı kuvvetin hassas bir şekilde sağlanması amacıyla gerilim ve kuvvet ilişkisine dair bir matematiksel model oluşturmuşlardır[12].

Elektroaktif polimerlerin görüntü işleme yardımıyla incelenmesi konusunda 2007 yılında Tsiakmakis ve arkadaşlarının[13] gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, sabit bir CCD kamera yardımıyla alınan ardışık çerçevelerde sentetik IPMC materyalinin küçük hareketleri incelenmiştir. Mikro robotik sistemler için su ve hava ortamlarında IPMC türü elektroaktif polimer malzemesinin hareket parametrelerinin incelendiği bu çalışmada sonuçlar yüksek doğruluğa sahip lazer konumlama sistemi ile karşılaştırılmıştır.

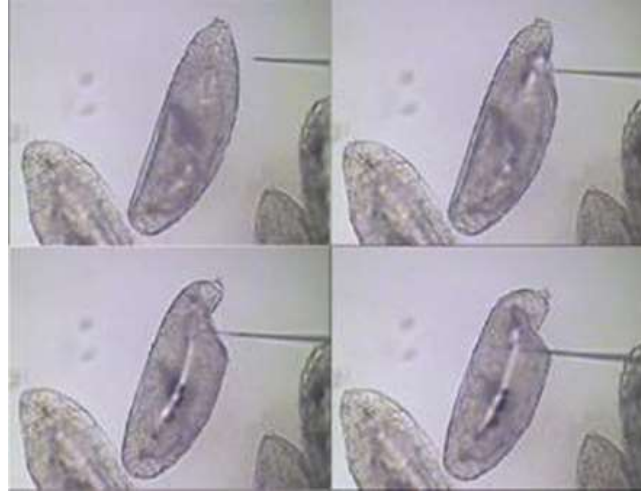
Elektroaktif polimerler üzerine çeşitli mikro manipülasyon uygulama çalışmaları bulunmasına rağmen mikroenjeksiyon işlemi için yapılmış pek fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu alandaki çalışmalardan Chen ve arkadaşlarının çalışmalarında[14], IPMC türü bir elektroaktif polimer mikro manipülatör olarak kullanılmış ve ucuna bağlanan



iğne ile *Drosophila* embriyosunun içine girilmiştir. Oluşturulan düzenekte elektroaktif polimer kontrolünü sağlamak amacıyla lazer sensörü, mikro güç sensörü gibi bazı sensörler kullanılmıştır. Şekil 1. 'de elektroaktif polimer kontrollü mikroenjeksiyon düzeneği[14] görülmektedir.



Şekil 1. Elektroaktif polimer ile mikroenjeksiyon işlemi düzeneği



Şekil 2. Elektroaktif polimer ile gerçekleştirilen mikroenjeksiyon görüntüleri

Şekil 2. 'de mikroenjeksiyon esnasında çekilmiş mikroskobik görüntülerin farklı aşamaları[14] görülmektedir.

2000 yılı sonrası çalışmalar, Mikroenjeksiyon işleminin otomatikleştirilmesini içeren mikro/nano konumlama ve manipülasyon mekanizmaları ve sistemleri; biyo-tıp, hücre cerrahisi, nano cerrahi, mikro/nano yüzey metrolojisi ve karakterizasyonu gibi bilimsel ve mühendislik uygulamalarına yönelmiştir[15]. 2001 yılında Li ve arkadaşları[16] bilgisayarla görmeye dayalı mikromanipülasyon sistemi tasarlamıştır. Sistemde oosit ve mikropipet, korelasyon tabanlı örüntü eşleme ile belirlenmiş ve takip edilmiştir. Mikroskopik nesne manipülasyonunda daha az insan yardımı ile yapılabileceği sonucuna varılmıştır. Aynı yıl Yu ve Nelson mikrorobotik embriyo mikroenjeksiyon alanında çalışmalar yapmıştır[17]. Görüntü tabanlı görü yardımcı kontrol ve hassas konum kontrolünü içeren hibrit bir yapı oluşturulmuştur. Görü yardımcı kontrolde izleme algoritması olarak SSD optik akış yöntemi kullanılmıştır. Beş fare embriyosu ile yapılan DNA mikroenjeksiyon deneylerinin tamamı başarı ile sonuçlanmıştır. 2003 yılında Kumar ve arkadaşları, otomatik hedeflemek ve hücre üzerine uygulanan gücü kontrol etmek amacıyla insan-robot işbirlikli bir çalışma yapmıştır[18]. Çalışmalarında, bir kontrolcü robot geliştirilmiş. Güç kontrolü Kumar ve arkadaşları tarafından denge eşitlikleri yardımıyla hazırladıkları yöntemle belirlenmiştir. Diğer bir çalışma 2005 'te mikroenjeksiyonu kolaylaştırma amacıyla Matsuoka ve arkadaşları tarafından yapılmıştır[19]. Çalışmada tasarlanan robot yardımıyla pirinç protoplastı ve fare embriyonik köküne enjeksiyon yapılmıştır. Robotsuz işlemlere göre daha hızlı sonuçlar elde edilmiştir. Örneğin pirinç protoplastında, 100 hücre içerisine durmaksızın yapılan mikroenjeksiyon işlemi bir saat içerisinde bitirilmiştir. Bu ise robotsuz yöneme göre yaklaşık 17 kat daha hızlı olmaktadır.

Ammi ve Ferreira da 2006 yılında bir mikroenjeksiyon sistemi oluşturarak hücreye verilen zararı azaltmaya çalışmışlardır[20]. İlgili çalışmada, 2 boyutlu geri besleme yardımı ile 3 boyutlu ortamda mikroenjeksiyon işlemini yapmanın zor olacağı belirtilmiştir. Bu nedenle bir insan\*0 makine arayüzü tasarlayarak mikro manipülasyon işlemini geliştirmeye çalışmışlardır. Embriyo üzerindeki deformasyonları izleyerek bir yapılandırma algoritması yardımıyla, 3 boyutlu görsel veriler elde edilmiştir. Sun ve Nelson tarafından geliştirilmiş olan nokta yükleme hücre modeli, enjeksiyon işleminin kararlılığının artırılması amacıyla, tasarlanan sistemde dokunsal geribesleme elde edilebilmesi için kullanılmıştır.

Wang ve arkadaşlarının çalışmasında mikroenjeksiyon sistemi oluşturularak zebra balığı embriyoları üzerinde deneyler yapılmıştır[21]. 250 örnek üzerinde yaptıkları testlerde

%98 hayatta kalma oranıyla dakikada 15 embriyoya başarılı enjekte işlemi gerçekleştirilmiştir.

Mikroenjeksiyon işleminde hücre yapısına bağlı olarak başarı değişmektedir. Otomatik mikroenjeksiyon işlemi için hücrenin mekanik yapısının bilinmesi, uygulanacak kuvvetin belirlenmesinde minimum deformasyon için gereklidir. Bu alanda az sayıda çalışma mevcuttur. Hücre zarını modellemek amacıyla 2003 yılında yapılan çalışmada[22], Yu Sun ve arkadaşları hücre zarını, mikropipet girintisi oluştuğunda meydana gelen yarı çembersel dairenin yarıçapı, oluşan girintinin yarıçapı ve girintinin derinliği olmak üzere üç parametre ile nitelemişlerdir. Sonra, hücre üzerine uygulanan kuvvet ile bu parametreleri ilişkilendirmişlerdir. Çalışmalarında fare oositi kullanılmış ve önerdikleri nokta-yükleme modeli ile oositinin elastisite modülünü bulmuşlardır. Gerekli parametreler mikroenjeksiyon sırasında alınmış resimlerden manuel olarak çıkarılmıştır.

Tan ve arkadaşları tarafından 2008 yılında hücre zarı teorisine[23] dayalı enjeksiyon kuvveti ile deformasyon arasında bir ilişki sağlayan bir model önerilmiştir[24]. Bu modelde, temas eden ve etmeyen noktalarda yarı-statik denge eşitliklerini kullanılmıştır. Bu eşitlikleri çözmek için karmaşık bir sayısal hesaplama prosedürü gerekmektedir.

2009 yılında Lu ve arkadaşları tarafından hücrenin deforme olmuş yüzeyi parabolün içbükeyliğinden faydalanarak modellenmiştir[25]. Çalışmada, deformasyonlu zebra balığı hücre görüntülerinde hücre sınırları incelenmiş ve girinti derinliği açısından maksimum gerilim modeli geliştirilmiştir.

2011 yılındaki başka bir çalışmada, Han ve arkadaşları tarafından, deforme olmuş hücre zarı girintisini modellemek için parabol modeli kullanılmıştır. Hücre zarı gerilimindeki değişimler için elips modeli uygulanmıştır[26].

2010 yılında Diaz ve arkadaşlarının gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, hücre zarı profili meridyen düzleminde iki boyutlu bir yüzey olarak tanımlanmıştır[27]. Oolemma profilini izlemek için bir yöntem belirlenmiş ve sınır izleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlemde manuel olarak bir başlangıç noktasının seçilmesi gerekmektedir.

Hücre zarının mekanik incelenmek amacıyla 2013 yılında Karimirad ve arkadaşları tarafından snake yöntemine dayalı bir çalışma yapılmıştır[15]. Ammi ve Ferreira 'nın 2006 yılında yapmış oldukları çalışmaya [20] benzeyen ve bu yöntem ek olarak bazı yöntemler uygulayarak oluşturdukları bir metotla hücre sınırı belirleme işlemi sağlanmıştır. Çalışmada, izleme işlemini otomatikleştirmek ve mikro manipülasyon esnasında hücre üzerindeki deformasyon safhalarını tanımlamak amaçlanmıştır. Hücre deformasyonunun modellenmesi

yapılan bu çalışmada, sistem diğer çalışmalardan farklı olarak gerçek zamanlı olarak çalıştırılabilmektedir[15].

### 1.3. Gürültü Filtreleri

Görüntülerde sayısallaştırma işlemi yapılırken veya görüntünün alındığı optik cihazdan kaynaklı gürültüler olabilir. Bu tip gürültülerin çoğunlukla, ortalama, ortanca ve gauss gibi filtrelerle ön işleme tabi tutularak giderilmesine çalışılır.

Ortalama filtresindeki genel düşünce; görüntüdeki her piksel değerini kendisi dâhil komşularının ortalaması ile değiştirmektir. Böylece o çevredeki piksel grubuna uymayan piksellerin elenmesi sağlanır. [28] Ortalama filtresi konvolüsyon denilen, matematiksel işlemle uygulanır. Konvolüsyon işlemi, filtreye uygun hazırlanmış bir çekirdek (kernel) matrisin görüntü üzerinde aynı boyutlardaki piksel gruplarıyla uygun şekilde çarpılıp toplanmasıyla yapılır. Ortalama filtresi için genellikle 3x3 ya da 5x5 'lik kernel matrisi oluşturulur.

Ortalama filtresine benzer olarak ortanca filtresi de; piksellerin belirli bir pencere aralığında komşu piksellere çok aykırı olmaması gerektiği düşüncesiyle, komşu piksellere bakarak elde edilen bir değerle piksel değerini değiştirir [29]. Böylece gürültülerin giderilmesi sağlanır. Burada ortalama filtresinden farklı olarak çevre pikseller sıraya dizilerek orta değer bulunur ve piksel değeri ile bu ortanca değer değiştirilir.

Gauss filtresi bir alçak geçiren filtredir. Gauss filtesi gürültüleri azaltırken, görüntüde bulanıklaştırma sağlamaktadır. Gauss dağılımı 1-B, 2-B ve N-Boyut için sırasıyla (1-3) gibi tanımlanır.

$$G(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

$$G(X) = \frac{1}{2\pi \cdot \sigma^2} \cdot e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

$$G(X) = \frac{1}{(\sqrt{2\pi} \cdot \sigma)^N} \cdot e^{-\frac{|x|^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Denklem (1-3) 'te;  $\sigma$  standart sapmayı,  $x$  yatay ekseninde orijinden uzaklığı ve  $y$  dikey ekseninde orijinden uzaklığı ifade eder.

Görüntüler bilgisayar ortamında 2 boyutlu ayırık pikseller olarak tutulmaktadır. Bu nedenle Gaussian fonksiyonu için ayırık bir yaklaşıma ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla Gaussian filtreleme için belirlenen boyutlarda ayırık bir matris tanımlanır. Bu matris penceresi görüntüdeki pikseller üzerinde konvolüsyon işlemine tabii tutularak görüntü üzerine Gaussian filtrelemesi uygulanmış olur.

#### **1.4. Nesne Bölütleme**

Bölütleme; sayısal görüntüler üzerinde farklı özelliklere sahip önplan ve arkaplan kısımlarını ayırtmak için yapılan bir görüntü analiz işlemidir. Görüntüyü daha sonra anlamlandıracak olan nesne ve özellik çıkarımı gibi kısımlar için hazırlayan aşamadır. Bölütleme problemi farklı yönlerden incelenebilir. Renk veya parlaklık değişimlerine göre bölütleme yapılabilmektedir. Gri düzeye getirilmiş görüntüler için bölütleme yöntemler, gri seviye değerleri görüntü içerisindeki gri seviye değerlerindeki süreksizlik ve benzerliği inceleyen yöntemler olarak ayrılabilir[31]. Gri seviye değerlerindeki süreksizliklere göre görüntü bölütlemeye, görüntü piksellerindeki ani parlaklık değişimleri incelenir, bu özelliği ile kenar belirleme işlemlerinde kullanılabilir. Gri seviye değerlerindeki benzerliklere göre görüntü bölütlemeye ise, görüntüdeki farklı parlaklık değerlerinden oluşan kümeler araştırılır. Bu bölütlemeye belirlenen bir eşik değere göre, eşiklemeye tabii tutmak, bölge bölütlemesi yapmak gibi çeşitli yöntemlerle görüntüdeki piksel kümeleri belirlenebilir. Hangi tür yöntemin kullanılacağı probleme özel olarak belirlenmektedir.

##### **1.4.1. Eşikleme Tabanlı Yöntemler**

Bilgisayarlı görü ve görüntü işleme uygulamalarında eşikleme işlemleri gri düzeye çevrilmiş görüntü üzerindeki pikselleri değerlerine göre iki veya daha fazla gruba ayırırken, en uygun değerin bulunması ya da minimum hata ile gruplama işleminin sağlanması için kullanılan işlemlerdir.

### 1.4.1.1. Otsu Eşikleme Yöntemi

Eşikleme için en uygun gruptan yapılabilmek için aktif olarak kullanılabilen, dahası sıkça kullanılan uygulamalardan birisi Nobuyuki Otsu tarafından geliştirilmiş, Otsu Algoritmasıdır [32]. Otsu yöntemi, sınıflar arası varyansı ( $\sigma^2_B$ ) maksimum yapmaya çalışır.

Otsu algoritmasına göre [32] ilk olarak görüntüde piksel değerleri  $L$  ( $[1..L]$ ) olarak, her  $i$ . seviyedeki piksel sayısı  $n_i$  olarak ifade edilir. Bu durumda toplam piksel sayısı ( $N$ ) (4) 'teki eşitlikten bulunabilir.

$$N = n_1 + n_2 + \dots + n_i + \dots + n_L \quad (4)$$

Gri seviye görüntü, uygun  $t$  eşik değeri ile görüntü piksellerinin ayrıldığı iki sınıf  $C_1$  ve  $C_2$  olarak adlandırılır;  $p_i$  değişkeni de  $i$ . seviyedeki piksel sayısının toplam piksel sayısına oranı olduğu düşünülürse  $C_i$  kümeleri (5) ve (6) eşitliklerindeki gibi bulunabilir.

$$C_1: \frac{p_1}{\omega_1(t)}, \frac{p_2}{\omega_1(t)}, \dots, \frac{p_t}{\omega_1(t)} \quad (5)$$

$$C_2: \frac{p_{t+1}}{\omega_2(t)}, \frac{p_{t+2}}{\omega_2(t)}, \dots, \frac{p_L}{\omega_2(t)} \quad (6)$$

(5) ve (6) 'da belirtilen kümelerde  $\omega$  değerleri de (7) ve (8) denklemlerine göre elde edilir;

$$\omega_1(t) = \sum_{i=1}^t p_i \quad (7)$$

$$\omega_2(t) = \sum_{i=t+1}^L p_i \quad (8)$$

Sonuç olarak sınıflar arası varyansı ( $\sigma$ ) en büyük yapacak uygun  $t^*$  eşikini belirleyebilmek için de (9-12) eşitlikleri kullanılır.

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2) \quad (9)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^t ip_i / \omega_1(t) \quad (10)$$

$$\mu_1 = \sum_{i=t+1}^L ip_i / \omega_2(t) \quad (11)$$

$$t^* = ArgMax\{\sigma_B^2(t)\} \quad (12)$$

#### 1.4.1.2. Uyarlamalı (Adaptif) Yerel Eşikleme

Uyarlamalı yerel eşikleme yaklaşımı ile görüntünün farklı bölgeleri için farklı eşik değerleri üretilerek önplan bilgileri daha doğru tespit edilmektedir. Nesnelerin sınırlarının belirlenmesine elverişlidir. Karakter tanıma gibi ışık değişiminden kolay etkilenen uygulamalarda kullanılmaktadır.[33]

Yerel eşikleme işlemi için geliştirilen yaklaşımlardan Chow ve Kaneko yaklaşımı[34]; resmi alt görüntülere bölerek yerelleştirme yapmaktadır. Burada her alt görüntü parçası için optimum eşik bulunmaya çalışılmaktadır.

Diğer bir yaklaşım olan her piksel için eşik değeri hesaplama yapan yerel (local) eşikleme yaklaşımıdır[35]. Bu yaklaşımda, her piksel için pikselin yerel komşuluklarında parlaklık değerlerinin istatistiksel olarak incelenmesi yapılmaktadır. Seçilecek istatistik yöntemi büyük oranda giriş görüntüsüne bağlıdır. Bu iş için kullanılacak basit ve hızlı fonksiyonlar; yerel parlaklık dağılımı için ortalama hesaplama, ortanca hesaplama ya da maksimum ve minimum değerlerin ortalamasının alınmasıdır[36].

Burada eşik değeri hesaplanırken seçilecek komşuluk oranı arkaplan ve önplan piksellerini içerebilecek kadar büyük seçilmelidir, aksi halde zayıf bir eşikleme olacaktır. Bununla beraber global eşiklemede olduğu gibi, ışık değişimlerinden etkilenmemesi için de çok büyük komşuluk oranı seçilmemelidir[36].

### 1.4.1.3. K-Ortalama Yöntemi

K-Ortalama (K-Means) kümeleme algoritması girilen veri noktalarını birbirlerine olan uzaklıklarına göre birden fazla sınıfa ayırabilen, danışmansız bir kümeleme algoritmasıdır. Algoritma veri özelliklerinin bir vektör alanı oluşturduğunu varsayar ve bunların içindeki doğal grupları bulmaya çalışır [37]. K-Ortalama algoritması ile görüntü birden fazla parlaklık grubuna ayrılarak betimlenebilir. Bu algoritma ile bölütleme olarak yapılan işlem şu şekilde ifade edilebilir:

Öncelikle görüntü gri seviyeye getirilir ve görüntüye ait histogram çıkarılır. Görüntü arkaplan ve önplan olarak iki seviyeye ayrıştırılmak istendiğinden çıkarılan histogramda iki adet merkez noktası rastgele belirlenir. Piksel değerlerinin merkez noktalara olan uzaklığı belirlenir ve yakın olan merkezle kümelenir. Kümelerin histogram değerlerine göre ortalamaları alınarak yeni merkez noktaları belirlenir. Bu işlemler merkez noktası değişimi olmayana kadar tekrar edilir.

### 1.4.2. Sınır Tabanlı Yöntemler

Sınırlar veya kenarlar, basit olarak ifade edilirse farklı iki bölgeyi ayıran kısımlardır. Bir görüntüdeki kenarlar; görüntüde istenilen detayları belirlemek, istenmeyen detayları ise kaldırmak, amacıyla belirlenmektedirler. Sınır bulma yöntemleri kendi aralarında Gradyan tabanlı yöntemler, Laplasyan tabanlı yöntemler ve Canny yöntemi olarak ayrıştırılabilir.

#### 1.4.2.1. Gradyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri (Roberts, Prewitt, Sobel)

Kenar belirleme işlemlerinde bir görüntü üzerindeki parlaklık yoğunluk farklılıkları yani ani ışık değişiklikleri araştırılmaktadır. Bu değişimlerin araştırılmasında ise görüntünün gradyanı kullanılmaktadır. Gradyanlar görüntü üzerinde yönlü türevler olarak ifade edilebilir. Görüntü işleme uygulamalarında gradyan tabanlı kenar belirleme yöntemleri olan Roberts[38], Prewitt[39] ve Sobel[40] yöntemlerinde, görüntü; farklı doğrultularda seçilen küçük boyutlu maskeler ile konvolüsyon işlemine tabi tutulur. Bu sayede belli bir yöndeki kenarların bulunmasını sağlar.



### 1.4.2.2. Laplasyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri

Görüntü üzerindeki belirgin ışık değişimlerinin belirlenmesi için kullanılan bir diğer yaklaşım Laplasyan tabanlı yöntemlerdir. Laplasyan tabanlı yöntemlerde ikinci türev kullanılmaktadır. Bu yöntemler, ikinci türevi kullanmasından dolayı gürültüye daha hassas hale gelmektedirler. Bu nedenle gürültüler; görüntünün Laplasyan filtresinden önce Gaussian filtresi gibi bir filtreden geçirilerek görüntüdeki yüksek frekanslı gürültü bileşenleri azaltılarak yumuşatılır. Görüntünün Laplasyan 'ı bir konvolüsyon filtresi aracılığı ile bulunabilmektedir.

Önce Gaussian filtresi kullanılan sonra hemen ardından Laplasyan filtresi uygulanan filtreleme işlemi LoG (Laplacian of Gaussian) filtreleme yöntemi[41] olarak ifade edilir. Konvolüsyon işlemi için farklı LoG maskeleri kullanılabilir.

### 1.4.2.3. Canny Kenar Belirleme Yöntemi

Canny kenar belirleme algoritmasının4 adımı bulunmaktadır bunlar: yumuşatma, gradyan hesaplanması, maksimum olmayan noktaların bastırılması ve eşiklemedir[42].

Yumuşatma (smoothing) aşaması ile görüntü bir Gaussian filtresi ile yumuşatılır. Gradyan hesaplanması aşaması ile gradyan büyüklüğü ve yönü elde edilir. Maksimum olmayan noktaların bastırılması aşamasında görüntüde maksimum olmayan noktalar elenir. Son olarak eşikleme kısmında, kenar pikselleri bulmak için önce maksimum olmayan kenarların bastırıldığı görüntüdeki hatalı oluşabilecek kenarlar için bir eşikleme yapılı, sonrasında tüm görüntü için uygun eşik aranır.

### 1.4.3. Aktif Kontur Yöntemi

Aktif kontur modeli ya da Snake olarak bilinen yöntem, sınırları net olmayan veya bozuk sınırları olan nesnelere ya da nesne parçalarını bölütlemek amacıyla kullanılmaktadır. Görüntülerde nesne sınırlarına enerji minimizasyonu ile yaklaşılmaya dayanmaktadır. [43] Görüntü üzerinde bulunan kenar gibi ve çizgiler gibi dış kuvvetlerin etkisiyle snake adı verilen kıvrım (spline) şekil değiştirir ve nesne sınırlarına yaklaştıkça durur. Bu şekil değiştirme işlemi için enerji minimizasyonunu kullanılmaktadır. Enerji minimizasyonu sonucunda nesne sınırlarına benzemiş olan eğri nesneye ait kapalı şekli ortaya çıkarmaktadır.

Aktif Kontur Modeller Algoritmasında yılanı etkileyen kuvvetler üç sınıfa ayrılmaktadır. İlki; snake kıvrımını çizgi ve kenarlar gibi görüntü detaylarına yönlendiren görüntü kuvvetleridir. İkincisi; snake kıvrım şeklini kontrol eden kuvvetlerdir bunlar iç kuvvetler olarak belirtilir. Dış kuvvetler, snake kıvrımını ilgilenilen bölgeye en yakın noktaya (yerel minimuma) olan hareket ettirmekten sorumludur. [44]

Yılan  $n$  adet noktadan oluşan bir küme olarak ifade edilebilir ( $V_i$ ). Snake enerjisi Denklem (13) ile verilir [43].

$$E_{snake}^* = \int_0^1 (E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{con}(v(s))) ds \quad (13)$$

Denklem (13) 'te;  $E_{int}$  kıvrılmadan oluşan iç enerjii,  $E_{image}$  görüntü kuvvetlerini ve  $E_{con}$  dış sabit kuvvetleri ifade eder. Denklem (14) 'te, iç enerjiiyi sınırın devamlılığı  $E_{cont}$  ve sınırın pürüzsüzlüğü (smoothness)  $E_{curv}$  tanımlar.

$$E_{int} = E_{cont} + E_{curv} \quad (14)$$

Görüntüdeki kuvvetler için verilen Denklem (15) 'te çizgiler ( $E_{line}$ ), kenarlar ( $E_{edge}$ ) ve bitişlerin ( $E_{term}$ ) enerjileri ile bu enerjilerin ağırlıklandırma katsayıları ( $w_{line}$ ,  $w_{edge}$ ,  $w_{term}$ ) kullanılarak oluşturulur.

$$E_{image} = w_{line}E_{line} + w_{edge}E_{edge} + w_{term}E_{term} \quad (15)$$

Yukarıda sözü edilen dış sabit kuvvetler ise bazı sistemlerde kullanıcının dışardan sağlayabildiği etkiyi ifade etmektedir. İşlemin başlaması için bir başlangıç alanı belirlenir ve bu alan içerisinde snake kıvrımına ait enerji fonksiyonu, adım adım minimize edilir.

#### 1.4.4. Matematiksel Morfoloji

Küme teorisine dayanan matematiksel morfoloji işlemleri; görüntüler üzerinde; uygulandığı yonteme göre küçük boşlukların doldurulması ya da olmaması gereken küçük bağlantı noktalarının giderilmesi gibi işlemleri sağlamaktadır. Bu sayede görüntülerin

yorumlanmasına engelleyecek durumların giderilmesine yardımcı olurlar. Morfolojik işlemlerin temeli aşındırma ve genişleme işlemlerine dayanmaktadır.

Aşındırma Morfolojik işlemi görüntü üzerinde iki nesne arasında kalmış istenmeyen bağlantıların ve küçük gürültülerin giderilmesi amacıyla kullanılır. Yapısal elemanın görüntü üzerinde gezdirilerek arkaplan noktalarına rastgelen kısımlarda pikselin arkaplan pikseline dönüştürülmesi sağlanır. Bu işlem matematiksel olarak (16) eşitliğindeki gibi ifade edilebilir.

$$A \ominus B = \{z|(B)_z \cap A^c = \emptyset\} \quad (16)$$

Denklem (16) 'da,  $A$  görüntü,  $A^c$  görüntünün tümleyeni,  $B$  yapısal eleman ve  $z$  de yapısal elemanın ötelenme miktarını ifade etmektedir[45].

Genleşme morfolojik işlemi, görüntü üzerinde oluşan istenmeyen küçük boşlukların doldurulması ve kopan bağlantıların düzeltilmesi gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Aşındırma işlemine benzer şekilde yine bir yapısal eleman oluşturularak görüntü üzerinde dolaştırılır. Yapısal elemanla kesişen bir ön plan örneği varsa görüntü üzerindeki o pikseller önplan pikseline dönüştürülür. Genleşmenin matematiksel küme teorisine dayalı ifadesi (17) eşitliğindeki gibidir.

$$A \oplus B = \{z|((B^s)_z \cap A \neq \emptyset)\} \quad (17)$$

Denklem (17) 'de,  $A$  görüntü,  $B$  yapısal eleman,  $B^s$ ;  $B$  'nin kendi orijinine göre yansıması yani simetriği ve  $z$  de bu simetrik elemanın kaydırılmasını ifade etmektedir[45].

### 1.5. Nesne Belirleme ve İlgili Alanının Belirlenmesi

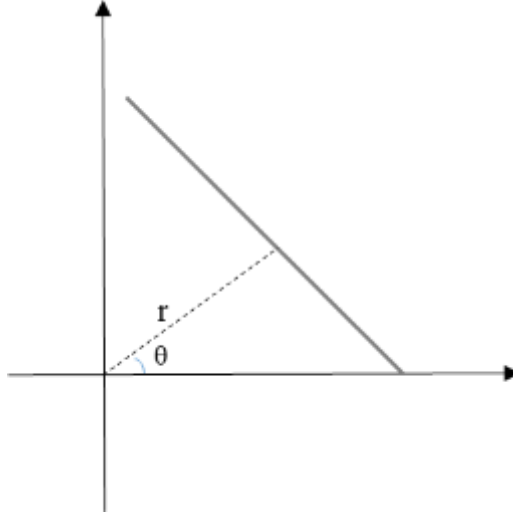
Nesne ve ilgili alanının belirlenmesi; görüntüdeki anlamlı parçaların, ayırt edici özellikleri sayesinde bulunması ve incelenmesi amacıyla yapılmaktadır. Görüntülerdeki nesnelerin sınıflandırılması veya yorumlanması için nesnelerin özellik çıkarımına ihtiyaç duyulur. Ayrıca video görüntülerindeki nesnelerin değişen kısımlarının takip edilebilmesi ve değişimlerin aranılacağı aralığın daraltılabilmesi için de ilgi alanlarının belirlenebilmesi gerekmektedir.

### 1.5.1. Hough Dönüşümü

Sayısal görüntü işlemede önemli bir konuma sahip Hough dönüşümü 1962 yılında Paul Hough tarafından sunulmuştur[46]. Daha sonra Richard Duda ve Peter Hart tarafından Genelleştirilmiş Hough Transformu önerilmiştir[47]. Hough dönüşümü görüntü üzerinden geometrik şekillerin çıkarılması için kullanılmaktadır. Hough dönüşümünü özel kılan görüntü üzerinde bozukluklar, gürültüler ya da kenarlarda eksik kısımlar olmasına rağmen kullandığı oylama uygulamasıyla şekle uygun sınıfın belirlenmesini sağlayabilmektedir. Her kenar noktası kendilerinden geçen mümkün tüm şekilleri oylar ve potansiyel şekillerin miktarlarının ölçüleceği akümülatör matrisindeki sayılarını artırır. Akümülatör matrisindeki en yüksek dereceli yere karşılık gelen nokta ilgili nokta olarak alınır.

#### 1.5.1.1. Hough Dönüşümü ile Doğru Bulma

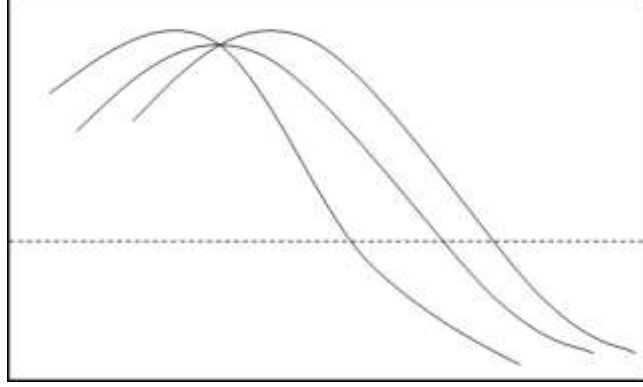
Hough dönüşümünün ilk kullanım şekli görüntüdeki çizgilerin bulunması amacıyla kullanılmıştır. Görüntü üzerinde Hough dönüşümü ile doğru bulmak için doğru denklemi parametrik uzayda ele alınır (18).



Şekil 3. Hough dönüşümü kartezyen uzay

$$x \cos \theta + y \sin \theta = r \quad (18)$$

Denklem (18) 'de  $r$  merkezden doğruya olan uzaklık ve  $\theta$ ;  $x$  eksenine göre normalin açısını ifade etmektedir. Görüntü işleme icrasında kenar noktaları belli olduğu için  $\theta$  ve  $r$  değerleri değişken olarak ele alınabilmektedir. Hough parametre uzayına bakıldığında. Şekil 3. 'de örneği görülen kartezyen uzayda aynı doğru üzerindeki noktalar, polar uzaydaki eğriler olarak  $(r, \theta)$  'de kesişeceklerdir. Şekil 4. 'de bunun örneği görülmektedir.



Şekil 4. Parametre uzayında kesişimler

Kesişimlerin miktarına göre akümülatör matrisi adı verilen matris üzerindeki hücrelerdeki değerler artırılır ve belirli bir eşikten fazla değere sahip olanlar çizgi olarak alınır.

#### 1.5.1.2. Hough Dönüşümü ile Daire Bulma

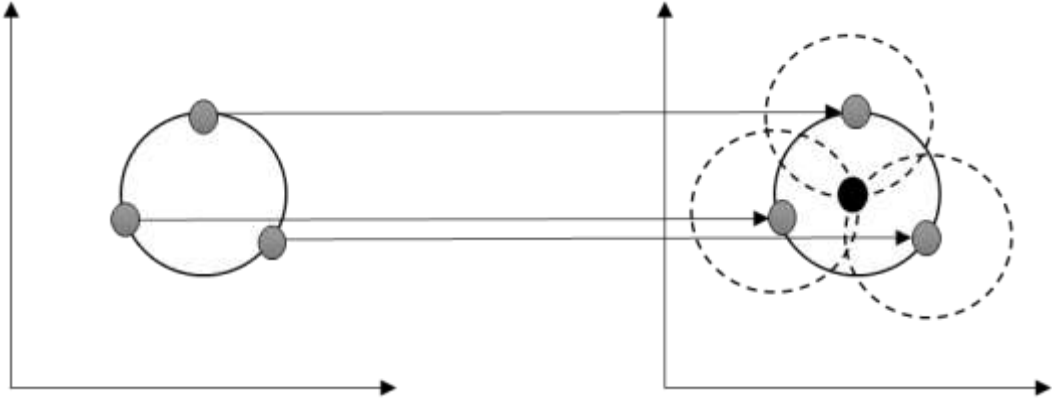
Hough dönüşümü ile görüntü üzerinde doğruların yanı sıra eliptik ve dairesel geometrik şekillerin bulunabilmesi de mümkündür. Yine daire denklemini olan (19) eşitliği, (20) ve (21) denklemleriyle parametrik hale getirilir.

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = r^2 \quad (19)$$

$$x = a + R \cos(\theta) \quad (20)$$

$$Y = b + R \sin(\theta) \quad (21)$$

Dairenin yarıçap verisi biliniyorsa, kenar bilgisi bulunan, kartezyen düzlemdeki görüntü üzerinde her bir kenar noktası; parametrik uzayda, merkez noktası gibi alınır. Her bir merkez noktasından bu yarıçapta daire oluşturulduğu düşünülürse; parametrik uzayda kesişimlerin en yoğun olduğu nokta merkez olarak belirlenir. Şekil 5. 'de sol tarafta kartezyen düzlemdeki görüntüdeki dairenin merkezinin parametre uzayında bulunmasına dair örnek görülmektedir. Eğer görüntüdeki daire ya da dairelerin yarıçap değeri bilinmiyorsa, tahmini bir yarıçap aralığı belirlenir. Sonra yarıçapın bilindiği durumda olduğu gibi parametrik uzayda dairelerin kesişim noktaları incelenerek daireler bulunur. Belirlenen yarıçap aralığında her bir yarıçap değeri için bu işlemler tekrar edilir. Şekil 5. 'de oklarla kartezyen uzaydaki sınır noktalarının polar düzlemde oluşturabileceği daireler gösterilmektedir. Polar düzlemdeki bu dairelerin en çok kesiştiği nokta dairenin merkezi olarak kabul edilir.

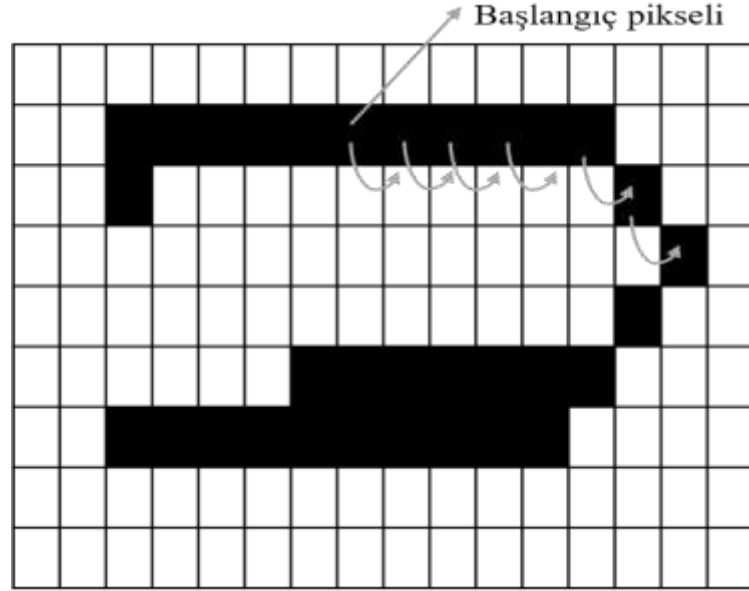


Şekil 5. Hough dönüşümü ile daire bulma

Doğru bulmada olduğu gibi daire bulmada da kesişim noktalarında bir akümülatör matrisindeki ilgili hücre değeri artırılır ve kesişimin en çok olduğu nokta belirlenir. Bu şekilde pek çok daire belirlenebilir. Bu nedenle belirlenen bir eşik uygulanarak belirli çaptaki daireler belirlenir.

### 1.5.2. Sınır İzleme

Sınır izleme, bir geometrik şekli olsun ya da olmasın nesnenin belirli bir aralıktaki sınırlarına ihtiyaç duyulduğu durumlarda nesnelerin kenarlarının izlenmesi için kullanılmaktadır. İzleme işlemi için öncelikle görüntüdeki nesnenin iç veya dış sınırlarından bir nokta seçilir. Sonra nesnenin izlenecek sınır yönü, saat yönünde veya saat yönünün tersi şeklinde, seçilmelidir. Bu seçimler sonrasında başlangıç pikseline belirlene en yakın uygun piksel belirlenir ve bu belirlenen pikselin komşuları arasında en yakın nokta aranır[45]. Şekil 6. 'da saat yönünde sınır izleme yapıldığında bulunan sonraki pikseller oklarla gösterilmiştir.



Şekil 6. Saat yönünde sınır izleme sonucu belirlenen pikseller

Arama yapılan yönde ve istenilen uzunlukta bu işlemler tekrar edilerek sınır izlemesi sağlanmış olur. Bu işlemi otomatikleştirebilmek için uygun başlangıç noktasının otomatik seçilmesi gerekmektedir.

### 1.5.3. Bağlantılı Bileşen Etiketleme

Arkaplan görüntüsü ile önplan görüntüsünün ayrıştırılması yani önplandaki nesnelerin bulunması işlemine görüntünün bölütlenmesi işlemi denir. Bağlantılı bileşen etiketleme (connected component labeling) algoritması önplan nesnelerinin ayrı ayrı etiketlenmesiyle bölütleme işlemi için kullanılabilir[48]. Bu algoritma bölütlenmiş ikili görüntülere uygulanmaktadır.

Bağlantılı bileşen etiketleme işleminin ardındaki düşünce görüntünün yukarıdan aşağıya ve soldan sağa piksel piksel taranarak bağlantılı piksel gruplarının belirlenmesi şeklindedir. Bağlantılı bileşen analizi için; “Her seferinde bir bileşen” (One component at a time) ve “Çift geçiş” (Two pass) gibi algoritmalar bulunmaktadır. Sıklıkla kullanılan yöntem çift geçiş algoritmasıdır. İkili görüntüde, ön plan nesnelerinin beyaz olduğu kabul edilirse bu algoritmada yapılan işlemler şöyledir[49].

Beyaz piksele geldiğinde seçilen komşuluk oranına göre, 4 veya 8 komşuluklardaki pikseller incelenir. Komşu piksellerde ön plan pikseli ya da etiketli piksel yoksa yeni bir etiket eklenir. Eğer etiketli bir komşu varsa bu pikselin etiketi alınır. Birden fazla ve farklı etiketli komşular varsa bu pikseller içinde en düşük olanı alınır ve ikinci geçiş için aynı alanı gösteren farklı etiketler tablosuna ekleme yapılır. İlk geçiş tamamlandıktan sonra ikinci geçişte de oluşturulan tabloya göre aynı grupta birden fazla etikete sahip olan durumlar tek grup haline getirilerek düzeltilir[49].

Şekil 7. ‘de “1” lerin önplan ve “0” ların arkaplan bilgisi olduğu soldaki gibi olan bir ikili görüntü üzerinde bağlantılı bileşen analizi yapılması durumunda elde edilecek gruplar sağda görülmektedir.

### 1.6. Öznitelik Çıkarımı

Öznitelik çıkarımı işlemi, örüntü tanıma, makine öğrenmesi ve bilgisayarlı görü gibi uygulamalarda; görüntünün ilgilenilen kısımlarındaki ayırt edici verileri daha küçük özellik vektörleri ile ifade etmek amacıyla kullanılır. Özellik çıkarımı yapılırken renk, desen veya şekil gibi bilgilerden faydalanılır. Görüntü parçalarının yorumlanması bu vektörler üzerinden yapılır. Bu nedenle uygulama başarısını doğrudan etkileyen faktörlerdendir.



0	0	0	0	1	1
0	1	1	0	1	0
0	0	1	0	1	0
0	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0

0	0	0	0	1	1
0	2	2	0	1	0
0	0	2	0	1	0
0	0	2	0	0	0
0	0	0	0	0	0
0	0	3	3	3	0

Şekil 7. İkili görüntü(solda) ve etiketleme sonrası elde edilen gruplar (sağda)

### 1.6.1. Değişmez Momentler

1962 yılında M-K Hu [50] tarafından matematik ve istatistikte kullanılan moment yaklaşımı ile yedi değişmez moment ortaya konuldu. Bu değişmez momentler döndürme, ölçeklendirme ve dönüştürme gibi durumlarda değişmediğinden görüntü tanıma, görüntü işleme gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Karakter tanıma gibi şekilsel farklılıklara dayalı 2 boyutlu görüntü tanıma uygulamalarında başarılı sonuçlar vermektedir[51].

Hu 'nun değişmez momentlerinin belirlenebilmesi için normalize edilmiş merkezi momentler kullanılmaktadır. Merkezi momentler ise en temel moment kümesi olan geometrik momentler yardımıyla hesaplanmaktadır. İki boyutlu  $f(x,y)$  fonksiyonu ile gösterilen bir görüntü fonksiyonu için, derecesi  $(p+q)$  şeklinde ifade edilen geometrik momentler  $(m_{pq})$ , (22) 'deki gibi tanımlanır.

$$m_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x^p y^q f(x,y) dx dy \quad p, q = 0,1,2, \dots \quad (22)$$

Buradan  $\bar{x}$  ve  $\bar{y}$  hesaplanmasında (23) eşitliği kullanılır.

$$\bar{x} = \frac{m_{10}}{m_{00}} \text{ ve } \bar{y} = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (23)$$

Buna göre merkez momentleri  $(\mu_{pq})$  (24) deki gibi ifade edilir.

$$\mu_{pq} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \bar{x})^p (y - \bar{y})^q f(x, y) dx dy \quad p, q = 0, 1, 2, \dots \quad (24)$$

Bulunan merkez momentlerinin normalize edilmesi gerekir.

$$\eta_{pq} = \frac{\mu_{pq}}{\mu_{00}^{\gamma}}, \gamma = \frac{p + q + 2}{2}, p + q = 2, 3, \dots \quad (25)$$

Normalize edilen merkezi momentlere göre Hu ‘nun yedi değişmez momentleri (26-32) ‘denklemleri ile elde edilir[52].

$$\phi_1 = \eta_{20} + \eta_{02} \quad (26)$$

$$\phi_2 = (\eta_{20} - \eta_{02})^2 + 4\eta_{11} \quad (27)$$

$$\phi_3 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})^2 + (3\eta_{21} - \eta_{03})^2 \quad (28)$$

$$\phi_4 = (\eta_{30} + \eta_{12})^2 + (\eta_{03} + \eta_{21})^2 \quad (29)$$

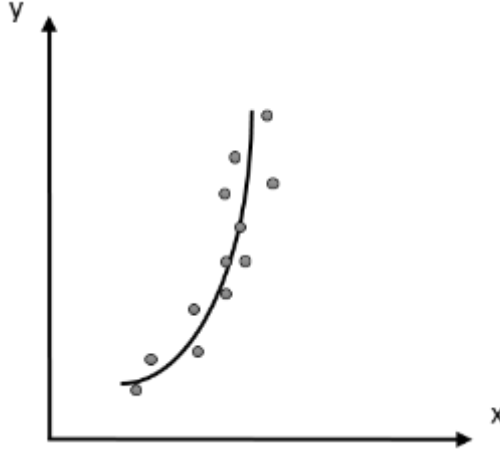
$$\phi_5 = (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{21} + \eta_{03})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (30)$$

$$\phi_6 = (\eta_{20} - \eta_{02})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ + 4\eta_{11}(\eta_{30} + \eta_{12})(\eta_{21} + \eta_{03}) \quad (31)$$

$$\phi_7 = (3\eta_{21} - \eta_{03})(\eta_{30} + \eta_{12})[(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - 3(\eta_{21} + \eta_{03})^2] \\ - (\eta_{30} - 3\eta_{12})(\eta_{03} + \eta_{12})[3(\eta_{30} + \eta_{12})^2 - (\eta_{21} + \eta_{03})^2] \quad (32)$$

### 1.6.2. En Küçük Kareler Yöntemi ile Eğri Uydurma

Eğri uydurma, düzlemde verilen noktalar kümesini bir matematiksel fonksiyon aracılığı ile ifade etmek için kullanılan bir yöntemdir. Böylece çok sayıda noktadan oluşan veri kümesi bir fonksiyon tarafından ifade edilebilir. Şekil 8. 'de noktalara uydurulmuş bir fonksiyon görülmektedir.



Şekil 8. Noktalara uydurulmuş fonksiyon eğrisi örneği

Burada yapılması gereken; verilmiş olan noktaları en az hata ile temsil edebilen bir eğri ya da doğru denkleminin bulunmasıdır. Bu doğru ya da eğri denklemini bulmak amacıyla Gauss tarafından geliştirilen En Küçük Kareler Yöntemi kullanılabilir.

Düzlemde bulunan noktalar  $i = 0, 1, 2, \dots, 3$  için  $(x_i, y_i)$  olarak belirtilsin. Bu noktalar için bir  $y_i = f(x_i)$  fonksiyonu aranır ancak noktaların hepsi bu denklemi sağlamayacağından  $y_i \approx f(x_i)$  olacak bir fonksiyon belirlenmelidir. Bu nedenle en küçük kareler yönteminde  $m$  tane noktada  $(y_i - f(x_i))^2$  değerleri toplamını minimum yapacak bir fonksiyon aranır[53]. Verilen  $(x_i, y_i)$  noktalarına uygun  $f(x) = mx + n$  doğrusu Denklem (33) ile bulunur.

$$f(m, n) = \sum_{i=1}^n (y_i - mx_i - k)^2 \quad (33)$$

Aynı şekilde bir parabol eğrisi denklemini  $f(x) = ax^2 + bx + c$  alınrsa (34) eşitliği oluşur.

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (y_i - ax_i^2 - bx_i - c)^2 \quad (34)$$

Bu denklemler matris işlemleri yardımıyla çözümlenerek  $y_i \approx f(x_i)$  sonucu elde edilir.

## 1.7. Nesne Sınıflandırma

Sınıflandırma, özellik vektörlerini gruplayacak en uygun karar doğrularının belirlenmesi işlemidir. Sınıflandırma uygulamalarında iki aşama bulunmaktadır. İlk sınıfların belirlenmesi ikincisi karar kuralının belirlenerek sınıflandırmanın tamamlanmasıdır. Sınıflandırma işlemleri danışmanlı ve danışmansız olmak üzere ikiye ayrılır. Danışmansız yöntemlerde verilerin sınıfları uygulamaya verilmezken; danışmanlı yöntemlerde; sınıfları danışman tarafından belirtilen bir eğitim kümesi kullanılır.

### 1.7.1. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları; insan beynini taklit etmeyi hedefleyen bir yöntemdir. İşlemsel düğüm ve bağlantılar içermektedirler. Yapay sinir ağlarının temel işlem birimleri yapay nöronlardır. Nöronlar lineer olmayan birleşim noktaları olarak çalışırlar. Nöronlar gelen bağlantı etkilerinin belli bir seviyeyi aşması ile harekete geçen bir eşik birimi olarak düşünülebilirler. Yani biyolojik nöronlarda olduğu gibi uyarımın belli bir seviyeyi aşmasıyla iletme geçen bir sisteme sahiptir. Biyolojik nörona dayalı ilk yapay nöron yapısı McCulloch ve Pitts modelidir[54], bu model yapay sinir ağlarının başlangıcı olarak kabul edilmektedir.

#### Yapay Sinir Ağlarının Avantaj ve Dezavantajları

##### Avantajları

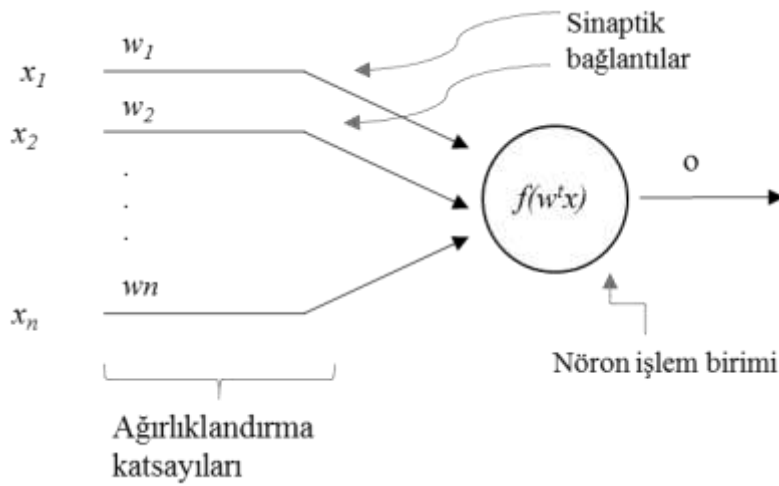
- Eksik bilgi ile çalışıp yaklaşık sonuçlar üretilebilir.
- Lineer olmayan sorunlara uygulanabilir.
- Bir kere eğitildikten sonra daha hızlı çalışır.
- Verilerin tamamı ağı etkiler.
- Örüntü ilişkilendirme ve sınıflandırma yapılabilir.
- Danışmansız eğitim yapılabilir.
- Hata toleransına sahiptir.

## Dezavantajları

- Kesin sonucu olabilen sistemler için yaklaşık sonuç üretebilmesi.
- Uygun ağ yapısının belli olmaması.
- Bilgisayarlarda paralelleştirme imkânlarının genelde kısıtlı olması.

## 1.7.1.1. Yapay Sinir Ağları İçin Nöron Modelleme

McCulloch-Pits modeli, yalnızca 0 ve 1 yani ikili ayrık durumları alması gibi bazı kısıtlamalara sahiptir. Her nöron modeli bir sinaptik giriş bağlantıları olan işlem elemanı ve bir çıkış içerir. Sinyal akışı ok yönünde tek yönlü olduğu kabul edilir. Genel nöron yapısı. Şekil 9. 'da görülmektedir.



Şekil 9. Genel nöron yapısı

Nöron çıkış sinyalleri Denklem (36) ve (37) 'deki yaklaşımlarla belirlenir.

$$o = f(w^t x) \quad (35)$$

$$o = f\left(\sum_{i=0}^n w_i x_i\right) \quad (36)$$

Burada  $w$  ağırlıklandırma vektörü Denklem (38) 'deki gibi;

$$w \triangleq [w_1 \ w_2 \ \dots \ w_n]^t \quad (37)$$

X giriş vektörü de Denklem (39) 'daki gibi ifade edilir.

$$x \triangleq [1 \ x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^t \quad (38)$$

$f(w^t x)$  fonksiyonu aktivasyon fonksiyonu olarak bilinir.  $net \triangleq w^t x$  olmak üzere  $f(net)$  şeklinde ifade edilir.

Denklem (40) 'da sürekli ve Denklem (41) 'de ayrık olmak üzere sıklıkla kullanılan aktivasyon fonksiyonları verilmiştir[54].

$$f(net) \triangleq \frac{2}{1 + \exp(-\lambda net)} \quad (39)$$

$$f(net) \triangleq sgn(net) = \begin{cases} 1, & net > 0 \\ 0, & net < 0 \end{cases} \quad (40)$$

### 1.7.1.2. Yapay Sinir Ağ Topolojileri

Yapay sinir ağ topolojileri ileri ve geri beslemeli olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. İleri beslemeli yapay sinir ağlarında  $n$  girişten,  $m$  tane nörona ve çıkışa doğru düzenli şekilde ilerleyen ağlardır. Girişlerden ara katmana ve oradan da çıkışa doğru ilerleme söz konusudur. Geri beslemeli yapay sinir ağlarında bir düğümün çıktısı kendinden önceki katmanlara giriş olarak verilebilmektedir.

### 1.7.1.2.1. İleri Beslemeli Yapay Sinir Ağları

İleri beslemeli yapay sinir ağı için,  $n$  giriş bilgisi  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^t$  şeklinde ve  $m$  çıkış bilgisi de; (bu tek katmanlı yapay sinir ağı olduğu için düğüm sayısı da  $m$  olacaktır)  $o = [o_1, o_2, \dots, o_m]^t$  şeklinde ifade edilsin.

Bu durumda net bilgisi (42) 'deki gibi olacaktır;

$$net_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m \quad (41)$$

$o$  çıkışı da aktivasyon fonksiyonunun eklenmesiyle (43) 'deki gibi olacaktır.

$$o_i = f(w_i^t x), \quad \text{for } i = 1, 2, \dots, m \quad (42)$$

Burada da  $w$  yine ağırlık vektörünü ifade etmektedir.  $w_{ij}$  ifadesinde  $i$ . Düğüme,  $j$ . Girişten gelen ağırlık ifade edilmektedir[55].

### 1.7.1.3. Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme Yöntemleri

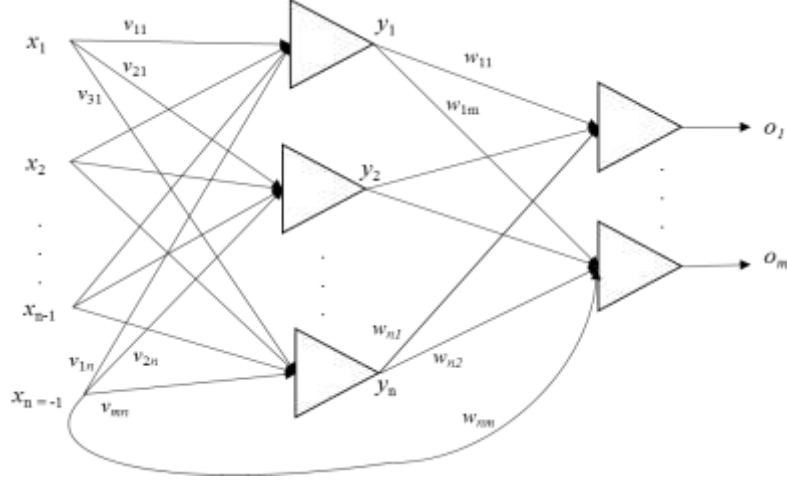
Yapay sinir ağları için danışmanlı ve danışmansız öğrenme şeklinde iki temel üzerine inşaa edilmiş çeşitli öğrenme yöntemleri bulunmaktadır. Perceptron, Delta, Widrow-Hoff, Outstar Learning Rule yöntemleri danışmanlı, Hebbian, Winner-take-all danışmansız öğrenme yaklaşımlarındandır[55].

#### 1.7.1.3.1. Hata Geri Yayımlı Öğrenme

Danışmanlı olan bu hata yayımlı öğrenme yönteminde eldeki giriş örüntü setinden örnekler sırayla ağa verilerek ağırlıkların güncellenmesi esas alınır. Bu işlem yapılırken sisteme ilk olarak ek bir giriş (1 veya -1 gibi) eklenir ve daha sonra rastgele ağırlık değerleri düğümlere gelen ağırlık vektörlerine verilir. Giriş verileri ilk katman düğümlerine iletilerek ilk düğüm çıkışlarından ilk (rastgele) ağırlıklara göre sonuç elde edilir. Sonra bu katmanın çıkışı sonraki katman için giriş kabul edilir ve çıkışların birleştiği düğümlerde buralardan gelen giriş verileri ve ilk ağırlıklara göre çıkışlar elde edilir[55]. İki katmanlıdan fazla katmana sahip sistemler için aynı işlemler çıkışa kadar devam eder.

Sonuç olarak çıkış katmanından bir sonuç bilgisi ya da örüntüsü elde edilir. Bu örüntü giriş verisine ait beklenen çıkış örüntüsü ile karşılaştırılır. Aynı ise ağırlıklar da değişmez. Ancak giriş verisine ait beklenen çıkış örüntüsü çıkışlardan farklı ise her bir düğümde fark alınarak elde edilen hata bilgisi ile sırayla, katman ağırlıklar güncellenir.

Bu sistem için uyarlanan ağ yapısı[55] Şekil 10. 'da verilmiştir.

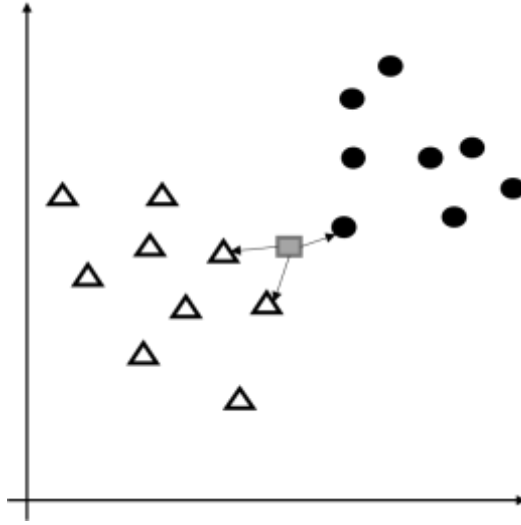


Şekil 10. Hata geri yayımlı öğrenme yapısı

### 1.7.2. K En Yakın Komşuluk (KNN) Yöntemi ile Sınıflandırma

K en yakın komşuluk yöntemi; sınıflandırılmak istenen nesneye ait özellik vektörünü, kendisinden önce sınıflandırılmış veri gruplarını inceleyerek, en yakın gruba dâhil eden, bir kümeleme yöntemidir. KNN yönteminin uygulanmasında önce eğitim nesnelerinin özellik vektörleri oluşturulur ve bu vektörlere ait sınıfların ataması yapılır. Doğru sınıflandırma için, uygun  $k$  değerinin belirlenmesi gerekmektedir.  $K$  değeri; yeni vektör için eğitim vektörleri arasında uygun sınıf araştırılırken kullanılmaktadır. Yeni vektöre en yakın  $k$  elemanın en çok ait olduğu sınıf incelenir ve bu sınıf yeni elemanın dâhil olacağı sınıf olarak belirlenir.  $K$  sayısının seçimi sınıflandırma başarısını etkilemektedir.  $K$  'nın yüksek seçimi sınıflandırmadaki gürültüleri azaltmakta, ancak sınıflarının ayrıklığını azaltabilmektedir.  $K$  sayısı pratik olarak, toplam eğitim örneklerinin karekökünden daha az olacak şekilde seçilebilir[56]. Şekil 11. 'de İki boyutlu düzlemde KNN yöntemi ile sınıflandırma için incelenen uzaklıklar görülmektedir.





Şekil 11. İki boyutlu düzlemde k=3 için knn sınıflandırması için bulunan en yakın elemanlar

En yakın k adet komşu belirlenirken uzaklık ölçütü seçilmelidir. Öklit, Manhattan, Minkowski, Mahalanobis vb. uzaklık ölçme yöntemlerinden biri kullanılabilir. Bu tez çalışmasında Öklit yöntemi kullanılmıştır.

### 1.7.2.1. Öklit Mesafesi

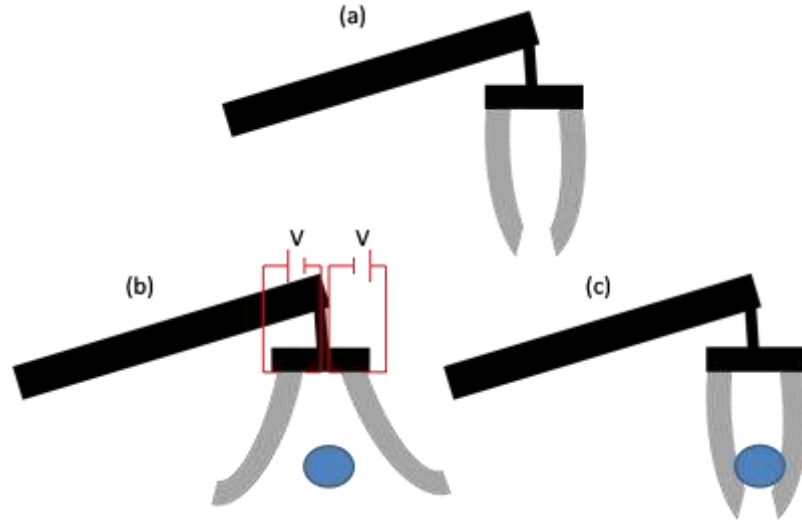
İki nokta arasındaki mesafenin ölçülmesinde kullanılan bir yöntemdir. Arama yapılan uzaya uygun şekilde uyarlanır.

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  ve  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$  için  $n$  boyutlu öklit uzayında öklit mesafesi (44) ve (45) eşitliklerindeki gibi hesaplanır[57].

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (43)$$

### 1.8. Elektroaktif polimer

Elektroaktif polimer malzemesi; üzerine elektriksel gerilim uygulandığı zaman şekilsel değişime uğrayan siyah şerit görüntüsünde olan bir maddedir. Genellikle kasları taklit etmek üzerine yapılan çalışmalarda kullanıldığından, yapay kas olarak da bilinmektedir. Şekil 12. 'de parmak kasını taklit etmek üzere tasarlanmış, elektroaktif polimer kullanılarak nesne tutmak amaçlı oluşturulan kısıkaç yapısı görülmektedir.

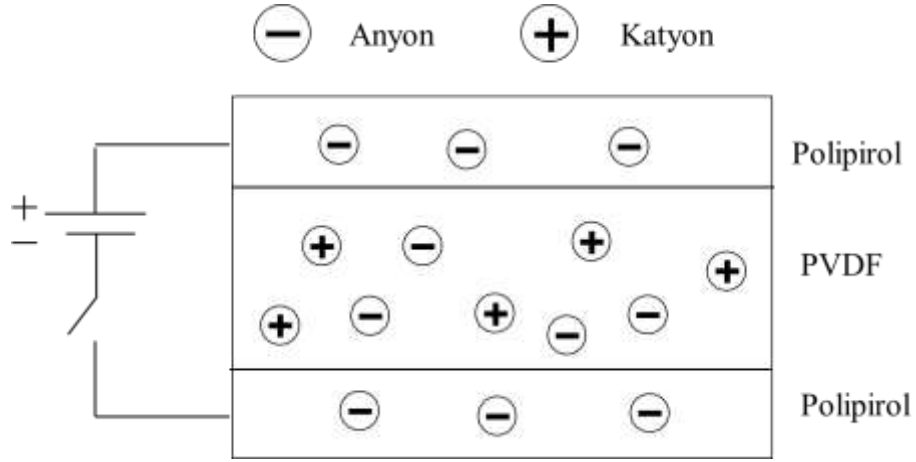


Şekil 12. Elektroaktif polimer ile örnek kısıkaç yapısı

Elektroaktif polimerler genel olarak; Elektronik ve İyonik olmak üzere iki sınıfa ayrılabilir. Elektronik elektroaktif polimerler; polimerleri tutan elektrotlar arasındaki elektrostatik kuvvetle hareketlenirler. Yüksek elektrik alanına; bunun için de yüksek gerilime ihtiyaç duyarlar, ancak buna karşılık düşük elektrik gücü tüketimi ile çalışırlar. İyonik elektroaktif polimerler ise hareketini polimerin içindeki iyonların yer değiştirmesi ile sağlarlar. Çok düşük gerilim seviyeleri bile bu polimerleri hareketlendirmek için yeterlidir. Buna karşılık daha çok elektriksel güç tüketimine ihtiyaç duyarlar. Dielektrik polimerlerin aksine, iyonik polimerleri istenen konumda tutabilmek için gücün uygulanmaya devam edilmesi gerekmektedir. Güç kesildiğinde elektrik uygulanmadan önceki haline döner.

Bu çalışmada konjuge tipinde iyonik elektroaktif polimer kullanılmaktadır. Dış katmanlarında her biri yaklaşık 30µm kalınlığında iletken *polipirol*, ara katmanda ise

yaklaşık 110 µm eninde *polyvinylidene fluoride* (PVDF) bulunmaktadır. Şekil 13. 'de genel yapı görülmektedir.



Şekil 13. Konjuge iyonik elektroaktif polimer yapısı

Konjuge iyonik elektroaktif polimer üzerine elektriksel gerilim uygulanması; indirgenme-yükseltgenme (redoks) tepkimesine sebep olur. Bu tepkime sonucunda iç yapıdaki iyonların katmanlar arasındaki hareketi polimerdeki şekil değişikliğine sebep olmaktadır. Uygulanan elektriksel gerilim oranı ile bükülme miktarı kontrol edilebilmektedir. [58].

### 1.9. Mikroenjeksiyon İşlemi

Mikroenjeksiyon işlemi cam bir mikropipet aracılığı ile canlı hücre içerisine ya da hücreler arası boşluğa sıvı madde enjekte edilmesi işlemidir. Genellikle bir Inverted Mikroskop altında yapılan hassas bir işlemdir. Enjeksiyon esnasında hücreye verilecek hasar minimum düzeyde olmalıdır. Aksi takdirde hücrenin fazla zarar görmesi işlemin başarısız olmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle işlemin en az hasarla sonuçlanabilmesi için mikroenjeksiyon işleminin bilgisayar kontrolü yardımı ile otomatik bir şekilde yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır.

### 1.9.1. Mikroenjeksiyon Hücre Zarı Mekaniği

Hücresinin mekanik incelenmesi çeşitli araştırma alanlarının ilgi alanı olmaktadır. Literatürde, uygulanan kuvvetler ile oosit üzerindeki değişimlerin ilişkilendirilebilmesi için hücrenin mekanik özelliklerine dayalı çeşitli modeller geliştirilmiştir. Biyozar Nokta Yükleme Modelinin yanı sıra, Temas Mekanikleri Modeli ve Mikropipet Aspirasyon Modeli olmak üzere iki çeşit popüler biyokapsül modeli daha bulunmaktadır.

Hertzian[59] ve Sneddon[60] modellerini içeren temas mekaniği modelinde, deformasyonlu nesne bir katı gövde olarak kabul edilmekteyken, kapsülleyen biyokapsüller katı bir gövde olarak ifade edilmez. Mikropipet aspirasyon modelinde, biyozarın deformasyonu için bir emme kuvvetini uygulandığı varsayılır[61]. Ancak enjeksiyon işleminde farklı olarak, tek yönlü kuvvet uygulanmaktadır. Bu nedenle Yu sun ve arkadaşları tarafından geliştirilen Biyozar Nokta Yükleme modeli hücre zarı mekaniği için daha iyi bir çözüm sunmaktadır[22].

#### 1.9.1.1. Biyozar (Hücre Zarı) Nokta Yükleme Modeli

Biyozar nokta yükleme modeli Sun ve arkadaşları tarafından önerilmiş hücre zarını mekanik olarak inceleyen bir modeldir[22]. Bu model hücre zarını ince bir film olarak kabul etmekte ve içteki sitoplazmanın hücre zarı üzerine hidrostatik baskı oluşturduğunu varsaymaktadır. Biyozar nokta yükleme modelinde, deneysel sonuçlardan elde edilen; hücre zarı şeklinin üç geometrik parametre ile temsil edilebildiği belirtilmektedir. Dolayısıyla bu modele göre mikropipet ya da kuvvet uygulayıcının hücreye kuvvet uygulaması sonucu deforme edilmiş bir hücre zarının mekanik özellikleri hücrenin deformasyon şeklinden elde edilebilmektedir.

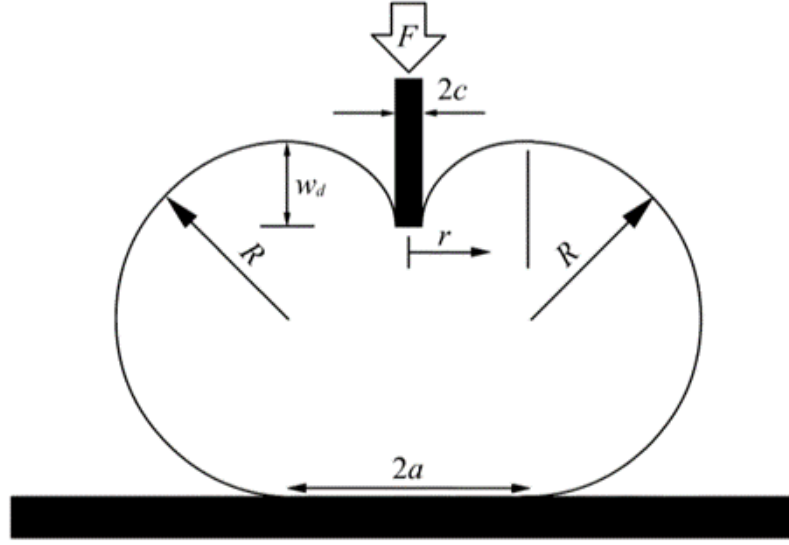
Bu model hücre ile ilgili olarak bazı durumların sağlandığını kabul etmektedir.

Bunlar:

- a) Hücre zarı, sitoplazma gibi, hücre zarına tekdüze hidrostatik basınç uygulayan bir sıvıyı çevreler.
- b) Hücre hacmi değişmez.
- c) Biyozar önemsiz boyutta bükülme mukavemetine sahiptir bu yüzden deformasyon yalnızca zarın esnemesi ile oluşur.
- d) Biyozar lineer elastiktir.
- e) Hücre ilk zar baskısı veya kalıntı bir baskı içermez.

f) Model düzlemsel dairevi bir alanda, kalıntı bir baskı olmadan başlamaktadır.

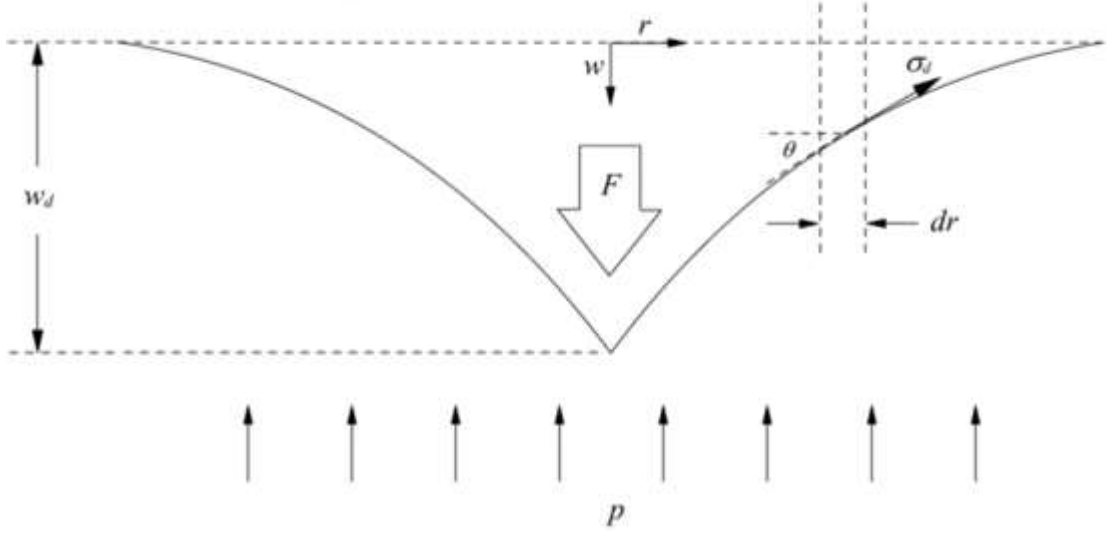
Girintilenmiş yani mikropipet tarafından baskıya uğramış bir hücrenin şekli üç parametre ile temsil edilmektedir. Bunlar  $a$ ,  $w_d$ ,  $R$  değerleridir. Girintilenmiş bir hücrenin yapısı Şekil 14. 'deki gibidir[22].



Şekil 14. Mikropipet tarafından uygulanan kuvvet sonucu girintilenmiş hücre yapısı

Şekil 14 'de  $F$  kuvveti ile  $c$  yarıçaplı mikropipetin uyguladığı kuvvet sonucu oluşan girintilenmiş hücre verileri görülmektedir. Burada,  $R$ ; hücrenin girintilenmesi sonucu oluşan yarı dairesel kısımların yarıçapını belirtirken,  $a$ ; hücre girintisi yarıçapını ifade etmektedir.  $w_d$  değeri de bu girintinin derinliğini belirtir.

Türetilen modelde ilk olarak yerel girintideki denge kuvvetleri ele alınır.  $p$  değerinin iç basıncı ifade ettiği varsayılırsa, iç basınç, uygulanan  $F$  kuvvetine karşılık  $\pi r^2 p$  şeklinde bir karşı kuvvet uygulayacaktır. Şekil 15 'de yerel girinti yapısı görülmektedir[22].



Şekil 15. Yerel girintide kuvvet dengesi

Diğer bir karlı denge kuvveti de hücre zarı gerilmesinin ( $\sigma_d$ ) sebep olduğu  $\sigma_d \sin \theta 2\pi r h$  kuvvetidir. Bu iki kuvvet F kuvveti ile dengededir. Küçük açı yaklaşımları ile  $w$  'nin deforme olmuş girinti profili[62] olduğu yerde  $dw/dt \approx \sin \theta \approx \theta$  'dır[22]. Böylece kuvvet denge eşitliği; (46) ve (47) 'deki gibi olur.

$$F = \pi r^2 p + \sigma_d 2\pi r h \frac{dw}{dr} \quad (44)$$

veya;

$$\sigma_d h \frac{dw}{dr} = \frac{F}{2\pi r} - \frac{pr}{2} \quad (45)$$

Burada  $h$  değeri zar kalınlığını ifade etmektedir.

Denklem (47) 'e  $w=0$  ve  $r=a$  sınır koşulları eklenir ve  $p = F/(\pi a^2)$  yaklaşımı girinti profilini sağlarsa,  $c \leq r \leq a$  aralığında Denklem (48) sağlanır.

$$w_a = - \frac{F}{4\pi\sigma_d h} \left[ 1 - \left(\frac{r}{a}\right)^2 - \ln\left(\frac{r}{a}\right)^2 \right] \quad (46)$$

O halde Şekil 14. 'de gösterilen girinti derinliği  $w_d$ , Denklem (49) ile ifade edilebilir.

$$w_d = w|_{r=c} = - \frac{F}{4\pi\sigma_d h} \left[ 1 - \left(\frac{c}{a}\right)^2 - \ln \left(\frac{c}{a}\right)^2 \right] \quad (47)$$

Şekil 15. 'de görülen, girinti içindeki her  $r$  yarıçaplı ve  $dr$  genişlikli çembersel yüzey, dış kuvvet ile  $dr/\cos\theta$  son genişliğine esner. Eğer  $\theta$  25 derecenin altında tutulursa küçük gerilme yaklaşımı geçerli olmaktadır. Biyozar nokta yükleme modeli için yapılan deneylerde en büyük  $\theta$  değerinin 22 dereceden küçük olduğundan[22] Denklem (50) ve (51) 'deki eşitlikler geçerli olmaktadır.

$$\varepsilon_d = \frac{\frac{dr}{\cos\theta} - dr}{dr} \approx \frac{\theta^2}{2} \quad (48)$$

$$= \frac{1}{2} \left( \frac{dw}{dr} \right)^2 \quad (49)$$

Biyozardaki esneklik gerilim katsayısı alan değişimi ile orantılı olduğundan[62] zardaki ortalama gerilim Denklem (52) 'deki gibi hesaplanabilir.

$$\bar{\varepsilon}_d = \frac{1}{2} \frac{\int_c^a \frac{1}{2} (dw/dr)^2 r dr}{\int_c^a r dr} \quad (50)$$

Bu denklemdeki payda kısmı temelde, çembersel kısmın alanını ifade etmektedir.

Lineer esneklik gereği[63,64] Denklem (53) yazılabilir.

$$\bar{\sigma}_d = \frac{E}{1-\nu} \bar{\varepsilon}_d \quad (51)$$

Burada  $E$  hücre zarının esneklik katsayısı ve  $\nu$  ise Poisson oranıdır. (49) ve (53) eşitlikleri birleştirilirse kuvvet; Denklem (54) 'e karşılık gelmektedir. (54) denkleminde kullanılan  $\zeta$  değişkeni (55) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$F = \frac{2\pi E h \omega_d^3}{a^2(1-\nu)} \left[ \frac{3 - 4\zeta^2 + \zeta^4 + 2\ln\zeta^2}{(1-\zeta^2)(1-\zeta^2 + \ln\zeta^2)^3} \right] \quad (52)$$

$$\zeta = c/a \quad (53)$$

Bir oosit üzerine uygulanan kuvvet; (54) ve (55) eşitlikleri yardımıyla, hücrenin değişen şekli incelenerek, tahmin edilebilmektedir.



## **2. YAPILAN ÇALIŞMALAR, BULGULAR VE İRDELEME**

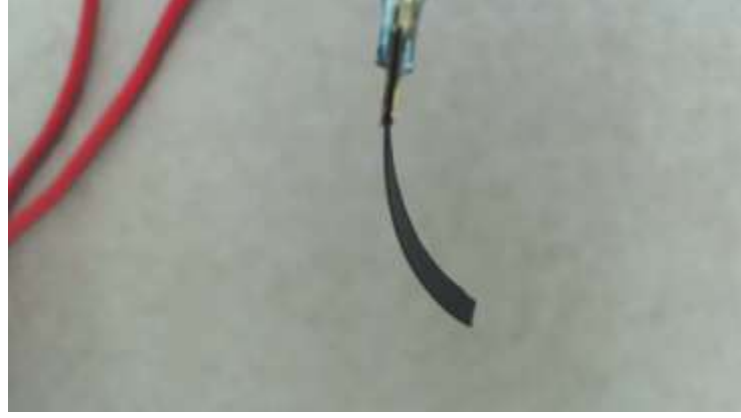
Bu çalışmada, otomatik mikroenjeksiyon sisteminde kullanılan mikropipetin elektroaktif polimer ile kontrol edilmesi için bilgisayarla görmeye dayalı bir düzeneğin gerçekleştirilmesine çalışılmıştır. Elektroaktif polimerle üzerine elektriksel güç düşürülerek konumlandırılabilen malzemelerdir. Bu çalışmada, öncelikle elektroaktif polimer üzerine düşürülen gerilimle elektroaktif polimerin hareketlerinin analiz edilmesi amacıyla, polimer hareketlerinden üzerine düşürülen gerilimin tahmin edilmesine çalışılmıştır. Bu amaçla elektroaktif polimer üzerine önceden belirlenen gerilimler uygulanarak polimerin hareketlerine ait video kayıtları alınmıştır. Bu kayıtlardaki polimer hareketlerinden öznitelikler çıkarılarak sınıflandırılmıştır. Sonraki çalışmada, mikroenjeksiyon işleminde elektroaktif polimere uygulanacak gerilimin kontrolü için; mikropipet tarafından oosit üzerine uygulanan kuvvetin tahmin edilmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, mikropipet ve oositin video görüntülerinden belirlenip izlenmiş ve oosit zarındaki değişim incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar ve irdelenmesi bir arada verilmiştir.

### **2.1. Elektroaktif Polimer Hareketlerinin İncelenmesi ve Üzerindeki Elektrik Geriliminin Tahmini**

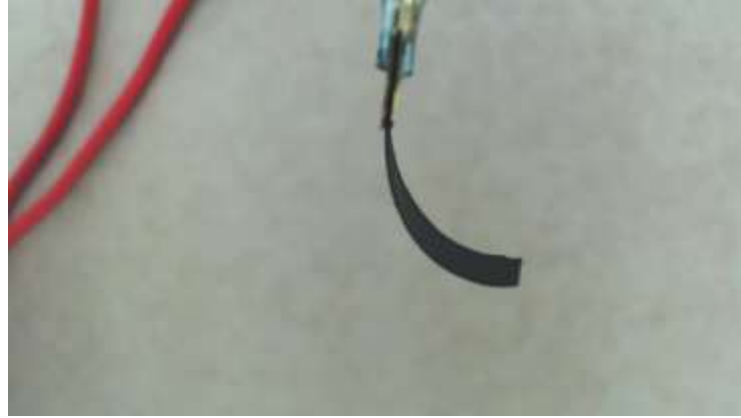
Mikroenjeksiyon için tasarlanan düzende elektroaktif polimer malzemesi; mikroenjeksiyon işleminde mikropipeti harekete geçirecek olan, eyleyici olarak kullanılacaktır. Bu nedenle elektroaktif polimer kontrolünün doğru şekilde yapılması gerekmektedir. Elektroaktif polimer malzemesi, üzerine elektrik gerilimi uygulanarak hareket ettirilmektedir. Polimer üzerine uygulanan gerilim arttıkça kıvrılma hareketi artmakta ve buna bağlı olarak polimer ucu konumu değişmektedir. Tez çalışmasının bu kısmında elektroaktif polimer kontrolünün bilgisayarlı görü yardımıyla yapılması amacıyla, elektroaktif polimere uygulanacak gerilimin belirlenmesi için; polimer hareketleri incelenmekte ve polimer üzerine uygulanmış olan gerilimin tahmini yapılmaktadır.

### 2.1.1. Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Bölütleme

Çalışmanın bu bölümünde, elektroaktif polimerin, farklı elektrik gerilimleri etkisindeyken kaydedilmiş olan video çerçeveleri üzerinde elektroaktif polimer nesnelere belirlenmiştir. Bu amaçla ilk olarak ele alınan görüntüler değerlendirilmiştir. Şekil 16. 'da örnek olarak 0.1 Volt ve 0.5 Volt değerlerinde kaydedilmiş çerçeveler gösterilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 16. (a) 0.1 v ve (b) 0.5 v için örnek görüntüler

Görüntüler üzerinde tek bir nesne olması ve bu nesnenin arkaplan ile zıt renkte olması nedeniyle eşikleme yöntemleriyle bu görüntülerin bölütlenmesi sağlanabilmektedir. Çerçeveler üzerinde işlemlere çerçeveden belirlenen kısımlar kesilerek başlanmaktadır.

Böylece gereksiz kısımlar için işlemler uygulanmamakta ve performans artışı sağlanmaktadır.

#### 2.1.1.1. Otsu Eşikleme Yöntemi ile Bölütleme

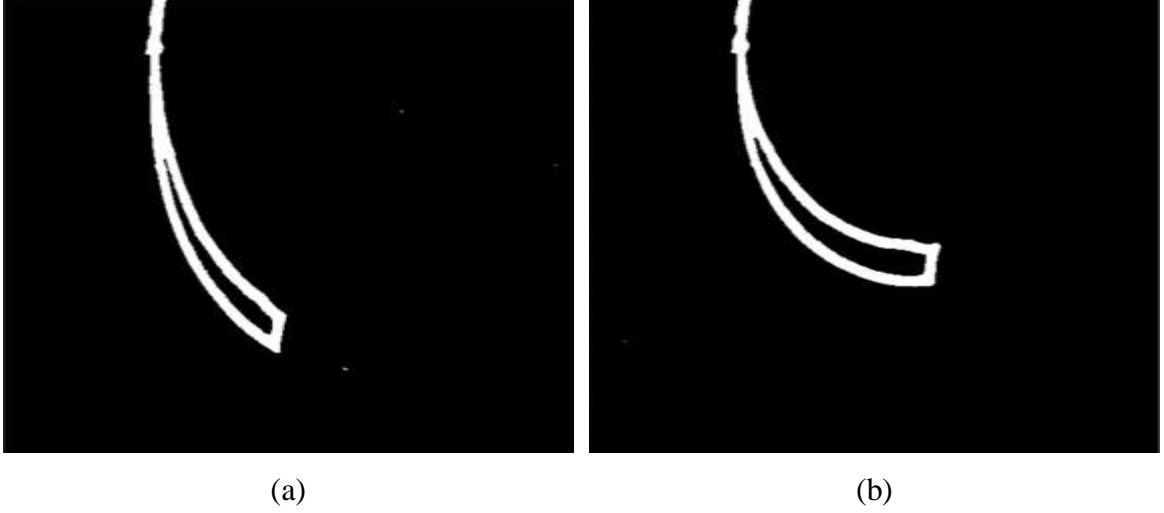
Elektroaktif polimer video çerçeveleri üzerinde ilk uygulanan bölütleme yöntemi Otsu eşikleme yöntemi olmuştur. Görüntünün genelini ele alarak sabit bir eşik öneren bu yaklaşımla; görüntüde polimer ve arkaplan parlaklık farkı olduğundan ve tolere edilebilecek miktarda ışık değişimi olduğundan, başarılı sonuçlar elde edilebilmiştir. Şekil 17. 'de 0.1 Volt ve 0.5 Volt için Otsu eşikleme sonuçları görülmektedir.



Şekil 17. Otsu eşikleme sonrası elektroaktif polimer görüntüsü (a) 0.1v (b) 0.5v

#### 2.1.1.2. Adaptif (Uyarlamalı) Eşikleme Yöntemi ile Bölütleme

Bilindiği üzere bu yöntemde belli pencere boyutları içerisinde her kısımda farklı bir eşik değerinin elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bu da daha düşük ışık değişimlerindeki kısımların elde edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Burada pencere boyutu uygun şekilde seçildiğinde Şekil 18. 'deki gibi görüntüler elde edilmiştir. Bu yöntemde de; orta kısımdaki açıklık bir morfolojik boşluk doldurma işlemi ile düzeltilebilir. Ancak Otsu yönteminin işlem süresi daha kısa olduğundan Otsu yöntemi kullanılması daha verimli olmaktadır.



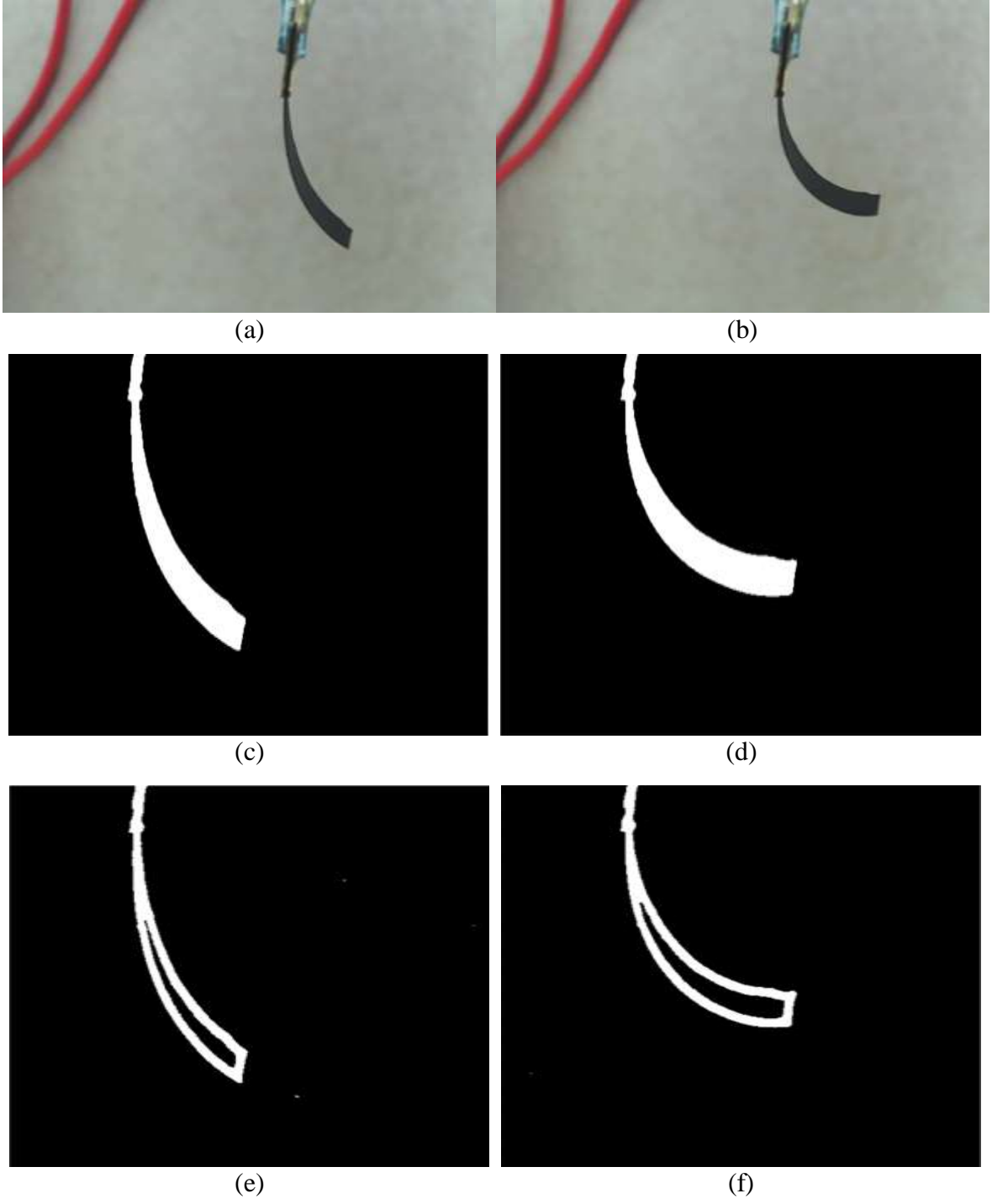
Şekil 18. Adaptif eşikleme sonrası elektroaktif polimer görüntüsü (a) 0.1v (b) 0.5v

### 2.1.1.3. Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Bölütleme Yöntemlerinin Kıyaslanması

Görüntüler üzerinde incelenmiş olan bölütleme yöntemleri. Şekil 19. 'da karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre her iki yöntemle de iyi sonuçlar alındığı ancak daha az boşluk doldurma işlemi gerektirmesi ve daha az işlem süresi gerektirmesi nedeniyle Otsu yönteminin kullanılmasına uygun görülmüştür.

### 2.1.1.4. Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Matematiksel Morfoloji

Bölütleme işleminin ardından görüntüler üzerinde bazı çerçevelerde ışık değişimlerinden dolayı küçük boşluklar kalabilmektedir. Bu nedenle otomatik şekilde boşluğu bulup dolduran morfolojik boşluk doldurma yöntemi ile iyileştirme yapılmıştır.



Şekil 19. Bölütleme sonuçları karşılaştırması (a) 0.1v orijinal görüntü (b) 0.5v orijinal görüntü (c) 0.1v otsu eşikleme (d) 0.5V otsu eşikleme (e) 0.1v adaptif eşikleme (f) 0.5v adaptif eşikleme sonuçları

### 2.1.2. Elektroaktif Polimer Nesnesinin Çıkarılması

Elde edilen görüntülerde istenmeyen kısımlar ve gürültüler bulunabilmektedir. Özellik çıkarımı için yalnızca elektroaktif polimer nesnesi elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla görüntüden polimeri ayırmak için bağlantılı bileşen etiketleme yapılmıştır. Bağlantılı bileşen etiketleme sonrası elde edilen nesnelere

İkili görüntüler üzerine bağlantılı bileşen analizi uygulanmış ve görüntüdeki olası tüm nesnelere bulunmuştur. Ancak görüntülerde elektroaktif polimer nesnesi dışında bir nesne bulunmamaktadır. Bağlantılı bileşen analizi sonucu gürültülerin oluşturduğu nesnelere elenip yalnızca polimer nesnesinin bulunması gerekmektedir. Bu amaçla polimer nesnesini diğer nesnelere ayırt eden özelliği olan boyutu kullanılmıştır. Yani görüntüde tüm nesnelere belirlenmiş ve bu nesnelere boyutları incelenmiştir. En büyük boyutlu nesne elektroaktif polimer nesnesi olarak belirlenmiştir.

### 2.1.3. Elektroaktif Polimer Görüntülerinde Özellik Çıkarımı

Önceki aşamada görüntülerden elektroaktif polimer nesnesi ayrılarak sınıflandırmaya hazır hale getirilmiştir. Ancak sınıflandırmaya nesne görüntüsü yerine görüntüden çıkarılacak olan özelliklerin verilecektir. Bu çalışmada polimer nesnelere şekilsel özellikleri incelenerek sınıflandırma yapılmıştır, dolayısıyla şekilsel özelliklerin çıkarımına uygun bir özellik çıkarım yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır. 1962 'de Hu tarafından sunulan değişmez momentleri ölçekleme, döndürme ve ötelemeden bağımsızdır ve plaka tanıma gibi şekilsel özelliklerin ön planda olduğu çalışmalarda başarıyla kullanılmaktadır[65]. Bu çalışmada polimerlerin şekilsel farklılıklarını incelemek için Hu 'nun değişmez moment yaklaşımı öznelik çıkarımı amacıyla kullanılmıştır.

Elektroaktif polimer nesnesinin her hareketinin sonucunda parabolik bir şekil almaktadır. Bu özelliği elektroaktif polimer şeklinin bir eğri denklemi ile ifade edilebilmesini sağlamaktadır. Bundan hareketle eğri uydurma işlemi diğer öznelik çıkarım yaklaşımı olarak kullanılmıştır.

İki özellik çıkarımı ile ayrı ayrı testler yapılarak sonuçlar incelenmiştir.

#### 2.1.4. Elektroaktif Polimer Gerilim Sınıflandırma

Kullanılan elektroaktif polimer malzemesinin kuruması, çalışıkça ısınması veya polimer üzerinde oluşabilecek deformasyonlar, elektroaktif polimer hareketini etkilemektedir. Bu nedenle ilk olarak lineer olmayan problemlere uygulanabilen YSA ile sınıflandırma işlemi yapılmıştır.

Yapay sinir ağı için özellik vektörü olarak önce elektroaktif polimer görüntülerinden elde edilen değişmez momentler kullanılmıştır. Farklı sınıflara ait özellik gruplarındaki elemanlarla eğitilen yapay sinir ağı sınıflandırıcı olarak kullanılmıştır. Daha sonra her bir polimer nesnesi için en küçük kareler yöntemi kullanılarak eğri uydurma yapılmış ve özellik vektörü çıkarılmıştır. Bu yöntemde elektroaktif polimerler ikinci dereceden denklemlerle ifade edilmiş; denklem katsayıları özellik vektörü olarak alınmıştır. Yapay sinir ağı yapısı olarak çok katmanlı ileri beslemeli ve geri yayımlı bir yapı oluşturulmuştur. Bu ağda 5 nöronluk birinci katman, 3 nöronluk ikinci katman bulunmaktadır. Başlangıç değerleri için belirli değerler kullanılmamakta rastgele değerler oluşturulmaktadır.

Çalışmada başarıya farklı sınıflandırıcıların etkisini görebilmek için ikinci bir sınıflandırma yöntemi olarak KNN (en yakın komşuluk) yöntemi kullanılmıştır. KNN ile sınıflandırmada test elemanı, seçilen  $k$  adet eleman incelenerek, uygun sınıfa dâhil edilmektedir. KNN sınıflandırıcı için uygun  $k$  değeri seçimi için maksimum eğitim kümesi eleman sayısının karekökü referans alınmıştır.  $K$  değeri bu referansın altında deneysel olarak seçilmiştir. Sonraki kısımda bu sınıflandırıcılara ait testler ve karşılaştırmalar bulunmaktadır.

##### 2.1.4.1. Elektroaktif Polimer Gerilim Tahmini Sonuçları

Çalışmada oluşturulan yapay sinir ağı yapısıyla görüntüler üzerinde sınıflandırmalar yapılmıştır. Matlab ortamında diğer görüntü işleme adımlarını ve yapay sinir ağı yapısını oluşturan ve test eden programlar oluşturulmuştur. Görüntü işleme adımları sonucu elde edilen elektroaktif polimer görüntülerinin özellikleri değişmez momentler ve eğri uydurma yaklaşımları ile çıkarıldı ve yapay sinir ağına ait veriler olarak kullanıldı. Özellik vektörleri uygun beklenen verilerle eşleştirilerek yapay sinir ağına verildi. Özellik vektörleri üretilirken bir veya birden fazla görüntü çerçevesi kullanılmıştır.

İlk deneyde elektroaktif polimerin üzerine sırayla farklı seviyelerde elektrik gerilimi uygulandı. Uygulanan gerilim sonucunda, polimerin hareketini tamamladığı durumlar gözlenmiştir. Bu amaçla elektroaktif polimer malzemesine beş farklı voltaj değeri uygulandığı, farklı videolardan elde edilen görüntüler kullanılmıştır. Her bir sınıfa ait 12 farklı görüntü örneği vardır. Bunların içlerinden seçilen görüntüler eğitim ve test verisi olarak kullanılmıştır.

Tablo 1. Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
<b>55/5</b>	80,00	100,00	100,00	60,00	100,0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	80,00	<b>92,00</b>
<b>50/10</b>	90,00	90,00	80,00	100,00	90,00	100,00	100,00	100,00	90,00	90,00	90,00	<b>93,00</b>
<b>45/15</b>	93,33	73,33	93,33	86,67	66,67	86,67	86,67	93,33	93,33	73,33	73,33	<b>87,93</b>
<b>40/20</b>	95,00	80,00	75,00	85,00	85,00	80,00	85,00	90,00	85,00	80,00	80,00	<b>84,00</b>
<b>35/25</b>	92,00	96,00	80,00	64,00	96,00	92,00	88,00	80,00	68,00	88,00	88,00	<b>84,40</b>
<b>30/30</b>	93,33	80,00	73,33	80,00	73,33	60,00	90,00	83,33	96,67	90,00	90,00	<b>82,00</b>
<b>25/35</b>	68,57	94,28	82,86	65,71	77,14	80,00	54,29	65,71	85,71	57,14	57,14	<b>73,14</b>
<b>20/40</b>	67,5	57,50	85,00	72,50	75,00	72,50	65,00	72,50	60,00	67,50	67,50	<b>69,50</b>

Tablolarda EÖS, TÖS ve OB kısaltmalarının açılımları, sırasıyla; “Eğitim Örneği Sayısı”, “Test Örneği Sayısı” ve “Ortalama Başarıdır”. Tablo 1. ‘de her sınıftan 12 farklı örneğin kullanılarak oluşturulan sisteme ait sonuçlar görülmektedir. Tablo 1. ‘in sol sütununda EÖS(Eğitim Örnek Sayısı) / (TÖS)Test Örnek Sayısı oranı verilmiştir. Bu oran her gerilim sınıfına ait kullanılan örnek sayısını göstermektedir. Örneğin her sınıfın 11 örneği eğitim verisi olarak; 1 örneği de test verisi olarak kullanıldığından bu oran 11/1 şeklinde olmaktadır. Bu orana göre beş sınıf için her sınıftan 11 eğitim verisi ve 1 test verisi kullanıldığında toplam 55 eğitim, 5 test verisi kullanılmış olmaktadır.

Her sınıflandırma işlemi öncesi veri havuzundan rastgele olarak eğitim ve test verileri belirlenmektedir. Tabloda, aynı sayıda eğitim ve test verisi kullanılarak 10 farklı testin sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçların farklı olmasının nedeni öncelikle rastgele



seçilen verilerdir. Ayrıca sınıflandırmayı yapmak üzere eğitilen yapay sinir ağının o anki durumu da sonuçlarda farklılıklara sebep olmaktadır. Beklendiği gibi eğitimde kullanılan örnek sayısı azaldıkça başarının düştüğü Tablo 1. 'de görülmektedir. Her bir sınıftan kullanılan eğitim örnek sayısı 11 olduğu ve geriye kalan tek örnek test olarak kullanıldığı durumda genelde %100 doğru sınıflandırma yapılmaktadır. Tablonun en sağdaki sütununda, bağımsız test sonuçlarının ortalaması OB(Ortalama Başarı) verilmiştir.

İkinci deney olarak üzerine gerilim uygulanmış polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 çerçeve kullanılmıştır. Son 5 çerçeve birbirine yakın olduğu için ayrı ayrı verilmektedir. Böylece her sınıf için 60 görüntü deneyde kullanılmıştır. Sonuçta 300 çerçevelik bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu deneye ait sonuçlar Tablo 2. 'de görülmektedir.

Tablo 2. 'de Tablo 1. 'e benzer şekilde düzenlenmiştir. Burada farklı olarak; 5 sınıfa ait, 12 farklı video görüntüsünden, 5 'er örnek seçildiği için Eğitim Örnek Sayısı/ Test Örnek Sayısı oranında taraflar 5 kat fazla olmaktadır. Örneğin Tablo 1. 'de 11/1 olan bu oranın Tablo 2. 'de 55/5 olmaktadır. Her bir sınıf için ayrı veriler olduğu için 55/5 oranı da 275/25 olmaktadır. Bu deneyde birbirinden bağımsız 10 testin sonuçları ve bu sonuçlara ait ortalamalar Tablo 2. 'de gösterilmiştir.

Üçüncü deneyde yapay sinir ağında eğri uydurma yöntemi ile elde edilen veriler kullanılmış ve sonuçları incelenmiştir. Eğri uydurma işleminde elektroaktif polimerlerin durağan hale geldiği son görüntüler kullanılmıştır. Bu deneye ait sonuçlar Tablo 3. 'de görülmektedir.

Tablo 2. Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>275/25</b>	80,00	100,00	100,00	64,00	80,00	92,00	96,00	100,00	100,00	100,00	<b>91,20</b>
<b>250/50</b>	98,00	86,00	100,00	90,00	82,00	96,00	100,00	100,00	98,00	94,00	<b>94,40</b>
<b>225/75</b>	93,33	93,33	92,00	80,00	80,00	93,33	98,67	94,67	92,00	93,33	<b>91,07</b>
<b>200/100</b>	100,00	90,00	96,00	85,00	87,00	95,00	99,00	92,00	90,00	87,00	<b>92,10</b>
<b>175/125</b>	91,20	96,80	76,00	82,40	60,00	88,00	94,40	85,60	80,80	75,20	<b>83,04</b>
<b>150/150</b>	80,00	73,33	84,00	72,00	98,00	84,00	79,33	88,67	90,67	79,33	<b>82,93</b>
<b>125/175</b>	93,71	83,42	78,29	84,57	67,43	80,57	84,00	91,43	93,14	69,71	<b>82,63</b>
<b>100/200</b>	66,00	76,50	89,50	86,50	73,00	84,50	63,00	54,00	91,50	66,00	<b>75,05</b>

Tablo 3. Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>55/5</b>	100,00	100,00	100,00	80,00	100,00	60,00	100,00	80,00	100,00	100,00	<b>92,00</b>
<b>50/10</b>	90,00	100,00	80,00	90,00	90,00	100,00	70,00	90,00	100,00	100,00	<b>91,00</b>
<b>45/15</b>	93,33	93,33	73,33	86,67	86,67	100,00	93,33	73,33	86,67	93,33	<b>88,00</b>
<b>40/20</b>	70,00	95,00	90,00	80,00	95,00	85,00	85,00	90,00	90,00	75,00	<b>85,50</b>
<b>35/25</b>	96,00	88,00	92,00	84,00	80,00	88,00	88,00	92,00	80,00	88,00	<b>87,60</b>
<b>30/30</b>	90,00	66,67	96,66	93,33	86,67	80,00	86,67	93,33	83,33	90,00	<b>86,67</b>
<b>25/35</b>	82,86	88,57	80,00	71,43	77,14	85,71	82,86	85,71	94,29	77,14	<b>82,57</b>
<b>20/40</b>	77,50	80,00	90,00	75,00	87,50	85,00	77,50	77,50	80,00	82,50	<b>81,25</b>

Tablo 3. 'de sonuçları verilen deneylerde eğitim ve test verileri rastgele seçildiği 10 testin sonuçları ve bu test sonuçlarına ait ortalamalar gösterilmiştir.

Deneylede her bir testte eğitim ve test için rastgele örnek seçildiğinden test sonuçları farklı çıkmaktadır. Bunun sebebi YSA eğitilirken kullanılan örnek gruplarının farklı olmasıdır. Bu nedenle verilen 10 test sonucunun ortalaması en sağ sütunda verilmiştir.

YSA sınıflandırıcının kullanıldığı son deneyde elektroaktif polimerin durağan hale gelmeden önceki son 5 çerçevesi eğri uydurma yöntemiyle kullanılmıştır. Bu deneye ait sonuçlar Tablo 4. 'te görülmektedir.

Tablo 4. Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özneliklerin ysa ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>275/25</b>	100,00	100,00	60,00	80,00	80,00	100,00	100,00	80,00	80,00	100,00	<b>88,00</b>
<b>250/50</b>	90,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	74,00	80,00	<b>94,40</b>
<b>225/75</b>	100,00	92,00	86,67	98,67	100,00	96,00	86,67	80,00	80,00	100,00	<b>92,00</b>
<b>200/100</b>	95,00	75,00	89,00	90,00	90,00	100,00	100,00	95,00	80,00	70,00	<b>88,40</b>
<b>175/125</b>	96,00	92,00	95,20	76,00	84,00	92,00	91,20	96,00	92,00	84,00	<b>89,84</b>
<b>150/150</b>	86,67	86,67	76,67	63,33	86,67	83,33	70,00	93,33	83,33	96,67	<b>82,67</b>
<b>125/175</b>	80,00	86,86	76,57	85,71	85,71	88,57	48,00	90,86	89,71	94,86	<b>82,69</b>
<b>20/40</b>	70,00	72,50	77,50	80,00	73,50	72,50	90,00	96,50	90,00	92,50	<b>81,50</b>

Sınıflandırıcının başarıya etkisini inceleyebilmek için ikinci bir sınıflandırma yöntemi olarak KNN kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Yapay sinir ağlarında kullanılan veri seçim yöntemleri bu kısımda da kullanılmıştır. Seçilen verilere ait özellikler KNN ile sınıflandırılmıştır. Bu amaçla yapılan ilk deney sonuçları Tablo 5. 'de görülmektedir. Bu deneyde elektroaktif polimer nesnesinin durağan hale geldiği durumdaki görüntüleri kullanılmaktadır. KNN ile yapılan sınıflandırma deneylerinde, deneysel olarak en iyi sonuç

$k = 7$  iken alındığından,  $k$  olarak bu değer seçilmiştir. Özellik çıkarımı yöntemi olarak değişmez momentler kullanılmıştır.

Tablo 5. Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen hu momentlerine dayalı özneliklerin, knn ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>55/5</b>	60,00	80,00	80,00	80,00	100,00	60,00	60,00	60,00	80,00	80,00	<b>74,00</b>
<b>50/10</b>	80,00	80,00	90,00	80,00	60,00	80,00	70,00	70,00	90,00	60,00	<b>76,00</b>
<b>45/15</b>	66,67	73,33	86,67	80,00	60,00	66,67	86,67	60,00	80,00	40,00	<b>70,00</b>
<b>40/20</b>	75,00	80,00	60,00	75,00	65,00	60,00	70,00	70,00	75,00	70,00	<b>70,00</b>
<b>35/25</b>	72,00	64,00	76,00	76,00	64,00	68,00	72,00	64,00	68,00	64,00	<b>68,80</b>
<b>30/30</b>	60,00	76,67	60,00	73,33	53,33	66,67	63,33	76,67	63,33	56,67	<b>65,00</b>
<b>25/35</b>	62,86	45,71	68,57	71,43	57,15	62,86	60,00	57,15	65,71	68,57	<b>62,00</b>
<b>20/40</b>	60,00	57,50	60,00	67,50	57,50	47,50	60,00	45,00	50,00	60,00	<b>56,50</b>

KNN sınıflandırıcı ile yapılan ikinci deneyde elektroaktif polimerin durağan hale gelmeden önceki son 5 çerçevesi kullanılmaktadır. Her örneğin son 5 çerçevesinde nesne çıkarımı yapılmakta ve değişmez momentlerden oluşan özellik vektörleri oluşturulmaktadır. İlgili deneyde ait sonuçlar Tablo 6. 'da görülmektedir.

Bu kısımda en yakın komşuluk sınıflandırması ile yapılan üçüncü deneyde özellik çıkarım yöntemi değiştirilmektedir. İlk iki deneyden farklı olarak KNN sınıflandırıcıya verilmek üzere değişmez momentler yaklaşımı yerine eğri uydurma (en küçük kareler) yöntemi kullanılmıştır. Tablo 7. 'de polimerlerin durağan haldeki son görüntülerine ait sonuçlar görülmektedir.

Tablo 6. Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen hu momentlerine dayalı özniteliklerin knn ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>275/25</b>	60,00	60,00	56,00	60,00	60,00	40,00	50,00	60,00	64,00	60,00	<b>57,00</b>
<b>250/50</b>	60,00	40,00	50,00	40,00	50,00	70,00	60,00	62,00	58,00	50,00	<b>54,00</b>
<b>225/75</b>	61,33	54,67	33,33	61,33	76,00	66,67	73,33	54,67	60,00	46,67	<b>58,80</b>
<b>200/100</b>	60,00	61,00	68,00	55,00	56,00	55,00	45,00	64,00	55,00	65,00	<b>58,40</b>
<b>175/125</b>	57,60	44,00	52,00	64,00	52,80	54,40	48,80	48,00	48,80	51,20	<b>52,16</b>
<b>150/150</b>	50,00	48,00	60,00	60,00	53,33	52,00	52,67	55,33	72,00	50,00	<b>55,33</b>
<b>125/175</b>	54,29	51,43	58,86	53,14	52,57	60,00	52,57	56,00	57,14	56,57	<b>55,26</b>
<b>100/200</b>	65,00	62,50	55,00	45,50	57,00	60,50	55,00	60,00	53,00	64,50	<b>57,80</b>

Tablo 7. Durağanlaşmış polimer görüntüsünden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özniteliklerin, knn ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>55/5</b>	100,00	100,00	60,00	80,00	100,00	100,00	100,00	60,00	80,00	100,00	<b>88,00</b>
<b>50/10</b>	80,00	70,00	60,00	70,00	80,00	80,00	80,00	60,00	80,00	80,00	<b>74,00</b>
<b>45/15</b>	73,33	73,33	80,00	66,67	86,67	73,33	66,67	66,67	80,00	73,33	<b>74,00</b>
<b>40/20</b>	80,00	75,00	80,00	75,00	70,00	85,00	70,00	70,00	65,00	90,00	<b>76,00</b>
<b>35/25</b>	68,00	64,00	72,00	68,00	84,00	76,00	72,00	64,00	80,00	72,00	<b>72,00</b>
<b>30/30</b>	73,33	76,67	73,33	70,00	70,00	86,67	76,67	70,00	83,33	73,33	<b>75,33</b>
<b>25/35</b>	85,71	80,00	68,57	85,71	77,14	65,71	68,58	74,28	74,28	68,57	<b>74,86</b>
<b>20/40</b>	80,00	62,50	80,00	67,50	60,00	72,50	77,50	55,00	72,50	75,00	<b>70,25</b>

Son deney olarak elektroaktif polimer nesnelerrinin durağan hale gelmeden önceki son 5 çerçevesinden eğri uydurma ile öznitelik çıkarımı yapılmış ve sınıflandırma işlemi için KNN yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 8. Polimerin durağan duruma geçmeden önceki son 5 görüntü çerçevesinden elde edilen eğri uydurmaya dayalı özniteliklerin knn ile sınıflandırılması

EÖS/TÖS	TESTLER										OB
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<b>55/5</b>	64,00	80,00	100,00	100,00	80,00	100,00	100,00	80,00	100,00	84,00	<b>88,80</b>
<b>50/10</b>	100,00	100,00	70,00	80,00	100,00	80,00	90,00	72,00	100,00	90,00	<b>88,20</b>
<b>45/15</b>	93,33	86,67	93,33	86,67	85,33	80,00	86,67	100,00	80,00	86,67	<b>87,87</b>
<b>40/20</b>	90,00	85,00	85,00	85,00	90,00	85,00	84,00	85,00	90,00	95,00	<b>87,40</b>
<b>35/25</b>	83,20	76,80	80,00	84,00	84,00	84,00	88,00	87,20	80,00	84,80	<b>83,20</b>
<b>30/30</b>	90,00	86,67	86,67	83,33	73,33	87,33	83,33	83,33	77,33	83,33	<b>83,47</b>
<b>25/35</b>	82,56	82,86	80,00	91,43	82,86	94,29	88,57	88,57	71,43	89,14	<b>85,17</b>
<b>20/40</b>	87,50	80,00	85,00	68,50	83,50	83,00	87,00	87,50	80,00	80,00	<b>82,20</b>

Elektroaktif polimerlerin gerilimlerinin tahmin edilmeye çalışıldığı bu kısımda, ilki, polimerin durağan haldeki tek bir görüntüsü; ikincisi elektroaktif polimerin durağan hale gelmeden önceki son 5 görüntüsü olmak üzere, iki farklı değerlendirme yapılmış; iki farklı özellik çıkarım yöntemi ve iki farklı sınıflandırma yöntemi kullanılmıştır. Her bir yöntemde eğitim ve test örnekleri rastgele seçilmiştir. Eğitimde kullanılan veriler teste kullanılmamıştır. Veri havuzundaki eğitim ve test örneği sayıları 8 farklı şekilde seçilmiş; değerlendirmesi yapılmış ve her değerlendirme için 10 ‘ar deneyin sonucu tablolarda gösterilmiştir. 5 farklı gerilim sınıfının araştırıldığı bu yöntemler için her sınıfa ait 12 farklı örnek kullanılmaktadır.

Yapay sinir ağı ve değişmez moment yaklaşımlarında eğitim örnek sayısı arttıkça ortalama %90 civarında sınıflandırma başarısı elde edilmiştir. Daha az sayıda eğitim verisi için genelde %80 üzerinde başarı elde edilmiştir. Eğri uydurma yöntemi sonuçlarında da değişmez moment özellikli sonuçlara yakın şekilde %90 civarı sonuçlar alınmıştır.

Polimerlerin durağan hale geldiği son 5 çerçeve kullanılarak yapılan deneylerde de genellikle %80 üzerinde sonuçlar elde edilmiştir. Eğitim kümesi sayısı arttıkça bu değerlerin de %90 'ın üzerine çıktığı görülmüştür.

Çalışmada KNN sınıflandırma, yapay sinir ağlarına kıyasla özellik çıkarım yöntemi seçiminden daha çok etkilenmektedir. Sınıflandırıcı olarak KNN yöntemi kullanıldığında, eğri uydurma ile özellik çıkarımı, değişmez moment özellik çıkarım yöntemine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. KNN sınıflandırma için; değişmez moment yöntemi kullanıldığında en iyi sonuçlar polimerin durağan durumdaki tek görüntülerden elde edilmiştir. KNN ve eğri uydurma yöntemleriyle yapılan deneylerde en iyi sonuçlar polimerlerin durağan hale gelmeden önceki son 5 çerçevesinin sınıflandırmaya verildiği durumda alınmıştır. Bu deneylerde %88,80 ile %82,20 aralığında sonuçlar elde edilmiştir.

Bu çalışmada yapay sinir ağları, KNN 'e göre daha iyi sınıflandırma başarısı sağlamıştır. Yapay sinir ağı ile yapılan deneylerde her iki özellik vektörü de başarılı iken, KNN sınıflandırmada eğri uydurma ile yapılan özellik çıkarımı daha iyi sonuçlar vermiştir. Ayrıca özellik çıkarım yöntemi olarak eğri uydurma kullanıldığında daha az sayıdaki eğitim örneklerinde nispeten daha başarılı olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, eğri uydurma ile çıkarılan özniteliklerin yapay sinir ağları ile sınıflandırılması önerilmiştir. Elde edilen başarı oranları ilgili yöntemlerin elektroaktif polimer gerilim tahmininde kullanılabileceğini göstermektedir.

## 2.2. Mikroenjeksiyon İşleminde Hücre Üzerine Uygulanan Kuvvetin Tahmini

Tıbbi bir uygulama olan mikroenjeksiyon işlemi, mikroskop altında mikropipet ile oosit üzerinde elle yapılan hassas bir işlemdir. Başarılı bir mikroenjeksiyonda, enjeksiyon yapılırken hücre duvarına en az zarar verilerek merkeze enjeksiyon yapılması gerekirken, hücre çeperinin yırtılması, mikro pipetin daha ileri gidip karşı duvardan çıkması gibi istenmeyen sonuçlar oluşabilmektedir. Çalışmanın bu kısmında, mikroenjeksiyon işleminin daha kontrollü şekilde uygulanabilmesi için, enjeksiyon sırasında oosite uygulanan baskı, bilgisayarlı görü yardımı ile her çerçevede otomatik olarak izlenmeye çalışılmıştır. Bu kısımda tahmin edilen kuvvet bilgisinin; hedef sistem olan, elektroaktif polimerle enjeksiyon işleminde polimere uygulanacak elektrik geriliminin kontrolünde kullanılması amaçlanmıştır. Elektroaktif polimerli mikroenjeksiyon düzeneği sağlanamadığı için elle kontrol edilen mikroenjeksiyon görüntüleri kullanılmıştır. Bu görüntülerde mikro pipetin

hücre üzerine uyguladığı kuvvet, hücre sınırlarında oluşan değişimlerden tahmin edilmiştir. Çalışmada kullanılan videolar, Embriyolojist Loke May Kew tarafından Leica DMI300B inverted mikroskop kullanılarak, Research Instrument DC 1 modeli kamera ile çekilmiş; web ortamında paylaşılan, 2 boyutlu görüntülerdir. Görüntüler iki boyutludur. Mikroenjeksiyon görüntülerinden hücreye uygulanan kuvvetin hesaplanması için; işlem karmaşıklığı az olması ve farklı çalışmalarda başarılı sonuçlar alınabilmiş olması gibi nedenlerle, “Biyozar Nokta Yükleme Modeli”[22] seçilmiştir. Sun ve arkadaşlarının geliştirdiği bu model için gerekli olan veriler de, mikroenjeksiyon görüntülerinden görüntü işleme teknikleri ile otomatik olarak çıkarılmaktadır.

Bilgisayarla görmeye dayalı mikroenjeksiyon işlemi için öncelikle video görüntülerinde nesnelere belirlenmesi ve izlenmesi gerekir. Bu çalışmada farklı yaklaşımlarla nesne bölütleme yaklaşımları karşılaştırılmıştır.

### 2.2.1. Mikroenjeksiyon İşleminde Görüntü Bölütleme

Mikroenjeksiyon görüntülerinde hücre bölütlemesi hücre sınırlarının takip edilebilmesi ve bu sınırlardan gerekli verilerin çıkarılabilmesi amaçlarıyla yapılmaktadır. Hücredeki değişikliklerin iyi bir şekilde incelenebilmesi için hücre sınırlarındaki değişikliklerin her çerçevede izlenebilmesi ve sınır verilerinin çıkarılabilmesi gerekmektedir. Hücre sınırlarının en iyi belirlenebileceği bölütleme metodunun bulunabilmesi için farklı yöntemlerle deneyler yapılmıştır.

Bölütleme yöntemlerini uygulamadan önce ön işlem olarak görüntüdeki yerel bozulma ya da ışık değişikliklerinin yumuşatılması için bir Gaussian filtresi uygulanmaktadır. Böylece kenar bilgisi aranırken gereksiz kenarların oluşumu azaltılmaktadır.

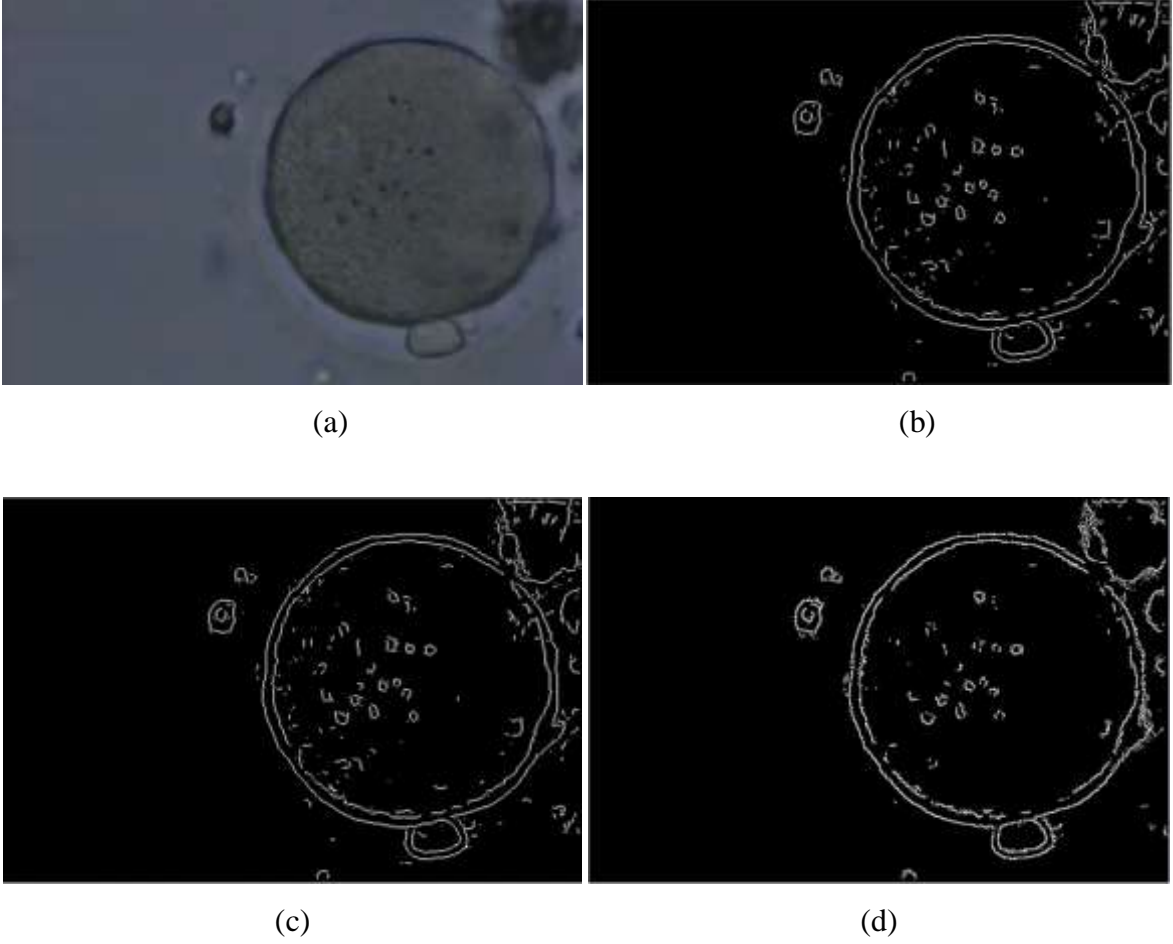
Çalışmadaki şekillerde görülen enjeksiyon görüntüleri aynı hücrenin; enjeksiyon işleminin farklı zamanlarındaki görüntü örnekleridir. Yapılacak olan bölütleme işleminin çerçeve dizisindeki tüm çerçeveler için kullanılabilir olması gerekmektedir. Bu nedenle örnek olarak şekillerde çerçeve dizisinin;

- 1) Henüz mikro pipetin, oosite temas etmediği başlangıç durumundan,
- 2) Mikro pipetin bir miktar baskı uyguladığı orta kısımlardan,
- 3) Hücre sınırının delinmeye başladığı zamanlardan, birer çerçeve görüntüsü gösterilmiştir.

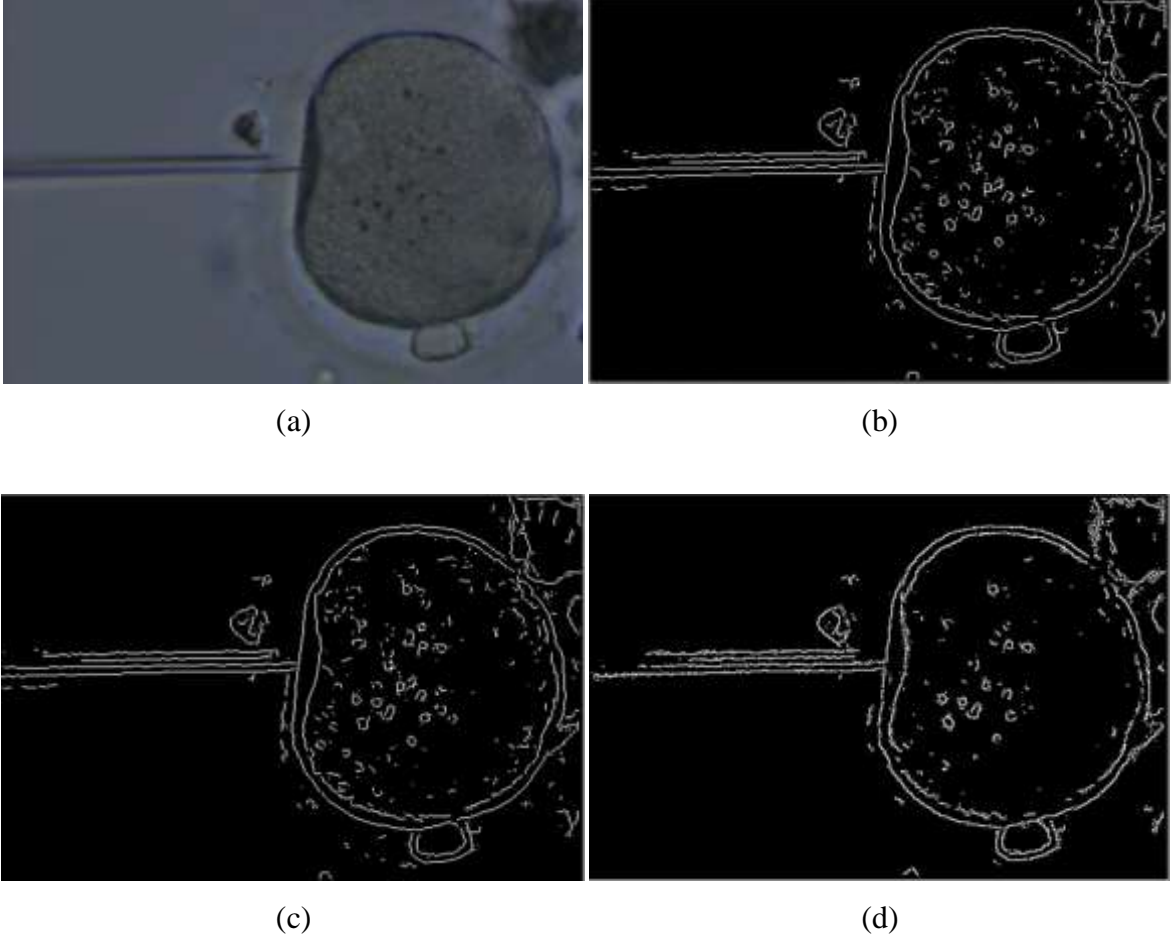


### 2.2.1.1. Gradyan Tabanlı Kenar Bulma Yöntemleri

Mikroenjeksiyon görüntülerinde ilk olarak kenar bulma yöntemleriyle hücre sınırlarının elde edilmesine çalışılmıştır. Gradyan tabanlı kenar bulma yöntemleri görüntülere uygulandığında sonuçlar Şekil 20., Şekil 21. ve Şekil 22. 'teki gibi olmaktadır.



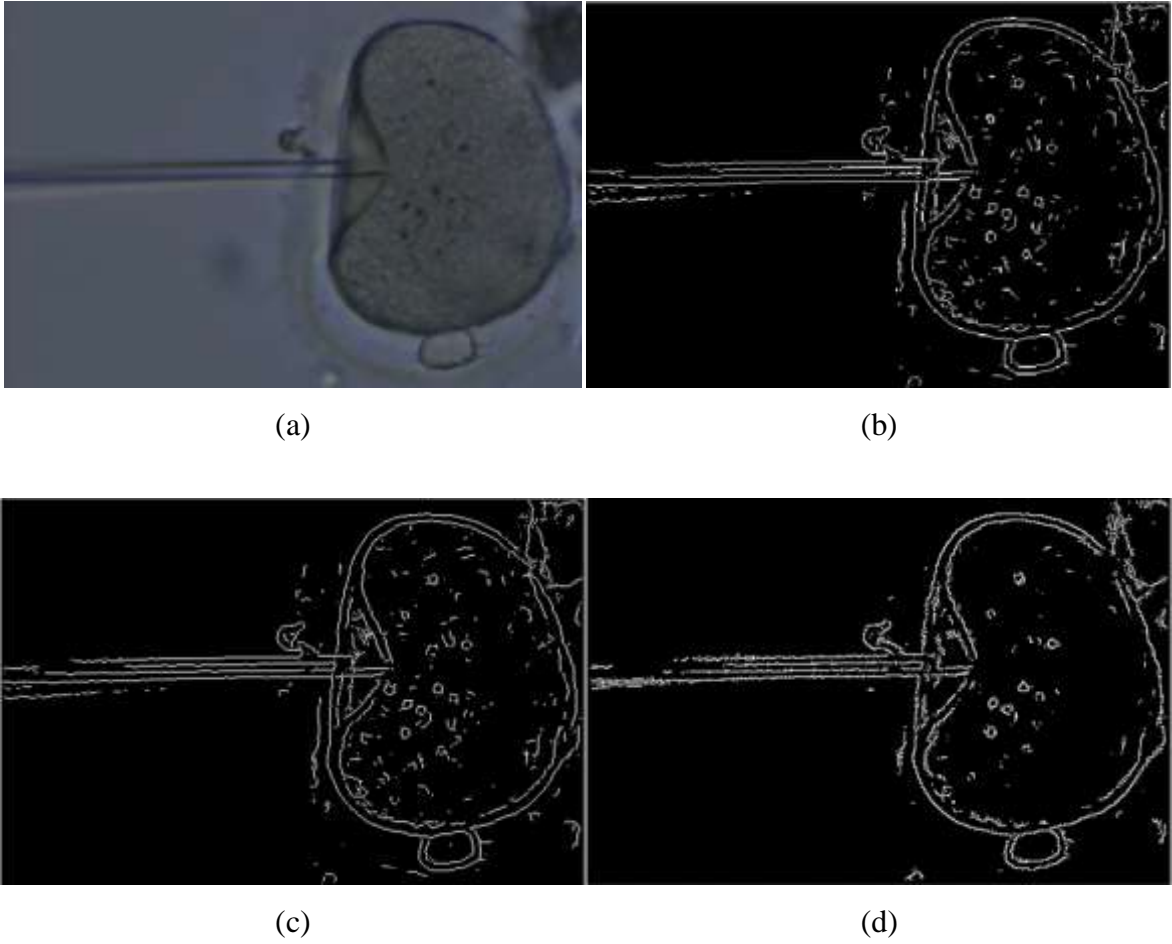
Şekil 20. Mikropipet olmayan durumda hücrenin görüntüleri. (a) işlenmemiş görüntü , (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü



Şekil 21. Mikropipetin hücreye kuvvet uygulamaya başladığı durumda hücrenin görüntüleri (a) işlenmemiş görüntü , (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü

Sobel yöntemi ile kıyaslandığında Prewitt yönteminden nispeten daha iyi sonuç elde edildiği görülsede bu kenar bulma işlemlerinde büyük bir fark izlenmemiştir.

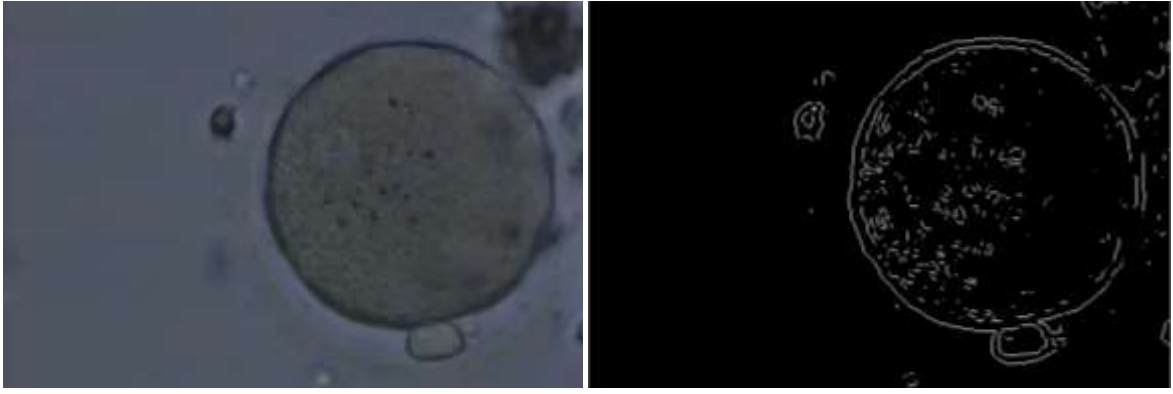
Görüntülerde Sobel ve Prewitt yöntemlerinin hemen hemen aynı şekilde sonuç verdiği, Roberts yönteminde ise biraz fark olsa da çok büyük bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Yine şekillerde görüldüğü üzere fazla gürültü ortaya çıkmıştır. Bu gürültüler bir noktaya kadar giderilebilir. Ancak bunun yanı sıra hücre sınırlarında çok sayıda bozulma bulunmaktadır. Bunlar hücre sınırından doğru bilgi edinilmesini engelleyen unsurlardır.



Şekil 22. Mikropipetin hücreyi delmeye başladığı durumda hücrenin görüntüleri. (a) işlenmemiş görüntü , (b) sobel yöntemi uygulanmış görüntü, (c) prewitt yöntemi uygulanmış görüntü, (d) roberts yöntemi uygulanmış görüntü

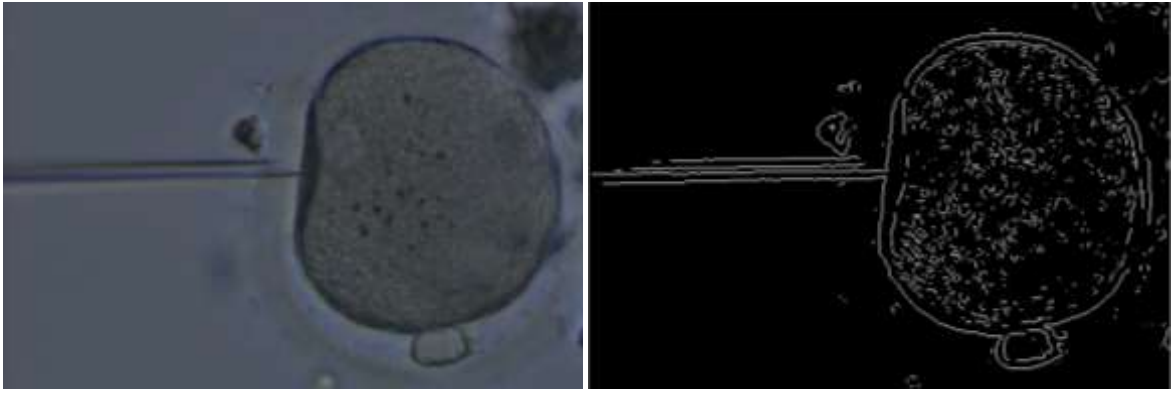
### 2.2.1.2. Laplasyan Tabanlı Kenar Bulma (LoG Yöntemi)

İkinci olarak Laplasyan tabanlı kenar bulma yöntemi Laplacian of Gaussian (LoG) ile deneyler yapılmıştır. Bu yöntemde farklı olarak ikinci türev kullanılmaktadır. İkinci türev gürültüye daha hassas olacağından öncelikle bir Gauss filtresi ile yumuşatma yapılmaktadır. Mikroenjeksiyon görüntülerine LoG filtresi uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar Şekil 23. 'teki gibidir.



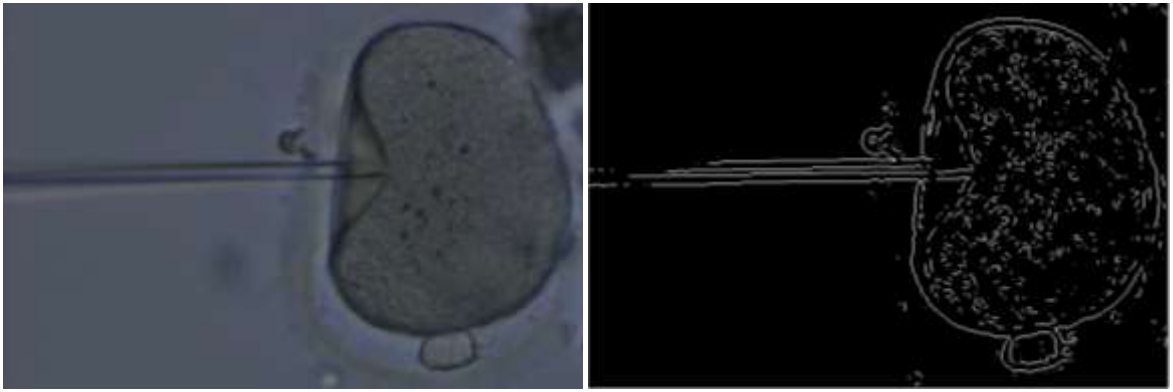
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Şekil 23. Log yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(c) ve (e) orijinal görüntüler. (b),(d) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları

Şekil 23 'te görüldüğü gibi, LoG yönteminde sınır piksellerinin elde edilmesinde kesikli yapılar oluşmaktadır

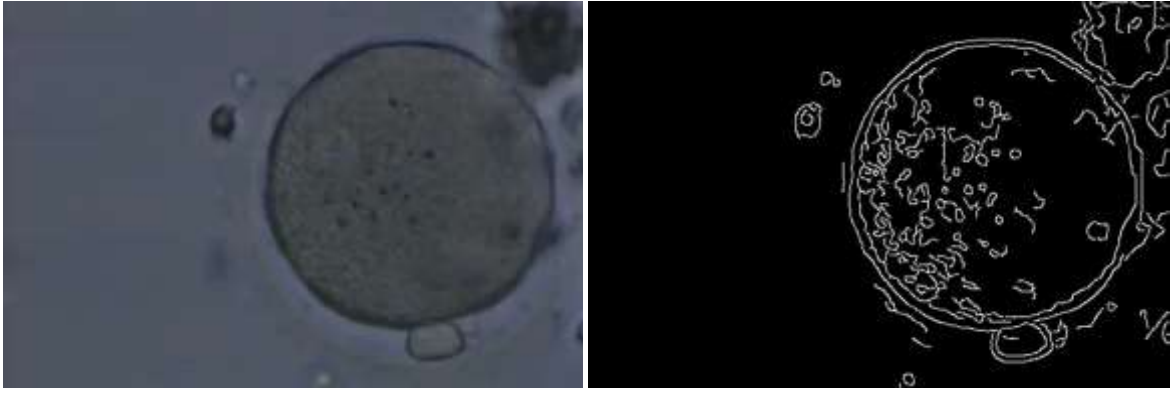
### 2.2.1.3. Canny Kenar Bulma Yöntemi

Kenar bulma yöntemleri içerisinde denenmiş olan son yöntem Canny kenar bulma yöntemidir. Bu yöntem diğerlerinden farklı olarak içerisinde dört adımı barındırmaktadır. LoG yöntemindeki gibi öncelikle bir Gaussian filtresi kullanılarak yumuşatma yapılır, gradyan büyüklüğü ve yönü elde edilir, daha sonra maksimum olmayan noktalar bastırılır ve son olarak eşikleme aşaması uygulanır.

Mikroenjeksiyon görüntülerine Canny yöntemi uygulanmış ve Şekil 24. 'deki gibi sonuçlar elde edilmiştir.

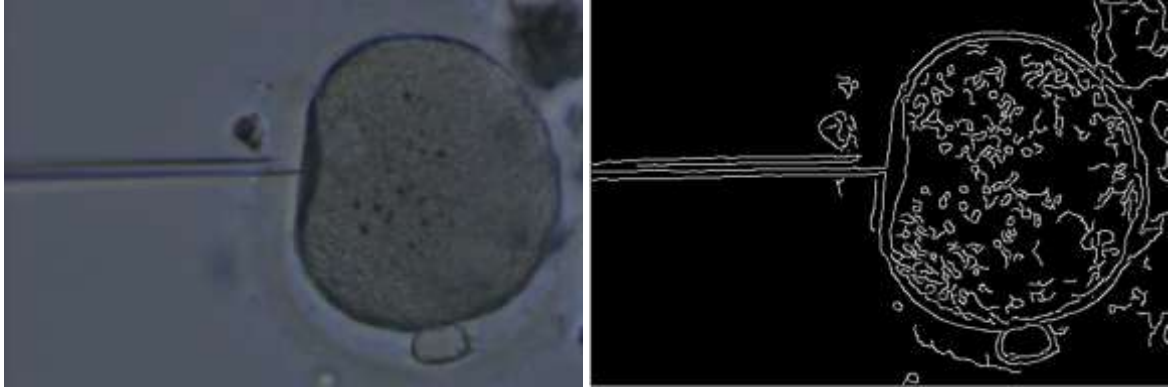
Canny yönteminde de sınırlarda bazı deformasyonlar olsa da diğer modellerden daha başarılı sonuç vermektedir. Hücre içinde istenmeyen yoğunluk değişimleri ve ışık değişimlerinden etkilendiği görülmektedir. Bu nedenle Canny yöntemi öncesinde Gaussian filtresi ile yumuşatma yapılarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 25. 'de Canny öncesinde bir yumuşatma daha yapıldığında elde edilen örnek sonuç görülmektedir.

Canny işleminden önce bir yumuşatma daha yapıldığında hücre içinde ortaya çıkan istenmeyen gölgeler elimine edilmiştir. Daha az sınır bilgisi kaybı ve daha az istenmeyen parça elde edilebilen bu yöntemi bu çalışmada diğer kenar bulma yöntemlerine göre daha iyi sonuç vermektedir.



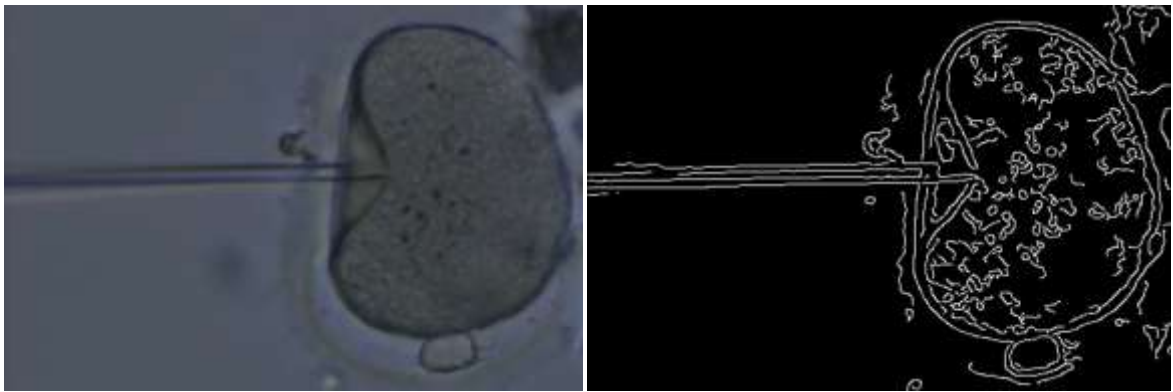
(a)

(b)



(c)

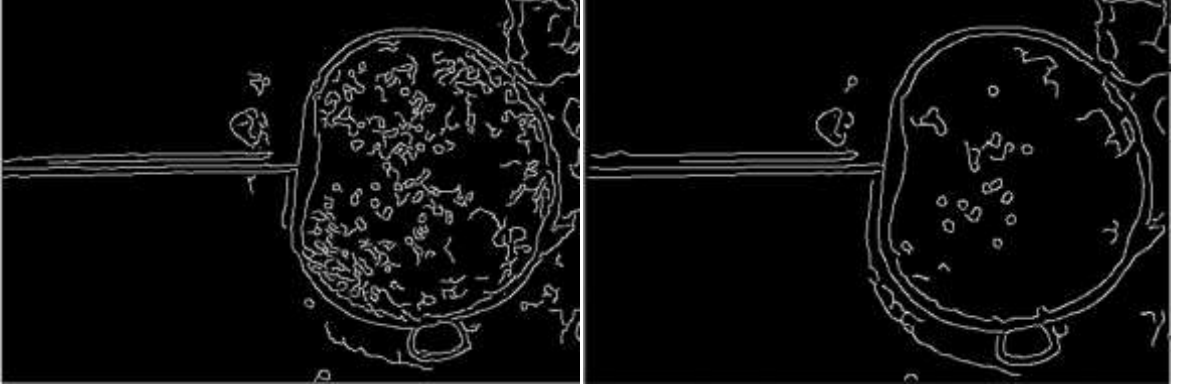
(d)



(e)

(f)

Şekil 24.Canny yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(c) ve (e) orijinal görüntüler. (b),(d) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları



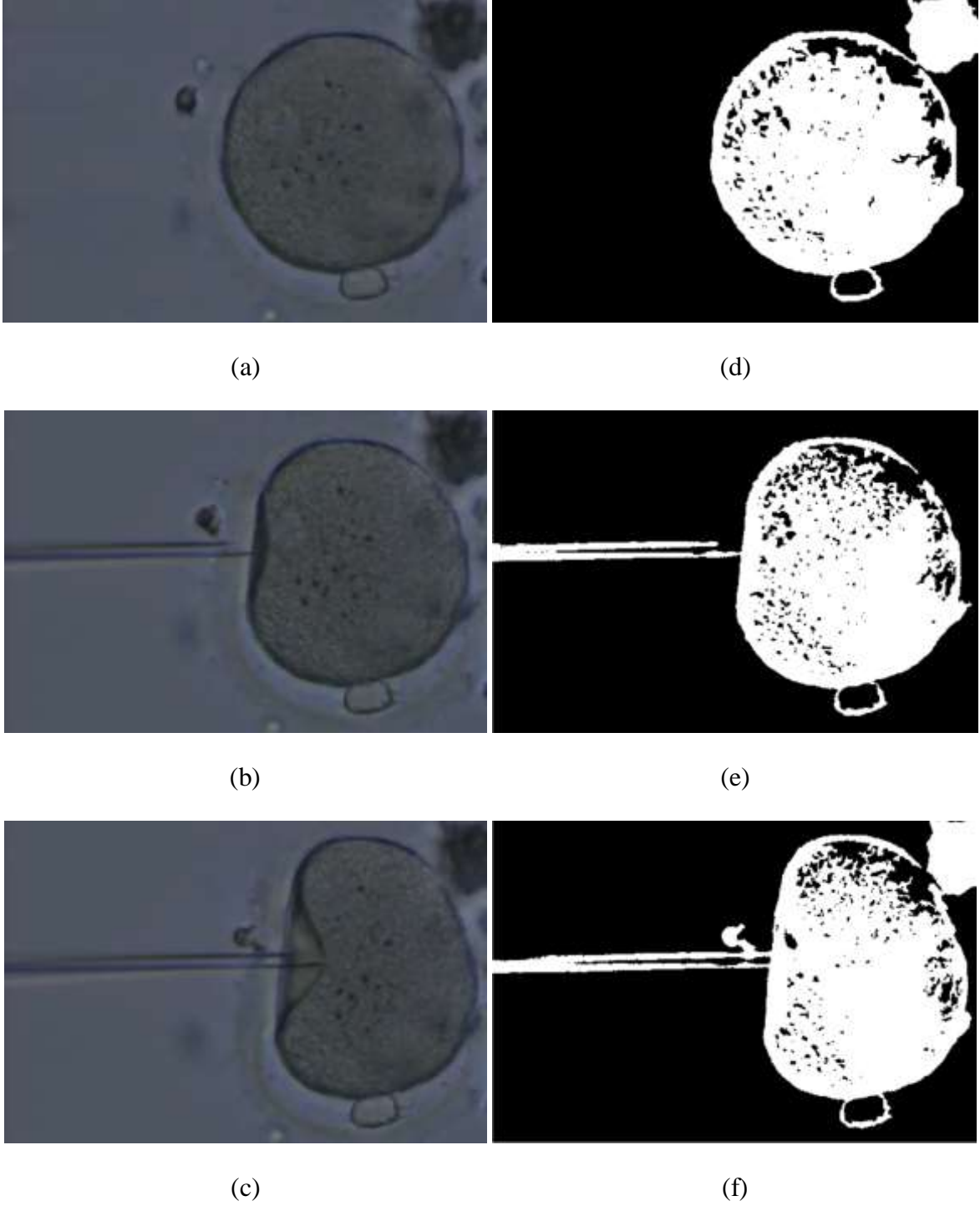
(a)

(b)

Şekil 25. Canny işleminden önce bir gauss filtresi uygulandığı duruma ait karşılaştırma

#### 2.2.1.4. Aktif Kontur Modeli (Snake)

Kenar belirleme yöntemlerinde, hücre sınırları üzerinde olduğu görülen bozulmalar nedeniyle; alternatif bölütleme yöntemleri incelenmeye devam edilmiştir. Bu bozulmalardan etkilenmeyecek bir yöntem olan Aktif Kontur Modeli veya Snake adıyla bilinen yaklaşımlar uygulanmıştır. Snake yöntemi önceden belirlenmiş olan kıvrımların, enerji minimizasyonuna dayanmaktadır. Görüntüdeki kenar ve çizgilerin etkisiyle belli bir noktaya kadar şekil değiştiren kıvrımların nesne sınırlarında durması beklenmektedir. Bu sayede nesne yani hücre sınırlarının şeklini alacak olan eğrilerin sınır bilgisi olarak kullanılabilceği düşünülmektedir. Aktif kontur modeli ile yapılan bölütleme örnekleri Şekil 26. 'daki gibidir.



Şekil 26. Aktif kontur modeli yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları



Aktif kontur modeli ile hücre zarının iç tarafındaki sınır bilgileri belirgin olarak elde edilememiştir. Bunun yanı sıra aktif kontur modelini gerçekleştirme süresi de diğer bölütleme yöntemlerine göre daha uzun sürmektedir.

#### **2.2.1.5. K-Ortalama ile Nesne Bölütleme**

Bu çalışmada danışmansız kümeleme yöntemlerinden K-Ortalama yaklaşımı nesne bölütleme amacıyla kullanılmıştır. K-Ortalama yönteminde, eldeki veriler oranlarına göre uygun kümelere ayrılır. Her bir küme ayrı bir nesne olarak belirlenir. K-Ortalama yöntemi ile elde edilen bölütleme sonuçları Şekil 27 'de gösterilmiştir.

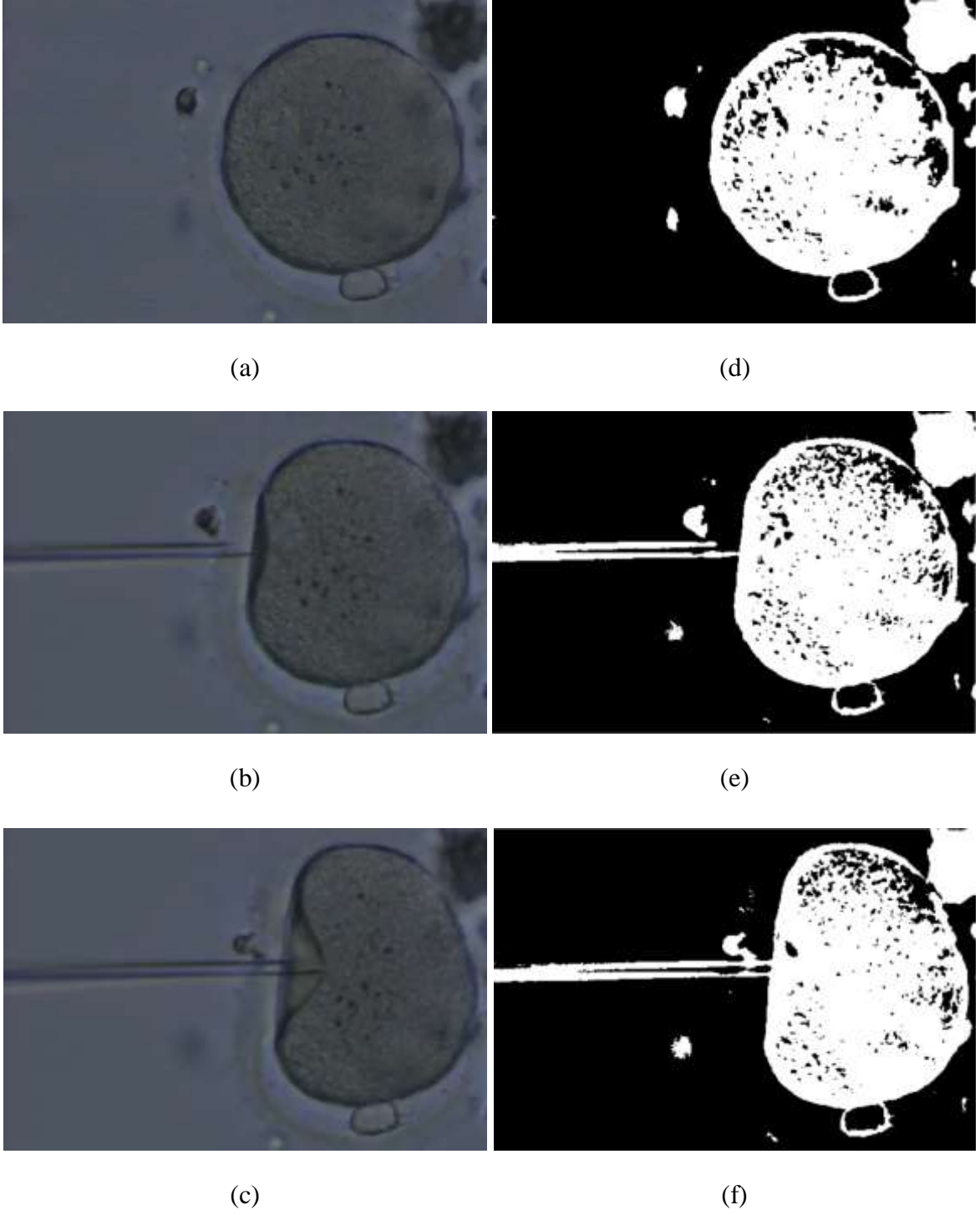
#### **2.2.1.6. Otsu Eşikleme Yöntemi**

Otsu algoritmasında sınıflar arası varyansı maksimum yapan eşik değeri bulunmaya çalışılır. Bu eşik değerine göre görüntü bölütlenir.

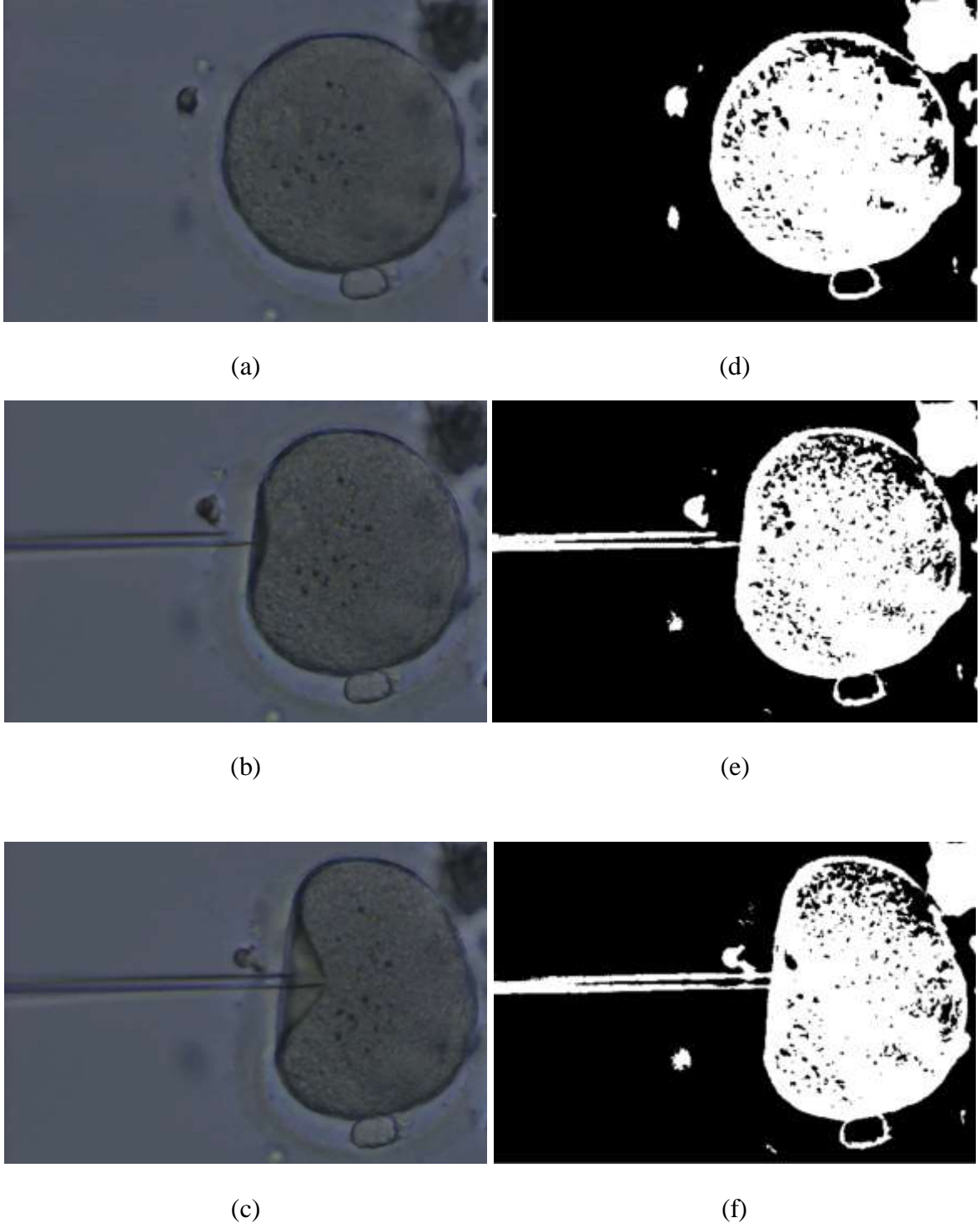
Şekil 28. 'de mikroenjeksiyon esnasında alınmış gri görüntülerde otsu algoritması uygulanması sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir.

#### **2.2.1.7. Adaptif Eşikleme Yöntemi**

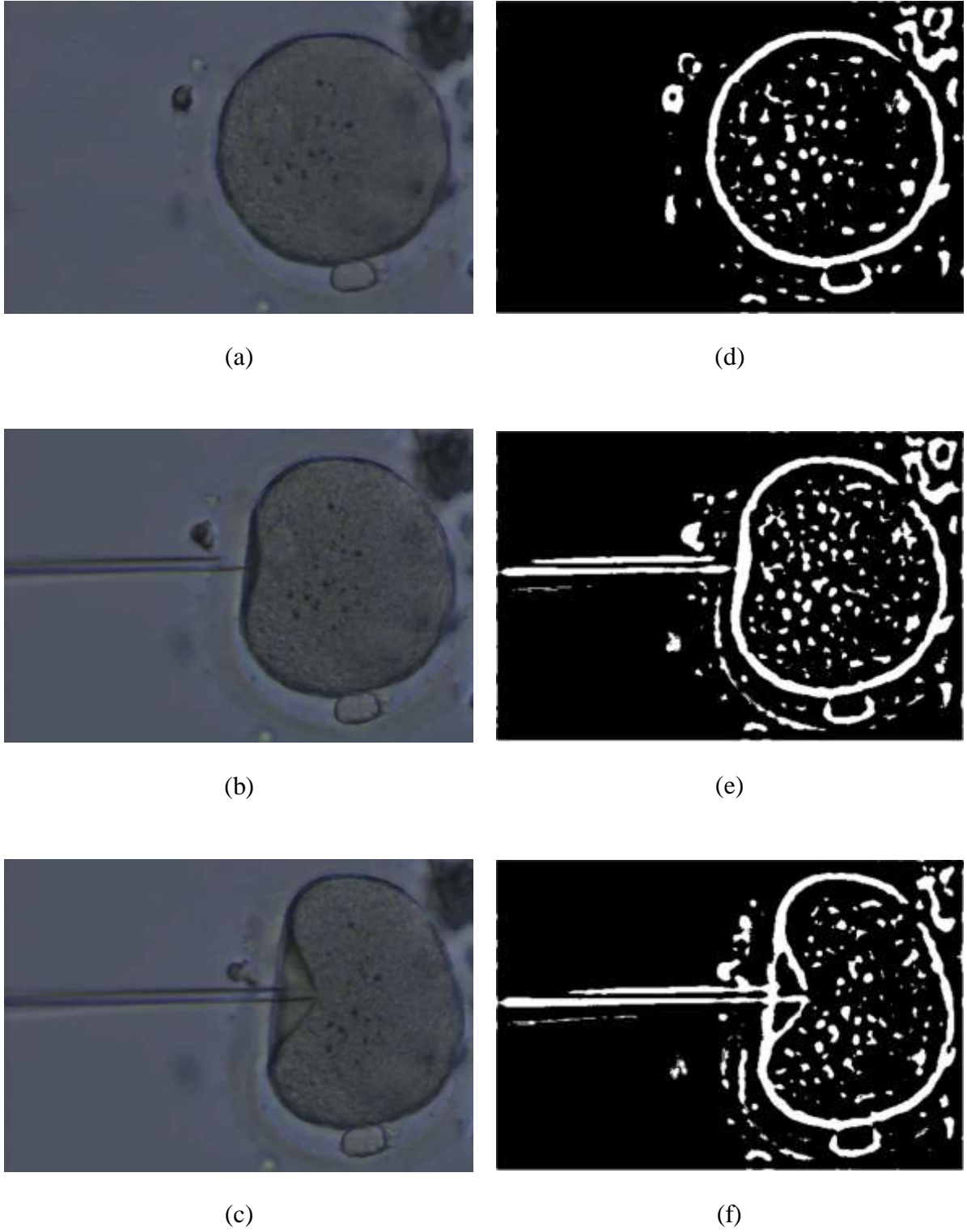
Adaptif eşiklemede daha küçük alanlarda eşikleme yapılarak görüntünün her bölümüne uygun bir eşikleme yapılması sağlanır. Görüntülerde renk değişiminin yüksek olmaması ve nesnenin yani hücrenin iç kısımlarındaki renk tonu değişiklikleri, diğer eşikleme yöntemlerinden yetersiz sonuçlar alınmasına neden olduğundan farklı alanlar için farklı eşik değeri üreten adaptif eşikleme yöntemi incelenmiştir. Şekil 29. 'da mikroenjeksiyon esnasında alınmış gri görüntülerde adaptif eşikleme yönteminin uygulanması sonucunda elde edilen görüntüler verilmiştir..



Şekil 27. K-Ortalama yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları



Şekil 28. Otsu eşikleme yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları



Şekil 29. Adaptif eşikleme yöntemi ile farklı zamanlardaki görüntüler üzerinde bölütleme işlemi. (a),(b) ve (c) orijinal görüntüler. (d),(e) ve (f) sırasıyla bu görüntülere ait bölütleme sonuçları

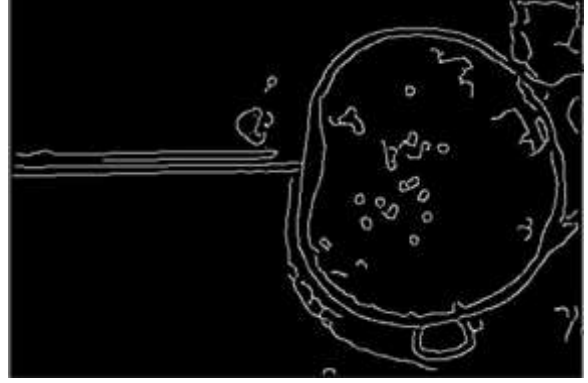
Adaptif eşikleme yöntemi ile dış sınırlar elde edilmiş ayrıca diğer yöntemlerde net olarak elde edilemeyen iç sınırlar belirlenmiştir. Adaptif eşikleme küçük pencere boyutlarına uygun olarak birer eşik değeri bulduğu için küçük değişimlere daha hassas olmaktadır. Bu nedenle adaptif eşikleme öncesinde de bir Gaussian filtresi uygulanmıştır. Bu sayede hücre içerisindeki gürültüler bastırılmış ve iç kenarlarla gürültüler arasındaki bağlantılar azaltılmıştır. Adaptif eşikleme yönteminde uygun pencere boyutu deneysel olarak belirlenmiştir. Kenar kopuklukları ve kenar gürültülerinin etkilerini azaltmak için nispeten kalın bir kenar oluşturan 21 piksellik bir pencere boyutu kullanılmıştır. Adaptif eşikleme işleminde, yerel eşiklerin bulunması için penceredeki piksellerin ortalaması kullanılmıştır. Parlaklık değişiminin çok az olduğu bölümler genellikle arka plan olarak alınması gerekirken doğrudan pencere içerisindeki ortalama değeri alıp eşik olarak belirlemek hatalı sonuçlara neden olacağından  $c$  gibi sabit bir değer ortalama değerden çıkarılmıştır. Bu sayede arka plan olmasına rağmen küçük değişimler nedeniyle ön plan gibi algılanacak kısımlar olması gerektiği gibi arka plan olarak belirlenmiştir. Görüntü sonuçları beyaz arka plan üzerine siyah nesnelere olarak çıkmasına rağmen yukarıda şekillerde arka plan – ön plan renkleri değiştirilmiş; arka plan siyah, ön plan beyaz olarak gösterilmiştir.

#### **2.2.1.8. Mikroenjeksiyon Bölütlemeye Sonuçlarının Kıyaslanması**

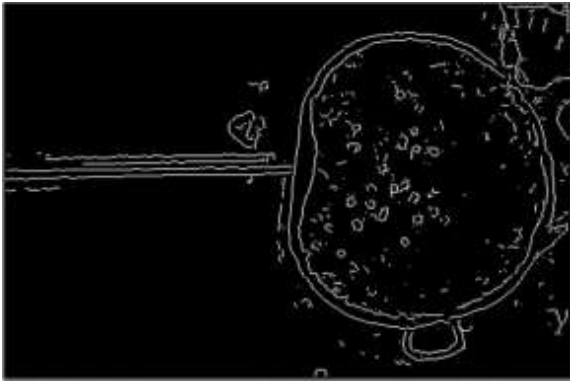
Önceki kısımda hücre sınırlarını en iyi şekilde elde edebilmek amacıyla çeşitli bölütleme yöntemleri incelenerek en uygun yaklaşımın belirlenmesine çalışılmıştır. Uygulanan farklı yaklaşımların sonuçları Şekil 30. 'da verilmiştir.



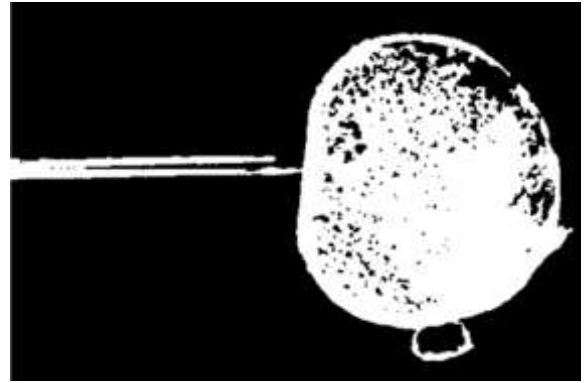
(a) Orijinal Görüntü



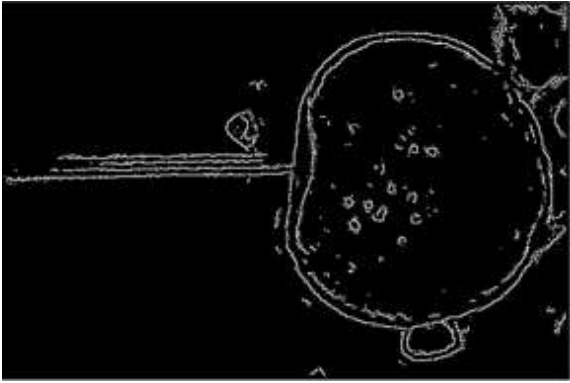
(f) Canny Yöntemi



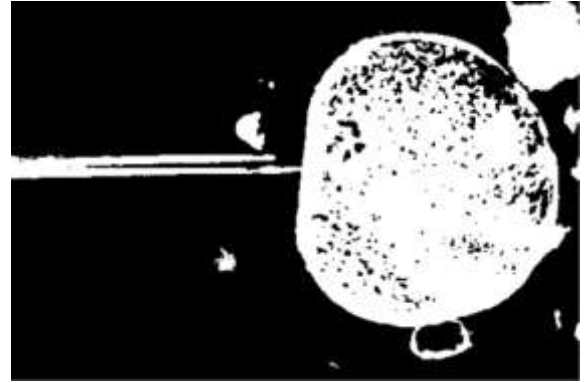
(b) Sobel Yöntemi



(g) Aktif Kontur Modeli



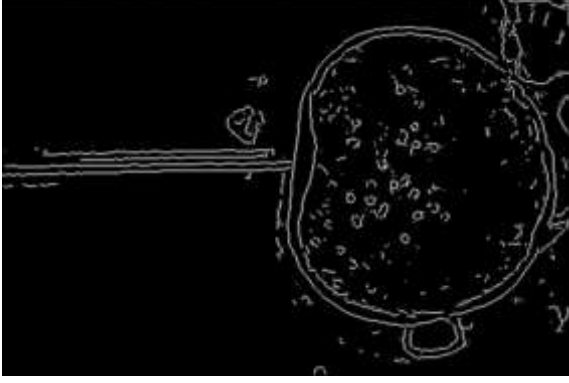
(c) Roberts Yöntemi



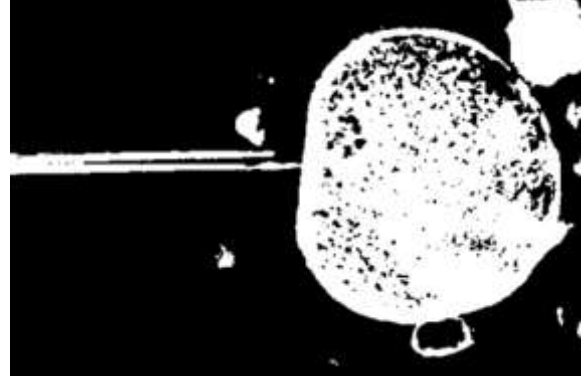
(h) K-Ortalama Yöntemi

Şekil 30. Örnek mikroenjeksiyon görüntüsü üzerinde farklı bölütleme yöntemlerinin kıyaslanması

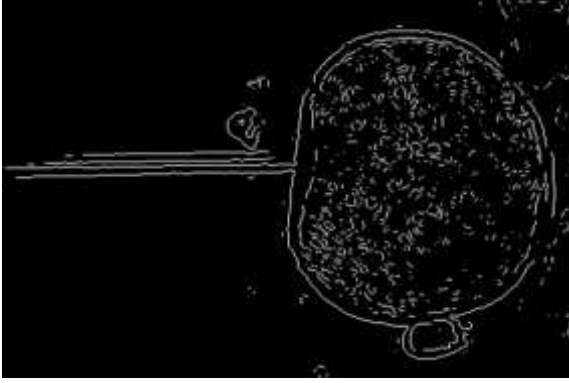
Şekil 30. 'un devamı



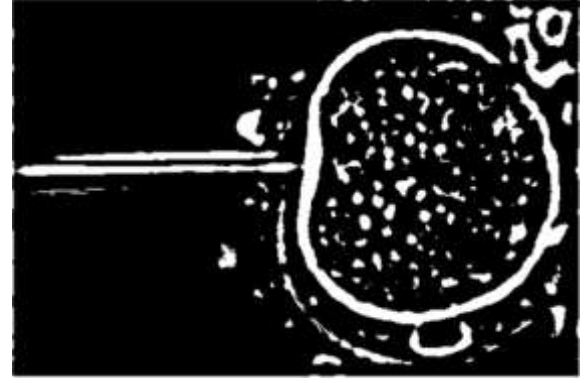
(d) Prewitt Yöntemi



(i) Otsu Eşikleme Yöntemi



(e) LoG Yöntemi



(j) Adaptif Eşikleme Yöntemi

Şekil 30. 'da görüldüğü gibi mikroenjeksiyon işleminde kullanılan video görüntüleri üzerinde en iyi bölütleme sonuçları Canny ve adaptif eşikleme yaklaşımları ile elde edilmiştir. Bölütlemenin iyileştirilmesi amacıyla tüm yöntemlerin öncesinde Gaussian filtresi uygulanmıştır. Gaussian filtresi için uygun parametreler deneysel olarak bulunmuştur. Bu yaklaşımlar içinde adaptif eşikleme daha hızlı ve net sonuçlar vermiştir.

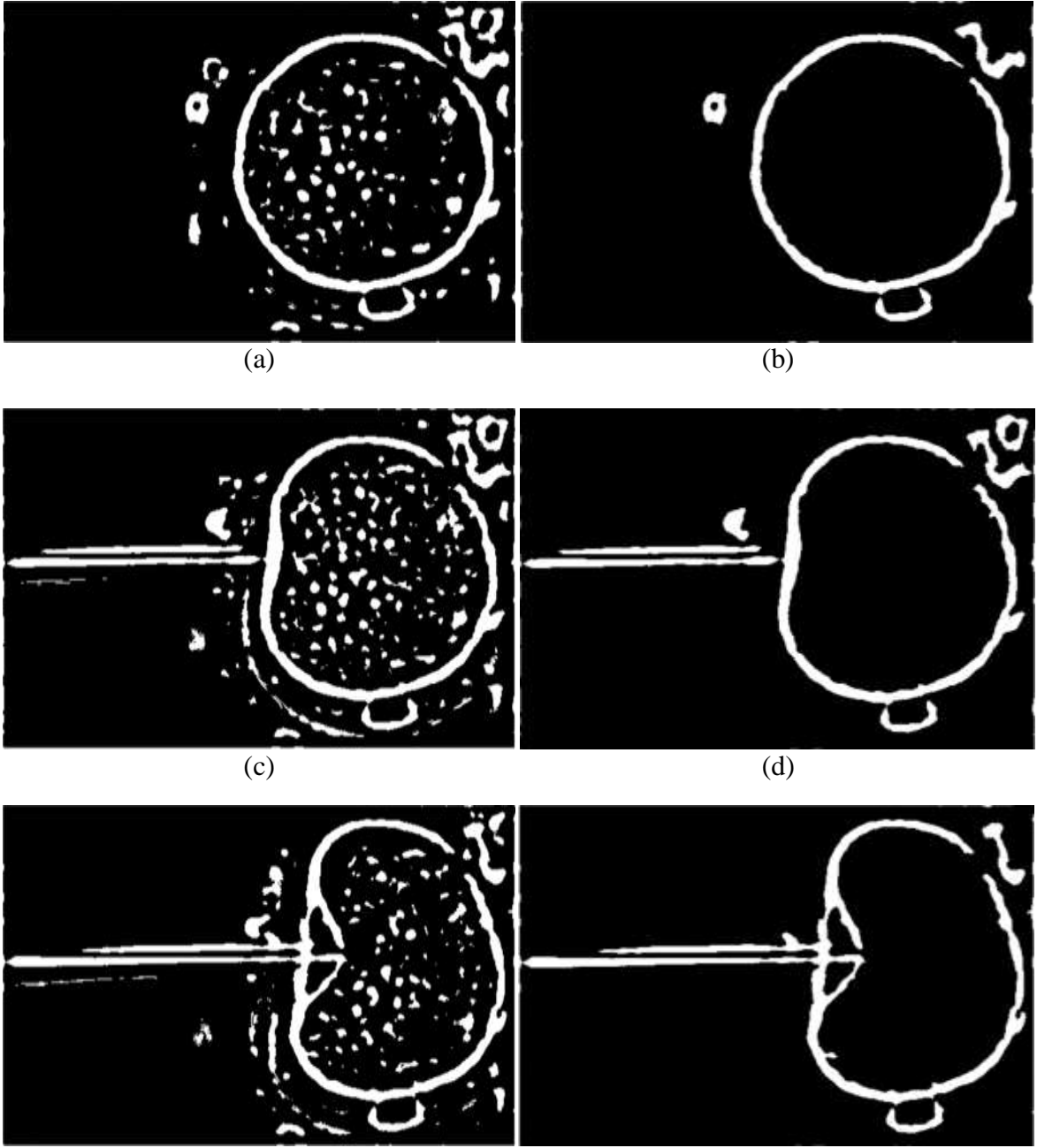
### 2.2.1.9. Mikroenjeksiyon Görüntülerinde Morfolojik İşlemler

Mikroenjeksiyon görüntüleri üzerinde bölütleme yapıldıktan sonra görüntülerde sınır bilgilerinin daha iyi elde edilebilmesi için bazı düzeltmeler yapan morfolojik işlemler uygulanmıştır. Adaptif eşikleme ile yapılan bölütleme sonucu elde edilen görüntüler incelendiğinde hücre içinde ve dışında gereksiz piksel gruplarının oluştuğu görülmektedir. Bu piksel gruplarından hücre içerisinde bulunanlar otomatik sınır izleme için engel teşkil etmektedirler. Bu nedenle nesne olarak algılanabilecek gereksiz piksel gruplarının mümkün olduğunca yok edilmesi gerekmektedir.

Gereksiz piksel gruplarını yok edebilmek için izlenen yol ise nesne boyutlarının incelenmesi şeklindedir. Yani gerçek nesnelerin (hücre ve mikropipet) boyutlarının diğer piksel gruplarına göre oldukça büyük olması, bunlar arasında ayırım yapılabilmesini sağlamaktadır. Bu amaçla morfolik alan açma işlemi gerçekleştirilmiştir.

Alan açma işlemi; ikili (binary) görüntülerde, piksel gruplarının incelenmesi sonucunda, belirlenen boyutların altında kalan piksel gruplarının, yok edilmesini sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem bölütlenmiş olan görüntüler üzerinde uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 31. 'deki gibidir.





Şekil 31. Alan açma işleminin bölütlenmiş görüntüler üzerindeki etkisi

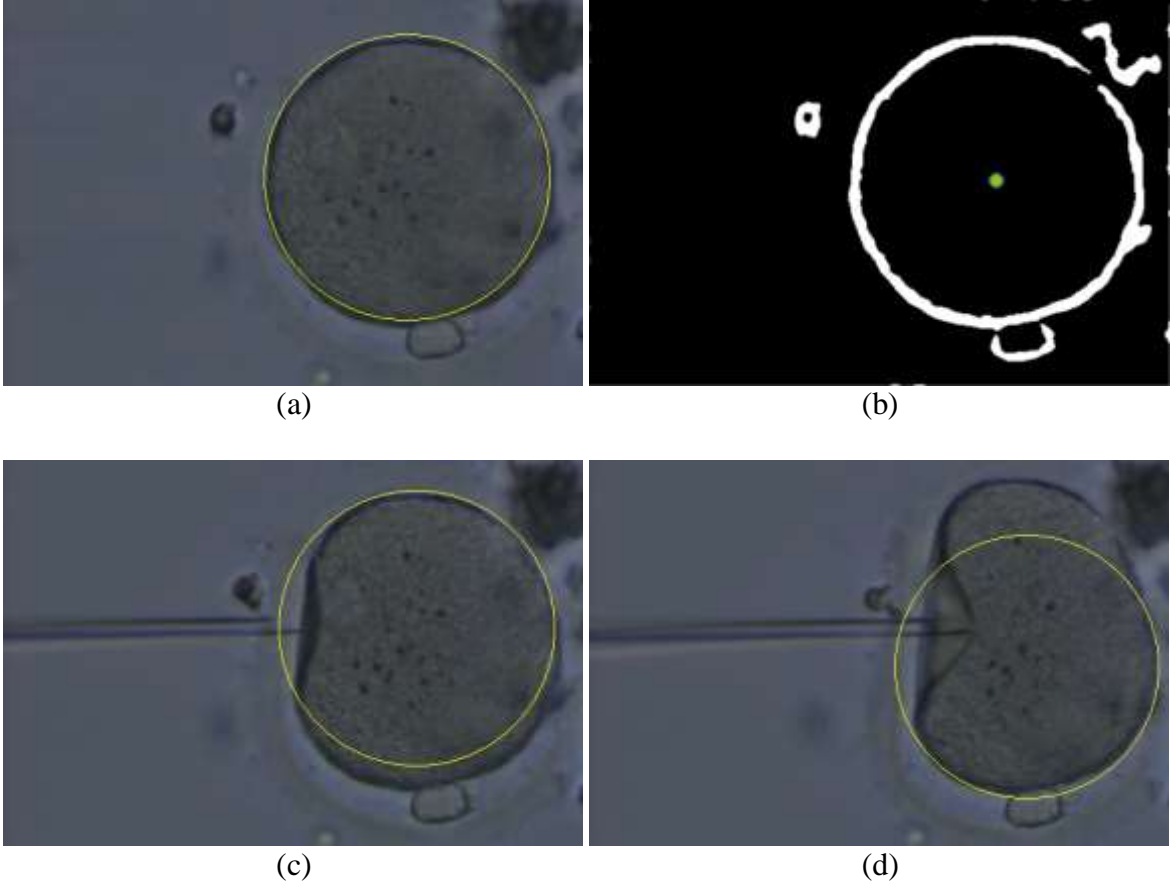
### 2.2.2. Oosit ve Mikropipetin Belirlenmesi ve Takibi

Görüntüler üzerinde morfolojik işlem uygulanması sonucu elde edilen görüntüler nesne belirlemeye uygun hale gelmektedirler. Bu aşamada görüntüler incelenerek oositin konumu belirlenmektedir.

Görüntüler üzerinde oosit nesnesi aramak için hücrenin şekilsel farklılıklarından yararlanılmaktadır. Oositin dairesel şekli hücre nesnesini diğer nesne ve gürültülerden ayırt etmektedir. Buna karşın, hücre nesnesinin şekli dairesel olmasına rağmen mikropipetin hücre içerisine girmesiyle tam bir daire elde edilemediği durumlar olmaktadır. Yani kullanılacak yöntemin dairedeki bozulmalara karşı toleransı olması gerekmektedir. Bu nedenlerle bu kısımda Hough dönüşümü kullanılmıştır. Hough dönüşümü görüntüler üzerinde düz çizgilerin yanı sıra daire ve elips gibi şekillerin elde edilmesinde de kullanılabilir. Ayrıca Hough dönüşümünün belli bir eşiğe kadar toleransı olmakla birlikte görüntüdeki nesnelere en uygun düşen nesnenin bulunmasını oylama yani olasılıkla gerçekleştirebilmektedir.

Hough Dönüşümü uygulandığında farklı boyutlarda daire veya doğru bulunabilmektedir. Bu aşamada hücre veya mikropipet için önceden belirlenmiş uygun boyut ve yarıçap bilgilerindeki doğru ve daireler nesne bilgisi olarak alınmıştır.

Şekil 32. 'de Hough dönüşümü kullanılarak hücre konumunun bulunmasına dair örnek görüntüler bulunmaktadır.



Şekil 32. Farklı video konumlarından alınan görüntülerde hough dönüşümü ile hücre konumunun bulunması

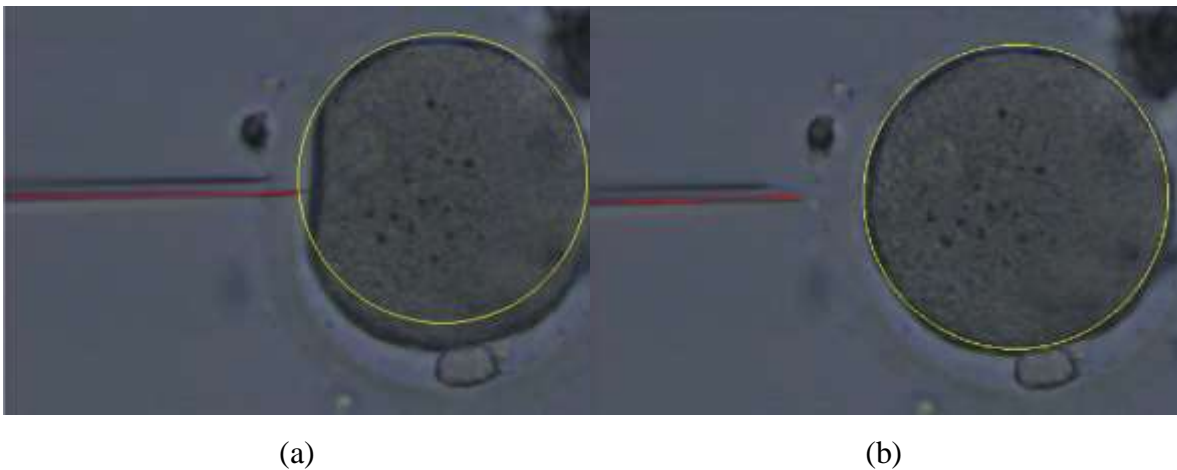
Şekil 32. 'de ikili görüntüler üzerine Hough Dönüşümü uygulanması sonucu bulunan dairelerin yani hücrelerin video çerçevelerine eklenmesi sonucu oluşan görüntüleri görülmektedir. Hough Dönüşümünün bu kısımdaki uygulanmasındaki amaç sonraki kısımlar için ihtiyaç duyulan hücre merkez konumunun otomatik şekilde yaklaşık olarak belirlenmesidir. Hough Dönüşümü ile dairenin bulunması da hücrenin merkez konumunun yaklaşık olarak elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Şekil 32.a. 'daki hücre için Hough dönüşümü ile belirlenmiş merkez konumu, Şekil 32.b. 'deki sarı nokta ile gösterilmektedir. Şekil 32.c.ve Şekil 32.d. 'deki görüntülerde hücrenin değişen şekillerinde elde edilen Hough dönüşümü sonuçları gösterilmektedir.

Video çerçeveleri incelendiğinde mikropipetin baskı yapmasıyla birlikte oositin konumunda ve şeklinde değişiklikler olduğu görülmektedir. Ayrıca hücredeki şekil değişikliği bazı çerçevelerde hücrenin bulunamamasına sebep olabilmektedir. Bu yüzden ilk

merkez konumunu belirleyip bu konumu tüm çerçeveler için merkez olarak uygulamak mümkün olmamaktadır.

Hücre merkezinin bulunması için izlenen yöntemde, ilk olarak birinci video çerçevesinde hücre konumu bulunmalıdır. İlk çerçevede henüz mikropipetin etkilemediği oosit olduğundan tamamen dairesel bir şekle sahiptir ve Hough Dönüşümü ile bulunan dairenin merkezi, hücre merkez konumu olarak alınabilir. Sonraki çerçevelerde ise yine Hough yöntemi ile hücre ve merkezi belirlenir ancak iki çerçeve arasındaki değişikliğin fazla olmamasına dikkat edilir. Yani ardışık iki çerçevede elde edilen merkez konumları arasındaki mesafe belli bir oranın üzerindeyse hücrenin bulunamaması ya da yanlış bulunması gibi bir problem olabilir. Bu nedenle yine ardışık iki çerçevedeki merkez konum uzaklığının fazla değişmeyeceği düşünülerek bir önceki çerçeveye ait merkez konumu, geçerli merkez konumu olarak alınmaya devam edilir. Bu sayede birkaç çerçevede merkez konum bilgisi bulunamasa bile bunlar tolere edilebilmektedir.

Görüntülerde mikropipet nesnesi de belirlenmiştir. Her yeni çerçevede mikropipet konumu ve çerçeve içerisindeki boyutu değişmektedir. Bu nedenle mikropipet nesnesinin ayırt edici özelliği olarak doğrusal şekli ele alınmıştır. Bu ayırt edici özelliği sayesinde Hough dönüşümünde doğru bulma yöntemi ile nesne bulunabilmektedir. Şekil 33. 'de videonun farklı zamanlardaki çerçevelerinde oosit ve mikropipetin birlikte Hough dönüşümleri yardımıyla bulunmuş halleri görülmektedir.



Şekil 33. Farklı video zamanlarında mikropipet ve oositlerin belirlenmesi

Oositin bulunmasında olduğu gibi, istenmeyen piksel grupları nedeniyle görüntüde birden fazla doğrusal nesne bulunabildiği durumlar olmaktadır. Doğru nesnenin elde edilebilmesi için mikropipetin boyutsal farklılığı kullanılmaktadır. Görüntüde bulunan en büyük doğrusal nesne mikropipet olarak belirlenmektedir. Görüntüye henüz mikropipet nesnesinin girmediği ya da yeni girdiği çerçevelerde yanlış nesnenin mikropipet olarak belirlenmesini önlemek için de deneysel olarak belirlenen bir eşik boyutu doğrusal nesnelere uygulanmaktadır.

### 2.2.3. Hücre Sınırlarındaki Değişimin İzlenmesi ve Hücreyi Delen Mikropipetin Durdurulması

Hough Dönüşümü ile hücrenin bulunması işleminde oosit genel hatlarıyla bulunmakta, sınırlar net bir şekilde elde edilememektedir. Ancak hücre üzerine uygulanan kuvvetin hesaplanabilmesi için hücrenin sınır bilgilerinin net bir şekilde elde edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla sınır izleme işlemi kullanılarak her bir çerçevede hücre sınırı değişikliğinin elde edilebilmesi sağlanmıştır.

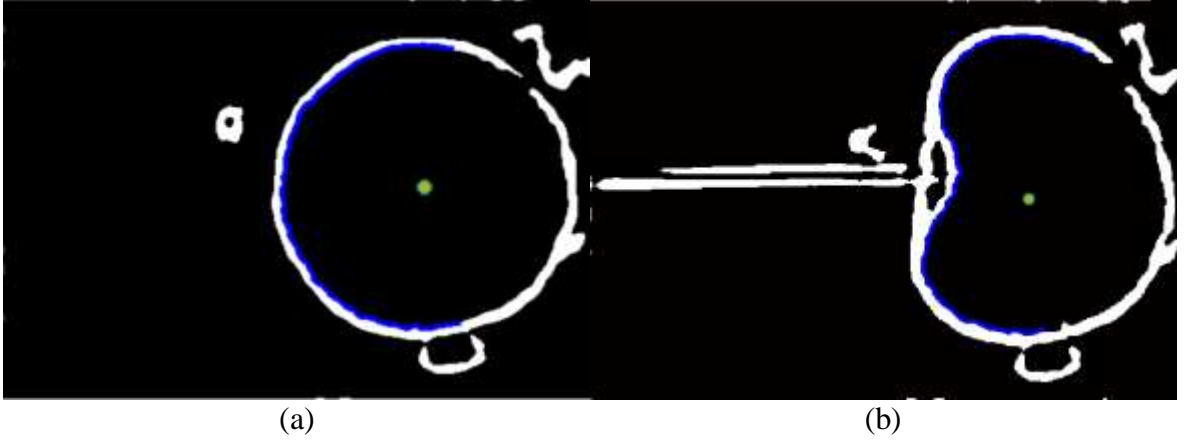
Hücre sınırlarını bulmak ve takip etmek için sınır izleme yaklaşımı kullanılmıştır[27]. Bu işleminde oosit hücre merkezine bakan sınırlarında belirlenen bir başlangıç noktasından itibaren sınır üzerinde belirlenen yönde ilerleyerek bir noktalar kümesi oluşturulur. şekil 34. ve şekil 35. 'de farklı renk ve boyutlarla sınır izleme sonuçlarının sırasıyla yakınladıştırılmış ve normal durumları gösterilmiştir.



şekil 34. Hücre sınırının yakınladıştırılmış gösterimi

Bu çalışmada hücre sınırlarını otomatik bir şekilde takip etmek hedeflenmiştir. Yani çerçeve üzerinde başlangıç noktasının elle seçilmesi ya da sabit bir değer verilmesi gibi bir durum olmadan, her çerçevede uygun başlangıç noktasının seçilmesi ve o başlangıç noktasından itibaren izleme yapılması sağlanmıştır. Önceki bölümde hücrenin merkez konumu yaklaşık olarak elde edilmişti. Bu kısımda da bu merkez noktası sınır izlemenin başlangıç noktasını belirlemek için kullanılmaktadır. Hücre içindeki gürültü ve fazla veriler görüntülerden silindiği için hücre merkez konumundan dikey yönde ilerleyerek hücre sınırı ile kesişen ilk nokta, sınır izlemenin başlangıç noktası olarak alınabilmektedir.

Hücre üzerine uygulanan kuvvetin hesaplanabilmesi için ihtiyaç duyulan veriler, hücrenin mikropipet ile kesişeceği, yaklaşık 180 derecelik, bir yüzeyden elde edilebilmektedir. Bu nedenle hücrenin tamamı yerine sadece mikropipetin temas edeceği yarı daireye ait sınırların izlenmesi yeterlidir. Dolayısıyla belirlenen başlangıç noktasından itibaren, tahmini temas yüzeyinin konumuna göre saat yönünde veya saat yönünün tersine olacak şekilde hücre iç sınırları takip edilerek; sayısı deneysel olarak belirlenen miktarda bir noktalar kümesi oluşturulur. Örnek sınır izleme görüntüleri Şekil 35. 'de görülmektedir.



Şekil 35. Farklı video konumlarından görüntüler üzerinde sınır izleme işlemi sonuçları

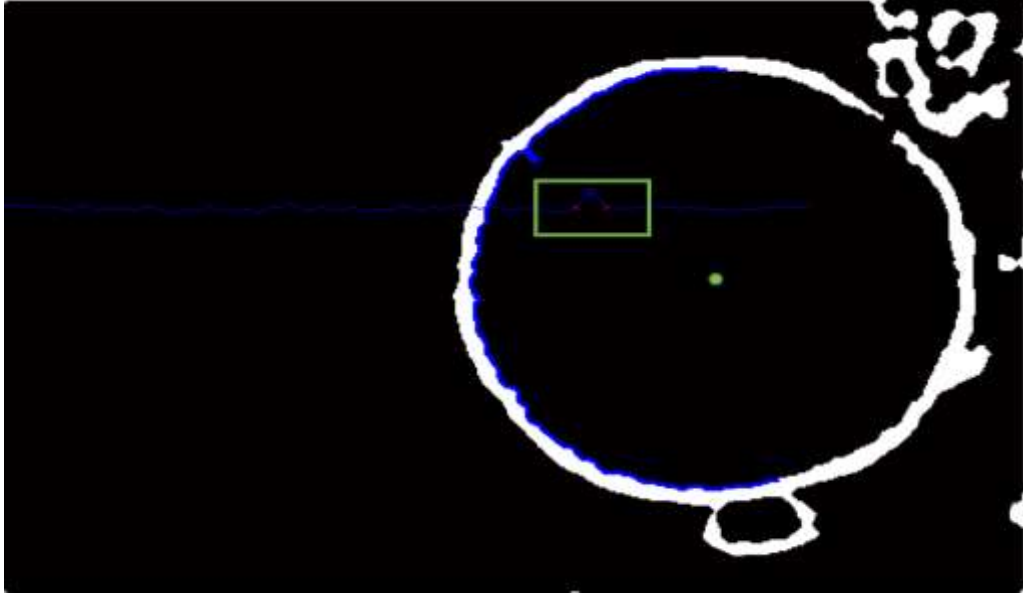
Burada mavi ile gösterilen eğriler, sınır izleme sonucu elde edile noktalar kümesini ifade etmektedir. Görüldüğü üzere sınır ile aynı şekli almaktadırlar.

Sınır izleme yardımıyla bulunan noktalardan veri çıkarımı yapılabilmesi için sınır bilgisi olarak çıkarılan noktalar kümesinin merkeze olan uzaklıkları incelenir. Henüz mikropipetin hücreye baskı uygulamadığı anda tüm sınır noktalarının merkeze olan

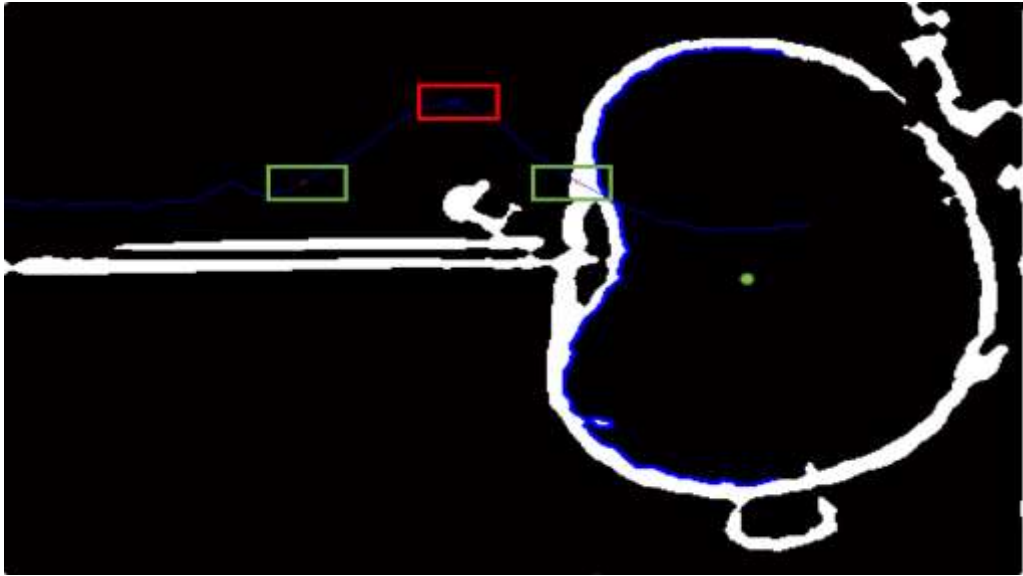
uzaklıkları eşit olmaktadır. Hücreye baskı yapıldıkça mikropipet ucuna yakın noktalar merkeze yaklaşır. Mikropipetin sağında ve solunda kalan kısımlarda daha küçük yarı dairesel alanlar oluşur. Bu durumda sınır uzaklıkları incelendiğinde sınırdaki pikseller içinde merkeze en uzak piksel ile en yakın piksel uzaklıkları arasındaki fark girinti derinliğini vermektedir. Merkeze en yakın noktanın iki tarafındaki merkeze en uzak iki nokta; yani iki tepe noktası arasındaki mesafe de, küçük yarı dairelerin çaplarına denk gelmektedir.

Şekil 36. 'da görülen, ince mavi çizgi; sınırdaki noktaların merkeze göre uzaklıklarını göstermektedir. Kırmızı dikdörtgen ile belirginleştirilen mavi yuvarlak nokta merkeze en yakın noktayı göstermektedir. Yeşil dikdörtgenler ile işaret edilen kırmızı noktalar ise girinti çapını bulmakta kullanılacak olan noktalardır. Bu noktalar hesaplanırken, girintinin sağında ve solundaki arama yapılır. Tüm uzaklık mesafelerinin ortalamasının; sağ ve solda ilk geçildiği noktalar ilgili noktalar olarak alınır.

Girinti olmamasına rağmen gürültüler nedeniyle girinti olarak algılanabilecek kısımların atılması için girinti genişliğinin ölçüsü kontrol edilir. Belirlenen orandan daha dar olan girintilerin, gürültüler nedeniyle oluştuğu kabul edilir.



(a) Gürültü kaynaklı girinti



(b) Minimum nokta ve maksimuma geçişin başlangıç noktaları

Şekil 36. Uzaklık ölçülerine göre değişkenlerin belirlenmesi (a) gürültü kaynaklı girinti, (b) girinti durumundaki noktalar

Benzer bir yöntemle, mikropipetin durdurulması için, hücre duvarında yırtılma olup olmadığını kontrol edilmesi de sağlanmaktadır. Hücre sınırları her çerçevede kontrol edilirken bulunan girinti genişliği uzaklıkları da kontrol edilir. Hücre zarı delinip mikropipetin hücre içerisine girmesiyle, izlenen sınırlarda ani değişiklikler görülmektedir.



Hücre duvarının delinmesiyle iki yana ayrılan hücre duvarında; iki taraftan noktalar seçilerek bulunan, girinti çapı boyutunda büyük bir artış olmaktadır. Bu girinti çapında oluşan ani ve büyük bir artış, hücre zarının delinmesiyle ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte enjeksiyon esnasında mikropipetin hücre zarını itererek ilerlemesi hücre zarındaki gerilimin, hücre duvarının delinmesine kadar artmasına sebep olmaktadır. Hücre duvarının delinmesinden sonra mikropipet, hücre içerisine girerken gerilimini kaybetmiş hücre duvarı da aniden eski konumuna doğru bir miktar geri döner. Dolayısıyla o ana kadar mikropipetin baskısı sonucunda oosit içine doğru oluşan girinti derinliği de aniden değişmektedir.

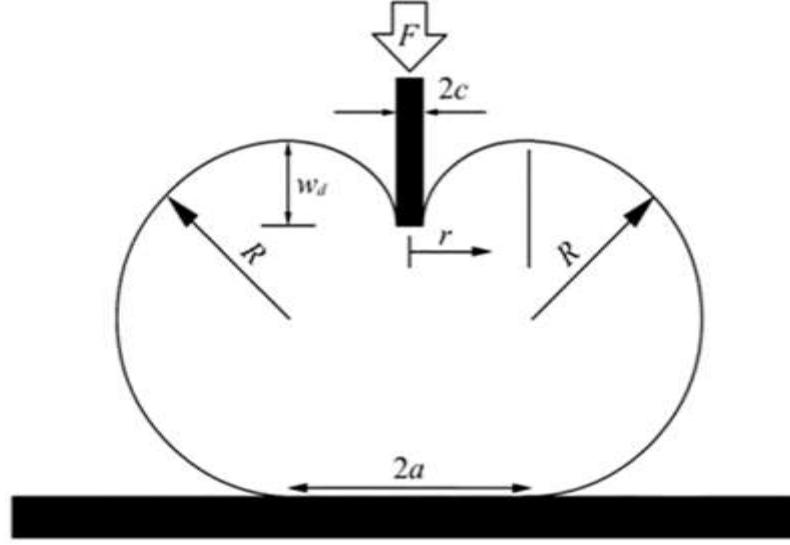
Sonuç olarak; i) Girinti çapındaki ani ve büyük değişimler sonucunda deneysel olarak belirlenen bir girinti genişliği boyunca üzerine çıkılması durumu; ii) Hücre duvarı delinene kadar sürekli olarak artan girinti derinliğindeki, ani azalma durumu; kontrol edilerek hücrenin delindiği ve mikropipet ucunun hücrenin içerisine girdiği bilgisine ulaşılmaktadır.

Sınır izleme sonucu elde edilen değişken uzaklık bilgileri hücre üzerine uygulanan kuvvetin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

### **2.2.3.1. Hücre Üzerine Uygulanan Kuvvetin Hesaplanması**

Son olarak oosit üzerine uygulanan kuvvet hesaplanmıştır. Bu aşamaya kadar görüntü işleme teknikleri yardımıyla hücre zarındaki değişikliklerin elde edilmesi sağlanmıştır. Bu kısımda da elde edilen veriler uygulanan kuvvetin hesaplanmasında kullanılacaktır.

Oosit üzerine uygulanmış olan kuvvetin belirlenebilmesi amacıyla biyozar nokta yükleme modeli[22] kullanılmıştır. Biyozar nokta yükleme adlı bu hücre mekaniği modeli oositin şekilsel değişimlerini inceleyerek üzerine uygulanmış olan kuvveti tahmin etmektedir. Biyozar nokta yükleme modelinde hücre zarı üç geometrik parametre ile ifade edilmektedir. Bunlar  $a$ ,  $w_d$ ,  $R$  değerleridir.



Şekil 37. Mikropipet tarafından uygulanan kuvvet sonucu girintilenmiş hücre yapısı

Şekil 37. 'de,  $c$  yarıçaplı mikropipet tarafından uygulanan  $F$  kuvveti sonucunda oluşan hücre görüntüsü verilmiştir[22].  $R$  harfinin yarı dairesel eğrilere ait yarıçapı ifade ettiği bu görüntüde;  $a$ , hücre girintisi yarıçapını;  $w_d$ , ise bu girintiye ait derinliği temsil etmektedir.

Biyozar nokta yükleme modeline göre hücre üzerine uygulanan  $F$  kuvveti aşağıdaki analitik ifadeler (56) ve (57) ile belirlenebilmektedir.

$$= \frac{2\pi E h \omega_d^3}{a^2(1-\nu)} \left[ \frac{3 - 4\zeta^2 + \zeta^4 + 2\ln\zeta^2}{(1-\zeta^2)(1-\zeta^2 + \ln\zeta^2)^3} \right] \quad (54)$$

$$\zeta = c/a \quad (55)$$

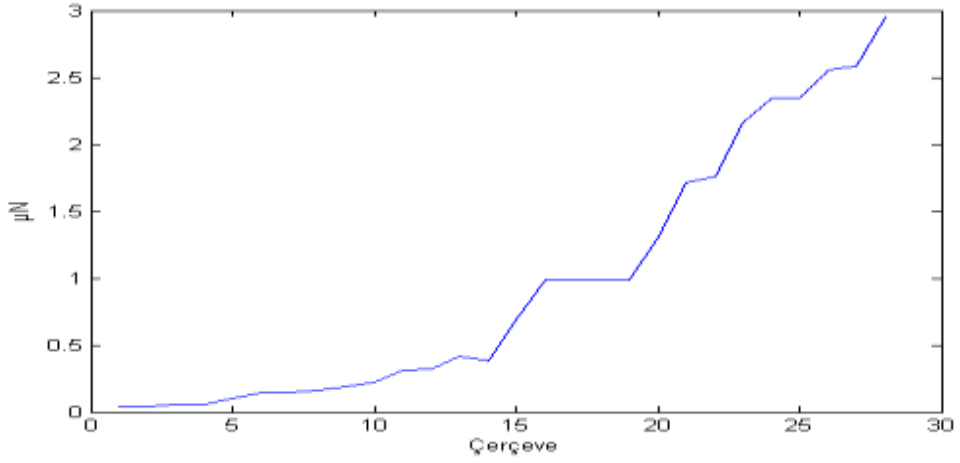
Bu analitik ifadede;  $p$ ,  $h$ ,  $c$  ve  $E$  değerleri sabit değerler iken, geometrik parametreler ( $a$ ,  $w_d$ ,  $R$ ) ve  $F$  kuvveti değişkenlerdir. Bu değişken geometrik parametreler ikili görüntülerde, sınır izleme yardımıyla alınan bilgiler kullanılarak elde edilmiştir. Değişken değerler her çerçevede incelenerek  $F$  kuvvet değişimi izlenmektedir. Eşitlikte bu geometrik parametrelerin dışında bulunan  $\nu$ ; *Poisson* katsayısını ifade etmektedir. Bu değer biyozarlar için genellikle 0.5 olarak alınmaktadır[66,67].  $h$  katsayı değeri; *Zona Pellusida* olarak

bilinen yumurta zarını çevreleyen yoğun sıvıya ait kalınlığı belirten sabit bir değerdir.  $E$  ise zarın esneklik katsayısı ifade edilmektedir.

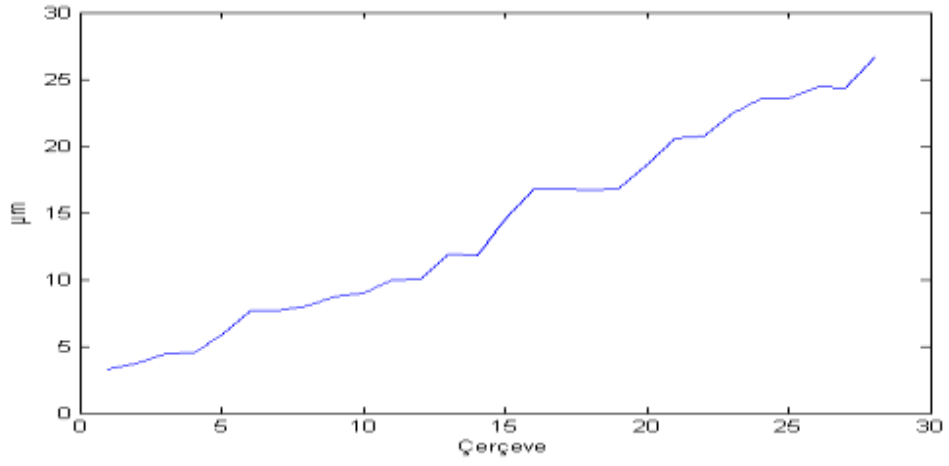
Bu çalışmada, hücre zarı esneklik katsayısı değeri için M.Khalilian ve arkadaşlarının çalışması referans alınmıştır [68]. İlgili çalışmalarında zar esneklik katsayısı, 3 farklı çiftten alınan 15 örnek üzerinde, katmanlı modelle yapılan ölçümde 1.29 kPa sapmayla ortalama 7.47 kPa ve kabuk modeli ile yapılan ölçümde 1.36 kPa sapmayla ortalama 7.34 kPa olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada ilgili çalışma temel alınarak zar esneklik katsayısı, 7.4 kPa yaklaşık değer olarak kabul edilmiştir.

İnsan oositlerinin çapı ortalama 120  $\mu\text{m}$  büyüklüğüne eriştiğinde tam boyutuna ulaşmaktadırlar[69]. Deneylerimizde kullandığımız görüntülerdeki oosit ve mikropipet boyutları hakkında bilgi alamadığımızdan görüntüdeki oositin çap büyüklüğü piksel olarak hesaplanıp  $\mu\text{m}/\text{piksel}$  oranından görüntüdeki diğer büyüklükler (mikropipet çapı, girinti çapı, girinti derinliği) bulunmuştur. Bu yaklaşımlarla, girinti çapı 57  $\mu\text{m}$ , girinti derinliği 10.077  $\mu\text{m}$  olduğunda 120  $\mu\text{m}$  çapındaki oosit üzerinde 4  $\mu\text{m}$  çaplı mikropipetin uyguladığı kuvvet 0.32  $\mu\text{N}$  olarak hesaplanmıştır. Şekil 38. 'deki grafiklerde sırasıyla belirlenen kuvvet, girinti derinliği ve girinti çapının, mikroenjeksiyon esnasında hesaplanan değerleri verilmiştir.

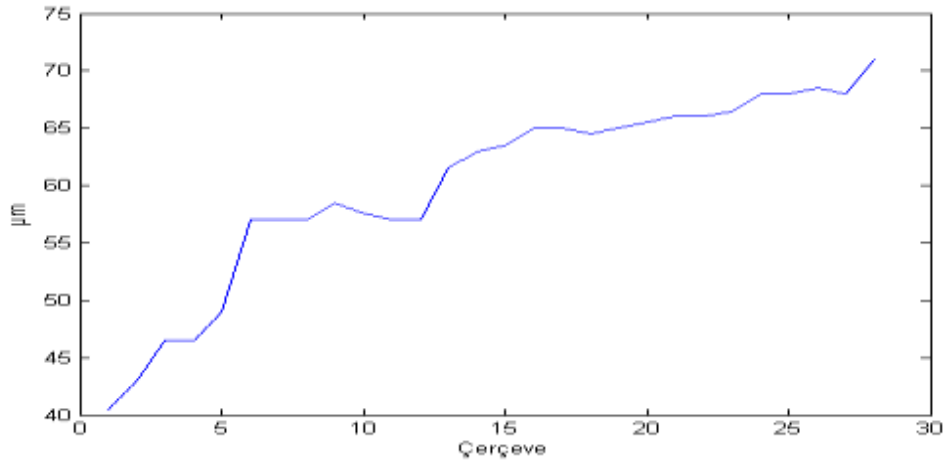
Video görüntüsünün başlangıcında hücre zarına henüz temas etmediği kısımlar ile mikropipetin girişi sağlandıktan sonraki ervelerde hesaplanan değerler grafiklerde gösterilmemiştir.



(a). Belirlenen kuvvet



(b) Girinti derinliği



(c) Girinti çapı

Şekil 38. Belirlenen sonuçlara ait (a). belirlenen kuvvet, (b) girinti derinliği, (c) girinti çapı, grafikleri

### 3. SONUÇLAR

Bu çalışmada; elektroaktif polimer malzemesinin, bilgisayar kontrollü mikroenjeksiyon işleminde kullanılması için incelemeler yapılmış ve mikroenjeksiyon kontrolünü sağlamak için nesnelere izlenerek geri bildirim verileri elde edilmeye çalışılmıştır. Elektroaktif polimer malzemesinin hareketleri incelenerek; gerilim miktarının ve hareketin, bilgisayar tarafından denetlenebilmesi için, polimer üzerine uygulanmış olan elektriksel gerilim tahmin edilmiştir. Ayrıca mikroenjeksiyon işleminde hücre ve mikropipet konumlarının bulunması ve hücre üzerine uygulanan kuvvet miktarı değişiklikleri takip edilebilmiştir. Gerilim kontrolü için ihtiyaç duyulan veri kümesini oluşturmak amacıyla; her sınıftan 12 olmak üzere, 5 sınıf için toplam 60 örnek video görüntüsü kaydedilmiştir. Bir bilgisayarlı görüntü yazılımı geliştirilip, elektroaktif polimer gerilim tahmini için laboratuvar ortamında kaydedilen görüntüler üzerinde polimer nesnesi ayrıştırılmıştır. Polimer üzerine uygulanan gerilim kuvveti polimer üzerinde sadece şekilsel değişiklik oluşturduğu için şekilsel özellikler üzerinde durulmuştur. Farklı özellik çıkarım ve sınıflandırma yöntemleri uygulanmıştır. Eğri uydurma ile çıkarılan özelliklerin yapay sinir ağı yaklaşımı ile sınıflandırılması önerilmiştir. Mikroenjeksiyon denetlenmesi amacıyla geliştirilen görüntü sistemi için örnek video çerçeveleri üzerinde çalışılmıştır. Ön işlem olarak bir Gaussian filtresi ile mikroenjeksiyon görüntülerinde yumuşatma yapılmıştır. Farklı bölütleme yöntemleri incelenerek hücre sınır bilgileri elde edilmeye çalışılmıştır. En iyi sonuçlar yerel adaptif eşikleme ile elde edilmiştir. Canny yönteminde de olumlu sonuç alınmasına karşın bazı çerçevelerde, sınır bilgisinde bozulmalar olmaktadır, bu nedenle tüm çerçevelerde iyi sonuç veren, yerel adaptif eşikleme yöntemi kullanılmıştır. Mikropipet nesnesi görüntülerdeki doğrular incelenerek belirlenmiştir. Oosit merkezini belirleyebilmek için benzer şekilde ardışık video çerçevelerinde dairesel nesnelere incelenmiştir. Oosit nesnesinin bazı çerçevelerde bulunamaması ya da hatalı bulunması gibi durumlar için, gerektiğinde önceki çerçeve bilgilerinden yararlanılarak hata toleransı sağlanmıştır. Her video görüntüsünde oositin sınırlarındaki değişimler izlenmiştir. Mikropipet yönünde, hücre zarındaki delinme de sınırların izlenmesi ile elde edilebilmektedir. Biyozar nokta yükleme modeli kullanılarak oosite uygulanan kuvvet, ardışık çerçevelerde takip edilmiştir. Çalışmanın hem elektroaktif polimer hem de mikroenjeksiyon kısımlarında olumlu sonuçlar alınmasına rağmen hedeflenen otomatik mikroenjeksiyon sistemi tam olarak

kurulamamıştır. Bu nedenle elektroaktif polimer ve mikroenjeksiyon çalışmaları için ayrı görüntüler üzerinde çalışılmıştır. Bu çalışmalar gerekli koşullar sağlandığında birleştirilebilir.

Bu tez çalışmasında 2 tane bildiri yayını yapılmıştır. Elektroaktif polimer karakteristiği ve gerilim tahmini konulu bildiri; 2014 Uluslararası Katılımlı VII. Ulusal Biyomekanik Kongresi kitapçığında ve Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarımı Dergisinde basılmıştır. Mikroenjeksiyon görüntülerinde hücre üzerine uygulanan kuvvetin tahmini konulu bildiri 2015 Çankaya Üniversitesi 8. Mühendislik ve Teknoloji Sempozyumunda sunulmuş ve bildiri kitapçığına basılmıştır.

#### 4. ÖNERİLER

Çalışmada otomatik mikroenjeksiyon sistemi için elektroaktif polimerdeki elektrik gerilimi ve hücre üzerine uygulanan kuvvetin tahmin edilmesine çalışılmıştır. Deney düzeneği tam olarak oluşturulmamıştır. Deney düzeneği oluşturularak oosite uygulanan kuvvet ve polimerin hareketleri gibi bilgilere göre gerilim değeri ayarlanarak otomatik mikroenjeksiyon sistemi oluşturulabilir.

Mikroenjeksiyon uzmanı eğitimlerinde oosite benzer özellikler taşıyan farklı hayvan yumurtaları kullanılmaktadır. Bu yumurtalar özel saklama koşulları gerektirmektedir. Bu koşullar sağlanıp otomatik mikroenjeksiyon düzeneği test edilebilir.

Mikroenjeksiyon işleminin belirli safhaları vardır. Kullanılan görüntülerde oositlerin net olduğu ön işlem yapılmış veriler görülmektedir. Biyolojik olarak ön işlemler yapılmadan mikroenjeksiyon yapılması mümkünse, nesne bulma ve izleme aşamalarında farklı görüntü işleme teknikleri kullanılabilir.

Mikroenjeksiyon işlemi mikroskop altında gerçekleştirilmektedir. Mikroskopik kameralarla daha basit düzenekler geliştirilerek başarımlı/maliyet değerlendirilmesi yapılabilir.

## 5. KAYNAKÇA

1. Ekinçi, M., ve Gedikli, E., A Novel Approach On Silhouette Based Human Motion Analysis For Gait Recognition. Advances in Visual Computing, (2005) 219-226.
2. Trucco, E. ve Verri, A., Introductory Techniques For 3-D Computer Vision, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1998.
3. Kumar N., Belhumeur, P. N., Biswas A., Jacobs, D. W., Kress, W. J., Lopez, I. C., ve Soares, J. V., Leafsnap: A Computer Vision System For Automatic Plant Species Identification. In Computer Vision–ECCV, (2012) 502-516.
4. Oliver, N. M., Rosario, B., ve Pentland, A. P., A Bayesian Computer Vision System For Modeling Human Interactions. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions On, 22,8, 831-843.
5. Bar-Cohen Y., Artificial Muscles Using Electroactive Polymers (EAP): Capabilities, Challenges and Potential, 2005.
6. Mcquade, D., T., Pullen, A., E., ve Swager, T., M., Conjugated Polymer-Based Chemical Sensors, Chemical Reviews, 100,7 (2000) 2537-2574.
7. Low, L., Seetharaman, S., He, K. ve Madou, M. J. Microactuators Toward Microvalves For Responsive Controlled Drug Delivery, Sensors and Actuators B, 67,1-2 (2000) 149-160.
8. Lee, K., K., Munce, N., R., Shoa, T., Charron, L., G., Wright, G., A., Madden, J., D. ve Yang, V., X., D., Fabrication and Characterization Of Laser-Micromachined Polypyrrole-Based Artificial Muscle Actuated Catheters, Sensors and Actuators A: Physical, 153,2 (2009) 230-236.
9. Roentgen, W. C., About The Changes in Shape and Volume Of Dielectrics Caused By Electricity. Section III in G. Wiedemann (Ed.), Annual Physics and Chemistry, 11 (1880) 771-786.
10. Chen Z., Tan X. ve Shahinpoor M., Quasi-Static Positioning Of Ionic Polymer-Metal Composite (IPMC) Actuators, Proceedings Of The IEEE/ASME International Conference On Advanced Intelligent Mechatronics, (2005) 60-65
11. Kruusamäe K., Punning A., Aabloo A., ve Asaka K., Self-Sensing Ionic Polymer Actuators: A Review. Actuators, 4,1 (2015).
12. Sancak, C. ve İtik M., Elektroaktif Üç Katmanlı Konjuge Polimer Bir Eyleyicinin Tekrarlamalı (Repetitive) Kontrol ile Kuvvet Denetimi, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, Haziran 2015, İzmir.
13. Tsiakmakis, K., Brufau, J., Puig-Vidal, M., ve Laopoulos, T. Measuring Motion Parameters Of Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC) Actuators With A CCD



- Camera. IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Warsaw, Mayıs 2007, Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 1-6.
14. Chen, Z., Shen, Y., Xi, N., ve Tan, X., Integrated Sensing For Ionic Polymer–Metal Composite Actuators Using PVDF Thin Films. Smart Materials and Structures, 16,2 (2007) 262.
  15. Karimirad, F., Shirinzadeh, B., Yan, W., ve Fatikow, S., A Vision-Based Methodology To Dynamically Track and Describe Cell Deformation During Cell Micromanipulation. International Journal Of Optomechatronics 7,1 (2013), 33-45.
  16. Li, X., Zong, G., ve Bi, S., Development Of Global Vision System For Biological Automatic Micro-Manipulation System, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mayıs 2001, Seoul, IEEE International Conference On, 1 127-132
  17. Yu, S., ve Nelson, B. J., Microrobotic Cell Injection. Robotics and Automation, IEEE International Conference on Robotics and Automation, Mayıs 2001, Seoul, International Conference On, 1 620-625.
  18. Kumar, R., Kapoor, A., ve Taylor, R. H., Preliminary Experiments in Robot/Human Cooperative Microinjection, Intelligent Robots and Systems, Kasım 2003, Las Vegas, IEEE/RSJ International Conference On, 4 3186-3191.
  19. Matsuoka, H., Komazaki, T., Mukai, Y., Shibusawa, M., Akane, H., Chaki, A., ve Saito, M., High Throughput Easy Microinjection With A Single-Cell Manipulation Supporting Robot. Journal Of Biotechnology 116,2 (2005) 185-194.
  20. Ammi, M., ve Ferreira, A. Biological Cell Injection Visual and Haptic Interface. Advanced Robotics 20,3 (2006) 283-304.
  21. Wang, W. H., Liu, X. Y., ve Sun, Y., High-Throughput Automated Injection Of Individual Biological Cells. Automation Science and Engineering, 6,2 (2009) 209-219.
  22. Sun, Y., Wan, K. T., Roberts, K. P., Bischof, J. C., ve Nelson, B. J., Mechanical Property Characterization Of Mouse Zona Pellucida. Nanobioscience, (2003) 279-286.
  23. Adkins, J. E., ve Rivlin, R. S., Large Elastic Deformations Of Isotropic Materials. IX. The Deformation Of Thin Shells. Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London A, (1952) 505-531.
  24. Tan, Y., Sun, D., Huang, W., ve Cheng, S. H., Mechanical Modeling Of Biological Cells in Microinjection., Nanobioscience, (2008) 257-266.
  25. Lu, Z., Chen, P. C., Luo, H., Nam, J., Ge, R., ve Lin, W., Models Of Maximum Stress and Strain Of Zebrafish Embryos Under Indentation. Journal Of Biomechanics, 42,5 (2009) 620-625.

26. Han, M. L., Zhang, Y. L., Yu, M. Y., Shee, C. Y., ve Ang, W. T., Real-Time Modeling and Control Of The Circular Cell Membranes Strain, Robotics and Automation (ICRA), Mayıs 2011, Shanghai, IEEE International Conference On 4115-4120.
27. Diaz, J. F., Karzar-Jeddi, M., Olgac, N., Fan, T. H., ve Ergenc, A. F., Geometric Characterization Of Cell Membrane Of Mouse Oocytes For ICSI, Journal Of Biomechanical Engineering, 132,12 (2010) 121002.
28. Fisher R., Perkins S., Walker A. ve Wolfart E., Mean Filter, <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/mean.htm>, 19 Ekim 2015
29. Fisher R., Perkins S., Walker A. ve Wolfart E., Median Filter <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/median.htm> 19 Ekim 2015
30. Fisher R., Perkins S., Walker A. ve Wolfart E., Gaussian Smoothing, <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/gsmooth.htm>, 19 Ekim 2015
31. Kizilkaya A, Görüntü Bölütleme, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Pamukkale Üniversitesi, Denizli, 2008 176-177, [http://Akizilkaya.Pamukkale.Edu.Tr/B%C3%B6l%C3%BCm4\\_Goruntu\\_Isleme.Pdf](http://Akizilkaya.Pamukkale.Edu.Tr/B%C3%B6l%C3%BCm4_Goruntu_Isleme.Pdf) , 21 Ekim 2015
32. Otsu, N., A Threshold Selection Method From Gray-Level Histogram. IEEE Transactions On Systems, Man and Cybernetics, 9,1 (1979) 62-66.
33. Ohya, J., Shio, A., ve Akamatsu, S., Recognizing Characters in Scene Images. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16,2 (1994) 214-220.
34. Chow, C. K., ve Kaneko, T., Automatic Boundary Detection Of The Left Ventricle From Cineangiograms. Computers and Biomedical Research, 5,4 (1972) 388-410.
35. Davies, E., R., Computer and Machine Vision: Theory, Algorithms and Practicalities, Academic Press, First Edition, 91-96, United States Of America, 1990.
36. Fisher, R., Perkins, S., Walker, A. ve Wolfart, E., Adaptive Thresholding, <http://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/HIPR2/adpthrsh.htm>, 21 Ekim 2015
37. Tatiraju, S., ve Mehta, A., Image Segmentation Using K-Means Clustering, EM and Normalized Cuts. University Of California Irvine, 2008.
38. Roberts, L., G., Machine Perception Of Three-Dimensional Solids., Optical and Electro-Optical Information Processing, (1965) 159-197
39. Prewitt, J., Object Enhancemet and Extraction, Picture Processing and Psychopictorics, 10,1 (1970) 15-19.
40. Sobel, I., Camera Models and Machine Perception, No. AIM-121. Stanford Univ Calif Dept Of Computer Science, 1970.

41. Marr, D. ve Ellen H., Theory Of Edge Detection. Proceedings Of The Royal Society Of London B: Biological Sciences, 207,1167 (1980) 187-217.
42. Canny, J., A Computational Approach To Edge Detection. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 6 (1986) 679-698.
43. Kass, M., Witkin, A., ve Terzopoulos, D. Snakes: Active Contour Models. International Journal Of Computer Vision, 1,4 (1988) 321-331.
44. Şeker, D. Z., ve Eker, O., Aktif Kontur Modeller ve Düzey Kümesi Kullanarak Çizgisel Detayların Yarı Otomatik Olarak Çizilmesi, 10. Türkiye Harita Bilimsel ve Teknik Kurultayı, 2005
45. Gonzalez, R. C. ve Woods, R. C., Sayısal Görüntü İşleme, Ziya Telatar, Palme Yayıncılık, 2013
46. Hough, Paul VC. Method and Means For Recognizing Complex Patterns. No. US 3069654. 1962.
47. Duda, R. O., ve Hart, P. E., Use Of The Hough Transformation To Detect Lines and Curves In Pictures, Communications Of The ACM 15,1 (1972) 11-15.
48. Rosenfeld, A. ve Pfaltz, J. L., Sequential Operations In Digital Picture Processing. Journal Of The ACM (JACM), 13,4 (1966) 471-494.
49. [https://en.wikipedia.org/wiki/Connected-Component\\_Labeling](https://en.wikipedia.org/wiki/Connected-Component_Labeling), Connected Component Labeling, 19 Ekim 2015
50. Hu, M. K.. Visual Pattern Recognition By Moment Invariants. Information Theory, IRE Transactions On, 8.2 (1962) 179-187.
51. Wong, W. H., Siu, W. C., ve Lam, K. M., Generation Of Moment Invariants and Their Uses For Character Recognition. Pattern Recognition Letters, 16,2 (1995) 115-123.
52. Huang, Z., ve Leng, J., Analysis Of Hu 's Moment Invariants On Image Scaling and Rotation. Computer Engineering and Technology (ICCET), Nisan 2010, Chengdu, 2nd International Conference On. 7 476-480.
53. Golayoğlu A., En Küçük Kareler, Ders Notları, [http://www.baskent.edu.tr/~afet/dersler/genel\\_matematik\\_2/dersnotlari\\_listesi/DERS\\_%207.pdf](http://www.baskent.edu.tr/~afet/dersler/genel_matematik_2/dersnotlari_listesi/DERS_%207.pdf), 19 Ekim 2015
54. Mcculloch W. S. ve Pitts, W., A Logical Calculus Of The Ideas Immanent in Nervous Activity, The Bulletin Of Mathematical Biophysics 5,4 (1943) 115-133.
55. Zurada, J. M., Introduction To Artificial Neural Systems. St. Paul: West, 1992.
56. Rosa, J. L. ve Ebecken, N., F., Data mining for data classification based on the KNN-fuzzy method supported by genetic algorithm. High Performance Computing for Computational Science (2001) 126-136.

57. Paul E. Black, Euclidean Distance,  
<https://Xlinux.Nist.Gov/Dads//HTML/Euclidndstnc.Html>, 21 Ekim 2015
58. Coşkun M.Y. ve İtik M., Konjugetip Bir Elektro-Aktif Polimer Eyleyicinin Görüntü Tabanlı Kontrolü, Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu, Haziran 2015, İzmir, Bildiriler Kitabı, 810-815
59. Johnson K.L., Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1987.
60. Maugis D., Contact, Adhesion and Rupture Of Elastic Solids, Springer- Verlag, 2000.
61. Evans, E. and Skalak R., Mechanics and Thermodynamics Of Biomem- Branes, CRC, 1980.
62. Wan, K. T., Chan V., ve Dillard D.A., Constitutive Equation For Elastic Indentation Of A Thin-Walled Bio-Mimetic Microcapsule By An Atomic Force Microscope Tip, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 27 (2002) 241–248.
63. Wan, K.T. ve Liu K.K., Contact Mechanics Of A Thin-Walled Capsule Adhered Onto A Rigid Planar Substrate, Medical and Biological Engineering and Computing, 39 (2001) 605–608.
64. Dietrich C., Angelova M., and Pouligny B., Adhesion Of Latex Spheres To Giant Phospholipid Vesicles: Statics and Dynamics, J. Phys. II France, 7 (1997) 1651–1682.
65. Song, Z. H., Zhao, B., Zhu, Z. X., ve Mao, E. R. Research On Traffic Number Recognition Based On Neural Network and Invariant Moments, International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Ağustos 2007, Hong Kong, Machine Learning and Cybernetics International Conference On. 1 389-393.
66. Vinckier, A. ve Semenza, G., Measuring Elasticity Of Biological Materials By Atomic Force Microscopy. Febs Letters, 430,1 (1998) 12-16.
67. Domke, J., Dannöhl, S., Parak, W. J., Müller, O., Aicher, W. K., ve Radmacher, M., Substrate Dependent Differences in Morphology and Elasticity Of Living Osteoblasts Investigated By Atomic Force Microscopy. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 19,4 (2000) 367-379.
68. Khalilian, M., Navidbakhsh, M., Valojerdi, M. R., Chizari, M., & Yazdi, P. E. Estimating Young's Modulus Of Zona Pellucida By Micropipette Aspiration In Combination With Theoretical Models Of Ovum, Journal Of The Royal Society Interface, 7,45 (2010) 687-694.
69. Pfeifer, S. vd. In vitro maturation: a committee opinion. Fertility and Sterility 99,3 (2013) 663-666.

## ÖZGEÇMİŞ

Mustafa Hakan BOZKURT 1989, Gaziantep doğumludur. İlkokulu Gaziantep Akyol İlköğretim, ortaokulu Gaziantep Yüzüncü Yıl İlköğretim okulunda okumuş; lise öğrenimini Gaziantep Fen Lisesi 'nde tamamlamıştır. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi almış, 2012 yılında mezun olmuştur. 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü 'nde araştırma görevlisi olarak başladığı mesleğine halen devam etmektedir. İyi derecede İngilizce bilmektedir.