



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN YENİ BİR
ALT PİKSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Gökhan POYRAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Programı

NİSAN 2025

**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN YENİ BİR
ALT PİKSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ**

DOKTORA TEZİ

Ahmet Gökhan POYRAZ

(19331541006)

ORCID: 0000-0002-2369-8814

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Doktora Programı**

Danışman: Prof. Dr. Hakan GÜRKAN

ORCID: 0000-0002-7008-4778

İkinci Danışman: Prof. Dr. Ahmet Emir DİRİK

ORCID: 0000-0002-6200-1717

NİSAN 2025

BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 19331541006 numaralı Doktora Öğrencisi Ahmet Gökhan POYRAZ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN YENİ BİR ALT PİKSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Hakan GÜRKAN**
Bursa Teknik Üniversitesi

İkinci Danışman : **Prof. Dr. Ahmet Emir DİRİK**
Bursa Uludağ Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Adı SOYADI**
Bursa Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Adı SOYADI
..... Üniversitesi

Prof. Dr. Adı SOYADI
..... Üniversitesi

Teslim Tarihi :

Savunma Tarihi :



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, 123E343 numaralı TÜBİTAK – 1002 projesi ile desteklenmiştir.

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Ahmet Gökhan POYRAZ

İmzası:





Destekleyen Herkese İthafen

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması, endüstriyel görüntü işleme sistemlerinde ölçüm doğruluğunu artırmaya yönelik yeni yöntemler geliştirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Hassas ölçüm gerektiren otomotiv, tıp ve uzay sanayii gibi alanlarda kullanılan ölçüm sistemlerinde karşılaşılan mekanik ve yazılım tabanlı ölçüsel hataları en aza indirmeyi hedefleyen bu çalışma, uzun ve titiz bir araştırma sürecinin ürünüdür.

Bu sürecin her aşamasında desteklerini esirgemeyen danışmanlarım Prof. Dr. Ahmet Emir DİRİK ve Prof. Dr. Hakan Gürkan'a değerli bilgi ve yönlendirmeleri için en içten teşekkürlerimi sunarım. Ek olarak, akademik hayatım boyunca beni yetiştiren ve her zaman destek olan Ahmet Emir DİRİK'e en içten minnettarlığımı sunarım.

Çalışmam boyunca her zaman beni destekleyen, çalışma azmi veren, her an yanımda olan ve beni her zaman motive eden eşime, bu günlere gelmemi sağlayan aileme, desteklerinden ötürü Doğu Pres Otomotiv'e minnettarım.

Ayrıca, tez çalışmamın yürütülmesine katkıda bulunan TÜBİTAK'a (TÜBİTAK 1002 - Proje No: "123E343" Endüstriyel Görüntü İşleme Tabanlı Hassas Ölçüm Uygulamaları İçin Hata Düzeltme Algoritması) sağladıkları maddi ve teknik destek için teşekkür ederim. Bu çalışmanın, endüstriyel ölçüm sistemlerinde doğruluk ve güvenilirliği artırma noktasında önemli katkılar sağlayacağına inanıyorum.

Tezimin bilimsel ve teknik anlamda gelişmesinde katkısı olan tüm çalışma arkadaşlarıma ve sürecin her anında desteklerini hissettiren dostlarıma teşekkür ederim.

Nisan 2025

Ahmet Gökhan POYRAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	viii
KISALTMALAR	x
SEMBOLLER	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiv
ÖZET.....	xvi
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1 Piksel Tabanlı Yaklaşımlar	5
2.2 Alt-Piksel Tabanlı Yaklaşımlar	6
2.2.1 Aradeğerleme tabanlı yöntemler	6
2.2.2 Uydurma tabanlı yöntemler	7
2.2.3 Moment tabanlı yöntemler	8
2.2.4 Alan tabanlı ve diğer yöntemler.....	9
2.3 Alt-Piksel Kenar Konumunun Gösterimi	10
2.4 Ölçüm Metodolojisi.....	11
2.4.1 Dönüşüm faktörü.....	11
2.4.2 Ölçüm hatasının tahmin edilmesi.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1 Alt Piksel Sayma Tabanlı Çap Ölçüm Algoritması	16
3.1.1 Alan tabanlı çap ölçüm algoritması	16
3.1.2 Alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritması	18
3.1.3 Eşik değerlerinin otomatik olarak belirlenmesi	23
3.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı	30
3.2.1 Problem Tanımı.....	30
3.2.2 Dönüşüm faktörü ve çap arasındaki ilişki.....	34
3.2.3 Önerilen Yaklaşımlar	36
3.2.3.1 Dönüşüm faktörü tabanlı yaklaşım	37
3.2.3.2 Piksel tabanlı yaklaşım.....	41
3.3 Deney Düzenegi	44
3.4 Veri Seti.....	47
3.4.1 Alt-Piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritması için kullanılan veri seti	47
3.4.1.1 Sentetik veri seti	47
3.4.1.2 İş parçalarından oluşan veri seti	48
3.4.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı	49
3.4.2.1 Sentetik veri seti	49
3.4.2.2 Cam veri seti	50
3.4.2.3 Metal veri seti.....	51

3.5 Tekrarlanabilirlik ve Doğruluk	52
4. BULGULAR.....	54
4.1 Alt-Piksel Sayma Tabanlı Ölçüm Algoritması İçin Elde Edilen Sonuçlar	54
4.1.1 İç değerlendirme	54
4.1.2 Karşılaştırma	56
4.1.2.1 Sentetik görüntü testi	57
4.1.2.2 Gerçek iş parçalarıyla yapılan testler	58
4.1.2.3 Hız testi	62
4.1.2.4 Etki büyüklüğü ve performans karşılaştırması.....	66
4.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı	68
4.2.1 Kullanılan çap ölçüm algoritmaları.....	68
4.2.2 Cam referans testi.....	68
4.2.3 Metal parça testi	72
4.2.4 Karşılaştırma	76
5. TARTIŞMA	82
5.1 Alt-Piksel Sayma Tabanlı Çap Ölçüm Algoritması	82
5.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı	85
6. SONUÇ.....	89
KAYNAKLAR	92
ÖZGEÇMİŞ.....	100

KISALTMALAR

AWG	: Adaptive Weighting of Gradients
CMM	: Coordinate Measurement Machine
GD	: Gerçek Değer
mm	: Milimetre
OMH	: Ortalama Mutlak Hata
OMYH	: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata
px	: Piksel
SWG	: Squared Weighting of Gradients

SEMBOLLER

σ	: Standart sapma
μ	: Mikron
D_{est}	: Sorgu parçasının mm türünden tahmini değeri
D_i	: Referans parçaların milimetre türünden çap değerleri
E	: Sorgu parçasının gerçek değeri ile ölçüm değeri arasındaki fark
G_x, G_y	: Yönüne bağlı büyüklük değerleri
I_B	: İkili (0-1) görüntü
mm/px	: Milimetre bölü piksel
P_i	: Referans parçaların piksel türünden çap değerleri
P_q	: Sorgu parçasının piksel türünden ölçüm değeri
R	: Dönüşüm faktörü
th	: Eşik değeri
V_x, V_y	: En yüksek ve en düşük piksel değerleri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Otomatik Eşik Bulma Yöntemi	26
Çizelge 3.2 : Otomatik n Değerinin Seçimi	27
Çizelge 3.3 : Birleştirme Fonksiyonu	27
Çizelge 3.4 : Deneylerde kullanılan kenar tespit süzgeç tipleri. Süzgeçler dikey (y) yönde verilmiştir. x yönde, ağırlıklar transpoze edilmiştir.	29
Çizelge 3.5 : Sentetik görüntülerden elde edilen yüzdesel hata.	31
Çizelge 3.6 : Önerilen yaklaşımlar ve alt metotları.	37
Çizelge 4.1 : Önerilen yöntem için sentetik görüntülerden elde edilen ortalama mutlak hatalar(piksel).....	55
Çizelge 4.2 : Sentetik görüntüler için piksel türünden ortalama mutlak yüzdesel hata ve ortalama mutla hata sonuçları.....	57
Çizelge 4.3 : Çap ölçüm sonuçları için tekrarlanabilirlik aralığı (μm).....	59
Çizelge 4.4 : Karşılaştırma sonuçları. OMH: Ortalama mutlak hata (μm), OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata ($\times 10^5$), YSS: Yüzdesel standart sapma ($\times 10^4$). Ortalama süzgeç, karışım süzgeci olarak seçilmiştir.	60
Çizelge 4.5 : 500×500 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.)... 65	65
Çizelge 4.6 : 1000×1000 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).	65
Çizelge 4.7 : 2000×2000 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).	66
Çizelge 4.8 : 250×250 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.)... 66	66
Çizelge 4.9 : Hesaplama süreleri için Cohen's d mesafeleri.	67
Çizelge 4.10 : [38] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (GD: Gerçek Değer).	69
Çizelge 4.11 : [76] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. . (GD: Gerçek Değer).	69
Çizelge 4.12 : [79] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. . (GD: Gerçek Değer).	70
Çizelge 4.13 : [38] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).	70
Çizelge 4.14 : [76] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).	71
Çizelge 4.15 : [79] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).	72
Çizelge 4.16 : [38] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (GD: Gerçek Değer).....	73

Çizelge 4.17: [76] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (G.D: Gerçek Değer)	73
Çizelge 4.18 : [79] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (G.D: Gerçek Değer).....	74
Çizelge 4.19 : [38] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH:Ortalama mutlak yüzdesel hata).....	74
Çizelge 4.20 : [76] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH:Ortalama mutlak yüzdesel hata).....	75
Çizelge 4.21 : [79] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar.	75
Çizelge 4.22 : Önerilen yaklaşımlar için mutlak hatalar. ('+' işareti önerilen yaklaşımın hangi çap ölçüm algoritmasıyla birlikte kullanıldığını belirtmek için kullanılmıştır.).....	77
Çizelge 4.23 : Önerilen yaklaşımlar için mutlak yüzdesel hatalar. ('+' işareti önerilen yaklaşımın hangi çap ölçüm algoritmasıyla birlikte kullanıldığını belirtmek için kullanılmıştır.).....	77

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Alt-Piksel konumları [80].....	11
Şekil 2.2 : Dönüşüm faktörü hesaplama akış diyagramı	12
Şekil 3.1 : Önerilen çap ölçüm algoritması ana adımları.....	16
Şekil 3.2 : Alan tabanlı çap ölçüm algoritması.....	17
Şekil 3.3 : İş parçasının kenar bölgesindeki piksellerin yoğunluk değerleri. (a) Parçanın geçiş bölgesi, (b) Geçiş bölgesinin modellenmesi. Diskin iç kısmı, arka plan alanı ve geçiş bölgesi sırasıyla A, B ve C bölgelerinde gösterilmektedir.....	19
Şekil 3.4 : Piksel başına düşen ışığın miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri (ortadaki piksel için). Kenarın tam fiziksel konumları kırmızı çizgilerle belirtilmiştir.....	19
Şekil 3.5 : Görüntü için geçiş bölgeleri. Karanlık bölge disk iç kısmını gösterir. (a) İkili görüntü için eşik sınırı (b) Gri düzey görüntü için eşik sınırı (c) Gerçek kenar sınırı	20
Şekil 3.6 : Seçilen th_L ve th_H için tam ve geçiş piksellerinin yoğunluk değerleri.....	21
Şekil 3.7 : Önerilen alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm yöntemi	22
Şekil 3.8 : Nesne görüntüsü net odaklı (a) ve net olmayan odaklı (b). Kırmızı kutu ve ok, geçişte en yüksek farkı veren pikselleri göstermektedir.	24
Şekil 3.9 : Önerilen otomatik eşik belirleme yöntemi diyagramı.....	28
Şekil 3.10 : Sentetik görüntü için elde edilen yüzdesel hatalar.	31
Şekil 3.11 : Tek bir R değeri (5 mm) kullanıldığında ortaya çıkan hatanın çaplara göre değişimi.	33
Şekil 3.12 : Simülasyon, cam ve metal veri setinden elde edilen dönüşüm faktörü oranları. (a) Sentetik görüntülerden elde edilen R-Varsayımsal Çap eğrisi. (b) Metal ve cam veri setinden elde edilen R-Çap eğrisi.	35
Şekil 3.13 : Metot 1.1 için R seçim prosedürü. En yakın R değeri sorgulanan çap için seçilir.	39
Şekil 3.14 : Metot 1.2 için R tahmin prosedürü.....	40
Şekil 3.15 : Dönüşüm faktörü (R) tabanlı yöntem şeması.....	41
Şekil 3.16 : Metot 2.1 için D_{est} hesaplama yaklaşımı (Doğrusal aradeğerleme).	42
Şekil 3.17 : Metot 2.2 için D_{est} hesaplama prosedürü (Doğrusal tahminleme).	43
Şekil 3.18 : Piksel tabanlı yaklaşım şeması.....	44
Şekil 3.19 : Deney düzeneği ve düzeneden elde edilen örnek resim.....	45
Şekil 3.20 : Optik sensör sınıfı ve kamera görüş alanı.	46
Şekil 3.21 : Sentetik görüntüler. (a) Gauss süzgeç uygulanmamış. (b) 0.5 standart sapmalı gauss süzgeç uygulanmış. (c) 1 standart sapmalı gauss süzgeç uygulanmış.	48
Şekil 3.22 : Örnek iş parçası (a) ve deney düzeneğinden alınan görüntüsü (b).	49
Şekil 3.23 : Referans cam master ve elde edilen görüntüler	50
Şekil 3.24 : Metal iş parçaları (a) ve elde edilen görüntüleri (b).....	52

Şekil 3.25 : Doğruluk ve tekrarlanabilirlik terimleri. Yeşil merkez gerçek doğruyu, kırmızı çarpılar ise ölçülen değerleri göstermektedir.....	53
Şekil 4.1 : Otomatik n değeri belirleme algoritması kullanılarak elde edilen iç değerlendirme için ortalama mutlak hata değerleri.....	56
Şekil 4.2 : Gerçek parçalar için ortalama çap ölçüm sonuçları. (a) OMH: Ortalama mutlak hata, (b) OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata, (c) YSS: Yüzdesel standart sapma.	61
Şekil 4.3 : Farklı çözünürlüklerde önerilen algoritmanın hesaplama zamanları (a) 500×500 görüntüler için (b) 1000×1000 görüntüler için	63
Şekil 4.4 : Ortalama mutlak hata ve hesaplama sürelerine göre performans karşılaştırmaları.....	67
Şekil 4.5 : Önerilen algoritma ve tahmin algoritmalarının cam seti üzerine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hata.....	71
Şekil 4.6 : Önerilen yaklaşım ve çap ölçüm algoritmalarıyla metal sette elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata).....	76
Şekil 4.7 : Önerilen yaklaşımlar için performans göstergeleri. Grafiklerdeki y eksenini logaritmik olarak gösterilmiştir. (a) Cam set için mutlak hatalar, (b) Metal set için mutlak hatalar.	78
Şekil 4.8 : Önerilen yaklaşımlar için performans göstergeleri. Grafiklerdeki y eksenini logaritmik olarak gösterilmiştir. (a) Cam set için mutlak yüzdesel hatalar, (b) Metal set için mutlak yüzdesel hatalar.	79
Şekil 5.1 : Görüntülerin sınır bölgelerindeki geçişi. Kırmızı kutular arka plandan parçaya geçişi göstermektedir. (a) İş parçası görüntüsü (b) Sentetik görüntü (c) Sentetik görüntü($\sigma=1$)	84
Şekil 5.2 : Şekil 5.1’de gösterilen kırmızı kutudaki geçiş çizgileri.	85

ENDÜSTRİYEL GÖRÜNTÜ İŞLEME UYGULAMALARI İÇİN YENİ BİR ALT PİKSEL ÖLÇÜM YÖNTEMİ

ÖZET

Endüstriyel görüntü işleme sistemleri, otomotiv, tıp ve uzay sanayii gibi yüksek hassasiyet gerektiren alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Hassas ölçümler için telesentrik lensler gibi özel donanımlar kullanılsa da, farklı çaplara sahip parçaların aynı sistemle ölçülmesi durumunda mekanik ve yazılıma bağlı hatalar ortaya çıkabilmektedir. Bu tez, ölçüm doğruluğunu artırmak için alt piksel sayma tabanlı bir yöntem geliştirmekte ve dönüşüm faktörü ile piksel bazlı çap tahmini yöntemlerini önermektedir. Alt piksel sayma yöntemi, halka biçimli nesnelerin çap ölçümünü daha hassas hale getirmek için geliştirilmiştir. Bu yöntemde, görüntüdeki pikseller tam pikseller (nesnenin tamamen içinde bulunduğu pikseller) ve geçiş pikselleri (nesne ile arka plan arasındaki sınırda bulunan gri tonlamalı pikseller) olarak sınıflandırılmaktadır. Geçiş piksellerinin çap hesaplamasına olan etkisini artırmak amacıyla normalizasyon işlemi uygulanmaktadır. Çember alan denklemi ile çap hesaplanırken, gelişmiş bir eşikleme yöntemi kullanılarak gri tonlamalı piksellerin doğru şekilde ayrıştırılması sağlanmaktadır. Bununla birlikte, tezde önerilen dönüşüm faktörü tabanlı yöntem ve piksel bazlı çap tahmini yöntemi, farklı çaplara sahip nesnelerin yüksek doğrulukla ölçülmesini sağlamaktadır. Dönüşüm faktörü tabanlı yöntemde, bilinen referans parçalarının dönüşüm faktörü hesaplanarak çap tahmini gerçekleştirilirken, piksel bazlı yöntemde çap, doğrudan referans parçalarının piksel ölçümleri üzerinden tahmin edilmektedir. Çalışmanın motivasyonu, farklı boyutlara sahip parçaların çaplarının aynı mekanizma kullanılarak hassas bir şekilde ölçülmesi gereksiniminden ve her bir ölçüm türü için özel referans ölçü üretmenin getirdiği yüksek maliyetlerden kaçınma ihtiyacından kaynaklanmaktadır. Bu sorunları ele almak amacıyla, bu çalışma, belirli bir ölçüm algoritmasına bağımlı olmayan genelleştirilebilir bir yaklaşım önermektedir. Tez kapsamında, endüstriyel kameralar ve telesentrik lensler kullanılarak yapılan deneyler, önerilen yöntemlerin ölçüm hatalarını önemli ölçüde azalttığını göstermektedir. Başlangıçta 13–114 μm arasında değişen ölçüm hataları, önerilen yöntemler sayesinde 1–2 μm seviyesine düşürülmüştür. Alt piksel sayma yönteminin operasyonel hassasiyeti piksel boyutunun 1/20'si olarak belirlenmiş ve ortalama belirsizliği 1 μm olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, önerilen algoritma mevcut yöntemlere kıyasla %3–%10 daha yüksek doğruluk sağlamış ve hesaplama süresini %12,5 ila %35 oranında iyileştirmiştir. Bu çalışma, çap ölçümünde alt piksel hassasiyetinde doğruluk sağlamak için yenilikçi bir algoritma sunmakta ve mevcut literatüre önemli katkılar sağlamaktadır. Önerilen yöntemler, yalnızca birkaç bilinen referans parçası kullanılarak, kamera görüş alanındaki tüm parçaların yüksek doğrulukla ölçülebilmesini sağlamakta, hata oranlarını azaltarak ölçüm güvenilirliğini artırmaktadır.

Anahtar kelimeler: Alt-Piksel, Çap, Ölçüm, Endüstriyel görüntü işleme, Dönüşüm faktörü.

A NOVEL SUB-PIXEL MEASUREMENT METHOD FOR INDUSTRIAL IMAGE PROCESSING APPLICATIONS

SUMMARY

Industrial image processing systems are widely utilized in high-precision fields such as the automotive, medical, and aerospace industries. Although specialized equipment such as telecentric lenses is used for precise measurements, mechanical and software-related errors may still occur when measuring parts of different diameters within the same system. This dissertation proposes a subpixel counting-based method to enhance measurement accuracy, along with conversion factor-based and pixel-based diameter estimation methods. The subpixel counting method has been developed to improve the accuracy of diameter measurements for ring-shaped objects. In this method, image pixels are classified into full pixels (completely contained within the object) and transition pixels (gray-scale pixels located at the boundary between the object and its background). To enhance the contribution of transition pixels to diameter calculations, a normalization process is applied. The diameter is computed using the circle area equation, while a refined thresholding method ensures the accurate classification of gray-scale pixels. Furthermore, the conversion factor-based and pixel-based estimation methods proposed in this study enable the high-precision measurement of objects with varying diameters. In the conversion factor-based approach, the diameter is estimated by determining the conversion factor from known reference parts, while in the pixel-based approach, the diameter is directly estimated based on the pixel measurements of reference parts, eliminating the need for additional conversion steps. The motivation for this study arises from the need for accurate measurement of parts with different dimensions using the same mechanism while avoiding the high costs associated with producing dedicated reference gauges. To address these challenges, this research introduces a generalizable approach that operates independently of specific measurement algorithms. Experiments conducted using industrial cameras and telecentric lenses demonstrate that the proposed methods significantly reduce measurement errors. Initially ranging between 13–114 μm , measurement errors were reduced to 1–2 μm with the proposed approaches. The operational sensitivity of the subpixel counting method was determined to be 1/20th of the pixel size, with an average uncertainty of 1 μm . Additionally, the proposed algorithm achieved 3–10% higher accuracy compared to existing methods and improved computation time by 12.5–35%. This study introduces an innovative algorithm to achieve subpixel-level accuracy in diameter measurement, making a significant contribution to the existing literature. The proposed methods enable high-precision measurement of all parts within the camera's field of view using only a limited number of known reference parts, thereby reducing error rates and improving measurement reliability.

Keywords: Sub-Pixel, Diameter, Measurement, Industrial image processing, Conversion factor.

1. GİRİŞ

Makine görüşü uygulamaları, ilerleyen teknoloji ile giderek yaygınlaşmaktadır. Otomotiv, havacılık, gıda ve kereste gibi çeşitli sektörlerde uygulama alanı bulmaktadır. Özellikle otomotiv endüstrisinde, hız ve hassasiyet gereksinimleri nedeniyle kamera tabanlı kontrol sistemleri kaçınılmaz bir gereklilik haline gelmiştir. Endüstriyel sektördeki imalat tesisleri, yılda milyonlarca kez aynı ürünü tekrar tekrar üretme kapasitesine sahiptirler. Özellikle, çeşitli uygulama alanları bulunan halka tipi pul parçaları, birçok sektörde kendine yer bulmaktadır. Otomotiv endüstrisinde hassas toleransların önemli bir etken olduğu özellikle göz önünde bulundurulduğunda, seri kontrol yapabilme yeteneğine sahip kamera sistemlerine önemli bir talep bulunmaktadır. Kaynak araştırması bölümü, bu sistemler tarafından çap ölçümü için kullanılabilecek görüntü işleme algoritmalarının kapsamlı bir açıklamasını sunmaktadır. Hassasiyet açısından etkili yöntemlerin mevcut olmasına rağmen, mevcut yöntemler hesaplama zamanı maliyetine odaklanmamıştır. Bir kamera sisteminin yılda milyonlarca parçayı incelediği senaryoda, ölçüm hızında sadece %1'lik bir artışın imalat fabrikasının işletme maliyetlerini önemli ölçüde azaltma potansiyeli bulunmaktadır. Bu tezin birinci motivasyonu, endüstriyel uygulamalara kolayca ve etkili bir şekilde entegre edilebilecek bir çap ölçüm algoritması geliştirmektir. Ayrıca, bileşenin kenar bölgesinden gri tonlu piksellerin çap hesabına belirli oranlarda dahil edilmesi, önerilen yaklaşımın yeniliğini vurgulamaktadır. Bu bilgiler ışığında, önerilen algoritmanın endüstriyel açıdan önemi ve uygulanabilirliği açıkça ortaya çıkmaktadır. Literatürde, “edge” ifadesi ayırık ve kenar olarak iki farklı şekilde de ifade edilmiştir. Bu tez kapsamında ayırık yerine kenar ifadesi kullanılmıştır. Ayrıca “parçanın sınırı” yerine “parçanın kenarı” ifadesi tercih edilmiştir.

Bu tezin ikinci motivasyonu ise karşılaşılan bir diğer sorundan ötürü ortaya çıkmıştır. Endüstriyel görüntü işleme uygulamalarında ölçüm yapılmadan önce makineye doğru değer öğretilmelidir. Görüntü işleme algoritmaları ölçüm sonucu olarak piksel değeri üretmektedir. Piksel değerinin gerçek ölçüm birimine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem dönüşüm faktörü kullanılarak yapılmaktadır. Kaynak araştırması kısmında

bu kısım detaylıca açıklanacaktır. Dönüşüm faktörünün hesaplanabilmesi için ise değeri hassas olarak bilinen bir referans parçasına ihtiyaç duyulmaktadır. Referans parçası kullanılarak 1 pikselin kaç mm'ye denk geldiği hesaplanmaktadır. Daha sonrasında ölçümü yapılan bütün parçaların gerçek ölçüsü, bu değer kullanılarak hesaplanmaktadır. Ancak hassas ölçüm uygulamalarında özellikle parçaların çapı küçüldüğünde bazı hatalar ortaya çıkmaktadır. Örneğin 5 mm çapa sahip bir pul parçasının ölçümünü yapan bir sistem oluşturulduğunu varsayalım. Bu parça için 5 mm çapında özel olarak referans parçası ürettirilmelidir. Ardından dönüşüm faktörü hesaplanabilir. Ancak aynı sistemle 10 mm çapındaki bir parça ölçülmek istendiğinde 5mm referansı kullanılarak elde edilen dönüşüm faktörü kullanıldığı zaman ortaya ölçüm hatası çıkmaktadır. Bu sebeple 10 mm için de yeni bir referans parçası ürettirilmedi. Bu durum bütün farklı çapa sahip iş parçaları için geçerlidir. Referans parça ürettirmek toleransları dar parçalar için yüksek maliyete sebep olmaktadır. Bazı durumlarda da özellikle parçaların çok küçük (1-2 mm gibi) olduğu durumlarda referans parçası ürettirilememektedir. Bu durumda en yakın referans kullanılmakta ve ortaya çıkan hataya razı olunmaktadır. Tam olarak bu noktada tezin ikinci motivasyonu ortaya çıkmıştır. Çaplardan bağımsız bir dönüşüm faktörü hesaplanabilirse bu problem ortadan kalkacak ve gereksiz yapılan maliyetlerin önüne geçilecektir.

Makine görüşü üzerine çeşitli çalışmalar literatürde bulunmaktadır [1]. Bazı araştırmacılar, meyve ve sebzelerin kalitesine dayalı olarak otomatik kalite kontrol sistemleri geliştirmişlerdir [2,3]. Bazıları ise farklı aydınlatma koşulları altında robot kolları kullanarak sınıflandırma uygulamaları gerçekleştirmişlerdir [4]. Görsel olarak kontrol edilen parçaları ayrıştırmanın yanı sıra, birçok uygulamada kamera tabanlı ölçümler yapılmaktadır. Birçok araştırmacı endüstriye yönelik ölçüm uygulamaları gerçekleştirmiştir. Bazı araştırmacılar, mil ve dişli ölçümü için çeşitli yöntemler geliştirmişlerdir. Gadelmawla, dişli ölçümü için bir program geliştirmiş ve bu programın istenen ölçümleri yüksek hassasiyetle gerçekleştirdiğini belirtmiştir [5]. Duan ve diğ., mekanik parçaların ölçümü için yüksek hassasiyetli bir kenar bulma yöntemi önermiştir [6]. Du ve diğ., makine görüşü kullanarak bir dişli ölçüm yöntemi önermiş ve dişlinin tüm özelliklerini ölçebilecek bir ölçüm metodolojisi önermişlerdir [7]. Liu ve diğ. çalışmasında ise mil boyutu bir aydınlatma sistemi kullanılarak ölçülmüştür [8]. Bazı araştırmacılar, uzunluk ölçümü için alt piksel tabanlı yaklaşımlar

kullanmışlardır. Guo, mini freze takımlarını telesentrik lensler ve arka aydınlatma kullanarak ölçmüş, alt piksel düzeyine ulaşmak için gri tonlu histogram ve eşikleme yöntemlerini benimsemiştir [9]. Geliştirdikleri algoritma ve mekanik sistem kullanarak yaklaşık 1 μm belirsizlikle ölçümler elde etmişlerdir. Chen ve diğ., lojistik kenar modellerini kullanarak alt piksel düzeyinde boyutsal ölçümler yapmışlardır [10]. Flesia, makine görüşü uygulamaları için bir çizgi ölçüm algoritması önermiştir [11]. Wang ve diğ., basılı devre kartlarını ölçmek için alt piksel tabanlı bir ölçüm sistemi geliştirmişlerdir [12]. [13-16] çalışmaları, parçaların boyutlarını ölçmek için makine görüşü tabanlı sistemleri kullanmışlardır.

Bu tez kapsamında iki yöntem önerilmiştir. İki yöntem de endüstriyel görüntü işleme alanına yenilik getirmektedir. Her iki yöntemde de üretilen pul tipli parçaların çaplarının ölçümü üzerine araştırma ve geliştirme yapılmıştır. İlk önerilen yöntem alt-piksel tabanlı bir çap ölçüm algoritması iken ikinci yöntem, mevcut çap ölçüm algoritmalarını kullanarak oluşan hatayı giderecek bir düzeltme algoritmasıdır. Tezin birinci kısmında, endüstriyel makine görüşü uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir çap ölçümü algoritması sunulmaktadır. Önerilen yöntem, geleneksel alan tabanlı yaklaşıma gri seviye piksel bilgisini dahil ederek çap ölçümlerinin doğruluğunu artırmaktadır. Bu amaçla, nesnenin kenarında bulunan gri piksellerin yoğunluk değerlerine doğrusal normalleştirme tekniği uygulanmaktadır. Bu çalışmada kullanılan deneysel veri seti, hem bilgisayar tarafından oluşturulan sentetik görüntüleri hem de endüstriyel bir ortamda elde edilen gerçek iş parçası görüntülerini içermektedir. Önerilen yöntem, türev tabanlı bir yaklaşımı kullanarak otomatik bir eşik değeri hesaplama prosedürü sunmaktadır. Eşik değerlerinin hesaplanması, görüntü içindeki en yüksek geçiş noktalarının belirlenmesine dayanmaktadır. Önerilen yaklaşımın etkinliğini değerlendirmek için önce içsel bir karşılaştırma yapılmaktadır. Daha sonra, doğruluk, tekrarlanabilirlik ve hesaplama süresi değerlendirmesine odaklanarak kapsamlı bir kaynak taraması yapılmaktadır.

Tezin ikinci kısmında, çap ölçüm algoritmaları ve kurulu kamera sistemi tarafından oluşturulan ölçüm hatalarını ortadan kaldırmak için iki yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşımlar, tek bir dönüşüm faktörü kullanıldığında ortaya çıkan hatayı azaltmak için önerilmektedir. Özellikle, çap değeri azaldıkça ve tolerans değerleri daraldıkça, bu hata daha belirgin hale gelmektedir. Önerilen yaklaşımlar, bilinmeyenleri bilinen referanslar kullanılarak tahmin etme prensibine dayanarak önerilmektedir. Bu

yaklaşımlar, tek bir dönüşüm faktörü (R) kullanıldığında ortaya çıkan hatayı azaltmak için iki farklı formda önerilmektedir: dönüşüm faktörü tabanlı ve piksel tabanlı. Yaklaşımı uygulamak için öncelikle bir çap ölçüm algoritması belirlenmelidir. Ardından, en az iki bilinen referans örneğe ihtiyaç duyulmaktadır. Referansların çapları ve dönüşüm faktörleri, seçilen çap ölçüm algoritmasını kullanarak piksel değerlerinden hesaplanmaktadır. İlk yaklaşımda, bilinmeyen dönüşüm faktörleri bilinen dönüşüm faktörleri kullanılarak tahmin edilir ve ardından çap (mm) değeri hesaplanır. İkinci yaklaşımda, gerçek çap ölçümü mm cinsinden bilinen çap değerleri (px) kullanılarak tahmin edilir. Tahmin süreci için aradeğerleme ve uyumlu model tabanlı modeller oluşturulmaktadır. Literatürde çeşitli tahmin yöntemleri bulunmasına rağmen, hiçbir çalışma halka tipi parçaların çapını doğru bir şekilde tahmin etmemektedir. Literatürde dönüşüm faktörünü detaylıca irdeleyen ve dönüşüm faktörünü tahmin eden bir çalışma bulunmamaktadır. Bu açıdan önerilen yaklaşım ve dolayısıyla tez çalışması yenilik içermektedir. Önerilen bu çalışma ile, referans parçalarının üretim maliyeti açısından büyük ölçüde azaltılacak ve endüstriyel kamera ölçüm sistemlerinin ölçüm doğruluğu artacaktır. Ayrıca, sadece birkaç referans parça kullanılarak, kameranın görüş alanına uygun olan tüm çaplar önerilen yaklaşımı kullanarak yüksek hassasiyetle ölçülebilir hale gelecektir. Bu durum önerilen yaklaşımın endüstriyel uygulanabilirliğini net bir şekilde göstermektedir. Bu tezin akademik katkısı özet maddeler halinde şu şekilde sıralanabilir:

- Endüstriyel görüntü işleme alanında kullanılabilecek literatürdeki en hızlı ve başarı olarak en iyi doğruluğa sahip bir çap ölçüm algoritmasının önerilmesi
- Alt-piksel tabanlı kenar tespiti kullanılarak yapılan çap ölçüm yöntemlerine ek, yeni bir alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritmasının geliştirilmesi
- Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan, aynı kameralı sistem üzerinde bilinen referans parçalarıyla farklı boyutlarda çapların alt-piksel seviyesinde ölçülmesi için yeni bir yaklaşım geliştirilmesi

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

Tez kapsamında iki farklı yöntem önerilmektedir. Her iki yöntem de endüstriyel görüntü işlemede kullanılan çap ölçüm algoritmalarıyla ilgilidir. İlk yöntem alt-piksel tabanlı bir çap ölçüm algoritması olmasına karşın; ikinci yöntem, çap ölçüm algoritmalarını kameralı sistemden gelen hataları gidererek iyileştirmektedir. Her iki yöntemde de ortak olan kısımlar çap ölçüm algoritmaları olduğundan ilk olarak piksel ve alt-piksel tabanlı yaklaşımlar anlatılacaktır. Ardından alt-piksel metodu ve ölçüm metodolojisi anlatılacaktır.

2.1 Piksel Tabanlı Yaklaşımlar

Endüstriyel görüntü işleme, teknolojinin gelişimi ile birlikte otomotiv, gıda ve ilaç endüstrileri gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Günümüzde, dar toleranslara sahip seri üretilen parçaların ölçüm kontrolleri, hız ve hassasiyet avantajı sayesinde kamera kontrol sistemleri tarafından gerçekleştirilmektedir. Parçalarda yüksek ölçüm doğruluğunu sağlamak için kenar noktalarının doğru bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Algılanan kenar noktaları kullanılarak istenilen ölçümler gerçekleştirilebilir. Kenar noktaları genellikle piksel düzeyinde ve alt piksel düzeyinde belirlenebilir. Sobel, Robert ve Canny algoritmaları literatürde en yaygın olarak kullanılan piksel düzeyinde kenar tespit yöntemleridir [17]. Robert operatörü, kenarları bulmak için bölgesel fark operatörünü kullanır, hızlıdır ancak gürültüye duyarlıdır. Sobel gürültüyü azaltabilir ancak kenar tespiti için daha az etkilidir. Canny yöntemi gürültüye dayanıklıdır ve yüksek performansla kenarları tespit edebilir, ancak işleme süresi daha uzundur. Son zamanlarda, bazı araştırmacılar klasik yöntemleri geliştirerek kenar tespiti üzerine çalışmalar yapmışlardır [18-23]. Malamas ve diğ. [24], endüstriyel görüntü işleme alanındaki makine görüşü uygulamalarını ve araçlarını kapsamlı bir şekilde ele almıştır. Bazı araştırmacılar piksel düzeyinde ölçüm yaparak endüstriyel makine görüşü uygulamaları geliştirmişlerdir. Gadelmawla, GearVision ve MISTVision sistemleri ile dişli ölçümü için piksel düzeyinde ölçüm yöntemini benimsemiştir [25].

2.2 Alt-Piksel Tabanlı Yaklaşımlar

Piksel düzeyinde yapılan ölçümler, özellikle toleranslar dar olduğunda yetersiz kalabilir. Bu sorunu aşmak için araştırmacılar, alt piksel tabanlı yaklaşımlar önermişlerdir. Alt piksel tabanlı yöntemler genellikle 4 ana kategoriye ayrılabilir: aradeğerleme, uyum, moment tabanlı ve bölgesel alan tabanlı [26-28].

2.2.1 Aradeğerleme tabanlı yöntemler

Aradeğerleme tabanlı yöntemler, orijinal görüntüde gri dağılımı aradeğerleme yaparak alt piksel konumlarını bulur. İnterpolasyon tabanlı yöntemlerin hesaplama süresi daha az olmasına rağmen, gürültüye çok duyarlıdır. Fabijanska [29], alt piksel tabanlı yöntemleri detaylı bir şekilde incelemiş ve makine görüşü temelli endüstriyel uygulamalar için yeni bir aradeğerleme tabanlı kenar tespit yöntemi önermiştir. Seo [30], piksel değerlerinin toplamını kullanarak alt piksel konumu belirleme yöntemi önermiştir. Fabijanska, gürültü içeren görüntülerin alt piksel düzeyinde kenarlarını bulmak için Gauss fonksiyonunun özelliğini kullanmıştır [31,32]. Bu yöntemde öncelikle piksel düzeyinde kenarlar Sobel yöntemiyle belirlenir. Daha sonra, türevsel aradeğerleme kullanılarak alt piksel düzeyinde konumlar bulunur. Breder ve diğ., genel B-spline modelini benimseyerek alt piksel düzeyinde kenar tespiti yapmıştır [33]. Önerdikleri değerlere göre, yöntemin gürültülü görüntülerde iyi performans gösterdiği belirtilmiştir.

Bazı araştırmacılar aradeğerleme yaklaşımını kullanarak makine görüşü için ölçüm algoritmaları oluşturmuşlardır. Peng ve diğ., döner tablayı geçen yuvarlak tip parçaların boyut ve görsel kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [34]. Piksel düzeyindeki pozisyonları bulmak için morfolojik kenar tespit algoritması kullandıktan sonra, halka tipi parçaların ölçüleri, Kübik çizgisel aradeğerleme tabanlı alt piksel algoritması ile ölçülmüştür. Li, küçük parça ölçümleri yapmak için bi-lineer aradeğerleme tabanlı alt piksel ölçüm algoritması önermiştir [35]. Yazar öncelikle piksel düzeyinde kenarları Canny algoritması ile bulmuş, ardından alt piksel konumlarını bulmak için iki satır aradeğerleme algoritması geliştirmiştir. Son olarak, çap, en küçük kareler uydurma yöntemi kullanılarak ölçülür. Çoğu yöntemde, araştırmacılar önce piksel düzeyinde kenarları bulur, ardından alt piksel düzeyinde kenarları odaklanırlar. Diğer yöntemlerin aksine, Yan, önce çözünürlüğü artırmak için aradeğerleme uygulaması, ardından lineer aradeğerleme kullanarak alt piksel tabanlı kenarı belirleyerek ölçümü

yapmıştır [36]. Son yıllarda, Haibing, yüzük tipi parçaların çapının ölçümü için kübik doğrusal aradeğerleme tabanlı bir alt piksel ölçüm algoritması önermiştir [37]. Telesentrik lensler ve aydınlatma kullanmasalar da, 0,18 mikrometre kare hata elde etmişlerdir. Grompone ve diğ., alt-piksel kenar tespiti için Canny yöntemini geliştirerek konumları alt-piksel seviyesinde bulmayı amaçlamışlardır [38]. Önerdikleri yöntemde, aradeğerleme, sürekli bir eğri sağlamak için 3 komşu değer üzerinde karesel aradeğerleme kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Oluşan eğrinin en yüksek noktası alt-piksel konumları verir.

2.2.2 Uydurma tabanlı yöntemler

Uydurma tabanlı yöntemler gri geçiş bölgesini, seçilen kenar modeline göre uydurarak alt piksel kenar pozisyonlarını bulmayı amaçlar. Gürültüye daha dayanıklı olmasına rağmen, uyum yaklaşımının daha fazla hesaplama süresine ihtiyacı vardır. Bazı araştırmacılar Gauss uyum tabanlı yöntemi benimsemiştir. Ye ve diğ., alt piksel seviyesinde oldukça keskin kenarları tespit edebilen bir yöntem önermiştir [39]. Önerdikleri yöntemde, bir bulanık kenar modeli benimsenmiş ve kare hata tabanlı Gauss uydurma algoritması tercih edilmiştir. Shang ve diğ., alt piksel pozisyonlarını bulmak için türe bağımlı türev yönü Gauss uydurma algoritmasını benimsemiştir [40]. Uyum için farklı modeller uygulayan araştırmacılar da vardır. Zhao ve diğ., alt piksel konumlarını bulmak için Facet modelini kullanmışlardır [41]. Yöntem ilk olarak Canny kenar tespiti yöntemiyle piksel düzeyinde kenar tespiti yapar ve ikinci olarak 5x5 komşuluk verilerini 2-Boyutlu Facet modeline uydurur. Ardından, alt piksel tabanlı konumlar polinom denkleminin birinci ve ikinci türevlerine göre belirlenir. Sun ve diğ., alt-piksel kenar tespiti için ters tanjant kenar modelini kullanmışlardır [42]. Önerdikleri yöntemde, önce kenarlar piksel düzeyinde Sobel yöntemiyle tespit edilir, ardından alt-piksel düzeyde çift yüzey uydurması ile çizgiler tespit edilir. Seo, AWG ve SWG tabanlı iki farklı alt-piksel tespit yöntemi önermiştir [43]. Başka bir çalışmada, Akınlar ve Topal, alt-piksel seviyede EDCircle (bağlantılı kenar segmentleri kullanan kenar tespit edici yöntem) tabanlı daire bulma yöntemini benimsemek için uyum yaklaşımını kullanmışlardır [44].

Uydurma tabanlı (fitting) yöntem, işlem maliyetinin yüksek olması nedeniyle endüstriyel kamera ölçümlerinde doğrudan tercih edilmese de, birçok araştırmacı hız ve hassasiyeti geliştirmek için farklı yöntemler önermiştir. Hagara ve Kulla [45],

endüstriyel ölçümlerde kullanılmak üzere alt piksel tabanlı bir uygunluk algoritması geliştirdiler. Geliştirdikleri yöntem, hata fonksiyonunu kullanarak $\pm 0,05$ piksel hassasiyetine ulaşabileceklerini gösterdi. Xu, görüntü üzerinde ölçümler yapmak için bir alt piksel konumlandırma yöntemi önerdi [46]. Zhang, ikinci türev ve eğri uyumlu tabanlı alt-piksel kenar tespit yöntemi önerdi [47]. Önerilen yöntem ile kalınlık ölçümü uygulaması gerçekleştirildi. Moru ve Diego, dişli kamera kalite kontrolü için bir telekentrük lensli robotik sistem kullandılar [48]. Geliştirdikleri algoritma içinde, 0,06 piksel hassasiyetine ulaşabilen daire uyumlu tabanlı bir algoritma kullandılar. Duan, mekanik parçaların boyutlarını belirlemek için Gauss integral model tabanlı alt-piksel kenar tespit yöntemini kullandı [49]. Önerdikleri yöntemde, ilk olarak, görüntüdeki gürültü bulanıklık uygulanarak giderildi. Ardından, piksel düzeyinde kenar tespiti ile kenar noktaları kabaca belirlenerek Gauss uydurma yapıldı. Li, milli parçaların geometrik ölçümlerini yapmak için bir makine görüşü tabanlı sistem kullandı [50]. Görüntüdeki gürültü bir dalgalet temizleme süzgeci ile giderildikten sonra, Canny kenar tespiti yöntemi uygulandı. Daha sonra, kare hata regresyon uyumu yapıp geometrik ölçümler elde edildi. Flesia, alt-piksel seviyesinde ölçüm için Gauss uyumlu tabanlı yöntemi benimsedi [51]. Chen, lojistik kenar modeli ile alt-piksel seviyesinde ölçüm yaptı [52].

2.2.3 Moment tabanlı yöntemler

Moment tabanlı yöntemler, gri veya mekansal integral yöntemini analitik olarak kenar pozisyonunu bulmak için kullanırlar ve en çok tercih edilen alt-piksel bulma yöntemidir. Gürültüye karşı dirençli olması nedeniyle avantajları vardır, ancak uygulanabilir modelin seçilmesi kısmi bir dezavantaj olarak kabul edilebilir. En çok kullanılan moment tipi olan Zernike moment, Ghosal ve diğ. tarafından önerilmiştir [53]. Önerdikleri yöntem, hem pikselin yönünü hem de alt konumunu matematiksel olarak bulabileceğini göstermiştir. Birçok araştırmacı, Zernike moment kullanarak alt-piksel kenar tespiti yöntemi önermiş veya Zernike moment geliştirmiştir. Peng, Zernike moment uygulamadan önce bitişik kenar noktalarına aradeğerleme uygulamıştır [54]. Zixin, alt-piksel pikselleri hızlı bir şekilde algılamak için Zernike moment yönteminden önce sınır çıkarma için otsu eşikleme yöntemini kullanmıştır [55]. Mai ve Ning, kenar tespiti için Zernike momenti 9×9 maske ile kullanmışlardır [56]. Yu, Zernike momenti otsu eşikleme ile geliştirmiştir [57]. Wei ve Zhao, kenar tespiti için geliştirilmiş morfolojik yöntemle piksel düzeyinde kenar tespitinden sonra

Zernike momenti tercih etmişlerdir [58]. Zhang ve diğ., kenar tespiti için psödo-Zernike momentini benimsemişlerdir [59]. Zhang ve diğ., Zernike momenti kullanarak mikropartiküllerin alt-piksel seviyesinde merkez konumunu bulmuşlardır [60]. Ying-Dong ve diğ., aynı performansla sadece Zernike momentini hızlandırmak için piksel düzeyinde kenar tespiti yapar [61].

Bazı araştırmacılar, alt-piksel seviyesinde kenar tespiti için Zernike moment yerine özel momentleri tercih etmişlerdir. Wang, alt-piksel seviyesinde kenar tespiti için mekansal moment kullanmıştır [62]. Araştırmacı, moment tipinin basit ve zaman kazandırıcı olacağını belirtmiştir. Bin, alt-piksel kenar konumlandırma yöntemi için Ortogonal Fourier-Mellin Moment (OFMM) tabanlı bir yöntem önermiştir [63]. Zunfeng ve diğ., OFMM yöntemini Sobel ile hızlandırarak farklı bir kenar tespit yöntemi benimsemişlerdir [64]. Sun ve diğ., alt-piksel seviyesinde kenar bulma için gri momenti tercih etmişlerdir [65].

Gürültüye karşı dirençli olması nedeniyle, moment tabanlı yöntemler endüstriyel kamera tabanlı ölçümlerde sıkça kullanılır. Da ve Zhang, geliştirdikleri moment tabanlı yaklaşımla işleme süresinde büyük bir kazanım sağladıklarını belirtmişlerdir [66]. Gester ve Simon, önerdikleri mekansal moment yaklaşımını Gauss bulanıklığı ile incelemişlerdir [67]. Elde edilen sonuçlara göre, 1/10 piksel hassasiyetine ulaşılabilceğini belirtmişlerdir. Wu, yuvarlak tip PCB işaretlerinin hatalarını bulmak için moment tabanlı alt-piksel yaklaşımı kullanmıştır [68]. Baozhang ve Yanping, makine görüşü uygulaması için moment tabanlı bir yaklaşım benimsemişlerdir [69]. Yang ve diğ., dış çap ölçüm sistemi oluşturmak için Zernike moment tabanlı bir yaklaşımı tercih etmişlerdir [70]. Yöntemde, Zernike moment ile kenar tespiti yapıldıktan sonra kare hata fonksiyonu ile uyum sağlanmıştır. Xie, endüstriyel alt-piksel kenar tespiti için Zernike momenti kullanmıştır [71]. Li, dişli parçaların ölçümlerini yapmak için Zernike moment tabanlı bir yöntem önermiştir [72].

2.2.4 Alan tabanlı ve diğer yöntemler

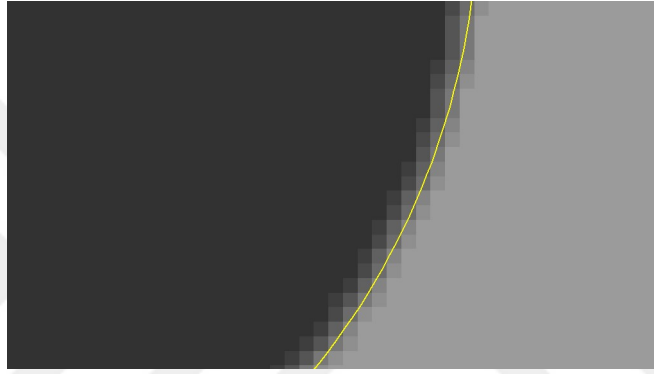
Alt-piksel seviyesinde kenar tespiti ve ölçüm yapabilmek için, bazı araştırmacılar geleneksel yöntemlerden farklı yaklaşımlar benimsemişlerdir [73]. Chu ve diğ., alt-piksel seviyesinde ölçüm algoritması önermişlerdir [74]. İlk olarak, piksel düzeyinde kenarlar Sobel yöntemiyle belirlenir, ardından piksel yoğunluklarının integraline dayalı bir yöntemle alt-piksel konumlar belirlenir. Eşik değerini belirlemek için hem

hata fonksiyonunu hem de özel kalibrasyon prosedürünü uygulamışlardır. Önerilen yöntem, Sobel kenar tespit yöntemine oldukça bağımlıdır ve hata oranı 45 derece açılarda artar. Önerilen yöntemin başarısı, gerçek değerler yerine tekrarlanabilirlik testleriyle ölçülmüştür. Hagara, kenar tespitinin wavelet dönüşümü ile alt-piksel düzeyde bulunabileceğini göstermiştir [75]. Trujillo ve diğ., bölgesel yoğunluğa dayalı bir yaklaşıma dayanan bir yöntem önermişlerdir ve geliştirdikleri yöntem gürültüye oldukça dayanıklıdır [76]. Zhu ve Peng, alan tabanlı yaklaşımı geliştirmiş ve bir ölçüm algoritması oluşturmuşlardır [77]. Poyraz ve diğ., endüstriyel makine görüşü uygulamaları için alan tabanlı çap ölçüm algoritması önermişlerdir [78]. Bu yöntem, nesneye ait tüm pikselleri değerlendirerek alan tabanlı yöntem kullanarak dairesel görüntülerin yarıçapını belirler. Algoritma ayrıca istenmeyen gürültüleri ortadan kaldırmak için bazı ön işlemleri içerir. Bu tez çalışmasında sunulan ve Literatürde yer almış bir diğer çalışma ise [79] numaralı referanstan ulaşılabilir. Bu çalışma tezin ilk önerdiği yöntem olmakla birlikte alan tabanlı yaklaşımlar içerisinde yer almaktadır. Kısaca görüntünün geçiş kısımlarındaki gri seviye pikselleri, dairenin alan hesabına belirli oranda katarak alan hesabını daha hassas hale getirmektedir.

2.3 Alt-Piksel Kenar Konumunun Gösterimi

Ölçümün hassas ve doğru olabilmesi için hem donanımın hem de yazılımın yüksek bir seviyede olması gereklidir. Genellikle, ölçülecek parçanın görüntüsündeki kenar noktaları ölçülmeye başlanmadan önce tespit edilir. Ardından, bu kenar noktaları birleştirilerek ölçüm sonucu hesaplanır. Ölçüm doğruluğu için, genellikle Sobel, Robert, Canny gibi piksel seviyesinde noktaları bulan yöntemlere ek olarak, alt-piksel seviyesinde çalışan yöntemler de oldukça önemlidir. Kameranın görüntüyü oluşturma sürecinde en büyük rolü sensörler üstlenmektedir. Sensörler, görevi gereği kendisine gelen ışığı elektrik akımına çevirmektedirler. Fakat bu duruma bir de pozlama süresi ve odak açıklığı eklendiğinde sensör üzerine düşen ışık miktarı değişmektedir. Değişen ışık miktarına göre pikselin değeri 0-255 arasında bir yoğunluğu vermektedir. Bu yoğunluklar birleşerek görüntüyü oluşturmaktadır. Kenar bulma algoritmaları genel olarak piksellerin yoğunluk değerlerinin değişimini kullanarak sınır bölgelerini belirlemektedirler. Birçok uygulamada piksel seviyesinde kenarların bulunması yeterli olmaktadır. Ancak hassasiyet gerektiren uygulamalarda piksel seviyesindeki kenar noktaları yeterli olmamaktadır. Bir iş parçasının görüntüsünün kameralı bir sistemden

alındığını varsayalım. Bu parça görüntüsü yakınlaştırıldığında, sınır bölgelerinde bir geçiş olduğu gözlemlenecektir (Şekil 2-1). Bu geçişin sebebi sınır bölgelerindeki kamera sensörlerinin üzerine düşen ışık miktarlarının değişken olmasıdır. Bu değişkenlik, parçadan gelen gölge ve ışık kaynağından gelen ışık miktarına bağlı olarak gözlemlenir. Ancak piksel olarak net bir sınır görülmesi de aslında parçanın pikselin içerisinde geçtiği bir nokta bulunmaktadır. Alt piksel tabanlı kenar bulma algoritmaları bu noktaların tespiti üzerine çalışmaktadırlar. Şekil 2.1’de bir iş parçasının kameralı bir sistemle elde edilen görüntüsü verilmiştir. Sarı çizgiyle ise parçanın gerçek sınırı gösterilmiştir. Sarı çizgi aynı zamanda alt-piksel kenar noktalarını da göstermektedir.



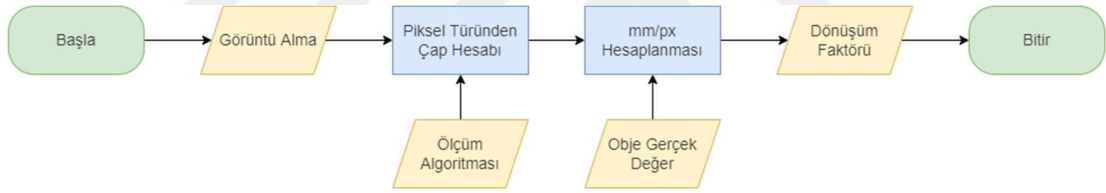
Şekil 2.1 : Alt-Piksel konumları [80]

2.4 Ölçüm Metodolojisi

2.4.1 Dönüşüm faktörü

Ölçüm yöntemlerinde kullanılan algoritmadan bağımsız olarak, piksel ölçümlerinden gerçek dünya birimlerine geçiş yapılırken bir dönüşüm faktörü kullanılır. Jamie ve diğ. [34], beton yüzey ölçüm tekniklerini araştırdı ve ölçüm testlerinde bir dönüşüm faktörü kullandılar. Zhou ve diğ. [81], geliştirdikleri makine görüşü sistemlerinde gerçek ölçümleri hesaplamak için bir dönüşüm faktörü kullandılar. Erin ve diğ. [70], damla boyutlarını karşılaştırdı ve çalışmalarında gerçek boyutu tahmin etmek için bir dönüşüm faktörü kullandılar. Bu çalışmaların yanı sıra, birçok diğer araştırma çalışması da bir dönüşüm faktörü kullanmaktadır [82-85]. Dönüşüm faktörünün kullanılmasının temel nedeni, piksel değerlerinden gerçek değerlere geçişi sağlamaktır. Bu geçiş her çap boyutu için farklılık gösterir. Rakhmanov’a göre, dönüşüm faktörü iç ve dış çaplar için aynı değildir [86]. Dış çap için faktörün iç çap için faktörden daha büyük olduğunu bulmuşlardır. Her çap için farklı bir dönüşüm

faktörü olduğundan, her çap için ayrı bir referans parçasına ihtiyaç duyulur. Referans parçalar genellikle hata miktarını en aza indirmek için çok sıkı toleranslarla özel olarak üretilirler. Dar toleranslara sahip referans kalıpların (seramik, metal, plastik, cam vb.) üretilmesi önemli maliyetler gerektirdiğinden, her boyut için yeniden üretmek maliyet ve zaman açısından zorluklar yaratabilir. Bunun yerine, benzer boyutlar için mevcut referanslar kullanılır. Ancak, benzer bir boyuttaki bir referansın dönüşüm faktörünü kullanırken bazı ölçüm hataları olabilir. Ölçüm toleranslarının geniş olduğu durumlarda, bu hata ihmal edilebilir olabilir. Ancak, hassas ölçüm uygulamalarında, hatta en küçük bir iyileşme bile sistemin ve algoritmanın performansını artırarak başarıyı artıracaktır. Kamera ölçüm sistemlerinde, iş parçalarının istenilen ölçümlerini hesaplamak için öncelikle ölçüm algoritması belirlenmesi gerekmektedir. Ardından, elde edilen görüntüler işlenir ve istenilen ölçümler piksel birimleri cinsinden hesaplanır. Bu sistemlerde hesaplanan değerler piksel birimleri üzerinden olduğundan, bunların gerçek dünya birimlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Yani, bir pikselin kaç birimlik bir mesafeye denk geldiği belirlenmesi gerekmektedir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2 : Dönüşüm faktörü hesaplama akış diyagramı

Bir pikselin kaç milimetre olduğunu bulmak için, R , dönüşüm faktörü, aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R = \frac{\text{Gerçek Çap (mm)}}{\text{Ölçülen Çap (piksel)}} \quad (2.1)$$

Dönüşüm faktörünü hesaplamak için bilinen bir değere sahip bir referans ile kalibre gereklidir. Referans masterları (seramik, cam veya metal) genellikle özel olarak üretilir. Alternatif olarak, bir standart iş parçası, referans masterı olarak belirlenmek için bir koordinat ölçüm makinesi (CMM) kullanılarak ölçülebilir. Ancak, bu durumda, hem iş parçasından hem de CMM'den gelen belirsizlikler R değerini olumsuz etkiler. Bu nedenle, genellikle ilk seçenek tercih edilir. Referans master kaynaklı hata genel olarak ihmal edilebilir düzeyde olduğundan, R değeri büyük ölçüde ölçülen çap ile ilişkilidir. Bu tezde, çap ölçümüne odaklandığından, geri kalan

kısımında ölçüm olarak sadece çap bilgisi kastedilecektir. Piksel biriminde hesaplanan çap değerini gerçek dünya birimlerine dönüştürmek için, piksel birimlerindeki çap değeri R değeri ile çarpılır. Elde edilen değer, gerçek (mm) ölçüm sonucudur.

Ölçüm oranı R değerinin hesaplanabilmesi için, boyutu bilinen bir referans ölçü gereklidir. Bu ölçüler genellikle seramik, cam veya metal gibi malzemelerden üretilmekte ve özel olarak imal edilmektedir. Alternatif olarak, bir standart iş parçası bir koordinat ölçüm cihazı (CMM) ile ölçülerek referans değeri belirlenebilir. Ancak bu durumda, hem iş parçasından hem de CMM ölçümünden kaynaklanan belirsizlikler R değerini olumsuz etkileyebilir. Bu nedenle, genellikle ilk yaklaşım tercih edilmektedir. Referans ölçünün hata payının ihmal edilebilir olduğu varsayıldığında, R değeri büyük ölçüde ölçülen çapa bağlı olacaktır. Bu çalışma çap ölçümlerine odaklandığından, metin boyunca “ölçüm” terimi özellikle “çap” anlamında kullanılacaktır. Piksel cinsinden elde edilen çap değerinin gerçek dünya birimlerine çevrilebilmesi için, piksel tabanlı çap değeri R değeri ile çarpılır. Sonuç olarak, çap milimetre (mm) cinsinden ifade edilir.

Bir sistemde n adet referans parçası bulunduğunda, referans parçalarının çap değerleri $D=[D_1, D_2, \dots, D_n]$, bunların piksel tabanlı ölçüm değerleri $P=[P_1, P_2, \dots, P_n]$ ve Denklem 2.1 kullanılarak elde edilen dönüşüm faktörleri $R=[R_1, R_2, \dots, R_n]$ olarak ifade edilir. Burada, alt indis i , ilgili referans parçasının indeksini belirtmektedir. Her bir referans parçası için dönüşüm faktörü R_i , aşağıdaki formüle göre hesaplanır:

$$R_i = \frac{D_i}{P_i} \quad (2.2)$$

Çapı bilinmeyen bir sorgu parçası geldiğinde, milimetre cinsinden tahmini çap (D_{est}), sorgu parçasının piksel tabanlı çapı (P_q) kullanılarak Denklem 2.2 ile hesaplanır:

$$D_{est} = R_i \cdot P_q \quad (2.3)$$

Eğer sorgu parçasının yaklaşık çapı biliniyorsa, çap bakımından en yakın referans parçasının R_i değeri kullanılabilir. Eğer yaklaşık çap bilinmiyorsa, i değişkeni 1 ile n arasında değişirken herhangi bir R_i değeri veya ortalama R değeri seçilebilir. İlgili i indeksi için revize edilmiş denklem aşağıdaki gibi verilir:

$$D_{est} = \frac{D_i}{P_i} \cdot P_q \quad (2.4)$$

Ölçüm sonucu ile gerçek değer arasındaki hatayı nicelleştirmek amacıyla hata (E), Denklem 2.5'te tanımlanmıştır. Burada D_q , sorgu parçasının gerçek çapını temsil etmektedir:

$$E = \left| D_q - \frac{D_i}{P_i} \times P_q \right| \quad (2.5)$$

2.4.2 Ölçüm hatasının tahmin edilmesi

Ölçüm hataları bazen kökeninden bağımsız olarak tahmin edilebilir. Literatürde ölçümlerdeki hataları tahmin edip düzeltmek için birçok çalışma bulunmaktadır. Su ve diğ. [84], bilgisayar görüşü uygulamaları için bir sinir ağı tabanlı yöntem önermiştir. Modellerini hataları azaltmak için kullanmışlardır. Jianming ve diğ. [85], tasarladıkları sistemde silindir çapını ölçmek için bir hata düzeltme yöntemi önermişlerdir. Parçanın yüksekliğinden kaynaklanan hatayı azaltmak için bir model oluşturmuşlardır. Rakhmanov ve diğ. [86], akışkan kamera sisteminde silindir çapını ölçmek için bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri yöntemde hataları önceden tahmin ederek başarıyı artırmışlardır. Zhang ve diğ., bir bölümdeki halkaları ölçerek ağaç yaşını ölçen bir algoritma önerilmiştir [87]. Ayrıca, geometrik bozulmaları önlemek için en küçük kareler polinom uyumlaması kullanarak bir hata düzeltme modeli oluşturmuşlardır. Hariadi ve diğ. [88], eğitim adımıyla farklı çaplar kullanarak kalibrasyon çapının ölçüm sonucu üzerindeki etkisini inceledi ve bir çap hata tahmini önermişlerdir. Benzer çalışmayı Bu ve Guo çalışmasında da incelemiştir [89].

Bu tez çalışmasının ikinci önerisinde, çap ölçüm algoritmalarından ve kurulu kamera sisteminden kaynaklanan ölçüm hatalarını ortadan kaldırmak için iki yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşımlar, tek bir dönüşüm faktörü kullanıldığında ortaya çıkan hatayı hafifletmek için önerilmiştir. Özellikle çap değeri azaldıkça ve tolerans değerleri daraldıkça, bu hata daha belirgin hale gelmektedir. Basitçe söylemek gerekirse, önerilen yaklaşımlar, bilinen referansları kullanarak bilinmeyenleri tahmin etme prensibine dayanmaktadır ve tek bir dönüşüm faktörü (R) kullanıldığında ortaya çıkan hatayı hafifletmek için iki farklı şekilde önerilmektedir: dönüşüm faktörü tabanlı ve piksel tabanlı. Yaklaşımı uygulamak için öncelikle bir çap ölçüm algoritması belirlenmelidir. Daha sonra en az iki bilinen referans örneği gereklidir. Referansların çap ve dönüşüm faktörleri, seçilen çap ölçüm algoritması kullanılarak piksel değerlerinden hesaplanır. İlk yaklaşımda, bilinmeyen dönüşüm faktörleri bilinen

dönüşüm faktörleri kullanılarak tahmin edilir, ardından çap (mm) değeri hesaplanır. İkinci yaklaşımda ise, gerçek çap ölçümü mm cinsinden bilinen çap değerleri (px) kullanılarak tahmin edilir. Tahmin süreci için aradeğerleme ve uydurma dayalı modeller oluşturulur. Literatürde tahmin için çeşitli yöntemler bulunsa da, hiçbir çalışma doğrudan halka tipi parçaların çapını doğru şekilde tahmin etmemiştir. Literatürde böyle bir çalışmanın olmaması, hatanın önemli ölçüde azaltılmasıyla birlikte, çalışmanın yenilikçi yönünü ortaya koymaktadır. Bu önerilen çalışma ile, referans kalıpların üretim maliyeti açısından büyük ölçüde tasarruf sağlanacak ve endüstriyel kamera ölçüm sistemlerinin ölçüm hassasiyeti artacaktır. Ayrıca, sadece birkaç referans parça kullanılarak, kameranın görüş alanına uygun olan tüm çaplar önerilen yaklaşımı kullanarak yüksek hassasiyetle ölçülebilir. Bu özellik, önerilen yaklaşımın endüstriyel uygulanabilirliğini göstermektedir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Alt Piksel Sayma Tabanlı Çap Ölçüm Algoritması

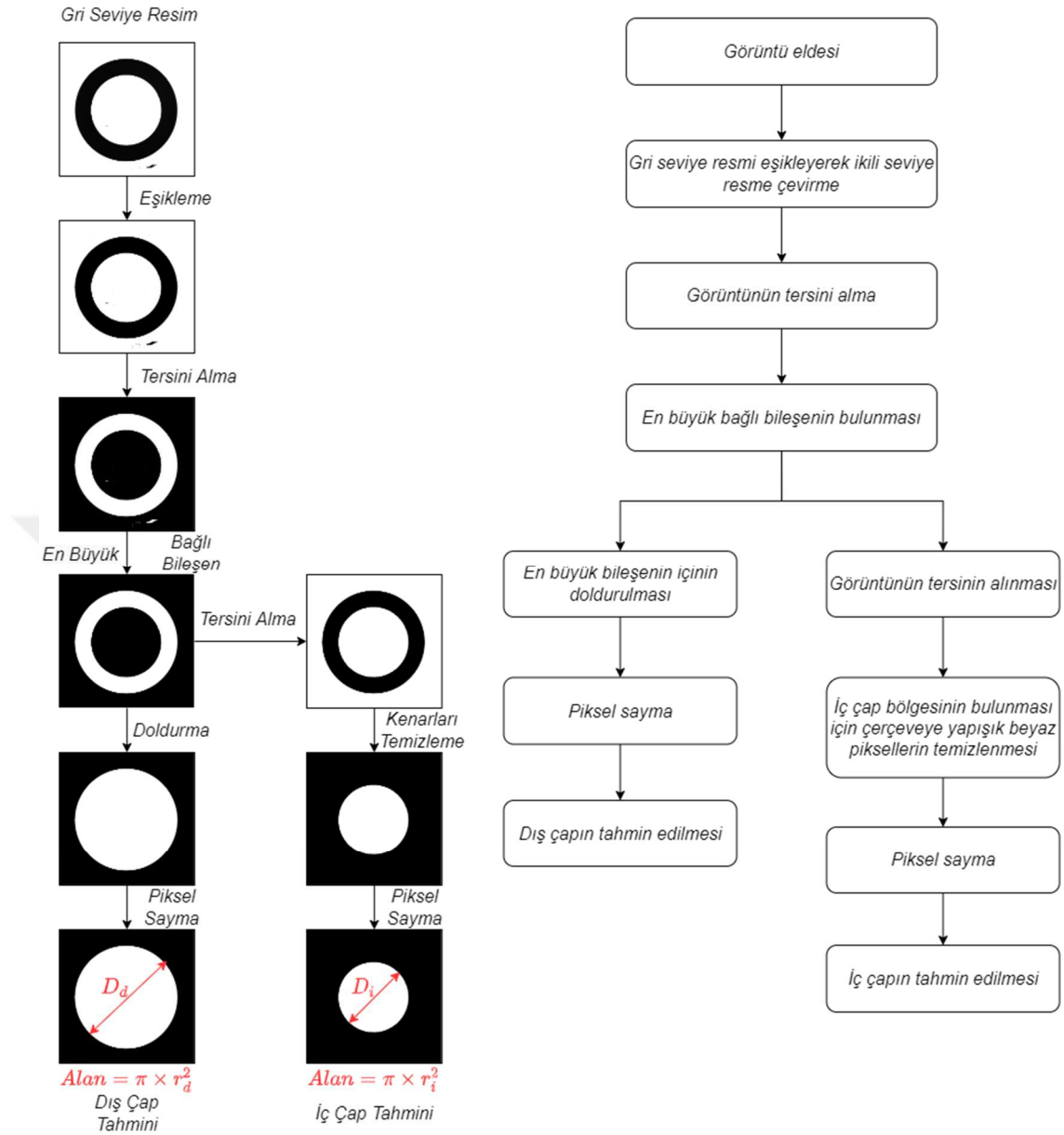
Kaynak araştırması kısmında belirtildiği gibi, alt piksel yöntemleri dört gruba ayrılabilir: uyumlamaya dayalı, aradeğerlemeye dayalı, moment tabanlı ve bölgesel alan tabanlı. Bu tezde birinci olarak önerilen algoritma, bölgesel alan tabanlı yöntemler kategorisine girmektedir. Önerilen algoritma, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi üç ana bileşenden oluşmaktadır. İlk kısım, ön işleme teknikleri ile birlikte gelen bölgesel alan tabanlı çap ölçümünün temel yöntemini içermektedir. Bölgesel alan tabanlı çap ölçüm algoritması hakkında daha fazla ayrıntıya [60] çalışmasından ulaşılabilir. Bu yöntemin kısa bir açıklaması ayrıca aşağıdaki bölümde verilmektedir. İkinci kısım, eşik değerlerin sağlam bir şekilde belirlenmesine odaklanmaktadır. Algoritmanın bu bölümü, doğru ölçümlerin sağlanması için güvenilir bir şekilde eşik değerleri belirlemeyi amaçlamaktadır. Son bölüm, alt piksel sayım yöntemi ile ilgilidir ve detaylı bir algoritmik açıklama ile sunulmaktadır. Bu bölüm, çap ölçümünde alt piksel hassasiyetine ulaşma sürecini detaylandırmaktadır.



Şekil 3.1 : Önerilen çap ölçüm algoritması ana adımları

3.1.1 Alan tabanlı çap ölçüm algoritması

Alan tabanlı çap ölçümü algoritmalarında, tüm piksellerin alan hesaplamasına katkıda bulunması nedeniyle görüntüdeki herhangi bir gürültünün giderilmesi kritiktir. Endüstriyel ortamlarda, toz, kir ve yağ gibi çeşitli kaynaklarla görüntüye gürültü girebilir ve bu da ölçüm sonuçlarının doğruluğunu etkileyebilir. Bu zorluğun üstesinden gelmek için [60], Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bir alan tabanlı çap ölçüm algoritması önermiştir.



Şekil 3.2 : Alan tabanlı çap ölçüm algoritması

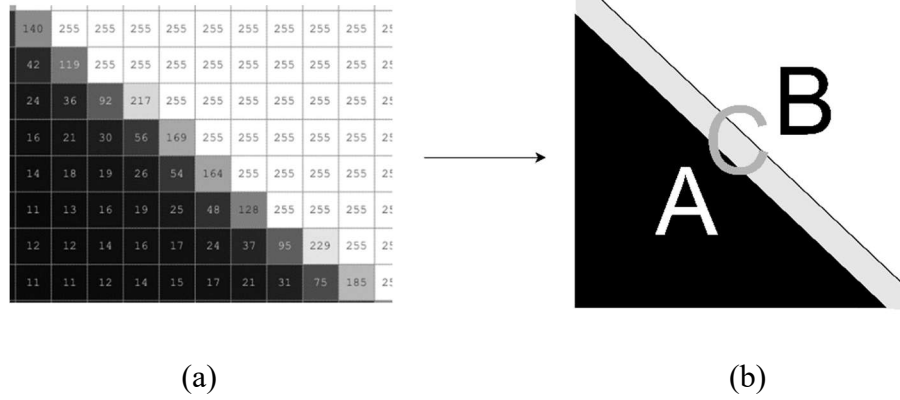
Her görüntü parçacığı, yakalanan görüntüde siyah bir piksel olarak kendini gösterir ve ölçüm camındaki yağ, toz veya istenmeyen kir gibi küçük koyu alanlar oluşturur. Bu görüntü kalıntılarından etkisini ortadan kaldırmak için, iş parçası nesnesinin en büyük olduğu varsayımıyla bütün bağlı bileşen tabanlı bir teknik kullanılmaktadır. Giriş görüntülerinin eşiklenmesini takiben, her bir nesne bütün bağlı bileşen yaklaşımı kullanılarak tanımlanır. Ardından, küçük nesneler görüntüden kaldırıldıktan sonra iç ve dış çapları belirlemek için doldurma, ters çevirme ve kenar temizleme işlemleri uygulanır. Son olarak, Denklem 3.1'i kullanarak, kalan nesnenin çapı (D olarak gösterilir) ikili görüntü (I_B) kullanılarak hesaplanır.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_B(i, j)}{\pi}} \quad (3.1)$$

Çap ölçümlerinde alt-piksel hassasiyetine ulaşmak için alan tabanlı bir yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşım sayesinde daha hassas ölçümler gerçekleştirilebilir ve iş parçasındaki bölgesel değişkenliğin etkisi en aza indirilir. Ayrıca, algoritmanın ön işleme aşaması, temelde ham görüntüde bulunan istenmeyen gürültüleri kaldırmaya odaklanmaktadır. Bu çalışmada gri seviye bir kamera kullanıldığından, RGB renk kanallarından gri seviyelere dönüşüme ihtiyaç duyulmamıştır. Bununla birlikte, araştırmacılar renkli bir kamera seçerlerse, ölçümleri gerçekleştirmeden önce görüntüyü gri seviyelere dönüştürebilirler. Ayrıca, araştırmacılar, isteklerine ve tercihlerine göre özelleştirebilecekleri ve gürültü ortadan kaldırma gibi ek ön işleme adımlarını algoritma içine entegre edebilecekleri esnekliğe sahiptir.

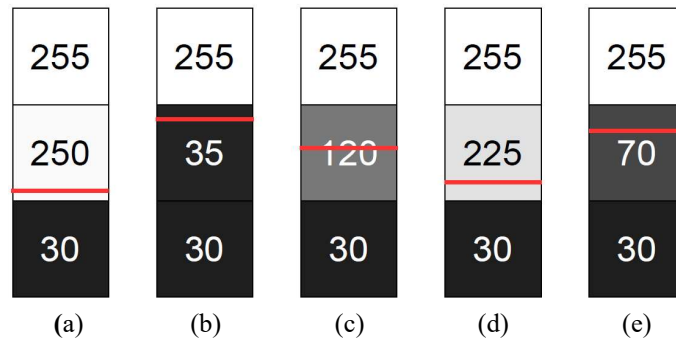
3.1.2 Alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritması

Önceki bölümde açıklanan alan tabanlı ölçme yöntemi, sadece ölçülen nesnenin gölgesini analiz etmeye odaklanmaktadır. Alan, gölgeye ait piksellerin sayısını sayarak belirlenir. Ancak, bu yöntem belirli varsayımlara dayanmaktadır. Bu varsayımlar, iş parçasının yüzeyindeki tüm piksellerin siyah olması gerektiğini, arka plandaki tüm piksellerin ise tamamen beyaz olması gerektiğini belirtir. Bununla birlikte, uygulamada sıklıkla gözlemlenen bir durum, iş parçasının kenar sınırlarında belirli bir geçişin olduğudur. Bu geçiş, kullanılan ekipman veya hassas odaklama elde edilememesi gibi faktörlerden kaynaklanan bir bulanıklık etkisiyle oluşabilir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 : İş parçasının kenar bölgesindeki piksellerin yoğunluk değerleri. (a) Parçanın geçiş bölgesi, (b) Geçiş bölgesinin modellenmesi. Diskin iç kısmı, arka plan alanı ve geçiş bölgesi sırasıyla A, B ve C bölgelerinde gösterilmektedir.

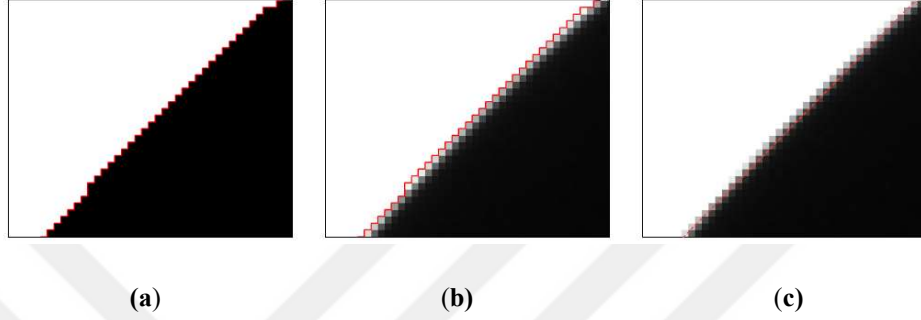
Bu geçiş analiz edildiğinde, iş parçasının merkezi bölgesinin bir araya yakın daha koyu yoğunluk değerlerine sahip olduğu, dış bölgenin ise benzer yoğunluk değerleri ile daha açık görüldüğü ortaya çıkmaktadır (Şekil 3.3b). Geçiş bölgesinde, her pikselin üzerine düşen ışık miktarı tarafından etkilenen yoğunluk değerlerinde bir gri tonlaması bulunmaktadır (Şekil 3.4). Bu nedenle, sabit bir eşik değeri uygulandığında, piksellerin kenar bölgelerindeki istatistiksel bilgi azalır. Önerilen yöntemin temel konsepti, bu gri piksellerden elde edilen bu bilgiyi çap ölçüm sürecine dahil etmektir. Bu şekilde, önerilen yöntem, özellikle geçiş bölgelerinin varlığında çap ölçümlerinin doğruluğunu artırmayı amaçlamaktadır.



Şekil 3.4 : Piksel başına düşen ışığın miktarına bağlı olarak yoğunluk değerleri (ortadaki piksel için). Kenarın tam fiziksel konumları kırmızı çizgilerle belirtilmiştir.

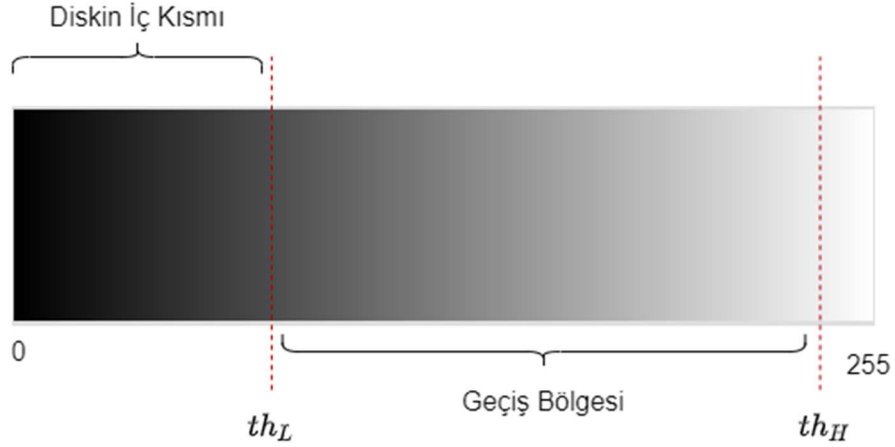
Önerilen yöntemin temel amacı, geçiş bölgelerini görüntüye dahil etmek ve böylece genel alan hesaplamasını artırmaktır. Gri bölgelerdeki pikselleri nispeten değişken bir ağırlıkla nesnenin alanının hesaplanmasına dahil ederek, daha doğru ölçümlerin elde edilebileceği öngörülmektedir. Şekil 3.5, aynı görüntünün yakınlaştırılmış versiyonunda kenar bölgelerini göstermektedir. İlk görüntüde (a), eşik değeri 250

olarak ayarlanmış bir eşikle işlenmiş görüntüde kenar bölgeleri vurgulanmıştır. İkinci görüntüde (b), eşik sınırının gri pikselleri içerdiği görülebilir. Ancak, yüksek veya düşük bir eşik değeri seçmek gri bölgedeki istatistiksel bilginin kaybolmasına neden olacaktır. Gerçek sınır, (c) görüntüsünde tasvir edildiği gibi gri ve siyah pikselleri içermelidir. Bu bilgiyi ölçüm yöntemine dahil ederek, daha kesin ve güvenilir sonuçlar elde edilebilir.



Şekil 3.5 : Görüntü için geçiş bölgeleri. Karanlık bölge diskin iç kısmını gösterir. (a) İkili görüntü için eşik sınırı (b) Gri düzey görüntü için eşik sınırı (c) Gerçek kenar sınırı

Bu yöntemin temsili (Şekil 3-3b) üzerinde, Kısım A, kameradaki iş parçasının iç kısmının gölgesine, Kısım B, iş parçasının dış kısmına ve Kısım C, iş parçasının kısmen gölge düşen bölgesine karşılık gelir. Dolayısıyla, iş parçasının kenar bilgisini içeren gri pikselleri belirlemek için iki farklı eşik değeri uygulanması gerekmektedir (Şekil 3.6). İlk eşik değeri, th_L , bir pikselin "tam" bir piksel olup olmadığını belirlemek için kullanılır. İkinci eşik değeri, th_H , ölçümden dış gürültüyü ayırmak ve iş parçası ile arka plan arasında net bir ayrım sağlamak amacıyla kullanılır. Gerçek alan, A ve C bölgelerindeki piksellerin sayısının oransal bir oranında birleştirilmesiyle belirlenebilir. Önerilen yöntemde, alan hesaplaması şu şekilde ifade edilebilir: $Alan = Tam\ Pikseller + Geçiş\ Pikseller \times t$. C bölgesindeki her piksele, bu pikselin genel alan hesaplamasına katkısını temsil eden belirli bir t değeri atanmıştır.



Şekil 3.6 : Seçilen th_L ve th_H için tam ve geçiş piksellerinin yoğunluk değerleri

Alan hesaplanırken, gri bölgedeki pikseller geçiş pikselleri olarak kabul edilir ve alt eşik (th_L) altındaki pikseller, genel alanın bir tam pikseli olarak toplam alanın üzerine eklenir. Çünkü gri alandaki pikseller sadece iş parçasının bir kısmını içerir (Şekil 3.4). $I_{M \times N}$ gri seviye görüntü matrisi, I_F ikili tam piksel ve I_{TP} gri tonlamalı (0-255) geçiş pikselleri olmak üzere aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$I_F(i, j) = \begin{cases} 1, & I(i, j) < th_L \\ 0, & other \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N \quad (3.2)$$

$$I_F(i, j) = \begin{cases} 1, & I(i, j) < th_L \\ 0, & other \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, M, j = 1, 2, \dots, N \quad (3.3)$$

Geçiş pikselleri, yoğunluk değerine göre 0 ile 1 arasında bir değere normalize edilir (Denklem 3.4). Hesaplanan değer, pikselin doluluğunu verir. Ayrıca pikselin alan hesaplamasına ne oranda eklenmesi gerektiğini gösterir. Başka bir deyişle, Denklem 3.4, bir gri pikselin bir tam piksele ne kadar yüzde karşılık geldiğini belirlemek için kullanılabilir.

$$\hat{I}(i, j) = 1 - \frac{I_{TP}(i, j) - th_L}{th_H - th_L} \quad (3.4)$$

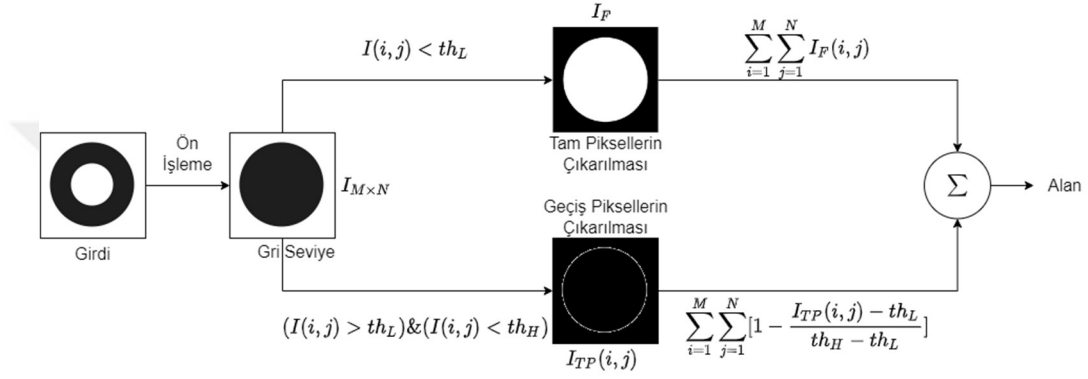
Alan toplamı için, tam piksellerin ve geçiş piksellerinin toplamı Denklem 3.5'te ifade edilir:

$$Alan = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N I_F(i, j) + \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \hat{I}(i, j) \quad (3.5)$$

Piksel türünden çap değeri Denklem 3.6 kullanılarak hesaplanır.

$$D = \sqrt{\frac{4 \times \text{Alan}}{\pi}} \quad (3.6)$$

İş parçasının tahmini alanı, alt eşik (th_L) altındaki toplam piksel sayısı ile üst eşik th_H üstündeki piksellerin normalleştirilmiş toplamının eklenmesiyle bulunur. Alt piksel sayım yönteminin algoritma diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7 : Önerilen alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm yöntemi

Önerilen alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritması aşağıdaki görüntü işleme adımlarından oluşmaktadır:

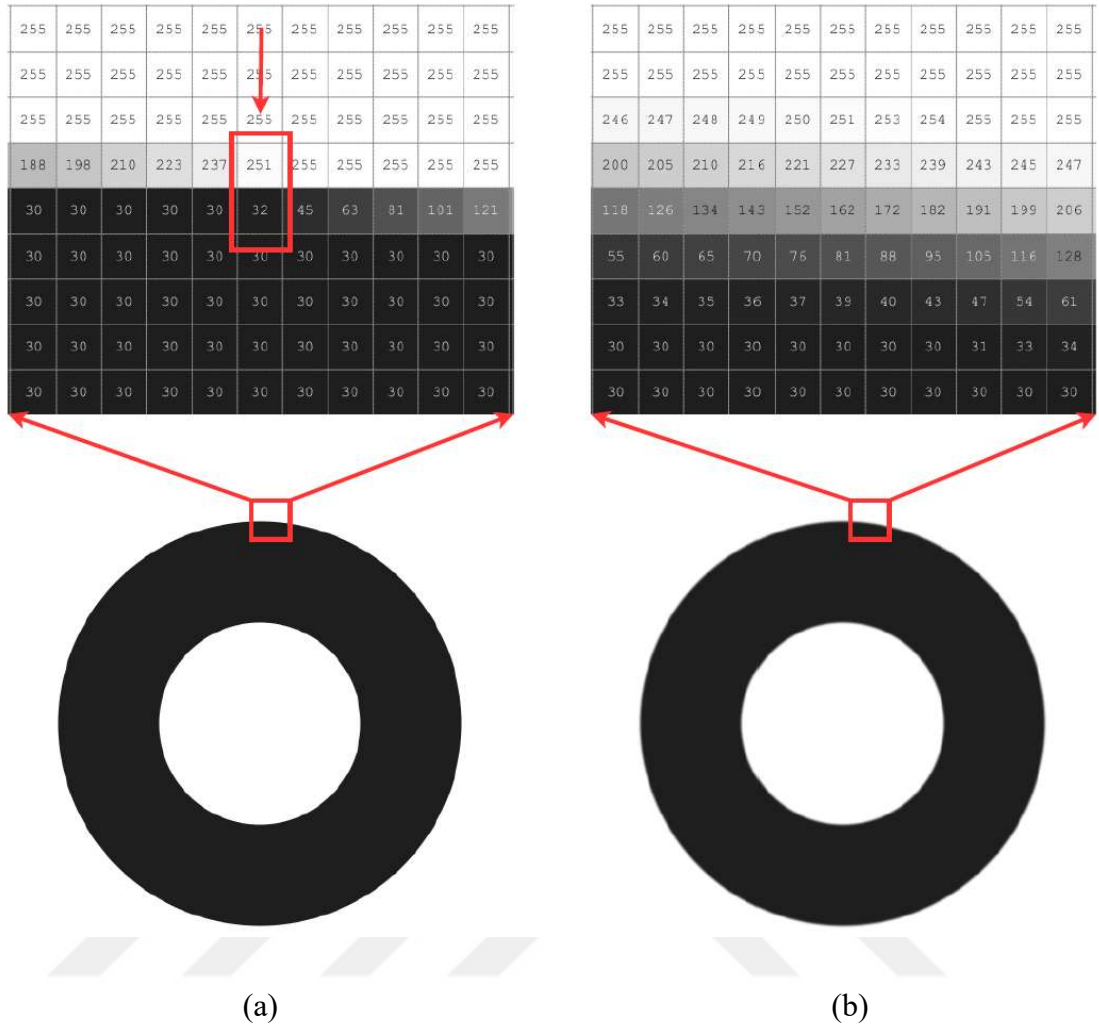
1. Görüntüyü elde etme: Görüntü kamera kullanılarak elde edilir
2. Ön İşleme: Gürültüyü azaltmak için görüntü üzerinde ön işleme adımları uygulanır.
3. Eşik Belirleme: Eşik değerleri (th_H ve th_L) manuel olarak seçilebileceği gibi otomatik eşik belirleme yöntemi ile de elde edilebilir.
 - Tam piksellerin belirlenmesi: Eşik th_L altında kalan yoğunluğa sahip pikseller tam piksel olarak tanımlanır.
 - Gri bölgenin çıkarılması: th_H ve th_L eşik değerlerinin arasında kalan gri seviye bölge çıkartılır
 - Gri piksel normalleştirilmesi: Gri seviye pikseller Denklem 3.4 kullanılarak normalleştirilir.
4. Alan Hesabı: Objenin alanı tam pikseller ile normalize edilmiş piksellerin toplanmasıyla elde edilir.

5. Alt-piksel tabanlı çap tahmini: Objenin alt-piksel hassasiyetindeki apı Denklem 3.6 kullanılarak elde edilir.

Yukarıda belirtilen görüntü işleme adımları takip edilerek, alt piksel sayımına dayalı çap ölçümü algoritması nesne çaplarının daha doğru ve hassas ölçülmesini sağlar.

3.1.3 Eşik değ erlerinin otomatik olarak belirlenmesi

Önerilen yöntemde gri piksellerin seçimi ve normalizasyonu için eşik değ erlerinin (th_H ve th_L) belirlenmesi önemlidir. Bu değ erler, deneysel kurulum temel alınarak manuel olarak hesaplanabilir, ancak farklı kurulumlar için bu süreç zahmetli ve tekrarlayıcı olabilir. Bu kısıtlamayı ele almak için ve yöntemin farklı deneysel kurulumlarda sağlamlığını garanti altına almak için otomatik bir eşik belirleme yaklaşımı önerilmiştir. Bu sorunu aşmak için, geçiş alanındaki pikseller detaylı bir şekilde incelenerek uygun eşik değ erlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.8). Hipotezimize dayanarak, geçişin en belirgin olduğu piksellerin görüntüdeki noktalarını kullanarak bu geçiş bölgesindeki gri piksellerin belirlenmesi için bir yaklaşım önerilmiştir.



Şekil 3.8 : Nesne görüntüsü net odaklı (a) ve net olmayan odaklı (b). Kırmızı kutu ve ok, geçişte en yüksek farkı veren pikselleri göstermektedir.

İlk olarak, elde edilen görüntüler dikkatlice analiz edilir ve eşik değerleri belirlenir. Bir pikselin yoğunluğu, nesnenin gölgesinin üzerine düştüğünde arka plan yoğunluğundan sapmaya başlar. Bu gözlem, net odaklı görüntüler için geçerlidir (Şekil 3.8a). Ancak, net olmayan görüntülerde bulanıklık etkileri olabilir (Şekil 3.8b). Parça sınırına yakın bazı arka plan piksellerinde gölge olmasa bile, odak kaynaklı yoğunluk değişimleri meydana gelir. Benzer şekilde, tamamen gölge altındaki pikseller siyahtan griye bir geçiş sergiler. Bu nedenle, analiz başlangıçta net odaklı görüntülere odaklanır. Bu faktörleri dikkate alarak ve elde edilen görüntülerin dikkatli bir şekilde incelenmesiyle, önerilen yöntem özellikle deneysel kurulumdan bağımsız olarak doğru ve tutarlı ölçümler için uygun eşik değerlerini belirlemeyi hedefler.

Geçiş bölgelerini inceledikçe, her satır veya sütundaki gri bölgelerin farklı yoğunluk değerlerine sahip olduğu açıkça görülür. Bu, her satır/sütun geçişindeki her pikseldeki

nesnenin gölgesinin doluluk oranının farklı olmasından kaynaklanır. Arka plan yoğunluk değerinin değişmeye başladığı noktalar, gri alanı tanımlayan sınırları bize sağlar. Eğer parçanın kenarı bir pikselin ortasına ulaşırsa, piksele orta yoğunluk değeri atanır. Tüm piksellere genişletildiğinde, bu yoğunluk değeri gölge bileşenini temsil eder (Şekil 3.4). Bu gözlemi dikkate alarak, her bir satır/sütundaki geçişleri analiz etmek yerine, en yüksek geçiş değerine sahip satır/sütundaki yoğunluk değerleri seçilir. Başka bir deyişle, eşik değerleri geçişin en yüksek olduğu noktalarda daha belirgin olarak görünmektedir. Bu en yüksek geçiş noktalarındaki alt ve üst değerler, algoritmamız için eşik değerleri (th_H ve th_L) olarak hizmet eder. Net odaklı görüntüler için, yoğunluk değişiminin başladığı pikselleri başlangıçta tanımladık. Daha sonra, yoğunluk değişiminin en yüksek olduğu noktaların bulunarak eşik değerlerinin belirlenebileceği önerilmektedir. Net olmayan görüntülerde, değişimin başladığı nokta her zaman değişimin başlangıç noktasına denk gelmeyebilir. Bu tür durumlarda, en büyük değişim noktası, bize değişimin başlangıç noktası yerine parçanın sınırını verebilir. Sonuç olarak, net odaklı görüntülerde elde edilen eşik değerleri, net olmayan görüntülerde elde edilenlere benzerdir. Bu bilgiler doğrultusunda, en yüksek değişim noktalarının, odaklama durumundan bağımsız olarak eşik değerleri hakkında bilgi sağladığı hipotezini sunuyoruz. Görüntüdeki geçişsel değişimleri tanımlamak için bir gradyan tabanlı yöntem önerilmektedir. Hem x hem de y yönlerinde yakalanan bir görüntünün türevlerini sıralayarak, en büyük geçişlere sahip noktalar belirlenir. Daha sonra, bu değerlere bir karışım işlevi (en büyük-en küçük, en küçük, en büyük veya ortalama gibi) uygulanarak pikselleri tam ve geçiş piksellerine ayıran eşik değerleri elde edilir. Önerilen metodolojinin anlaşılmasını artırmak için, hem bir diyagram (Şekil 3.9) hem de sözde kod (Algoritma 1, 2, 3) ile sunulmaktadır.

Çizelge 3.1 : Otomatik Eşik Bulma Yöntemi

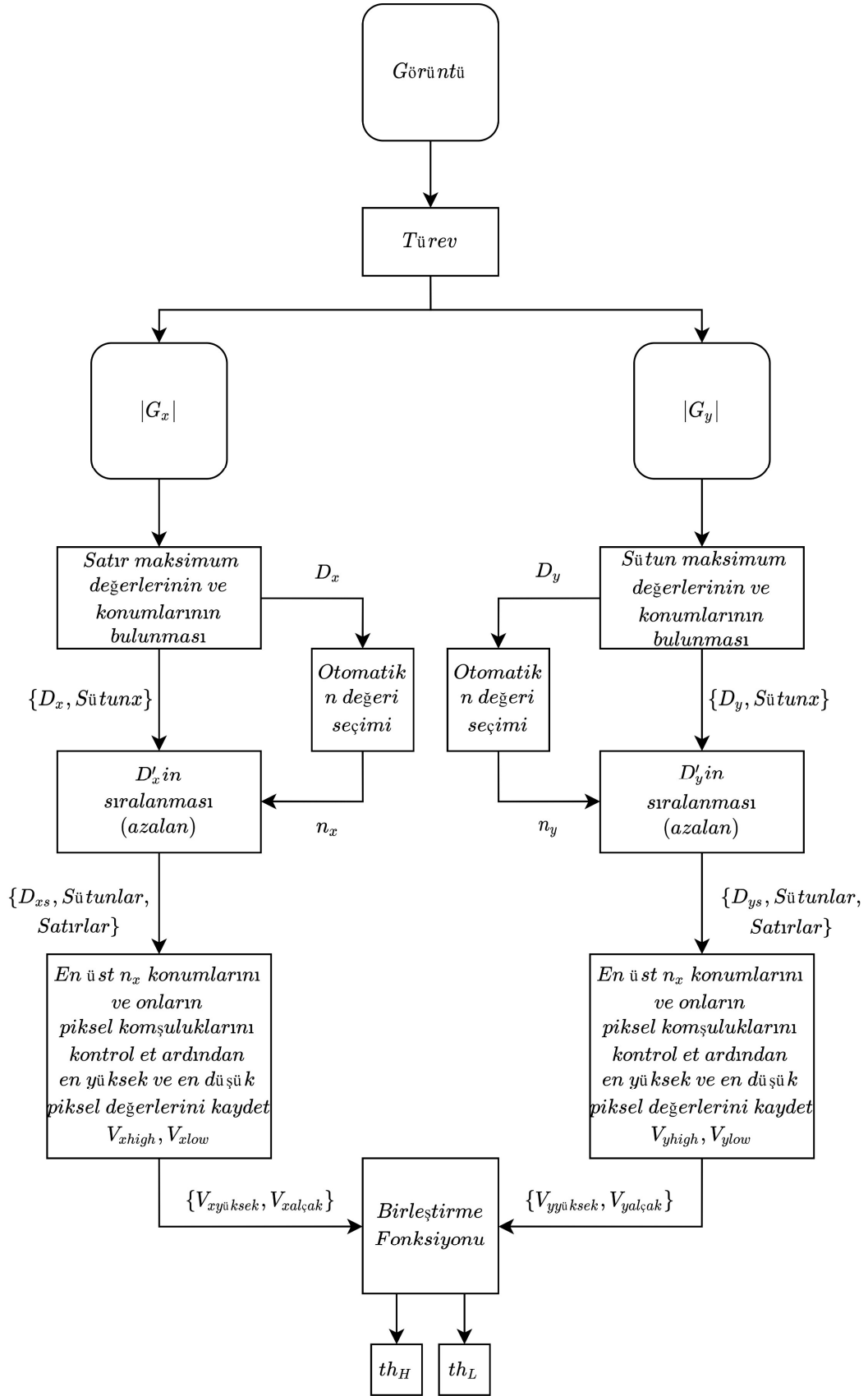
Algoritma 1	
1:	Girdi: <i>görüntü, eşik, metod, n, otomatik</i>
	Çıktı: th_L, th_H
2:	$I \leftarrow \text{önişleme}(\text{görüntü}, \text{eşik})$
3:	$[M, N] \leftarrow \text{boyut}(I)$
4:	$[G_x, G_y] \leftarrow \text{türev}(I)$ // G_x ve G_y , $M \times N$ boyutunda matrislerdir // G_x kısmının değerlendirilmesi
5:	for $i \leftarrow \text{to } M$ do
6:	$[D_x(i), \text{Sütunx}(i)] \leftarrow \text{enbüyük}(\text{mutlak}(G_x(i,:)))$ // D_x , G_x 'in en büyük değerlerini içeren $M \times I$ boyutunda bir vektördür ve Sütunx , en büyük konumları içeren $M \times I$ boyutunda bir vektördür.
7:	end for i
8:	if $\text{otomatik} == 1$ then
9:	$n_x \leftarrow \text{otomatikseçim}(D_x)$
10:	end if
11:	$[D_{xs}, \text{indeks}_{xs}] \leftarrow \text{sırala}(D_x, \text{'Azalan'})$
12:	$\text{Sütunxler} \leftarrow \text{Sütunx}(\text{indeks}_{xs})$
13:	$\text{Satırxler} \leftarrow \text{indeks}_{xs}$
14:	for $k \leftarrow \text{to } n_x$ do
15:	$C_x \leftarrow \text{Sütunxler}(k); R_x \leftarrow \text{Satırxler}(k)$
16:	$\text{Seçimx} \leftarrow I(R_x, C_x: C_x+1)$ // Seçimx , 1×2 boyutunda bir vektördür
17:	$V_{xyüksek}(k) \leftarrow \text{enbüyük}(\text{Seçimx})$
18:	$V_{xalçak}(k) \leftarrow \text{enküçük}(\text{Seçimx})$
19:	end for k // G_y kısmının değerlendirilmesi
20:	for $j \leftarrow \text{to } N$ do
21:	$[D_y(i), \text{Satıry}(j)] \leftarrow \text{enbüyük}(\text{mutlak}(G_y(j,:)))$ // D_y , G_y 'nin en büyük değerlerini içeren $N \times I$ boyutunda bir vektördür ve Satıry , en büyük konumları içeren $N \times I$ boyutunda bir vektördür.
22:	end for j
23:	if $\text{otomatik} == 1$ then
24:	$n_y \leftarrow \text{otomatikseçim}(D_y)$
25:	end if
26:	$[D_{ys}, \text{indeks}_{ys}] \leftarrow \text{sırala}(D_y, \text{'Azalan'})$
27:	$\text{Satıryler} \leftarrow \text{Satıry}(\text{indeks}_{ys})$
28:	$\text{Sütunylar} \leftarrow \text{indeks}_{ys}$
29:	for $k \leftarrow \text{to } n_y$ do
30:	$C_y \leftarrow \text{Sütunylar}(k); R_y \leftarrow \text{Satıryler}(k)$
31:	$\text{Selecty} \leftarrow I(R_y: R_y+1, C_y)$ // Selecty , 1×2 boyutunda bir vektördür
32:	$V_{yyüksek}(k) \leftarrow \text{enbüyük}(\text{Selecty})$
33:	$V_{yalçak}(k) \leftarrow \text{enküçük}(\text{Selecty})$
34:	end for k
35:	$th_L, th_H \leftarrow \text{birleştirmefonksiyonu}(V_{xyüksek}, V_{xalçak}, V_{yyüksek}, V_{yalçak}, \text{metod})$

Çizelge 3.2 : Otomatik n Değerinin Seçimi

Algoritma 2	
1:	Girdi: D // D , en büyük türev vektörü, hem x hem y yönünde olabilir Çıktı: n // n , D vektörünün en büyük değerinin tekrar etme sayısı
2:	$n \leftarrow 0$
3:	$D_{maks} \leftarrow \text{enbüyük}(D)$
4:	for $i \leftarrow 1$ to $\text{boyut}(D)$ do
5:	if $D_{maks} == D(i)$
6:	$n \leftarrow n + 1$
7:	end if
8:	end for
15:	return n

Çizelge 3.3 : Birleştirme Fonksiyonu

Algoritma 3	
1:	Girdi: $V_{xyyüksek}$, $V_{xalçak}$, $V_{yyyüksek}$, $V_{yalçak}$, $metod$ Çıktı: th_L , th_H
2:	$V_L \leftarrow \text{birleştir}(V_{yalçak}, V_{xalçak})$
3:	$V_H \leftarrow \text{birleştir}(V_{yyyüksek}, V_{xyyüksek})$
4:	if $metod == \text{'ortalama'}$ then
5:	$th_L \leftarrow \text{topla}(V_L) / \text{boyut}(V_L)$
6:	$th_H \leftarrow \text{topla}(V_H) / \text{boyut}(V_H)$
7:	else if $metod == \text{'ortanca'}$ then
8:	$th_L \leftarrow \text{ortanca}(V_L)$
9:	$th_H \leftarrow \text{ortanca}(V_H)$
10:	else if $metod == \text{'enbüyük'}$ then
11:	$th_L \leftarrow \text{enbüyük}(V_L)$
12:	$th_H \leftarrow \text{enbüyük}(V_H)$
13:	else if $metod == \text{'enbüyük/enküçük'}$ then
14:	$th_L \leftarrow \text{enküçük}(V_L)$
15:	$th_H \leftarrow \text{enbüyük}(V_H)$
16:	end if
17:	return th_L, th_H



Şekil 3.9 : Önerilen otomatik eşik belirleme yöntemi diyagramı.

Otomatik eşik tespiti yöntemi, ön işleme aşamasını takip eden üç ana adımdan oluşmaktadır: güçlü n değeri seçimi, karışım işlevi ve güçlü eşik seçimi. Ön işleme aşamasında, tüm ölçüm dışı bileşenler elenir ve yalnızca ölçüm bileşenine odaklanılır. Önerilen yöntem, geçiş bölgelerini tanımlamak için gradyan analizi kullanır. Özellikle, gradyan adımı, ölçülen nesnenin sınırı boyunca kenarları tespit etmeyi sağlar. Farklı süzgeçler gradyan prosedürünü gerçekleştirmek için kullanılabilir. Bu çalışmada, dört süzgeç türü kullanılmıştır: Ara, Merkezi, Sobel ve Prewitt (Çizelge 3.1). Bu araştırmada Orta süzgeci en uygun sonuçları verdiği için, algoritmalar buna göre açıklanmıştır. Araştırmacılar, hafif değişiklikler yaparak farklı süzgeç tiplerine uyum sağlamak için algoritmaları uyarlayabilirler.

Çizelge 3.4 : Deneylerde kullanılan kenar tespit süzgeç tipleri. Süzgeçler dikey (y) yönde verilmiştir. x yönde, ağırlıklar transpoze edilmiştir.

$\begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$
Orta	Merkezi	Sobel	Prewitt

Eşik değeri belirlenirken, önce iş parçasının görüntüsü ön işleme gürültüden arındırılarak ve I görüntüsü elde edilir. Daha sonra görüntünün hem x hem de y yönlü gradyanı G_x ve G_y hesaplanır. Gradyan matrisleri D_x ve D_y 'nin en büyük değerleri, konumları $Sütunx$ ve $Sütuny$ elde edilir. D vektörleri, eşik seçiminde kaç değer kullanılacağını belirlemek için kullanılır. Değer n , vektör D 'deki en yüksek değerin kaç kez tekrarlandığına bağlı olarak belirlenir. D vektörleri en büyükten en küçüğe sıralanır ve indeks değerleri $Sütunlar$ ve $Satırlar$ elde edilir. En yüksek ve en düşük piksel değerleri $V_{yüksek}$ ve $V_{alçak}$, I üzerinde ilk n yer ve 1 piksel komşuları incelenerek hesaplanır. $V_{yüksek}$ ve $V_{alçak}$ değerleri, hem x yönlü hem de y yönlü farklı olduğu için bu değerlerin birleştirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, son adımda bu değerler birleştirilir. Birleştirme aşamasında en büyük, en küçük veya ortanca kullanılabilir. Karşılaştırma sonuçları, bulgular bölümünde sunulmuştur.

3.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı

Tezin ikinci önerdiği yöntem, mevcut çap ölçme algoritmalarını iyileştiren bir yaklaşımdır. Önerilen yaklaşım iki alt yöntem olacak şekilde sunulmuş ve birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Özellikle hassas ölçüm yapan kamera kontrollü sistemler için önerilmekte ve sistemden gelen ölçüm hatalarını büyük ölçüde azaltmaktadır. Önerilen algoritmanın detayı anlatılmadan önce, hangi probleme çözüm getirildiğinin daha iyi anlaşılabilmesi açısından ilk olarak problem tanımı, dönüşüm faktörü ve çap arasındaki ilişki ardından yöntem detayı anlatılacaktır.

3.2.1 Problem Tanımı

Literatürdeki çap ölçüm algoritmaları, temelindeki yaklaşımları sayesinde önemli derecede başarıya sahiptir. Ancak her ne kadar iyi çalışsalar da ortaya bir ölüm hatası çıkmaktadır. Ölçüm hatasının nedeni iki sebebe dayandırılabilir: mekanik ve yazılım. Mekanik etkiler, kullanılan lensler, kamera sensör özellikleri, ölçüm camının ışık geçirgenliği, kullanılan aydınlatma, camın hizalaması, odak bozulması ve harici gürültüyü içerir. Diğer yandan, kullanılan ölçüm algoritmasının performansı da ölçüm hatası üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ölçülecek çap boyutu azaldıkça ve toleranslar daraldıkça, algoritmaların performansı doğru ve hassas ölçüm için hayati öneme sahiptir. Bu tez kapsamında önerilen yöntem özellikle küçük çapa sahip ve toleransları dar parçalar için ortaya çıkan hataların giderilmesi için önerilmektedir. Tez kapsamında yapılan bütün testler ve elde edilen bütün sonuçlar, bulgular bölümünde verilmektedir. Ancak problem tanımının yapılabilmesi ve net olarak anlatılabilmesi açısından yapılan ön test sonuçları bu bölümde verilecektir.

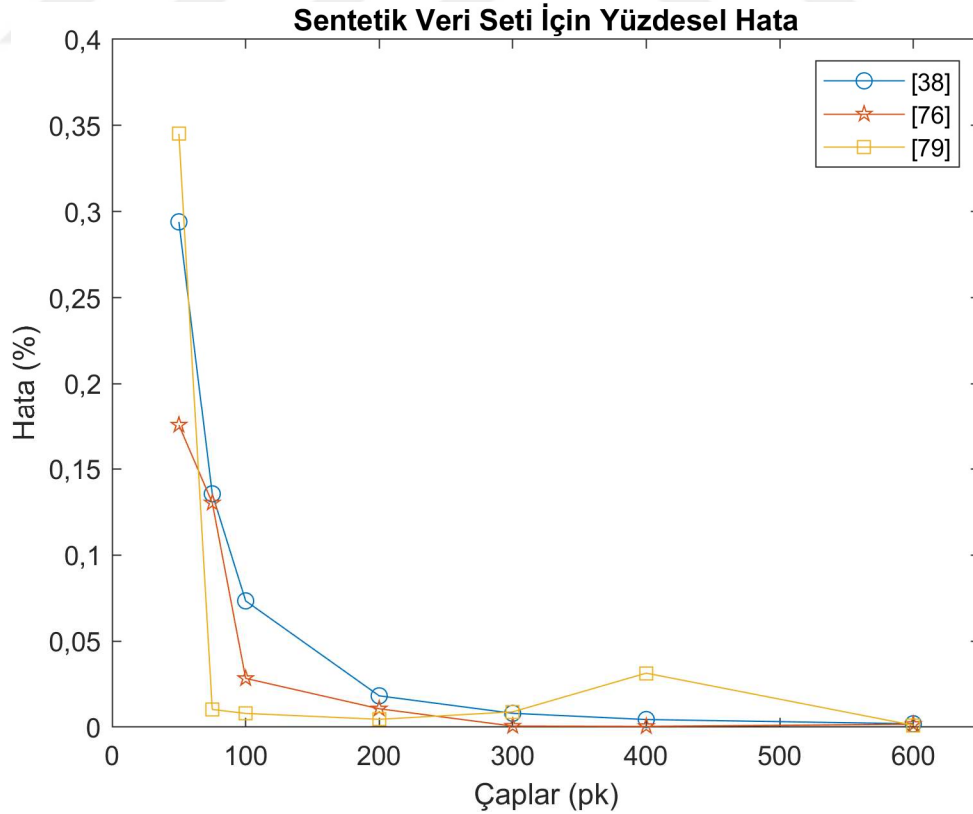
Problemin daha iyi anlaşılabilmesi açısından temel bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Literatürdeki alt-piksel seviyesinde çalışan en iyi çap ölçüm algoritmalarının çap boyutuna göre performansları değerlendirilmiştir. Sentetik görüntülerin oluşturulması için [76] çalışmasında kullanılan sentetik daire oluşturma algoritması kullanılmıştır. Çapları 50 ve 600 piksel arasında değişen çaplara sahip daireler elde edilmiştir. Sentetik görüntüde oluşan daire mükemmel olduğundan herhangi bir odak bozukluğu bulunmamaktadır. Ancak gerçek görüntülerde az da olsa bir odak bozukluğu bulunmaktadır. Bu sebeple görüntülere Gauss bulanıklaştırma süzgeci uygulanmıştır. Elde edilen görüntülerdeki dairelerin çapları [76], [38] ve [79]

yöntemleri kullanılarak piksel türünden hesaplanmıştır (Çizelge 3.2). [79] yöntemi, bu tez kapsamında sunulan ilk olarak sunulan alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritmasıdır. Önerilen ilk yöntemin başarısı, bu başlık altında önerilen yaklaşım kullanılarak arttırılabileceği de ortaya koyulmuştur.

Çizelge 3.5 : Sentetik görüntülerden elde edilen yüzdesel hata.

Yöntemler	Çaplar (px)						
	50	75	100	200	300	400	600
Devernay [38]	0,294	0,136	0,073	0,018	0,008	0,004	0,002
Alt-Piksel Kenar [76]	0,176	0,130	0,028	0,011	0,001	0,000	0,002
Alt-Piksel Sayma [79]	0,345	0,010	0,008	0,005	0,009	0,031	0,001

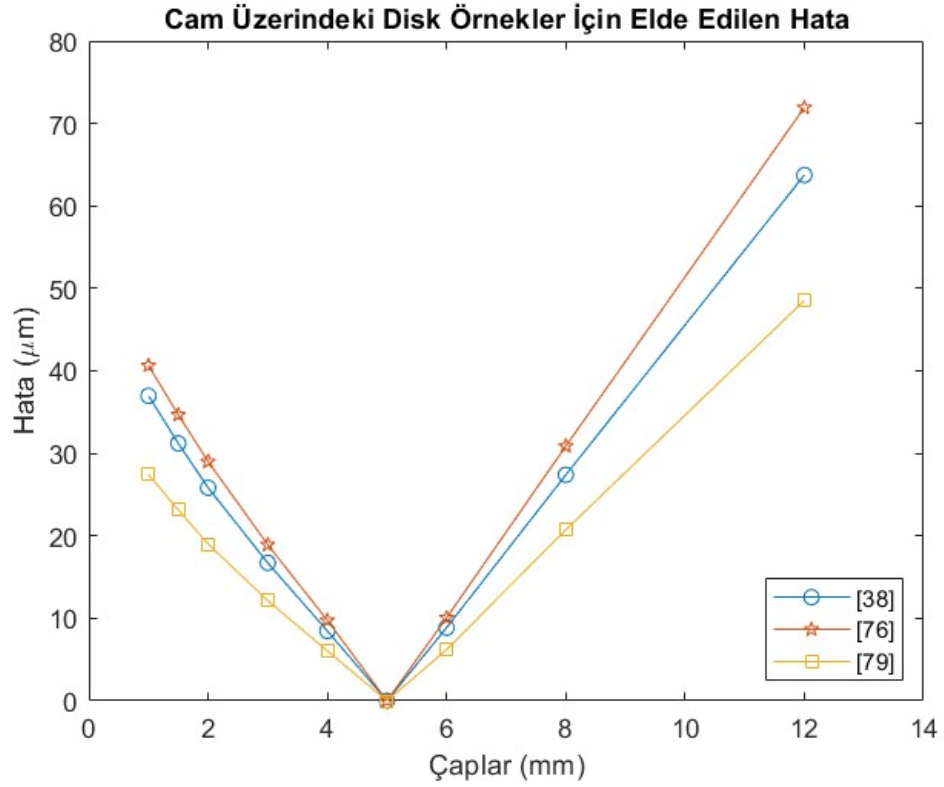
Çizelge 3.2'yi incelediğimizde, çap boyutu azaldıkça yöntemlerin giderek istikrarsız hale geldiğini gözlemleyebiliriz. Mevcut algoritmalar bu konuda benzer bir davranış sergilemiştir (Şekil 3.10). Bu hatayı düzelten sistemlere ve yöntemlere ihtiyaç vardır. Birçok uygulamada, yaklaşık %1 civarında bir hata kabul edilebilir. Ancak, hassas ölçüm uygulamalarında bu oran daha da düşük olmalıdır. Özellikle iş parçalarının küçük olduğu uygulamalarda, toleranslar da daralmaktadır. Bu nedenle, doğru ölçüm daha da önemli hale gelmektedir.



Şekil 3.10 : Sentetik görüntü için elde edilen yüzdesel hatalar.

Problemin etkisi ve meydana gelişi basit bir senaryo ile gösterilebilir. Yılda yüz binlerce ürün üreten ve seri üretim yapan bir fabrikayı düşünelim. Bu tür senaryolarda her parçanın doğru üretilip üretilmediği kontrol edilir. Hız avantajı nedeniyle bu denetimler genellikle kamera sistemleri ile yapılır. Senaryoda standart bir uygulama olarak, seri üretilen bir iş parçasının çapı için bilinen bir değere sahip özel olarak üretilmiş bir referans ölçü aleti üretilir. Referans parça eğitim aşaması için kullanılır. Ölçü aletinin görüntüsü alınır ve piksel cinsinden ölçüsü hesaplanır. Ardından, piksel cinsinden milimetre cinsine geçişi sağlayan R faktörü Denklem 2-1'deki formül kullanılarak hesaplanır. İş parçalarının ölçüleri piksel cinsinden, R değeri kullanılarak gerçek mm birimine dönüştürülür. Benzer şekilde, aynı fabrika yılda binlerce farklı çapta ürün ürettiği için her biri için özel olarak referans master parçası üretir. Ancak, referans master parçalarının özel üretimi zaman ve fiyat açısından bir maliyet oluşturmaktadır.

Endüstriyel uygulamalarda tek bir dönüşüm faktörünün kullanılması ürün hassasiyetine göre değişmektedir. Özellikle hassas ölçüm uygulamalarında tek bir R değeri genel olarak tercih edilmemektedir. Çünkü R değerini sabit aldığımız zaman, farklı çaplarda ölçüm hatası ortaya çıkmaktadır. Bu hata R değerinin üretildiği masterın çap değeri ile ölçüm parçasının çap değeri arasındaki fark büyüdükçe artmaktadır. Bu problemi daha iyi anlatabilmek açısından basit bir test gerçekleştirilmiştir. Bu test için elimizde bulunan cam referans masterı kullanılmıştır (Veri seti kısmında detaylıca açıklanacağı için bu kısımda detayı verilmeyecektir). Cam referans masterı, üzerinde 1, 1,5, 2, 3, 4, 5, 6, 8 ve 12 mm çaplara sahip halkalar bulundurmaktadır. Bu halkalar özel olarak üretildiği için gerçek değerleri $\pm 0,1\mu\text{m}$ arasında değişmektedir. Bu değer ölçüm sistemleri için oldukça dar bir değerdir. Bu veri setinin her biri için deney düzeneği kullanılarak görüntüler elde edilmiştir. Ardından üç farklı çap ölçüm algoritmasıyla çapları piksel türünden ölçülmüştür. Tekrarlanabilirlik hatasını azaltabilmek için ölçümler tekrarlanmış ve elde edilen ölçümlerin ortalaması alınmıştır. Gerçek değere çevirebilmek için de 5 mm'ye sahip halka seçilmiştir. Seçilen halka kullanılarak R değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan R değeri ile diğer çaplara ait piksel türünden çap değerleri mm'ye çevrilmiştir. Böylelikle her bir parçanın tahmin edilen ve gerçek değerleri ortaya çıkmıştır. Elde edilen ölçümler kullanılarak ölçüm hatası her bir çap için belirlenmiştir (Şekil 3.11).



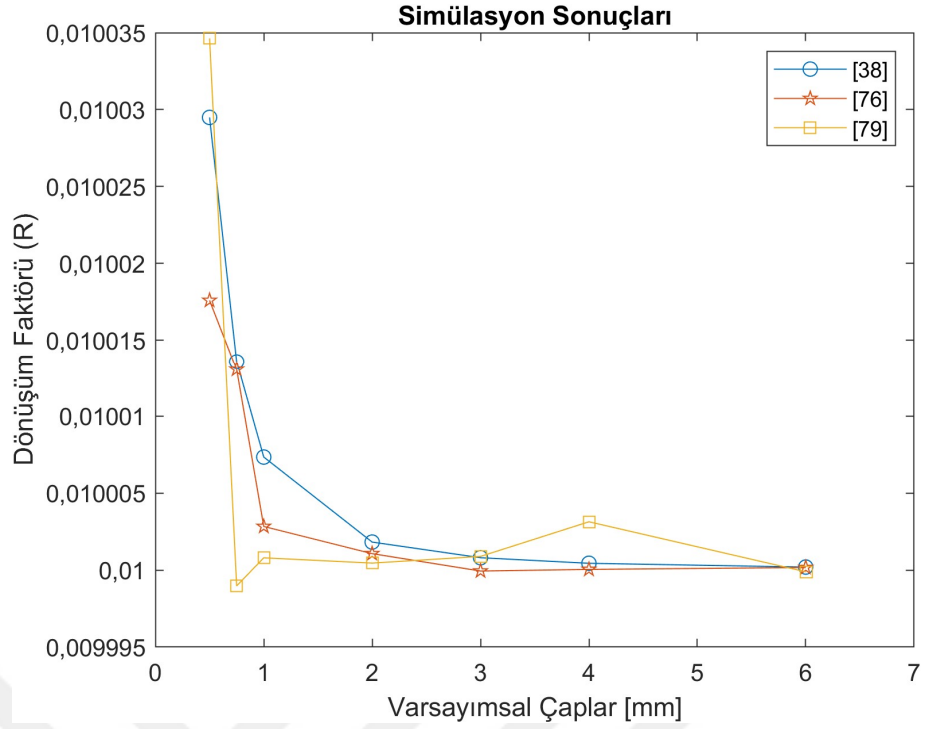
Şekil 3.11 : Tek bir R değeri (5 mm) kullanıldığında ortaya çıkan hatanın çaplara göre değişimi.

Ölçüm hatasından kaynaklanan bu problem temel olarak hem yazılım hem de mekanik kurulumdan kaynaklanmaktadır. Literatürdeki bulunan üç farklı algoritma da, tek bir R değeri kullanıldığında farklı çaplarda hatalı ölçümler yaptığı görülmüştür (Şekil 3.11). Bu problemi çözmek için uygulamacılar genellikle her bir çap için ayrı referans mastarı kullanmışlardır. Böylelikle her bir çap değeri için ayrı bir R değeri elde edilmektedir. Ancak bu yaklaşım hem finansal açıdan hem de zaman açısından büyük maliyete sebep olmaktadır. Ek olarak bilinen çaplar arasında bilinmeyen bir boyutta parça geldiği zaman yeni bir referans mastarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tam olarak bu noktada bu tezin motivasyonların biri Şekil 3.11’de verilen ve ölçüm sisteminden kaynaklanan hatanın giderilmesidir. Bu tezde, belirtilen problemin çözümü için hem dönüşüm faktörü tabanlı hem de piksel tabanlı tahmin modelleri önerilmiştir.

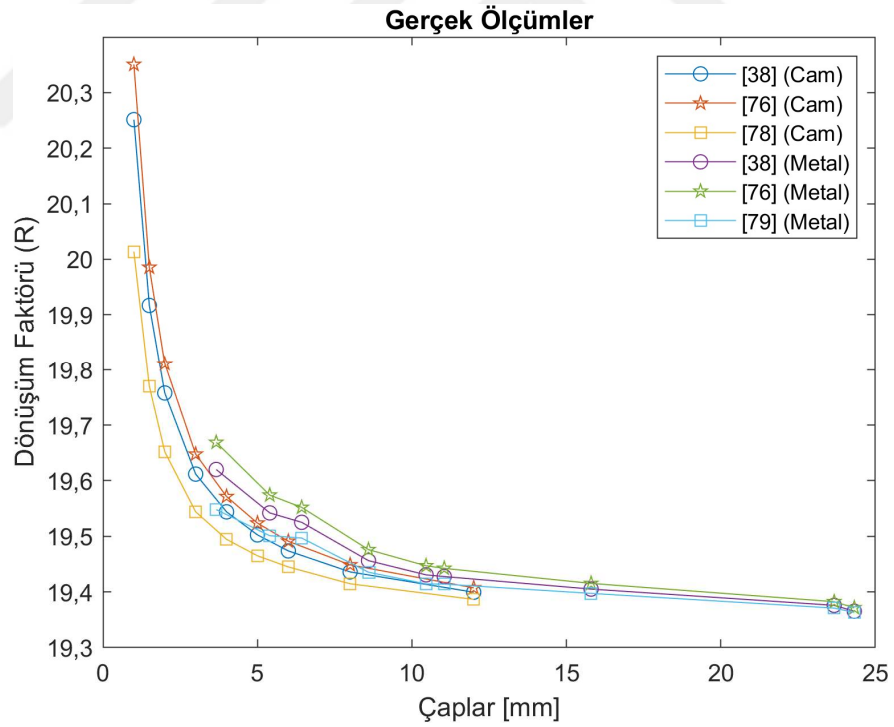
Literatürde dönüşüm faktörünün farklı çaplarda, farklı değerlere sahip olduğunu gösteren çalışmalar bulunmaktadır [86,88,89]. Ancak bu probleme tam olarak çözüm getiren bir çalışmaya rastlanmamıştır. Ek olarak, farklı çaplarda elde edilen dönüşüm faktörlerini araştıran ya da karşılaştıran araştırmaların eksikliği bulunmaktadır. Bu bakış açısıyla önerilen yaklaşım özgün ve yenilik içermektedir. Benzer şekilde bu çalışma benzer algoritmaların önerilen yaklaşımla karşılaştırılmalı sonuçları içermesi bakımından yenilik içermektedir.

3.2.2 Dönüşüm faktörü ve çap arasındaki ilişki

Dönüşüm faktörü Denklem 2-1'e göre iki değişkene bağlıdır: referans parçanın gerçek çapı ve piksel türünden ölçüm değeri. Referans parçaları genel olarak özel üretilmiş ve belirsizlikleri mikron seviyesinin altında ürünlerdir. Referans parçasının gerçek değerinin hassas bir şekilde doğru olduğu bilindiğine göre R değeri büyük oranda piksel türünden ölçüm değerine bağlıdır. Ancak piksel türünden ölçümü etkileyen hem mekanik hem de yazılımsal etkiler bulunmaktadır. Bu etkiler hesaba katıldığında çapa bağlı olarak bir hata ortaya çıkmaktadır. Bu hata V şekline benzer Şekil 3-11'de veya R-Çap (Şekil 3-12b) eğrisinde görülmektedir. Şekil 3-12a grafiği elde edilirken hem simülasyon hem de gerçek parçalarla yapılan deneylerden elde edilen R değerleri gösterilmiştir. Sentetik görüntüler ile elde edilen görüntüler hem Şekil 3-10 hem de Şekil 3-12a oluşturulurken kullanılmıştır. Şekil 3-12a'da Şekil 3-10'dan farklı olarak R-Çap eğrisi gösterilmiştir. Gerçek deney kurulumunda görüntüler hem cam hem de metal parçalar kullanılarak elde edilmiştir. Ardından çaplara göre R değerleri hesaplanarak Şekil 3-12b'de gösterilmiştir. Cam setteki dairelerin çapları 1 ve 12 mm arasındayken metal veri setindeki parçalar 3 ile 24 mm arasında değişen çaplara sahiptir. Şekil 3-12b incelendiğinde metal veri setinin oluşturduğu eğrinin, cam veri setinin oluşturduğu eğrisinin devamı gibi olduğu görülmektedir. Bu gözlemden yola çıkarak 3 mm'den daha küçük çapa sahip bir iş parçasını ölçmek istediğimizde R değerini belirlemek için R-Çap eğrisi kullanılarak tahminleme yapılabilir. R değerini tahmin etmek için kullanılacak yaklaşım, yöntem açıklaması kısmında anlatılacaktır.



(a)



(b)

Şekil 3.12 : Simülasyon, cam ve metal veri setinden elde edilen dönüşüm faktörü oranları. (a) Sentetik görüntülerden elde edilen R-Varsayımsal Çap eğrisi. (b) Metal ve cam veri setinden elde edilen R-Çap eğrisi.

Şekil 3.12 incelendiğinde (a) ve (b) grafiklerinin benzer davranışta olduğu yani belirli bir noktaya doğru yakınsadığı görülmektedir. Sentetik görüntülerle yapılan simülasyon testinde dışarıdan gelen herhangi bir gürültü ya da etki bulunmamaktadır. Yalnızca odağın mükemmel olmasının önüne geçilebilmesi için gauss süzgeci uygulanmıştır. Gauss süzgeci haricinde herhangi bir etki bulunmamaktadır. Ek olarak herhangi bir mekanik etki de yoktur. Yalnızca algoritmadan gelen bir değişkenlik mevcuttur. Gerçek veri setiyle yapılan testteki görüntülerde, hem mekanik hem de yazılımsal etki bulunmaktadır. Ancak Şekil 3.12 incelendiğinde mekanik etki olan gerçek veri setinde de olmayan sentetik veri setinde de benzer bir yakınsama durumu görülmektedir. Davranışları benzer biçimdedir. Bu durum bize asıl etki eden durumun mekanik değil algoritmadan kaynaklandığını göstermektedir.

Her iki grafikte de (Şekil 3.12 (a) ve (b)) büyük R değeri küçük çaplar ölçüldüğünde, küçük R değeri de büyük çaplar ölçüldüğünde elde edilmektedir. Bu durumun sebebi, büyük çapa sahip parçalarda çok daha fazla piksel işleme katılmakta ve daha hassas bir ölçüm yapılmasına olanak sağlamaktadır. Eğrilerin bir noktaya doğru yakınsamasının sebebi bundan kaynaklanır. Tüm bu gözlemlere göre farklı çaplardaki R değerleri tahmin edilebilir hipotezi ortaya çıkmaktadır. Bu bilgi ışığında bu tezde hem R tabanlı hem de direkt piksel tabanlı tahmin yaklaşımları önerilmektedir.

3.2.3 Önerilen Yaklaşımlar

Bahsedilen problemin çözümü için bu tez kapsamında iki farklı yaklaşım önerilmiştir: dönüşüm faktörü tabanlı ve piksel tabanlı yaklaşım. İlk yaklaşımda çaplara göre değişen R değeri bilgisini kullanarak bir model oluşturulmaktadır. İkinci yaklaşımda ise milimetre türünden çap değeri direkt olarak çapların piksel bilgisi kullanılarak tahmin edilmektedir. Her iki yaklaşım için de birinci ve ikinci dereceden modeller elde edilmektedir. Her iki yaklaşımın da uygulanabilmesi için değeri bilinen referans parçalara ihtiyaç duyulmaktadır. Değeri bilinen referanslardan elde edilen bilgi kullanılarak değeri bilinmeyen parçalar tahmin edilmektedir. Dönüşüm faktörü ve çap değerleri sorgulanan parçanın piksel tabanlı ölçüsü kullanılarak tahmin edilmektedir. Önerilen iki yaklaşım da alt metotları barındırmaktadır. İlk yaklaşımdan üç ve ikinci yaklaşımdan üç olmak üzere toplam altı adet alt metot önerilmiş ve karşılaştırılmıştır. Her bir metodun daha iyi anlaşılabilmesi grafiklerle anlatılmıştır. Basit gösterim Çizelde 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.6 : Önerilen yaklaşımlar ve alt metotları.

Metot	Açıklama	Yaklaşım
1.0 (Temel)	Ortalama R değerini kullanarak çapın tahmin edilmesi	Dönüşüm Faktörü
1.1	Referanslar arasından en yakın R değerinin seçilerek R_{est} değerinin tahmin edilmesi	Tabanlı Yaklaşımlar
1.2	Referanslar arasından en yakın iki R değerinin seçilerek R_{est} değerinin tahmin edilmesi	(pk $\rightarrow$ R $\rightarrow$ mm)
2.1	En yakın iki P değeriyle D_{est} değerinin tahmin edilmesi	Çap Tabanlı Yaklaşımlar
2.2	Bütün P değerleri kullanılarak D_{est} değerinin tahmin edilmesi	(pk $\rightarrow$ mm)

3.2.3.1 Dönüşüm faktörü tabanlı yaklaşım

İlk yaklaşımda, çaplara göre R değerinin değişkenliği dikkate alınarak bir R tabanlı yöntem önerilmektedir. Buradaki amaç, R değerini tahmin etmek ve ardından gerçek çap değerini hesaplamaktır. R değeri belirlendikten sonra, gerçek ölçüm piksel değeri kullanılarak tahmin edilebilir. Her bir yöntem için dört bilinen referans değeri olduğu varsayılır. Bu referanslar, gerçek ölçümü tahmin etmek için kullanılır. Aşağıda üç farklı R tabanlı alt yöntem ve temel yöntem açıklanmaktadır. Temel yöntem, endüstride kullanılan standart yöntemi belirtmektedir. Tek bir referans master ile bütün çapları ölçmeye çalışmaktadır. Önerilen yöntem ise en az iki adet referans mastara ihtiyaç duymaktadır. Bilinen referansların bilgileri kullanılarak bilinmeyen referanslar için R değeri tahmin edilmektedir. Bu tez kapsamında dokuz adet değeri bilinen referans masterından dört tanesi tahminleme/model oluşturma için, beş tanesi ise test için kullanılmaktadır.

Önerilen yöntemler, bir sorgu parçasının piksel tabanlı ölçümüne (P_q) dayalı olarak çapını (D_{est}) tahmin etmektedir. Bu tahmin işlemi, bilinen çaplar (D), referans parçalarının piksel tabanlı ölçümleri (P) ve bunların dönüşüm faktörleri (R) gibi referans verilerini kullanarak gerçekleştirilir. Aşağıdaki adımlar süreci özetlemektedir:

Girdi:

- $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$: Referans parçalarının bilinen çapları (mm cinsinden).
- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$: Referans parçalarının piksel tabanlı çap ölçümleri.
- $R = \{R_1, R_2, \dots, R_n\}$: Referans parçaları için dönüşüm faktörleri.
- P_q : Sorgu parçasının piksel tabanlı ölçümü.
- metot: Kullanılacak tahmin yöntemi.

Çıktı:

- D_{est} : Tahmin edilen çap (mm cinsinden).

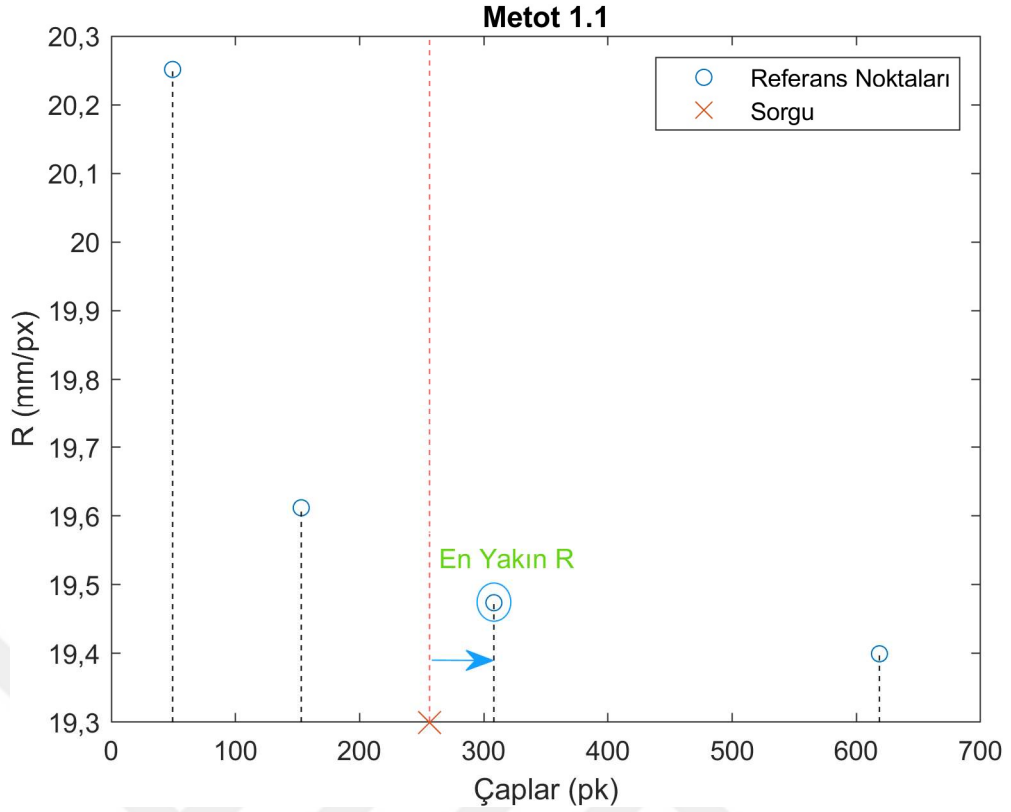
Metot 1.0: Bu yaklaşımda yalnızca tek bir R değeri kullanılmaktadır. Bütün farklı boyuttaki çapların tahmini gerçek ölçülerinin bulunması için öncelikle piksel türünden çapları hesaplanır. Ardından bütün piksel türünden çaplar aynı R ile çarpılarak gerçek ölçü (mm) hesaplanır. Bu yöntem standart uygulama olduğundan metot 1.0 olarak adlandırılmıştır. Bu yöntemde, tahmini çap (D_{est}), referans parçalarından elde edilen tüm dönüşüm faktörlerinin (R) ortalaması kullanılarak hesaplanır. Ortalama dönüşüm faktörü (R_{est}) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$R_{est} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3.7)$$

Bu ortalama değer kullanılarak tahmini çap şu şekilde belirlenir:

$$D_{est} = P_q \cdot R_{est} \quad (3.8)$$

Metot 1.1: Önerilen ilk metot, bilinen R değerlerini kullanarak çap ölçüm işlemini gerçekleştirmektedir. Burada herhangi bir tahminleme ya da model oluşturma yapılmamaktadır. Elimizde değeri bilinen dört adet referans parçası için ayrı ayrı R değerleri bulunmaktadır. R değerlerinin piksel türünden çapa göre grafiği Şekil 3.13'te verilmiştir. Elimizdeki değeri bilinen ve modelleme için kullanılan çapların (1,3,6,12 mm) piksel türünden ölçüm değerleri bilinmektedir. Bu bilgi kullanılarak, test parçası için ölçülen piksel değerinin (D_{query}) konumu tahmin edilir. Sorgu parçasının piksel ölçüsü bilinen referansların hangisine daha yakın ise, en yakındaki referansın R değeri sorgu parçası için dönüşüm faktörü olarak seçilir. Böylelikle sorgu parçası için piksel türünden mm türüne (D_{est}) geçiş yapılmış olur.



Şekil 3.13 : Metot 1.1 için R seçim prosedürü. En yakın R değeri sorgulanan çap için seçilir.

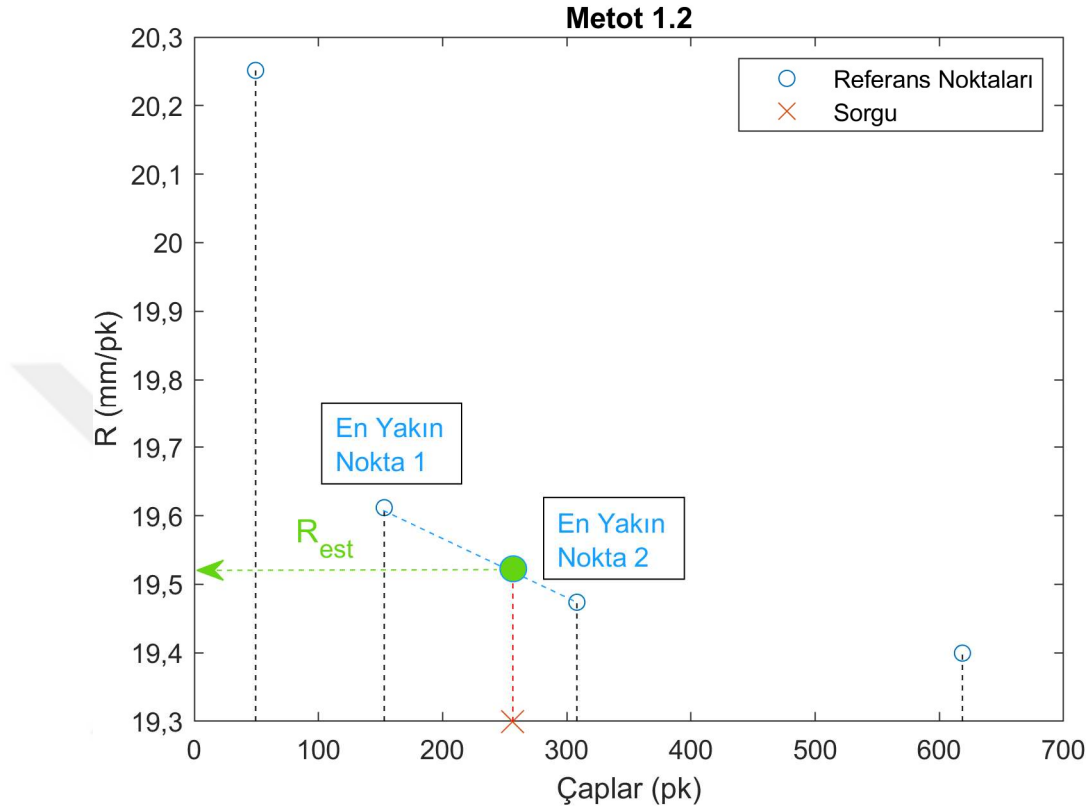
Bu yöntemde, sorgu parçasının piksel tabanlı ölçümü (P_q) ile en yakın referans parçasının piksel değerini karşılaştırarak en uygun referans parçası seçilir. Algoritma, tüm referans parçalarını tarayarak P_q ile referans parçalarının piksel değerleri arasındaki farkı hesaplar ve en küçük farkı veren referans parçasını belirler. En yakın referans parça indeksi (j) şu şekilde bulunur:

$$j = \arg_i \text{ enküçük } |P_q - P_i| \quad (3.9)$$

$$R_{est} = R_j \quad (3.10)$$

Metot 1.2: İkinci metotta sorgu çapı D_{query} , bilinen pikse türünden çaplar ile karşılaştırılır. Sorgu çapının bilinen referanslar arasında olduğu varsayımı yapılarak en yakın iki bilinen referans seçilir. Seçilen referansların R değerleri alınır. Ardından bilinen iki R değeri ve sorgu çapı bilgisi kullanılarak aradeğerleme tabanlı R_{est} tahmini gerçekleştirilir. Tahmin edilen R_{est} , D_{query} ile çarpılarak D_{est} hesaplanır. İlk metottan farklı olarak bu metotta bir modelleme bulunmaktadır. İki R değerinin arasındaki bir

noktayı bulabilmek için aradeğerleme yöntemi kullanılmıştır. Böylelikle ilk metoda göre daha hassas olması amaçlanmıştır. Şekil 3.14'te yöntemin daha iyi anlaşılacağı prosedürü verilmiştir. Sorgu için en yakın R noktalarının belirlenmesinin ardından arada kalan R değerinin tahmini aradeğerleme yapılarak tahmin edilmektedir.



Şekil 3.14 : Metot 1.2 için R tahmin prosedürü.

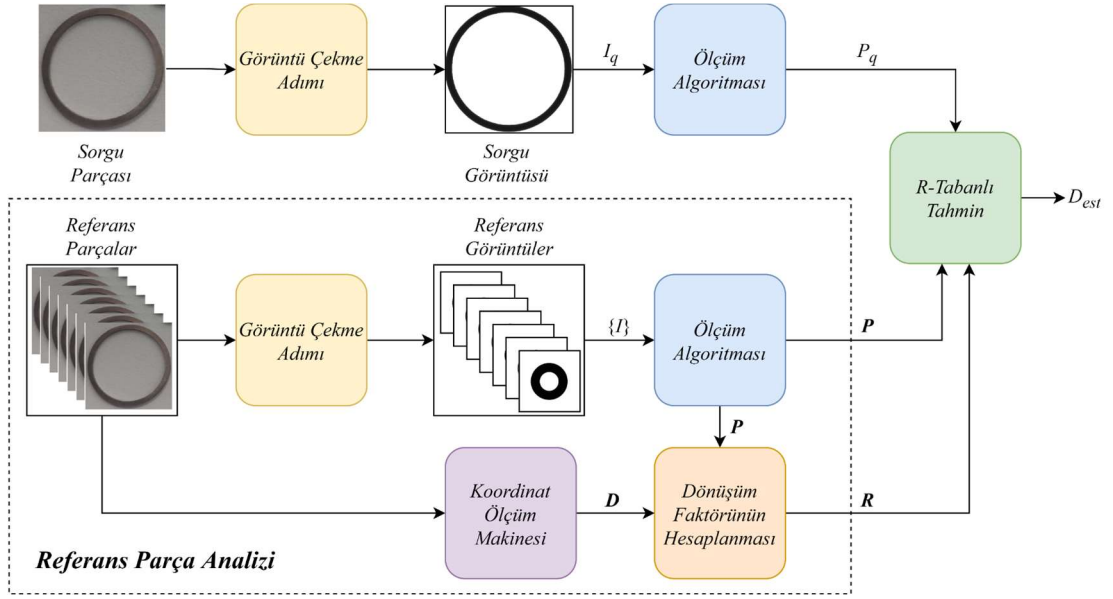
Bu yöntemde, sorgu parçasının piksel değeri (P_q) ile en yakın iki referans piksel değeri (P_i ve P_{i+1}) belirlenir. Daha sonra, bu referans parçalarına karşılık gelen dönüşüm faktörleri (R_i ve R_{i+1}) kullanılarak aradeğerleme yöntemi ile tahmini dönüşüm faktörü (R_{est}) hesaplanır. Aradeğerleme formülü aşağıdaki gibidir:

$$R_{est} = \frac{R_i \cdot (P_{i+1} - P_q) + R_{i+1} \cdot (P_q - P_i)}{(P_{i+1} - P_i)} \quad (3.10)$$

Aradeğerleme ile elde edilen R_{est} değeri kullanılarak tahmini çap şu şekilde hesaplanır:

$$D_{est} = R_{est} \cdot P_q \quad (3.11)$$

Önerilen R-tabanlı yöntemin akış şeması Şekil 3.15'te sunulmuştur.

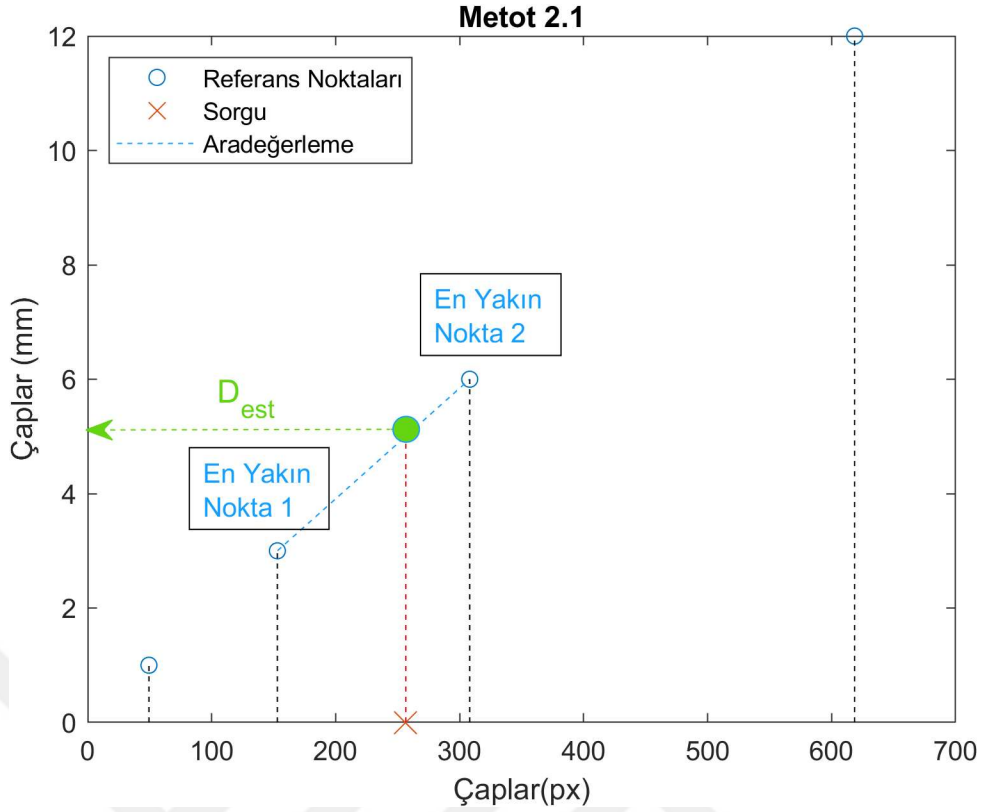


Şekil 3.15 : Dönüşüm faktörü (R) tabanlı yöntem şeması.

3.2.3.2 Piksel tabanlı yaklaşım

Önerilen ikinci yaklaşımda R değerlerini tahmin etmek yerine direkt olarak pikselden mm'ye geçiş yapılabileceği hipotezi düşünülmüştür. R değeri, mm'ye geçilmek için kullanılan yalnızca bir ara değerdir. Bu değeri kullanmak yerine pikselden mm'ye geçiş sağlanabilirse hem R değerine ihtiyaç kalmaz hem de yöntem daha basit hale gelir. İlk yaklaşıma benzer şekilde burada piksel türünden bilinen çap değerleri ve gerçek değerleri kullanılarak bilinmeyen çapın gerçek değeri tahmin edilmektedir. İlk yaklaşıma benzer olarak dört farklı çap modellemeye, beş farklı çap ise test kısmında kullanılmıştır. İlk yaklaşıma benzer olarak burada da üç farklı alt metot önerilmiştir. Bu ikinci yaklaşımda, çap D_{est} doğrudan tahmin edilir ve R değerinin hesaplanmasına gerek kalmadan süreç basitleştirilir. İlk yaklaşıma benzer şekilde, bilinmeyen çapları tahmin etmek için piksel tabanlı ölçümleri (P) temel alan dört referans ölçü kullanılır. Aşağıda önerilen iki tahmin yöntemi açıklanmaktadır:

Metot 2.1: Bu alt metotta, sorgu görüntünün çap değeri D_{query} , bilinen çap değerleriyle karşılaştırılır (Şekil 3.16). Ardından en yakın $D_{px}-D_{mm}$ noktaları belirlenir. Belirlenen noktalar kullanılarak aradeğerleme tabanlı yöntemle D_{query} için direkt olarak D_{est} tahmin edilir.

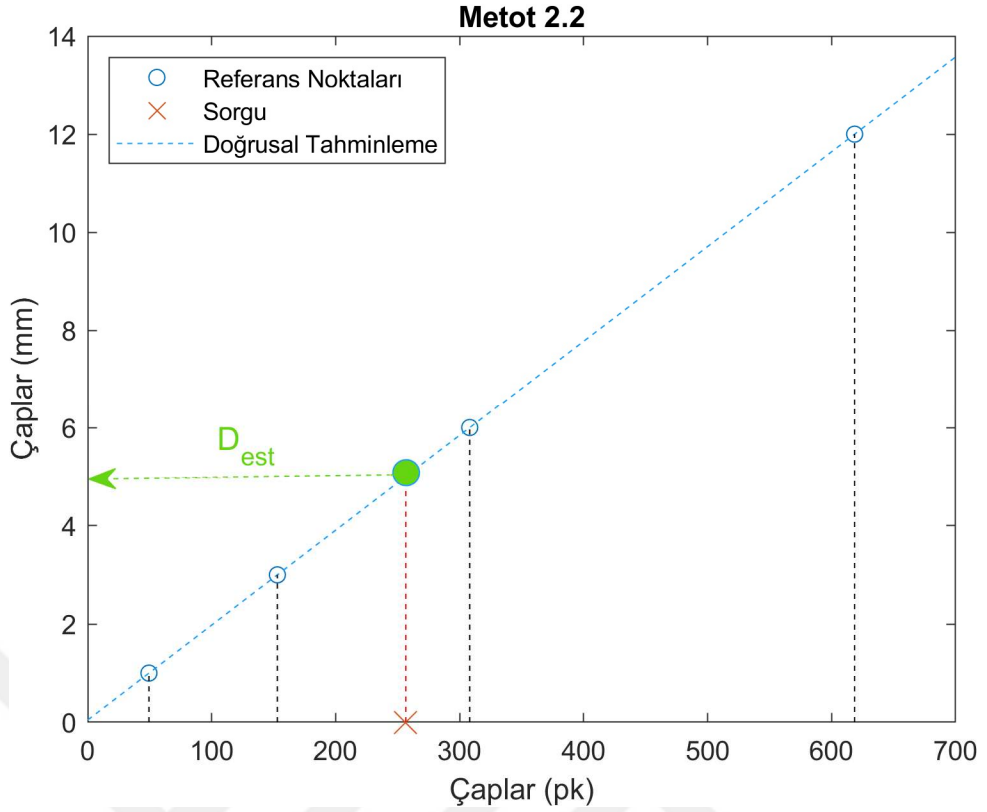


Şekil 3.16 : Metot 2.1 için D_{est} hesaplama yaklaşımı (Doğrusal aradeğerleme).

Bu yöntemde, tahmini çap D_{est} doğrudan hesaplanır. Sorgu parçasının piksel değeri (P_q) ile en yakın iki referans piksel değeri (P_i ve P_{i+1}) belirlenir. Daha sonra, bu referans parçalarının bilinen çap değerleri (D_i ve D_{i+1}) kullanılarak enterpolasyon ile sorgu parçasının tahmini çapı bulunur:

$$D_{est} = \frac{D_i \cdot (P_{i+1} - P_q) + D_{i+1} \cdot (P_q - P_i)}{(P_{i+1} - P_i)}$$

Metot 2.2: Bütün D_{mm} - D_{px} noktaları kullanılarak doğrusal denklem tahmini gerçekleştirilmektedir. Ardından girdi resmi için D_{query} , tahmin edilen denkleme verilerek D_{est} değeri hesaplanmaktadır (Şekil 3.17). R tabanlı yaklaşımda doğrusal denklem tahmini noktaların konumundan ötürü tercih edilmemiştir. Ancak burada D_{mm} - D_{px} noktalarının doğrusal bir eğri oluşturabileceği görülmektedir. Bu sebeple, piksel tabanlı yaklaşımda doğrusal eğri tahmini bir alt metot olarak önerilmiştir.



Şekil 3.17 : Metot 2.2 için D_{est} hesaplama prosedürü (Doğrusal tahminleme).

Bu yöntemde, referans parçalarının piksel tabanlı ölçümleri (P) ile bilinen çapları (D) arasında en küçük kareler yöntemi (Least Squares Method) kullanılarak doğrusal bir ilişki oluşturulur. Doğrusal denklem aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$D = m \cdot P + b$$

Burada, m eğimi (slope), b ise doğrusal denklemin sabit terimidir (intercept). Bu katsayıları belirlemek için öncelikle hem piksel tabanlı ölçümlerin hem de çap değerlerinin ortalama değerleri hesaplanır. Ortalama piksel değeri $\bar{P}$ ve ortalama çap değeri ($\bar{D}$) bulunur. Ardından, eğim (m) hesaplanırken kullanılan pay ve payda sıfır olarak başlatılır. Her bir referans parçası için şu işlemler gerçekleştirilir:

- Piksel değeri ile ortalama piksel değeri arasındaki fark ($P_i - \bar{P}$), çap değeri ile ortalama çap değeri arasındaki fark ($D_i - \bar{D}$) ile çarpılarak paya eklenir.
- Aynı zamanda, piksel değeri ile ortalama piksel değeri arasındaki farkın karesi paydaya eklenir.

Eğim (m), payın paydaya bölünmesiyle hesaplanır:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P}) \cdot (D_i - \bar{D})}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}$$

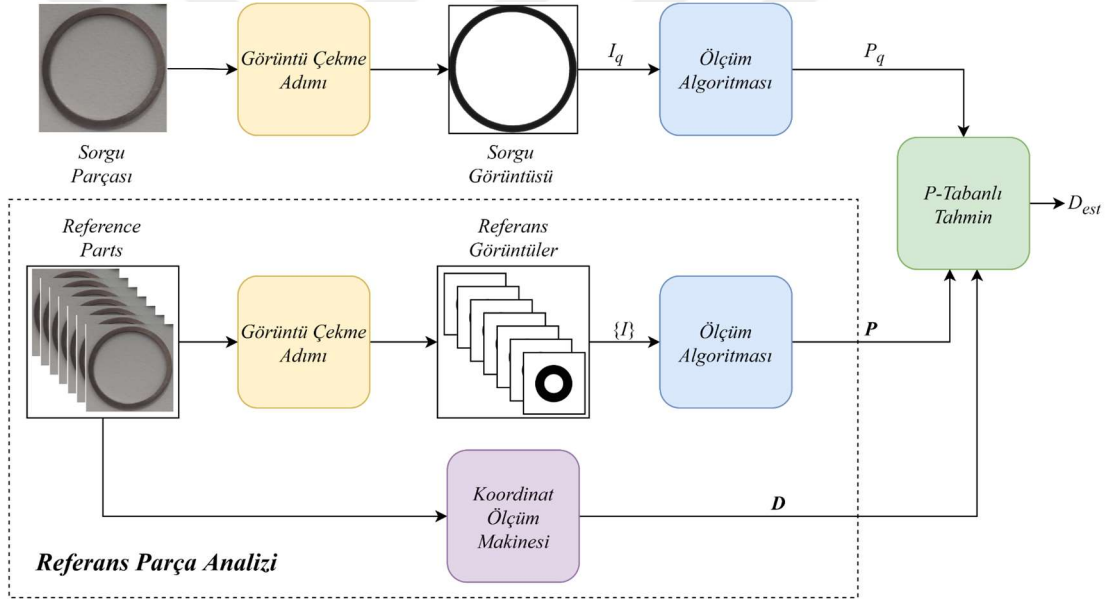
Kesim noktası (b), ortalama değerler yerine konularak şu şekilde hesaplanır:

$$b = \bar{D} - m \cdot \bar{P}$$

Belirlenen m ve b katsayıları kullanılarak, sorgu parçasının piksel tabanlı ölçümüne (P_q) dayalı olarak tahmini çap şu şekilde hesaplanır:

$$D_{est} = m \cdot P_q + b$$

Önerilen P-tabanlı yaklaşım şekil 3.18'te gösterilmektedir.

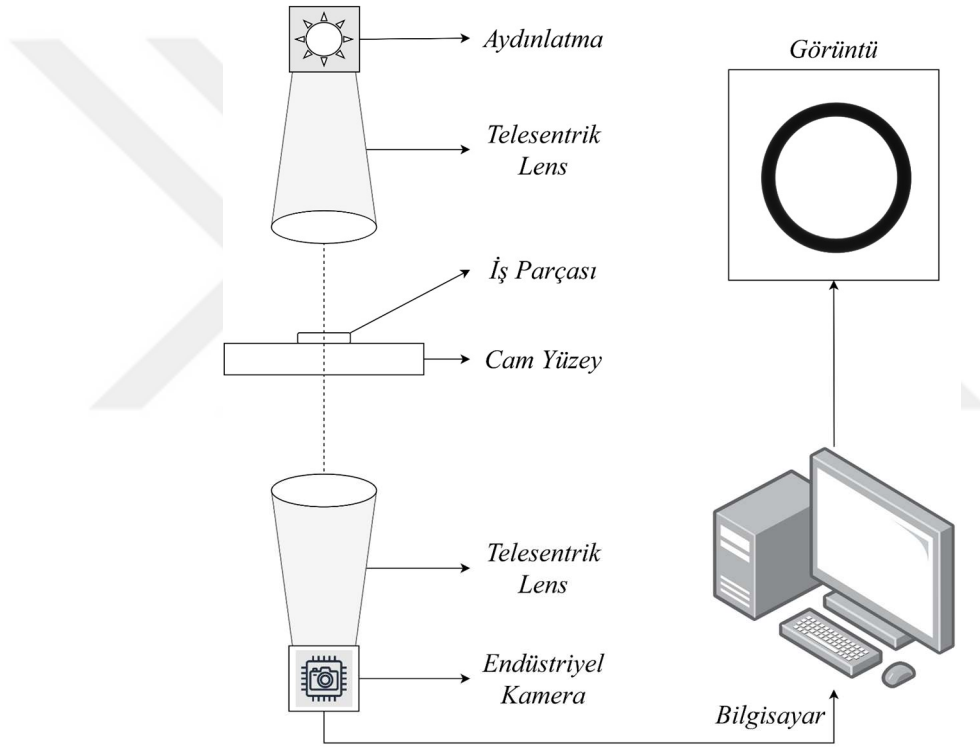


şekil 3.18 : Piksel tabanlı yaklaşım şeması.

3.3 Deney Düzenegi

Bu çalışmada, endüstriyel görüntü işleme uygulamaları için özel olarak tasarlanmış bir deneysel kurulum kullanılmıştır (şekil 3-19). Deneysel kurulum, endüstri tipi bir kamera (Matrix Vision, Sensör IMX256, 5MP, Global Shutter, Grayscale), telesentrik aydınlatma ve telekentrık bir lens içermektedir. Telekentrık lensler, balık gözü etkisini en aza indirerek net görüntüler elde etmemizi sağlarlar. Özellikle hassas ölçüm uygulamalarında, telekentrık lensler, parçanın sınır bölgelerini daha net yakalamak ve

ölçüm doğruluğunu artırmak için endüstriyel uygulamalarda tercih edilir. Parçaların veya referans ölçü aletlerinin lensler arasına yerleştirilebilmesini sağlamak için kamera ile aydınlatma arasına bir cam levha yerleştirilmiştir. Işık, cam plaka aracılığıyla yukarıdan kameraya aktarılmaktadır. Aydınlatma ve kameranın birbirine zıt konumlandırıldığı sistemlerde gölgeleme teknikleri kolayca uygulanabilir. Standart telesentrik lenslerin çalışma prensibinde, lensin çalışma mesafesi sabit kalır. Lensin çalışma mesafesinden farklı bir mesafede konumlandırma yapılırsa, görüntüde odak bulanıklığı meydana gelir. Bu çalışmada ilgili çalışma mesafesi ve kamera hizalaması manuel olarak ayarlanmıştır. Araştırmacılar odaklama işlemini otomatikleştirmek isterlerse, [90] numaralı çalışmaya başvurabilirler.

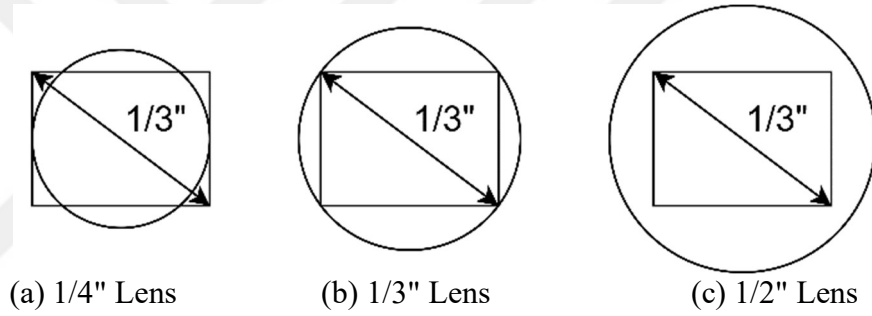


Şekil 3.19 : Deney düzeneği ve düzenekten elde edilen örnek resim.

DeneySEL kurulumla elde edilen örnek görüntü, Şekil 3.19'da verilmiştir. Elde edilen görüntü, gölgeleme tekniği sayesinde beyaz bir arka plana ve siyah bir parça görüntüsüne sahiptir. Bu düzenleme, parça bölgesini daha kolay yakalamayı sağlar. Tüm testler belirtilen kurulumda gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel bir ortamda toz ve yağ gibi istenmeyen gürültüler oluşabilir. Bu nedenle, görüntülerin ölçümler için uygun olduğundan emin olmak için görüntülerin alınması için kullanılan ekipmanlar ölçümlerden önce temizlenmiştir. Bu şekilde, dış faktörlerin etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Mekanik sapmaları önlemek için camın, kameranın ve aydınlatmanın

dikliği manuel olarak ayarlanmıştır. Odaklama için parça sınırının en keskin olduğu pozisyona manuel olarak ayarlanmıştır. Hassas ölçümlerin sağlanması için telesentrik lenslerin uygun şekilde hizalanması ve her test öncesinde test camının temiz olduğundan emin olmak olunması önem arz etmektedir. Ekipmanın hassasiyeti ve ölçülen parçaların küçük boyutu, temiz bir ortamın gerekliliğini ortaya koyduğundan her adımda hassas davranılmaktadır. Parçalara yapışan en ufak bir toz parçası dahi ölçüm sonuçlarını etkilemektedir. Bu nedenle, herhangi bir dış etkiyi en aza indirmek için her test öncesinde temizlik yapılmıştır.

Bir lens, kamera sensör sınıfından daha küçük bir optik sensör sınıfıyla kullanıldığında, lensin sınırları görüntünün kenarlarında görünebilir. Ancak, bu ölçüm sonuçlarını etkilemez; sadece görüş alanını değiştirir. Bu durum Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.20 : Optik sensör sınıfı ve kamera görüş alanı.

Görüntülerden çap ölçmek için ilk adım, görüntü alanına bağlı olarak gözlemlenebilen lens gölgelerinden parçayı ayırmaktır. Parça ayrıldıktan sonra çap tahmini, belirlenen algoritma kullanılarak sınırların tespit edilmeyle gerçekleştirilir. Deneysel kurulumda ölçüm doğruluğunu etkileyebilecek birkaç faktör bulunmaktadır. Bu faktörlerin başında lensin konumu, düz ve temiz bir cam yüzeyinin kullanımı ve lensin hizalanması gelmektedir. Ölçüm için potansiyel etki unsurların kapsamlı bir şekilde incelenmesi, [91] olarak referans verilen çalışmada açıklanmıştır. Bu faktörlerin, güvenilir ve doğru ölçümler elde etmek için dikkate alınması önemlidir. Parçaların görüntülerini yakalamadan önce telesentrik lenslerin çalışma mesafeleri manuel olarak ölçülmüş ve ayarlanmıştır. İnce ayar pozisyonu için, elde edilen görüntülerdeki netlik değerlendirilmiştir. Optimal çalışma mesafesinin belirlenmesinin ardından, deneysel kurulum sabit bir konumda güvenli bir şekilde sabitlenmiştir. Telesentrik lensler, optimal performans için sabit bir çalışma mesafesi gerektirir, bu da hassas

ayarlamaları gerektirir. Ancak, optimal bir çalışma mesafesi belirlendiğinde bile, üretim veya montaj süreçlerinden kaynaklanan çalışma konumunda sapmalar meydana gelebilir. Bu çalışma mesafesindeki kaymalar, net olmayan görüntülere neden olabilir. Bu tezde önerilen yöntem, net ve bulanık görüntülerle etkili bir şekilde çalışabilir, bu da çalışma mesafesindeki değişkenlikleri karşılamada esneklik sağlar. Performansını doğrulamak için, sentetik görüntü testleri yapılmış ve görüntülere Gauss bulanıklık süzgeci uygulanmıştır.

3.4 Veri Seti

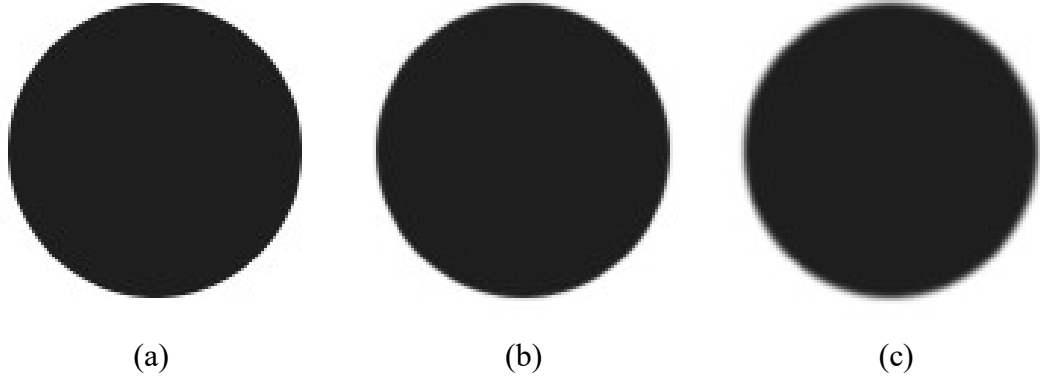
Tez kapsamında iki farklı yöntem önerilmektedir. Her iki yöntemin de test kısmı temel olarak birbiriyle benzer olsa da, testlerin yapılma zamanı ve konseptleri farklı olduğundan farklı veri setleri kullanılmıştır. Dolayısıyla bu bölümde her iki yöntem için de kullanılan veri setleri ayrı başlıklar altında gösterilecektir.

3.4.1 Alt-Piksel sayma tabanlı çap ölçüm algoritması için kullanılan veri seti

Önerilen ilk yöntemin testleri için hem sentetik görüntüler hem de gerçek iş parçalarının görüntüleri kullanılmıştır.

3.4.1.1 Sentetik veri seti

Önerilen yöntem içerisinde süzgeç-birleştirme fonksiyon ikilisi bulunmaktadır. Gerçek veri setiyle test yapılmadan önce bu ikilinin en iyi çalışan versiyonunun belirlenebilmesi için sentetik veri seti üzerinde testler planlanmıştır. Sentetik veri setinin oluşturulabilmesi için [76] çalışmasından faydalanılmıştır. Sentetik görüntü olarak 25, 50, 100, 200, 400, 800 ve 1600 çapa sahip daire parçaları oluşturulmuştur. Oluşturulan sentetik görüntüler mükemmel daireler olduğundan herhangi bir odak bozukluğu etkisi bulunmamaktadır. Yapılan testlerin daha gerçekçi olması için görüntülere 0,5 ve 1 standart sapmaya sahip gauss bulanıklaştırma fitresi uygulanmıştır (Şekil 3.21).

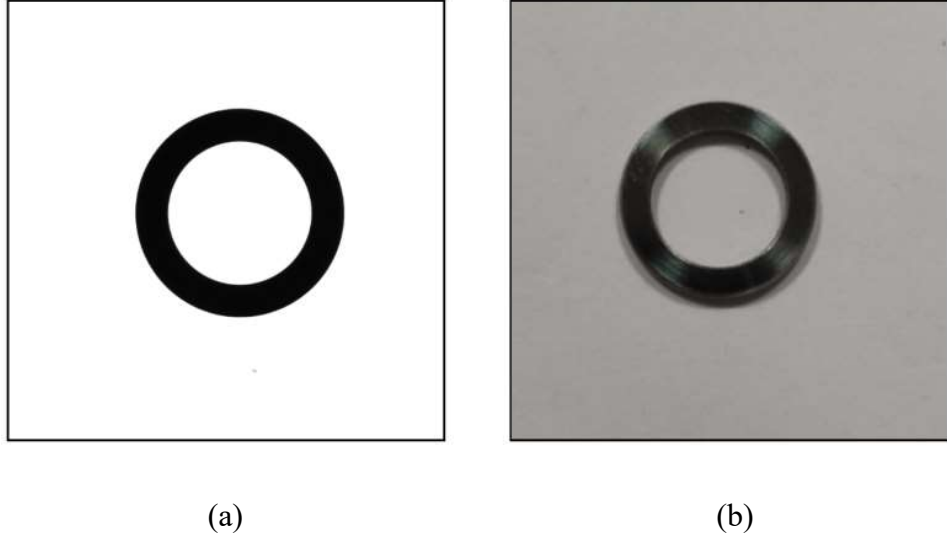


Şekil 3.21 : Sentetik görüntüler. (a) Gauss süzgeç uygulanmamış. (b) 0.5 standart sapmalı gauss süzgeç uygulanmış. (c) 1 standart sapmalı gauss süzgeç uygulanmış.

Oluşturulan çap değerlerinin 25-1600 arasında olmasının temel sebebi, önerilen algoritmanın hem büyük hem de küçük çaplardaki performansının değerlendirilmesidir. Büyük çaplarda, hesaba katılan piksel sayısı fazla olduğundan ölçüm doğruluğu yüksek olmaktadır. Ancak küçük çaplarda algoritmaların çalışma performansları algoritmaya bağlı olarak değişkenlik gösterebilir. Bunu daha net görebilmek açısından bu tez çalışmasında 25-1600 piksel aralığında çaplara sahip dairelerde testler gerçekleştirilmiştir.

3.4.1.2 İş parçalarından oluşan veri seti

Yöntemin gerçek uygulamalardaki performansını kanıtlamak açısından gerçek iş parçaları kullanılmıştır. Böylelikle hem kamera sisteminden gelen hem de parçadan gelen değişkenlikler de ölçüme etki etmesiyle, yöntemlerin karşılaştırılmasının daha adil olması sağlanmaktadır. İlk yöntem için 21 adet yüzük tipli pul parçası temin edilmiştir. Kullanılan iş parçası ve örnek görüntüsü Şekil 3.22’de verilmiştir. Bu tez kapsamında yalnızca dış çap için araştırma yapılmaktadır. Ancak iç çap ölçümü için oluşturulacak algoritma ve yöntem benzer olacağından araştırmacılar önerilen yöntemi iç çap için de uygulayabilirler. Veri setindeki iç parçalarının dış çapları yaklaşık olarak 13.9 mm seviyesindedir. Her bir iş parçasının gerçek değerinin belirlenebilmesi için Koordinat Ölçüm Makinesi adı verilen CMM cihazı kullanılmıştır. CMM cihazları uluslararası olarak kabul edilen hassas ölçüm makineleridir. Parçaları dokunma yöntemiyle ölçmektedirler.



Şekil 3.22 : Örnek iş parçası (a) ve deney düzeneğinden alınan görüntüsü (b).

3.4.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı

Tez kapsamında önerilen ikinci yöntem, kullanılan kameralı sistemin farklı çaplara sahip parçaları ölçerken gereken referans masterları ortadan kaldıracak bir yaklaşım sunmaktadır. En az iki değeri bilinen referans master parçası ile kamera görüş alanına sığan bütün parçaların çaplarının düşük hata ile ölçülmesi mümkün hale gelmektedir. Dolayısıyla önerilen yaklaşımın testlerini gerçekleştirmek için farklı çaplara sahip parçalar gerekmektedir. Bu sebeple tez çalışmasının bu kısmında üç farklı veri seti tercih edilmiştir. İlk veri sentetik görüntülerden, ikincisi gerçek cam referans masterlarından ve üçüncüsü ise iş parçalarından oluşmaktadır. Her biri sırasıyla bölümler halinde anlatılmıştır.

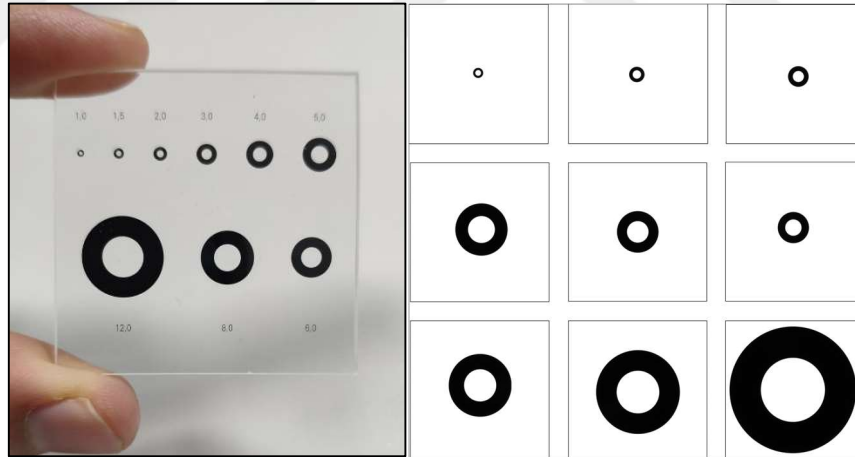
3.4.2.1 Sentetik veri seti

Bu tez çalışmasının ikinci önerilen yöntemi için ilk olarak sentetik veri setiyle denemeler gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan sentetik görüntülerin çapları piksel türündendir. Onların çaplarının mm türünden karşılığı olmadığı için önerilen yöntem direkt olarak uygulanamamaktadır. Ancak varsayımsal olarak ve çaplarla orantılı olacak şekilde her sentetik görüntü için mm türünden bir çap değeri belirlenmiştir. Böylelikle R-Çap eğrisi sentetik görüntüler için oluşturulabilmektedir.

Sentetik görüntüler [76] çalışması kullanılarak oluşturulmuştur. Çapları 50, 75, 100, 150, 200 250, 300, 400 ve 600 piksel olacak şekilde üretilmiştir. Ek olarak odak bozukluğunu sağlayabilmek için standart sapma (σ) değeri 1,5 olacak şekilde gauss bulanıklaştırma süzgeci uygulanmıştır. Her bir sentetik görüntü belirlenen çap ölçüm algoritmalarıyla ölçülmüştür. Elde edilen ölçümler ve varsayımsal çaplar kullanılarak R değerleri hesaplanmıştır.

3.4.2.2 Cam veri seti

Önerilen yaklaşımın başarısını göstermek için bu çalışmada öncelikle referans camı kullanılmıştır. Referans camı sertifikalı ve özel olarak üretilmiştir. Sertifikalı referans camında, 1 ila 12 mm arasında değişen ve değeri bilinen çap değerlerine sahip dokuz daire bulunmaktadır (Şekil 3.23). Her dairenin belirsizliği 0,1 μ m seviyesindedir. Görüntüler alınırken, cam üzerinde bulunan her daire kameranın merkez noktasında manuel olarak yerleştirilerek görüntüler alınmıştır. Görüntülerde istenmeyen gürültüler ve hedef çap dışında diğer daireler, bağlı bileşen analizi kullanılarak giderilmiştir.



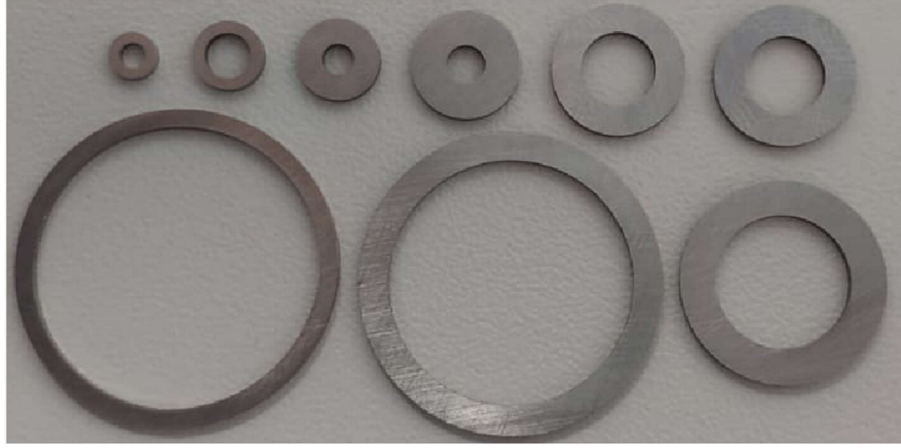
Şekil 3.23 : Referans cam master ve elde edilen görüntüler

Görüntülerin elde edilmesi sırasında, her bir görüntü için referans camı deney düzeneği üzerine yerleştirilip, görüntüsü alınıp ardından kamera altından alınmıştır. Burada amaçlanan durum sürekli aynı noktada ölçüm almak değil tekrarlanabilirlik durumunda ortaya çıkabilecek etkilerin de sisteme dahil olmasını sağlamaktır. Bu sayede önerilen yaklaşımın sistemden gelen bütün etkileri giderdiği gösterilmiştir.

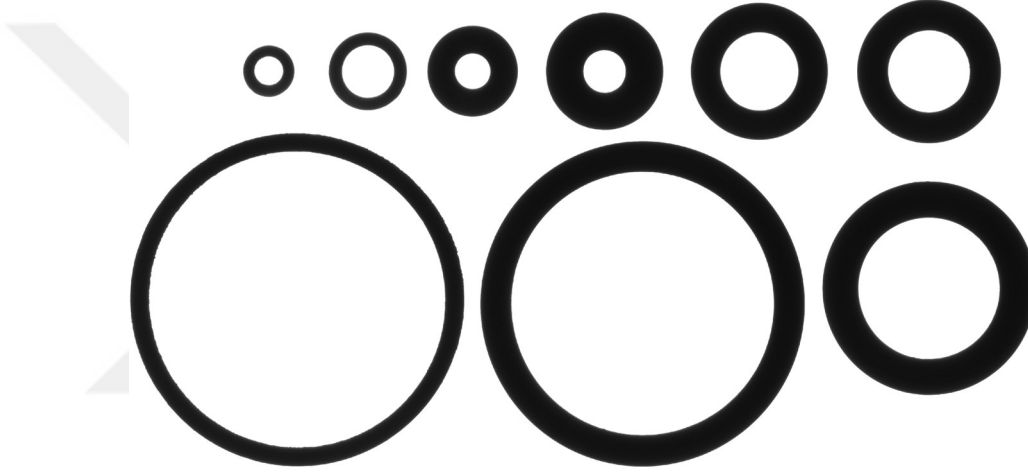
Harici gürültüyü azaltmak ve tekrarlanabilirliği artırmak için her çap için on kez görüntü çekilmiştir. Ardından, yakalanan görüntülerden çap değerleri piksel cinsinden tahmin edilmiş ve elde edilen değerlerin ortalaması, mekanik değişkenliği ortadan kaldırmak için hesaplanmıştır. Toplamda doksan görüntü elde edilmiş ve bu görüntüler test ve eğitim amaçları için iki ayrı sete bölünmüştür. Özellikle, önerilen yaklaşımların modellenmesi (eğitim) için 1, 3, 6 ve 12 mm çaplar kullanılırken, test aşamasında 1,5; 2, 4, 5 ve 8 mm çaplar kullanılmıştır.

3.4.2.3 Metal veri seti

Algoritmaların daha kapsamlı bir şekilde test edilmesini sağlamak için gerçek parçalardan oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur (Şekil 3.24). Farklı çaplarda (hepsi disk formunda) dokuz parça elde edilmiştir. Her bir parça, bir Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) kullanılarak ölçüldü ve gerçek boyutları belirlenmiştir. CMM cihazının ölçüm belirsizliği 1 μ m'dir. Ancak, parçalardaki varyasyonlar CMM cihazının sapmasını artırabilir. Örneğin, bir parça konik şekilli ise, CMM cihazının yaklaşık ± 5 μ m sapmasına neden olabilir. Ancak, önerilen algoritmanın sağladığı iyileşme çok daha büyük olduğu için, bu sapmalar göz ardı edilebilir. Parçaların kalınlığından kaynaklanan sapmaların olmadığından emin olmak için, tüm parçalar lebleme işleminden geçirilmiştir. İşlemden sonra, tüm parçaların kalınlığı $0,9 \pm 0,01$ mm'ye düşürülmüştür. Cam testi gibi, parçalar eğitim ve test setlerine ayrılmıştır. Dört parça eğitim setine ayrılmış ve beş parça test setine atanmıştır. Görüntü yakalama sırasında, her parçanın görüntüsü cam referansında olduğu gibi on kez yakalanmıştır. Tekrarlanabilirlik hatasını azaltmak için elde edilen ölçüm değerlerinin ortalaması hesaplanmıştır. Her parça, görüntü yakalanmadan önce kurulumdan çıkarıldı ve yeniden konumlandırılmıştır. Toplamda, doksan görüntü elde edilmiştir.



(a)



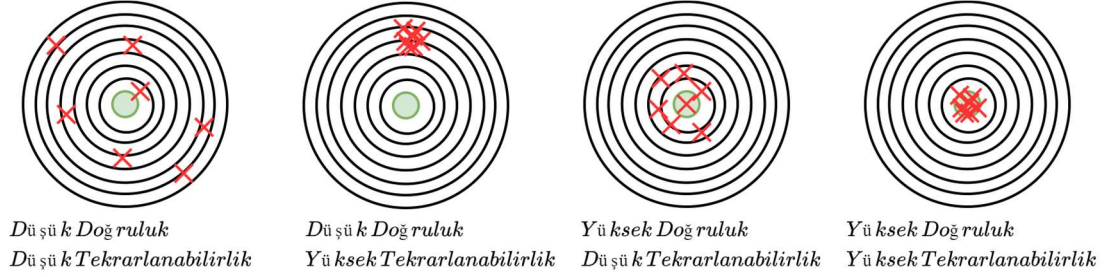
(b)

Şekil 3.24 : Metal iş parçaları (a) ve elde edilen görüntüleri (b).

3.5 Tekrarlanabilirlik ve Doğruluk

Ölçüm sistemlerinin performansını değerlendirmek için hem tekrarlanabilirlik hem de doğruluk testleri yapılır. Tekrarlanabilirlik testi, aynı parçanın aynı koşullar altında birden çok kez ölçülmesini içerir ve ölçüm sonuçları arasındaki farkları analiz eder. Yüksek bir tekrarlanabilirlik değeri, ölçüm sistemi/yönteminin tutarlı olduğunu ve minimal değişimle güvenilir sonuçlar ürettiğini gösterir. Diğer yandan, doğruluk testi, ölçülen değerlerin gerçek değerlere ne kadar yakın olduğunu değerlendirir. Gerçek değerler genellikle güvenilir ölçüm teknikleri veya referans standartlar aracılığıyla elde edilir. Ölçülen değerlerin gerçek değerlere göre karşılaştırılmasıyla, ölçüm sistemi/yönteminin doğruluğu değerlendirilebilir. Yüksek bir doğruluk düzeyi,

sistemin/yöntemin gerçek değerlere yakın ölçümler sağladığını gösterir. Hem tekrarlanabilirlik hem de doğruluk, bir ölçüm sisteminin başarısını değerlendirmede önemli ölçütlerdir. Yüksek tekrarlanabilirlik ve doğruluğa sahip bir ölçüm sistemi, verilen parçalar için tutarlı ve doğru ölçümler sağlayarak güvenilir ve hassas olarak kabul edilir.



Şekil 3.25 : Doğruluk ve tekrarlanabilirlik terimleri. Yeşil merkez gerçek doğruyu, kırmızı çarpılar ise ölçülen değerleri göstermektedir.

4. BULGULAR

Tez kapsamında önerilen iki yöntem için ayrı ayrı testler gerçekleştirilmiştir. Bu sebepten ötürü tezin bu kısmında her iki algoritma için ayrı başlıklar altında sonuçlar sunulacak ve değerlendirilecektir. İlk olarak alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm sonuçları anlatılacak, ardından da ikinci önerilen yöntem için elde edilen sonuçlar detaylıca sunulacaktır.

4.1 Alt-Piksel Sayma Tabanlı Ölçüm Algoritması İçin Elde Edilen Sonuçlar

Önerilen alt-piksel sayma tabanlı çap ölçüm yönteminde, karışım süzgeci ve kenar bulma süzgeci seçimi, otomatik eşik seçimi adımının performansını etkileyebilir. Bu nedenle, en iyi süzgeç türünü belirlemek için bir iç test gerçekleştirilmiştir. En iyi süzgeç türü belirlendikten sonra, hem doğruluk hem de hız açısından mevcut literatür ile karşılaştırma yapılmıştır. İç test sırasında, en iyi sonuçları veren kombinasyonu belirlemek için çeşitli karışım fonksiyonları ve kenar bulma süzgeçleri değerlendirilmiştir. Her kombinasyonun performansı, tekrarlanabilirlik ve doğruluk metrikleri temel alınarak gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır.

İç testin ardından, önerilen yöntemin mevcut tekniklerle karşılaştırılması için bir literatür karşılaştırması yapılmıştır. Karşılaştırma, ölçümlerin doğruluğu ve algoritmanın hızı üzerinde odaklanmıştır. Önerilen yöntemi literatürde mevcut diğer yaklaşımlarla karşılaştırarak, önerilen yöntemin güçlü ve zayıf yönleri belirlenmiştir. İç test ve literatür karşılaştırması sonuçları ve bulguları, önerilen yöntemin etkinliği ve verimliliği hakkında ön bilgi sağlamaktadır. Bu sonuçlar, çalışmanın sonraki bölümlerinde daha detaylı olarak tartışılacak ve analiz edilecektir.

4.1.1 İç değerlendirme

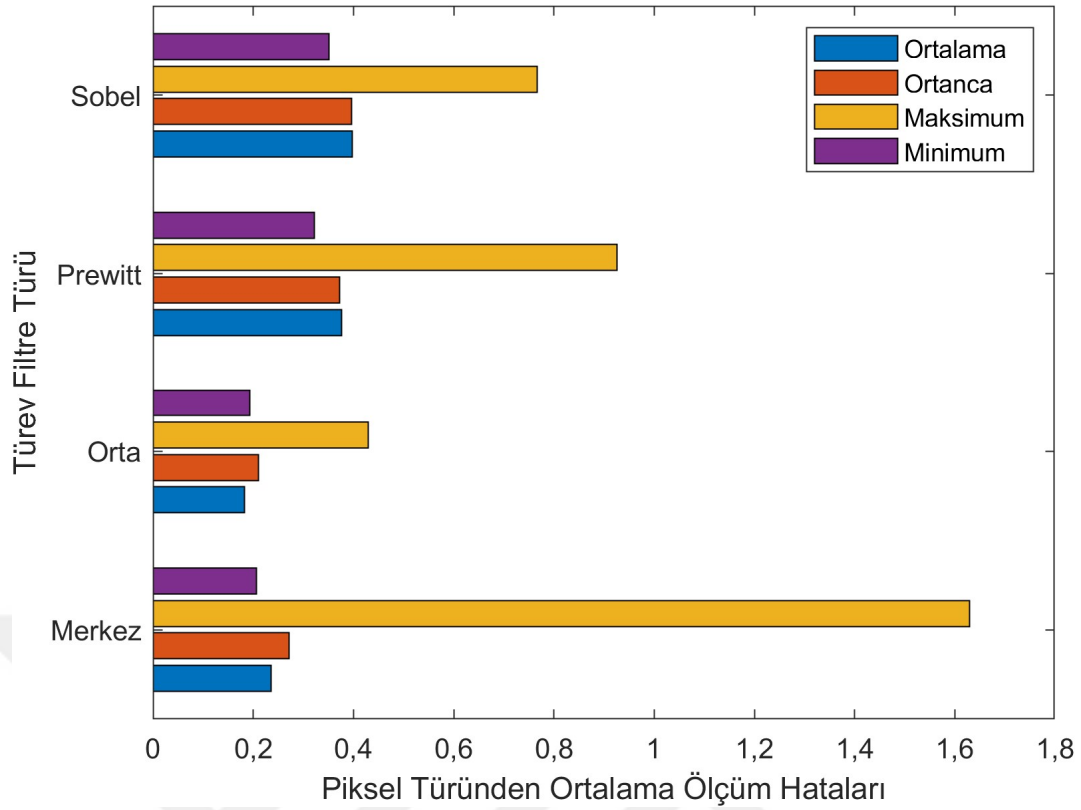
İç testte, önerilen yöntemin çeşitli koşullar altında değerlendirilmesi için sentetik görüntüler kullanılmıştır. Sentetik görüntüler, farklı karışım fonksiyonları, kenar algılama yöntemleri ve manuel veya otomatik n değerleri kullanılarak işlenmiştir. Odak bozukluğunu görüntüler üzerinde uygulayabilmek için standart sapması 0,5 ve

1 olan Gauss bulanıklaştırma süzgeci uygulanmıştır. 100, 200, 400, 800 ve 1600 piksel çaplarında sentetik görüntüler oluşturulmuştur. Süzgeçler ve görüntülerin her biri için test yapıldığı düşünüldüğünde toplamda 80 adet sonuç elde edilmiştir. Her test için ortalama mutlak hatalar hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Bu değerlendirme, önerilen yöntemin farklı bulanıklık seviyelerine ve çaplara sahip sentetik görüntüleri ölçme performansını değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Çizelge 4.1 : Önerilen yöntem için sentetik görüntülerden elde edilen ortalama mutlak hatalar(piksel).

		Orta	Merkez	Sobel	Prewitt
Ortalama	n=3	0,198	0,336	0,406	0,383
	n=5	0,221	0,319	0,462	0,384
	n=7	0,223	0,197	0,300	0,280
	n=9	0,216	0,251	0,280	0,332
	n=oto	0,182	0,236	0,397	0,376
Ortanca	n=3	0,195	0,347	0,392	0,400
	n=5	0,234	0,307	0,502	0,433
	n=7	0,218	0,299	0,378	0,331
	n=9	0,230	0,258	0,230	0,351
	n=oto	0,211	0,271	0,396	0,373
En Büyük	n=3	0,453	0,631	0,729	0,820
	n=5	0,684	0,882	0,941	1,002
	n=7	0,848	1,226	0,941	1,017
	n=9	0,946	1,313	0,985	1,129
	n=oto	0,429	1,629	0,766	0,926
En Büyük /En Küçük	n=3	0,226	0,360	0,424	0,371
	n=5	0,226	0,340	0,392	0,375
	n=7	0,191	0,198	0,305	0,267
	n=9	0,203	0,303	0,318	0,301
	n=oto	0,193	0,207	0,351	0,322

İç değerlendirmenin sonuçları, önerilen yöntemde ortalama karışım fonksiyonu, ara kenar süzgeci ve otomatik n değeri seçimi kullanıldığında en iyi performansın elde edildiğini göstermektedir. Ara kenar süzgeci, çoğu durumda diğer kenar algılama yöntemlerine üstünlük sağlamıştır (Şekil 4-1'de görüldüğü gibi). Ayrıca, önerilen otomatik n değeri seçimi yöntemi, hemen hemen tüm senaryolarda diğer yaklaşımlara göre avantajlı olduğunu kanıtlamıştır. Otomatik n değeri seçimi uygulaması, çeşitli süzgeç tiplerinde yüksek başarı oranlarına yol açmıştır. Performans ve sağlamlık kombinasyonunu göz önünde bulundurarak, ara süzgeç ile otomatik n değeri seçimi, gerçek görüntülerle yapılan ileri testler için seçilmiştir. Bu bulgular, önerilen yöntemin gerçek nesneleri ölçme konusunda etkili ve güvenilir olduğunu önermektedir.



Şekil 4.1 : Otomatik n değeri belirleme algoritması kullanılarak elde edilen iç değerlendirme için ortalama mutlak hata değerleri.

4.1.2 Karşılaştırma

Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için, sentetik ve gerçek görüntülerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu çalışmada karşılaştırma için literatürdeki en iyi alt piksel teknikleri seçilmiştir. Literatürde, ilk olarak alt piksel tabanlı kenar algılama algoritması, kenar noktalarını hassas bir şekilde tespit etmek için çalıştırılır, ardından halka parçalarının çapları, daire uyum algoritması kullanılarak hesaplanır. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için, sentetik ve gerçek görüntülerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Karşılaştırma için, iki alt piksel tabanlı kenar algılama algoritması ([38] ve [76]), ayrıca [92]te tanımlanan çember uydurma algoritması kullanılarak halka parçalarının çapları hesaplanmıştır. [78]'den gelen çap bulma algoritması için eşik değeri manuel olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmada, önerilen yöntemin sentetik görüntülerde en iyi sonuçları veren iki süzgeç türü kullanılmıştır. Önerilen yöntem, alan hesabında gri piksel bilgilerini içerdiğinden, karşılaştırmada "Alt Piksel Sayma Yöntemi" olarak adlandırılmıştır.

Önerilen yöntem için seçilen karışım fonksiyonu ortalama süzgeç olarak seçilmiştir. Bu karşılaştırmaları yaparak, önerilen yöntemin, kenar algılama ve çap tahmini için alt piksel teknikleri kullanılan en son teknolojilere karşı performansı ve doğruluğu değerlendirilmektedir.

4.1.2.1 Sentetik görüntü testi

Tüm yöntemlerin performansı, önerilen yöntem de dahil olmak üzere, 15 sentetik görüntü üzerinde değerlendirilmiştir. Görüntüler, farklı odak bozukluğu seviyelerini simüle etmek için sigma (σ) değerleri 0, 0,5 ve 1 kullanılarak Gauss bulanıklık süzgecinden geçirilmiştir. Bu testlerden elde edilen ortalama sonuçlar Çizelge 4-2'de sunulmuştur. Önerilen yöntem, Ortalama Mutlak Hata (OMH) açısından diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında ortalama %23 performans iyileştirmesi göstermiştir. Daha detaylı olarak, önerilen yöntem, yedi çaptan dördünde diğer yöntemleri geride bırakmıştır. Dahası, önerilen yaklaşım, 25px ve 50px gibi daha küçük çaplı parçalarda dikkate değer başarılar göstermiştir. Bu bulgular, önerilen yöntemin odak tabanlı bozukluklarla başa çıkma ve sentetik görüntü senaryolarında doğru ölçümler elde etme konusundaki etkinliğini vurgulamaktadır.

Çizelge 4.2 : Sentetik görüntüler için piksel türünden ortalama mutlak yüzdesel hata ve ortalama mutlak hata sonuçları

Çaplar	OMYH Piksel(%)				OMH Piksel			
	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
25 px	0,47840	0,62200	0,19533	0,03843	0,1196	0,1555	0,0488	0,0096
50 px	0,20782	0,15047	0,03770	0,00797	0,1039	0,0752	0,0189	0,0040
100 px	0,07860	0,03720	0,00721	0,00824	0,0786	0,0372	0,0072	0,0082
200 px	0,06111	0,00925	0,00233	0,00119	0,1222	0,0185	0,0047	0,0024
400 px	0,02651	0,00231	0,00026	0,00713	0,1060	0,0092	0,0010	0,0285
800 px	0,01401	0,00060	0,00006	0,00004	0,1121	0,0048	0,0005	0,0003
1600 px	0,00654	0,00016	0,00005	0,00084	0,1047	0,0025	0,0008	0,0134
Ortalama	0,12471	0,11743	0,03471	0,00912	0,10673	0,04327	0,01170	0,00949

Sanayi ortamında elde edilen görüntüler için en büyük üst eşik değeri olarak varsayılan değer olan 250 seçilmiştir. Bunun sebebi, 250'nin üzerindeki yoğunluklarda, sensör ve diğer hataların ölçüm sonucunda farklılıklara neden olabileceğidir. Bir görüntünün arka plan yoğunluğunun genellikle 255 değerine sahip olduğu, ancak ışık miktarına veya mekanik konumlandırmaya bağlı olarak bazen (olasılığı düşük) 255 ile 250 arasında bir değer alabileceği unutulmamalıdır. Bu nedenle, parçaların en büyük eşik değeri için varsayılan değer 250 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, sentetik

görüntüler bu durumdan etkilenmezler. Sentetik görüntülerde odak bozukluğu veya doğruluk sorunu olmadığından, en büyük eşik değeri olarak 255 yerine 250 seçilebilir. Bu nedenle, 250 olan eşik değeri 255 olarak değiştirilmiştir. Sentetik görüntüler üzerinde yapılan testler, önerilen yaklaşımın etkinliğini göstermektedir. Ancak, gerçek görüntüler kullanılarak yapılan daha fazla deney, performansının daha kesin bir şekilde değerlendirilmesini sağlayacaktır. Önerilen algoritma özellikle endüstriyel bir ortamda yakalanan görüntüler üzerinde yapılan araştırmalara dayanarak tasarlanmıştır. Bu nedenle, bir sonraki bölüm, algoritmanın gerçek görüntüler kullanılarak test edilmesine odaklanacak ve performansının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyacaktır.

4.1.2.2 Gerçek iş parçalarıyla yapılan testler

Gerçek görüntü test aşamasında, endüstriyel bir kurulumda özel telesentrik lensler kullanılarak toplamda yirmi parça elde edilmiştir. Her parçanın görüntüsü, tekrarlanabilirliği değerlendirmek için onar kez alınmıştır. Görüntüler alınırken parçanın konumu yaklaşık olarak hep aynı noktaya gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Böylelikle gerçek ortam şartları sağlanmıştır. Elde edilen görüntüler üzerinde hem tekrarlanabilirlik hem de doğruluk testleri gerçekleştirilmiştir. Tekrarlanabilirlik testinde, her bir parça için onar görüntü analiz edilmiştir (Çizelge 4.3).

Tekrarlanabilirlik analizinde, her parçanın on görüntüsünden elde edilen en büyük ve en küçük ölçüm değerleri karşılaştırılmıştır. En küçük ve en büyük değerler arasındaki fark, karşılaştırma için bir ölçüt olarak kabul edilen tekrarlanabilirlik aralığı olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntem [76] yöntemini geride bırakmakta, [38] yöntemiyle benzer performans göstermekte ve [78] yönteminin sadece 0,11 mikron gerisinde kalmaktadır. Ancak, OMH ve OMYH değerlerini incelediğimizde, önerilen yöntemin [78] yöntemini geride bıraktığı açık hale gelmektedir. Bu nedenle, [78] yönteminin tekrarlanabilirlik sonuçlarında daha iyi performans gösterdiği görünse de, aslında gerçek değere daha uzak ölçümler üretmektedir. [78] yöntemi, düşük doğruluk, yüksek tekrarlanabilirlik senaryosunu temsil etmektedir. Öte yandan, önerilen yöntem, tekrarlanabilirlikte diğer yöntemlere yakın bir performans sergilerken, diğer yöntemlere kıyasla üstün doğruluk elde etmektedir.

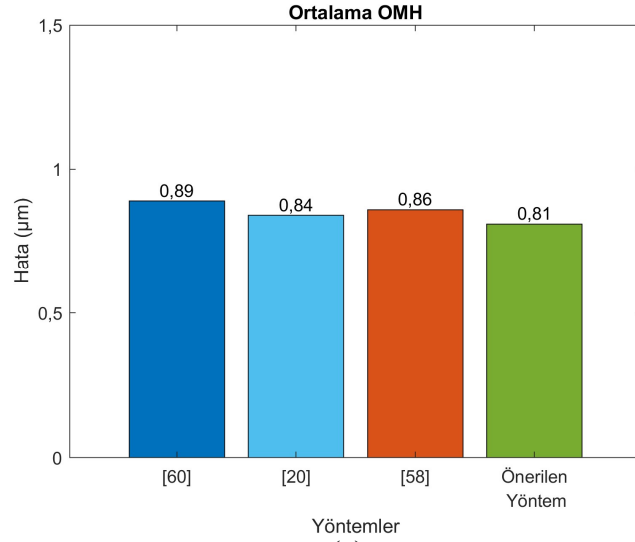
Çizelge 4.3 : Çap ölçüm sonuçları için tekrarlanabilirlik aralığı (μm).

Parça Numarası	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
1	2,31	2,23	2,42	2,31
2	3,01	3,58	3,81	3,37
3	1,02	1,27	1,37	1,47
4	1,35	1,78	1,90	2,36
5	1,56	1,56	1,66	1,51
6	2,13	2,19	2,21	2,01
7	1,25	1,07	1,11	1,15
8	1,37	1,50	1,58	1,70
9	1,29	1,49	1,64	1,73
10	1,56	2,03	2,23	1,58
11	1,39	1,45	1,45	1,26
12	2,09	2,03	2,11	2,17
13	2,40	2,27	2,19	2,33
14	4,71	5,04	5,37	4,62
15	3,20	2,70	2,89	2,53
16	1,21	1,35	1,39	1,67
17	1,95	2,07	2,21	1,87
18	2,68	2,85	3,09	2,76
19	1,68	1,86	1,99	1,83
20	4,49	4,46	4,73	4,62
Ortalama	2,13	2,24	2,37	2,24

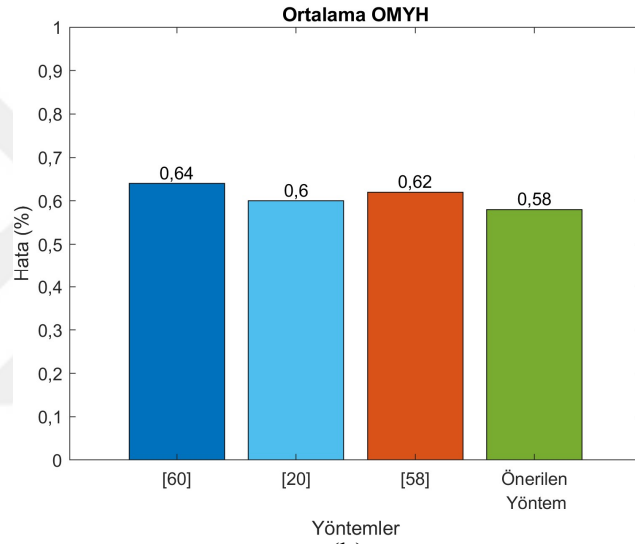
Doğruluk testi için 21 parça kullanılmıştır, bunlardan biri kalibrasyon adımı için seçilmiş ve kalan 20'si test için kullanılmıştır. Her parçanın görüntüsü on kez alınmış ve bu da toplamda 200 görüntünün değerlendirilmesini sağlamıştır. Ölçüm yöntemlerinin doğruluğunu değerlendirmek için ortalama mutlak hata hesaplanmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4.4 : Karşılaştırma sonuçları. OMH: Ortalama mutlak hata (μm), OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata ($\times 10^5$), YSS: Yüzdesel standart sapma ($\times 10^4$). Ortalama süzgeç, karışım süzgeci olarak seçilmiştir.

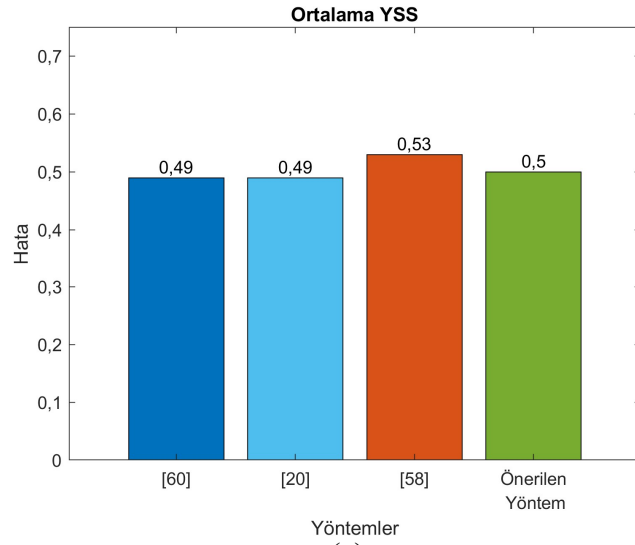
Parça Numarası	[60]			[20]			[58]			Önerilen Yöntem		
	OMH	OMYH	YSS	OMH	OMYH	YSS	OMH	OMYH	YSS	OMH	OMYH	YSS
1	1,47	1,06	0,51	1,54	1,11	0,51	1,56	1,12	0,55	1,41	1,01	0,51
2	1,27	0,91	0,71	1,23	0,88	0,82	1,27	0,91	0,87	1,05	0,76	0,81
3	1,30	0,94	0,25	1,22	0,87	0,29	1,23	0,88	0,31	1,17	0,84	0,30
4	1,41	1,01	0,35	1,26	0,91	0,40	1,28	0,92	0,44	1,19	0,86	0,51
5	1,21	0,87	0,39	1,18	0,85	0,37	1,21	0,87	0,39	1,07	0,77	0,41
6	0,52	0,38	0,45	0,41	0,30	0,42	0,43	0,31	0,42	0,43	0,31	0,41
7	0,61	0,44	0,28	0,55	0,40	0,23	0,52	0,38	0,25	0,61	0,44	0,26
8	0,58	0,42	0,35	0,56	0,40	0,37	0,60	0,43	0,40	0,65	0,46	0,44
9	0,49	0,35	0,34	0,49	0,35	0,36	0,53	0,38	0,38	0,50	0,36	0,42
10	0,51	0,37	0,35	0,50	0,36	0,40	0,50	0,36	0,44	0,39	0,28	0,32
11	0,48	0,35	0,29	0,43	0,31	0,29	0,46	0,33	0,29	0,43	0,31	0,26
12	0,67	0,48	0,50	0,62	0,45	0,50	0,65	0,47	0,53	0,65	0,46	0,55
13	0,78	0,56	0,64	0,71	0,51	0,58	0,74	0,53	0,60	0,73	0,53	0,59
14	1,19	0,86	1,00	1,28	0,92	1,01	1,34	0,96	1,08	1,19	0,86	0,97
15	0,87	0,62	0,77	0,71	0,51	0,65	0,77	0,56	0,70	0,70	0,50	0,61
16	0,34	0,25	0,28	0,33	0,24	0,29	0,34	0,25	0,30	0,40	0,29	0,35
17	0,56	0,40	0,47	0,44	0,32	0,44	0,47	0,34	0,49	0,42	0,30	0,42
18	1,45	1,04	0,62	1,36	0,98	0,65	1,41	1,01	0,70	1,30	0,93	0,61
19	0,69	0,50	0,37	0,64	0,46	0,42	0,65	0,47	0,45	0,60	0,43	0,38
20	1,31	0,94	0,90	1,24	0,89	0,87	1,30	0,93	0,93	1,24	0,89	0,91
Ort.	0,89	0,64	0,49	0,84	0,60	0,49	0,86	0,62	0,53	0,81	0,58	0,50



(a)



(b)



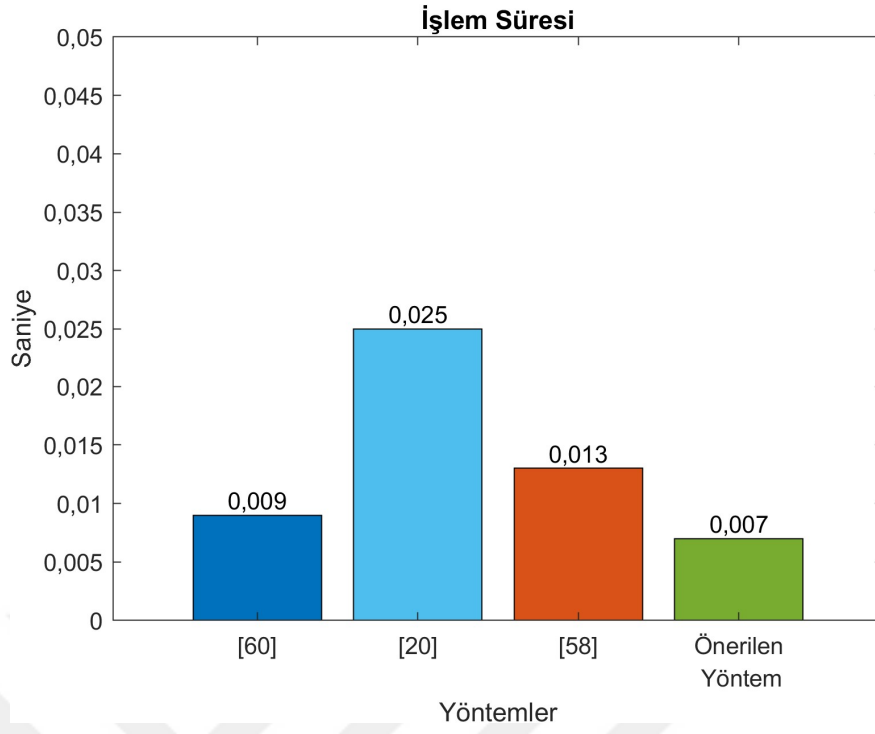
(c)

Şekil 4.2 : Gerçek parçalar için ortalama ϕ ölçüm sonuçları. (a) OMH: Ortalama mutlak hata, (b) OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata, (c) YSS: Yüzdesel standart sapma.

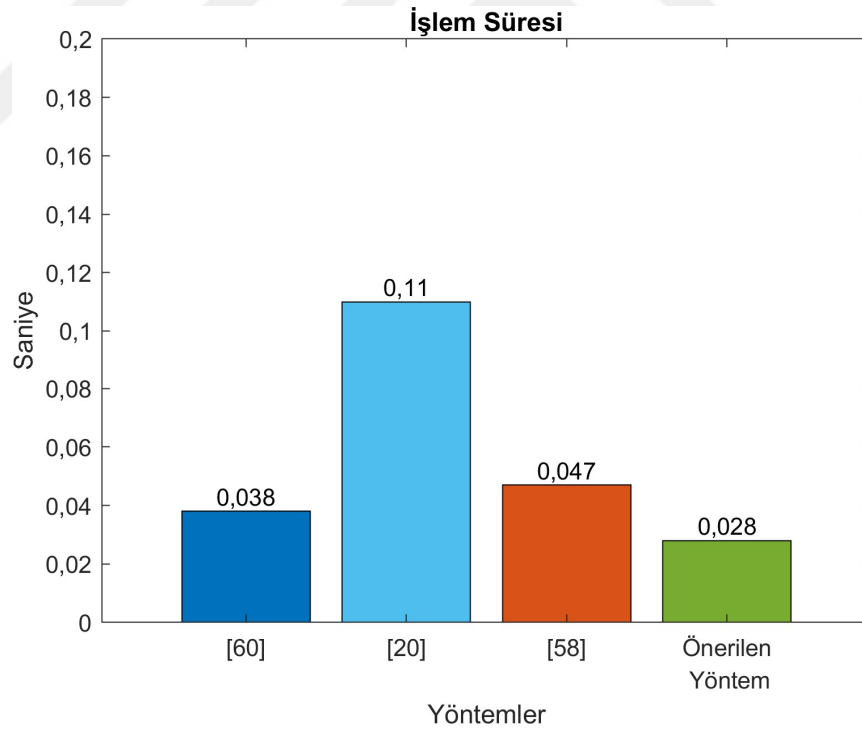
Performans karşılaştırmasında, önerilen yöntemin ortalama mutlak hata (OMH) açısından diğer yöntemlere göre %3 ila %10 arasında üstün sonuçlar elde ettiği belirlenmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.4'ten ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) değerleri göz önüne alındığında, önerilen yöntem diğer yöntemleri de geride bırakmaktadır. Bu üstünlük, gerçek parça görüntüleri kullanıldığında özellikle belirgindir (Şekil 4.2). Önerilen yöntem, [78] yönteminin doğruluğunu önemli ölçüde arttırmaktadır.

4.1.2.3 Hız testi

Hız testinde, önerilen yöntemin hesaplama süresi diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Testler, aynı bilgisayar üzerinde, Matlab programı kullanılarak ve aynı koşullar altında (Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz) gerçekleştirilmiştir. Tüm yöntemler için ortak olan ön işleme adımı, sonuçları etkilemeden önceleme yapılabilmesi için karşılaştırma için atlanmıştır. Hız testi için, daha önce kullanılan 21 sentetik görüntü kullanılmıştır. Görüntülerin nesne çapları sırasıyla 25, 50, 100, 200, 400, 800 ve 1600 piksel olup, çözünürlükleri sırasıyla 500×500, 500×500, 500×500, 1000×1000 ve 2000×2000'dir. Hız testi sonuçlarının dağılımları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Her algoritma, hız testi sırasında beş kez görüntülere uygulanmış ve ortalama ölçüm süresi hesaplanmıştır. Doğru ölçümler sağlamak için, bilgisayardaki tüm gereksiz programlar kapatılmış ve sadece MATLAB programı algoritmaların çalıştırılması için kullanılmıştır. Hız testi, önerilen yöntemin diğer yöntemlere kıyasla hesaplama verimliliğine dair bilgi sağlar. Ortalama ölçüm süreleri analiz ederek, her algoritmanın göreceli hız performansı belirlenebilir.

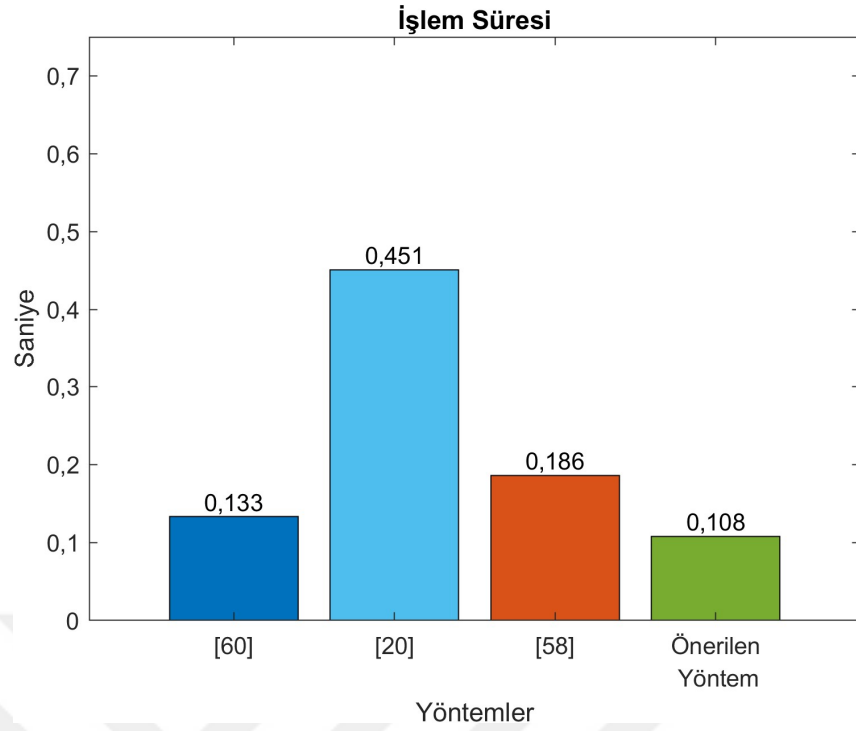


(a) Görüntü Boyutu 500×500

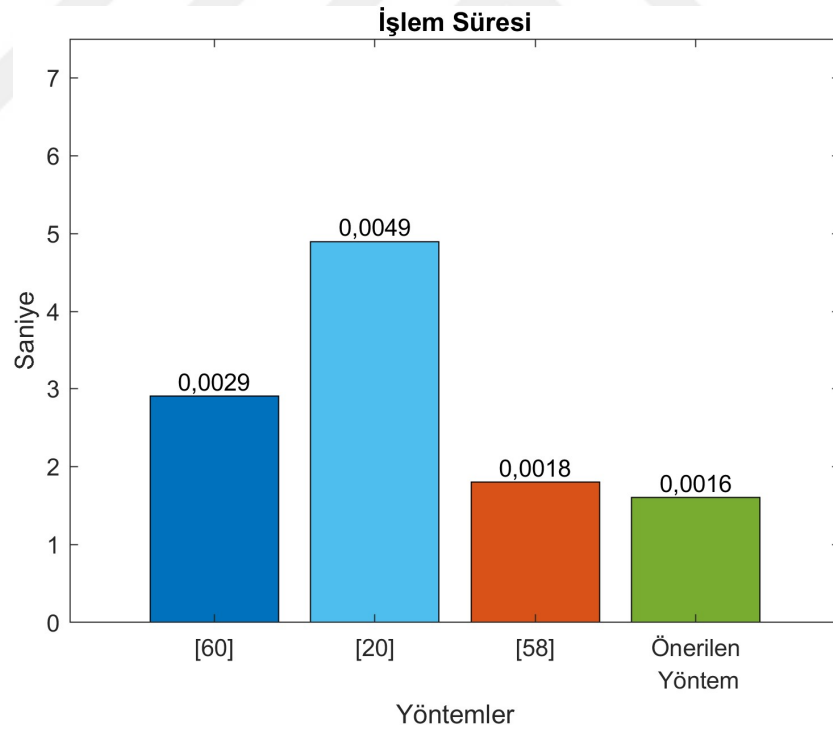


(b) Görüntü Boyutu 1000×1000

Şekil 4.3 : Farklı çözünürlüklerde önerilen algoritmanın hesaplama zamanları (a) 500×500 görüntüler için (b) 1000×1000 görüntüler için



(c) Görüntü Boyutu 2000×2000



(d) Görüntü Boyutu 250×250

Şekil 4.3 (devam) : Farklı çözünürlüklerde önerilen algoritmanın hesaplama zamanları. (c) 2000×2000 görüntüler için (d) 250×250 görüntüler için

Sonuçlara göre, önerilen yöntem diğer yöntemlere göre üstün hız performansı sergilemektedir. Literatürdeki yöntemler, kenar tespiti veya evrişim adımlarını içeren yöntemler genellikle alt-optimal algoritmik işlem hızlarına sahiptir. Buna karşılık, önerilen yöntem yalnızca sayım işlemine odaklanarak daha hızlı işleme imkanı sağlamaktadır. 500×500 çözünürlüğündeki görüntüler için ortalama değerlendirme süresi 0,007 saniye olarak ölçülmüştür. Önerilen yöntem, [38] ve [76] yöntemlerinden en az iki kat daha hızlı çalışırken, [78] yönteminden %29 daha hızlı işlem gerçekleştirir (Çizelge 4.5, 4.6, 4.7, 4.8). Ayrıca, tüm yöntemlerin işleme süresi nesne boyutu arttıkça artmaktadır, ancak [78] yönteminde artış daha belirgin olmaktadır. Önerilen yöntem, daha büyük nesne boyutlarıyla bile hız avantajını korumaktadır. 1000×1000 ve 2000×2000 çözünürlükteki görüntüler için, önerilen yöntem sırasıyla diğer yöntemlere göre %35 ve %23 daha iyi performans sergilemiştir. Genel olarak, önerilen yöntem, hem hız hem de doğruluk açısından literatürdeki mevcut yöntemleri geride bırakarak ön plana çıkmaktadır.

Çizelge 4.5 : 500×500 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).

σ	Görüntü Boyutu	Obje Çapı	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
0	500×500	100	0,007	0,024	0,012	0,006
0,5	500×500	100	0,007	0,025	0,012	0,006
1	500×500	100	0,007	0,023	0,013	0,006
0	500×500	200	0,009	0,025	0,013	0,007
0,5	500×500	200	0,009	0,026	0,014	0,006
1	500×500	200	0,008	0,025	0,014	0,007
0	500×500	400	0,013	0,025	0,014	0,008
0,5	500×500	400	0,013	0,025	0,013	0,008
1	500×500	400	0,013	0,026	0,013	0,008
Ortalama			0,009	0,025	0,013	0,007

Çizelge 4.6 : 1000×1000 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).

σ	Görüntü Boyutu	Obje Çapı	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
0	1000×1000	800	0,038	0,110	0,047	0,028
0,5	1000×1000	800	0,037	0,106	0,047	0,028
1	1000×1000	800	0,038	0,107	0,047	0,028
Ortalama			0,038	0,108	0,047	0,028

Çizelge 4.7 : 2000×2000 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).

σ	Görüntü Boyutu	Obje Çapı	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
0	2000×2000	1600	0,133	0,443	0,184	0,103
0,5	2000×2000	1600	0,131	0,450	0,188	0,110
1	2000×2000	1600	0,133	0,437	0,184	0,108
Ortalama			0,132	0,443	0,185	0,107

Çizelge 4.8 : 250×250 boyutundaki görüntü için ortalama hesaplama süresi (sn.).

σ	Görüntü Boyutu	Obje Çapı	[60]	[20]	[58]	Önerilen Yöntem
0	250×250	25	0,0028	0,0048	0,0018	0,0016
0,5	250×250	25	0,0028	0,0047	0,0019	0,0016
1	250×250	25	0,0028	0,0047	0,0019	0,0015
0	250×250	50	0,0030	0,0048	0,0018	0,0016
0,5	250×250	50	0,0030	0,0049	0,0019	0,0017
1	250×250	50	0,0029	0,0052	0,0019	0,0017
Ortalama			0,0029	0,0049	0,0018	0,0016

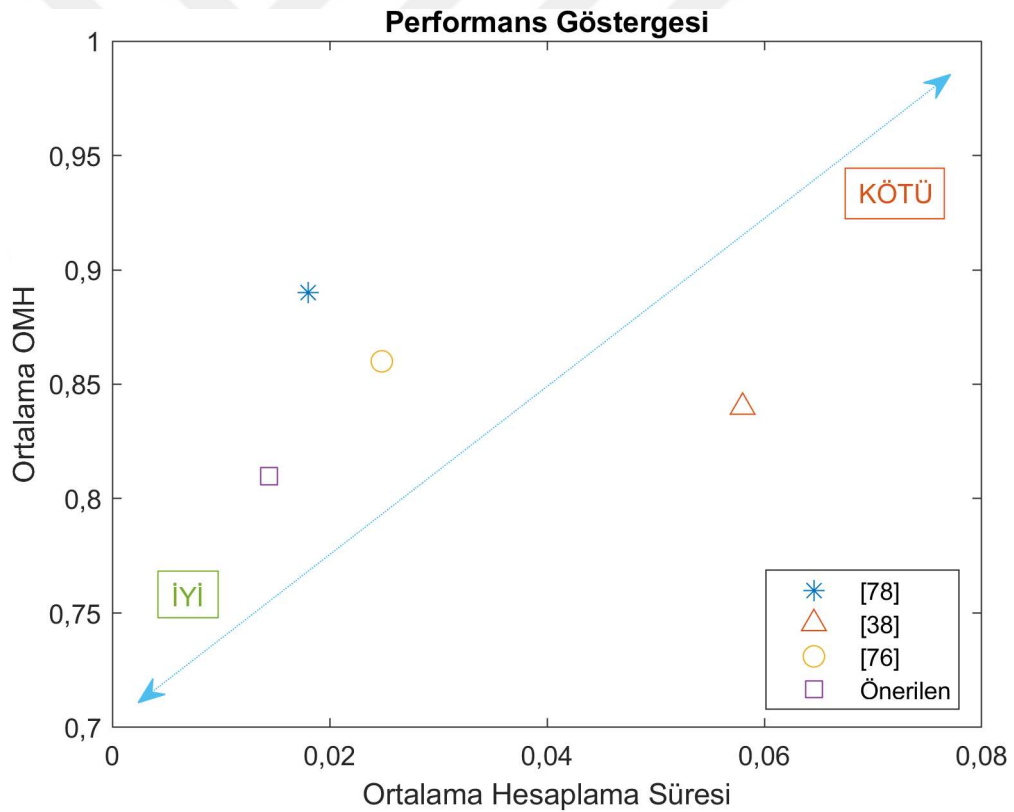
4.1.2.4 Etki büyüklüğü ve performans karşılaştırması

Bu çalışmada önerilen yöntemin temel yeniliği, sadece doğruluğun iyileştirilmesi değil, aynı zamanda önemli ölçüde hızın artırılmasıdır. Bu çalışmadaki temel yeniliğin etkisini ölçmek için etki büyüklüğü tercih edilmiştir. Etki büyüklüğü, iki değişken arasındaki farkın büyüklüğünü veya ilişkinin gücünü ölçerek, farklı çalışmalar veya deneyler arasında tutarlı bir şekilde yorumlanabilir standartlaştırılmış bir ölçü sağlar. Gözlemlenen etkilerin pratik önemini veya gerçek dünya önemini değerlendirirken özellikle araştırmalarda kritik bir kavramdır. Temel yeniliği daha iyi belirtmek için, Cohen'in d mesafesi (Etki Büyüklüğü [93]) hesaplaması, işlem süresi için yapılmıştır. Cohen'in d mesafesi değerinin 0,2 olması küçük bir etkiyi, 0,5 olması orta büyüklükte bir etkiyi ve 0,8 olması büyük bir etkiyi ifade eder. Mesafe değerleri, yöntemleri çiftler halinde seçerek ve önerilen yöntemi diğer yöntemlerle karşılaştırarak elde edilmiştir (Çizelge 4.9). Sonuçları incelediğimizde, önerilen yöntemin [78] yöntemi ile karşılaştırıldığında küçük bir etki, [76] yöntemi ile karşılaştırıldığında Orta-Küçük bir etki ve [38] yöntemi ile karşılaştırıldığında Büyük-Orta bir etki gösterdiğini görüyoruz. Etki büyüklüğü mesafelerini incelediğimizde, önerilen yöntem, doğruluk açısından en yakın olduğu [38] yöntemi ile karşılaştırıldığında orta ve büyük arasında bir etki sergilemiştir. Etki büyüklüğü değerlerinin büyüklüklerini incelemek, önerilen tekniklerin temel özgünlüğünü ve etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.9 : Hesaplama süreleri için Cohen's d mesafeleri.

	Önerilen & [78]	Önerilen & [38]	Önerilen & [76]
d	0,1932	0,6947	0,4042
Etki Boyutu [64]	Küçük	Orta-Büyük	Küçük-Orta

Bu noktaya kadar, karşılaştırmalar hata ve hesaplama süresi için ayrı ayrı yapılmıştır. Önerilen yöntemin literatürdeki konumunu daha iyi anlamak için, hız ve Ortalama Mutlak Hata değerlerini içeren bir performans ölçütü oluşturulmuştur (Şekil 4.4). Doğruluk açısından en yakın yöntemin [38] yöntemi olduğu göz önüne alındığında, hız açısından en büyük fark yine [38] yöntemi ile gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, hız açısından en yakın yöntemin [78] yöntemi olduğu düşünüldüğünde, en büyük hata miktarı da [78] yöntemi ile gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar göz önüne alındığında, önerilen yöntemin Literatürdeki mevcut yöntemleri geride bıraktığı ve bu yönde yenilik sunduğu açıktır.



Şekil 4.4 : Ortalama mutlak hata ve hesaplama sürelerine göre performans karşılaştırmaları.

4.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı

Bu çalışmada, Literatürde tanımlanan mevcut çap tahmini algoritmaları ile uyumlu olacak şekilde iki yaklaşım önerilmiştir; bunlar R-tabanlı ve D-tabanlı olarak adlandırılmıştır. Her bir yaklaşım için üç alt yöntem önerilmiştir. Bu önerilen yaklaşımların ve alt yöntemlerin etkinliğini değerlendirmek için iki veri kümesi üzerinde deneyler yapılmıştır: biri cam örneklerinden oluşurken diğeri metal örneklerinden oluşmaktadır. Her veri kümesi, dört tanesi eğitim için ayrılan beş tanesi ise test için ayrılan dokuz örneği içermektedir. Her set, üç farklı çap ölçüm algoritması kullanılarak değerlendirilmiştir. Hem cam master hem de metal iş parçaları ile testler gerçekleştirilmiştir. Son olarak detaylı karşılaştırma yapılmıştır.

4.2.1 Kullanılan çap ölçüm algoritmaları

Kamera ölçüm sistemlerinde, özellikle hassas toleranslara sahip parçalar için tasarlanmış ölçüm uygulamalarında, genellikle alt piksel tabanlı yöntemler tercih edilir. Bu tez çalışmasında, çap ölçümü üzerine yapılan araştırmalarda, literatürdeki en iyi çap ölçüm algoritmaları testlerde kullanılmıştır. Alt piksel tabanlı ölçüm algoritmalarında, genellikle iki temel yaklaşım tercih edilir: kenar tabanlı ve kenar tabanlı olmayan yöntemler. İlk yaklaşım, görüntüdeki kenar noktalarını alt piksel algoritmaları kullanarak algılamayı içerir, ardından algılanan noktalardan en küçük kare uydurma ile çap elde edilir. Literatürdeki iki en iyi kenar algılama yöntemi, Devernay [38] ve Alt-piksel Kenar [76], bu çalışmada ilk iki algoritma olarak seçilmiştir. Üçüncü olarak, özellikle hız avantajı nedeniyle çap ölçümünde başarı elde eden ve bu tez kapsamında önerilen Alt-Piksel Sayma yöntemi [79] seçilmiştir.

4.2.2 Cam referans testi

İlk veri seti özel olarak üretilmiş bir cam referansı içermektedir (Şekil 3.24). Camdaki her daire için onar görüntü çekilmiştir. Çekilen görüntülerdeki çaplar, algoritmalar [76], [38] ve [79] kullanılarak piksel biriminde hesaplanmıştır. Tekrarlanabilirlik hatalarını azaltmak için, her referans için on ölçümün ortalaması alınmıştır (Çizelge 4.10, 4.11, 4.12). Ortalama değerler ve bilinen gerçek değerler kullanılarak, R değerleri denklem 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.10 : [38] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (GD: Gerçek Değer).

		Çap Ölçümleri [px]								
	GD	1 mm	1.5 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm	12 mm
Ölçümler	1	49,39	75,32	101,21	152,91	204,65	256,36	308,05	411,64	618,62
	2	49,37	75,34	101,23	152,89	204,66	256,36	308,11	411,62	618,56
	3	49,31	75,31	101,25	152,96	204,69	256,39	308,13	411,65	618,59
	4	49,40	75,32	101,22	152,97	204,66	256,39	308,13	411,59	618,56
	5	49,40	75,29	101,25	152,95	204,66	256,38	308,11	411,58	618,58
	6	49,41	75,32	101,24	153,00	204,70	256,38	308,10	411,60	618,57
	7	49,39	75,29	101,20	152,99	204,69	256,35	308,08	411,65	618,56
	8	49,38	75,31	101,23	153,00	204,67	256,40	308,14	411,59	618,59
	9	49,38	75,33	101,19	153,01	204,60	256,38	308,12	411,59	618,58
	10	49,35	75,30	101,24	153,01	204,67	256,38	308,09	411,56	618,53
Ort(px)		49,38	75,31	101,23	152,97	204,67	256,38	308,11	411,61	618,57
R		20,251	19,917	19,758	19,612	19,544	19,503	19,474	19,436	19,400

Çizelge 4.11 : [76] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. . (GD: Gerçek Değer).

		Çap Ölçümleri [px]								
	GD	1 mm	1.5 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm	12 mm
Ölçümler	1	49,14	75,06	100,94	152,63	204,36	256,08	307,78	411,38	618,36
	2	49,14	75,09	100,96	152,62	204,38	256,07	307,85	411,36	618,31
	3	49,08	75,04	100,97	152,68	204,39	256,11	307,86	411,39	618,34
	4	49,16	75,07	100,94	152,69	204,39	256,11	307,85	411,32	618,31
	5	49,16	75,02	100,98	152,67	204,38	256,10	307,84	411,31	618,32
	6	49,17	75,05	100,97	152,73	204,42	256,10	307,82	411,33	618,32
	7	49,14	75,03	100,93	152,71	204,41	256,07	307,80	411,39	618,31
	8	49,14	75,05	100,96	152,72	204,38	256,12	307,87	411,32	618,34
	9	49,14	75,07	100,92	152,73	204,29	256,11	307,85	411,32	618,33
	10	49,10	75,07	100,97	152,74	204,38	256,11	307,82	411,29	618,28
Ort(px)		49,14	75,05	100,95	152,69	204,38	256,10	307,83	411,34	618,32
R		20,351	19,986	19,811	19,645	19,571	19,524	19,491	19,449	19,407

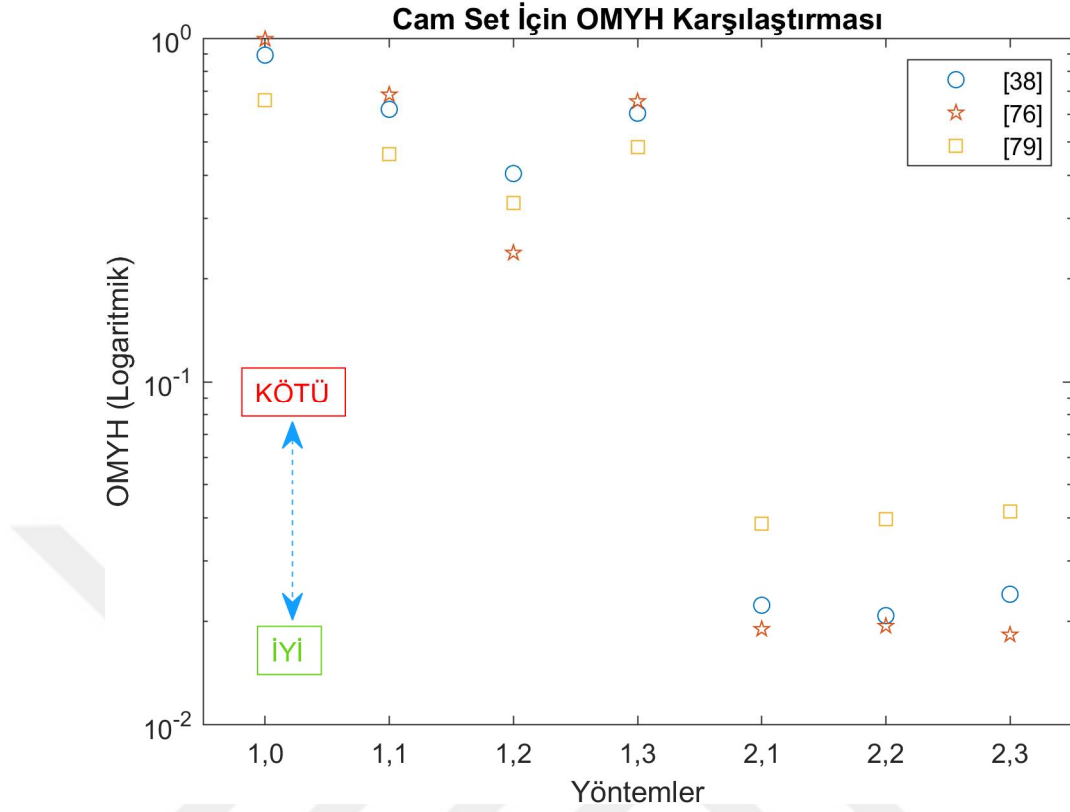
Hesaplanan R değerleri kullanılarak, önerilen yaklaşımlar test setine uygulanmıştır (1,5, 2, 4, 6, 8 mm). Tahmin edilen ölçüm ile gerçek ölçüm arasındaki fark hesaplanmış ve ardından yüzde hata belirlenlenmiştir. Bu süreç, üç ölçüm algoritması için tekrarlanmıştır (Çizelge 4.13, 4.14, 4.15). Elde edilen yüzde hatalar cam seti için karşılaştırılmıştır (Şekil 4.5).

Çizelge 4.12 : [79] yönteminin cam veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. . (GD: Gerçek Değer).

		Çap Ölçümleri [px]								
	GD	1 mm	1,5 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm	6 mm	8 mm	12 mm
Ölçümler	1	50,03	75,91	101,80	153,46	205,19	256,89	308,32	412,12	619,06
	2	49,94	75,90	101,81	153,36	205,19	256,88	308,55	412,07	618,95
	3	49,88	75,90	101,81	153,49	205,19	256,86	308,59	412,06	619,04
	4	50,00	75,86	101,74	153,50	205,16	256,90	308,60	412,04	618,96
	5	49,89	75,79	101,76	153,52	205,20	256,84	308,58	412,06	619,02
	6	50,06	75,87	101,76	153,54	205,23	256,87	308,59	412,08	618,97
	7	50,02	75,84	101,76	153,52	205,25	256,89	308,57	412,08	618,96
	8	49,92	75,85	101,78	153,54	205,19	256,88	308,63	412,05	619,02
	9	49,99	75,90	101,73	153,53	205,14	256,83	308,64	412,04	618,99
	10	49,93	75,90	101,78	153,52	205,11	256,87	308,58	412,01	618,88
Ort(px)		49,97	75,87	101,77	153,50	205,19	256,87	308,56	412,06	618,99
R		20,014	19,770	19,652	19,544	19,495	19,465	19,445	19,415	19,387

Çizelge 4.13 : [38] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).

		Mutlak Yüzdesel Hata (%)				
	Metotlar	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım	
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	1,5	1,1687	1,6794	0,8755	0,0469	0,0274
	2	0,3725	0,7384	0,8784	0,0507	0,0619
	4	0,7172	0,3473	0,1119	0,0052	0,0109
	5	0,9310	0,1476	0,0884	0,0049	0,0034
	8	1,2766	0,1943	0,0670	0,0040	0,0003
OMYH		0,8932	0,6214	0,4042	0,0223	0,0208



Şekil 4.5 : Önerilen algoritma ve tahmin algoritmalarının cam seti üzerine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hata.

Çizelge 4.14 : [76] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).

		Mutlak Yüzdesel Hata (%)				
	Metotlar	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım	
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	1,5	1,3079	1,8274	0,4464	0,0363	0,0308
	2	0,4378	0,8244	0,4442	0,0392	0,0517
	4	0,7806	0,3893	0,1227	0,0118	0,0020
	5	1,0270	0,1673	0,1001	0,0075	0,0101
	8	1,4169	0,2180	0,0746	0,0002	0,0023
OMYH		0,9940	0,6853	0,2376	0,0190	0,0194

Çizelge 4.15 : [79] yöntemi ve önerilen yaklaşımın cam veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata).

		Mutlak Yüzdesel Hata (%)				
	Metotlar	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım	
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	1,5	0,8726	1,2341	0,7277	0,0948	0,0807
	2	0,2773	0,5484	0,7104	0,0787	0,0914
	4	0,5276	0,2543	0,0963	0,0090	0,0208
	5	0,6799	0,1033	0,0729	0,0032	0,0018
	8	0,9409	0,1557	0,0555	0,0066	0,0037
MAPE		0,6597	0,4592	0,3326	0,0385	0,0397

Çizelge 4.10, 4.11 ve 4.12 incelendiğinde, çap ölçüm yöntemlerinin birbirine benzer ancak tamamen aynı olmadığı görülmektedir. Hesaplanan R değerleri, her bir yöntem için çap arttıkça azalmaktadır. Bu davranış, tüm üç yöntemde tutarlıdır. Ayrıca, çap boyutu arttıkça, R değeri belirli bir noktaya yaklaşmaktadır. Çap temelli önerilen yaklaşımların yüzde hata sonuçları incelendiğinde, tüm önerilen alt yöntemlerin temel yöntemden daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Genel olarak, D-tabanlı yaklaşım, R-tabanlı yaklaşımdan daha iyi bir performans sergilemiştir. D-tabanlı yaklaşımlar kendi aralarında ise çok benzer bir performans sergilemişlerdir. Ayrıca, [76] tahmin algoritması ile birleştirildiğinde, Yöntem 2.3 cam veri kümesi için önerilen yaklaşımlar arasında en iyi sonucu vermiştir.

4.2.3 Metal parça testi

İkinci veri setinde, dokuz farklı çapta metal pul parçaları bulunan iş parçaları kullanıldı. Her parça için gerçek ölçümler (mm cinsinden), Koordinat Ölçüm Makinesi (CMM) kullanılarak belirlenmiştir. Ardından, her parça için onar görüntü, deneysel kurulum kullanılarak alınmıştır. Yakalanan görüntülerden elde edilen çaplar, algoritmalar [38], [79] ve [76] kullanılarak piksel cinsinden hesaplanmıştır. Tekrarlanabilirlik hatalarını en aza indirmek için, her referans için on ölçümün ortalaması alınmıştır (Çizelge 4.16, 4.17, 4.18). Ortalama değerler ve bilinen gerçek değerler kullanılarak, R değeri denklem 2.1 kullanılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 4.16 : [38] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (GD: Gerçek Değer).

		Çap Ölçümleri [px]								
	GD	3,665 mm	5,398 mm	6,431 mm	8,594 mm	10,458 mm	11,046 mm	15,8 mm	23,668 mm	24,32 mm
Ölçümler	1	186,80	276,19	329,46	441,78	538,23	568,61	814,25	1221,54	1255,87
	2	186,82	276,14	329,40	441,71	538,17	568,56	814,24	1221,49	1255,84
	3	186,79	276,27	329,35	441,72	538,22	568,58	814,23	1221,53	1255,82
	4	186,76	276,23	329,33	441,71	538,11	568,56	814,17	1221,52	1255,85
	5	186,83	276,42	329,38	441,67	538,13	568,44	814,26	1221,52	1255,88
	6	186,76	276,18	329,34	441,76	538,18	568,64	814,15	1221,53	1255,85
	7	186,84	276,25	329,37	441,69	538,30	568,72	814,24	1221,52	1255,86
	8	186,80	276,13	329,38	441,76	538,33	568,61	814,17	1221,52	1255,86
	9	186,75	276,20	329,36	441,67	538,25	568,53	814,21	1221,47	1255,83
	10	186,83	276,25	329,34	441,62	538,31	568,46	814,26	1221,53	1255,88
	Ort (px)	186,80	276,22	329,37	441,71	538,22	568,57	814,22	1221,52	1255,85
	R	19,620	19,542	19,525	19,456	19,431	19,428	19,405	19,376	19,365

Çizelge 4.17: [76] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (G.D: Gerçek Değer)

		Çap Ölçümleri [px]								
GD	3,665 mm	5,398 mm	6,431 mm	8,594 mm	10,458 mm	11,046 mm	15,8 mm	23,668 mm	24,32 mm	
Ölçümler	1	186,34	275,74	329,01	441,34	537,77	568,18	813,83	1221,13	1255,46
	2	186,36	275,69	328,95	441,25	537,71	568,13	813,81	1221,07	1255,43
	3	186,32	275,82	328,91	441,28	537,77	568,16	813,81	1221,13	1255,41
	4	186,31	275,77	328,88	441,27	537,66	568,12	813,75	1221,11	1255,46
	5	186,37	275,97	328,93	441,21	537,68	568,00	813,82	1221,11	1255,48
	6	186,29	275,72	328,87	441,32	537,72	568,21	813,73	1221,13	1255,45
	7	186,37	275,80	328,92	441,24	537,85	568,29	813,81	1221,10	1255,47
	8	186,34	275,68	328,92	441,31	537,88	568,18	813,74	1221,10	1255,45
	9	186,29	275,74	328,90	441,22	537,80	568,09	813,79	1221,05	1255,43
	10	186,38	275,79	328,88	441,16	537,86	568,03	813,82	1221,11	1255,49
Ort (px)	186,34	275,77	328,92	441,26	537,77	568,14	813,79	1221,10	1255,45	
R	19,669	19,574	19,552	19,476	19,447	19,442	19,415	19,382	19,371	

Çizelge 4.18 : [79] yönteminin metal veri seti ve piksel tabanlı yaklaşımla elde edilen ölçüm sonuçları. (G.D: Gerçek Değer).

GD	Çap Ölçümleri [px]								
	3,665 mm	5,398 mm	6,431 mm	8,594 mm	10,458 mm	11,046 mm	15,8 mm	23,668 mm	24,32 mm
Ölçümler	1	187,47	276,73	329,99	442,30	538,71	569,07	814,59	1221,85
	2	187,52	276,70	329,88	442,20	538,65	568,91	814,61	1221,78
	3	187,49	276,80	329,85	442,18	538,66	568,97	814,53	1221,84
	4	187,43	276,86	329,77	442,20	538,52	568,95	814,47	1221,83
	5	187,47	277,00	329,88	442,16	538,56	568,75	814,61	1221,85
	6	187,47	276,76	329,78	442,28	538,66	569,10	814,45	1221,85
	7	187,55	276,76	329,86	442,14	538,77	569,15	814,57	1221,82
	8	187,49	276,63	329,82	442,22	538,73	569,03	814,44	1221,83
	9	187,46	276,85	329,85	442,11	538,69	568,96	814,51	1221,80
	10	187,53	276,95	329,79	442,03	538,77	568,79	814,63	1221,84
Ort (px)	187,49	276,81	329,85	442,18	538,67	568,97	814,54	1221,83	1255,99
R	19,548	19,501	19,497	19,435	19,414	19,414	19,397	19,371	19,363

Hesaplanan R değerleri kullanılarak, önerilen yaklaşımlar test setine uygulanmıştır (5,4, 6,431, 10,458, 11,046, 23,668 mm). Tahmin edilen ölçüm ile gerçek ölçüm arasındaki fark hesaplandı, ardından yüzde hata belirlenmiştir. Bu süreç, üç ölçüm algoritması için tekrarlanmıştır (Çizelge 4.19, 4.20, 4.21). Elde edilen yüzde hatalar metal parça veri kümesi için karşılaştırılmıştır (Şekil 4.6).

Çizelge 4.19 : [38] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH:Ortalama mutlak yüzdesel hata).

Yöntemler	Mutlak Yüzdesel Hata					
	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım		
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	5,398	0,4391	0,3995	0,1053	0,0718	0,0296
	6,431	0,3529	0,3529	0,0169	0,1440	0,1201
	10,458	0,1316	0,1316	0,0634	0,0310	0,0066
	11,046	0,1472	0,1159	0,0576	0,0214	0,0080
	23,668	0,4147	0,1509	0,0387	0,0433	0,0280
	OMYH	0,2971	0,2302	0,0564	0,0623	0,0385

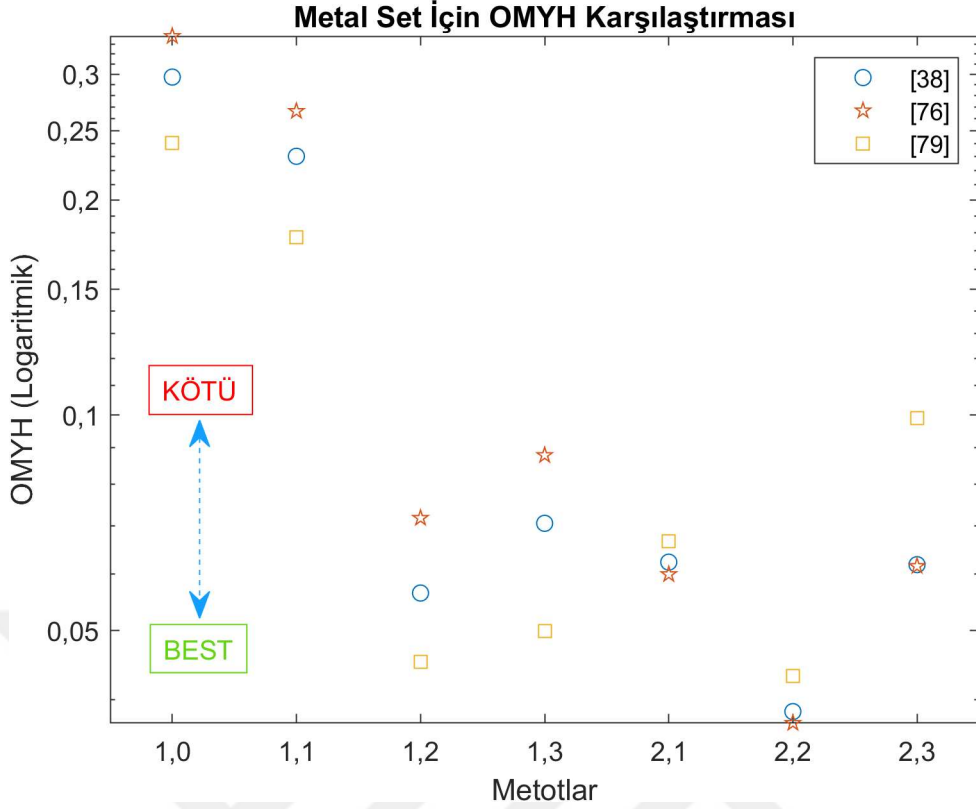
Çizelge 4.20 : [76] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH:Ortalama mutlak yüzdesel hata).

		Mutlak Yüzdesel Hata (%)				
	Yöntemler	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım	
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	5,398	0,5008	0,4842	0,1386	0,0692	0,0268
	6,431	0,3886	0,3886	0,0459	0,1429	0,1189
	10,458	0,1495	0,1495	0,0686	0,0250	0,0058
	11,046	0,1731	0,1392	0,0667	0,0186	0,0056
	23,668	0,4827	0,1695	0,0390	0,0436	0,0284
OMYH		0,3389	0,2662	0,0718	0,0599	0,0371

Çizelge 4.21 : [79] yöntemi ve önerilen yaklaşımın metal veri setine uygulandığında elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar.

		Mutlak Yüzdesel Hata (%)				
	Yöntemler	Temel Metot	R-Tabanlı Yaklaşım		P-Tabanlı Yaklaşım	
		1.0	1.1	1.2	2.1	2.2
Çaplar [mm]	5,398	0,3367	0,2410	0,0384	0,0851	0,0356
	6,431	0,3155	0,3155	0,0606	0,1731	0,1480
	10,458	0,1080	0,1080	0,0572	0,0300	0,0045
	11,046	0,1099	0,0859	0,0432	0,0132	0,0165
	23,668	0,3327	0,1364	0,0263	0,0317	0,0115
OMYH		0,2405	0,1774	0,0452	0,0666	0,0432

Çizelge 4.16, 4.17 ve 4.18 incelendiğinde, hesaplanan R değerlerinin her bir yöntem için çap arttıkça azaldığı görülebilir. Bu eğilim hem cam hem de metal veri setlerinde belirgindir. R'nin belirli bir değere yakınsaması da gözlemlenir, bu durum hem cam hem de metal veri setlerinde mevcuttur. Metal veri setinde, cam veri setiyle benzer şekilde, D-tabanlı yaklaşım R-tabanlı yaklaşıma göre daha iyi performans göstermekmiştir. Ancak, cam veri setinde olduğu gibi, metal veri setinde de metot 2.1, metot 2.2 ve metot 2.3 arasında farklı sonuçlar bulunmaktadır. Metot 2.2, tüm tahmin algoritmalarında en iyi performansı sergilemiştir. [76] yöntemi ile method 2.2'nin birleşimi, metal veri seti için en düşük hatayı üretmiştir. Veri kümelerinin çap dağılımları iki set arasında farklılık göstermektedir. Cam test seti, 1 ila 12 mm arasında değişen örnekler içerirken, metal seti 3 ila 24 mm arasında değişen örnekler içerir. Özellikle, daha küçük çaplar için hata miktarı daha büyük olduğundan, ortalama mutlak yüzde hata değerleri metal parçalar için daha düşüktür. Bu, daha küçük parçaların sonuçlarının ortalama üzerinde daha büyük bir etkisi olduğu için gerçekleşir. Her iki sette yapılan testler, önerilen yaklaşımların başarısını ortaya koymuştur.



Şekil 4.6 : Önerilen yaklaşım ve çap ölçüm algoritmalarıyla metal sette elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hatalar. (OMYH: Ortalama mutlak yüzdesel hata).

4.2.4 Karşılaştırma

Önerilen yöntemlerin performansı incelendiğinde, metot 2.2'nin metal seti için en düşük hata yüzdesine sahip olduğu görülmüştür (Şekil 4.6). Cam set testinde, D-tabanlı yöntemlerin benzer şekilde performans gösterdiği ve R-tabanlı yöntemlere göre önemli ölçüde üstün olduğu görülmüştür (Şekil 4.5). Bu nedenle, metot 2.2, önerilen yaklaşımlar arasında en iyi performans gösteren yöntem olarak seçilmiştir. Method 2.2, çap tahmini algoritmalarıyla birlikte test edilmiş ve temel yöntemle karşılaştırılmıştır (Çizelge 4.22, Çizelge 4.23). Karşılaştırmalarda, hem mutlak yüzde hata hem de mutlak hata değerleri incelenmiştir. Karşılaştırmalar ayrıca her iki veri seti için de yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen yöntem, kullanılan tahmin algoritması ne olursa olsun, temel yaklaşım tarafından oluşturulan hatayı ortadan kaldırmaktadır (Şekil 4.7, Şekil 4.8). Önerilen yöntemle hataların en küçük 8 μm 'den en yüksek 113 μm 'ye kadar değiştiği çaplarda, hata seviyesi 1-2 μm seviyesine düşürülmüştür.

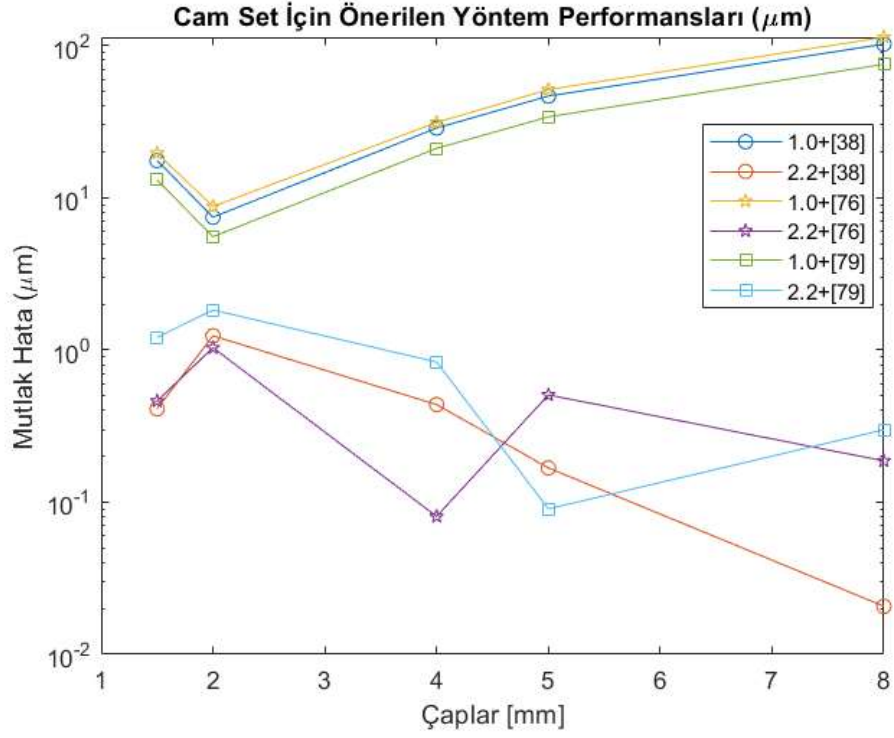
Çizelge 4.22 : Önerilen yaklaşımlar için mutlak hatalar. ('+' işareti önerilen yaklaşımın hangi çap ölçüm algoritmasıyla birlikte kullanıldığını belirtmek için kullanılmıştır.).

Metot	Mutlak Hata (μm)									
	Metal Set için Test Çapları [mm]					Cam Set için Test Çapları [mm]				
	5,40	6,43	10,46	11,05	23,67	1,5	2	4	5	8
1.0+[8]	0,44	0,35	0,13	0,15	0,41	1,17	0,37	0,72	0,93	1,28
2.2+[8]	0,03	0,12	0,01	0,01	0,03	0,03	0,06	0,01	0,00	0,00
1.0+[7]	0,50	0,39	0,15	0,17	0,48	1,31	0,44	0,78	1,03	1,42
2.2+[7]	0,03	0,12	0,01	0,01	0,03	0,03	0,05	0,00	0,01	0,00
1.0+[33]	0,34	0,32	0,11	0,11	0,33	0,87	0,28	0,53	0,68	0,94
2.2+[33]	0,04	0,15	0,00	0,02	0,01	0,08	0,09	0,02	0,00	0,00

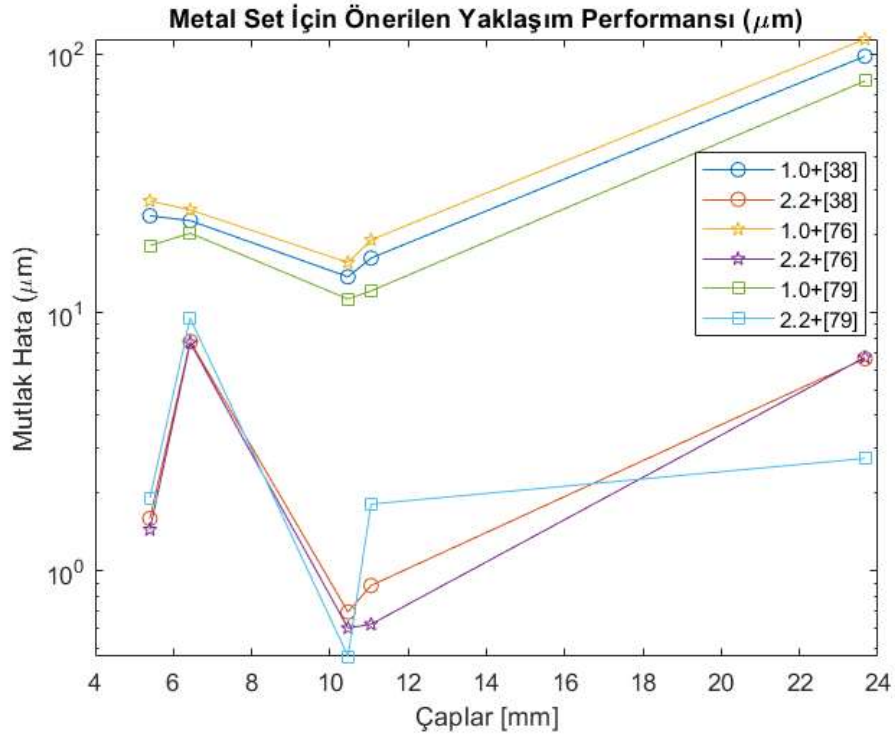
Çizelge 4.23 : Önerilen yaklaşımlar için mutlak yüzdesel hatalar. ('+' işareti önerilen yaklaşımın hangi çap ölçüm algoritmasıyla birlikte kullanıldığını belirtmek için kullanılmıştır.).

Metot	Mutlak Yüzdesel Hata (%)									
	Metal Set için Test Çapları [mm]					Cam Set için Test Çapları [mm]				
	5,40	6,43	10,46	11,05	23,67	1,50	2,00	4,00	6,00	8,00
1.0+[8]	23,70	22,70	13,76	16,26	98,16	17,53	7,45	28,69	46,55	102,13
2.2+[8]	1,60	7,73	0,69	0,88	6,64	0,41	1,24	0,44	0,17	0,02
1.0+[7]	27,03	24,99	15,63	19,12	114,25	19,62	8,76	31,23	51,35	113,35
2.2+[7]	1,45	7,65	0,60	0,62	6,71	0,46	1,03	0,08	0,51	0,19
1.0+[33]	18,18	20,29	11,29	12,14	78,74	13,09	5,55	21,10	34,00	75,27
2.2+[33]	1,92	9,52	0,47	1,82	2,73	1,21	1,83	0,83	0,09	0,30

Hem yüzde hatalar hem de mikrometre cinsinden hatalar incelendiğinde, önerilen algoritmanın cam setinde sadece birkaç mikronluk bir hata yaptığı görülmüştür. Metal setinde, temel yaklaşıma kıyasla önemli bir iyileşme sağlanmış olup en yüksek hata yaklaşık 6 μm civarındadır. Önerilen yaklaşım, cam veri setinde çok daha iyi performans sergilemiştir.

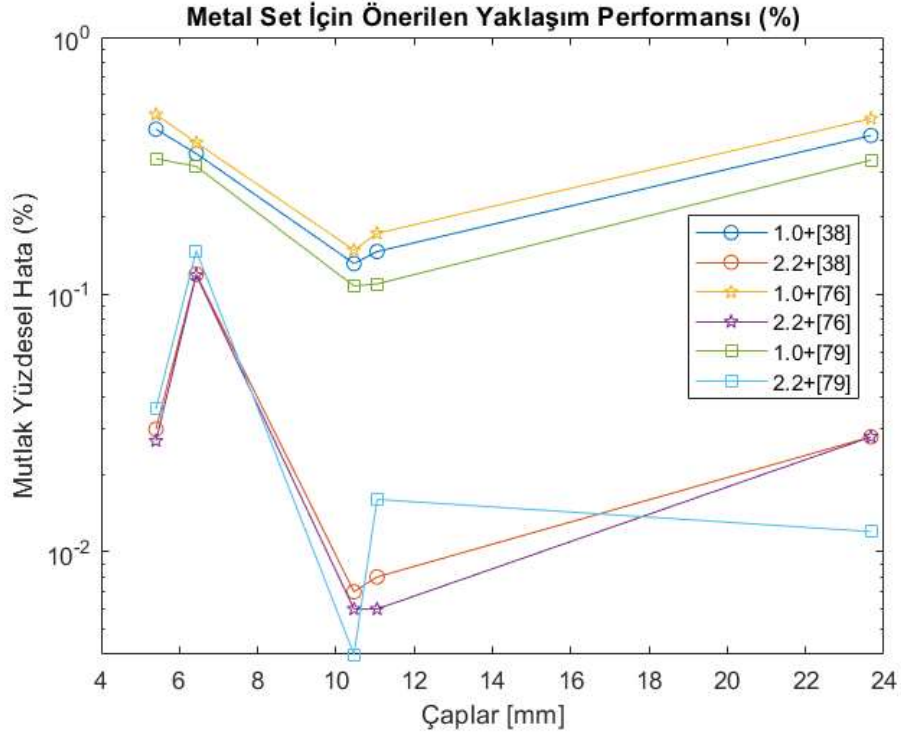


(a)

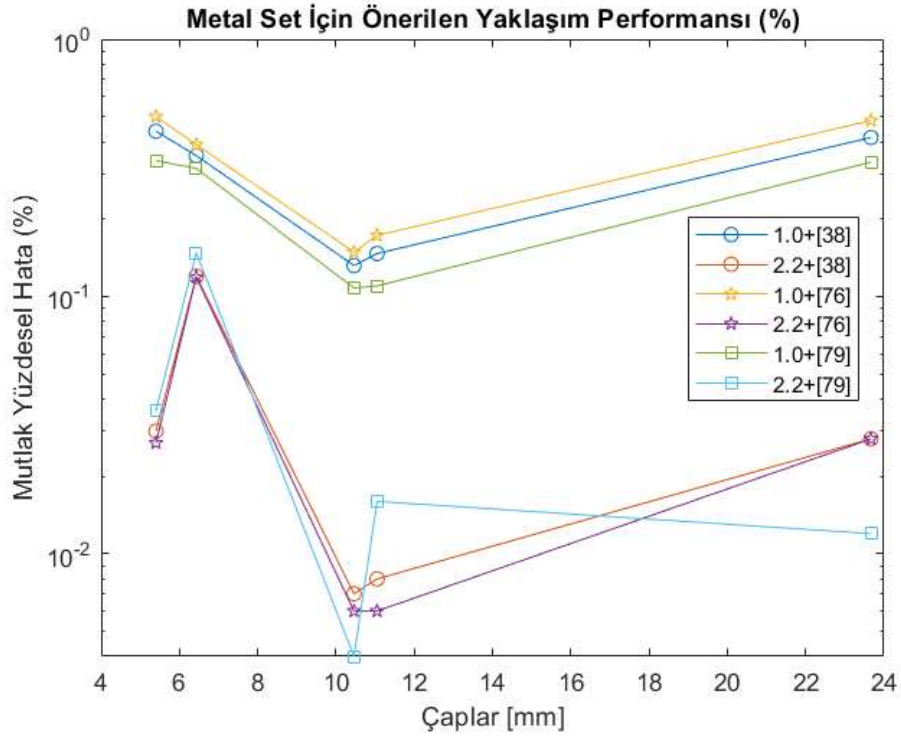


(b)

Şekil 4.7 : Önerilen yaklaşımlar için performans göstergeleri. Grafiklerdeki y eksenini logaritmik olarak gösterilmiştir. (a) Cam set için mutlak hatalar, (b) Metal set için mutlak hatalar.



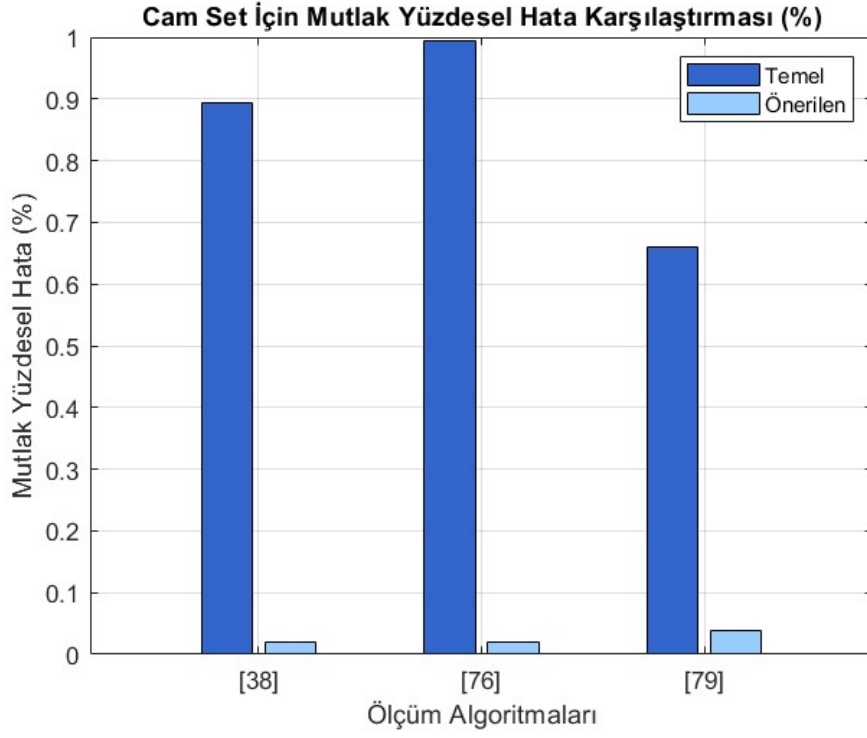
(a)



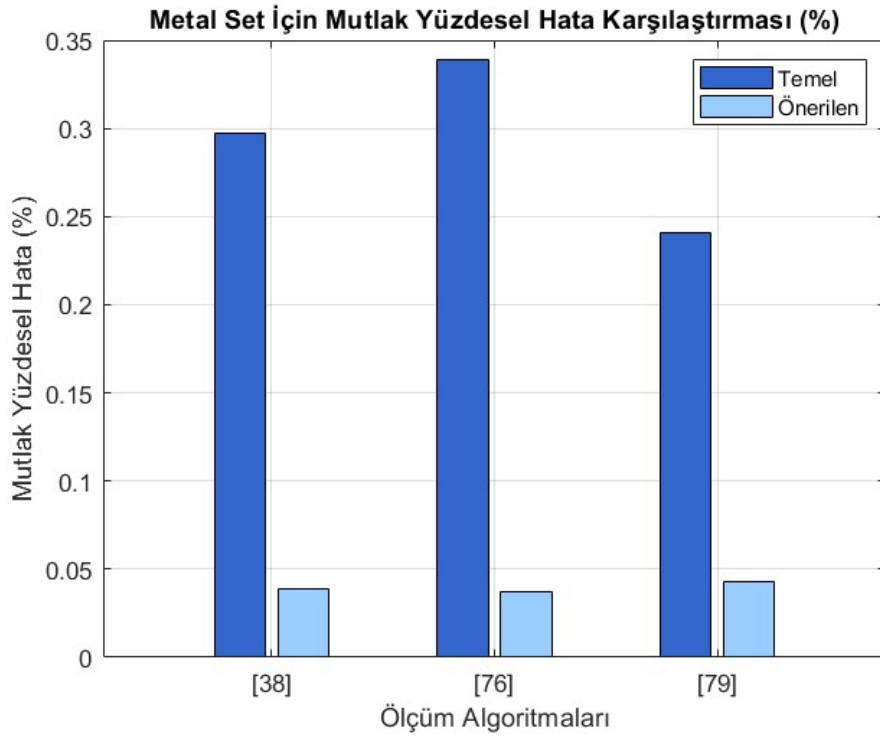
(b)

Şekil 4.8 : Önerilen yaklaşımlar için performans göstergeleri. Grafiklerdeki y eksenini logaritmik olarak gösterilmiştir. (a) Cam set için mutlak yüzdesel hatalar, (b) Metal set için mutlak yüzdesel hatalar.

Cam veri seti özel olarak üretilmiştir ve üretim toleransları yaklaşık 0.1 μm civarındadır, bu da daha net sonuçlar sağlamıştır. Metal veri seti aynı kalınlığa sahip olmasına rağmen, parçada değişkenlik olabilir. Ayrıca, parçanın bilinen değeri laboratuvar ortamında CMM kullanılarak belirlenmiştir. CMM cihazının ölçüm belirsizliği, önerilen yaklaşımın metal veri setindeki performansını da etkilemiştir. Ölçüm tahmin algoritmalarının performansları incelendiğinde, hepsinin benzer performans sergilediği görülmüştür. Buna ek olarak, [76] yönteminin önerilen yaklaşımla birleştirilmesi, her iki veri seti için de en iyi sonuçları sağlamıştır. İyileştirilmiş çap ölçüm algoritmasının hem cam veri setiyle hem de metal veri setiyle yapılan testlerde büyük bir iyileştirme gösterdiği gözlemlenmiştir. Özellikle Method 2.2 için önerilen yöntemler arasındaki en iyi performansı gösteren yöntem diyebiliriz. Cam ve metal veri kümeleri arasındaki karşılaştırma, numune özelliklerinin ölçüm doğruluğu üzerindeki etkisini vurgulamaktadır. Küçük çaplara sahip cam veri kümesi (1–12 mm), hatalara daha duyarlı bulunurken, daha büyük çaplara sahip metal veri kümesi (3–24 mm), daha yüksek stabilite ve daha düşük hata oranları sergilemiştir (Şekil 4-9). Genel olarak, önerilen yöntem, temel yöntemin sınırlamalarını etkili bir şekilde ortadan kaldırmakta ve özellikle uygun tahmin algoritmaları ile entegre edildiğinde üstün performans göstermektedir. Bu bulgular, önerilen yöntemlerin çeşitli veri kümeleri ve koşullar altında hassas çap tahmini için güvenilirliğini ortaya koymaktadır.



(a)



(b)

Şekil 4.9 : Önerilen yöntemin mutlak yüzde hatası farklı ölçüm algoritmaları için elde edilen sonuçları (a) Cam veri kümesi için sonuçlar, (b) Metal veri kümesi için sonuçlar.

5. TARTIŞMA

Bu tez kapsamında önerilen iki yöntem için çalışma detayları, yapılan testler ve elde edilen sonuçlar önceki bölümlerde anlatılmıştır. Bu bölümde elde edilen sonuçlar ve yöntemler hakkında üzerine konuşulması gereken kısımlar ele alınacaktır. Tez kapsamında iki adet yöntem önerildiği için iki yöntem ayrı başlıklar halinde incelenecektir.

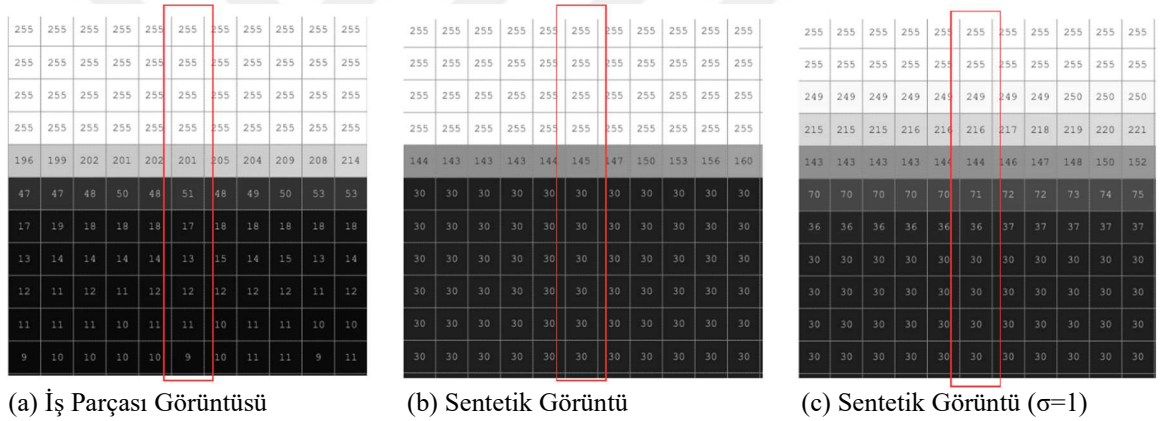
5.1 Alt-Piksel Sayma Tabanlı Çap Ölçüm Algoritması

Bu tezde, önerilen yöntem için öncelikle iç karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. İç karşılaştırma sonuçlarına dayanarak, en iyi süzgeç kombinasyonunun Orta ve Ortalama süzgeçlerden oluştuğu gözlemlenmiştir. Bunu takiben, tekrarlanabilirlik, doğruluk ve hız göz önünde bulundurularak bir literatür taraması yapılmıştır. Yöntemin başarısını göstermek için sentetik ve gerçek görüntüler kullanılarak testler gerçekleştirilmiştir. Sentetik görüntülerden elde edilen sonuçlara göre, Ortalama Mutlak Hata (OMH) açısından diğer yöntemlere kıyasla yaklaşık %23'lük bir performans iyileştirmesi sergilemiştir. Önerilen yöntem, yedi farklı çap değerinden dördünde daha iyi performans göstermiştir. Ayrıca, küçük çaplarda işlem yaparken önemli ölçüde daha üstün sonuçlar elde edilmiştir. Testlerin ikinci aşamasında, gerçek görüntüler kullanılmıştır. Elde edilen doğruluk sonuçlarına göre, önerilen yöntem diğer yöntemlere kıyasla yaklaşık %3-10 daha iyi performans sergilemiştir. Her yöntemi ayrı ayrı karşılaştırıldığında, önerilen yöntem Ortalama Mutlak Hata (OMH) açısından %9,8 oranında [78] yönteminden, %3,7 oranında [76] yönteminden ve %6,1 oranında [38] yönteminden daha iyi bir performans sergilemiştir. Benzer şekilde, Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata (OMYH) açısından, önerilen yöntem [78] yöntemine kıyasla %10, [76] yöntemine kıyasla %6,8 ve [38] yöntemine kıyasla %3,4 oranında performans iyileştirmeleri göstermiştir. Ayrıca, önerilen yöntem, MAE ve MAPE açısından 20 örnekten 13'ünde üstün performans sergilemiştir. Elde edilen tekrarlanabilirlik sonuçlarına göre, tüm yöntemler yaklaşık olarak 2 mikronluk bir performans sergilemiştir. Önerilen yöntem, tekrarlanabilirlik açısından [78]

yönteminden %5 daha kötü, [76] yönteminden %6 daha iyi ve [38] yöntemiyle eşit performans göstermiştir. Tekrarlanabilirlik ve doğruluk testleri birlikte değerlendirildiğinde, [76] yöntemi tekrarlanabilirlikte önerilen yönteme %6 ve doğrulukta %5,8 oranında geride kalmıştır. [38] yöntemi tekrarlanabilirlik açısından eşit olsa da doğrulukta önerilen yöntemin gerisinde kalmıştır. [78] yönteminin performansı değerlendirildiğinde, önerilen yöntem tekrarlanabilirlik açısından %5 daha kötü görünse de OMH-OMYH açısından [78] yöntemini %10 oranında geride bırakmaktadır. Hız açısından değerlendirildiğinde, önerilen yöntemin diğer yöntemleri önemli ölçüde geride bıraktığı açıktır. Hız değerlendirmesi için 7 farklı çapta görüntüler 4 farklı görüntü boyutunda test edilmiştir. En küçük çapta, hızda en az %12,5 iyileşme gözlemlenirken, çaplar arttıkça bu oran en az %35'e kadar çıkabilmektedir. Ayrıca, en yüksek olarak yaklaşık 4 kat fark gözlemlenmiştir. Hız sonuçları, önerilen yöntemin karşılaştırılan yöntemlere göre çok daha üstün olduğunu göstermiştir. Tüm bulguları göz önüne aldığımızda, önerilen tekniğin hız ve doğruluk avantajlarıyla tekrarlanabilirlikten ödün vermeden mevcut yöntemlerden daha iyi performans sergilediği görülmektedir. Hassas ölçümler genellikle endüstriyel uygulamalarda gerçekleştirilir. Bu uygulamalarda ölçümler genellikle beyaz bir arka plan üzerinde yapılır ve ölçülecek parçalar kameranın altında temiz bir şekilde yerleştirilir. Ancak, ön işleme adımlarıyla genellikle azaltılan toz, kir veya yağ gibi istenmeyen gürültüler bazı durumlarda temizlenmemiş olabilir. Parçalar kirli olduğunda, alan tabanlı basit yöntem en az seviyede etkilenir, ancak diğer yöntemler, önerilen yöntem de dahil olmak üzere, kirin etkisinde kalacaktır. Ölçümlerin mikron seviyesinde yapıldığı durumlarda, parçaların ölçülmeden önce temizlenmesi gereklidir. Bu nedenle, araştırmacılar parçaların hassas ölçümlere izin vermek için iyice temizlendiğinden emin olmalıdır. Tüm karşılaştırılan yöntemlerde ortalama olarak 1 μm 'lik bir hata gözlemlenmiştir. μm /piksel değerleri, seçilen kamera ve lens kombinasyonu kullanılarak hesaplanmış ve bir pikselin 19,5 μm 'ye karşılık geldiği göz önüne alınmıştır. Ortalama 1 μm 'lik hatalar göz önüne alındığında, yöntemlerin ortalama olarak μm /piksel değerinin yaklaşık 1/20'si kadar bir hata payına sahip olduğu sonucuna varılabilir. Bu bilgi, yöntemlerin performansına dayanarak uygun bir kamera-lens çifti seçerken faydalı olabilir. Kamera-lens kombinasyonunun, iş parçası toleranslarına dayalı olarak hassas bir şekilde seçilebileceği varsayımı, pratik uygulamalarda gerçekten değerlidir. Bu, gereken hassasiyete uygun bir kombinasyonun seçilmesini mümkün kılar. Yöntemler arasındaki hata dağılımlarının

benzerlikler gösterdiği ve küçük farklılıkların olduğu gözlemlenmesi ilginçtir. Önerilen yöntem, ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) açısından diğer yöntemlerle karşılaştırılabilir bir performans sergilemiştir. Dahası, önerilen yaklaşımın kullanılmasıyla, gerçek görüntülerin sentetik görüntülere kıyasla daha iyi performans gösterdiği görülmüştür. Bu bulgu, önerilen yöntemin gerçek dünya senaryolarına uygulandığında daha etkili ve güvenilir olduğunu göstermektedir.

Yapılan analizlerde sentetik görüntüler ile gerçek görüntüler arasında gözlemlenen küçük farklılıklar, Şekil 5-1'de görüldüğü gibi, gerçek görüntülerle deneyler yapmanın önemini daha da vurgulamaktadır. Gerçek görüntüler, iş parçalarının gerçek koşullarını ve özelliklerini yansıtır, bu da sentetik görüntülere kıyasla farklılıklara ve farklara neden olabilir. Bu nedenle, gerçek görüntüler kullanılarak yapılan performans değerlendirmesi, önerilen stratejinin etkinliği hakkında daha doğru öngörüler sağlar.

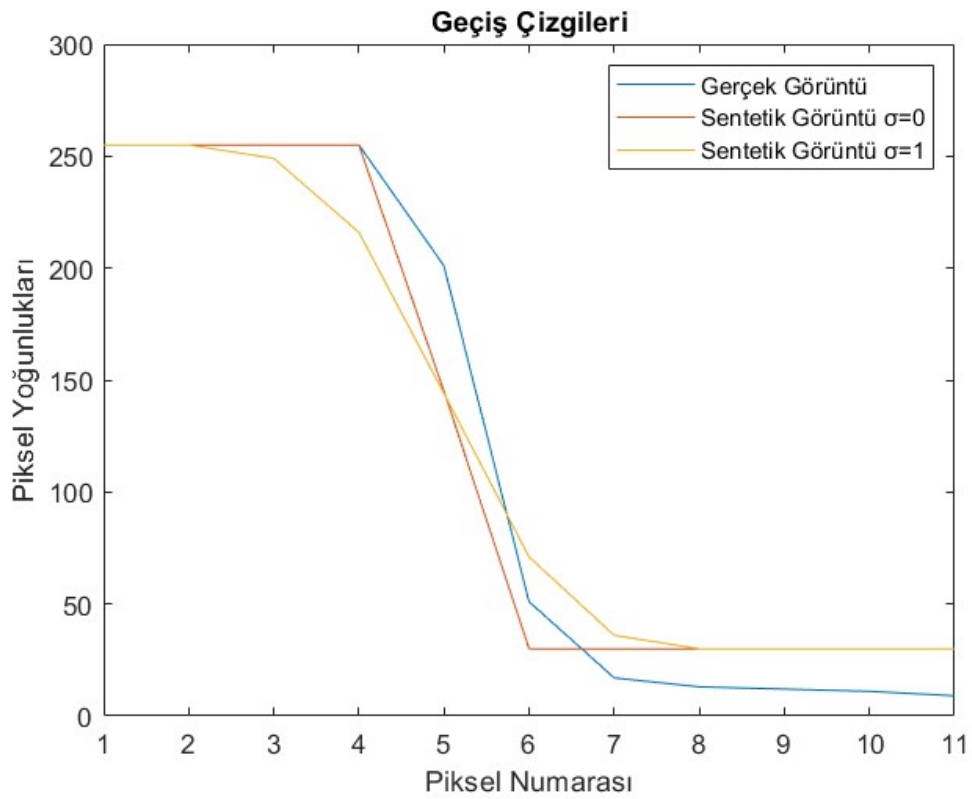


Şekil 5.1 : Görüntülerin sınır bölgelerindeki geçişi. Kırmızı kutular arka plandan parçaya geçişi göstermektedir. (a) İş parçası görüntüsü (b) Sentetik görüntü (c) Sentetik görüntü($\sigma=1$)

Gerçek parça görüntülerinin iç kısmında piksel yoğunluğundaki varyasyonlar, sentetik görüntülerdeki sabit yoğunlukla karşılaştırıldığında, ölçüm sürecinde eşik değerlerinin belirlenmesini etkilemektedir. Önerilen yöntem, özellikle gerçek görüntülerde bulunan değişken piksel yoğunluklarını dikkate aldığı için diğer yaklaşımlara göre üstün performans sergilemiştir. Bu varyasyonları dikkate alarak, önerilen yöntem, parçanın çevresi ile arasındaki geçişi daha doğru bir şekilde tespit etme yeteneğine sahiptir.

Ayrıca, gerçek görüntülerde parça ile çevresi arasındaki geçişin tamamen keskin olmaktan ziyade hafif bir eğim gösterdiğini belirtmek önemlidir. Bu, kullanılan veri setinin keskinlik seviyesinin, sentetik görüntüdeki bulanıklığı olmayan ancak tamamen aynı olmayan şekilde gösterildiği Şekil 5-2'de görülmektedir. Sentetik ve

gerçek görüntüler arasındaki farklar, özellikle alt eşik değeri açısından önemli bir etkiye sahiptir. Gerçek görüntülerde yoğunluk değeri giderek sıfıra yaklaşırken daha düzgün bir geçiş oluştururken, sentetik görüntülerde geçiş daha keskin bir şekilde tanımlanmış görünmektedir. Bu gözlemler, etkili ölçüm yöntemleri geliştirirken gerçek görüntülerin özelliklerini ve detaylarını dikkate almanın önemini vurgulamaktadır. Gerçek görüntülerde piksel yoğunluğundaki değişkenlikleri ve gözlemlenen kademeli geçişi dikkate alan önerilen yaklaşım, yalnızca yapay olarak üretilen görüntülere dayanan yöntemlere kıyasla geliştirilmiş performans sergilemektedir.



Şekil 5.2 : Şekil 5.1’de gösterilen kırmızı kutudaki geçiş çizgileri.

5.2 İyileştirilmiş Alt-Piksel Tabanlı Çap Ölçüm Yaklaşımı

Endüstriyel kameralı ölçüm uygulamalarında, üretilen parçaların tolerans sınırları içinde olup olmadığından emin olunmak için kontrol tabi tutulur. Toleranslar daraldıkça, kullanılan ekipman ve algoritmalar değişebilir. Özellikle, daha keskin geçişler elde etmek için telesentrik lensler kullanılır. Ölçüm hassasiyetini artırmak için alt-piksel tabanlı ölçüm algoritmaları tercih edilir. Ancak, bu önlemlere rağmen,

kamera düzeneğinden ya da kullanılan algoritmalarından kaynaklanan bir ölçüm hatası oluşabilir. Ölçüm algoritmasından kaynaklanan hata, sentetik görüntülerle yapılan testte gözlemlenir. Küçük çaplı parçalarda, daha büyük çaplara kıyasla daha büyük bir R değeri gözlemlenir. Ölçüm sisteminin mekanik ve yazılım kaynaklı sapmaları Şekil 3.12b'de görülebilir.

İki farklı veri seti ve üç farklı çap ölçüm algoritması ile yapılan testlerde, daha küçük çaplar için daha yüksek R değerleri oluşturulduğu gözlemlenmiştir. Bu durum standart uygulamalarda karşılaşılmayabilir. Çünkü standart uygulamalarda, ölçülmek istenen parça olarak yalnızca tek bir çap boyutu belirlenir. Belirlenen parça boyutunda özel bir referans kalıp üretilir. Oluşturulan ölçüm sistemi yalnızca ilgili parçayı ölçebilir. Kurulmuş ölçüm sisteminde farklı bir çapta bir parçayı ölçmek istenildiğinde, kamera-lens çifti tarafından oluşturulan görüş alanı öncelikle incelenir. Yeterli bir görüş alanı varsa, yeni bir referans master, yeni parçanın boyutlarında üretilir. Eğer teknolojik yetersizlik nedeniyle üretilemezse, mevcut R değeri kullanılır. Bu durumda, Şekil 3.11'de verilen ölçüm hatası oluşur. Bu tez çalışmasında, bahsedilen ölçüm hatasını ortadan kaldırmak için bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntem sayesinde, bu hata ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca, önerilen yöntem, yalnızca birkaç referans parça kullanarak görüş alanındaki tüm çapları düşük hata ile ölçmeyi mümkün kılmıştır. Bu bağlamda, önerilen yöntem özgünlük ve yenilik içermektedir. Dahası, endüstriye doğrudan uygulanabilen bir özelliğe sahiptir.

İki farklı veri seti, cam ve metal olmak üzere, kullanılarak yöntemlerin detaylı analizi gerçekleştirilmiştir. Her birinin altında üç yöntem önerilen iki yaklaşım önerilmiştir: R-tabanlı ve D-tabanlı. Her bir yaklaşım altında, üç yöntem önerilmiştir. Tüm yöntemler belirtilen veri setlerinde test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, D-tabanlı yaklaşım R-tabanlı yaklaşıma göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Bu, R-tabanlı yaklaşımda eğrinin modelleme için bir noktaya yakınsaması eğiliminde olmasından kaynaklanmaktadır. Ancak, D-tabanlı yaklaşımda eğri doğrusal davranış sergilemektedir. Bu nedenle, doğrusal uyarlama yaklaşımı daha doğru sonuçlar üretmektedir.

Cam ve metal veri setlerindeki ölçümlerde farklılıklar bulunmaktadır. Cam veri setinde elde edilen sonuçlar, metal veri setinde elde edilenlere göre daha iyi çıkmaktadır. Bunun nedenini araştırırken, cam veri setinin özel olarak üretildiği ve

örneklerden kaynaklanan hataların ihmal edilebileceği görülmektedir. Ancak, metal veri seti, iş parçalarından seçilen numunelerden oluşmaktadır. Parça ile ilgili varyasyonlar (örneğin koniklik gibi) bulunmaktadır. Ayrıca, metal parçaların gerçek boyutları bir CMM cihazıyla ölçülmüştür. Bu nedenle, CMM cihazından gelen bir ölçüm belirsizliği de bulunmaktadır. Dolayısıyla, cam veri seti önerilen yaklaşımın avantajını açıkça göstermektedir. Ayrıca, bu durum özel olarak üretilen referans mastarının avantajını da ortaya koymaktadır.

Şekil 3.12b incelendiğinde, cam veri seti ve metal veri seti tarafından oluşturulan eğrilerin benzer davranışlar sergilediği görülmektedir. Ancak, metal ve cam veri setlerinin kesiştiği benzer çaplarında, cam veri seti daha düşük değerler üretmektedir. Bunun nedeni, metal iş parçalarının cam örneklerinden daha kalın olmasıdır, bu da görüntüde odaklanmayı değiştirir. Metal veri seti boyunca tutarlı bir kalınlığa sahipken, cam örneği metal ile karşılaştırıldığında nispeten daha incedir. Öneri olarak, kalınlık farklarının çap ölçümü üzerindeki etkisi gelecekteki çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenebilir ve önerilen yaklaşım daha da geliştirilebilir.

Önerilen yaklaşımın hatası, ilgili çapların oranına göre hem yüzde hem de mikrometre (μm) cinsinden sağlanmıştır. Cam veri setinde, ölçüm hatası 13 μm ile 113 μm arasında değişirken, önerilen yaklaşımın uygulanmasıyla bu hata 1 μm seviyesine düşmüştür. Benzer şekilde, ölçüm hatası 18 μm ile 114 μm arasında değişen Metal veri setinde, hata birkaç mikrometre seviyesine düşmüş, en yüksek 9 μm olmuştur. Bu eğilim, kullanılan üç çap ölçüm algoritması için tutarlıdır. Bu nedenle, önerilen yöntemin başarısı açıkça gösterilmiştir.

Şekil 3.17 ve Şekil 3.18 incelendiğinde, milimetre cinsinden çap değerleri ile piksel çapı değerleri arasında doğrusal bir ilişki olduğu görülebilir. Bu açıdan, tek bir R değerinin yeterli olabileceği düşünülebilir. Ancak, Şekil 3.11 ve Şekil 3.12, tek bir R değerinin yeterli olmadığını açıkça göstermektedir. Önerilen yaklaşım bir çap ölçüm algoritması değil, çap ölçüm algoritmalarını iyileştiren bir yaklaşımdır. Yapılan testlere dayanarak, literatürdeki üç farklı yöntemi geliştirdiği gösterilmiştir. Özellikle, dar toleranslara ve küçük çaplara sahip parçaların çaplarının ölçümünde önemli bir iyileştirme sağlamıştır.

Bu çalışmada, yöntemi uygulamak için dört eğitim rneği kullanılmıştır. Önerilen yöntemler arasında en başarılı olanı metot 2.2 olarak bulunmuştur. Bu yöntem, öncelikle birkaç nokta kullanarak doğrusal uyum sağlar ve bu nedenle en az iki nokta gerektirir. Araştırmacılar, uygulamalarında dört yerine iki referans kullanarak önerilen yaklaşımı uygulayabilirler. Uygulamada kullanılacak masterların özel olarak üretilmesi, yöntemin başarısını artırabilir. Diğer bir açıdan, metot 2.2 ile elde edilen denklem kullanılarak, yalnızca bilinen referanslar arasındaki çaplar değil, aynı zamanda referansların üzerinde ve altındaki çapların da tahmin edilebilir.

Önerilen yaklaşım, en az iki referans master gerektirmesi nedeniyle standart uygulamalardan farklılık gösterir, bu da dezavantaj olarak düşünülebilir. Ancak, nerilen yöntemin en büyük avantajı, mevcut sistemdeki hata miktarının ortadan kaldırılmasıdır. Ayrıca, mevcut sistemin mekanik revizyonu olmadan farklı çaplı parçaların llmesine izin vermesi, önerilen yaklaşımın önemli bir avantajıdır. Bu avantaj, sadece tek bir sistem ve birkaç referans parça ile kameranın alanında bulunan tüm çapların llmesine, ölçüm hatası olmaksızın izin verir. Ayrıca, gereksiz referans master maliyetlerinin ortadan kaldırılmasına da olanak tanır. Son olarak, özel bir referans master üretmenin mümkün olmayabileceği küçük çaplı parçalar için, referans mastara ihtiyaç duyulmadan ölçüm yapılabilir. Önerilen yaklaşım sayesinde, küçük çaplar, büyük referans çaplar kullanılarak mevcut sistem için tahmin edilebilir hale gelmektedir.

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında endüstriyel görüntü işlemede çokça uygulaması bulunan yuvarlak tipli pul parçalarının çaplarının ölçülmesi üzerine araştırmalar yapılmıştır. Tez kapsamında iki farklı yöntem önerilmiştir. İlk yöntem alt-piksel sayma tabanlı hassas çap ölçüm algoritmasıdır. Önerilen algoritma standart alan tabanlı çap hesaplama yöntemini iyileştirmektedir. Alan tabanlı çap ölçümü yapılırken standart yöntemde görüntü gri seviyeden ikili seviyeye eşikleme yapılarak dönüştürülür. Ardından toplam piksel sayısı ve alan denklemi kullanılarak çap hesaplanır. Önerilen yöntemde ise gri seviye resimde eşikleme yapılırken yeni bir bakış açısı getirilmiştir. Gri seviye görüntünün sınır bölgelerindeki geçiş kısmında arka planlardan parça görüntüsüne geçerken beyazdan siyaha doğru bir geçiş olmaktadır. Tek bir eşikleme yapıldığında parçanın geçiş kısmındaki gri seviye piksellerin içerdiği parçaya ait bilgiler kaybolmaktadır. Önerilen yöntem parçanın sınır bölgelerindeki gri pikselleri de alan hesabına dahil edecek bir metod sunmaktadır. İki farklı eşik değeri seçilerek öncelikle parçaya ait geçiş olmayan ‘tam pikseller’ belirlenir ardından geçiş kısmındaki gri piksellerin konumları ve değerleri belirlenir. Belirlenen gri seviye pikseller yoğunluk değerlerine göre değişken oranlarda alan hesabına katılır. Önerilen algoritmanın başarısının ölçülmesi için hem sentetik hem de gerçek iş parçalarıyla testler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sentetik görüntü sonuçlarına göre ortalama mutlak hata (OMH) bakımından karşılaştırılan yöntemlere göre %23 daha iyi performans sergilemiştir. Özellikle küçük çaplı görüntülerde algoritmanın performansı belirgin şekilde artmaktadır. Gerçek parçalarla yapılan testlerde ise doğruluk bakımından %3 ile %10 arasında bir iyileştirme gerçekleştirilmiştir. Yöntemin en avantajlı olduğu özelliği ise işleme hızıdır. Hız testlerinde diğer yöntemlere göre ortalama %12 ile %35 arasında bir performans farkı gözlemlenmiştir. Tüm bu sonuçlar önerilen yöntemin endüstriyel yüzük parçaların çap ölçümleri için ne kadar etkili bir yöntem olduğunu göstermiştir. Tez kapsamında ikinci olarak çap ölçüm algoritmalarını iyileştirebilecek genel bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım yeni bir çap ölçüm algoritması değil, çap ölçüm algoritmalarıyla birlikte kullanılabilecek ve hatayı azaltacak bir iyileştirme yaklaşımıdır. Standart ölçüm uygulamalarında ölçülmek istenen bir iş

parçasını ölçmek için, aynı çapa sahip değeri bilinen bir referans mastara ihtiyaç duyulmaktadır. Referans master kullanılarak dönüşüm faktörü (R) hesaplanır. R değeri ile birlikte pikselden mm'ye geçiş sağlanır. Eğer iş parçasının çap değerinden farklı bir çapa sahip parça ölçülmek istendiğinde ortaya bir ölçüm hatası çıkmaktadır. Bu tez kapsamında ortaya çıkan hatanın sebebi için kök neden araştırması gerçekleştirilmiştir. Temel olarak ölçüm hatasını etkileyen iki faktör bulunmaktadır. Kurulan sistem ya da dış gürültüler gibi mekanik etkiler, diğeri ise algoritmanın çalışma performansı. Yapılan sentetik görüntü testlerinde ve gerçek parça testlerinde görülmektedir ki asılekten olan kısmın algoritmadan geldiğidir. Farklı çaplarda farklı R değerlerine sahip olduğu ortaya çıkmış ve R değerlerinin çap büyüdükçe bir noktaya doğru yakınsadığı gözlemlenmiştir. Buradan çıkarılan sonuç hesaba katılan piksel sayısı arttıkça yapılan hata düşmekte ve sabite yakın bir R değeri üretilmektedir. Küçük çaplarda ise ölçüm algoritmalarının hesaba katılan piksel sayıları azalmakta dolayısıyla değişen R değerleri üretilmektedir. Bu durum ise hataya sebep olmaktadır. Standart uygulamalarda ölçüm yapılacak iş parçasının çapı sabit ise aynı çapta özel referans mastarı üretilirerek R değeri hesaplanır ve hata yüzdesi düşürülür. Ancak bu durum her değişen çap için tekrarlanmalı, her seferinde yeni bir referans mastarı üretimine ihtiyaç duyulmaktadır. İkinci bir durumda değeri bilinmeyen bir çap ölçüsü ölçülmek istendiğinde mevcut R değeri kullanılır. Ancak R değerinin üretildiği çap ile ölçüm yapılan çapın farklı olması durumunda ortaya ölçüm hatası çıkmaktadır. Bu tez çalışmasında bahsedilen problem için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın R tabanlı ve piksel tabanlı olmak üzere iki alt yaklaşımı sunulmuştur. Her iki yaklaşımda da temel olarak en az iki adet değeri bilinen master kullanılır. Bilinen referans mastarlardan R ve piksel değerleri üretilir. Ardından bir modelleme yapılarak bilinmeyen çap için R veya direkt çap tahmin edilir. Önerilen yaklaşımın başarısını ölçmek için hem cam referans mastarı hem de gerçek iş parçaları kullanılmıştır. Kullanılan iş parçalarının kalınlıklarından kaynaklı sorun olmaması için hepsi aynı kalınlığa getirilene kadar lebleme işlemine tabi tutulmuştur. Yapılan cam testi sonuçlarına göre her iki alt yaklaşımda da standart yöntemle göre iyileştirme olduğu gözlemlenmiştir. Piksel tabanlı yaklaşım, R tabanlı yaklaşıma göre daha iyi performans göstermekle birlikte, 3-114 μm seviyelerinde gezen hata miktarını 1-2 μm mertebesine indirmiştir. Tüm çap ölçüm algoritmaları önerilen yaklaşımla bir araya getirildiğinde, genel olarak benzer iyileştirmeler gözlemlenmiştir. Bu durum, önerilen yöntemin farklı ölçüm algoritmaları ile birlikte kullanılabileceğini göstermiştir.

Ayrıca, yöntem [76], önerilen yaklaşım ile birlikte kullanıldığında en iyi sonuçları vermiştir. Bu çalışma, dar toleranslı parçaların ölçümünde ortaya çıkabilecek hataları ele almayı amaçlamıştır. Ayrıca, aynı kurulumla farklı çaplardaki iş parçalarının düşük hata oranlarıyla doğru ölçümünü mümkün kılmaktadır.



KAYNAKLAR

- [1] **Malamas, Elias N.** (2003). A survey on industrial vision systems, applications and tools. *Image and Vision Computing*, 21 (2), 171-188. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- [2] **Cubero, Sergio.** (2011). Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables. *Food and bioprocess technology*, 4, 487-504. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0411-8>
- [3] **Q. Zeng, C. Liu, Y. Miao, S. Fei, S. Wang.** (2008). A Machine Vision System for Continuous Field Measurement of Grape Fruit Diameter. *Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application*, Shanghai, China, 2, 1064-1068, <https://doi.org/10.1109/IITA.2008.274>
- [4] **Hsu, Quang-Cherng, Ngoc-Vu Ngo, Rui-Hong Ni.** (2019). Development of a faster classification system for metal parts using machine vision under different lighting environments. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 3219-3235. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2888-7>
- [5] **Gadelmawla, E. S.** (2011). Computer vision algorithms for measurement and inspection of spur gears. *Measurement*, 44 (9), 1669-1678. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.06.023>
- [6] **Duan, Zhenyun.** (2018). High precision edge detection algorithm for mechanical parts. *Measurement Science Review*, 18 (2), 65-71. <https://doi.org/10.1515/msr-2018-0010>
- [7] **Du, Hongru.** (2011). A method of dimension measurement for spur gear based on machine vision. *International Conference on Multimedia and Signal Processing*, 1, 243-246. <https://doi.org/10.1109/CMSP.2011.56>
- [8] **Liu, Siyuan, Qingchang Tan, Yachao Zhang.** (2015). Shaft diameter measurement using structured light vision. *Sensors*, 15 (8), 19750-19767. <https://doi.org/10.3390/s150819750>
- [9] **Shuxia, Guo.** (2011). Mini milling cutter measurement based on machine vision. *Procedia Engineering*, 15, 1807-1811. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.336>
- [10] **Chen, Ping.** (2014). Sub-pixel dimensional measurement with Logistic edge model. *Optik*, 125 (9), 2076-2080. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.020>
- [11] **Flesia, Ana Georgina.** (2014). Sub-pixel straight lines detection for measuring through machine vision. *IEEE international instrumentation and*

- measurement technology conference (I2MTC) proceedings*, 402-406. IEEE, 2014. <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860776>
- [12] **Wang, Wei-Chien.** (2016). A machine vision based automatic optical inspection system for measuring drilling quality of printed circuit boards. *IEEE access*, 5, 10817-10833. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2631658>
- [13] **Ngo, Ngoc-Vu.** (2017). Development of a simple three-dimensional machine-vision measurement system for in-process mechanical parts. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (10). <https://doi.dox.org/10.1177/1687814017717183>
- [14] **Li, Bin.** (2018). Application of machine vision technology in geometric dimension measurement of small parts. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 1 (8). <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0364-9>
- [15] **Tan, Zhiying.** (2023). A Method of Improving the Length Measurement Accuracy of Metal Parts Using Polarization Vision. *Machines*, 11 (2), 145. <https://doi.org/10.3390/machines11020145>
- [16] **Gangfeng, Xiao.** (2018). Research on the Dimensional Accuracy Measurement Method of Cylindrical Spun Parts Based on Machine Vision. *MATEC Web of Conferences*, 167, 3010. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201816703010>
- [17] **Reddy. R. Vijaya Kumar.** (2017). Comparative analysis of common edge detection algorithms using pre-processing technique. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 7 (5), 2574. DOI: <https://doi.org/10.11591/ijece.v7i1.pp2574-2580>
- [18] **He. Yi-Bin.** (2018). Research on improved edge extraction algorithm of rectangular piece. *International Journal of Modern Physics*, 29 (1), 1850007. <https://doi.org/10.1142/S0129183118500079>
- [19] **Gonzalez. Claudia I. Patricia Melin, Oscar Castillo.** (2017). Edge detection method based on general type-2 fuzzy logic applied to color images. *Information*, 8 (3), 104. DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2297159>
- [20] **Gonzalez. Claudia I.** (2016). Optimization of interval type-2 fuzzy systems for image edge detection. *Applied Soft Computing*, 47, 631-643. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.12.010>
- [21] **Melin. Patricia.** (2014). Edge-detection method for image processing based on generalized type-2 fuzzy logic. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22 (6), 1515-1525. DOI: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2297159>
- [22] **Rong. Weibin.** (2014). An improved CANNY edge detection algorithm. *IEEE international conference on mechatronics and automation*. 577-582. IEEE. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885761>
- [23] **Gonzalez. Claudia I.** (2016). An improved sobel edge detection method based on generalized type-2 fuzzy logic. *Soft Computing*, 20 (2), 773-784. <https://doi.org/10.1007/s00500-014-1541-0>

- [24] **Malamas. Elias N.** (2003). A survey on industrial vision systems. applications and tools. *Image and Vision Computing*, 21 (2), 171-188. [https://doi.org/10.1016/S0262-8856\(02\)00152-X](https://doi.org/10.1016/S0262-8856(02)00152-X)
- [25] **Gadelmawla. E. S.** (2017). Computer vision algorithms for measurement and inspection of external screw threads. *Measurement*, 100, 36-49. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.034>
- [26] **Renshaw, Devin T., John A. Christian.** (2020). Subpixel localization of isolated edges and streaks in digital images. *Journal of Imaging*, 6 (5), 33. <https://doi.org/10.3390/jimaging6050033>
- [27] **Bu, Lingbin.** (2021). Concentric circle grids for camera calibration with considering lens distortion. *Optics and Lasers in Engineering*, 140, (106527). <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106527>
- [28] **Su, Chung-Yen, Li-An Yu, Nai-Kuei Chen.** (2016). Effective subpixel edge detection for LED probes. *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 379-382, IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844270>
- [29] **Fabijańska. Anna.** (2012). A survey of subpixel edge detection methods for images of heat-emitting metal specimens. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 22, 695-710. DOI: <https://doi.org/10.2478/v10006-012-0052-3>
- [30] **Seo. Suyoung.** (2019). Subpixel line localization with normalized sums of gradients and location linking with straightness and omnidirectionality. *IEEE Access*, 7, 180155-180167. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2959320>
- [31] **Fabijańska. Anna.** (2015). Subpixel edge detection in blurry and noisy images. *International Journal of Computer Science and Applications*, 12 (2), 1-19.
- [32] **Fabijańska. Anna.** (2014). Gaussian-based approach to subpixel detection of blurred and unsharp edges. *Federated Conference on Computer Science and Information Systems*. 641-650. IEEE. 2014. DOI: <https://doi.org/10.15439/2014F136>
- [33] **Breder. Ricardo Lucas Bastos. Vania Vieira Estrela, Joaquim Teixeira de Assis.** (2009). Sub-pixel accuracy edge fitting by means of b-spline. *IEEE international workshop on multimedia signal processing*, 1 (5). IEEE. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/MMSP.2009.5293265>
- [34] **Peng. Gaoliang. Zhujun Zhang, Wei quan Li.** (2016). Computer vision algorithm for measurement and inspection of O-rings. *Measurement*, 94, 828-836. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.09.012>
- [35] **Li. Bin.** (2018). Application of machine vision technology in geometric dimension measurement of small parts. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018 (1), 1-8. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0364-9>
- [36] **Yan. Xuefei.** (2018). Research of Sub-Pixel Inner Diameter Measurement of Workpiece Based on OpenCV. *International Conference on Robots &*

- Intelligent System (ICRIS)*. 370-373. IEEE. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRIS.2018.00098>
- [37] **Haibing. Hu.** (2021). Research on O-ring Dimension Measurement Algorithm Based on Cubic Spline Interpolation. *Applied Sciences* 11 (8), 3716. <https://doi.org/10.3390/app11083716>
- [38] **Grompone von Gioi. Rafael, Gregory Randall.** (2017). A sub-pixel edge detector: an implementation of the canny/devernay algorithm. *IPOl Journal-Image Processing On Line*, 7, 347-372. <https://doi.org/10.5201/ipol.2017.209>
- [39] **Ye. Jian. Gongkang Fu, Upendra P. Poudel.** (2004). High-accuracy edge detection with blurred edge model. *Image and Vision Computing*, 23 (5), 453-467. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.07.007>
- [40] **Shang. Ya-ceng. Jing Chen, Jun-wei Tian.** (2010). The study of sub-pixel edge detection algorithm based on the function curve fitting. *2nd International Conference on Information Engineering and Computer Science*. 1-4. IEEE 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIECS.2010.5678279>
- [41] **Zhao. Ping.** (2012). Subpixel-precise edge extraction algorithm based on facet model. *Fourth International Conference on Computational and Information Sciences*. 86-89. IEEE. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2012.307>
- [42] **Sun. Qiucheng. Yueqian Hou, Qingchang Tan.** (2016). A subpixel edge detection method based on an arctangent edge model. *Optik*, 127 (14), 5702-5710. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.03.058>
- [43] **Seo. Suyoung.** (2018). Subpixel edge localization based on adaptive weighting of gradients. *IEEE Transactions on Image Processing*, 27 (11), 5501-5513. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIP.2018.2860241>
- [44] **Akinlar. Cuneyt, Cihan Topal.** (2013). EDCircles: A real-time circle detector with a false detection control. *Pattern Recognition*, 46 (3), 725-740. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.09.020>
- [45] **Hagara. Miroslav, Peter Kulla.** (2011). Edge detection with sub-pixel accuracy based on approximation of edge with Erf function. *Radioengineering*, 20 (2), 516-524.
- [46] **Xu. Guo-Sheng.** (2009). Sub-pixel edge detection based on curve fitting. *Second International Conference on Information and Computing Science*, 2. IEEE. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIC.2009.205>
- [47] **Zhang. Xi.** (2021). Research on Subpixel Algorithm of Fixed-Point Tool Path Measurement. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021 (1). <https://doi.org/10.1155/2021/7270908>
- [48] **Moru. Desmond K., Diego Borro.** (2020). A machine vision algorithm for quality control inspection of gears. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106 (1), 105-123. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04426-2>

- [49] **Duan. Zhenyun.** (2018). High precision edge detection algorithm for mechanical parts. *Measurement Science Review*, 18 (2), 65-71. DOI: <https://doi.org/10.1515/msr-2018-0010>
- [50] **Li. Bin.** (2018). Research on geometric dimension measurement system of shaft parts based on machine vision. *EURASIP Journal on Image and Video Processing*, 2018 (1), 1-9. <https://doi.org/10.1186/s13640-018-0339-x>
- [51] **Flesia. Ana Georgina.** (2014). Sub-pixel straight lines detection for measuring through machine vision. *IEEE international instrumentation and measurement technology conference (I2MTC) proceedings*. 402-406. IEEE. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2014.6860776>
- [52] **Chen. Ping.** (2014). Sub-pixel dimensional measurement with Logistic edge model. *Optik*, 125 (9), 2076-2080. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.10.020>
- [53] **Ghosal. Sugata, Rajiv Mehrotra.** (1993). Orthogonal moment operators for subpixel edge detection. *Pattern recognition*, 26 (2), 295-306. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90038-X](https://doi.org/10.1016/0031-3203(93)90038-X)
- [54] **Peng. Shaohu.** (2018). Subpixel edge detection based on edge gradient directional interpolation and Zernike moment. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering csse*, 26 (2), 295-306.
- [55] **Zixin. Liu.** (2018). A Fast Tool Edge Detection Method Based on Zernike Moments Algorithm. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 439 (3). DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/439/3/032106>
- [56] **Mai. Jiang, Ma Ning.** (2018). Sub-pixel edge detection method based on Zernike moment. *The 27th Chinese Control and Decision Conference, (CCDC)*. 3673-3676. IEEE. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2015.7162563>
- [57] **Yu. Weibo.** (2015). Research of improved subpixel edge detection algorithm using Zernike moments. *Chinese Automation Congress (CAC)*. 712-716. IEEE. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/CAC.2015.7382590>
- [58] **Wei. B. Z, Z. M. Zhao.** (2013). A sub-pixel edge detection algorithm based on Zernike moments. *The Imaging Science Journal*, 61 (5), 436-446. DOI: <https://doi.org/10.1179/1743131X12Y.00000000024>
- [59] **Zhang. Kun.** (2010). Subpixel edge-detection algorithm based on pseudo-Zernike moments. *5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Detector. Imager. Display. and Energy Conversion Technology*, 7658. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.866023>
- [60] **Zhang. Baojian. L. Bai, X. Zeng.** (2010). A novel subpixel edge detection based on the Zernike moment. *Information Technology Journal*, 9 (1), 41-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2010.05.003>
- [61] **Ying-Dong. Qu.** (2005). A fast subpixel edge detection method using Sobel–Zernike moments operator. *Image and Vision Computing*, 23 (1), 11-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2004.07.003>

- [62] **Wang. Chunfang.** (2016). Improved sub-pixel edge location based on spatial moment. *Int. J. Simul. Syst. Sci. Technol.*, 17, 3. DOI: <https://doi.org/10.5013/IJSSST.a.17.11.03>
- [63] **Bin. T. J.** (2008). Subpixel edge location based on orthogonal Fourier–Mellin moments. *Image and Vision Computing*, 26 (4), 563-569. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2007.07.003>
- [64] **Zunfeng. Hu. Dang Hongshe, Li Xiaorui.** (2008). A novel fast subpixel edge location method based on Sobel-OFMM. *International Conference on Automation and Logistics*. 828-832. IEEE. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICAL.2008.4636264>
- [65] **Sun. Qiucheng.** (2014). A robust edge detection method with sub-pixel accuracy. *Optik*, 125 (14), 3449-3453. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.02.001>
- [66] **Da. Feipeng, Hu Zhang.** (2010). Sub-pixel edge detection based on an improved moment. *Image and Vision Computing*, 28 (12), 1645-1658. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2010.05.003>
- [67] **Gester. D, S. Simon.** (2018). A spatial moments sub-pixel edge detector with edge blur compensation for imaging metrology. *International instrumentation and measurement technology conference (I2MTC)*. 1-6. IEEE. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/I2MTC.2018.8409664>
- [68] **Wu. Zhen.** (2019). Accurate localization of defective circular PCB mark based on sub-pixel edge detection and least square fitting. *8th Data Driven Control and Learning*, 465-470. DOI: <https://doi.org/10.1109/DDCLS.2019.8909052>
- [69] **Baozhang. Li, Cui Yanping.** (2010). Study on edge subpixel location of ellipse in computer vision measurement. *3rd International Congress on Image and Signal Processing*. 4, 1684-1688. IEEE. 2010 DOI: <https://doi.org/10.1109/CISP.2010.5647739>
- [70] **Yang. Shangkun. Yansong Wang, Hui Guo.** (2017). Sub-pixel Measurement System of Circle Outer Diameter Based on Zernike Moment. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*. 894-903.
- [71] **Xie. Xin.** (2020). An improved industrial sub-pixel edge detection algorithm based on coarse and precise location. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 11 (5), 2061-2070. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-019-01232-2>
- [72] **Li. Yangyang.** (2019). Sub-pixel Gear Parameter Measurement Based on Zemike Moment. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*. 2336-2341. IEEE. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2019.8816252>
- [73] **Steger. Carsten.** (2000). Subpixel-precise extraction of lines and edges. *International archives of photogrammetry and remote sensing*, 33 (3), 141-156.
- [74] **Chu. Menglin.** (2020). Sub-pixel dimensional measurement algorithm based on intensity integration threshold. *OSA Continuum*, 3 (10), 2912-2924. DOI: <https://doi.org/10.1364/OSAC.402101>

- [75] **Hagara. Miroslav.** (2006). Sub-pixel edge detection with wavelets." *Conf. Proc. of Radioelektronika*, 353-356.
- [76] **Trujillo-Pino. Agustín.** (2013). Accurate subpixel edge location based on partial area effect. *Image and Vision Computing*, 31 (1), 72-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2012.10.005>
- [77] **Zhu. Feijia, Peng Jin.** (2017). Sub-pixel measurement system for grid's width and period based on an improved partial area effect. *Optics Communications*, 404, 124-131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.04.004>
- [78] **Poyraz. A. G., Kınagu. H. M., Alan. S., Atak. M.** (2022). "Endüstriyel makine görmesi uygulamalarında kullanılabilecek alan tabanlı çap ölçüm algoritması". *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 919-929. DOI: <https://doi.org/10.28948/ngmuh.1069442>
- [79] **Poyraz, Ahmet Gökhan, Kaçmaz, M., Gürkan, H., Dirik, A. E.** (2024). Sub-Pixel Counting Based Diameter Measurement Algorithm for Industrial Machine Vision. *Measurement*, 225, (114063). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114063>
- [80] **Url** <<https://www.mvtec.com/technologies/subpixel>>, erişim tarihi 11.03.2024.
- [81] **Li, Xianyou, Ke Xu, Shun Wang.** (2022). Precision measurement method of large shaft diameter based on dual camera system. *Sensors*, 22 (11), 3982. <https://doi.org/10.3390/s22113982>
- [82] **Tan, Qingchang,** (2021). A model of diameter measurement based on the machine vision. *Symmetry*, 13 (2), 187. <https://doi.org/10.3390/sym13020187>
- [83] **Che, J. K., M. M. Ratnam.** (2018). Real-time monitoring of workpiece diameter during turning by vision method. *Measurement*, 126, 369-377. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.089>
- [84] **Su, Chao-Ton, C. Alec Chang, Fang-Chih Tien.** (1995). Neural networks for precise measurement in computer vision systems. *Computers in industry*, 27 (3), 225-236. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(95\)00024-8](https://doi.org/10.1016/0166-3615(95)00024-8)
- [85] **Jianming, Wang.** (2015). Error correction for high-precision measurement of cylindrical objects diameter based on machine vision. *12th IEEE International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI)*, 3, 1113-1117. IEEE, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICEMI.2015.7494414>
- [86] **Rakhmanov, V. V.** (2020). Cylinder diameter measurement with displacement and rotation error correction for non-telecentric optics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1675 (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1675/1/012085>
- [87] **Zhang, Wenjie.** (2021). A Tree Ring Measurement Method Based on Error Correction in Digital Image of Stem Analysis Disk. *Forests*, 12 (4), 464. <https://doi.org/10.3390/f12040464>
- [88] **Hariadi, Tony K.** (2018). High accuracy real time machine vision for diameter measurement using simpson algorithm. *International Conference on*

- Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 625-629. IEEE, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICTC.2018.8539544>
- [89] **Bu, Y., Guo, J.** (2022). The online detection system of concentric ring size based on machine vision. In *Journal of Physics: Conference Series*, 2290 (1), 012108. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2290/1/012108>
- [90] **Poyraz, A., Kaçmaz, M.** (2022). Edge Detection Based Autofocus Algorithm to Detect Accurate Camera Working Distance. *Academic Perspective Procedia*, 5 (3), 406-416. DOI: <https://doi.org/10.33793/acperpro.05.03.7422>
- [91] **Baleani, Alessia.** (2021). Dimensional measurements in production line: a comparison between a custom-made telecentric optical profilometer and on-the-market measurement systems. *International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4. 0&IoT)*, 693-698 IEEE, 2021. <https://doi.org/10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488428>
- [92] **Izhak Bucher** (2022). Circle fit MATLAB Central File Exchange. Retrieved November 30. 2022.
- [93] **Sawilowsky, Shlomo S.** (2009). New effect size rules of thumb. *Journal of modern applied statistical methods*, 8 (2), 26. <https://doi.org/10.22237/jmasm/1257035100>

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Ahmet Gökhan POYRAZ
Doğum Tarihi ve Yeri :
E-posta :

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik- Elektronik Mühendisliği (İng)
- **Yüksek Lisans** : 2019, Bursa Uludağ Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Anabilim dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2021- , Doğu Pres Otomotiv, Ar-Ge Sorumlusu
- 2016-2020, New York University, Deep Learning Researcher
- Eleco 2024 - Best Student Presentation Award

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Mehmet Kaçmaz, Hakan Gürkan, Ahmet Emir Dirik, “Sub-Pixel counting based diameter measurement algorithm for industrial machine vision”, *Measurement, Elsevier (SCI-Expanded, Q1)*, Vol. 225, February 2024., DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.114063>
- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Ahmet Emir DİRİK, Hakan GÜRKAN, “Measurement of Geometric Dimensions of Hexagonal Type Washer Parts Using Machine Vision-Based Systems”, In *2024 15th National Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO)* (pp. 1-5). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.1109/eleco64362.2024.10847143>
- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Ahmet Emir Dirik, Hakan Gürkan, Mehmet Kaçmaz, “Enhancing Diameter Measurement Accuracy in Machine Vision Applications”, *Optics and Lasers in Engineering , Elsevier (SCI-Expanded, Q1-Under Review)*, February 2025.

DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Mehmet Kaçmaz, “Edge Detection Based Autofocus Algorithm to Detect Accurate Camera Working Distance”, *Academic Perspective Procedia* 5.3 (2022): 406-416. <https://doi.org/10.33793/acperpro.05.03.7422>
- Büyükbayraktar, A., Kınagu, H. M., Altın, İ., Özalp, A., Ögüt, E., Salihoğlu, N. K., **Poyraz, A.G.**, ... & Mutaş, G. U. (2022). “Dizel Enjektör Yakıt Delığının Aşındırıcı Akış ile İşlenmesi (AFM) Sonrası Kalıntı Macundan Temizlenmesine Yönelik Makinenin Geliştirilmesinde Kullanılacak Kompakt Isı Eşanjörü Tasarım Analizi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (36), 243-254. DOI: <https://doi.org/10.31590/ejosat.1113144>
- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Hasan Melih Kınagu, Semih Alan, Mehmet Atak, “Area Based Diameter Measurement Algorithm for Industrial Machine Vision Applications”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1-1, DOI: <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1069442>
- **Ahmet Gökhan Poyraz**, Ahmet Emir Dirik, Ahmet Karaküçük, Nasir Memon, “Fusion of Camera Model and Source Device Specific Forensic Methods for Improved Tamper Detection”, *arXiv preprint arXiv:2002.10123* (2020). DOI: <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2002.10123>
- **Ahmet Gökhan Poyraz**, “Sayısal İmgeler İçin Prnu Ve Cnn Tabanlı Bölgesel Müdahale Tespiti”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi* 24.2 (2019): 311-324. DOI: <https://doi.org/10.17482/uumfd.516224>