T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK ÇİLEK MEYVESİNİN OLGUNLUĞU, BÜYÜKLÜĞÜ VE ÖLÇÜM YAPILAN MERKEZDEN MESAFESİNİN BULUNMASI

MUSTAFA BİLGİÇ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Jüri Üyeleri : **Dr. Öğr. Üyesi Davut AKDAŞ (Tez Danışmanı)**
Doç. Dr. Hüseyin GÜNEŞ
Dr. Öğr. Üyesi Metin DOĞAN

BALIKESİR, TEMMUZ - 2026

ETİK BEYAN

Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak tarafımca hazırlanan "**Görüntü İşleme Teknikleri Kullanılarak Çilek Meyvesinin Olgunluğu, Büyüklüğü ve Ölçüm Yapılan Merkezden Mesafesinin Bulunması** " başlıklı tezde;

- Tüm bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Kullanılan veriler ve sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tüm bilgi ve sonuçları bilimsel araştırma ve etik ilkelere uygun şekilde sunduğumu,
- Yararlandığım eserlere atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,

beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mustafa BİLGİÇ

ÖZET

GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANILARAK ÇİLEK MEYVESİNİN OLGUNLUĞU, BÜYÜKLÜĞÜ VE ÖLÇÜM YAPILAN MERKEZDEN MESAFESİNİN BULUNMASI
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MUSTAFA BİLGİÇ
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ DAVUT AKDAŞ)
BALIKESIR, TEMMUZ - 2026

Bu tez çalışmasında, çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilmesi, geometrik özelliklerinin çıkarılması ve elde edilen bilgilerin robotik hasat sistemiyle ilişkilendirilmesi ele alınmıştır. Görüntü işleme akışı MATLAB ortamında oluşturulmuştur. RGB görüntüler HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmüş, elde edilen maskeler her iki renk uzayının koşullarını birlikte sağlayan pikseller seçilerek birleştirilmiştir. Morfolojik işlemlerle küçük gürültüler azaltılmış; çilek bölgesinden alan, çevre, centroid, sınırlayıcı kutu, majör eksen ve minör eksen bilgileri çıkarılmıştır. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, Unsharp ve farklı 5×5 filtreler aynı referans görüntü ve ortak segmentasyon akışı üzerinde karşılaştırılmıştır. Ayrıca merkez ağırlıklı bir 5×5 filtre maskesi önerilmiştir. Önerilen filtre, incelenen referans görüntü üzerinde maske bütünlüğü, boyut kararlılığı ve centroid konumu açısından dengeli sonuç vermiştir. Yöntemin farklı örneklerdeki davranışını gözlemlemek amacıyla ek çilek görüntülerinde piksel tabanlı özellik çıkarımı uygulanmıştır. Olgunluk renk dağılımına göre değerlendirilmiş, stereo kamera yaklaşımı sınırlı referans mesafelerde incelenmiştir. Robotik bölümde çift kameralı uç efektör ve çok parmaklı gripper kavramsal olarak ele alınmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: 5×5 filtre, CIELab, çilek tespiti, görüntü işleme, kavrayıcı, HSV, MATLAB, robotik hasat, uç efektör

Bilim Kod / Kodları : 93418, 93431, 93436 Sayfa Sayısı : 210

ABSTRACT

DETERMINING THE RIPENESS, SIZE AND DISTANCE FROM THE MEASURED CENTER OF THE STRAWBERRY FRUIT USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES
MSC THESIS
MUSTAFA BILGIC
BALIKESIR UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING
(SUPERVISOR: ASST. PROF. DR. DAVUT AKDAS)
BALIKESIR, JULY - 2026

This thesis investigates strawberry detection using image processing methods, extraction of geometric features, and the relationship of the obtained information with a robotic harvesting system. The image processing workflow was implemented in MATLAB. RGB images were converted into HSV and CIELab color spaces, and the resulting masks were combined by selecting pixels that satisfied the conditions of both color spaces. Small regions and noise were reduced through morphological operations. Area, perimeter, centroid, bounding box, major-axis length, and minor-axis length were extracted from the detected strawberry region. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, Unsharp, and different 5×5 filters were compared using the same reference image and a common segmentation workflow. A center-weighted 5×5 filter mask was also proposed. Under the selected image and processing conditions, the proposed filter produced a balanced result in terms of mask integrity, dimensional stability, and centroid position. Pixel-based feature extraction was additionally applied to other strawberry images to observe the behavior of the method on different samples. Ripeness was evaluated according to color distribution, while the stereo-camera approach was examined using a limited number of reference distances. A dual-camera end-effector and a multi-finger gripper were conceptually evaluated in the robotic design section.9

KEYWORDS: 5×5 filter, CIELab, strawberry detection, image processing, gripper, HSV, MATLAB, robotic harvesting, end-effector

Science Code / Codes : 93418, 93431, 93436 Page Number : 210

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **i**
ABSTRACT ..... **ii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **viii**
SEMBOL LİSTESİ ..... **ix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Çalışmanın Motivasyonu 3
1.2 Tarımsal Robotik Sistemlerde Görüntü İşleme Problemi 4
1.3 Robotik Çilek Hasadında Mekanik ve Algısal Zorluklar 6
1.4 Problem Tanımı 7
1.5 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı 8
1.6 Tezin Özgün Katkıları 10
1.7 Tezin Organizasyonu 11
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI **14**
2.1 Tarımsal Görüntü İşleme Sistemleri 14
2.2 Meyve Algılama ve Olgunluk Tespiti Yöntemleri 15
2.3 Renk Tabanlı Görüntü İşleme Yaklaşımları 16
2.4 RGB, HSV ve CIELab Renk Uzaylarının Kullanımı 17
2.5 Boyut ve Mesafe Tahmini Yöntemleri 18
2.6 Robotik Hasat Sistemlerinde Algılama Problemleri 18
2.7 Klasik Filtre Tabanlı Yaklaşımlar 19
2.8 Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımların Sınırlılıkları 20
2.9 Robotik Hasat Sistemleri 21
2.10 Çilek Toplama Robotları 22
2.11 Robotik Kol ve Uç Efektör Tasarımları 23
2.12 Hassas Meyve Kavrama ve Gripper Mekanizmaları 24
2.13 Stereo Görüş ve Kamera Tabanlı Robotik Algılama 25
2.14 Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Konumlandırılması 25
3. SİSTEMİN GENEL YAPISI **27**
3.1 Sistem Mimarisi 27
3.2 Tezin Görüntü İşleme Kanadı 29
3.3 Tezin Robotik Tasarım Kanadı 30
3.4 Donanım Bileşenleri 31
3.4.1 Kamera sistemi 32
3.4.2 Robot kol 33
3.4.3 Uç efektör ve gripper yapısı 33
3.4.4 Aydınlatma koşulları 34
3.5 Yazılım Altyapısı 35
3.5.1 MATLAB ortamı 35
3.5.2 Kullanılan araçlar ve fonksiyonlar 35
3.6 Görüntü İşleme ve Robotik Sistem Arasındaki Veri Akışı 36
3.7 Sistem Veri Akış Diyagramı 37

İÇİNDEKİLER (devam)

3.8 Genel Çalışma Senaryosu 38
4. GÖRÜNTÜ OLUŞUMU VE KAMERA MODELİ 40
4.1 Görüntü Oluşum Prensipleri 40
4.2 Kamera Modellemesi Denklemleri 41
4.2.1 Perspektif ve Geometrik Dönüşüm Denklemleri 44
4.2.2 Stereo Kamera ile Derinlik Denklemleri 45
4.3 Ölçüm Hataları ve Belirsizlik Kaynakları 47
5. ÖNERİLEN GÖRÜNTÜ İŞLEME YAKLAŞIMI 50
5.1 Görüntünün MATLAB Ortamına Aktarılması 52
5.2 Ön İşleme Aşamaları 53
5.2.1 Gürültü kaynakları 53
5.2.2 Normalizasyon 54
5.3 Renk Uzayı Analizi 54
5.3.1 RGB renk uzayı 55
5.3.2 HSV renk uzayı 56
5.3.3 CIELab renk uzayı 57
5.4 Görüntü Filtreleme Aşaması 58
5.5 Renk Tabanlı Segmentasyon 59
5.6 HSV Tabanlı Segmentasyon 59
5.7 CIELab Tabanlı Segmentasyon 61
5.8 HSV ve CIELab Maskelerinin Birleştirilmesi 62
5.9 Morfolojik İşlemler 63
5.10 Çilek Bölgesinin Çıkarılması 65
5.11 Özellik Çıkarımı 66
5.11.1 Renk özellikleri 67
5.11.2 Geometrik özellikler 67
5.11.3 Alan hesabı 68
5.11.4 Çevre hesabı 68
5.11.5 Merkez noktası hesabı 68
5.11.6 Major ve minor eksen uzunlukları 70
5.11.7 Bounding box hesabı 70
5.12 Olgunluk Değerlendirmesi 71
6. FİLTRELEME VE ÖNERİLEN 5×5 FİLTRE MODELİ 73
6.1 Filtreleme Aşamasının Önemi 74
6.2 Klasik Filtrelerin Matematiksel Modelleri 74
6.3 Klasik Yumuşatma Filtreleri 77
6.3.1 Mean filter / ortalama filtre 79
6.3.2 Gaussian filter 81
6.3.3 Median filter / medyan filtre 83
6.3.4 Wiener filter 85
6.4 Kenar Tabanlı Filtreler 87
6.4.1 Sobel filter 88
6.4.2 Prewitt filter 89
6.4.3 Laplacian filter 90
6.5 Keskinleştirme Filtresi 91

İÇİNDEKİLER (devam)

6.5.1 Unsharp filter 92
6.6 Custom 5×5 Filter Maskeleri 93
6.7 Maske Boyutlarının Karşılaştırılması ve Önerilen Merkez Ağırlıklı 5×5 Filtre 95
6.8 MATLAB Ortamında Önerilen Filtrenin Uygulanması 97
6.9 Önerilen Filtrenin Segmentasyon Üzerindeki Etkisi 99
6.10 Önerilen Filtrenin Boyut ve Merkez Hesabı Üzerindeki Etkisi 100
6.11 Filtre Sonuçlarının Robotik Hasat Açısından Değerlendirilmesi 102
6.12 Bölüm Değerlendirmesi 103
7. OLGUNLUK, BOYUT VE MESAFE TAHMİNİ 105
7.1 Çilek Olgunluğunun Renk Uzayları ile Değerlendirilmesi 105
7.2 Boyut Tespitinde Major ve Minor Eksen Kullanımı 107
7.3 Piksel–Milimetre Dönüşümü ve Gerçek Ölçü Karşılaştırması 108
7.4 Stereo Kamera ile Mesafe Tahmini 110
7.5 Bölüm Değerlendirmesi 112
8. ROBOTİK ÇİLEK TOPLAMA SİSTEMİ TASARIMI 114
8.1 Robotik Hasat Sisteminin Genel Tasarım Yapısı 114
8.2 Robot Kol ve Uç Efektör Yerleşimi 116
8.3 Kamera Entegreli Uç Efektör ve Kamera Montaj Yapısı 117
8.4 Gripper Tasarım Yaklaşımı 118
8.5 Yumuşak Temas Yüzeyli Parmak Ucu Tasarımı 119
8.6 SolidWorks Tabanlı Kavramsal Tasarım 121
8.7 Bölüm Değerlendirmesi 122
9. GÖRÜNTÜ İŞLEME VE ROBOTİK TASARIMIN ENTEGRASYONU 125
9.1 Görüntü İşleme Çıktılarının Robotik Sisteme Aktarılması 125
9.2 Centroid, Boyut ve Olgunluk Bilgisinin Robotik Kararlarda Kullanılması 126
9.3 Kamera Koordinatından Robot Koordinatına Geçiş 128
9.4 Entegre Robotik Toplama İşlem Sırası 129
9.5 Bölüm Değerlendirmesi 131
10. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR 132
10.1 Deneysel Görüntü ve MATLAB İş Akışı 132
10.2 Filtreleme ve Segmentasyon Sonuçları 133
10.3 Özellik Çıkarımı ve Ölçüm Sonuçları 135
10.4 Gerçek Ölçü ile Görüntü İşleme Sonuçlarının Karşılaştırılması 137
10.5 Stereo Kamera ile Mesafe Ölçüm Sonuçları 140
10.6 Önerilen 5×5 Filtrenin Genel Başarımı 142
10.7 Bölüm Değerlendirmesi 144
11. TARTIŞMA 145
11.1 Filtre Sonuçlarının Genel Yorumu 145
11.2 Önerilen 5×5 Filtrenin Değerlendirilmesi 145
11.3 Robotik Hasat Açısından Değerlendirme ve Sınırlamalar 146
11.4 Bölüm Değerlendirmesi 150
12. SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR 152
12.1 Genel Sonuçlar ve Tezin Katkıları 152
12.2 Gelecek Çalışmalar 153
13. KAYNAKLAR 155

İÇİNDEKİLER (devam)

EKLER **159**
ÖZGEÇMİŞ **209**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1:Sistemin Genel Mimarisi 28
Şekil 3.2: Görüntü işleme ve robotik sistem arasındaki veri akışı.....37
Şekil 4.1: Pinhole kamera modeli 43
Şekil 4.2: Stereo kamera geometrisi.....47
Şekil 5.1: MATLAB tabanlı görüntü işleme iş akışı.....51
Şekil 5.2: HSV renk uzayı.....56
Şekil 5.3: CIELab renk uzayı.....57
Şekil 5.4: HSV renk uzayı dönüşümü yapılmış görüntü ve maske sonucu 60
Şekil 5.5: CIELab renk uzayı dönüşümü yapılmış görüntü ve maske sonucu.....62
Şekil 5.6: HSV ve CIELab birleşimi sonucu elde edilen maske.....63
Şekil 5.7: Morfolojik işlemlerden sonra maske 65
Şekil 5.8: Özellik çıkarımı yapılan görüntü.....66
Şekil 5.9: Çilek meyvesinin merkez noktası.....69
Şekil 6.1: Mean filtre sonucu elde edilen görüntü 81
Şekil 6.2: Gaussian filtre sonucu elde edilen görüntü.....83
Şekil 6.3: Medyan filtre sonucu elde edilen görüntü 85
Şekil 6.4: Custom 5x5 maskelerden alınan sonuçlar, 3 farklı maske 3 farklı çıktı.....95
Şekil 8.1: İlk tasarım denemeleri Solidwork kullanarak çizim oluşturulması 115
Şekil 8.2: Tasarım denemeleri önden kesit görüntüsü.....115
Şekil 8.3: Kamera yerleşimi.....118
Şekil 8.4: Yumuşatıcı kauçuk parmak ucu tasarımı 120
Şekil 8.5: Tasarım çizimleri 123
Şekil 8.6: Konsept dizayn olarak giydirilmiş kafa tutucu yapısı 124
Şekil 8.7: Konsept dizayn olarak giydirilmiş nihai model yapısı 124
Şekil 9.1: Sistemin çalışma adımları.....130
Şekil 10.1: Filtre sonuçları.....133
Şekil 10.2: Segmentasyon sonuçları 134
Şekil 10.3: Merkez sapması sonuçları.....136
Şekil 10.4: Ortalama boyut hatası sonuçları 136
Şekil 10.5: Kumpas ile yapılan ölçüm 138
Şekil 10.6: Mesafe ölçüm düzeneği, raspery pi 3 model kamera.....141

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 10.1: Filtrelerin genel performans karşılaştırılması 135
Tablo 10.2: MATLAB özellik çıkarımı sonuçları 137
Tablo 10.3: Filtre sonuçlarının referans boyutlara göre karşılaştırılması 139
Tablo 10.4: Gerçek ve stereo kamera ile hesaplanan mesafe sonuçlarının karşılaştırılması .. 142
Tablo 10.5: Önerilen merkez ağırlıklı 5x5 filtrenin referans görüntü üzerindeki temel sonuçları 143
Tablo 11.1: Renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinde kullanılan karar ölçütleri 147
Tablo 11.2: Çalışmanın seçili literatürle kapsam ve sayısal değerlendirme açısından karşılaştırılması 149

SEMBOL LİSTESİ

2B : İki boyutlu
3B : Üç boyutlu
a* : CIELab renk uzayında yeşil-kırmızı renk bileşeni
α : Keskinleştirme katsayısı
b* : CIELab renk uzayında mavi-sarı renk bileşeni
B_c : Mavi renk kanalı
CIELab : L, *a* ve b* bileşenlerinden oluşan renk uzayı
G : Toplam gradyan büyüklüğü
G : Yeşil renk kanalı
H : HSV renk uzayında renk tonu bileşeni
HSV : Renk tonu, doygunluk ve parlaklık/değer renk uzayı
L* : CIELab renk uzayında açıklık/parlaklık bileşeni
mm : Milimetre
mm/px : Milimetre/piksel dönüşüm oranı
px : Piksel
R : Kırmızı renk kanalı
RGB : Kırmızı, yeşil ve mavi renk uzayı
Σ : Toplam sembolü
σ : Standart sapma
σ^2 : Varyans
∇ : Gradyan operatörü
∇^2 : Laplacian operatörü

1. GİRİŞ

Tarımda robotik çalışmalar gerek verimlilik açısından gerek faydaları açısından gün geçtikçe önemli hale gelmektedir. Özellikle hasat hala büyük ölçüde insan gücüne bağlı olarak devam etmektedir. Meyve hasadı denildiğinde, yalnızca meyvenin daldan koparılması değil, bu meyvenin olgunluğunun tespit edilmesi, gerekli olgunluk var ise meyveye zarar vermeden kavranması ayrıca kavrama sırasında da ağaca da zarar verilmeden işlemin tamamlanması gerekir. Tarımsal görüntü işleme çalışmaları, meyvenin görüntüden tespit edilmesi ve ayırt edici özelliklerinin sayısal olarak çıkarılması üzerine kurulmaktadır [1], [2]. Robotik hasat söz konusu olduğunda ise bu algılama çıktılarının robot kol ve uç efektör yapısıyla ilişkilendirilmesi gerekir.

Robotik hasat sistemlerinde görüntü işleme, robotun çevresini algılamasını sağlayan en önemli adımlardan biridir. Robot kolun hareket edebilmesi için sistemin yalnızca görüntüde bir çilek olduğunu bilmesi yeterli değildir. Çileğin görüntü üzerindeki merkezi, yaklaşık boyutu, olgunluk durumu ve mümkünse kamera veya robot koordinat sistemine göre konumu belirlenmelidir. Özellikle çileğin merkez noktası, robot kolun hedefe yönelmesi için temel bir referans noktası sağlar. Bu merkez bilgisinde oluşabilecek küçük bir hata, robot kolun meyveye yanlış noktadan yaklaşmasına ve hasat işleminin başarısız olmasına neden olabilir [3], [4], [5].

Çilek, robotik hasat çalışmaları için hem uygun hem de zorlayıcı bir meyvedir. Uygun bir örnektir çünkü olgun çilek genellikle kırmızı rengiyle arka plandan ayrılabilir. Renk tabanlı görüntü işleme yöntemlerinin kullanılmasına olanak sağlar. Ancak çilek aynı zamanda hassas, küçük boyutlu ve kolay zarar görebilen bir meyvedir. Ayrıca doğal ortamda yapraklar arasında kalabilir, gölgeli bölgelerde bulunabilir veya diğer çileklerle üst üste gelebilir. Çileğin doğal ortamda yapraklar arasında kalması, farklı ışık koşullarında görüntülenmesi ve diğer meyvelerle yakın konumda bulunması tespit sürecini zorlaştırmaktadır [3], [5], [6]. Görüntüde oluşan bu belirsizlikler, sonraki robotik yaklaşma ve kavrama adımlarına da doğrudan yansıyabilir.

Tez çalışmasında, çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilmesi ve elde edilen bilgilerin robotik bir çilek toplama sistemi için kullanılabilir hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Çalışma iki ana bölüm üzerine kurulmuştur. Birinci bölüm, MATLAB tabanlı görüntü işleme ve filtreleme yaklaşımıdır. Kapsamda RGB görüntü HSV ve CIELab renk uzaylarına

dönüştürülerek ve bu dönüşümler birleştirilerek, farklı filtreleme yöntemleri karşılaştırılıp, segmentasyon ve morfolojik işlemler uygulanmaktadır. Sonucunda ise çileğe ait alan, çevre, merkez noktası, major eksen ve minor eksen gibi özellikler çıkarılmaktadır. İkinci bölüm ise robotik çilek toplama sistemi tasarımıdır. Bu bölümde görüntü işleme sonucunda elde edilen merkez, boyut ve olgunluk bilgilerinin robot kol, kamera sistemi, uç efektör ve gripper tasarımı ile nasıl ilişkilendirileceği ele alınmaktadır. Tasarlanan sistemde iki adet kamera, uç efektörün sağ ve sol tarafına yerleştirilmiş şekilde düşünülmüştür. Kameralar, taşıyıcı çubuk benzeri montaj elemanları üzerine bağlanmış ve arka tarafta yay destekli bir yapı ile mekanik gevşekliğin azaltılması hedeflenmiştir. Bu sayede kamera hizasının korunması, titreşim etkilerinin azaltılması ve görüntü işleme algoritmasına daha kararlı veri sağlanması amaçlanmaktadır.

Görüntü işleme tarafında filtreleme aşaması özel olarak ele alınmaktadır. Segmentasyon öncesi uygulanan filtre, çileğin arka plandan ayrılmasını, sınırlarının korunmasını, renk bilgisinin bozulmamasını ve merkez noktasının kararlı hesaplanmasını doğrudan etkiler. Bazı filtreler gürültüyü azaltırken çilek sınırını bulanıklaştırabilir. Bazı filtreler ise kenarları belirginleştirirken renk tabanlı segmentasyon için gerekli renk bilgisini zayıflatabilir. Filtreleme, segmentasyon öncesinde görüntüdeki istenmeyen değişimlerin azaltılması ve kullanılacak özelliklerin daha kararlı hale getirilmesi için temel görüntü işleme adımlarından biridir [7], [8], [9], [10]. Bu nedenle filtre seçimi, yalnızca görüntünün görünümünü değil, segmentasyon ve özellik çıkarımı sonucunu da etkileyebilir.

Robotik tasarım tarafında ise uç efektör ve gripper yapısı ön plana çıkmaktadır. Çileğin hassas yapısı nedeniyle kavrama işlemi tek noktadan yüksek kuvvet uygulayacak şekilde yapılmamalıdır. Bunun yerine çileği çevresel olarak destekleyen, temas yüzeyini artıran ve düşük kuvvetle kavrama sağlayan bir mekanizma tercih edilmelidir. Çilek ile temas eden tutucular, üç veya dört parmaklı, simetrik yerleşimli ve ileri–geri hareket edebilen bir yapıya sahip olmalıdır. Çileğin yumuşak ve kolay zarar görebilen yapısı, kavrama sırasında temasın kontrollü biçimde gerçekleştirilmesini gerekli kılmaktadır [5], [11], [12]. Bu tez kapsamında çileği tek noktadan sıkıştırmak yerine çevresel olarak desteklemek amacıyla üç veya dört parmaklı, simetrik yerleşimli ve ileri–geri hareket edebilen bir gripper yapısı önerilmiştir.

Bu tezde görüntü işleme ve robotik tasarım birbirinden bağımsız iki alan olarak ele alınmamaktadır. Görüntü işleme tarafında elde edilen merkez noktası robot kol için hedef konum bilgisini oluşturur. Çileğin eksen uzunlukları, gripper açıklığının belirlenmesinde kullanılabilir. Renk ve olgunluk bilgisi ise robotun hasat kararı vermesine yardımcı olur. Çalışma, yalnızca çileği görüntü üzerinde tespit eden bir yaklaşım sunmakla kalmamakta; bu tespiti robotik toplama sistemi için kullanılabilir mekanik ve sayısal verilere dönüştürmeyi amaçlamaktadır. Kısacası sistem çalışma prensibi olarak, görüntü işleme tarafındaki her veriyi robotik anlamda kullanılabilir halde iletimini sağlayıp, kullanmayı hedeflemiştir.

1.1 Çalışmanın Motivasyonu

Temel motivasyon noktası, tarımsal robotik sistemlerde algılama ve kavrama süreçlerinin birlikte değerlendirilmesi gerekliliğidir. Bir insan çileğe baktığında meyvenin olgunluğunu, yerini ve yaklaşık boyutunu kolayca anlayabilir. Ayrıca çileği tutarken uyguladığı kuvveti doğal olarak ayarlayabilir. Ancak aynı işlemin robotik bir sistem tarafından yapılabilmesi için görüntüden elde edilen renk, şekil, konum ve boyut bilgilerinin sayısal olarak çıkarılması gerekir. Daha sonra bu bilgiler robot kol ve uç efektör tasarımı için kullanılabilir hale getirilmelidir.

Çilek gibi hassas meyvelerde algılama hatası doğrudan hasat hatasına dönüşebilir. Örneğin çileğin merkezi yanlış hesaplanırsa robot kol meyveye doğru noktadan yaklaşamayabilir. Çileğin boyutu hatalı çıkarılırsa gripper açıklığı uygun ayarlanamayabilir. Olgunluk bilgisi yanlış yorumlanırsa hasat için uygun olmayan bir meyve seçilebilir. Benzer şekilde görüntü üzerinde çileğin kenarları fazla bulanıklaşırsa, boyut ve merkez hesabı hatalı olabilir. Görüntü işleme aşamasındaki küçük bir hata, robotik sistemin mekanik hareketini ve kavrama başarısını etkileyebilir [3], [4], [5].

Literatürde meyve tespiti ve olgunluk analizi için renk tabanlı yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Çilek, domates, elma ve benzeri meyvelerde renk bilgisi, meyvenin arka plandan ayrılması ve hasat uygunluğunun değerlendirilmesi için önemli bir göstergedir [1], [6], [13]. Bununla birlikte robotik hasat sistemlerinde yalnızca renk bilgisi yeterli değildir. Robotun

hedefe yönlendirilebilmesi için meyvenin görüntü üzerindeki merkezi, gerçek dünya koordinatlarına aktarılabilecek konumu ve yaklaşık boyutu da belirlenmelidir [4], [5], [14].

Bu tezde motivasyon, çilek tespitini sadece bir görüntü işleme problemi olarak değil, robotik hasat sistemine veri üreten bir algılama problemi olarak ele almaktır. Görüntü işleme modülü, robotik sistemin karar verme sürecinin başlangıç noktasıdır. Kamera görüntüsünden elde edilen merkez, boyut ve olgunluk bilgileri, robot kolun hedef seçimini ve gripper mekanizmasının çalışma biçimini doğrudan etkiler.

Öte yandan, çalışma klasik görüntü işleme yöntemlerinin açıklanabilir ve kontrol edilebilir yapısından yararlanmaktır. Derin öğrenme tabanlı yöntemler birçok görüntü işleme probleminde yüksek başarı sağlayabilmektedir. Ancak bu yöntemler büyük veri setlerine, eğitim sürecine ve daha karmaşık hesaplama altyapılarına ihtiyaç duyabilir. Bu tezdeki amaç ise, hazır bir derin öğrenme modeli eğitmek değil, çilek algılama sürecinde kullanılan filtreleme ve segmentasyon adımlarının sistem çıktısına etkisini incelemektir. Klasik görüntü işleme yöntemlerinde filtre çekirdeği, eşik değeri ve işlem adımları doğrudan incelenebildiği için kullanılan yöntemin görüntü üzerindeki etkisi ayrı ayrı değerlendirilebilir [7], [8], [9]. Bu tezde de farklı filtrelerin aynı işlem zinciri içinde karşılaştırılabilmesi amacıyla klasik görüntü işleme yaklaşımı tercih edilmiştir.

1.2 Tarımsal Robotik Sistemlerde Görüntü İşleme Problemi

Tarımsal robotik sistemlerde görüntü işleme problemi çoğu zaman yalnızca meyvenin görüntüde bulunması şeklinde düşünülmektedir. Ancak robotik hasat açısından asıl ihtiyaç, meyvenin görüntüde tespit edilmesinden sonra başlar. Robot kolun hareket edebilmesi için meyvenin merkezi, yaklaşık boyutu, olgunluk durumu ve mümkünse üç boyutlu konumu belirlenmelidir. Görüntü işleme çıktısı yalnızca görsel bir sonuç değil, robotik sistemin kullanabileceği sayısal bir veri olmalıdır.

Meyve tespitinde renk bilgisi önemli bir başlangıç noktasıdır. Çilek gibi kırmızı renkle belirginleşen meyvelerde renk uzayı seçimi sonucu doğrudan etkiler. RGB renk uzayı görüntünün temel renk bilgisini verse de ışık değişimlerinden kolay etkilenebilir. Aynı çilek

farklı ışık altında daha açık, daha koyu veya farklı doygunlukta görünebilir. Bu durum sabit RGB eşiklerine dayalı segmentasyon işlemlerini kararsız hale getirebilir. Meyve görüntülerinde renk bilgisinin değerlendirilmesi için farklı renk uzaylarından yararlanılabilmektedir [6], [14], [15], [16]. HSV renk uzayı renk tonu ve doygunluk bileşenlerini ayrı ele alırken, CIELab uzayındaki a* bileşeni kırmızı–yeşil yönündeki renk değişimini incelemeye olanak sağlar.

HSV renk uzayı, renk tonu, doygunluk ve parlaklık bilgisini ayrı bileşenler olarak değerlendirmeye olanak sağlar. Bu durum çileğin kırmızı tonlarının belirlenmesi açısından avantaj sağlar. CIELab renk uzayı ise L*, a* ve b* bileşenleriyle renk farklılıklarını farklı bir düzlemde temsil eder. Özellikle a* kanalı, yeşil-kırmızı ekseni üzerinde bilgi sağladığı için çileğin yeşil yapraklardan ayrılmasında faydalıdır. CIELab renk uzayı, renk bileşenlerinin parlaklık bilgisinden ayrı değerlendirilmesine ve kırmızı–yeşil karşıtlığının incelenmesine olanak sağlamaktadır [15], [16], [17]. Bu tezde HSV ve CIELab renk uzayları birlikte kullanılarak çilek bölgesinin daha kararlı şekilde ayrılması hedeflenmiştir.

Görüntü işleme probleminde bir diğer kritik adım filtrelemedir. Tarımsal görüntülerde gürültü, gölge, parlama, yaprak örtüşmesi ve arka plan karmaşıklığı gibi etkiler bulunabilir. Segmentasyon öncesi uygulanan filtreler bu etkileri azaltabilir. Ancak her filtre aynı etkiyi oluşturmaz. Ortalama ve Gauss filtreleri gürültüyü azaltabilir ancak kenar bilgisini yumuşatabilir. Medyan filtre küçük izole gürültüleri azaltırken sınırları daha iyi koruyabilir. Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler ise sınırları belirginleştirir; fakat renk tabanlı segmentasyon için gerekli orijinal renk bilgisini yeterince koruyamayabilir [7], [8], [9], [10].

Bu durum robotik hasat açısından önemlidir. Çünkü segmentasyon sonucunda elde edilen maske, çileğin merkez noktasını ve boyutunu belirlemek için kullanılır. Maske gürültülü olursa merkez noktası kayabilir. Maske fazla yumuşatılmışsa çileğin gerçek sınırları bozulabilir. Eğer çilek bölgesi eksik veya fazla ayrılırsa, robot kolun hedef noktası ve gripper açıklığı yanlış belirlenebilir. Görüntü işleme problemi, doğrudan robotik hareket ve kavrama başarısıyla ilişkilidir [4], [5], [11].

Bu tezde görüntü işleme problemi, çileği görüntüde bulmakla sınırlı tutulmamaktadır. Renk ve olgunluk analizi, boyut tahmini, merkez noktası hesabı ve robotik lokasyon bilgisi birlikte düşünülmektedir. Bu adımların güvenilirliği ise büyük ölçüde filtreleme ve segmentasyon kalitesine bağlıdır. Filtreleme aşaması, bütün sistemin doğruluğunu etkileyen temel bir bölüm olarak ele alınmaktadır.

1.3 Robotik Çilek Hasadında Mekanik ve Algısal Zorluklar

Robotik çilek hasadı hem algısal hem de mekanik zorluklar içeren bir problemdir. Algısal zorluklar, çileğin görüntü üzerinde doğru tespit edilmesi, arka plandan ayrılması, olgunluk durumunun belirlenmesi ve merkez noktasının hesaplanması ile ilgilidir. Mekanik zorluklar ise robot kolun çileğe uygun açıdan yaklaşması, meyveyi ezmeden kavraması ve hasat işlemini gerçekleştirmesi ile ilgilidir. Bu iki alan birbirinden bağımsız değildir. Algılama sisteminden gelen hata, mekanik hareketin başarısını doğrudan etkiler.

Çileğin doğal ortamda bulunduğu koşullar görüntü işleme açısından zorluk oluşturur. Çilekler çoğu zaman yapraklar arasında kısmen kapanmış şekilde bulunur. Bazı durumlarda meyvenin yalnızca bir bölümü görünür. Ayrıca ışık koşulları sabit değildir; gölge, parlama ve farklı kamera açıları çileğin renk değerlerini değiştirebilir. Çileği yalnızca kırmızı pikselleri seçerek güvenilir biçimde tespit etmek her zaman mümkün değildir. Bu durum özellikle robotik hasat sistemlerinde daha kritik hale gelir, çünkü görüntüdeki tespit hatası robotun fiziksel hareketine yansır [3], [14], [18].

Mekanik açıdan çileğin hassas yapısı önemli bir sınırlamadır. Çilek yumuşak dokulu bir meyve olduğu için yüksek temas kuvveti altında kolayca ezilebilir veya yüzeyinde hasar oluşabilir. Robotik kavrama sistemi, meyveyi tek noktadan sıkıştırmak yerine daha geniş bir temas yüzeyi ile desteklemelidir. Çok parmaklı gripper mekanizmaları bu noktada avantaj sağlayabilir. Robotik çilek hasadında kavrama mekanizmasının meyveye zarar verme riskini azaltacak ve teması kontrollü biçimde dağıtacak şekilde tasarlanması önemlidir [5], [11], [12]. Bu tez kapsamında kuvvetin çilek çevresine daha dengeli yayılması amacıyla üç veya dört parmaklı simetrik bir gripper yapısı değerlendirilmiştir.

Robot kolun hedefe yaklaşma hareketi de çileğin doğru tespit edilmesine bağlıdır. Görüntü işleme sonucunda elde edilen centroid değeri, robot kol için temel hedef noktası olarak değerlendirilebilir. Ancak gerçek bir hasat senaryosunda robotun doğrudan meyvenin merkezine gitmesi her zaman yeterli değildir. Meyvenin sap yönü, çevredeki yapraklar, diğer meyveler ve gripperın yaklaşma açısı da dikkate alınmalıdır. Robotik hasat sistemlerinde algılama, lokalizasyon ve uç efektör tasarımı birlikte değerlendirilmelidir [4], [5], [11].

Çalışma kapsamında geliştirilen robotik tasarım yaklaşımında, uç efektör üzerinde iki adet kamera kullanılması düşünülmüştür. Kameralar sağ ve sol tarafta konumlandırılarak çileğin farklı açılardan görüntülenmesi ve bu şekilde derinlik algısının tespiti hedeflenmiştir. Ayrıca kameraların taşıyıcı çubuk benzeri bağlantı elemanlarına monte edilmesi, görüş alanının gripper parmakları tarafından engellenmesini azaltabilir. Efektöre bağlantı tarafında kullanılan yay destekli yapı, kamera montajındaki mekanik gevşekliğin azaltılması, titreşim sönümlenmesi ve görüntü alma kararlılığının artırılması için düşünülmüştür.

Bu mekanik yaklaşımın temel amacı, görüntü işleme ve robotik kavrama arasındaki bağlantıyı güçlendirmektir. Kamera sisteminin kararlı görüntü sağlaması, filtreleme ve segmentasyon başarısını destekler. Segmentasyon sonucunda daha kararlı bir merkez ve boyut bilgisi elde edilmesi ise robot kolun hedefe yaklaşmasını ve gripperın çileği uygun şekilde kavramasını kolaylaştırır. Böylece robotik çilek hasadı problemi, yalnızca yazılım veya yalnızca mekanik tasarım problemi olarak değil, bütünleşik bir algılama ve kavrama problemi olarak ele alınmaktadır.

1.4 Problem Tanımı

Bu tezde ele alınan temel problem, çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleriyle doğru ve kararlı şekilde tespit edilmesi, ardından bu tespitin robotik bir toplama sistemi için kullanılabilir bilgiye dönüştürülmesidir. Problem yalnızca görüntüde çileğin bulunması değildir. Çileğin arka plandan ayrılması, olgunluk durumunun yorumlanması, görüntü üzerindeki merkez noktasının hesaplanması, yaklaşık boyutunun çıkarılması ve bu bilgilerin robot kol ile gripper tasarımı açısından kullanılabilir hale getirilmesi gerekir.

Bu problem birkaç alt bileşenden oluşmaktadır. İlk olarak çileğin görüntüdeki arka plandan ayrılması gerekmektedir. Çilek kırmızı rengiyle belirginleşse de gölge, ışık değişimi, yapraklar ve arka plan karmaşıklığı bu ayrımı zorlaştırabilir. İkinci olarak çileğe ait renk bilgisi güvenilir şekilde çıkarılmalıdır. Olgunluk değerlendirmesi için kullanılacak renk bilgisi, yalnızca doğru ayrılmış çilek bölgesinden alınmalıdır. Üçüncü olarak segmentasyon sonucunda meyvenin alanı, çevresi, major ekseni, minor ekseni ve merkezi hesaplanmalıdır. Son aşamada ise bu bilgiler robotik sistem için anlamlı hedef bilgisine dönüştürülmelidir.

Görüntü işleme zincirinde oluşan küçük hatalar robotik sistem açısından büyük sonuçlar doğurabilir. Örneğin segmentasyon maskesine arka plan pikselleri dahil edilirse çileğin merkezi gerçek konumundan sapabilir. Çileğin bir kısmı maskenin dışında kalırsa boyut olduğundan küçük hesaplanabilir. Filtreleme sırasında sınır bilgisi fazla yumuşatılırsa major ve minor eksen uzunlukları gerçek ölçüden uzaklaşabilir. Bu hatalar robot kolun hedefe yaklaşma doğruluğunu ve gripper mekanizmasının kavrama davranışını etkileyebilir.

Bu tezde problem, klasik görüntü işleme filtrelerinin doğrudan uygulanması şeklinde ele alınmamaktadır. Bunun yerine, farklı filtreleme yöntemlerinin çilek segmentasyonu ve ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi karşılaştırılmaktadır. Özellikle önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre yapısı, gürültü azaltma ve sınır koruma arasında daha dengeli bir çözüm sunması amacıyla değerlendirilmektedir. Bu filtreleme çıktıları daha sonra robotik toplama sistemi açısından yorumlanmaktadır.

Robotik tarafta ise problem, görüntü işleme sonucunda elde edilen bilgilerin mekanik tasarım ile uyumlu hale getirilmesidir. Çileğin merkez noktası robot kolun yaklaşacağı hedefi belirlerken, boyut bilgisi gripper açıklığına etki edebilir. Olgunluk bilgisi ise çileğin toplanıp toplanmayacağına karar vermede kullanılabilir. Robotik uç efektör tasarımı, görüntü işleme çıktılarının pratikte kullanılabileceği şekilde düşünülmelidir.

1.5 Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilmesi, çileğe ait merkez, boyut ve olgunluk bilgilerinin çıkarılması ve bu bilgilerin robotik çilek toplama sistemi tasarımı ile

ilişkilendirilmesidir. MATLAB tabanlı görüntü işleme yaklaşımı ile kamera destekli robotik uç efektör tasarımını birlikte ele almaktadır.

Görüntü işleme tarafında, RGB görüntü ya da görüntü beslemesi, HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmektedir. RGB renk uzayının ışık değişimlerinden daha fazla etkilenmesi ve çilek gibi renk tabanlı ayrılabilen meyvelerde HSV ve CIELab uzaylarının daha uygun analiz imkânı sunmaktadır. HSV uzayı renk tonu ve doygunluk bilgisini ayırırken, CIELab uzayındaki a* kanalı kırmızı-yeşil ayrımını desteklemektedir. Çilek renginin değerlendirilmesinde HSV bileşenleri ile CIELab uzayındaki kırmızı–yeşil ayrımından yararlanılabilmektedir [6], [13], [15], [16]. Bu tez kapsamında iki renk uzayından elde edilen bilgiler birlikte kullanılarak çileğin arka plandan daha kararlı biçimde ayrılması hedeflenmiştir.

Filtreleme kısmında, klasik filtreler ve özel 5×5 filtre maskeleri karşılaştırılmaktadır. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian ve Unsharp filtreleri aynı görüntü işleme zinciri içinde test edilmekte; bu filtrelerin segmentasyon, sınır koruma, renk bilgisi ve ölçüm kararlılığı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir. Görüntü filtrelerinde komşuluk yapısı ve katsayı dağılımı, gürültü azaltma ile sınır bilgisinin korunması arasındaki dengeyi doğrudan etkiler [7], [8], [9], [10]. Bu tez kapsamında önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, söz konusu denge çilek görüntüsü üzerinde incelenecek şekilde tasarlanmıştır.

Robotik tasarım tarafında, çilek toplama işlemine yönelik kavramsal bir robotik uç efektör tasarımı sunulmaktadır. Bu tasarımda iki adet kamera, uç efektörün sağ ve sol tarafına yerleştirilmiş şekilde düşünülmüştür. Kameralar, taşıyıcı çubuk benzeri montaj elemanlarına bağlanmakta ve arka tarafta yay destekli bir yapı ile mekanik gevşekliğin azaltılması hedeflenmektedir. Bu yapı, kamera hizasının korunmasına ve görüntü işleme için daha kararlı veri elde edilmesine katkı sağlayabilir.

Gripper tasarımında ise üç veya dört parmaklı, simetrik yerleşimli ve ileri-geri hareket edebilen bir tutucu yapı değerlendirilmektedir. Çileği tek noktadan sıkıştırmak yerine çevresel olarak destekleyerek almayı hedefleyen bu tutucu tasarım, meyveye zarar vermeden kavrama sağlamaktır. Çileğin hassas yapısı nedeniyle temas kuvvetinin azaltılması, temas yüzeyinin

artırılması ve yumuşak temas sağlayabilecek malzemelerin kullanılması robotik hasat sistemi için önemli tasarım kriterleri olarak ele alınmaktadır [5], [11], [12].

Gerçek zamanlı çalışan tamamlanmış bir robot prototipi üretmekten ziyade, görüntü işleme tabanlı algılama modülü ile robotik uç efektör tasarımının bütünleşik bir şekilde ortaya konulması hedeflenmiştir. MATLAB ortamı, görüntü işleme ve filtre doğruluk karşılaştırma süreci için kullanılırken; robotik tasarım tarafı kavramsal CAD yaklaşımı, kamera yerleşimi, gripper mekanizması ve sistem entegrasyonu üzerinden değerlendirilmektedir.

1.6 Tezin Özgün Katkıları

Tezin özgün katkısı olgun çilek meyvesinin tespitinin yalnızca görüntü üzerinde bir nesne bulma problemi olarak ele alınmamasıdır. Tasarımı bütünü ile ele alındığında işlenmiş olan görüntü verileri, robotik toplama sisteminin kullanabileceği sayısal verilere dönüştürülmektedir. MATLAB tabanlı görüntü işleme ve filtreleme yaklaşımının kullanımı, kamera destekli robotik uç efektör ve gripper tasarımı ile birleştiren bütünleşik bir çalışma halinde bu tez tam bir tasarımı ele almaktadır.

İlk katkı noktası, çilek meyvesinin renk, merkez, boyut ve olgunluk bilgilerini çıkarmaya yönelik görüntü işleme zincirinin kurulmasıdır. RGB görüntüden HSV ve CIELab renk uzaylarına geçiş, filtreleme, renk tabanlı segmentasyon, morfolojik işlemler ve özellik çıkarımı adımları birlikte ele alınmaktadır. Böylece çilek yalnızca görsel olarak tespit edilmekle kalmamakta, robotik sistem için kullanılabilecek sayısal özelliklere dönüştürülmektedir.

İkinci katkı, farklı görüntü filtrelerinin aynı işlem akışı içinde karşılaştırılmasıdır. Klasik filtreler ve 5×5 filtre maskeleri; gürültü azaltma, sınır koruma, renk bilgisi, segmentasyon kalitesi ve ölçüm kararlılığı açısından değerlendirilmektedir. Bu karşılaştırma, filtreleme adımının çilek tespiti ve robotik hedef bilgisi üretimi üzerindeki etkisini daha açık şekilde göstermektedir.

Üçüncü katkı, önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre yapısının kullanılmasıdır. Bu yapı, 3×3 maskelere göre daha geniş bir komşuluk bilgisi kullanırken, 7×7 gibi daha büyük maskelerin oluşturabileceği aşırı yumuşatma etkisini azaltmayı amaçlamaktadır. Merkez piksele ve yakın

komşulara daha fazla ağırlık verilmesi, çilek sınırının ve renk bilgisinin korunmasına yardımcı olabilir.

Dördüncü katkı, görüntü işleme çıktılarının robotik sistemle ilişkilendirilmesidir. Çileğin merkez noktası robot kolun hedef noktası olarak, boyut bilgisi gripper açıklığı için, olgunluk bilgisi ise toplama kararı için kullanılabilecek bir veri olarak ele alınmaktadır. Yapılan bu geçiş ile, görüntü işleme sonucunun yalnızca ekranda gösterilen bir maske olmaktan çıkıp robotik hareket ve kavrama sürecine bağlanmasını sağlamaktadır.

Beşinci katkı, kamera destekli robotik uç efektör tasarımının sunulmasıdır. Tasarımda iki adet kamera sağ ve sol tarafa yerleştirilmiş, kameraların çubuk taşıyıcılar üzerine montajı ve yay destekli gevşeklik alma yapısı değerlendirilmiştir. Bu detay, robotik sistemde kamera hizasının korunması ve görüntü alma kararlılığının artırılması açısından önemlidir.

Altıncı katkı ise hassas meyve kavramaya yönelik çok parmaklı gripper yapısının değerlendirilmesidir. Çileğin yumuşak dokulu ve zarar görmeye açık bir meyve olması nedeniyle, gripper tasarımında temas kuvvetinin azaltılması ve meyvenin çevresel olarak desteklenmesi hedeflenmiştir. Bu kapsamda üç veya dört parmaklı, simetrik yerleşimli ve ileri-geri hareket edebilen bir tutucu yapı önerilmiştir.

Bu katkılar sayesinde tez, yalnızca görüntü işleme tabanlı bir çilek tespit çalışması olmaktan çıkmakta; filtreleme, özellik çıkarımı, robotik hedef bilgisi üretimi ve mekanik uç efektör tasarımını birlikte değerlendiren bütünleşik bir robotik çilek hasat sistemi yaklaşımına dönüşmektedir.

1.7 Tezin Organizasyonu

Bu tez on iki ana bölümden oluşur. İlk bölüm, çalışmanın genel çerçevesini, motivasyonunu, problem tanımını, amacını, kapsamını ve özgün katkılarını sunar. Ve, görüntü işleme ve robotik tasarımın bu çalışmada nasıl bir arada ele alındığı açıklanır.

İkinci bölümde literatür araştırması yer almaktadır. Bu bölümde tarımsal görüntü işleme sistemleri, meyve algılama ve olgunluk tespiti, renk tabanlı yaklaşımlar, boyut ve mesafe tahmini, robotik hasat sistemleri, çilek toplama robotları, robotik uç efektörler, gripper mekanizmaları ve stereo görüş yaklaşımları incelenmektedir. Ayrıca derin öğrenme tabanlı yöntemlerin sınırlılıkları ve bu tezin literatürdeki konumu tartışılmaktadır.

Üçüncü bölümde önerilen sistemin genel yapısı açıklanmaktadır. Bu bölümde tezin görüntü işleme ve robotik tasarım kanatları tanıtılmakta, sistem mimarisi, donanım bileşenleri, yazılım altyapısı, veri akışı ve genel çalışma senaryosu verilmektedir.

Dördüncü bölümde görüntü oluşumu ve kamera modeli ele alınmaktadır. Kamera modellemesi, perspektif dönüşümler, piksel-gerçek dünya koordinat dönüşümü, stereo kamera ile derinlik bilgisi yaklaşımı ve ölçüm hataları bu bölümde açıklanmaktadır.

Beşinci bölümde önerilen görüntü işleme yaklaşımı anlatılmaktadır. Görüntünün MATLAB ortamına aktarılması, RGB, HSV ve CIELab renk uzayları, filtreleme aşaması, segmentasyon, morfolojik işlemler ve özellik çıkarımı bu bölümün ana konularıdır.

Altıncı bölümde filtreleme ve önerilen 5×5 filtre modeli verilmektedir. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian ve Unsharp filtreleri açıklanmakta; custom 5×5 filtre maskeleri ve önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre yapısı detaylandırılmaktadır. Ayrıca bu filtrelerin segmentasyon, boyut ve merkez hesabı üzerindeki etkileri değerlendirilmektedir.

Yedinci bölümde olgunluk, boyut ve mesafe tahmini ele alınmaktadır. Renk-olgunluk ilişkisi, HSV ve CIELab tabanlı olgunluk analizi, piksel-milimetre dönüşümü, major ve minor eksenlere göre boyut tahmini, gerçek ölçü ile karşılaştırma ve stereo kamera ile derinlik yaklaşımı bu bölümde açıklanmaktadır.

Sekizinci bölümde robotik çilek toplama sistemi tasarımı sunulmaktadır. Robot kol yapısı, uç efektör tasarımı, sağ ve sol kamera yerleşimi, çubuk taşıyıcı kamera montajı, yay destekli

kamera mekanizması, çok parmaklı gripper yapısı, tutucu parmakların simetrik yerleşimi ve SolidWorks tabanlı kavramsal tasarım bu bölümde ele alınmaktadır.
Dokuzuncu bölümde görüntü işleme ve robotik tasarımın entegrasyonu açıklanmaktadır. Çilek merkez noktasının robot hedef noktası olarak kullanılması, boyut bilgisinin gripper açıklığına etkisi, olgunluk bilgisinin toplama kararına etkisi, kamera koordinatlarından robot koordinatlarına geçiş ve robotik toplama işlem sırası bu bölümde verilmektedir.

Onuncu bölümde deneysel çalışmalar ve sonuçlar yer almaktadır. Kullanılan görüntü ve ölçüm verileri, filtrelenmiş görüntü sonuçları, segmentasyon maskeleri, feature extraction çıktıları, gerçek ölçü ile karşılaştırmalar, boyut hataları, merkez noktası hataları ve robotik sistem açısından sonuçların değerlendirilmesi bu bölümde sunulmaktadır.

On birinci bölümde tartışma yapılmaktadır. Görüntü işleme sonuçları, önerilen 5×5 filtrenin başarısı, robotik uç efektör tasarımı, kamera yerleşiminin etkisi, yöntemin güçlü ve zayıf yönleri, sistem sınırlamaları ve gerçek saha koşullarında karşılaşılabilecek problemler bu bölümde değerlendirilmektedir.

On ikinci bölümde sonuç ve gelecek çalışmalar verilmektedir. Çalışmanın genel değerlendirmesi, görüntü işleme kanadından elde edilen sonuçlar, robotik tasarım kanadından elde edilen sonuçlar ve tezin akademik katkıları özetlenmektedir. Ayrıca gerçek prototip üretimi, gerçek zamanlı görüntü işleme, stereo kamera ile 3B konum hesabı, kuvvet sensörü destekli gripper kontrolü, saha testleri ve gömülü sistem entegrasyonu gelecek çalışmalar olarak önerilmektedir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatür araştırması kısmında çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleri ile tespit edilmesi, olgunluk durumunun belirlenmesi, boyut ve mesafe bilgilerinin çıkarılması ve bu bilgilerin robotik toplama sistemlerinde kullanılmasına yönelik çalışmalar incelenmektedir. Literatürde bu konu farklı başlıklar altında ele alınmıştır. Bazı çalışmalar doğrudan meyve tespitine odaklanırken, bazıları renk tabanlı olgunluk analizini, bazıları ise robotik hasat sistemlerinde konum belirleme ve kavrama problemini incelemiştir.

Amaç ve kapsam bir bütün halinde düşünüldüğünde literatür yalnızca hangi yöntemin kullanıldığını göstermek için değil, görüntü işleme ve robotik tasarım arasındaki ilişkiyi açıklamak için değerlendirilmektedir. Robotik bir hasat sisteminde görüntü işleme sonucu yalnızca ekranda görülen bir maske olarak ele almak doğru olmamaktadır. Robot kolun hedefe yönelmesi, gripper açıklığının belirlenmesi ve çileğin hasat edilip edilmeyeceğine karar verilmesi için temel veri oluşturan yer görüntü işlemenin vermiş olduğu verilere dayandırılmaktadır.

2.1 Tarımsal Görüntü İşleme Sistemleri

Tarımsal görüntü işleme sistemleri, kamera veya benzeri görüntüleme araçları ile alınan verilerden ürün, bitki, yaprak, hastalık, yabancı ot veya meyve gibi hedef bilgilerin çıkarılmasına dayanır. Bu sistemlerde amaç, insan gözünün yaptığı gözlemi sayısal hale getirerek daha tekrarlanabilir ve otomatik bir karar süreci oluşturmaktır. Tarımda görüntü işleme; ürün sayımı, hastalık tespiti, meyve sınıflandırma, olgunluk analizi, kalite kontrol ve robotik hasat gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır [1], [2].

Meyve tespiti açısından bakıldığında, görüntü işleme sisteminin ilk görevi hedef meyveyi arka plandan ayırmaktır. Bu işlem çoğu zaman renk, şekil, doku veya kenar bilgisi üzerinden yapılır. Özellikle meyve rengi arka plandan belirgin şekilde ayrılıyorsa, renk tabanlı yöntemler pratik ve açıklanabilir bir çözüm sunar. Çilek gibi olgunlaştığında kırmızı renge sahip olan meyvelerde bu yaklaşım daha anlamlı hale gelmektedir. Ancak tarımsal ortamlar kontrollü laboratuvar koşulları gibi değildir. Işık değişimi, yaprakların meyveyi kapatması, arka plan karmaşıklığı ve kamera açısı gibi faktörler görüntü işleme sonucunu doğrudan etkileyebilir [1], [3].

Tarımsal görüntü işleme sistemlerinde yalnızca renk seçimi yapmak yeterli değildir. Görüntü genellikle filtreleme, renk uzayı dönüşümü, segmentasyon, morfolojik düzeltme ve özellik çıkarımı gibi adımlardan geçirilmelidir. Bu adımların her biri sonuca etki eder. Örneğin segmentasyon sonucunda elde edilen çilek maskesi hatalıysa, bu maskeden hesaplanan merkez noktası ve boyut bilgisi de hatalı olacaktır. Tarımsal makine görüsünde görüntüden elde edilen konum bilgisi, kamera geometrisi ile ilişkilendirilerek fiziksel sistemlerde kullanılabilir hale getirilebilir [2], [4]. Buradaki çalışmada görüntü işleme çıktıları, robotik hasat sisteminin hareket sürecine giriş oluşturan sayısal veriler olarak ele alınmıştır.

Bu tezde tarımsal görüntü işleme sistemi, yalnızca çileği görüntü üzerinde bulmak için değil, robotik bir toplama sistemine kullanılabilir veri sağlamak için ele alınmaktadır. Görüntü işleme zinciri; çileğin tespiti, merkez noktasının bulunması, boyutunun hesaplanması, olgunluk durumunun değerlendirilmesi ve robotik tasarım ile ilişkilendirilmesi açısından değerlendirilmektedir.

2.2 Meyve Algılama ve Olgunluk Tespiti Yöntemleri

Meyve algılama, görüntü içinde hedef meyvenin yerini belirleme işlemidir. Bu işlem basit gibi görünse de doğal ortamda oldukça zorlaşabilir. Meyve bazen tamamen görünür durumdadır, bazen yaprakların arkasında kalır, bazen de birden fazla meyve birbirine yakın konumda bulunur. Meyve algılama çalışmalarında yalnızca bir özellik kullanmak yerine renk, şekil, kenar, alan ve doku gibi farklı bilgilerin birlikte değerlendirilmesi gerekebilir [1], [2].

Çilek için en önemli özelliklerden biri renktir. Çileğin olgunlaşma sürecinde yeşil, beyaz, pembe ve kırmızı tonları arasında geçiş görülür. Olgun çileklerde kırmızı renk baskın hale gelir. Renk bilgisi, çileğin hem tespiti hem de olgunluk seviyesinin yorumlanması için kullanılabilir. Literatürde meyve olgunluğunun görüntü işleme yöntemleriyle ve meyveye zarar vermeden değerlendirilebileceği belirtilmektedir [6], [13].

Bununla birlikte renk bilgisi tek başına her zaman yeterli değildir. Aynı çilek farklı ışık koşullarında daha koyu, daha açık veya daha düşük doygunlukta görünebilir. Gölge altında kalan kırmızı bir bölge, algoritma tarafından farklı bir sınıfa atanabilir. Benzer şekilde parlama

olan yüzeylerde gerçek renk değeri bozulabilir. Olgunluk analizi yapılmadan önce çilek bölgesinin arka plandan doğru ayrılması ve yalnızca meyveye ait pikseller üzerinden renk analizi yapılması gerekir [6], [13].

Bu tezde olgunluk tespiti, yalnızca renk değerlerine bakılarak yapılan bağımsız bir işlem olarak görülmemektedir. Olgunluk analizi, filtreleme ve segmentasyon başarısıyla doğrudan ilişkilidir. Eğer segmentasyon maskesine yaprak veya arka plan pikselleri dahil olursa, hesaplanan renk ortalaması gerçek çilek rengini temsil etmez. Renk tabanlı olgunluk değerlendirmesi, görüntü işleme zincirinin önceki adımlarıyla birlikte ele alınmaktadır.

2.3 Renk Tabanlı Görüntü İşleme Yaklaşımları

Renk tabanlı görüntü işleme, meyve tespiti çalışmalarında en sık kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bunun nedeni, birçok meyvenin olgunluk, tür veya hasat uygunluğu gibi özelliklerinin renk üzerinden yorumlanabilmesidir. Çilekte de bu durum açık şekilde görülmektedir. Meyvenin kırmızı tonlara yaklaşması, genellikle olgunlukla ilişkilendirilir. Renk tabanlı segmentasyon, çilek tespiti için mantıklı bir başlangıç noktasıdır [6], [13].

RGB renk uzayı, görüntünün temel renk bilgisini verir. Ancak RGB değerleri ışık şiddetinden doğrudan etkilenir. Aynı çilek güneş altında, gölgede veya farklı kamera ayarlarında farklı RGB değerlerine sahip olabilir. Yalnızca RGB eşiklerine dayalı bir tespit yöntemi, değişken ışık koşullarında kararsız sonuçlar verebilir. Meyve tespiti ve renk analizinde HSV ve CIELab gibi farklı renk uzaylarından yararlanılan çalışmalar bulunmaktadır [13], [15], [16].

HSV renk uzayı, renk tonu, doygunluk ve parlaklık bilgisini ayrı bileşenler halinde değerlendirir. Bu durum, çileğin kırmızı rengini parlaklık değişiminden kısmen ayırmaya yardımcı olur. CIELab renk uzayı ise insan görme algısına daha yakın bir renk temsili sağlamayı amaçlar. Özellikle CIELab uzayındaki a* kanalı, yeşil-kırmızı ekseninde bilgi verdiği için çileğin yeşil yapraklardan ayrılmasında faydalı olabilir [15], [16], [17].

Bu tezde renk tabanlı yaklaşım, RGB görüntünün HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmesi üzerine kurulmuştur. Böylece çileğin kırmızı renk karakteristiği farklı renk

modelleri üzerinden değerlendirilmektedir. HSV tabanlı maske ile CIELab tabanlı maske birlikte kullanılarak daha güçlü bir çilek bölgesi elde edilmesi hedeflenmektedir. Bu yaklaşım, tek bir renk uzayına bağlı kalmanın oluşturabileceği hataları azaltmak için tercih edilmiştir.

2.4 RGB, HSV ve CIELab Renk Uzaylarının Kullanımı

RGB, dijital görüntülerde en temel renk temsilidir. Her piksel kırmızı, yeşil ve mavi kanal değerlerinden oluşur. Çilek kırmızı bir meyve olduğu için RGB görüntüde kırmızı kanal önemli bir başlangıç bilgisi sağlayabilir. Ancak RGB modelinde renk ve parlaklık bilgisi tam olarak ayrılmadığından, ışık değişimleri doğrudan kanal değerlerine yansır. Aydınlatma değişimleri ve görüntü koşullarındaki farklılıklar segmentasyon sonucunu etkileyebilir [7], [8].

HSV renk uzayı, bu sınırlılığı azaltmak için kullanılabilecek alternatif bir renk modelidir. Hue bileşeni renk tonunu, Saturation bileşeni rengin doygunluğunu, Value bileşeni ise parlaklığı ifade eder. Çilek tespitinde Hue ve Saturation bileşenleri özellikle önemlidir. Hue kırmızı renk aralığını belirlemek için, Saturation ise rengin belirginliğini değerlendirmek için kullanılabilir. HSV, çileğin arka plandan ayrılmasında RGB'ye göre daha kararlı sonuçlar sağlayabilir [6], [13].

CIELab renk uzayı ise L*, a* ve b* bileşenlerinden oluşur. L* bileşeni parlaklığı temsil ederken, a* kanalı yeşil-kırmızı ekseninde, b* kanalı ise mavi-sarı ekseninde bilgi verir. Çilek tespiti açısından a* kanalı özellikle önemlidir. Çünkü çileğin kırmızı rengi ile yaprakların yeşil rengi bu eksende daha anlamlı şekilde ayrılabilir. CIELab renk uzayı, çilek gibi kırmızı meyvelerin yeşil arka plandan ayrılmasında destekleyici bir yapı sunar [15], [16], [17].

Bu tezde RGB, HSV ve CIELab renk uzayları birbirinin yerine geçen bağımsız seçenekler olarak değil, birbirini destekleyen aşamalar olarak değerlendirilmiştir. RGB görüntü temel giriş verisini oluştururken, HSV ve CIELab dönüşümleri çileğin daha kararlı şekilde ayrılmasını desteklemektedir. Özellikle HSV ve CIELab maskelerinin birleştirilmesi, segmentasyon sonucunun daha güvenilir hale getirilmesi açısından önemli görülmektedir.

2.5 Boyut ve Mesafe Tahmini Yöntemleri

Meyvenin görüntü üzerinde tespit edilmesi robotik sistemler için tek başına yeterli değildir. Robot kolun hedefe yaklaşabilmesi için meyvenin görüntüde nerede olduğu, yaklaşık ne kadar büyük olduğu ve kameraya olan mesafesi de bilinmelidir. Meyve algılama probleminin devamında boyut ve mesafe tahmini önemli bir yer tutar [4], [18].

Boyut tahmini genellikle segmentasyon sonucunda elde edilen meyve bölgesi üzerinden yapılır. Çileğin görüntü üzerindeki alanı, çevresi, genişliği, yüksekliği, major ekseni ve minor ekseni gibi özellikler kullanılarak yaklaşık boyut bilgisi çıkarılabilir. Ancak burada segmentasyon kalitesi doğrudan boyut hesabını etkiler. Çileğin kenarları fazla yumuşatılırsa boyut olduğundan farklı hesaplanabilir. Segmentasyon maskesi, ölçülecek nesnenin sınırlarını belirlediği için maskeye dahil edilen yanlış bölgeler alan ve eksen ölçümlerini değiştirebilir [7], [19]. Bu nedenle çilek dışındaki arka plan bölgelerinin maskeden mümkün olduğunca uzaklaştırılması gerekir.

Mesafe tahmini daha karmaşık bir problemdir. Tek kamera ile alınan görüntüde çileğin iki boyutlu piksel konumu bulunabilir; ancak derinlik bilgisi doğrudan elde edilemez. Robotik hasat uygulamalarında stereo kamera veya çoklu kamera sistemleri önemli hale gelir. Stereo görüş sistemlerinde iki kamera görüntüsü arasındaki farktan yararlanılarak derinlik bilgisi hesaplanabilir. Bu yaklaşım, meyvenin robot koordinat sistemine aktarılması için gerekli olan üç boyutlu konum bilgisini destekler [4], [14].

Bu tez kapsamında boyut ve mesafe tahmini, görüntü işleme çıktılarının robotik sistem için anlamlı hale getirilmesi açısından ele alınmaktadır. Çileğin major ve minor eksen uzunlukları, gripper açıklığının belirlenmesine yardımcı olabilir. Merkez noktası robot kolun hedef noktasını belirlerken, mesafe bilgisi robotun çileğe yaklaşma hareketini etkiler. Boyut ve mesafe tahmini, görüntü işleme ve robotik tasarım arasındaki geçiş noktalarından biridir.

2.6 Robotik Hasat Sistemlerinde Algılama Problemleri

Robotik hasat sistemlerinde algılama problemi, meyveyi görüntüde bulmanın ötesinde bir problemdir. Robot kolun meyveye yaklaşabilmesi için hedefin konumu doğru belirlenmelidir.

Ayrıca meyvenin hasada uygun olup olmadığı, çevresinde engel bulunup bulunmadığı ve tutulabilecek bölgenin neresi olduğu da önemlidir. Görüntü işleme sistemi, robotun hareket planlamasına temel veri sağlar [14], [20].

Doğal tarım ortamlarında algılama işlemini zorlaştıran birçok durum vardır. Meyveler farklı büyüklüklerde olabilir, bazıları yaprakların arkasında kalabilir, ışık her bölgede aynı olmayabilir ve arka plan sürekli değişebilir. Laboratuvar ortamında iyi çalışan bir yöntem, sera veya açık tarla koşullarında aynı sonucu vermeyebilir. Bu durum özellikle robotik sistemler için önemlidir; çünkü görüntüdeki küçük bir hata robot kolun yanlış noktaya yönelmesine neden olabilir [3], [18], [20].

Çilek hasadında algılama probleminin önemi daha da artmaktadır. Çilek küçük ve hassas bir meyve olduğu için, robot kolun hedef noktasındaki hata doğrudan fiziksel hasara veya başarısız kavramaya dönüşebilir. Çileğin merkez noktasının, sınırlarının ve olgunluk bilgisinin güvenilir şekilde çıkarılması gerekir. Görüntü işleme modülü bu bilgileri sağlamazsa, robot kol ve gripper mekanizması mekanik olarak iyi tasarlanmış olsa bile sistem beklenen başarıyı gösteremeyebilir [5], [11].

Bu tezde algılama problemi, robotik sistemden bağımsız bir yazılım problemi olarak değerlendirilmemektedir. Görüntü işleme sonucunda elde edilen merkez, boyut ve olgunluk bilgileri robot kol ve uç efektör tasarımı ile ilişkilendirilmektedir. Böylece algılama sistemi, robotik hasat sürecinin başlangıç kararı olarak konumlandırılmaktadır.

2.7 Klasik Filtre Tabanlı Yaklaşımlar

Klasik görüntü işleme yöntemlerinde filtreleme, ham görüntüyü analiz edilebilir hale getirmek için kullanılan temel adımlardan biridir. Gürültüyü azaltmak, kenarları belirlemek, bölge sınırlarını iyileştirmek veya segmentasyon öncesi görüntüyü düzenlemek için farklı filtreler kullanılabilir. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian ve Unsharp filtreleri bu alanda yaygın olarak kullanılan yöntemlerdir [7], [8], [9], [10].

Mean filter, komşu piksellerin ortalamasını alarak görüntüyü yumuşatır. Bu yöntem basit ve hızlıdır; ancak tüm komşulara eşit ağırlık verdiği için kenar bölgelerinde bulanıklaşmaya neden olabilir. Gaussian filter ise merkez piksele yakın olan değerlere daha fazla ağırlık verir ve daha doğal bir yumuşatma etkisi oluşturur. Median filter, özellikle izole gürültüleri azaltmada etkili olabilir ve bazı durumlarda kenar bilgisini ortalama filtreye göre daha iyi koruyabilir [7], [9], [21].

Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler görüntüdeki ani yoğunluk değişimlerini ortaya çıkarır. Bu filtreler çileğin sınırını belirginleştirebilir; ancak renk tabanlı segmentasyon için doğrudan yeterli değildir. Çünkü bu filtreler çoğunlukla renk bilgisinden çok yoğunluk değişimlerine odaklanır. Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler görüntüdeki yoğunluk değişimlerini belirginleştirmeye yönelik çalışır [7], [9], [19]. Bu yapı, renk bileşenleri üzerinden gerçekleştirilen HSV ve CIELab segmentasyonundan farklı olduğu için söz konusu filtreler renk tabanlı segmentasyonun doğrudan yerine geçmemektedir.

Bu tezde klasik filtreler yalnızca hazır yöntemler olarak kullanılmamaktadır. Her filtrenin çilek segmentasyonu, sınır koruma, renk bilgisi ve ölçüm kararlılığı üzerindeki etkisi karşılaştırmalı olarak değerlendirilmektedir. Bu karşılaştırma, önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre yapısının neden tercih edildiğini göstermek için de önemlidir. Çünkü robotik hasat açısından en iyi filtre yalnızca görüntüyü güzel gösteren filtre değil, çileğin merkez ve boyut bilgilerini en kararlı şekilde çıkaran filtredir.

2.8 Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımların Sınırlılıkları

Son yıllarda derin öğrenme yöntemleri görüntü işleme alanında çok güçlü sonuçlar vermektedir. Nesne tespiti, görüntü sınıflandırma ve segmentasyon gibi birçok problemde derin öğrenme modelleri yüksek başarı sağlayabilmektedir. Meyve tespiti ve lokalizasyonu, görüntü işleme zincirinde öğrenme tabanlı yöntemler, segmentasyon ve gürültü azaltma gibi farklı yaklaşımlarla ele alınmaktadır [18], [22], [23]. Bu tezde ise yeni bir derin öğrenme modeli eğitmek yerine filtreleme, segmentasyon ve özellik çıkarımı adımlarının sonuç üzerindeki etkisinin doğrudan incelenmesi amaçlanmıştır.

Buna rağmen derin öğrenme her çalışma için en uygun çözüm olmayabilir. Bu yöntemlerin başarılı olabilmesi için yeterli sayıda ve iyi etiketlenmiş görüntü verisine ihtiyaç vardır. Tarımsal görüntülerde bu veri setini oluşturmak kolay değildir. Aynı meyvenin farklı ışık koşullarında, farklı açılardan, farklı olgunluk seviyelerinde ve farklı arka planlarda görüntülenmesi gerekir. Klasik görüntü işleme zincirinde segmentasyon ve gürültü filtreleme adımları kullanılan yöntem ve parametreler üzerinden doğrudan kontrol edilebilmektedir [22], [23]. Bu tezde de veri toplama ve model eğitimi gerektiren yeni bir öğrenme modeli yerine, filtrelerin ve segmentasyon adımlarının etkisini karşılaştıran açıklanabilir bir işlem akışı tercih edilmiştir.

Bir diğer sınırlılık yorumlanabilirliktir. Klasik görüntü işleme yöntemlerinde kullanılan filtre maskesi, eşik değeri veya matematiksel model açık biçimde incelenebilir. Örneğin bir filtre maskesinde hangi piksele ne kadar ağırlık verildiği görülebilir. Ancak derin öğrenme modellerinde kararın hangi özelliklere göre verildiğini açıklamak daha zordur. Klasik görüntü işleme yöntemlerinde filtreleme ve görüntü düzenleme adımlarının etkisi ayrı ayrı incelenebilmektedir [7], [8]. Bu durum, filtreleme ve segmentasyon aşamalarının matematiksel etkisini karşılaştırmayı amaçlayan bu tez için önemli bir avantaj oluşturmuştur.

Bu tezde derin öğrenme yöntemleri gereksiz görülmemektedir. Aksine, bu yöntemler birçok problemde güçlü çözümler sunmaktadır. Ancak bu çalışmanın amacı bir yapay sinir ağı modeli eğitmek değildir. Amaç, klasik görüntü işleme filtrelerini daha iyi anlamak, parametrelerini değerlendirmek ve çilek algılama problemine uygun şekilde iyileştirilmiş bir filtre yaklaşımı sunmaktır. Çalışma, daha açıklanabilir ve kontrol edilebilir bir görüntü işleme yapısı üzerine kurulmuştur.

2.9 Robotik Hasat Sistemleri

Robotik hasat sistemleri, tarımda insan gücüne bağlı işlemleri azaltmak, verimliliği artırmak ve hasat sürecini daha kontrollü hale getirmek amacıyla geliştirilmektedir. Bir robotik hasat sistemi genel olarak algılama, karar verme, konum belirleme, robot kol hareketi ve uç efektör ile kavrama/toplama adımlarından oluşur. Bu adımlardan herhangi birinde oluşan hata, tüm sistemin başarısını etkileyebilir [14], [20].

Robotik hasatta en önemli konulardan biri, meyvenin doğru konumunun belirlenmesidir. Robot kolun hedefe yaklaşabilmesi için meyvenin yalnızca görüntüde tespit edilmesi yeterli değildir; bu tespit robot koordinat sisteminde kullanılabilir bir hedef noktasına dönüştürülmelidir. Kamera kalibrasyonu, stereo görüş, koordinat dönüşümü ve robot kol kinematiği robotik hasat sistemlerinin temel bileşenleri arasında yer alır [4], [5], [14].

Hasat sistemlerinde diğer önemli konu uç efektör tasarımıdır. Meyvenin türüne göre kavrama yöntemi değişir. Sert kabuklu meyvelerde daha rijit mekanizmalar kullanılabilirken, çilek gibi hassas meyvelerde daha yumuşak ve kontrollü tutuculara ihtiyaç vardır. Robotik çilek hasadı, yalnızca algılama değil, aynı zamanda hassas kavrama problemi olarak da değerlendirilmelidir [5], [11].

Bu tezde robotik hasat sistemi, görüntü işleme modülü ile mekanik uç efektör tasarımının birleşimi olarak ele alınmaktadır. Kamera sistemi çileğin merkezini, boyutunu ve olgunluk bilgisini üretirken, robot kol ve gripper bu bilgileri kullanarak hedefe yaklaşma ve kavrama işlemini gerçekleştirecek şekilde düşünülmektedir.

2.10 Çilek Toplama Robotları

Çilek toplama robotları, meyvenin hassas yapısı ve yetişme koşulları nedeniyle robotik hasat alanında özel bir çalışma konusudur. Çilekler çoğu zaman yapraklar arasında kısmen gizlenmiş halde bulunur. Meyve küçük, yumuşak ve yüzey hasarına duyarlı olduğu için hem algılama hem de kavrama açısından dikkatli bir sistem tasarımı gerekir [3], [5].

Literatürde çilek toplama robotları için farklı algılama ve kavrama yaklaşımları kullanılmıştır. Bazı çalışmalarda derin öğrenme tabanlı tespit yöntemleri kullanılarak çileklerin görüntüdeki konumu belirlenmiştir. Bazı çalışmalarda ise robotik uç efektör ve gripper tasarımı üzerinde durulmuştur. Çileğin görüntüde tespit edilmesi robotik hasadın yalnızca ilk adımıdır; hedefin konumu, robotun yaklaşma biçimi ve meyveyle temas eden kavrama yapısı da sistem başarısını belirleyen bileşenler arasındadır [3], [5], [11], [12]. Bu nedenle algılama ve kavrama aşamalarının birbirinden bağımsız değerlendirilmemesi gerekir.

Çilek toplama robotlarında merkez noktası, robot kolun hedefe yönelmesi için önemli bir parametredir. Ancak yalnızca merkez noktasının bulunması her zaman yeterli değildir. Çileğin boyutu, olgunluk durumu ve çevresindeki engeller de değerlendirilmelidir. Özellikle gripper mekanizması çileği çevresel olarak destekleyecek şekilde tasarlanmalı ve meyveye zarar verecek yüksek temas kuvvetlerinden kaçınılmalıdır [5], [11].

Bu tezde çilek toplama robotu doğrudan tamamlanmış bir saha robotu olarak değil, görüntü işleme destekli kavramsal bir robotik toplama sistemi olarak ele alınmaktadır. Çalışmanın odak noktası, çileğin görüntüden kararlı şekilde tespit edilmesi ve bu tespitin kamera destekli uç efektör ve çok parmaklı gripper tasarımı ile ilişkilendirilmesidir.

2.11 Robotik Kol ve Uç Efektör Tasarımları

Robotik hasat sistemlerinde robot kol, hedef meyveye ulaşmayı sağlayan ana mekanik yapıdır. Ancak robot kolun başarılı olması yalnızca hareket kabiliyetine bağlı değildir. Robot kolun ucunda bulunan uç efektör, meyveyle doğrudan temas eden ve hasat işlemini gerçekleştiren kısımdır. Görüntü analizi ve makine görüsü, hedef nesneye ait konum ve geometrik bilgilerin görüntü üzerinden çıkarılmasını sağlayan temel çalışma alanlarıdır [10]. Bu tez kapsamında uç efektör, elde edilen bu bilgilerin fiziksel kavrama işlemine aktarılacağı robotik uç yapı olarak ele alınmıştır.

Uç efektör tasarımı, hasat edilecek ürünün fiziksel özelliklerine göre değişir. Sert veya kabuklu ürünlerde mekanik sıkıştırma daha kolay uygulanabilirken, çilek gibi hassas meyvelerde temas kuvvetinin sınırlanması gerekir. Çilek üzerinde yüksek noktasal kuvvet uygulanması meyvenin ezilmesine, yüzey hasarına veya kalite kaybına neden olabilir. Uç efektörün meyveye yaklaşma yönü, temas yüzeyi ve kavrama mekanizması dikkatli seçilmelidir [5], [11].

Robotik uç efektörde kamera entegrasyonu da önemli bir konudur. Kamera, grippera çok yakın yerleştirilirse görüş alanı parmaklar tarafından engellenebilir. Çok uzak yerleştirilirse de hedef nokta ile kamera görüşü arasındaki ilişki zayıflayabilir. Kamera yerleşimi hem görüntü işleme hem de mekanik kavrama açısından uygun bir noktada olmalıdır. Bu tezde sağ ve sol tarafa

yerleştirilen iki kamera, uç efektörün çileği farklı açılardan görmesini sağlayacak şekilde düşünülmüştür.

Bu tez kapsamında uç efektör tasarımı, çileğe zarar vermeden kavrama, çift kamera ile algılama ve çok parmaklı gripper yapısını bir araya getiren kavramsal bir mekanik çözüm olarak değerlendirilmektedir. Bu yaklaşım, görüntü işleme çıktılarının doğrudan mekanik tasarıma bağlanmasını sağlamaktadır.

2.12 Hassas Meyve Kavrama ve Gripper Mekanizmaları

Hassas meyve kavrama, robotik hasat sistemlerinde önemli bir araştırma alanıdır. Çilek gibi yumuşak dokulu meyveler, yüksek temas kuvveti altında kolayca zarar görebilir. Gripper mekanizmalarının yalnızca meyveyi tutması değil, bunu kontrollü ve düşük zarar riskiyle yapması gerekir [5], [11], [12].

Gripper tasarımlarında farklı yaklaşımlar kullanılabilir. Mekanik parmaklı sistemler, vakum tabanlı sistemler, yumuşak robotik tutucular ve hibrit mekanizmalar bu yaklaşımlar arasında yer alır. Çilek gibi hassas meyvelerde çok parmaklı sistemler, meyveyi tek noktadan sıkıştırmak yerine daha geniş bir temas alanı ile çevresel olarak destekleyebilir. Bu durum temas kuvvetinin daha dengeli dağılmasına yardımcı olur [11], [12].

Üç veya dört parmaklı gripper yapıları, meyvenin etrafında simetrik kavrama oluşturmak için tercih edilebilir. Parmakların eşit açılarla yerleştirilmesi, çileğin merkezine doğru daha dengeli bir kavrama hareketi sağlar. Ayrıca parmakların ileri-geri hareket edebilen bir yapıda olması, farklı boyuttaki çileklere uyum sağlamayı kolaylaştırabilir. Bu tezde önerilen gripper yaklaşımı da bu mantığa dayanmaktadır.

Bu çalışmada gripper tasarımı yalnızca mekanik bir tutucu olarak değil, görüntü işleme çıktılarını kullanan bir uç sistem olarak ele alınmaktadır. Çileğin major ve minor eksen uzunlukları gripper açıklığını etkileyebilir. Merkez noktası, gripperın meyveye yaklaşma hedefini belirleyebilir. Olgunluk bilgisi ise robotun meyveyi toplayıp toplamama kararını

destekleyebilir. Hassas kavrama mekanizması, görüntü işleme sisteminden gelen bilgilerle birlikte değerlendirilmelidir.

2.13 Stereo Görüş ve Kamera Tabanlı Robotik Algılama

Robotik hasat sistemlerinde kamera tabanlı algılama, meyvenin yerinin belirlenmesi için temel yöntemlerden biridir. Tek kamera ile meyvenin görüntü üzerindeki iki boyutlu konumu bulunabilir. Ancak robot kolun gerçek dünyada hareket edebilmesi için derinlik bilgisine de ihtiyaç vardır. Stereo görüş veya çoklu kamera sistemleri, robotik hasat uygulamalarında önemli bir rol oynar [4], [14].

Stereo görüş sistemlerinde iki kamera kullanılarak aynı nesnenin iki farklı görüntüsü elde edilir. Bu iki görüntü arasındaki konum farkı, yani disparity değeri, derinlik bilgisinin hesaplanmasında kullanılabilir. Bu yaklaşım sayesinde çileğin yalnızca görüntü üzerindeki merkezi değil, kameraya olan uzaklığı da tahmin edilebilir. Derinlik bilgisi, robot kolun çileğe doğru yaklaşma mesafesini belirlemek açısından önemlidir [4].

Kamera yerleşimi stereo görüş başarısını doğrudan etkiler. İki kamera arasındaki mesafe, kameraların açıları, sabitliği ve titreşimden etkilenme düzeyi derinlik hesabında önemli rol oynar. Kameraların uç efektör üzerinde kararlı şekilde konumlandırılması gerekir. Bu tezde sağ ve sol tarafta konumlandırılan iki kamera, çubuk taşıyıcı yapı üzerine monte edilmiş ve arka tarafta yay destekli bir mekanizma ile gevşekliğin azaltılması hedeflenmiştir.

Bu yaklaşım, kamera tabanlı robotik algılamanın mekanik tasarımla ilişkisini göstermektedir. Kamera sistemi kararlı değilse, görüntü işleme ve stereo derinlik hesabı da kararsız olabilir. Kamera montajı yalnızca mekanik bağlantı detayı değil, algılama sisteminin doğruluğunu etkileyen bir tasarım unsurudur.

2.14 Literatürdeki Boşluklar ve Bu Çalışmanın Konumlandırılması

Literatür genel olarak incelendiğinde, meyve tespiti, renk tabanlı segmentasyon, olgunluk analizi, stereo görüş ve robotik hasat üzerine önemli çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Renk ve şekil tabanlı yöntemler meyvenin arka plandan ayrılmasında kullanılabilmektedir. Derin

öğrenme tabanlı yöntemler çilek tespitinde güçlü sonuçlar verebilmektedir. Tarımsal görüntüleme çalışmalarında meyvenin tespiti ve lokalizasyonu, robotik hasat çalışmalarında ise algılanan hedefe ulaşma ve toplama süreçleri birlikte önem kazanmaktadır [1], [3], [5], [18], [20]. Bu nedenle robotik hasat sistemi yalnızca görüntü işleme algoritması olarak değil, algılama, robot kol hareketi ve uç efektörün birlikte çalıştığı bir yapı olarak değerlendirilmelidir.

Bununla birlikte mevcut çalışmaların önemli bir kısmı ya görüntü işleme tarafına ya da robotik mekanik tasarım tarafına ağırlık vermektedir. Görüntü işleme çalışmalarında çileğin tespiti ve segmentasyonu ele alınırken, bu çıktının robotik gripper tasarımıyla nasıl ilişkilendirileceği her zaman ayrıntılı tartışılmamaktadır. Robotik tasarım çalışmalarında ise uç efektör ve gripper mekanizmaları incelenmekte, ancak görüntü işleme tarafındaki filtreleme ve segmentasyon adımlarının robotik hedef bilgisine etkisi sınırlı şekilde ele alınmaktadır.

Bu tez çalışması bu boşluğa odaklanmaktadır. Çilek algılama problemi, yalnızca renk tabanlı bir segmentasyon problemi olarak değil, robotik hasat sistemine veri üreten bir algılama problemi olarak ele alınmaktadır. Görüntü işleme tarafında filtreleme ve 5×5 merkez ağırlıklı filtre modeli değerlendirilirken, robotik tarafta çift kamera yerleşimi, yay destekli kamera montajı ve çok parmaklı gripper tasarımı birlikte düşünülmektedir.

Bu yönüyle tez, MATLAB tabanlı görüntü işleme yaklaşımı ile robotik uç efektör tasarımını birleştiren bütünleşik bir çalışma sunmaktadır. Çileğin merkez noktası robot kol hedefi olarak, boyut bilgisi gripper açıklığı için, olgunluk bilgisi ise toplama kararı için kullanılabilecek veri olarak değerlendirilmektedir. Böylece çalışma yalnızca çileğin görüntü üzerinde tespit edilmesine değil, tespit edilen bilginin robotik toplama sistemi için kullanılabilir hale getirilmesine odaklanmaktadır.

3. SİSTEMİN GENEL YAPISI

Bu bölümde tez kapsamında önerilen görüntü işleme destekli robotik çilek toplama sisteminin genel yapısı açıklanmaktadır. Çalışmada amaç, çilek meyvesinin görüntü üzerinden tespit edilmesi, renk ve olgunluk bilgilerinin çıkarılması, boyut ve merkez noktasının hesaplanması ve bu bilgilerin robotik toplama sistemi için kullanılabilir hale getirilmesidir. Bu yüzden sistem yalnızca bir görüntü işleme algoritmasından oluşmamaktadır. Kamera sistemi, MATLAB tabanlı görüntü işleme adımları, filtreleme yaklaşımı, segmentasyon, özellik çıkarımı, robot kol, uç efektör, gripper ve kamera montaj tasarımı birlikte ele alınmaktadır.

Önerilen sistem iki ana kanattan oluşmaktadır. Birinci kanat görüntü işleme kanadıdır. Bu bölümde kamera ile alınan çilek görüntüsü MATLAB ortamında işlenmekte, renk uzayı dönüşümleri yapılmakta, farklı filtreler uygulanmakta, çilek bölgesi arka plandan ayrılmakta ve çileğe ait sayısal özellikler çıkarılmaktadır. İkinci kanat ise robotik tasarım kanadıdır. Bu bölümde görüntü işleme sonucunda elde edilen merkez, boyut ve olgunluk bilgilerinin robot kol, uç efektör, çift kamera sistemi ve çok parmaklı gripper tasarımı ile nasıl ilişkilendirileceği açıklanmaktadır.

Çalışma sistemin merkezi, görüntü işleme sonucunda elde edilen bilginin robotik sistem için anlamlı hale getirilmesidir. Başka bir ifadeyle, çalışma yalnızca çileği görüntü üzerinde bulmayı değil, bu tespitten robotik hasat için kullanılabilecek hedef noktası, gripper açıklığı ve toplama kararı gibi veriler üretmeyi amaçlamaktadır. Sistem genel yapısı, algılama ve mekanik tasarım arasında bir bağlantı kuracak şekilde düzenlenmiştir.

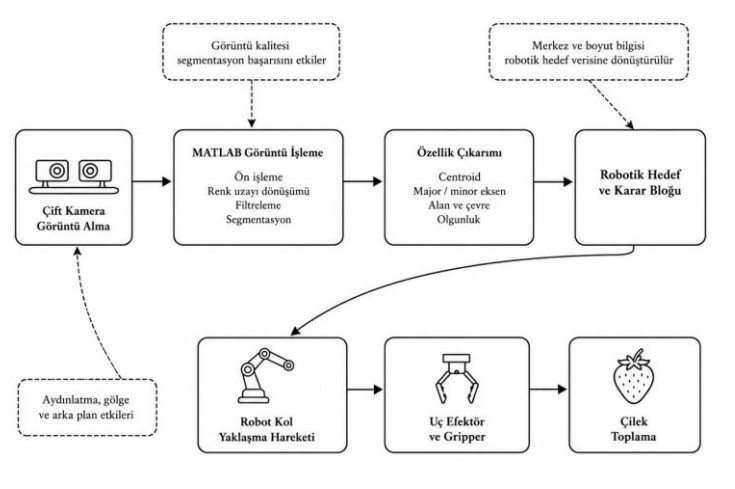
3.1 Sistem Mimarisi

Sistem mimarisi sırasıyla görüntünün işlenmesi ve bu görüntünün özelliklerinin çıkartılarak, robotik veriye dönüştürülmesi üzerinedir. İlk yapılan işlem sırasıyla kameradan ilgili görüntünün alınması ve bu görüntünün MATLAB ortamına aktarılmasıdır. Burada ön işlem aşaması yapılarak ilgili görüntüdeki ses azaltılır, çalışılan renk uzaylarına dönüşümü gerçekleştirilir. Segmentasyon yapılması için uygun görüntü edilmeye çalışılır.

Görüntü işleme tarafında RGB görüntü, HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülür. Çileğin kırmızı renk karakteristiği HSV ve CIELab bileşenleri üzerinden değerlendirilir. Daha sonra farklı filtreleme yöntemleri uygulanır. Bu aşamada Mean, Gaussian, median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, unsharp ve custom 5×5 filtre yapıları karşılaştırılır. Filtreleme işleminden sonra renk tabanlı segmentasyon uygulanır ve çilek bölgesi arka plandan ayrılır.

Segmentasyon sonrasında elde edilen maske morfolojik işlemlerle iyileştirilir. Küçük gürültü bölgeleri temizlenir, maskede oluşan boşluklar doldurulur ve çilek bölgesinin daha bütünlüklü hale gelmesi sağlanır. Ardından özellik çıkarımı aşamasına geçilir. Bu aşamada çileğin alanı, çevresi, merkez noktası, bounding box değeri, major eksen uzunluğu ve minor eksen uzunluğu hesaplanır. Bu bilgiler hem görüntü işleme sonuçlarının değerlendirilmesi hem de robotik sistem için hedef bilgisi oluşturulması açısından önemlidir.

Robotik sistem tarafında ise görüntü işleme sonucunda elde edilen bilgiler kullanılır. Çileğin merkez noktası, robot kolun hedefe yaklaşması için temel referans noktası olarak değerlendirilir. Major ve minor eksen uzunlukları, çileğin yaklaşık boyutunu verdiği için gripper açıklığının belirlenmesine yardımcı olabilir. Olgunluk bilgisi ise çileğin toplanıp toplanmayacağına karar vermek için kullanılabilir. Böylece görüntü işleme çıktıları robotik sistemin hareket ve kavrama kararlarıyla ilişkilendirilir.



Şekil 3.1:Sistemin Genel Mimarisi

Sistem mimarisinin genel akışı şekil 3.1'de gösterildiği gibi, şu şekilde de özetlenebilir:

- Görüntü alma
- Ön işleme
- Renk uzayı dönüşümü
- Filtreleme
- Segmentasyon
- Morfolojik işlemler
- Özellik çıkarımı
- Olgunluk ve boyut değerlendirmesi
- Robotik hedef bilgisi
- Robot kol ve gripper hareketi

Bu akış içinde en kritik noktalardan biri filtreleme ve segmentasyon aşamasıdır. Çünkü segmentasyon sonucunda elde edilen maske, çileğin merkez ve boyut bilgilerinin hesaplanmasında doğrudan kullanılır. Maske hatalı olursa, robotik sisteme gönderilecek hedef bilgisi de hatalı olabilir. Sistem mimarisi içinde filtreleme aşaması yalnızca görsel iyileştirme adımı olarak değil, robotik hasat doğruluğunu etkileyen temel bir işlem olarak değerlendirilmiştir.

3.2 Tezin Görüntü İşleme Kanadı

Tezin görüntü işleme kanadı, çileğin kamera görüntüsü üzerinden tespit edilmesini ve sayısal özelliklerinin çıkarılmasını kapsamaktadır. Bu kanatta temel amaç, çileği arka plandan ayırmak ve robotik sistem için kullanılabilecek merkez, boyut ve olgunluk bilgilerini üretmektir.

Görüntü işleme süreci RGB görüntünün MATLAB ortamına aktarılmasıyla başlar. RGB görüntü, kamera tarafından doğrudan elde edilen temel renk bilgisini içerir. Ancak RGB renk uzayı ışık değişimlerinden kolay etkilenebildiği için tek başına yeterli görülmemiştir. Görüntü HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmektedir. HSV renk uzayı çileğin renk tonu ve doygunluk bilgisini değerlendirmek için kullanılırken, CIELab renk uzayı özellikle kırmızı-yeşil ayrımı açısından destekleyici bir yapı sunmaktadır.

Filtreleme aşaması, görüntü işleme kanadının en önemli bölümlerinden biridir. Çilek görüntülerinde gürültü, ışık değişimi, gölge, parlama ve arka plan karmaşıklığı gibi etkiler bulunabilir. Bu etkilerin azaltılması için farklı filtreler karşılaştırılmaktadır. Ancak filtreleme işlemi dikkatli uygulanmalıdır. Çünkü fazla yumuşatma çileğin sınırlarını bozabilir, kenar tabanlı filtreler ise renk bilgisini zayıflatabilir. Amaç filtrelerin yalnızca görüntüyü daha düzgün göstermesi değil, çileğin segmentasyon ve ölçüm sonuçlarına olan etkisi de değerlendirilmektedir.

Görüntü işleme kanadında segmentasyon işlemi HSV ve CIELab maskeleri üzerinden yapılmaktadır. Çilek bölgesi renk bilgisine göre arka plandan ayrılır. Daha sonra maske morfolojik işlemler ile temizlenir. Bu aşamada küçük gürültüler kaldırılır, boşluklar doldurulur ve çilek bölgesinin daha düzenli hale gelmesi sağlanır. Son olarak feature extraction işlemi uygulanır. Bu işlem ile alan, çevre, centroid, bounding box, major eksen uzunluğu ve minor eksen uzunluğu gibi değerler elde edilir.

Bu kanadın robotik sistem açısından en önemli çıktısı centroid bilgisidir. Çünkü centroid değeri robot kolun yaklaşacağı hedef noktayı belirlemek için kullanılabilir. Bunun yanında major ve minor eksen uzunlukları gripper açıklığının ayarlanmasına, renk ve olgunluk bilgisi ise hasat kararına katkı sağlayabilir. Görüntü işleme kanadı, robotik sistemin algılama ve karar verme kısmının temelini oluşturmaktadır.

3.3 Tezin Robotik Tasarım Kanadı

Tezin robotik tasarım kanadı, görüntü işleme sonucunda elde edilen bilgilerin mekanik bir çilek toplama sistemi ile nasıl kullanılabileceğini açıklamaktadır. Bu bölümde robot kol, uç efektör, kamera yerleşimi ve gripper mekanizması birlikte değerlendirilmektedir.

Robotik sistemde temel amaç, çileğe uygun bir açıdan yaklaşmak, meyveyi zarar vermeden kavramak ve hasat işlemini gerçekleştirebilecek bir uç yapı tasarlamaktır. Çilek hassas bir meyve olduğu için gripper tasarımında yüksek sıkma kuvvetinden kaçınılmalıdır. Bunun yerine meyveyi çevresel olarak destekleyen, temas yüzeyini artıran ve düşük kuvvetle kavrama

sağlayan bir yapı tercih edilmelidir. Bütün bunları baz alarak mekanizma çok parmaklı olarak önerilmektedir.

Tasarımda uç efektör üzerinde iki adet kamera kullanılması düşünülmüştür. Kameralar sağ ve sol tarafa yerleştirilerek çileğin farklı açılardan görüntülenmesi hedeflenmiştir. Bu yapı stereo görüş yaklaşımına uygun bir altyapı oluşturabileceği gibi, gripperın çileğe yaklaşma sürecinde görüş alanının daha iyi korunmasına da yardımcı olabilir. Kameraların doğrudan gövdeye sabitlenmesi yerine taşıyıcı çubuk benzeri bağlantı elemanları üzerine yerleştirilmesi, kamera görüş açısının daha uygun şekilde ayarlanmasını sağlayabilir.

Kamera montajında arka tarafta yay destekli bir yapı düşünülmüştür. Bu yaylı yapı, kamera bağlantısında oluşabilecek küçük mekanik boşlukları ve gevşeklikleri azaltmayı amaçlamaktadır. Ayrıca titreşim etkilerinin azaltılması ve kamera hizasının daha kararlı tutulması için de faydalı olabilir. Bu durum görüntü işleme açısından önemlidir. Çünkü kamera görüntüsündeki küçük titreşimler, merkez noktası ve segmentasyon sonucunu etkileyebilir.

Gripper tarafında üç veya dört parmaklı bir yapı değerlendirilmektedir. Parmakların çileğin etrafına simetrik şekilde yerleştirilmesi, kavrama kuvvetinin daha dengeli dağılmasını sağlar. Parmakların ileri-geri hareket edebilecek şekilde tasarlanması ise farklı boyuttaki çileklere uyum sağlamak açısından önemlidir. Bu yapı sayesinde gripper, çileği tek noktadan sıkıştırmak yerine çevresel olarak destekleyen bir mekanizma haline gelir.

Robotik tasarım kanadı, bu tezde gerçek prototip üretiminden çok kavramsal mekanik tasarım ve sistem entegrasyonu düzeyinde ele alınmaktadır. SolidWorks tabanlı kavramsal tasarım görselleri, uç efektörün genel geometrisini, kamera yerleşimini ve gripper yapısını açıklamak için kullanılacaktır. Böylece görüntü işleme tarafından üretilen bilgilerin gerçek bir robotik tasarımda nasıl kullanılabileceği gösterilecektir.

3.4 Donanım Bileşenleri

Önerilen sistemin donanım tarafı kamera sistemi, robot kol, uç efektör, gripper yapısı ve aydınlatma koşullarından oluşmaktadır. Bu bileşenler görüntü işleme ve robotik hasat başarısını

doğrudan etkiler. Kamera görüntüsünün kalitesi, robot kolun hedefe ulaşma kabiliyeti, gripperın çileği zarar vermeden kavraması ve ortam ışığının kararlılığı sistemin genel performansı açısından önemlidir.

Bu tezde donanım bileşenleri, sistemin çalışma mantığını açıklamak için kavramsal düzeyde ele alınmaktadır. Gerçek zamanlı ve tamamlanmış bir saha prototipi bu çalışmanın ana amacı değildir. Ancak önerilen sistemin ileride prototipe dönüştürülebilmesi için kamera, robot kol ve gripper yapısı birlikte değerlendirilmiştir.

3.4.1 Kamera sistemi

Kamera sistemi, görüntü işleme zincirinin başlangıç noktasıdır. Kamera tarafından alınan görüntü ne kadar kararlı ve net olursa, filtreleme, segmentasyon ve özellik çıkarımı sonuçları da o kadar güvenilir olur. Kamera sistemi yalnızca görüntü alan bir bileşen olarak değil, robotik algılama zincirinin temel sensörü olarak düşünülmelidir.

Önerilen tasarımda iki adet kamera kullanılması düşünülmüştür. Kameralar uç efektörün sağ ve sol tarafına yerleştirilmiştir. Bu yerleşim ile çileğin farklı açılardan görüntülenmesi amaçlanmaktadır. İki kamera kullanımı, stereo görüş veya çift açılı gözlem yaklaşımı için uygun bir temel oluşturur. Böylece ileride çileğin yalnızca iki boyutlu görüntü koordinatları değil, derinlik bilgisi de hesaplanabilir.

Kameralar, uç efektör gövdesine doğrudan sabitlenmek yerine taşıyıcı çubuk benzeri montaj elemanları üzerine yerleştirilmiş şekilde düşünülmüştür. Bu yapı sayesinde kameraların görüş açısı gripper parmakları tarafından daha az engellenebilir. Ayrıca kameraların çileğe göre daha uygun bir açıda konumlandırılması sağlanabilir.

Kamera montajının arka kısmında yay destekli bir mekanizma kullanılması düşünülmüştür. Bu yaylı yapı, montaj boşluklarının azaltılması, mekanik gevşekliğin alınması ve titreşim etkilerinin sınırlandırılması amacıyla tasarlanmıştır. Kamera hizasının korunması, özellikle stereo görüş veya çift kamera tabanlı algılama sistemlerinde önemlidir. Çünkü kamera hizasındaki küçük değişimler, görüntü işleme ve derinlik hesaplama sonuçlarını etkileyebilir.

3.4.2 Robot kol

Robot kol, görüntü işleme sistemi tarafından belirlenen hedef noktaya ulaşmak için kullanılan mekanik yapıdır. Bu tezde robot kolun ayrıntılı kinematik kontrolü ana çalışma konusu değildir. Ancak görüntü işleme çıktılarının robot kol tarafından kullanılabilir olması hedeflenmektedir. Çileğin merkez noktası, boyut bilgisi ve olgunluk durumu robot kolun hareket planlaması açısından değerlendirilmiştir.

Robot kol için en temel ihtiyaç, hedef çileğin konumunun bilinmesidir. Görüntü üzerinde hesaplanan piksel koordinatları robot kol için doğrudan yeterli değildir. Koordinatların kamera modeli ve kalibrasyon bilgileri kullanılarak gerçek dünya veya robot koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm ilerleyen bölümlerde kamera modeli ve sistem entegrasyonu kapsamında açıklanacaktır.

Robot kolun çileğe yaklaşma hareketi, uç efektör ve gripper tasarımıyla birlikte düşünülmelidir. Eğer gripper çileğe geniş bir açıyla yaklaşacak şekilde tasarlanmışsa, robot kolun hedefe geliş yönü buna göre belirlenmelidir. Aynı şekilde kameraların uç efektör üzerindeki konumu, robot kolun yaklaşma sırasında görüş alanını kaybetmemesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada robot kol, görüntü işleme çıktısını kullanan uygulama bileşeni olarak ele alınmaktadır. Robot kolun hedefe yönelmesi için gerekli başlangıç verileri; çileğin merkezi, yaklaşık boyutu ve olgunluk bilgisi olarak belirlenmiştir.

3.4.3 Uç efektör ve gripper yapısı

Uç efektör, robot kolun çilekle doğrudan etkileşime giren kısmıdır. Robotik hasat sisteminin başarısında önemli rol oynar. Çileğin hassas yapısı nedeniyle uç efektör tasarımında yüksek kuvvetli ve dar temas yüzeyli kavrama yaklaşımlarından kaçınılmalıdır. Bunun yerine meyveyi daha geniş yüzeyden destekleyen, düşük kuvvetle kavrama sağlayan ve farklı çilek boyutlarına uyum gösterebilen bir yapı tercih edilmelidir.

Önerilen gripper yapısı çok parmaklı bir mekanizma olarak düşünülmüştür. Üç veya dört parmaklı yapı, çileğin etrafında daha dengeli bir kavrama oluşturabilir. Parmakların simetrik

olarak yerleştirilmesi, çileğe uygulanan kuvvetin daha dengeli dağılmasına yardımcı olur. Bu yaklaşım, çileğin tek noktadan sıkıştırılmasını azaltır ve yüzey hasarı riskini düşürebilir.

Tutucu parmakların ileri-geri hareket edebilecek şekilde tasarlanması, farklı boyuttaki çileklere uyum sağlamak açısından önemlidir. Görüntü işleme sonucunda elde edilen major ve minor eksen değerleri, gripper açıklığının ayarlanmasında kullanılabilir. Böylece gripper, görüntüden elde edilen boyut bilgisine göre daha kontrollü bir kavrama hareketi gerçekleştirebilir.

Uç efektör üzerinde kameraların bulunması, algılama ve kavrama işleminin aynı mekanik yapı üzerinde birleşmesini sağlar. Ancak kamera yerleşimi gripper hareketini engellememelidir. Kameraların sağ ve sol tarafta, taşıyıcı çubuklar üzerinde konumlandırılması uygun bir yerleşim olarak değerlendirilmiştir. Bu yapı hem görüntü alma alanını korumayı hem de kavrama bölgesini açık bırakmayı amaçlamaktadır.

3.4.4 Aydınlatma koşulları

Aydınlatma koşulları, görüntü işleme sisteminin başarısını doğrudan etkileyen önemli bir faktördür. Aynı çilek farklı ışık koşullarında farklı renk değerlerine sahipmiş gibi görünebilir. Gölge, parlama, yansıma ve ortam ışığındaki değişimler özellikle renk tabanlı segmentasyon işlemini zorlaştırır. Kontrollü aydınlatma altında alınan görüntülerde çileğin arka plandan ayrılması daha kolay olabilir. Ancak gerçek tarım ortamlarında ışık koşulları sabit değildir.

Görüntü işleme algoritmasının farklı ışık koşullarına karşı belirli ölçüde dayanıklı olması gerekir. HSV ve CIELab renk uzaylarının kullanılması, RGB'ye göre ışık değişimlerinin etkisini azaltmaya yardımcı olabilir. Bununla birlikte filtreleme ve morfolojik işlemler de maske kalitesinin artırılmasında rol oynar.

Bu tezde aydınlatma koşulları, görüntü işleme başarısını etkileyen bir çevresel değişken olarak değerlendirilmiştir. Özellikle segmentasyon ve olgunluk analizi yapılırken renk bilgisinin ışık koşullarından etkilenebileceği dikkate alınmıştır. Gelecek çalışmalarda sabit LED aydınlatma veya kontrollü sera ortamı kullanılarak görüntü alma kararlılığı artırılabilir.

3.5 Yazılım Altyapısı

Yazılım altyapısı MATLAB ortamı üzerine kurulmaktadır. MATLAB, görüntü işleme, matris işlemleri, filtre tasarımı, grafiksel analiz ve deneysel karşılaştırmalar için uygun bir çalışma ortamı sunmaktadır. Görüntü işleme problemlerinde pikseller matris yapısı ile temsil edildiğinden, MATLAB'ın matris tabanlı çalışma yapısı avantaj sağlamaktadır.

Yazılım altyapısının temel amacı, çilek görüntülerinin işlenmesi, filtrelerin uygulanması, segmentasyon maskelerinin oluşturulması ve feature extraction sonuçlarının elde edilmesidir. Ayrıca farklı filtrelerin aynı görüntü üzerinde karşılaştırılması ve gerçek ölçüm değerleriyle hata analizlerinin yapılması da MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir.

3.5.1 MATLAB ortamı

MATLAB çalışmada yalnızca kod yazmak için kullanılan bir program olarak değerlendirilmemektedir. MATLAB, önerilen görüntü işleme ve filtreleme yaklaşımının uygulanması, test edilmesi ve klasik yöntemlerle karşılaştırılması için kullanılan doğrulama ortamıdır. Ayrıca MATLAB, tezin amacı değil, önerilen yöntemin uygulanmasını sağlayan araçtır.

Görüntülerin okunması, renk uzayı dönüşümleri, filtreleme işlemleri, segmentasyon, morfolojik işlemler ve özellik çıkarımı MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Özellikle filtreleme aşamasında hazır fonksiyonların yanında custom 5×5 maske yapılarının da uygulanabilmesi, MATLAB'ın bu çalışma için uygun bir ortam olmasını sağlamıştır.

MATLAB ortamında aynı görüntü üzerinde farklı filtreler test edilebilmekte ve her filtre sonrası çilek bölgesine ait sayısal özellikler hesaplanabilmektedir. Böylece filtrelerin yalnızca görsel etkisi değil, merkez noktası, boyut ve hata sonuçları üzerindeki etkisi de değerlendirilebilmektedir.

3.5.2 Kullanılan araçlar ve fonksiyonlar

MATLAB'ın temel görüntü işleme fonksiyonlarından yararlanılmıştır. Görüntünün okunması için imread fonksiyonu, renk uzayı dönüşümleri için rgb2hsv ve rgb2lab fonksiyonları,

filtreleme işlemleri için imfilter, imgaussfilt, medfilt2 ve benzeri fonksiyonlar kullanılabilir. Segmentasyon için renk eşikleme adımları uygulanmakta, morfolojik işlemler için imopen, imclose, imfill ve bwareaopen gibi fonksiyonlardan yararlanılmaktadır.

Feature extraction aşamasında regionprops fonksiyonu önemli bir rol oynamaktadır. Bu fonksiyon ile çilek bölgesinin alanı, çevresi, merkezi, bounding box değeri, major eksen ve minor eksen uzunlukları hesaplanabilir. Bu değerler daha sonra filtre karşılaştırması ve robotik sistem değerlendirmesi için kullanılmaktadır.

Bu tez açısından önemli olan nokta, MATLAB fonksiyonlarının yalnızca hazır sonuç üretmek için kullanılmamasıdır. Özellikle filtreleme aşamasında custom 5×5 maskeler tanımlanarak filtre çekirdeğinin yapısı kontrol edilmiştir. Böylece farklı ağırlık dağılımlarının çilek segmentasyonu ve ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi incelenebilmiştir.

3.6 Görüntü İşleme ve Robotik Sistem Arasındaki Veri Akışı

Görüntü işleme ve robotik sistem arasındaki veri akışı, bu tezin bütünleşik yapısını oluşturan temel bağlantıdır. Kamera görüntüsünden elde edilen ham veri, görüntü işleme adımlarından geçerek robotik sistem için anlamlı bilgilere dönüştürülür. Bu bilgiler daha sonra robot kol ve gripper tasarımı açısından değerlendirilir.

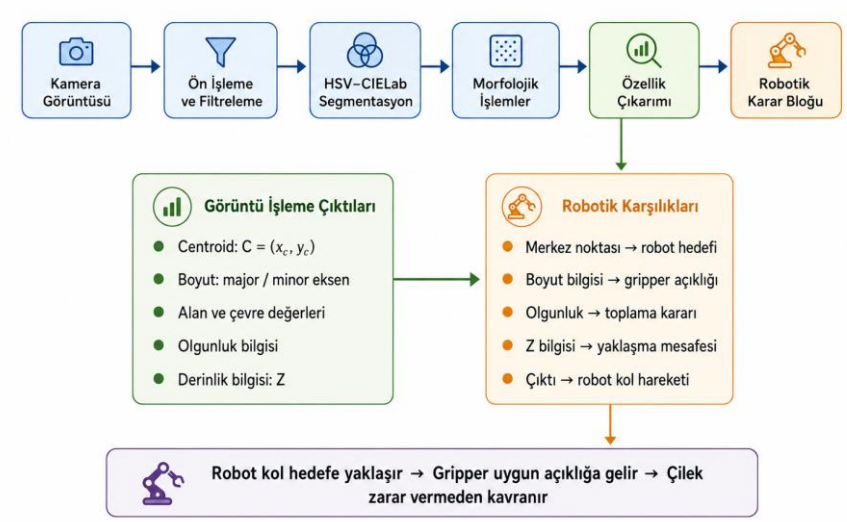
İlk aşamada kamera görüntüsü alınır ve MATLAB ortamında işlenir. Görüntü filtrelenir, HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülür, çilek bölgesi segmentasyon ile ayrılır ve morfolojik işlemlerle maske temizlenir. Daha sonra çilek bölgesi üzerinden özellik çıkarımı yapılır. Bu aşamada centroid, major axis length, minor axis length, area, perimeter ve bounding box gibi değerler elde edilir.

Bu değerlerin robotik karşılıkları bulunmaktadır. Centroid değeri, robot kolun hedef noktası olarak değerlendirilebilir. Major ve minor eksen değerleri, çileğin yaklaşık boyutunu gösterdiği için gripper açıklığına etki edebilir. Renk ve olgunluk bilgisi, robotun çileği toplayıp toplamama kararını destekleyebilir. Eğer stereo kamera veya derinlik bilgisi sisteme eklenirse, çileğin üç boyutlu konumu da hesaplanabilir.

Veri akışı yalnızca görüntü işleme sonucunda tablo oluşturmak için değil, robotik toplama sisteminin karar ve hareket sürecini desteklemek için kullanılmaktadır. Bu yaklaşım, tezde görüntü işleme ve robotik tasarımın birbirinden ayrı değil, birbirini tamamlayan iki yapı olarak ele alınmasını sağlamaktadır.

3.7 Sistem Veri Akış Diyagramı

Önerilen sistemin veri akışı ham görüntünün alınmasından robotik hedef bilgisinin oluşturulmasına kadar devam eden bir zincir şeklinde düşünülebilir. Bu zincirde her adım, bir sonraki adımın doğruluğunu etkiler. Özellikle filtreleme ve segmentasyon aşamaları, sonraki özellik çıkarımı ve robotik değerlendirme için kritik öneme sahiptir.



Şekil 3.2: Görüntü işleme ve robotik sistem arasındaki veri akışı

Şekil 3.2'de gösterilen veri akışı aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

1. Kamera sistemi ile çilek görüntüsünün alınması
2. Görüntünün MATLAB ortamına aktarılması
3. RGB görüntünün ön incelenmesi
4. HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüşüm yapılması
5. Farklı filtreleme yöntemlerinin uygulanması

6. HSV ve CIELab tabanlı çilek maskelerinin oluşturulması
7. Maskelerin birleştirilmesi
8. Morfolojik işlemler ile maskenin temizlenmesi
9. Çilek bölgesinin çıkarılması
10. Feature extraction ile alan, çevre, merkez, major eksen ve minor eksen değerlerinin hesaplanması
11. Renk ve olgunluk bilgisinin değerlendirilmesi
12. Boyut bilgisinin gerçek ölçü ile karşılaştırılması
13. Çilek merkez noktasının robotik hedef bilgisi olarak değerlendirilmesi
14. Boyut bilgisinin gripper açıklığı ile ilişkilendirilmesi
15. Olgunluk bilgisinin toplama kararı ile ilişkilendirilmesi

Bu veri akışı, sistemin hem görüntü işleme hem de robotik tasarım açısından nasıl çalıştığını göstermektedir. Görüntü işleme tarafında elde edilen her sayısal değer, robotik sistem için potansiyel bir giriş parametresi olarak değerlendirilebilir. Sistem veri akış diyagramı, tezde önerilen bütünleşik yaklaşımın temel yapısını oluşturmaktadır.

Bu bölümde verilecek diyagramda kamera, MATLAB görüntü işleme bloğu, filtreleme bloğu, segmentasyon bloğu, feature extraction bloğu, robotik hedef üretimi ve gripper karar bloğu birlikte gösterilebilir. Böylece okuyucu, ham görüntüden robotik toplama kararına kadar olan süreci görsel olarak takip edebilir.

3.8 Genel Çalışma Senaryosu

Önerilen sistemin genel çalışma senaryosu, robotik çilek toplama işleminin adım adım nasıl gerçekleşebileceğini açıklamaktadır. İlk olarak uç efektör üzerinde yer alan sağ ve sol kameralar çilek bölgesini görüntüler. Kameralardan elde edilen görüntüler MATLAB tabanlı görüntü işleme sürecine aktarılır. Bu aşamada görüntü filtrelenir, renk uzaylarına dönüştürülür ve çilek bölgesi segmentasyon ile ayrılır.

Çilek bölgesi belirlendikten sonra “feature extraction” işlemi uygulanır. Bu işlem sonucunda çileğin merkez noktası, boyut bilgileri ve alan değeri hesaplanır. Aynı zamanda renk bilgisi

üzerinden olgunluk durumu değerlendirilir. Eğer çilek olgun kabul edilirse ve segmentasyon sonucu yeterince güvenilir ise robotik sistem bu çileği hedef olarak seçebilir.

Hedef seçildikten sonra çileğin merkez noktası robot kol için yaklaşma hedefi olarak değerlendirilir. Eğer sistemde stereo kamera veya derinlik bilgisi bulunuyorsa, bu merkez noktası üç boyutlu konuma dönüştürülebilir. Robot kol, uç efektörü bu hedefe doğru yönlendirir. Gripper parmakları, çileğin boyut bilgisine göre uygun açıklığa getirilir ve meyveyi çevresel olarak kavrayacak şekilde hareket eder.

Kavrama sırasında amaç, çileğe zarar vermeden yeterli tutuş sağlamaktır. Bu yüzden çok parmaklı ve simetrik gripper yapısı, çileğin çevresinde dengeli bir temas oluşturacak şekilde düşünülmüştür. Çilek kavrandıktan sonra robot kol hasat hareketini tamamlar ve meyveyi bırakma veya taşıma noktasına götürür.
Bu çalışma kapsamında sistem gerçek zamanlı çalışan tamamlanmış bir robot prototipi olarak uygulanmamıştır. Ancak önerilen görüntü işleme yaklaşımı, kamera destekli uç efektör tasarımı ve gripper mekanizması birlikte ele alınarak robotik çilek hasadı için uygulanabilir bir kavramsal sistem yapısı sunulmuştur. Bu yapı, ileride gerçek prototip üretimi, kuvvet sensörü entegrasyonu, stereo görüş ile 3B konum hesabı ve saha testleri ile geliştirilebilir.

4. GÖRÜNTÜ OLUŞUMU VE KAMERA MODELİ

Görüntü işleme tabanlı robotik bir algılama sisteminde kamera yalnızca görüntü alan bir donanım elemanı değildir. Kamera, gerçek dünyadaki üç boyutlu ortamı iki boyutlu görüntü düzlemine aktaran temel ölçüm aracıdır. Görüntü üzerinde görülen bir pikselin gerçek dünyada hangi noktaya karşılık geldiğini anlamak için görüntü oluşum sürecinin ve kamera modelinin açıklanması gerekmektedir.

İlk olarak çileğin görüntü üzerinde tespit edilmesi, merkez noktasının hesaplanması, boyutunun tahmin edilmesi, olgunluk durumunun değerlendirilmesi ve robotik toplama sistemi için kullanılabilir hedef bilgisinin üretilmesi amaçlanmaktadır. Bu işlemlerin tamamı kamera görüntüsü üzerinden başlamaktadır. Ancak kamera görüntüsünde elde edilen bilgi doğrudan gerçek dünya bilgisi değildir. Görüntüde hesaplanan merkez noktası piksel koordinatıdır. Çileğin görüntüde kapladığı alan piksel sayısıdır. Görünen boyutu ise kamera ile çilek arasındaki mesafeye, lens özelliklerine ve kamera açısına bağlıdır.

Görüntü işleme çıktılarının robotik sistemde kullanılabilmesi için kamera modeli ve koordinat dönüşümleri önemlidir. Robot kol, görüntüdeki piksel koordinatlarıyla değil, kendi koordinat sistemindeki hedef noktalarla çalışır. Çileğin görüntü üzerindeki merkezi önce kamera modeli ile ilişkilendirilmeli, daha sonra robot koordinat sistemine aktarılabilecek hale getirilmelidir. Özellikle robotik hasat sistemlerinde stereo görüş, kamera kalibrasyonu ve kamera-robot koordinat dönüşümü, hedef konum doğruluğunu doğrudan etkileyen temel aşamalardır [4], [14].

Bu tez kapsamında kamera modeli temel düzeyde ele alınmıştır. Amaç, karmaşık bir kamera kalibrasyon sistemi geliştirmekten çok, görüntü işleme sonucunda elde edilen merkez, boyut ve derinlik bilgilerinin robotik sistemle nasıl ilişkilendirilebileceğini açıklamaktır. Bu yaklaşım, çift kamera destekli uç efektör tasarımının ve robotik hedef üretim sürecinin teorik temelini oluşturmaktadır.

4.1 Görüntü Oluşum Prensipleri

Gerçek dünyadaki nesneler üç boyutlu koordinatlara sahiptir. Bir çileğin kamera sistemine göre konumu yatay, dikey ve derinlik eksenlerinde tanımlanabilir. Ancak kamera bu üç boyutlu

bilgiyi iki boyutlu görüntü düzlemine yansıtır. Yani kamera görüntüsü, gerçek dünyanın doğrudan kopyası değil, perspektif projeksiyon ile oluşan iki boyutlu bir temsildir.

Bir nesnenin görüntüdeki konumu ve büyüklüğü; kameranın konumuna, nesneye olan uzaklığa, lens özelliklerine, odak uzaklığına, sensör yapısına ve görüntü çözünürlüğüne bağlıdır. Aynı çilek kameraya yakın olduğunda görüntüde daha büyük görünürken, kameradan uzaklaştığında daha küçük görünür. Bu durum boyut tahmini açısından önemlidir. Çünkü görüntü üzerindeki piksel alanı veya eksen uzunluğu doğrudan gerçek boyutu vermez; mesafe veya ölçek bilgisiyle birlikte değerlendirilmelidir.

Görüntü oluşumunda ışık da önemli bir etkendir. Çileğin yüzeyinden yansıyan ışık kamera sensörüne ulaşır ve sensörde sayısal piksel değerlerine dönüştürülür. Görüntüdeki renk değerleri yalnızca çileğin gerçek rengine bağlı değildir. Ortam ışığı, gölge, parlama, kamera beyaz dengesi ve yüzey yansıması da renk değerlerini değiştirebilir. Bu durum özellikle renk tabanlı çilek tespiti ve olgunluk değerlendirmesi için dikkate alınmalıdır.

Çilek görüntüsünde elde edilen her piksel, belirli bir renk ve konum bilgisi taşır. Ancak bu bilgiler doğrudan robotik sistem tarafından kullanılabilir halde değildir. Görüntüdeki kırmızı bölge çileği temsil edebilir; fakat robot kol için asıl gerekli olan, bu bölgenin merkezi, yaklaşık boyutu ve gerçek dünyadaki hedef konumudur. Görüntü oluşum süreci, yalnızca kamera görüntüsünün nasıl meydana geldiğini değil, bu görüntüden robotik sistem için nasıl veri çıkarılabileceğini de açıklayan temel bir aşamadır.

Görüntü oluşumu, çileğin kamera görüntüsü üzerinde tespit edilmesi ile robotik hedef bilgisi üretimi arasındaki başlangıç noktası olarak değerlendirilmektedir. Görüntüde görülen renk, boyut ve merkez bilgileri, daha sonra filtreleme, segmentasyon, özellik çıkarımı ve koordinat dönüşümü adımlarından geçirilerek robotik sistem için anlamlı hale getirilmektedir.

4.2 Kamera Modellemesi Denklemleri

Gerçek dünyadaki bir noktanın kamera koordinat sistemindeki gösterimi denklem (1) şeklindedir.

$$P_c = \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \tag{4.1}$$

Burada $\boldsymbol{P_c}$, noktanın kamera koordinat sistemindeki üç boyutlu konumunu ifade eder. Bu denklem, çileğin kameraya göre yatay, dikey ve derinlik konumunu tanımlamak için kullanılır [4], [14].

Görüntü düzlemindeki piksel koordinatı denklem (2) gösterilir.

$$p = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \tag{4.2}$$

Burada $\boldsymbol{u}$ yatay piksel koordinatını, $\boldsymbol{v}$ ise dikey piksel koordinatını gösterir. Bu ifade, görüntü işleme sonucunda bulunan çilek merkezinin görüntü üzerindeki konumunu belirtmek için kullanılır [4].

Pinhole kamera modelinde kamera koordinatlarından piksel koordinatlarına geçiş denklem (4.3) kullanarak olur ve şekil 4.1'de de bu model gösterilmektedir.

$$u = \frac{f_x X_c}{Z_c} + c_x \tag{4.3}$$

Denklem (3), üç boyutlu bir noktanın görüntü düzlemindeki yatay piksel konumunu hesaplamak için kullanılır [4], [14].

$$v = \frac{f_y Y_c}{Z_c} + c_y \tag{4.4}$$

Denklem (4), üç boyutlu bir noktanın görüntü düzlemindeki dikey piksel konumunu hesaplamak için kullanılır [4], [14].

Kamera modeli genel matris formunda şu şekilde yazılabilir:

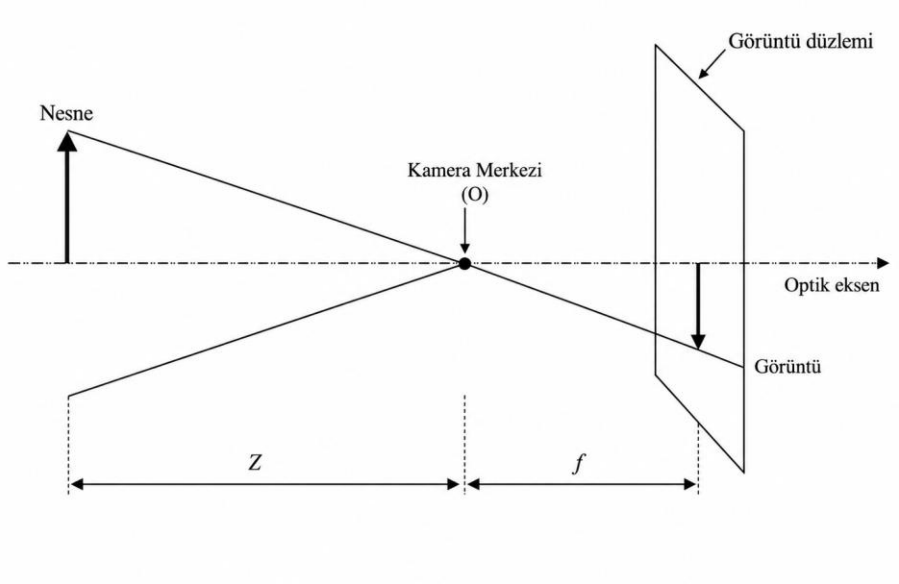
$$s\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K[R \quad t]\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

Bu denklem, gerçek dünya koordinatındaki bir noktanın kamera parametreleri kullanılarak görüntü düzlemine aktarılmasını açıklar. Kamera kalibrasyonu ve perspektif projeksiyon ilişkisini göstermek için kullanılır [4], [14].

Kamera iç parametre matrisi:

$$K = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

Bu matris, kameranın odak uzaklığı ve görüntü merkezi gibi iç parametrelerini içerir. Piksel koordinatları ile kamera modeli arasındaki ilişkiyi kurmak için kullanılır [4].



Şekil 4.1: Pinhole kamera modeli

4.2.1 Perspektif ve Geometrik Dönüşüm Denklemleri

Kamera koordinat sistemindeki bir noktanın robot koordinat sistemine aktarılması:

$$P_r = R_{rc}P_c + t_{rc} \tag{4.7}$$

Burada $\boldsymbol{P_r}$robot koordinat sistemindeki noktayı, $\boldsymbol{P_c}$kamera koordinat sistemindeki noktayı, $\boldsymbol{R_{rc}}$dönme matrisini ve $\boldsymbol{t_{rc}}$öteleme vektörünü ifade eder. Bu denklem, kameranın gördüğü çilek merkezini robot kolun kullanabileceği hedef konuma dönüştürmek için kullanılır [4], [14].

Aynı dönüşüm homojen matris formunda şu şekilde gösterilebilir:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{rc} & t_{rc} \\ 0_{1\times3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Bu form, dönme ve öteleme işlemlerini tek bir matris içinde toplar. Robotik sistemlerde kamera koordinatından robot koordinatına geçişi daha düzenli şekilde ifade etmek için kullanılır [14].

Segmentasyon sonrası çileğin görüntü üzerindeki merkez noktası:

$$C = \begin{bmatrix} u_c \\ v_c \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

Burada $\boldsymbol{C}$, çileğin görüntü üzerindeki merkez noktasını ifade eder. Bu denklem, robotik sistem için kullanılacak hedef piksel konumunu tanımlamak için kullanılır.

Piksel uzunluğu ile gerçek uzunluk arasındaki ölçek katsayısı:

$$s = \frac{L_{ger\backslash cek}}{L_{piksel}} \tag{4.10}$$

Burada $\boldsymbol{s}$, mm/piksel cinsinden ölçek katsayısıdır. Görüntüde ölçülen piksel uzunluğunun gerçek uzunlukla ilişkilendirilmesi için kullanılır.

Görüntüde ölçülen piksel uzunluğundan tahmini gerçek uzunluk:

$$L_{tahmin} = L_{piksel} \cdot s \tag{4.11}$$

Bu denklem, görüntü üzerinde ölçülen bir uzunluğun milimetre cinsinden tahmini karşılığını hesaplamak için kullanılır.

Piksel koordinatından kamera koordinatına dönüşüm:

$$X_c = \frac{(u - c_x)Z}{f_x} \tag{4.12}$$

Bu denklem, görüntüdeki yatay piksel koordinatının kamera koordinat sistemindeki $\boldsymbol{X_c}$konumuna dönüştürülmesini sağlar [4], [14].

$$Y_c = \frac{(v - c_y)Z}{f_y} \tag{4.13}$$

Bu denklem, görüntüdeki dikey piksel koordinatının kamera koordinat sistemindeki $\boldsymbol{Y_c}$konumuna dönüştürülmesini sağlar [4], [14].

$$Z_c = Z \tag{4.14}$$

Bu ifade, kamera koordinat sistemindeki derinlik değerinin $\boldsymbol{Z}$olarak alındığını gösterir. Piksel koordinatının üç boyutlu kamera koordinatına çevrilmesi için derinlik bilgisinin gerekli olduğunu belirtir [4], [14].

4.2.2 Stereo Kamera ile Derinlik Denklemleri

Sol ve sağ görüntüler arasındaki yatay konum farkı disparity olarak ifade edilir:

$$d = x_L - x_R \tag{4.15}$$

Burada $\boldsymbol{x_L}$, sol kamera görüntüsündeki yatay piksel konumunu; $\boldsymbol{x_R}$, sağ kamera görüntüsündeki yatay piksel konumunu ifade eder. Bu denklem, stereo görüntüler arasındaki eşleşen nokta farkını hesaplamak için kullanılır [4], [14].
Stereo kamera sisteminde derinlik hesabı:

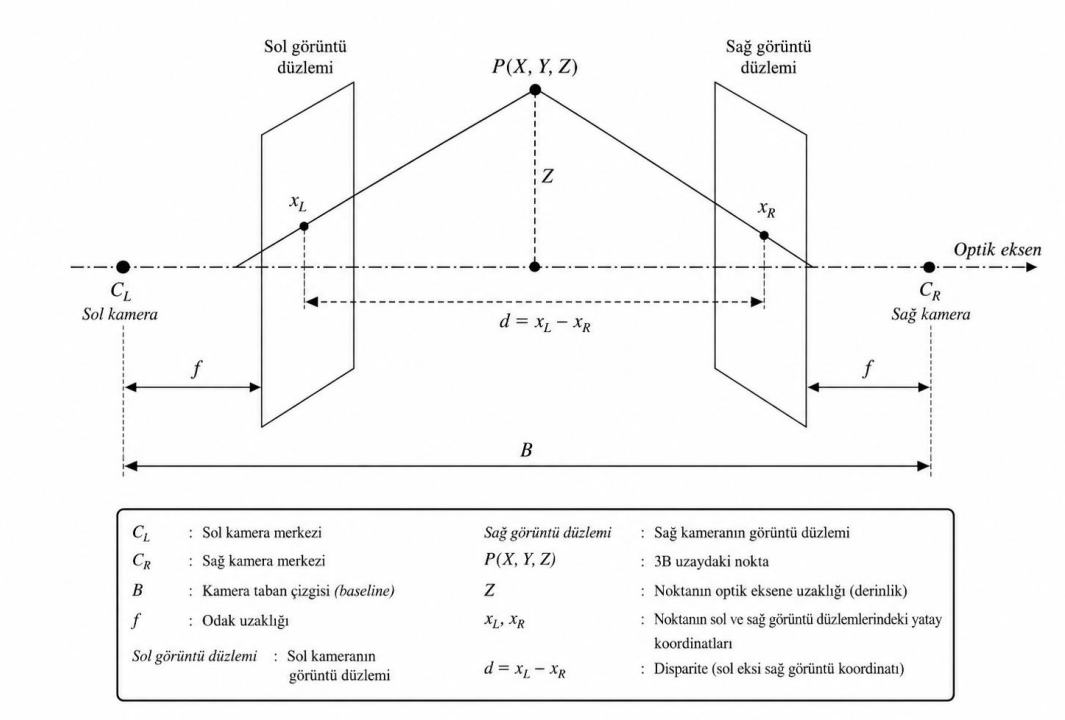
$$Z = \frac{f \cdot B}{d} \tag{4.16}$$

Burada $\boldsymbol{Z}$ derinlik mesafesini, $\boldsymbol{f}$ odak uzaklığını, $\boldsymbol{B}$ iki kamera arasındaki baz mesafesini ve $\boldsymbol{d}$disparity değerini ifade eder. Bu denklem, çileğin kameraya olan uzaklığını hesaplamak için kullanılır [4], [14].

Disparity ile derinlik arasındaki ilişki şu şekilde yorumlanabilir:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{d} \uparrow &\Rightarrow \boldsymbol{Z} \downarrow \\ \boldsymbol{d} \downarrow &\Rightarrow \boldsymbol{Z} \uparrow \end{aligned} \tag{4.17}$$

Bu ilişki, disparity arttığında nesnenin kameraya daha yakın, disparity azaldığında ise daha uzak olduğunu gösterir. Stereo kamera yaklaşımı çileğin üç boyutlu hedef konumunu belirlemek için kullanılabilir [4], [14]. Şekil 4.2, stereo kamera geometrisini göstermekte ve çalışma mantığını anlatmaktadır.



Şekil 4.2: Stereo kamera geometrisi

4.3 Ölçüm Hataları ve Belirsizlik Kaynakları

Görüntü işleme tabanlı ölçüm sistemlerinde hata kaçınılmazdır. Bu hatalar kamera kaynaklı olabilir, çevresel koşullardan kaynaklanabilir, görüntü işleme algoritmalarından gelebilir veya robotik koordinat dönüşümü sırasında oluşabilir. Bu tez açısından önemli olan, bu hataların yok sayılması değil, hangi aşamalarda ortaya çıkabileceğinin bilinmesi ve sistem çıktısına nasıl etki edebileceğinin değerlendirilmesidir.

Kamera kaynaklı hatalar arasında lens bozulmaları, düşük çözünürlük, odak problemleri, sensör gürültüsü ve kamera hizasındaki değişimler yer alır. Lens bozulmaları özellikle görüntünün kenar bölgelerinde geometrik sapmalara neden olabilir. Düşük çözünürlük ise çileğin sınırlarının daha az hassas belirlenmesine yol açar. Bu durumlar alan, çevre, major eksen ve minor eksen ölçümlerini etkileyebilir. Ayrıca donanıma ek olarak çevresel hatalar da oldukça önemlidir. Işık değişimi, gölge, parlama, yansıma ve yaprak örtüşmesi görüntüdeki renk ve kenar bilgisini etkiler. Çileğin bir kısmı gölgede kaldığında renk tabanlı segmentasyon yanlış sonuç verebilir.

Arka planda çileğe yakın renkli bölgeler varsa, bu bölgeler hatalı şekilde çilek olarak algılanabilir. Bu tür hatalar özellikle olgunluk analizi ve segmentasyon aşamasında önemlidir.

Görüntü işleme adımlarından kaynaklanan hatalar filtreleme, eşikleme ve morfolojik işlemlerle ilişkilidir. Fazla yumuşatma uygulanırsa çileğin kenarları bulanıklaşabilir. Eşik değeri yanlış seçilirse çileğin bazı bölgeleri maskenin dışında kalabilir. Morfolojik işlemler gereğinden fazla uygulanırsa çileğin gerçek alanı değişebilir. Hataların tamamı merkez noktası, alan, çevre, boyut ve robotik hedef bilgisi üzerinde etkili olabilir.

Stereo kamera sistemlerinde ek hata kaynakları da bulunmaktadır. İki kamera arasındaki baz mesafesinin doğru bilinmemesi, kamera hizasının bozulması, görüntü eşleştirme hataları ve disparity değerindeki küçük sapmalar derinlik hesabını etkileyebilir. Stereo derinlik denkleminde disparity değeri paydada bulunduğu için, d değerindeki küçük bir hata Z değerinde büyük değişimlere neden olabilir. Stereo sistemlerde kamera kalibrasyonu ve mekanik sabitlik kritik öneme sahiptir. Ek olarak tasarımda kullanılmış olan yay mekanizması da bu hata payını sıfırlamakta yardımcı olan bir düzenektir.

Robotik sistem açısından en önemli hatalardan bir diğeri de merkez noktası hatasıdır. Görüntü üzerinde hesaplanan centroid değeri hatalıysa, bu hata kamera koordinatlarına ve robot koordinat sistemine aktarılır. Sonuçta robot kol çileğin gerçek merkezine değil, sapmış bir hedef noktasına yönelebilir. Bu durum gripperın çileği doğru kavrayamamasına veya meyveye zarar vermesine neden olabilir.
Tezde ölçüm hataları, filtreleme ve segmentasyon sonuçlarının değerlendirilmesinde önemli bir kriter olarak ele alınmaktadır. Gerçek çilek ölçüleri ile görüntü işleme sonucunda elde edilen boyut değerleri karşılaştırılarak hata oranları hesaplanabilir. Aynı şekilde farklı filtrelerin merkez noktası üzerindeki etkisi incelenerek hangi filtrenin robotik sistem için daha kararlı hedef bilgisi ürettiği değerlendirilebilir.

Genel olarak ölçüm hataları aşağıdaki temel kaynaklardan oluşmaktadır:

- Kamera çözünürlüğü ve lens kaynaklı hatalar
- Işık değişimi, gölge ve parlama etkileri

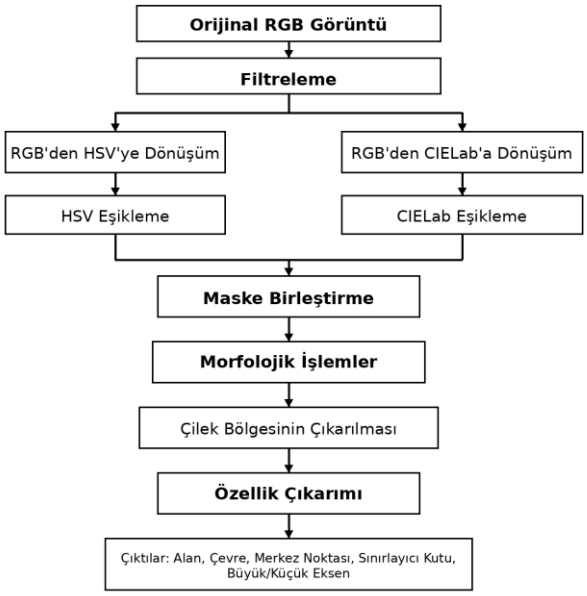
- Yaprak örtüşmesi ve arka plan karmaşıklığı
- Filtreleme ve segmentasyon hataları
- Morfolojik işlem parametrelerinin etkisi
- Piksel-gerçek dünya dönüşümündeki ölçek hataları
- Stereo görüşte disparity ve kalibrasyon hataları
- Kamera-robot koordinat dönüşümü hataları
- Mekanik titreşim ve kamera montaj gevşekliği

Hata kaynakları dikkate alındığında, görüntü işleme ve robotik tasarımın birlikte değerlendirilmesi gerektiği görülmektedir. Kamera montajının kararlı olması, filtreleme ve segmentasyonun doğru yapılması, merkez noktasının güvenilir hesaplanması ve koordinat dönüşümünün uygun kurulması robotik çilek toplama sisteminin başarısı için temel gerekliliklerdir.

5. ÖNERİLEN GÖRÜNTÜ İŞLEME YAKLAŞIMI

Bu bölümde çilek meyvesinin görüntü üzerinden tespit edilmesi, arka plandan ayrılması, renk ve olgunluk bilgisinin yorumlanması, boyut ve merkez noktası gibi sayısal özelliklerinin çıkarılması için kullanılan görüntü işleme yaklaşımı açıklanmaktadır. Önerilen yaklaşım tek bir işlem adımından oluşmamaktadır. Görüntünün MATLAB ortamına aktarılması, renk uzayı dönüşümleri, filtreleme, renk tabanlı segmentasyon, maske birleştirme, morfolojik iyileştirme ve özellik çıkarımı adımları birlikte kullanılmaktadır. Tarımsal görüntü işleme çalışmalarında da meyve tespiti için renk, şekil, segmentasyon ve özellik çıkarımı adımlarının birlikte kullanıldığı görülmektedir [1], [2], [3], [6], [7].

Burada görüntü işleme yaklaşımının amacı yalnızca çileği görüntü üzerinde işaretlemek değildir. Elde edilen sonuçların robotik çilek toplama sistemi için kullanılabilir olması hedeflenmektedir. Çileğin görüntüdeki merkezi, yaklaşık boyutu, major ve minor eksen uzunlukları, renk bilgisi ve olgunluk durumu birlikte değerlendirilmektedir. Robotik hasat sistemlerinde meyvenin merkez noktası ve konum bilgisi, robot kolun hedefe yönelmesi için temel veri sağladığından, görüntü işleme çıktılarının kararlı olması önemlidir [4], [18], [20].



Şekil 5.1: MATLAB tabanlı görüntü işleme iş akışı

Önerilen görüntü işleme zinciri şekil 5.1, genel olarak şu sıraya dayanmaktadır:

- Görüntünün MATLAB ortamına aktarılması
- RGB görüntünün incelenmesi
- HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüşüm
- Filtreleme → HSV tabanlı segmentasyon
- CIELab tabanlı segmentasyon
- Maskelerin birleştirilmesi
- Morfolojik işlemler
- Çilek bölgesinin çıkarılması
- Özellik çıkarımı
- Olgunluk, boyut ve merkez bilgisinin değerlendirilmesi

İşleme zincirinde filtreleme ve segmentasyon aşamaları kritik öneme sahiptir. Çünkü çilek bölgesi doğru ayrılmazsa, sonraki alan, çevre, merkez ve eksen uzunluğu hesapları da hatalı olur. Bu durum robotik hasat sisteminde yanlış hedef bilgisi üretimine neden olabilir. Görüntü işleme zincirinde eşikleme ile hedef bölge ayrılır, morfolojik işlemlerle maske düzenlenir ve

bağlı bölge üzerinden geometrik özellikler çıkarılır [22], [24], [25]. Bu tezde de amaç yalnızca çileği ekranda göstermek değil, robotik sistemde kullanılabilecek sayısal çıktılar üretmektir.

5.1 Görüntünün MATLAB Ortamına Aktarılması

Görüntü işleme süreci, çilek görüntüsünün MATLAB ortamına aktarılması ile başlamaktadır. MATLAB'da görüntü okuma işlemi genellikle imread fonksiyonu ile yapılır. Bu işlem sonucunda görüntü, piksel değerlerinden oluşan sayısal bir matris olarak çalışma ortamına alınır. Renkli bir görüntüde her piksel kırmızı, yeşil ve mavi olmak üzere üç temel renk kanalından oluşur. Dijital görüntüler sayısal matrisler olarak işlenebilir ve segmentasyon sonrasında ayrılan bağlı bölgelerden geometrik özellikler çıkarılabilir [22], [25]. MATLAB ortamına aktarılan çilek görüntüsü de bu sayısal yapı üzerinden filtreleme ve renk uzayı dönüşümü adımlarına alınmıştır.

MATLAB ortamına aktarılan görüntü ilk olarak RGB formatında incelenmektedir. RGB görüntü, kamera tarafından elde edilen temel renk bilgisini içerdiği için başlangıç aşaması açısından önemlidir. Çilek meyvesi olgun durumda genellikle kırmızı renge sahip olduğundan, RGB görüntü üzerinde çileğin genel konumu görsel olarak fark edilebilir. Ancak RGB görüntünün doğrudan segmentasyon için her zaman yeterli olmadığı bilinmektedir. RGB kanalları ışık şiddetinden doğrudan etkilenebildiği için farklı aydınlatma koşullarında aynı meyve farklı renk değerlerine sahipmiş gibi görünebilir [6], [7], [22].

Tezde RGB görüntü başlangıç verisi olarak kullanılmış, ancak daha kararlı çilek tespiti için HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüşüm yapılmıştır. Görüntünün MATLAB ortamına aktarılmasından sonra analiz edilecek görüntünün boyutu, renk kanalları ve genel görsel yapısı kontrol edilir. Çileğin görüntüdeki konumu, arka plan yapısı, gölge durumu, parlama etkileri ve yaprak bölgeleri görsel olarak değerlendirilir. Tarımsal görüntülerde arka plan karmaşıklığı ve yaprak örtüşmesi hedef meyvenin tespitini zorlaştırabilir; ayrılan meyve bölgesi ise daha sonra geometrik olarak ölçülebilir [1], [2], [3], [25]. Bu nedenle RGB görüntü ilk aşamada görsel olarak incelenmiş ve sonraki filtreleme ile segmentasyon adımları görüntünün yapısına göre kurulmuştur.

5.2 Ön İşleme Aşamaları

Ön işleme aşaması, ham görüntüyü segmentasyon ve özellik çıkarımı için daha uygun hale getirmek amacıyla uygulanır. Kamera ile alınan görüntüler her zaman doğrudan analiz için uygun olmayabilir. Görüntüde küçük gürültüler, renk değişimleri, gölgeler, parlama bölgeleri veya arka plan karmaşıklığı bulunabilir. Bu etkiler çileğin arka plandan ayrılmasını zorlaştırır. Tarımsal görüntülerde ışık, gölge ve arka plan değişkenliği, görüntü işleme başarısını doğrudan etkileyen temel problemler arasında gösterilmektedir [18], [20].

Ön işleme aşamasının temel amacı, çileğe ait önemli bilgileri korurken istenmeyen görüntü bozulmalarını azaltmaktır. Bu aşamada gürültü azaltma, renk uzayı dönüşümü, filtreleme ve gerektiğinde görüntü normalizasyonu gibi işlemler kullanılabilir. Ancak ön işleme işlemleri dikkatli uygulanmalıdır. Ön işleme sırasında uygulanan filtreleme, görüntü sınırlarını ve sonraki segmentasyon sonucunu etkileyebilir [9], [22], [23]. Bu nedenle renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinde çileğin ayırt edici renk bilgisinin korunması ayrıca dikkate alınmıştır.

Tezde ön işleme aşaması yalnızca görüntüyü görsel olarak daha düzgün hale getirmek için değil, çileğin sayısal özelliklerinin daha güvenilir çıkarılması için kullanılmaktadır. Robotik hasat sistemi açısından bu nokta önemlidir. Çünkü ön işleme aşamasındaki hata, segmentasyon maskesine; segmentasyon hatası da merkez noktası, boyut ve robotik hedef bilgisine yansıyabilir [4], [20].

5.2.1 Gürültü kaynakları

Çilek görüntülerinde gürültü farklı kaynaklardan oluşabilir. İlk kaynak kamera ve sensör kaynaklı gürültülerdir. Düşük ışık altında alınan görüntülerde sensör gürültüsü artabilir. Odak problemleri veya düşük çözünürlük, çileğin sınırlarının daha az net görünmesine neden olabilir. Görüntüdeki gürültü ve sınır bozulmaları, sonraki segmentasyon sonucunu etkileyebilir [22], [23]. Segmentasyon maskesinde oluşan değişimler ise alan, çevre ve eksen uzunluğu hesaplarına yansıyabilir.

İkinci önemli gürültü kaynağı çevresel koşullardır. Tarımsal ortamlarda ışık koşulları sabit değildir. Güneş ışığı, gölge, yaprakların oluşturduğu kapatma etkisi, yansıma ve arka plan

karmaşıklığı görüntü üzerinde istenmeyen değişiklikler oluşturabilir. Çileğin bir kısmı gölgede kaldığında aynı meyvenin farklı bölgeleri farklı renk değerlerine sahipmiş gibi algılanabilir. Bu durum renk tabanlı segmentasyonu zorlaştırır [18], [20].

Üçüncü gürültü kaynağı algoritmik işlemlerden kaynaklanabilir. Yanlış eşik değeri seçildiğinde çileğin bazı bölgeleri maskenin dışında kalabilir. Fazla güçlü bir filtre kullanıldığında kenar bilgisi zayıflayabilir. Morfolojik işlemler gereğinden fazla uygulanırsa çileğin gerçek alanı değişebilir. Gürültü ve görüntüdeki düzensiz yoğunluk değişimleri, eşikleme ve bölge çıkarımı sonucunu etkileyebilen hata kaynaklarıdır [22], [24], [25]. Bu etkiler sonraki morfolojik düzenleme ve özellik çıkarımı aşamalarına taşınabildiği için gürültü, bütün görüntü işleme zinciri açısından değerlendirilmiştir.

5.2.2 Normalizasyon

Normalizasyon, görüntü değerlerinin belirli bir aralığa veya daha dengeli bir yapıya getirilmesi işlemidir. Çilek görüntülerinde normalizasyon, özellikle farklı ışık koşullarının etkisini azaltmak için kullanılabilir. Aynı çileğin farklı parlaklık değerlerinde görünmesi, renk tabanlı segmentasyon ve olgunluk analizi üzerinde hataya neden olabilir [6], [7].

Ancak normalizasyon işlemi yapılırken çileğin gerçek renk bilgisinin bozulmamasına dikkat edilmelidir. Çünkü renk bilgisi yalnızca çileği tespit etmek için değil, olgunluk değerlendirmesi için de kullanılmaktadır. Eğer normalizasyon işlemi kırmızı tonları gereğinden fazla değiştirirse, olgunluk analizi hatalı sonuç verebilir. Çilekte olgunluk değerlendirmesi renk bilgisine dayandığı için görüntü üzerinde yapılan düzenlemelerin ayırt edici renk özelliklerini koruması önemlidir [6], [13]. Normalizasyon, görüntüyü daha dengeli hale getirebilecek yardımcı bir işlem olarak ele alınmış ancak çileğin temel renk yapısının değiştirilmemesine dikkat edilmiştir.

5.3 Renk Uzayı Analizi

Çilek tespitinde renk bilgisi önemli bir başlangıç noktasıdır. Çileğin olgunlaşma süreci renk değişimiyle yakından ilişkilidir. Olgunlaşmamış çileklerde yeşil veya açık renkli bölgeler daha belirgin olabilirken, olgun çileklerde kırmızı renk baskın hale gelir. Yani renk bilgisi hem çileğin

arka plandan ayrılması hem de olgunluk durumunun yorumlanması için kullanılabilir [6], [7], [13].

Görüntüler genellikle RGB formatında elde edilir ya da beslenir. RGB renk uzayı görüntünün temel renk bilgisini verir; ancak parlaklık ve renk bilgisi birbirinden tam olarak ayrılmadığı için ışık değişimlerinden kolay etkilenir. Çalışmada RGB görüntü tek başına kullanılmamış, HSV ve CIELab renk uzayları da değerlendirilmiştir. Tarımsal bilgisayarlı görü çalışmalarında meyve tespiti için renk, şekil ve öğrenme tabanlı farklı özelliklerden yararlanılmaktadır; renk tabanlı analizlerde RGB dışındaki renk temsilleri de kullanılabilir [1], [2], [3], [6], [7]. Çileğin renk yapısını daha ayrıntılı incelemek amacıyla HSV ve CIELab renk uzayları değerlendirmeye alınmıştır.

HSV renk uzayı şekil 5.2, renk tonu, doygunluk ve parlaklık bilgisini ayrı bileşenler halinde temsil eder. Bu yapı, çileğin kırmızı renk tonunun belirlenmesini kolaylaştırabilir. CIELab şekil 5.3, renk uzayı ise özellikle kırmızı-yeşil ayrımı açısından faydalı bilgiler sağlar. Meyve rengi ve renk farklılıklarının değerlendirilmesinde HSV ve CIELab gibi farklı renk temsillerinden yararlanılabilmektedir [6], [15], [16], [17]. RGB görüntü başlangıç verisi olarak kullanılmış, HSV ve CIELab uzayları ise çilek bölgesinin renk tabanlı analizi için birlikte değerlendirilmiştir.

5.3.1 RGB renk uzayı

RGB renk uzayı, kırmızı, yeşil ve mavi kanallardan oluşur. Çilek meyvesi kırmızı renge sahip olduğu için RGB görüntüde kırmızı kanal önemli bir bilgi sağlar. Kırmızı kanalın yeşil ve mavi kanallara göre daha baskın olması, çilek bölgesinin belirlenmesi için kullanılabilir [1], [7].

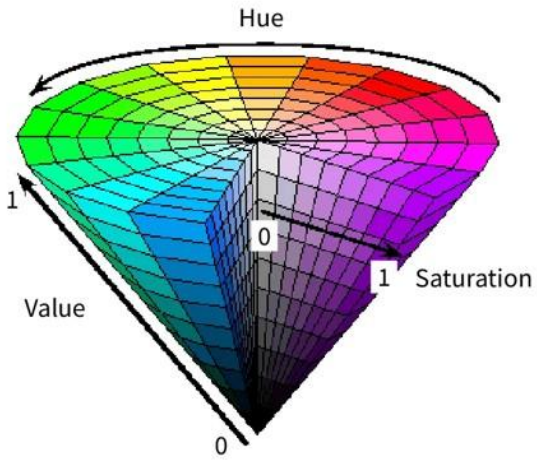
Ancak RGB renk uzayının önemli bir sınırlılığı vardır. RGB değerleri ortam ışığından doğrudan etkilenir. Aynı çilek güneş altında, gölgede veya farklı kamera ayarlarında farklı RGB değerleri verebilir. Yalnızca RGB kanal değerlerine dayalı bir segmentasyon yaklaşımı, değişken aydınlatma koşullarında kararlı sonuç vermeyebilir [6], [7], [22].

Bu tezde RGB görüntü başlangıç görüntüsü olarak kullanılmıştır. Görüntünün genel yapısı, çileğin konumu ve renk dağılımı ilk olarak RGB formatında incelenmiştir. Renk tabanlı meyve

analizinde farklı renk uzayları, görüntüdeki renk bilgisini farklı bileşenler üzerinden incelemeye olanak sağlamaktadır [6], [15], [16]. RGB görüntü, çileğin renk özelliklerini daha ayrıntılı değerlendirmek amacıyla HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmüştür.

5.3.2 HSV renk uzayı

HSV renk uzayı şekil 5.2, renk bilgisini Hue, Saturation ve Value bileşenlerine ayırır. Hue renk tonunu, Saturation rengin doygunluğunu, Value ise parlaklık değerini ifade eder. Bu ayrım, renk tabanlı segmentasyon için avantaj sağlar. Çünkü çileğin kırmızı rengi, parlaklık değerinden kısmen bağımsız olarak değerlendirilebilir [6], [13].



Şekil 5.2: HSV renk uzayı

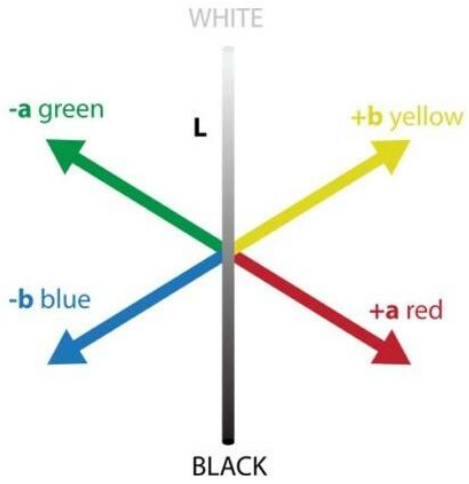
Çilek tespitinde Hue ve Saturation bileşenleri özellikle önemlidir. Hue bileşeni kırmızı renk aralığını belirlemek için kullanılabilir. Saturation bileşeni ise rengin ne kadar belirgin olduğunu gösterir. Olgun çileklerde kırmızı renk daha doygun olduğu için Saturation değeri olgunluk değerlendirmesi açısından da bilgi sağlayabilir [6], [7], [13].

HSV renk uzayında kırmızı renk genellikle iki ayrı aralıkta temsil edilebilir. Bunun nedeni Hue ekseninin dairesel yapıda olmasıdır. Kırmızı renk hem 0'a yakın hem de 1'e yakın değerlerde bulunabilir. HSV renk uzayında Hue bileşeni dairesel bir yapı gösterdiğinden kırmızı tonlar

eksenin iki ucuna yakın bölgelerde temsil edilebilir [6], [13]. Bu nedenle kırmızı çilek segmentasyonunda düşük ve yüksek Hue aralıklarının birlikte değerlendirilmesi gerekebilir.

5.3.3 CIELab renk uzayı

CIELab renk uzayı şekil 5.3, renk farklılıklarını insan görme algısına daha yakın şekilde temsil etmeyi amaçlayan bir renk modelidir. Bu renk uzayında L* bileşeni parlaklığı, a* ve b* bileşenleri ise renk karşıtlıklarını ifade eder. a* kanalı yeşil-kırmızı ekseniyle ilişkilidir. Çilek gibi kırmızı meyvelerin yeşil yapraklardan ayrılmasında faydalı olabilir [15], [16], [17].



Şekil 5.3: CIELab renk uzayı

CIELab renk uzayının avantajı, kırmızı çilek bölgesi ile yeşil yaprak bölgeleri arasındaki renk farkını daha belirgin hale getirebilmesidir. Özellikle doğal ortam görüntülerinde çilek ile arka plan arasında RGB değerleri açısından bazı karışmalar olabilir. CIELab a* kanalı bu ayrımı güçlendirmek için kullanılabilir [15], [16].

Bu tezde CIELab renk uzayı, HSV tabanlı segmentasyonu desteklemek için kullanılmıştır. HSV maskesi çileğin ana kırmızı bölgesini belirlerken, CIELab maskesi kırmızı-yeşil ayrımını destekleyerek arka plan ve yaprak bölgelerinin azaltılmasına yardımcı olabilir. HSV renk bileşenleri ile CIELab uzayındaki kırmızı–yeşil karşıtlığı, çilek renginin farklı yönlerden

değerlendirilmesini sağlar [6], [15], [16], [17]. İki renk uzayından elde edilen maskeler birlikte kullanılarak daha bütünlüklü bir çilek bölgesi elde edilmesi amaçlanmıştır.

5.4 Görüntü Filtreleme Aşaması

Filtreleme aşaması, görüntü işleme zincirinin en önemli adımlarından biridir. Kamera görüntüsü doğrudan segmentasyon işlemine gönderildiğinde küçük gürültüler, yüzey dokuları, gölgeler, parlama bölgeleri ve arka plan detayları maske sonucunu etkileyebilir. Segmentasyon öncesinde uygun bir filtreleme işlemi yapılması gerekmektedir [22], [23].

Bu çalışmada farklı filtreleme yöntemleri karşılaştırılmıştır. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, Unsharp ve custom 5×5 filtre maskeleri aynı görüntü işleme akışı içinde test edilmiştir. Filtreleme, segmentasyon ve bölge analizi birbirini takip eden görüntü işleme adımlarıdır ve bir aşamadaki değişim sonraki ölçümlere yansıyabilir [8], [9], [10], [19], [22]. Farklı filtrelerin çilek segmentasyonu ve özellik çıkarımı üzerindeki etkileri karşılaştırılarak robotik sistem açısından daha kararlı çıktı üreten yaklaşım araştırılmıştır.

Filtreleme işlemi yalnızca görüntüyü daha pürüzsüz hale getirmek için yapılmamaktadır. Robotik hasat açısından önemli olan, çileğin merkez noktasının, boyutunun ve sınırlarının doğru hesaplanmasıdır. Eğer filtre çileğin kenarlarını fazla bulanıklaştırırsa major ve minor eksen değerleri bozulabilir. Eğer filtre renk bilgisini zayıflatırsa HSV ve CIELab segmentasyonu hatalı sonuç verebilir. Eğer filtre gürültüyü yeterince azaltmazsa maske içinde küçük yanlış bölgeler kalabilir. Filtreleme sonucunda oluşan değişimler segmentasyon maskesine, maske yapısındaki değişimler ise bölgeden çıkarılan geometrik özelliklere yansıyabilir [19], [22], [25]. Söz konusu zincirin centroid ve boyut bilgilerinden robotik hedef verisine kadar olan etkisi birlikte değerlendirilmiştir.

Tezde filtreleme aşaması, sonraki bölümlerde daha ayrıntılı olarak karşılaştırılacak temel bir işlem adımı olarak ele alınmaktadır. Filtre seçiminde yalnızca görüntünün yumuşaması değil, sınırların korunması ve sonraki bölge analizinin kararlılığı da önem taşır [8], [9], [10], [19]. Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, gürültü azaltma ile renk ve sınır bilgisinin korunması arasındaki denge açısından incelenmiştir.

5.5 Renk Tabanlı Segmentasyon

Renk tabanlı segmentasyon, görüntüdeki çilek bölgesinin arka plandan ayrılması için kullanılan temel adımdır. Bu işlemde her pikselin çileğe ait olup olmadığı, seçilen renk uzayındaki değerlerine göre belirlenir. Çilek için bu işlem çoğunlukla kırmızı renk tonlarının seçilmesiyle başlar. Meyve tespiti ve sınıflandırma çalışmalarında renk tabanlı segmentasyonun yaygın olarak kullanılmasının temel nedeni, birçok meyvede olgunluk ve tür bilgisinin renk ile ilişkili olmasıdır [1], [2], [3], [6], [7].

Segmentasyonun başarısı, seçilen renk uzayına, filtreleme sonucuna ve eşik değerlerine bağlıdır. Eşik değerleri çok dar seçilirse çileğin bazı bölgeleri maskeye dahil edilmeyebilir. Eşik değerleri çok geniş seçilirse yaprak, toprak veya arka plandaki farklı bölgeler yanlışlıkla çilek olarak algılanabilir. Segmentasyon işlemi, yalnızca kırmızı rengi seçmekten ibaret değildir. Eşikleme yaklaşımının görüntü dağılımına bağlı olarak seçilmesi gerektiği, klasik thresholding çalışmalarında da vurgulanmaktadır [24].

Bu tezde segmentasyon işlemi HSV ve CIELab renk uzayları üzerinden gerçekleştirilmiştir. HSV renk uzayı çileğin kırmızı renk tonlarını ve doygunluk bilgisini değerlendirmek için kullanılmıştır. CIELab renk uzayı ise özellikle kırmızı-yeşil ayrımını desteklemek için eklenmiştir. Meyve görüntülerinde renk analizi farklı renk uzaylarının sunduğu bileşenler üzerinden gerçekleştirilebilmektedir [6], [15], [16], [17]. HSV ve CIELab renk uzaylarından elde edilen maskeler birleştirilerek tek bir çilek maskesi oluşturulmuştur.

5.6 HSV Tabanlı Segmentasyon

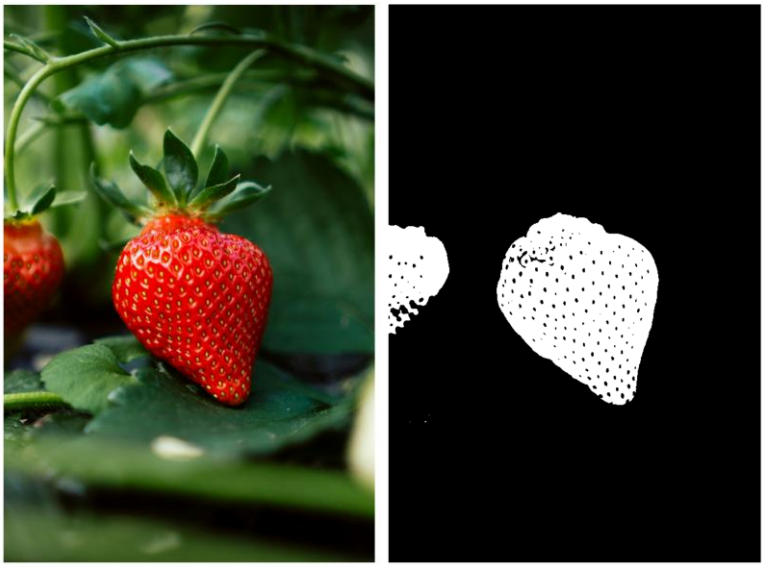
HSV tabanlı segmentasyon, çileğin kırmızı renk karakteristiğini belirlemek için kullanılmıştır. HSV renk uzayında Hue bileşeni renk tonunu, Saturation bileşeni rengin doygunluğunu ve Value bileşeni parlaklığı ifade eder. Bu üç bileşen birlikte kullanıldığında çilek bölgesi arka plandan daha kararlı şekilde ayrılabilir [6], [13].

Çilek tespitinde Hue bileşeni kırmızı renk aralığını belirlemek için kullanılır. Ancak kırmızı renk HSV uzayında dairesel Hue ekseni nedeniyle iki farklı aralıkta bulunabilir. Kırmızı renk için yalnızca tek bir Hue aralığı kullanmak bazı çilek piksellerinin maskenin dışında kalmasına

neden olabilir. Çilek renginin HSV uzayında değerlendirilmesinde Hue bileşeni kırmızı tonların belirlenmesi açısından kullanılabilmektedir [6], [13]. Kırmızının Hue eksenindeki düşük ve yüksek aralıkları birlikte değerlendirilerek daha geniş bir kırmızı bölgenin yakalanması amaçlanmıştır.

Saturation bileşeni, rengin doygunluğunu gösterir. Düşük doygunluk değerine sahip arka plan bölgeleri, gölgeler veya açık renkli alanlar bu bileşen yardımıyla azaltılabilir. Value bileşeni ise parlaklık bilgisini taşır. Çok karanlık veya çok düşük parlaklığa sahip bölgelerin maske sonucunu bozmasını önlemek için Value bileşeni de dikkate alınabilir [6], [7].

HSV tabanlı maske, çileğin ana kırmızı bölgesini belirlemek için etkili bir başlangıç sağlar. Ancak yalnızca HSV maskesi bazı durumlarda yeterli olmayabilir. Özellikle arka planda kırmızıya yakın bölgeler veya ışık değişimi varsa yanlış pikseller maskeye dahil olabilir. CIELab renk uzayı, özellikle kırmızı–yeşil yönündeki renk farklılıklarının ayrı bir bileşen üzerinden incelenmesine olanak sağlar [15], [16], [17]. HSV tabanlı maske, çilek bölgesini farklı bir renk temsiliyle kontrol etmek amacıyla CIELab tabanlı maske ile birlikte değerlendirilmiştir.



Şekil 5.4: HSV renk uzayı dönüşümü yapılmış görüntü ve maske sonucu

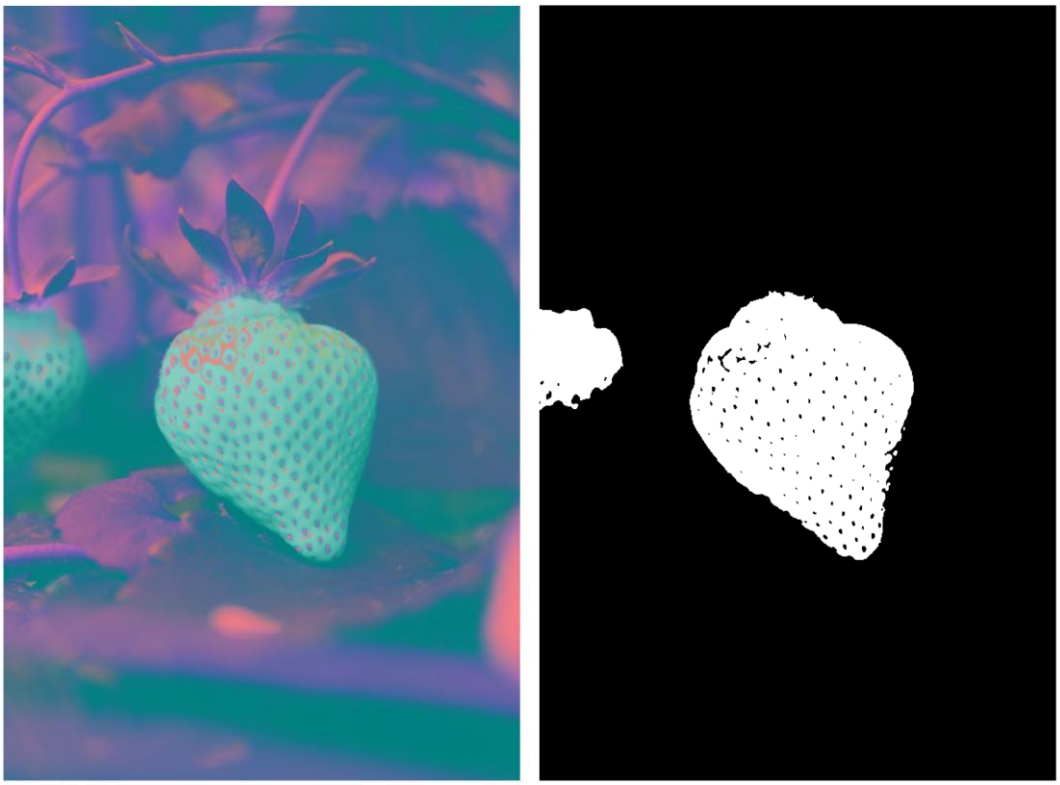
HSV renk uzayı dönüşümü sonrası elde edilen çilek meyvesinin çıktısı ve bu çıktının sonucu elde edilen maske şekil 5.4'de gösterilmiştir.

5.7 CIELab Tabanlı Segmentasyon

CIELab tabanlı segmentasyon, çileğin kırmızı rengini yeşil yaprak ve arka plan bölgelerinden ayırmak için destekleyici bir yöntem olarak kullanılmıştır. CIELab renk uzayında a* kanalı yeşil-kırmızı eksenini temsil eder. Kırmızı çilek pikselleri ile yeşil yaprak pikselleri arasında daha belirgin bir ayrım sağlanabilir [15], [16], [17].

CIELab segmentasyonunda özellikle a* kanalındaki değerler önemlidir. Kırmızı bölgeler genellikle pozitif a* değerleriyle temsil edilirken, yeşil bölgeler daha düşük veya negatif değerlere sahip olabilir. Bu durum, çilek ile yaprak arasındaki ayrımı kolaylaştırır. CIELab uzayındaki a* bileşeni kırmızı ve yeşil bölgeler arasındaki renk karşıtlığını incelemek için kullanılabilir [15], [16]. Bu özellikten yararlanılarak CIELab maskesi, HSV maskesinin ayırmakta zorlandığı bazı bölgelerde destekleyici bir ikinci renk maskesi olarak kullanılmıştır.

CIELab renk uzayının bir diğer avantajı, renk farklarını RGB'ye göre daha anlamlı şekilde temsil edebilmesidir. RGB kanal değerleri ışık değişimlerinden doğrudan etkilenirken, CIELab renk uzayı bazı durumlarda renk ayrımını daha kararlı hale getirebilir. Farklı renk temsilleri, meyve görüntüsündeki renk özelliklerinin tek bir kanal yapısına bağlı kalmadan incelenmesini sağlar [6], [15], [17]. CIELab dönüşümü, HSV tabanlı segmentasyonu destekleyen ikinci bir renk uzayı yaklaşımı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 5.5: CIELab renk uzayı dönüşümü yapılmış görüntü ve maske sonucu

CIELab renk uzayı dönüşümü sonrası elde edilen çilek meyvesinin çıktısı ve bu çıktının sonucu elde edilen maske şekil 5.5'de gösterilmiştir.

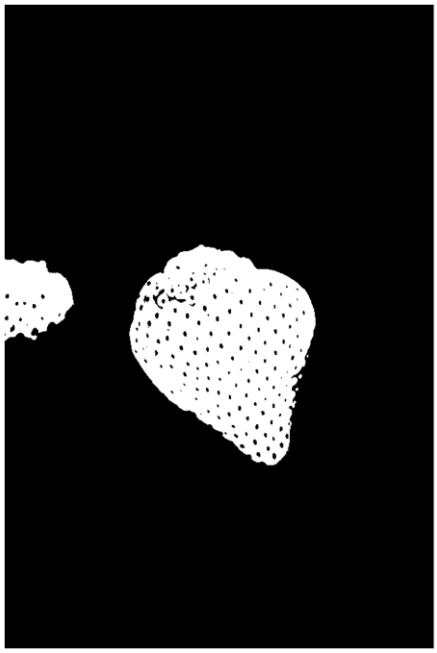
5.8 HSV ve CIELab Maskelerinin Birleştirilmesi

HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon işlemlerinden sonra iki ayrı maske elde edilir. HSV maskesi çileğin kırmızı renk tonlarını yakalamaya odaklanırken, CIELab maskesi kırmızı-yeşil ayrımını destekler. Çileğin renk yapısı HSV bileşenleri ve CIELab uzayındaki renk karşıtlığı üzerinden farklı biçimlerde değerlendirilebilmektedir [6], [15], [16]. İki maskenin birlikte kullanılmasıyla Şekil 5.6'da gösterilen daha bütünlüklü çilek bölgesinin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Maskelerin birleştirilmesindeki amaç, tek bir renk uzayına bağlı kalmanın oluşturabileceği hataları azaltmaktır. HSV maskesi bazı ışık koşullarında çileğin ana kırmızı bölgesini iyi yakalayabilir; ancak arka plandaki benzer renkleri de içerebilir. CIELab maskesi ise yeşil yaprak

bölgelerini ayırmada daha destekleyici olabilir. CIELab ve dijital renk görüntüleme yaklaşımları, renk bilgisinin farklı bileşenler üzerinden ayrıştırılmasına olanak sağlamaktadır [15], [16], [17]. HSV ve CIELab maskeleri mantıksal olarak birleştirilmiş ve iki renk uzayından gelen bilgilerin aynı çilek maskesinde toplanması hedeflenmiştir.

Birleştirme işlemi sonrasında elde edilen maske, çilek bölgesini temsil eden daha güçlü bir ikili görüntü oluşturur. Ancak bu maske hâlâ küçük gürültüler, boşluklar veya kopuk bölgeler içerebilir. Birleştirilmiş maske doğrudan feature extraction aşamasına gönderilmez. Segmentasyonla elde edilen ikili maskenin doğrudan ölçüme alınması yerine, maske yapısının düzenlenmesi ve ardından bölge özelliklerinin çıkarılması daha kontrollü bir işlem akışı oluşturur [22], [25]. Birleştirilmiş maske, özellik çıkarımı öncesinde morfolojik işlemlerle temizlenmiştir.



Şekil 5.6: HSV ve CIELab birleşimi sonucu elde edilen maske

5.9 Morfolojik İşlemler

Morfolojik işlemler, segmentasyon sonucunda elde edilen ikili maskenin düzenlenmesi için kullanılır. Renk tabanlı segmentasyon sonrasında maskede küçük gürültü bölgeleri, boşluklar,

kopuk parçalar veya arka plana ait yanlış pikseller bulunabilir. Bu hatalar doğrudan özellik çıkarımı sonuçlarını etkiler. İkili görüntülerde eşikleme sonrasında oluşan küçük bölgeler ve boşluklar, morfolojik işlemlerle düzenlenebilir; ardından bağlı bölgelere ait geometrik özellikler çıkarılabilir [22], [24], [25]. Bu aşama, çilek maskesinin daha bütünlüklü ve ölçülebilir hale getirilmesi için kullanılmıştır.

En temel morfolojik işlemler erozyon ve genişlemedir. Erozyon işlemi nesne sınırlarını daraltarak küçük gürültü bölgelerinin temizlenmesine yardımcı olabilir. Genişleme işlemi ise kopuk bölgeleri birleştirebilir ve nesne içindeki küçük boşlukları azaltabilir. Morfolojik işlemler, segmentasyon maskesindeki küçük yapısal bozuklukların giderilmesinde kullanılan temel araçlardandır [22]. Morfolojik düzenleme sonrasında bağlı bölgelere ait geometrik özellikler ayrıca incelenebilir [25]. Açma işlemi küçük nesne ve çıkıntıların azaltılmasına, kapama işlemi ise küçük boşluk ve kopuklukların giderilmesine yardımcı olabilir.

Morfolojik işlemler ile segmentasyon maskesindeki küçük gürültülerin temizlenmesi, çilek bölgesindeki boşlukların doldurulması ve daha düzgün bir bağlı bölge elde edilmesi hedeflenmiştir. Segmentasyon ve morfolojik düzenleme sonrasında bağlı bölgelerin alan gibi geometrik özellikleri incelenebilir [22], [25]. Çok küçük alanlı bölgeler maske dışına çıkarılarak çilek dışındaki küçük yanlış tespitlerin azaltılması amaçlanmıştır.

Morfolojik işlemler dikkatli uygulanmalıdır. Fazla erozyon çileğin gerçek alanını küçültebilir. Fazla genişleme ise arka plan bölgelerinin çilek maskesine katılmasına neden olabilir. Kullanılan yapılandırma elemanının boyutu ve şekli görüntüye göre seçilmelidir. Segmentasyonla ayrılan bölgenin geometrik olarak ölçülebilmesi için maskenin düzenli ve bağlı bir yapı göstermesi önemlidir [19], [22], [25]. Morfolojik işlemler, çilek maskesini özellik çıkarımı aşamasına hazırlayan destekleyici bir adım olarak kullanılmıştır. Şekil 5.7 ise morfolojik işlem uygulandıktan sonra elde edilen maskeyi göstermektedir.



Şekil 5.7: Morfolojik işlemlerden sonra maske

5.10 Çilek Bölgesinin Çıkarılması

Morfolojik işlemlerden sonra elde edilen temiz maske şekil 5.8'de gösterildiği gibi, çilek bölgesinin görüntüden çıkarılması için kullanılır. Bu aşamada amaç, yalnızca çileğe ait pikselleri korumak ve arka planı analiz dışına almaktır. Böylece renk analizi, boyut hesabı ve merkez noktası hesapları yalnızca çilek bölgesi üzerinden yapılabilir [22], [25].

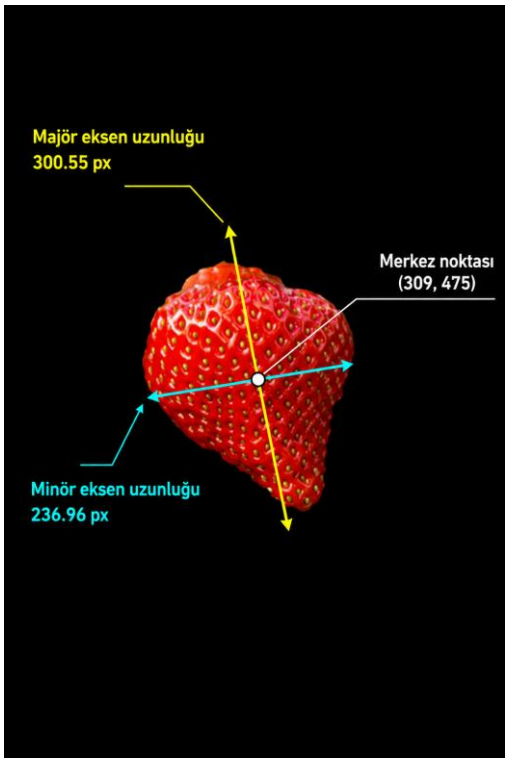
Çilek bölgesinin çıkarılması, robotik sistem açısından önemli bir adımdır. Çünkü robot kolun hedef bilgisi ve gripper açıklığı, bu maskeden elde edilen sayısal değerlere bağlıdır. Eğer maske arka plan piksellerini içerirse, merkez noktası kayabilir ve boyut olduğundan büyük hesaplanabilir. Robotik hasat sisteminde hedefe yönelme, görüntü üzerinden elde edilen konum bilgisinin doğru belirlenmesine bağlıdır [4], [20]. Çilek bölgesinin bir kısmının maskede eksik kalmasının bölge geometrisini değiştireceği ve buna bağlı olarak boyut ile centroid hesaplarında sapma oluşturabileceği dikkate alınmıştır.

Çilek bölgesinin doğru çıkarılması, yalnızca görüntüde iyi görünen bir sonuç elde etmek için değil, robotik hasat sistemine doğru veri sağlamak için gereklidir. Temiz maske elde edildikten

sonra çileğe ait bağlı bölge seçilir ve feature extraction işlemi uygulanır. Segmentasyon sonrasında görüntüde birden fazla bağlı bölge oluşabilir ve bu bölgeler geometrik özelliklerine göre ayrı ayrı incelenebilir [22], [25]. Alan ve çilek karakteristiği dikkate alınarak ana çilek bölgesi seçilmiştir.

5.11 Özellik Çıkarımı

Özellik çıkarımı şekil 5.8'de gösterildiği gibi, segmentasyon sonucunda elde edilen çilek bölgesinden sayısal bilgilerin hesaplanmasıdır. Robotik sistem açısından bu adım oldukça önemlidir. Çünkü robot kol görüntüyü doğrudan yorumlamaz; ona gönderilen merkez, boyut, mesafe veya hedef noktası gibi sayısal bilgileri kullanır. Robotik sistemin görüntüyü doğrudan yorumlaması yerine, tespit edilen bölgeden sayısal özelliklerin çıkarılması gerekir [4], [20]. Bu nedenle segmentasyon sonrası çilek bölgesi alan, centroid, bounding box ve eksen uzunlukları gibi ölçülebilir özelliklere dönüştürülmüştür.



Şekil 5.8: Özellik çıkarımı yapılan görüntü

Bu tezde özellik çıkarımı iki ana grupta ele alınmaktadır: renk özellikleri ve geometrik özellikler. Renk özellikleri çileğin olgunluk durumunun değerlendirilmesi için kullanılırken, geometrik özellikler boyut ve konum hesabı için kullanılmaktadır. Geometrik özellikler arasında alan, çevre, merkez noktası, bounding box, major eksen uzunluğu ve minor eksen uzunluğu yer almaktadır [19], [22], [25].

MATLAB ortamında bu tür özellikler regionprops fonksiyonu ile hesaplanabilir. Bu fonksiyon, ikili maske üzerinde belirlenen bağlı bölgelere ait geometrik özellikleri verir. Böylece segmentasyon sonucunda elde edilen çilek bölgesi, sayısal verilere dönüştürülür [19], [25].

5.11.1 Renk özellikleri

Renk özellikleri, çileğin olgunluk seviyesi hakkında bilgi verir. Çilek bölgesine ait RGB, HSV veya CIELab değerleri üzerinden ortalama renk, kırmızı kanal baskınlığı, Hue aralığı, Saturation değeri veya CIELab a* değeri hesaplanabilir. Meyve olgunluğunun görüntü tabanlı renk analiziyle değerlendirilebildiği birçok çalışmada gösterilmiştir [6], [7], [13].

Renk analizi yapılırken yalnızca çilek maskesi içinde kalan pikseller kullanılmalıdır. Eğer arka plan pikselleri analize dahil edilirse hesaplanan renk değerleri gerçek çilek rengini temsil etmez. Olgunluk değerlendirmesinde meyveye ait renk özellikleri hedef bölgedeki pikseller üzerinden incelenirken, bu hedef bölgenin geometrik sınırları segmentasyon maskesi üzerinden tanımlanabilir [6], [13], [25]. Bu nedenle analiz edilen piksel kümesinin çilek bölgesini doğru temsil etmesi önemlidir.

5.11.2 Geometrik özellikler

Geometrik özellikler, çileğin görüntü üzerindeki şekil ve boyut bilgisini temsil eder. Segmentasyon sonrasında elde edilen çilek bölgesi üzerinden alan, çevre, merkez noktası, bounding box, major eksen ve minor eksen uzunlukları hesaplanabilir [19], [22], [25].

Bu özellikler robotik sistem açısından doğrudan önemlidir. Merkez noktası robot kolun hedefe yönelmesi için temel referans noktasıdır. Major ve minor eksen uzunlukları çileğin yaklaşık boyutunu gösterir ve gripper açıklığının belirlenmesine yardımcı olabilir. Bounding box ise

çileğin görüntü üzerinde kapladığı bölgeyi gösterir. Geometrik özellik çıkarımı, görüntü işleme ile robotik tasarım arasındaki önemli bağlantılardan biridir [4], [20].

5.11.3 Alan hesabı

Alan, çilek bölgesine ait toplam piksel sayısını ifade eder. İkili maskede çileğe ait pikseller 1, arka plan pikselleri 0 olarak kabul edildiğinde alan, maskede 1 değerine sahip piksellerin toplamı olarak hesaplanabilir. Alan bilgisi, çileğin görüntü üzerinde kapladığı bölgenin büyüklüğünü gösterir [22], [25].

Ancak piksel cinsinden alan doğrudan gerçek fiziksel alan anlamına gelmez. Gerçek boyut hesabı için piksel-gerçek dünya dönüşümü veya ölçek katsayısı gerekir. Yine de alan bilgisi, farklı filtrelerin segmentasyon sonucu üzerindeki etkisini karşılaştırmak için faydalıdır. Bağlı bölge analizi sırasında alan değeri, segmentasyonla elde edilen maskenin kapladığı piksel miktarını sayısal olarak gösterir [19], [25]. Filtreleme veya eşikleme değiştiğinde alan değerinde oluşan değişim, segmentasyon sonucunun kararlılığını izlemek için kullanılmıştır.

5.11.4 Çevre hesabı

Çevre, çilek bölgesinin sınır uzunluğunu temsil eder. Segmentasyon maskesindeki çilek bölgesinin dış sınırı üzerinden hesaplanır. Çevre bilgisi, çileğin şekil yapısını ve sınır düzgünlüğünü değerlendirmek için kullanılabilir [22], [25].

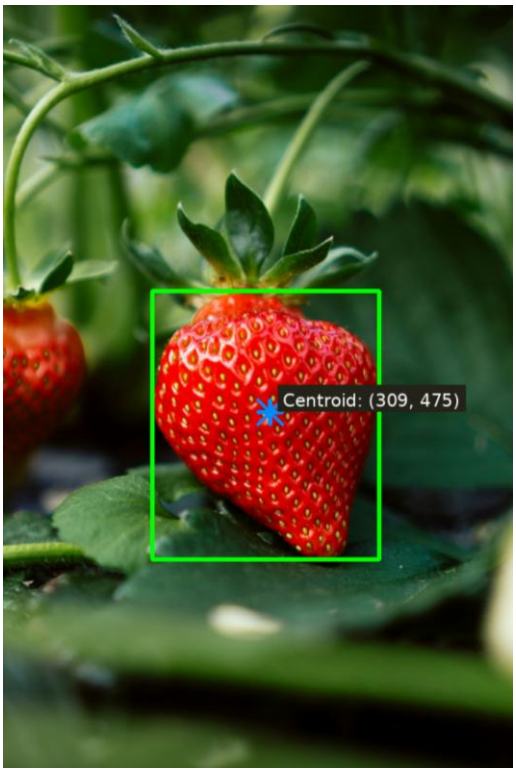
Çevre hesabı filtreleme işleminden etkilenebilir. Fazla yumuşatma uygulanırsa çileğin sınırları daha düz veya bulanık hale gelebilir. Kenar tabanlı filtreler ise bazı durumlarda sınırı belirginleştirebilir, fakat gürültüyü de artırabilir. Çevre değeri, filtrelerin çilek sınırı üzerindeki etkisini görmek için kullanılabilir [9], [10], [22].

5.11.5 Merkez noktası hesabı

Merkez noktası, çilek bölgesinin görüntü üzerindeki centroid değeridir. Bu değer, robotik hasat sistemi açısından en önemli görüntü işleme çıktılarından biridir. Çünkü robot kolun çileğe yönelmesi için temel hedef noktası olarak kullanılabilir [4], [20].

Centroid değeri şekil 5.9'de gösterildiği gibi, çilek maskesindeki piksellerin geometrik merkezini temsil eder. Eğer segmentasyon maskesi doğruysa, centroid değeri çileğin görüntü üzerindeki merkezine yakın olur. Ancak maske hatalıysa centroid değeri gerçek merkezden sapabilir. Örneğin maskeye arka plan pikselleri dahil edilirse merkez noktası o yöne kayabilir. Çileğin bir kısmı maskede eksik kalırsa merkez noktası diğer tarafa kayabilir [19], [25].

Merkez noktası hesabı hem görüntü işleme hem de robotik sistem açısından kritik bir değerlendirme kriteridir. Görüntüden çıkarılan merkez ve geometrik bölge bilgileri, robotik sistemlerde hedef konumun değerlendirilmesine temel oluşturabilir [4], [19], [20]. Tezde farklı filtrelerin centroid üzerindeki etkisi karşılaştırılarak robotik hedef bilgisi açısından daha kararlı sonucu veren yaklaşım incelenmiştir.



Şekil 5.9: Çilek meyvesinin merkez noktası

5.11.6 Major ve minor eksen uzunlukları

Major eksen uzunluğu, çilek bölgesinin en uzun yönünü temsil eder. Minor eksen uzunluğu ise buna dik olan daha kısa yönü ifade eder. Bu iki değer, çileğin görüntü üzerindeki yaklaşık boyutunu değerlendirmek için kullanılır [19], [25]. Ayrıca şekil 5.8'de de çıkarılmış majör ve minör eksen uzunlukları görülmektedir.

Çilek tam olarak dairesel bir meyve değildir. Yalnızca tek bir çap değeri kullanmak her zaman yeterli olmayabilir. Major ve minor eksen uzunlukları birlikte değerlendirildiğinde çileğin görüntü üzerindeki genel formu daha iyi anlaşılabilir. Bölge tabanlı görüntü analizinde majör ve minör eksen uzunlukları, tespit edilen nesnenin genel geometrisini tanımlamak için kullanılabilir [19], [25]. Bu değerler gerçek ölçülerle karşılaştırılarak görüntü işleme sisteminin boyut tahmin başarısı değerlendirilmiştir.

Robotik sistem açısından major ve minor eksen bilgileri gripper açıklığı için önemlidir. Gripper, çileğin yaklaşık genişliğine göre açılıp kapanmalıdır. Eğer boyut bilgisi hatalı olursa gripper meyveye fazla kuvvet uygulayabilir veya yeterli kavrama sağlayamayabilir. Görüntüden elde edilen geometrik boyut bilgisinin robotik sistemlerde kullanılabilir bir çıktıya dönüştürülmesi önemlidir [4], [20]. Major ve minor eksen uzunlukları gripper açıklığı ile ilişkilendirilmiştir.

5.11.7 Bounding box hesabı

Bounding box, çilek bölgesini içine alan en küçük dikdörtgen alanı ifade eder. Bu kutu, çileğin görüntü üzerinde kapladığı bölgeyi yaklaşık olarak gösterir. Bounding box değeri genellikle x-y başlangıç koordinatı, genişlik ve yükseklik bilgilerini içerir [19], [25].

Bounding box, görüntü üzerinde çileğin yerini görselleştirmek için kullanılabilir. Aynı zamanda robotik sistem açısından hedef bölgenin sınırlarını belirlemek için de faydalıdır. Centroid ve bounding box gibi bölge özellikleri, tespit edilen nesnenin görüntü üzerindeki konumunu ve kapladığı alanı birlikte göstermeye yardımcı olur [4], [20], [25]. Bu iki bilgi birlikte kullanıldığında çileğin görüntüdeki genel yerleşimi daha açık biçimde izlenebilir.

5.12 Olgunluk Değerlendirmesi

Olgunluk değerlendirmesi, çileğin hasat için uygun olup olmadığını belirlemek amacıyla yapılır. Çilek meyvesinde olgunluk seviyesi büyük ölçüde renk değişimiyle ilişkilidir. Olgunlaşmamış çileklerde yeşil veya açık renkli bölgeler daha belirginken, olgun çileklerde kırmızı renk baskın hale gelir. Renk bilgisi, olgunluk değerlendirmesi için önemli bir göstergedir [6], [7], [13].

Bu tezde olgunluk değerlendirmesi, segmentasyon sonucunda elde edilen çilek bölgesi üzerinden yapılmaktadır. Bütün görüntünün renk ortalaması yerine yalnızca çilek maskesi içinde kalan piksellerin renk değerleri dikkate alınır. Çilek olgunluğunun renk üzerinden değerlendirilmesi meyveye ait piksellerin analizine dayanırken, hedef bölgenin sınırları segmentasyon ve bölge ölçümü adımlarıyla belirlenir [6], [13], [25]. Renk ortalamaları yalnızca çilek maskesi içinde kalan pikseller üzerinden hesaplanmıştır.

RGB uzayında kırmızı kanalın diğer kanallara oranı, HSV uzayında Hue ve Saturation değerleri, CIELab uzayında ise a* kanalı olgunluk değerlendirmesi için kullanılabilir. Olgun çileklerde kırmızı renk daha baskın ve doygun olduğu için bu değerler hasat uygunluğu hakkında bilgi verebilir [6], [7], [13].

Çileğin olgunlaşma sürecinde yeşil ve açık renkli yüzey bölgelerinin azalarak kırmızı rengin baskın hale gelmesi, renk bilgisinin olgunluk değerlendirmesinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır [6], [7], [13]. Bu tez kapsamında segmentasyon maskesi içerisinde kalan kırmızı piksellerin toplam çilek alanına oranı hesaplanmış; kırmızı bölge oranı %50'nin altında olan örnekler olgunlaşmamış, %50–79 arasında olan örnekler yarı olgun ve %80 ve üzerinde olan örnekler olgun olarak sınıflandırılmıştır.

Ancak olgunluk değerlendirmesi yalnızca renk değerine bağlı basit bir karar olarak düşünülmemelidir. Işık koşulları, gölge, parlama ve segmentasyon kalitesi renk analizini etkileyebilir. Olgunluk değerlendirmesi, filtreleme ve segmentasyon sonucuyla birlikte ele alınmalıdır. Çilekte renk ve olgunluk analizi meyve bölgesine ait pikseller üzerinden yürütülür; geometrik bölge ölçümü de doğru ayrılmış bir maskeye dayanır [6], [13], [25]. Bu nedenle

segmentasyon hatasıyla arka plan piksellerinin analize katılması, elde edilen renk değerini ve buna bağlı olgunluk yorumunu değiştirebilir.

Robotik hasat sistemi açısından olgunluk bilgisi, toplama kararının temel parametrelerinden biridir. Eğer çilek olgun kabul edilirse robot kol hedefe yönelir ve gripper kavrama işlemini gerçekleştirir. Eğer çilek olgun değilse sistem bu meyveyi toplamama kararı verebilir. Robotik hasatta görüntüden elde edilen karar bilgilerinin fiziksel toplama sürecine aktarılması sistemin temel aşamalarından biridir [4], [20]. Olgunluk bilgisi, çileğin hedef olarak seçilip seçilmeyeceğini belirleyen karar girdilerinden biri olarak değerlendirilmiştir.

Bu bölümde açıklanan görüntü işleme yaklaşımı, çileğin görüntü üzerinde tespit edilmesiyle başlayan ve robotik sistem için kullanılabilir sayısal bilgilerin üretilmesiyle devam eden bütünleşik bir yapıdır. Filtreleme, segmentasyon, morfolojik işlemler ve özellik çıkarımı adımları birlikte kullanılarak çileğin merkezi, boyutu ve olgunluk durumu hesaplanmaktadır. Bu bilgiler, sonraki bölümlerde robotik çilek toplama sistemiyle ilişkilendirilecektir.

Bölümde tanımlanan renk tabanlı olgunluk değerlendirme yaklaşımının farklı olgunluk seviyelerine sahip birden fazla çilek üzerindeki uygulanabilirliğini göstermek amacıyla ek bir görüntü çalışması gerçekleştirilmiştir. Aynı görüntü içerisinde bulunan olgun, yarı olgun ve olgunlaşmamış çileklerin birlikte değerlendirildiği bu uygulama EK C'de sunulmuştur.

6. FİLTRELEME VE ÖNERİLEN 5×5 FİLTRE MODELİ

Görüntü işleme tabanlı çilek tespitinde filtreleme aşaması, segmentasyon ve özellik çıkarımı sonuçlarını doğrudan etkileyen temel işlem adımlarından biridir. Kamera ile alınan ham görüntü çoğu zaman doğrudan analiz için uygun değildir. Görüntü üzerinde sensör kaynaklı küçük gürültüler, ışık değişimleri, gölgeler, yüzey yansımaları, yaprak bölgeleri ve arka plan karmaşıklığı bulunabilir. Bu etkiler çileğin arka plandan ayrılmasını zorlaştırır ve daha sonra hesaplanacak alan, merkez noktası, major eksen ve minor eksen değerlerinde hataya neden olabilir [22], [23].

Robotik çilek toplama sistemi açısından filtreleme yalnızca görüntüyü daha düzgün göstermek için yapılan bir işlem değildir. Filtreleme sonucunda elde edilen görüntü, segmentasyon maskesini; segmentasyon maskesi ise çileğin merkez noktası ve boyut bilgisini belirler. Filtreleme aşamasında oluşan küçük bir hata, robot kolun hedef noktasına ve gripper açıklığına kadar yansıyabilir. Robotik hasat sisteminde algılama hatası hedef konumun ve kavrama sürecinin değerlendirilmesini etkileyebilir [4], [5], [20]. Filtreleme de segmentasyon ve özellik çıkarımı sonuçlarını değiştirebildiği için filtre aşamasının sistem çıktısına etkisi ayrıca incelenmiştir.

Bu tezde filtreleme aşaması, klasik görüntü işleme filtrelerinin doğrudan uygulanması şeklinde bırakılmamıştır. Bunun yerine farklı filtrelerin aynı görüntü işleme zinciri içinde çilek segmentasyonu, renk bilgisinin korunması, sınır kararlılığı, merkez noktası hesabı ve boyut tahmini üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Görüntü filtreleri yumuşatma, gürültü azaltma, kenar belirleme ve görüntü iyileştirme gibi farklı amaçlarla kullanılabilmektedir [8], [9], [10], [22], [23]. Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, Unsharp ve özel 5×5 filtre maskeleri aynı görüntü işleme zinciri içinde karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde önce klasik filtrelerin matematiksel temeli açıklanmakta, ardından çalışmada karşılaştırılan filtreler ayrı ayrı ele alınmaktadır. Daha sonra 3×3, 5×5 ve 7×7 maske boyutlarının genel etkisi tartışılmakta ve önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre modeli açıklanmaktadır. Son olarak önerilen filtrenin segmentasyon, boyut hesabı ve robotik hedef bilgisi üzerindeki etkisi değerlendirilmektedir.

6.1 Filtreleme Aşamasının Önemi

Filtreleme, görüntüdeki istenmeyen değişimleri azaltmak ve sonraki analiz adımları için daha kararlı bir görüntü elde etmek amacıyla uygulanır. Tarımsal görüntülerde bu adım daha da önemlidir. Çünkü doğal ortam görüntülerinde ışık koşulları sabit değildir, yapraklar meyveyi kısmen kapatabilir, arka plan renkleri meyve rengine yaklaşabilir ve kamera kaynaklı gürültüler oluşabilir [18], [20].

Çilek tespitinde filtreleme işlemi, renk tabanlı segmentasyondan önce uygulanarak maske kalitesini etkiler. Uygun bir filtre, küçük gürültüleri azaltabilir ve çilek bölgesinin daha bütünlüklü ayrılmasına yardımcı olabilir. Ancak uygun olmayan bir filtre, çileğin sınırlarını fazla yumuşatabilir, renk bilgisini bozabilir veya segmentasyon sırasında çileğin bazı bölgelerinin kaybolmasına neden olabilir [8], [22], [23].

Filtreleme aşamasında temel amaç, yalnızca gürültüyü azaltmak değildir. Aynı zamanda çileğin renk bilgisini, sınır yapısını ve geometrik özelliklerini mümkün olduğunca korumak gerekir. Robotik hasat açısından en önemli nokta, segmentasyon sonrasında elde edilen merkez ve boyut bilgilerinin kararlı olmasıdır. Çünkü centroid değeri robot kolun hedef noktası olarak kullanılabilir, major ve minor eksen uzunlukları ise gripper açıklığı ile ilişkilendirilebilir [4], [20].

Bu tezde farklı filtreler aynı görüntü üzerinde test edilerek her filtrenin son ölçüm değerlerine etkisi incelenmiştir. Böylece filtreleme aşaması yalnızca görsel bir iyileştirme adımı değil, çilek tespiti ve robotik hedef bilgisi üretimi üzerinde etkili olan matematiksel bir işlem olarak değerlendirilmiştir.

6.2 Klasik Filtrelerin Matematiksel Modelleri

Görüntü filtreleri, bir pikselin yeni değerini yalnızca kendi mevcut değerine göre değil, çevresindeki komşu piksellerin değerlerine göre de hesaplayan matematiksel işlemlerdir. Bu yapı, görüntüdeki küçük gürültüleri azaltmak, sınır geçişlerini düzenlemek veya belirli görüntü özelliklerini öne çıkarmak için kullanılır. Çilek görüntülerinde filtreleme işlemi, segmentasyon öncesinde görüntüyü daha kararlı hale getirmek açısından önemlidir [8], [22].

Lineer filtreleme işlemi genel olarak konvolüsyon temelli ifade edilir. Giriş görüntüsü $f(x,y)$, filtre maskesi $w(i,j)$ile işlenerek çıkış görüntüsü $g(x,y)$elde edilir.

$$g(x,y) = \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} w(i,j) f(x+i, y+j) \tag{6.1}$$

Bu denklemde (18), $f(x,y)$orijinal giriş görüntüsünü, $g(x,y)$filtreleme sonrası elde edilen çıkış görüntüsünü temsil eder. $w(i,j)$filtre maskesindeki ağırlık katsayısıdır. $i$ve $j$değerleri ise merkez pikselin çevresindeki komşu piksel konumlarını gösterir.

Filtreleme penceresinin boyutu, merkez pikselin etrafında kaç komşu pikselin hesaba katılacağını belirler. Genel pencere boyutu şu şekilde tanımlanır:

$$m = 2a + 1 \tag{6.2}$$

$$n = 2b + 1 \tag{6.3}$$

Burada (19) m filtreleme penceresinin satır sayısını, n ise sütun sayısını ifade eder. Örneğin $a = 2$ ve $b = 2$ seçildiğinde 5×5 boyutunda bir filtreleme penceresi elde edilir.

Filtre maskesindeki ağırlık katsayılarının toplam etkisi görüntünün genel parlaklık seviyesini değiştirebilir. Bu yüzden birçok filtreleme işleminde maske katsayıları normalize edilir. Normalize edilmiş filtreleme işlemi denklem 6.4 şeklinde yazılabilir:

$$g(x,y) = \frac{1}{K} \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} w(i,j) f(x+i, y+j) \tag{6.4}$$

Denklem 6.5 eşitliğindeki K, filtre maskesindeki tüm katsayıların toplamıdır.

$$K = \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} w(i,j) \tag{6.5}$$

Normalizasyon işlemi, filtreleme sonrasında görüntünün gereğinden fazla parlak veya koyu hale gelmesini önler. Bu durum özellikle HSV ve CIELab tabanlı renk eşikleme için önemlidir. Eşikleme işlemi görüntüdeki yoğunluk ve renk dağılımından etkilendiği için giriş görüntüsündeki değişimler farklı ikili maskelerin oluşmasına neden olabilir [22], [24]. Elde edilen ikili maskeden bölge özellikleri daha sonra çıkarılabilir [25]. Sabit eşiklerin kullanıldığı işlem akışında parlaklık ve yoğunluk değişimleri ayrıca dikkate alınmıştır.

Filtre maskesindeki katsayıların dağılımı, filtrenin görüntü üzerindeki etkisini belirler. Tüm katsayılar eşit seçildiğinde ortalama alma etkisi oluşur. Merkez piksele yakın katsayılar daha yüksek seçildiğinde, merkez bilgisi daha fazla korunur ve daha kontrollü bir yumuşatma elde edilir. Kenar tespit filtrelerinde ise katsayılar, görüntüdeki yatay veya dikey yoğunluk değişimlerini ortaya çıkaracak şekilde düzenlenir [8], [9], [22].

Bu genel matematiksel yapı, Mean, Gaussian, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian ve özel 5×5 filtreler için temel açıklama sağlar. Median filtre ise doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir ve komşuluk penceresindeki piksel değerlerinin ağırlıklı toplamını almak yerine medyan değerini kullanır. Bu fark, median filtrenin izole gürültü piksellerine karşı daha dayanıklı olmasını sağlar [19], [21], [22].

Çilek tespiti açısından filtre modelinin etkisi yalnızca görüntünün görsel görünümüyle sınırlı değildir. Filtreleme sonucunda oluşan küçük değişimler, segmentasyon maskesini, çileğin sınır yapısını, alanını, çevresini, merkez noktasını ve major/minor eksen uzunluklarını etkileyebilir. Görüntüden çıkarılan geometrik bilgiler, kamera ve robotik sistem arasındaki veri akışında hedefleme ve kavrama kararlarıyla ilişkilendirilebilir [4], [19], [20]. Centroid ile eksen

uzunlukları robotik hedef noktası ve gripper açıklığı açısından değerlendirildiğinden, filtrelerin ölçüm sonuçlarına etkisi doğrudan incelenmiştir.

6.3 Klasik Yumuşatma Filtreleri

Klasik yumuşatma filtreleri, görüntüdeki küçük gürültüleri, ani piksel değişimlerini ve yerel düzensizlikleri azaltmak için kullanılan temel ön işleme yöntemleridir. Segmentasyon öncesinde görüntünün daha kararlı hale getirilmesi, çilek bölgesinin arka plandan daha düzgün ayrılmasına yardımcı olur. Görüntüdeki gürültü, parlaklık farklılıkları ve yoğunluk geçişleri sonraki görüntü işleme adımlarının sonucunu etkileyebilir [8], [9], [22]. Çilek görüntülerinde bu değişimlerin segmentasyon maskesine etkisi tez kapsamında ayrıca incelenmiştir.

Yumuşatma işleminin genel mantığı, merkez pikselin değerini çevresindeki komşu piksellerle birlikte yeniden hesaplamaktır. Bu işlem, filtre maskesindeki ağırlık katsayılarına göre yapılır. Genel bir yumuşatma işlemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$g_s(x,y) = \frac{1}{K} \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} w_s\,(i,j) f(x+i, y+j) \tag{6.6}$$

Bu denklemde $f(x,y)$giriş görüntüsünü, $g_s(x,y)$yumuşatma işlemi sonrası elde edilen çıkış görüntüsünü ifade eder. $w_s(i,j)$, yumuşatma filtresine ait ağırlık katsayısıdır. K ise filtre katsayılarının toplamını gösteren normalizasyon katsayısıdır.

$$K = \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} w_s\,(i,j) \tag{6.7}$$

Normalizasyon katsayısı, filtreleme sonrası görüntünün genel parlaklık seviyesinin korunmasına yardımcı olur. Filtre katsayıları normalize edilmediğinde görüntü gereğinden fazla parlak veya koyu hale gelebilir. Renk tabanlı segmentasyonda kullanılan eşikler, görüntünün

renk ve parlaklık dağılımına bağlı olarak farklı maske sonuçları üretebilir [22], [24]. Elde edilen bölgelerin geometrik özellikleri daha sonraki aşamada değerlendirilebilir [25]. Bu nedenle HSV ve CIELab bileşenlerinde oluşan değişimlerin segmentasyon sonucuna etkisi göz önünde bulundurulmuştur.

Klasik yumuşatma filtreleri içinde Mean, Gaussian, Median ve Wiener filtreleri öne çıkmaktadır. Mean filter tüm komşu piksellere eşit ağırlık verir. Gaussian filter merkez piksele yakın olan değerlere daha fazla ağırlık atar. Median filter komşuluk içindeki piksel değerlerinin ortalamasını almak yerine medyan değeri kullanır. Wiener filter ise yerel ortalama ve yerel varyans bilgisinden yararlanarak daha uyarlamalı bir gürültü azaltma davranışı gösterir [10], [21], [22].

Yumuşatma filtrelerinin ortak amacı görüntüyü daha düzenli hale getirmek olsa da, her filtre çilek görüntüsü üzerinde farklı sonuç oluşturur. Bazı filtreler gürültüyü başarılı şekilde azaltırken çileğin sınırlarını bulanıklaştırabilir. Bazıları ise sınır bilgisini daha iyi koruyabilir; fakat belirli gürültü tiplerine karşı daha sınırlı kalabilir. Filtrelerin görüntü üzerindeki etkisi yalnızca görsel yumuşama üzerinden değil, bölgeden çıkarılan sayısal özelliklerde oluşturduğu değişim üzerinden de incelenebilir [8], [9], [19]. Filtre başarısı, segmentasyon sonrası elde edilen alan, centroid ve eksen uzunlukları birlikte değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

Çilek tespitinde yumuşatma filtresinin etkisi doğrudan maske kalitesine yansır. Maske değiştiğinde alan, çevre, merkez noktası, 78inör eksen ve 78inör eksen değerleri de değişebilir. Robotik hasat açısından bu değerler yalnızca görüntü işleme çıktısı değildir; robot kolun hedef noktası ve gripper açıklığı için temel veri olarak kullanılabilir. Görüntüden çıkarılan geometrik bilgilerin sonraki robotik süreçlerde kullanılabilmesi, bölge analizinin kararlılığını önemli hale getirmektedir [4], [19], [20]. Yumuşatma filtrelerinin ölçüm sonuçları üzerindeki etkisi bu nedenle ayrıca değerlendirilmiştir.

Aşırı yumuşatma, çilek ile arka plan arasındaki geçişi zayıflatabilir. Bu durumda çileğin gerçek sınırı maskede tam olarak korunamayabilir. Yetersiz yumuşatma ise gürültünün maskeye

taşınmasına neden olabilir. En uygun filtreleme yaklaşımı, küçük gürültüleri azaltırken çileğin sınırını, renk bilgisini ve merkez noktasını koruyabilen dengeli yapı olmalıdır.

6.3.1 Mean filter / ortalama filtre

Mean filter, görüntüdeki her piksel değerini çevresindeki komşu piksellerin ortalama değeriyle değiştiren temel bir yumuşatma filtresidir. Küçük piksel gürültülerini azaltabilir; ancak çilek ile arka plan arasındaki sınır geçişini de yumuşatabilir [8], [9], [22].

Mean filter işlemi genel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$g(x,y) = \frac{1}{mn} \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} f(x+i, y+j) \tag{6.8}$$

Buradaki denklemde (24) $f(x,y)$ giriş görüntüsünü, $g(x,y)$ filtrelenmiş çıkış görüntüsünü ifade eder. m ve n, filtreleme penceresinin boyutlarıdır.

$$m = 2a + 1 \tag{6.9}$$

$$n = 2b + 1 \tag{6.10}$$

5×5 mean filter için işlem denklem (26) şeklinde yazılabilir:

$$g(x,y) = \frac{1}{25} \sum_{i=-2}^{2} \sum_{j=-2}^{2} f(x + i, y + j) \tag{6.11}$$

Bu işlemde merkez pikselin etrafındaki 25 pikselin ortalaması alınır. Böylece küçük yerel değişimler azaltılır ve daha yumuşak bir görüntü elde edilir.

5×5 mean filter maskesi ise denklem (27) şu şekildedir:

$$H = \frac{1}{25}\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.12}$$

Bu maskede tüm katsayılar eşittir. Yani her komşu piksel çıkış değerine aynı oranda katkı verir. Mean filter düzgün bir yumuşatma sağlar; fakat sınır bölgelerinde bulanıklaşmaya neden olabilir.

Çilek tespitinde bu durum önemlidir. Sınır bulanıklığı segmentasyon maskesini değiştirebilir ve alan, çevre, centroid, major eksen ve minor eksen değerlerini etkileyebilir. Görüntüden çıkarılan bölge geometrisi ve merkez bilgisi, robotik sistemde hedefin değerlendirilmesi açısından önem taşır [4], [19], [20]. Mean filter temel bir karşılaştırma filtresi olarak kullanılmış; sınır ve merkez bilgisini koruma düzeyi diğer filtre sonuçlarıyla birlikte incelenmiştir. Şekil 6.1'de filtre uygulanmış ve alınmış sonuç gösterilmiştir.



Şekil 6.1: Mean filtre sonucu elde edilen görüntü

6.3.2 Gaussian filter

Gaussian filter, görüntüyü yumuşatmak için kullanılan klasik filtrelerden biridir. Mean filterdan farklı olarak tüm komşu piksellere eşit ağırlık vermez. Merkez piksele yakın olan piksellere daha yüksek, merkezden uzaklaştıkça daha düşük ağırlık verir. Daha dengeli ve doğal bir yumuşatma etkisi oluşturabilir [8], [10], [22].

Gaussian fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \tag{6.13}$$

Burada $G(x,y)$ Gaussian ağırlık değerini, σise standart sapmayı ifade eder. σ değeri arttıkça yumuşatma etkisi artar. Küçük σ değeri daha sınırlı yumuşatma oluştururken, büyük σ değeri görüntüyü daha fazla bulanıklaştırabilir.

Gaussian filtreleme işlemi genel olarak şu şekilde yazılabilir:

$$g(x,y) = \sum_{i=-a}^{a} \sum_{j=-b}^{b} G(i,j) f(x-i, y-j) \tag{6.14}$$

Bu denklemde $f(x,y)$ giriş görüntüsünü, $g(x,y)$ filtrelenmiş çıkış görüntüsünü ifade eder. $G(i,j)$, Gaussian çekirdeğindeki ağırlık katsayısıdır.

Yaklaşık 5×5 Gaussian filtre maskesi şu şekilde gösterilebilir:

$$H = \frac{1}{256}\begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 6 & 24 & 36 & 24 & 6 \\ 4 & 16 & 24 & 16 & 4 \\ 1 & 4 & 6 & 4 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.15}$$

Bu maskede merkez bölgedeki katsayılar daha yüksektir. Böylece merkez piksel ve yakın komşular çıkış değerine daha fazla katkı verirken, uzak komşuların etkisi daha düşük olur.

Çilek görüntülerinde Gaussian filter küçük gürültüleri azaltabilir ve segmentasyon öncesinde daha düzenli bir görüntü sağlayabilir. Ancak σdeğeri veya maske boyutu fazla büyük seçilirse çilek sınırı yumuşayabilir. Görüntüdeki sınır yapısında oluşan değişimler, bölgeden hesaplanan geometrik özelliklere ve bu özelliklerin robotik sistemde kullanımına yansıyabilir [4], [19], [20]. Gaussian filtrenin oluşturduğu yumuşama etkisi alan, centroid, majör eksen ve minör eksen ölçümlerindeki değişim üzerinden değerlendirilmiştir. Şekil 6.2, Gaussian filtresi sonucu elde edilen görüntüyü göstermektedir.



Şekil 6.2: Gaussian filtre sonucu elde edilen görüntü

6.3.3 Median filter / medyan filtre

Median filter, doğrusal olmayan bir yumuşatma filtresidir. Mean ve Gaussian filtrelerden farklı olarak komşu piksellerin ortalamasını almaz. Bunun yerine seçilen komşuluk penceresindeki piksel değerlerini sıralar ve ortadaki değeri merkez pikselin yeni değeri olarak kullanır. Bu yapı, özellikle tekil parlak veya koyu gürültü piksellerinin azaltılmasında etkilidir [19], [21], [22].

Median filter işlemi genel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$g(x,y) = \text{median}\,\{f(x+i, y+j) \mid (i,j) \in W\} \tag{6.16}$$

Burada $f(x,y)$ giriş görüntüsünü, $g(x,y)$ filtrelenmiş çıkış görüntüsünü ve W seçilen komşuluk penceresini ifade eder. Merkez pikselin yeni değeri, bu pencere içindeki piksel değerlerinin medyanı olarak belirlenir.

5×5 median filter penceresi şu şekilde gösterilebilir:

$$g(x,y) = \text{median} \begin{bmatrix} f(x-2,y-2) & \cdots & f(x-2,y+2) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(x+2,y-2) & \cdots & f(x+2,y+2) \end{bmatrix} \tag{6.17}$$

5×5 pencere içinde toplam 25 piksel değeri dikkate alınır. Genel formda bu işlem şu şekilde yazılabilir:

$$g(x,y) = \text{median}\,\{p_1, p_2, p_3, \dots, p_{25}\} \tag{6.18}$$

Bu denklemde $p_1, p_2, \dots, p_{25}$, 5×5 komşuluk penceresindeki piksel değerlerini ifade eder. Değerler küçükten büyüğe sıralanır ve ortadaki değer çıkış pikseli olarak seçilir.

Çilek görüntülerinde median filter, küçük izole gürültüleri azaltırken sınır bilgisini mean filtera göre daha iyi koruyabilir. Ancak pencere boyutu fazla büyütülürse çilek yüzeyindeki ince detaylar ve sınır geçişleri bozulabilir. Segmentasyon maskesinden çıkarılan centroid ve eksen uzunlukları, hedef bölgenin geometrik olarak tanımlanmasını ve robotik sistemle ilişkilendirilmesini sağlar [4], [19], [20]. Median filter, söz konusu ölçümler üzerindeki etkisi bakımından diğer filtrelerle karşılaştırılmıştır. Şekil 6.3, medyan filtre sonucu elde edilen görüntüyü göstermektedir.



Şekil 6.3: Medyan filtre sonucu elde edilen görüntü

6.3.4 Wiener filter

Wiener filter, görüntüdeki gürültüyü azaltırken yerel görüntü istatistiklerini kullanan uyarlamalı bir filtredir. Mean ve Gaussian filtrelerde sabit bir ağırlık yapısı bulunurken, Wiener filter yerel ortalama ve yerel varyans değerlerine göre işlem yapar. Homojen bölgelerde daha güçlü yumuşatma sağlayabilir, kenar veya doku içeren bölgelerde ise ayrıntıyı daha fazla koruyabilir [10], [21], [22].

Wiener filter çıkışı genel olarak şu şekilde ifade edilir:

$$g(x,y) = \mu + \frac{\sigma^2 - \nu^2}{\sigma^2}[f(x,y) - \mu] \tag{6.19}$$

Burada $g(x,y)$ filtrelenmiş çıkış görüntüsünü, $f(x,y)$ giriş görüntüsünü, μ yerel ortalamayı, σ^2 yerel varyansı ve ν^2 gürültü varyansını ifade eder.
Yerel ortalama şu şekilde hesaplanır:

$$\mu = \frac{1}{mn}\sum_{i=-a}^{a}\sum_{j=-b}^{b} f(x+i, y+j) \tag{6.20}$$

Yerel varyans ise şu şekilde yazılabilir:

$$\sigma^2 = \frac{1}{mn}\sum_{i=-a}^{a}\sum_{j=-b}^{b} [f(x+i, y+j) - \mu]^2 \tag{6.21}$$

Bu denklemlerde $m$ve n, seçilen komşuluk penceresinin boyutlarını göstermektedir. Yerel varyans küçükse bölge daha homojen kabul edilir ve daha fazla yumuşatma uygulanabilir. Yerel varyans büyükse bölgede kenar veya doku bulunabileceği için detaylar daha fazla korunur.

Çilek görüntülerinde Wiener filter, meyve yüzeyindeki gürültüyü azaltmak için faydalı olabilir. Ancak performansı görüntüdeki gürültü yapısına bağlıdır. Eğer yerel varyans dağılımı çilek sınırı ve yüzey dokusu ile uyumlu değilse, segmentasyon maskesi kararsız hale gelebilir. Alan, centroid ve eksen uzunlukları, tespit edilen çilek bölgesinin geometrik yapısını tanımlayan temel ölçümlerdir ve robotik değerlendirmeye aktarılabilir [4], [19], [20]. Wiener filter bu, söz konusu değerlerde oluşturduğu değişim açısından diğer filtrelerle birlikte incelenmiştir.

6.4 Kenar Tabanlı Filtreler

Kenar tabanlı filtreler, görüntüdeki ani yoğunluk değişimlerini belirginleştirmek için kullanılır. Çilek görüntülerinde meyve sınırı, sap bölgesi, yaprak kenarları ve gölge geçişleri bu filtrelerle daha görünür hale gelebilir. Kenar tabanlı filtreler yoğunluk geçişlerini belirginleştirmeye yönelik çalışır ve renk bileşenlerine dayalı segmentasyondan farklı bir işlem yapısına sahiptir [9], [19], [22]. Bu nedenle söz konusu filtreler, HSV ve CIELab tabanlı segmentasyonun doğrudan yerine kullanılmamıştır.

Kenar tespiti genel olarak yatay ve dikey yöndeki yoğunluk değişimlerinin hesaplanmasına dayanır:

$$G_x(x,y) = f(x,y) * H_x \tag{6.22}$$

$$G_y(x,y) = f(x,y) * H_y \tag{6.23}$$

Burada $G_x(x,y)$ yatay yöndeki gradyan cevabını, $G_y(x,y)$ dikey yöndeki gradyan cevabını ifade eder. H_x ve H_y, yatay ve dikey kenar maskeleridir. $*$ işareti konvolüsyon işlemini gösterir. Toplam kenar büyüklüğü şu şekilde hesaplanabilir:

$$G(x,y) = \sqrt{G_x^2(x,y) + G_y^2(x,y)} \tag{6.24}$$

Daha hızlı hesaplama için yaklaşık form da kullanılabilir:

$$G(x,y) \approx |\, G_x(x,y) \,| + |\, G_y(x,y) \,| \tag{6.25}$$

Kenar yönü ise şu şekilde ifade edilir:

$$\theta(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{G_y(x,y)}{G_x(x,y)}\right) \tag{6.26}$$

Bu denklemler, görüntüdeki kenar şiddetini ve kenar yönünü belirlemek için kullanılır. Çilek tespitinde kenar tabanlı filtreler sınırı görünür hale getirebilir; fakat robotik hasat için yalnızca kenar çizgisi yeterli değildir. Çileğin bütün bölgesi, merkezi ve boyut bilgisi de güvenilir şekilde çıkarılmalıdır. Kenar bilgisinin belirginleştirilmesi ile bölge tabanlı ölçüm ve robotik hedef üretimi aynı görüntü işleme zincirinin farklı aşamalarını oluşturmaktadır [4], [19], [20]. Sobel, Prewitt ve Laplacian filtreleri ana segmentasyon yöntemi olarak değil, kenar etkisini karşılaştırmak amacıyla destekleyici filtreler olarak değerlendirilmiştir.

6.4.1 Sobel filter

Sobel filter, görüntüdeki yatay ve dikey yoğunluk değişimlerini hesaplayan birinci dereceden kenar tespit filtresidir. Kenar filtreleri çilek sınırındaki yoğunluk değişimlerini belirginleştirebilir; ancak renk tabanlı segmentasyonda kullanılan renk bileşenlerini doğrudan temsil etmez [9], [19], [22]. Söz konusu filtreler HSV ve CIELab segmentasyonunun yerine değil, filtreleme sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla değerlendirilmiştir.

Sobel operatörünün yatay ve dikey maskeleri şu şekildedir:

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.27}$$

$$S_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.28}$$

Sobel gradyan cevapları şu şekilde hesaplanır:

$$I_x^S(x,y) = f(x,y) * S_x \tag{6.29}$$

$$I_y^S(x,y) = f(x,y) * S_y \tag{6.30}$$

Burada $I_x^S(x,y)$yatay yöndeki, $I_y^S(x,y)$ise dikey yöndeki Sobel cevap görüntüsünü ifade eder. Kenar büyüklüğü şu şekilde bulunur:

$$G_S(x,y) = \sqrt{\left[I_x^S(x,y)\right]^2 + \left[I_y^S(x,y)\right]^2} \tag{6.31}$$

Yaklaşık hesaplama için şu ifade de kullanılabilir:

$$G_S(x,y) \approx | I_x^S(x,y) | + | I_y^S(x,y) | \tag{6.32}$$

Kenar yönü ise şu şekilde hesaplanır:

$$\theta_S(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_y^S(x,y)}{I_x^S(x,y)}\right) \tag{6.33}$$

Sobel filter, çileğin dış sınırını belirginleştirmede faydalıdır. Ancak yalnızca kenar cevabı ürettiği için çileğin tüm bölgesini, merkezini ve boyutunu doğrudan vermez. Görüntüdeki kenar değişimlerinin ortaya çıkarılması, hedef bölgenin sınır yapısını incelemek açısından kullanılabilir; bölgeden elde edilen geometrik bilgiler ise robotik uygulamaya aktarılabilir [4], [19], [20]. Sobel filtresi bu tezde ana segmentasyon filtresi olarak değil, destekleyici ve karşılaştırmalı bir kenar filtresi olarak kullanılmıştır.

6.4.2 Prewitt filter

Prewitt filter, Sobel filtera benzer şekilde yatay ve dikey yoğunluk değişimlerini hesaplar. Sobel filtresinden farklı olarak merkez satır veya merkez sütuna ekstra ağırlık vermez. Daha basit bir kenar cevabı üretir [9], [22].

Prewitt operatörünün yatay ve dikey maskeleri şu şekildedir:

$$P_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.34}$$

(6.35)

$$P_y = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Prewitt gradyan cevapları şu şekilde hesaplanır:

$$I_x^P(x,y) = f(x,y) * P_x \tag{6.36}$$

$$I_y^P(x,y) = f(x,y) * P_y \tag{6.37}$$

Kenar büyüklüğü şu şekilde ifade edilir:

$$G_P(x,y) = \sqrt{[I_x^P(x,y)]^2 + [I_y^P(x,y)]^2} \tag{6.38}$$

Kenar yönü ise şu şekilde hesaplanır:

$$\theta_P(x,y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_y^P(x,y)}{I_x^P(x,y)}\right) \tag{6.39}$$

Prewitt filter, çilek sınırını görünür hale getirebilir. Ancak yaprak kenarları, gölge geçişleri ve arka plan detayları da kenar olarak algılanabilir. Kenar tabanlı işlemler görüntüdeki yoğunluk geçişlerini öne çıkarırken, bölge analizi ve robotik hedef üretimi için ayrıca bütünlüklü bir nesne maskesine ihtiyaç duyulur [4], [19], [20]. Prewitt filtresi tek başına çilek segmentasyonu için kullanılmamış ve Sobel filtresine benzer biçimde karşılaştırmalı bir kenar filtresi olarak değerlendirilmiştir.

6.4.3 Laplacian filter

Laplacian filter, görüntüdeki hızlı yoğunluk değişimlerini vurgulayan ikinci dereceden türev tabanlı bir filtredir. Sobel ve Prewitt filtreleri belirli yönlerdeki değişimleri hesaplarken, Laplacian filter birden fazla yöndeki değişime tepki verir [8], [9], [22].

Laplacian operatörünün sürekli formu şu şekildedir:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \tag{6.40}$$

Ayrık dört-komşuluk yaklaşımı şu şekilde yazılabilir:

$$\nabla^2 f(x,y) = f(x+1,y) + f(x-1,y) + f(x,y+1) + f(x,y-1) - 4f(x,y) \tag{6.41}$$

Dört-komşuluk Laplacian maskesi şu şekildedir:

$$H_4 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.42}$$

Sekiz-komşuluk Laplacian maskesi ise şu şekilde gösterilebilir:

$$H_8 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -8 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{6.43}$$

Laplacian filter çilek sınırını ve ince detayları belirginleştirebilir. Ancak gürültüye duyarlı olduğu için çekirdek dokusu, yaprak kenarları ve küçük arka plan detaylarını da güçlendirebilir. Kenar filtreleri görüntüdeki yoğunluk değişimlerini belirginleştirirken, bölge tabanlı analiz için nesnenin bütünlüklü biçimde ayrılması gerekir [9], [19], [22]. Laplacian filtresi ana segmentasyon filtresi yerine kenar etkisini gözlemlemek ve diğer filtrelerle karşılaştırmak amacıyla kullanılmıştır.

6.5 Keskinleştirme Filtresi

Keskinleştirme filtreleri, görüntüdeki kenarları, yerel kontrastı ve ince detayları daha belirgin hale getirmek için kullanılır. Yumuşatma filtreleri gürültüyü azaltırken bazı sınır geçişlerini zayıflatabilir. Keskinleştirme filtreleri ise bunun tersine, görüntüdeki yüksek frekanslı bileşenleri güçlendirir [8], [10], [22].

Genel olarak keskinleştirme işlemi, orijinal görüntüye bir detay bileşeninin eklenmesiyle ifade edilebilir:

$$g(x,y) = f(x,y) + k \cdot d(x,y) \tag{6.44}$$

Burada $f(x,y)$ giriş görüntüsünü, $g(x,y)$ keskinleştirilmiş çıkış görüntüsünü, $d(x,y)$ detay bileşenini ve k keskinleştirme katsayısını ifade eder.

Keskinleştirme işlemi çilek sınırlarını daha görünür hale getirebilir. Ancak aynı zamanda çilek yüzeyindeki çekirdek dokusunu, parlama bölgelerini ve arka plan gürültülerini de artırabilir. Keskinleştirme filtreleri, segmentasyon öncesinde dikkatli değerlendirilmelidir. Robotik hasat açısından amaç yalnızca daha keskin görüntü elde etmek değil, çileğin merkez ve boyut bilgisini kararlı şekilde çıkarabilmektir [4], [19], [20].

6.5.1 Unsharp filter

Unsharp filter, görüntüyü keskinleştirmek için kullanılan temel yöntemlerden biridir. İlk olarak orijinal görüntünün bulanıklaştırılmış bir versiyonu elde edilir. Daha sonra bu bulanık görüntü orijinal görüntüden çıkarılarak detay maskesi oluşturulur. Son aşamada detay maskesi tekrar orijinal görüntüye eklenir [8], [10], [22].

Bulanıklaştırılmış görüntü şu şekilde ifade edilir:

$$f_b(x,y) = f(x,y) * h(x,y) \tag{6.45}$$

Burada $f(x,y)$ orijinal görüntüyü, $h(x,y)$ yumuşatma çekirdeğini ve $f_b(x,y)$bulanıklaştırılmış görüntüyü ifade eder. $*$ işareti konvolüsyon işlemini göstermektedir.

Detay maskesi şu şekilde hesaplanır:

$$m(x,y) = f(x,y) - f_b(x,y) \tag{6.46}$$

Bu maske, orijinal görüntü ile bulanıklaştırılmış görüntü arasındaki farkı içerir. Kenar bilgisi, ince detaylar ve yerel kontrast değişimleri bu fark görüntüsünde bulunur.

Keskinleştirilmiş çıkış görüntüsü şu şekilde yazılır:

$$g(x,y) = f(x,y) + k \cdot m(x,y) \tag{6.47}$$

Burada k, keskinleştirme miktarını belirleyen katsayıdır. k değeri arttıkça keskinleştirme etkisi güçlenir.

Aynı işlem detay maskesi yerine doğrudan şu şekilde de yazılabilir:

$$g(x,y) = f(x,y) + k[f(x,y) - f_b(x,y)] \tag{6.48}$$

Bu ifade yeniden düzenlenirse:

$$g(x,y) = (1+k)f(x,y) - kf_b(x,y) \tag{6.49}$$

Unsharp filter, çilek sınırını daha belirgin hale getirebilir. Ancak aşırı keskinleştirme, çilek yüzeyindeki çekirdek dokusunu ve küçük gürültüleri de artırabilir. Bu durum HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon sırasında kararsız maske bölgelerine neden olabilir. Sınır belirginliğinde oluşan değişim, segmentasyon sonrasında hesaplanan bölge geometrisine ve robotik değerlendirmeye yansıyabilir [4], [19], [20]. Unsharp filter ana filtre olarak seçilmemiş; sınır belirginliği ve ölçüm sonuçları üzerindeki etkisini görmek amacıyla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

6.6 Custom 5×5 Filter Maskeleri

Custom 5×5 filtre maskeleri, klasik hazır filtrelerden farklı olarak problem yapısına göre manuel olarak düzenlenebilen filtrelerdir. Bu yapıda merkez piksel, yakın komşular ve uzak komşular farklı ağırlıklarla değerlendirilebilir. Filtreleme sırasında gürültünün azaltılması kadar nesne sınırlarının ve bölge yapısının korunması da sonraki segmentasyon aşaması açısından önemlidir

[8], [19], [22]. Özel 5×5 filtre, küçük gürültüleri azaltırken çileğin renk ve sınır bilgisini mümkün olduğunca koruyacak bir ön işleme yaklaşımı olarak tasarlanmıştır.

Genel ağırlıklı 5×5 filtreleme işlemi şu şekilde ifade edilebilir:

$$(x, y) = \sum_{i=-2}^{2} \sum_{j=-2}^{2} w(i,j) f(x+i, y+j) \tag{6.50}$$

Burada $f(x,y)$giriş görüntüsünü, $g(x,y)$filtreleme sonrası çıkış görüntüsünü ve $w(i,j)$filtre maskesindeki ağırlık katsayısını ifade eder. Her katsayı, merkez piksel etrafındaki bir komşu pikselin çıkış değerine ne kadar katkı vereceğini belirler.

5×5 ağırlık matrisi genel olarak şu şekilde gösterilebilir:

$$W = \begin{bmatrix} w_{-2,-2} & w_{-2,-1} & w_{-2,0} & w_{-2,1} & w_{-2,2} \\ w_{-1,-2} & w_{-1,-1} & w_{-1,0} & w_{-1,1} & w_{-1,2} \\ w_{0,-2} & w_{0,-1} & w_{0,0} & w_{0,1} & w_{0,2} \\ w_{1,-2} & w_{1,-1} & w_{1,0} & w_{1,1} & w_{1,2} \\ w_{2,-2} & w_{2,-1} & w_{2,0} & w_{2,1} & w_{2,2} \end{bmatrix} \tag{6.51}$$

Bu matris, custom 5×5 filtrenin uzamsal yerleşimini gösterir. Merkez katsayının daha yüksek seçilmesi, merkez piksel bilgisinin korunmasına yardımcı olur. Dış katsayıların daha düşük tutulması ise arka plan ve uzak komşuların çıkış pikseline etkisini azaltabilir.

Normalize edilmiş custom filtreleme işlemi şu şekilde yazılabilir:

$$g(x, y) = \frac{1}{K} \sum_{i=-2}^{2} \sum_{j=-2}^{2} w(i,j) f(x+i, y+j) \tag{6.52}$$

Burada K, filtre katsayılarının toplamıdır:

$$K = \sum_{i=-2}^{2} \sum_{j=-2}^{2} w(i,j) \tag{6.53}$$

Normalizasyon işlemi, filtreleme sonrası görüntünün gereğinden fazla parlak veya koyu hale gelmesini önler. Bu durum özellikle HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon için önemlidir. Eşikleme ile oluşturulan maskenin yapısı, giriş görüntüsündeki renk ve parlaklık dağılımından etkilenir; elde edilen bölge daha sonra geometrik olarak ölçülebilir [22], [24], [25]. Renk ve parlaklık dengesindeki değişimler çilek maskesinin bütünlüğü açısından dikkate alınmıştır. Şekil 6.4 farklı 5x5 maskelerinin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 6.4: Custom 5x5 maskelerden alınan sonuçlar, 3 farklı maske 3 farklı çıktı

6.7 Maske Boyutlarının Karşılaştırılması ve Önerilen Merkez Ağırlıklı 5×5 Filtre

Filtre maskesinin boyutu, filtreleme sonucunu doğrudan etkiler. 3×3 maskeler daha küçük bir komşuluk alanı kullanır. Çilek sınırını ve ince detayları daha iyi koruyabilir; ancak küçük gürültüleri azaltmada yetersiz kalabilir. 7×7 maskeler daha geniş bir komşuluk alanı kullandığı

için daha güçlü yumuşatma sağlar; fakat çilek sınırını ve renk geçişlerini fazla bulanıklaştırabilir [8], [9], [19].

5×5 maske bu iki yapı arasında daha dengeli bir çözüm sunar. 3×3 maskeye göre daha fazla komşuluk bilgisi kullanır, 7×7 maskeye göre ise daha az agresif yumuşatma yapar. Çilek görüntülerinde hem gürültü azaltma hem de sınır koruma açısından uygun bir ara yapı olarak değerlendirilmiştir.

Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre maskesi şu şekilde verilmiştir:

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 12 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.54}$$

Bu filtre maskesinde merkez piksele en yüksek ağırlık verilmiştir. Merkez pikselin yatay ve düşey doğrultudaki yakın komşuları daha yüksek, dış bölgelerde bulunan pikseller ise daha düşük katsayılarla temsil edilmiştir. Köşe katsayılarının sıfır olarak belirlenmesiyle merkezden daha uzak piksellerin filtreleme sonucuna etkisi sınırlandırılmıştır.

Filtre katsayıları, merkez piksel bilgisinin korunması ve yakın komşuluk üzerinden yumuşatma sağlanması amacıyla deneysel olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kapsamlı bir katsayı optimizasyonu yapılmamış; farklı merkez ağırlıklı 5×5 maskeler aynı görüntü işleme akışı içerisinde uygulanarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle önerilen yapı, evrensel olarak optimum bir filtre olarak değil, kullanılan çilek görüntüsü ve segmentasyon koşulları altında değerlendirilen merkez ağırlıklı bir filtre maskesi olarak ele alınmıştır.

Maskenin katsayı toplamı şu şekildedir:

$$K_{toplam} = 48 \tag{6.55}$$

Filtreleme işlemi öncesinde katsayıların toplamı bire eşit olacak şekilde normalizasyon uygulanmıştır:

$$K_n = \frac{1}{48}\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 12 & 4 & 1 \\ 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \tag{6.56}$$

Burada K_n, normalize edilmiş merkez ağırlıklı 5×5 filtre maskesini ifade eder. Normalizasyon işlemi, filtreleme sonrasında görüntünün genel parlaklık seviyesinde oluşabilecek değişimin sınırlandırılması amacıyla uygulanmıştır.

Önerilen filtrenin amacı, çilek görüntüsünde küçük gürültüleri azaltırken çileğin genel formunu, renk bilgisini ve sınır yapısını korumaktır. Bu yapı mean filter gibi tüm komşulara eşit ağırlık vermez. Komşuluk penceresindeki ağırlıkların dağılımı, filtrenin yumuşatma davranışını ve bölge sınırları üzerindeki etkisini belirleyen temel unsurlardan biridir [8], [19], [22]. Önerilen 5×5 filtrede merkez ve yakın komşulara daha yüksek ağırlık verilmiş, katsayılar çilek tespit problemine göre manuel olarak düzenlenmiştir.

Robotik hasat açısından bu filtrenin önemi, segmentasyon sonrası elde edilen centroid, major eksen ve minor eksen değerlerinin daha kararlı hesaplanabilmesidir. Daha kararlı bir maske, robot kol için daha güvenilir hedef noktası ve gripper için daha doğru boyut bilgisi sağlayabilir [4], [19], [20].

6.8 MATLAB Ortamında Önerilen Filtrenin Uygulanması

Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, MATLAB ortamında bir maske matrisi olarak tanımlanmıştır. Maske katsayıları merkez piksele daha fazla ağırlık verecek şekilde seçilmiş, böylece çileğin ana renk ve sınır bilgisinin korunması hedeflenmiştir. Filtre uygulanmadan önce maske katsayıları normalize edilmiştir. Filtreleme, segmentasyon ve bölge ölçümü birbirini takip eden görüntü işleme adımlarıdır [19], [22], [25]. Bu zincirin ilk aşamasında kullanılan

filtre maskesinin normalize edilmesi, filtreleme sonrasında genel yoğunluk seviyesindeki istenmeyen değişimlerin sınırlandırılmasına yardımcı olabilir.

Önerilen filtre maskesi MATLAB ortamında şu şekilde tanımlanabilir:

```
K = [0 1 1 1 0;
     1 2 4 2 1;
    1 4 12 4 1;
     1 2 4 2 1;
     0 1 1 1 0];
```
(6.57)

Filtre katsayılarının toplamı alınarak maske normalize edilir:

```
K = K / sum(K(:));
```
(6.58)

Bu işlem matematiksel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$K_n = \frac{K}{\sum K} \tag{6.59}$$

Burada Könerilen filtre maskesini, $\sum K$maske katsayılarının toplamını ve $K_n$normalize edilmiş filtre maskesini ifade eder. Normalize edilmiş maske, görüntüye uygulanırken parlaklık dengesinin korunmasına yardımcı olur.

Filtreleme işlemi MATLAB'da şu şekilde uygulanabilir:

- filteredImage = imfilter(originalImage, K, 'replicate');

Burada $originalImage$giriş görüntüsünü, $filteredImage$ise filtreleme sonrası elde edilen görüntüyü ifade eder. imfilter fonksiyonu, tanımlanan filtre maskesini görüntüye uygular. Filtreleme sonrasında oluşturulan maskeden alan, centroid ve eksen uzunlukları gibi geometrik özellikler `regionprops` ile çıkarılabilmektedir [25]. Ayrıca`imfilter` fonksiyonunun `replicate`

sınır seçeneği kullanılarak görüntü dışındaki değerler en yakın sınır pikselinin yinelenmesiyle ele alınmıştır.

Filtreleme işlemi tamamlandıktan sonra görüntü HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülür. Daha sonra renk tabanlı segmentasyon, maske birleştirme, morfolojik işlemler ve özellik çıkarımı adımları uygulanır. Böylece önerilen 5×5 filtrenin yalnızca görsel etkisi değil, segmentasyon kalitesi, merkez noktası ve boyut ölçümleri üzerindeki etkisi de değerlendirilebilir.

6.9 Önerilen Filtrenin Segmentasyon Üzerindeki Etkisi

Önerilen 5×5 filtre, segmentasyon öncesinde görüntüdeki küçük gürültüleri azaltmak ve çilek bölgesinin daha kararlı şekilde ayrılmasını sağlamak için uygulanmıştır. Görüntü analizi sırasında eşikleme ile hedef bölge ayrılabilir ve ayrılan bölgeden geometrik özellikler çıkarılabilir [19], [24], [25]. Filtreleme sonrası görüntü HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüştürülmüş, renk eşikleme işlemlerinin ardından çilek maskesi elde edilmiştir.

HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon işlemleri genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$M_{HSV}(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{piksel HSV eşik aralığı içindeyse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

$$M_{Lab}(x,y) = \begin{cases} 1, & \text{piksel CIELab eşik aralığı içindeyse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases}$$

Burada $M_{HSV}(x,y)$ HSV renk uzayından elde edilen maskeyi, $M_{Lab}(x,y)$ ise CIELab renk uzayından elde edilen maskeyi ifade eder. Piksel, belirlenen renk aralığına giriyorsa çilek bölgesi olarak kabul edilir.

İki maskenin birlikte kullanılması daha güçlü bir çilek maskesi elde edilmesini sağlar:

$$M_{final}(x,y) = M_{HSV}(x,y) \cap M_{Lab}(x,y) \tag{6.60}$$

Bu işlem hem HSV hem de CIELab koşullarını sağlayan piksellerin korunmasını sağlar. Böylece arka plan, yaprak ve gölge kaynaklı hatalı bölgeler azaltılabilir.

Önerilen filtre uygulandığında çilek yüzeyindeki küçük gürültüler azaldığı için eşikleme sonucunda daha temiz bir maske elde edilir. Mean filter gibi tüm pikselleri eşit yumuşatmadığı için çilek sınırını tamamen bulanıklaştırmaz. Merkez ağırlıklı yapı, çileğin genel formunu korurken küçük renk değişimlerini dengelemeye yardımcı olur.

Önerilen 5×5 filtre, segmentasyon aşamasında daha kararlı bir çilek bölgesi oluşturur. Daha temiz maske; alan, çevre, centroid, major eksen ve minor eksen hesaplarının daha güvenilir yapılmasına katkı sağlar [19], [21].

6.10 Önerilen Filtrenin Boyut ve Merkez Hesabı Üzerindeki Etkisi

Önerilen 5×5 filtre, segmentasyon maskesinin daha temiz ve düzenli oluşmasına katkı sağladığı için özellik çıkarımı sonuçlarını da doğrudan etkiler. Maske üzerindeki küçük gürültülerin azalması, bölge sınırlarının daha düzenli elde edilmesine yardımcı olabilir [19]. Alan, çevre, centroid, major eksen ve minor eksen gibi bölge özellikleri bu maske üzerinden hesaplanabilir [25].

Çilek bölgesinin alanı, maske üzerinde çileğe ait piksellerin toplamı ile hesaplanabilir:

$$A = \sum_{x} \sum_{y} M_{final}\,(x, y) \tag{6.61}$$

Burada A, tespit edilen çilek alanını; $M_{final}(x, y)$ise son segmentasyon maskesini ifade eder. Piksel değeri 1 olan bölgeler çileğe ait kabul edilir.

Centroid noktası ise şu şekilde hesaplanabilir:

$$x_c = \frac{1}{A} \sum_x \sum_y x \cdot M_{final}(x, y) \tag{6.62}$$

$$y_c = \frac{1}{A} \sum_x \sum_y y \cdot M_{final}(x, y) \tag{6.63}$$

Burada $x_c$ve y_c, çilek bölgesinin merkez noktasını ifade eder. Bu merkez noktası, robotik sistemde hedef noktanın belirlenmesi için önemlidir.

Boyut ölçümündeki hata oranı şu şekilde hesaplanabilir:

$$E = \frac{| D_{measured} - D_{real} |}{D_{real}} \times 100 \tag{6.64}$$

Bu denklemde D_{real}gerçek ölçülen değeri, $D_{measured}$ise görüntü işleme sonucunda elde edilen ölçüm değerini ifade eder.

Gerçek çilek ölçüleri 42.00 mm ve 33.10 mm olarak alınmıştır. Önerilen 5×5 filtre sonucunda ölçülen değerler 42.03 mm ve 33.14 mm olarak elde edilmiştir. Buna göre hata oranları X yönünde %0.08, Y yönünde ise %0.12 seviyesinde kalmıştır. Centroid noktasındaki hata da düşük olduğu için önerilen filtre, boyut ve merkez hesabı açısından diğer filtrelere göre daha dengeli sonuç vermiştir.

Bu sonuçlar, önerilen filtrenin yalnızca görsel olarak daha temiz bir görüntü üretmediğini, aynı zamanda robotik hasat için gerekli olan ölçüm verilerinin doğruluğunu da desteklediğini göstermektedir. Daha doğru centroid değeri robot kolun hedefleme başarısını artırırken, daha doğru major ve minor eksen değerleri gripper açıklığının daha uygun belirlenmesine yardımcı olur [4], [19], [20].

6.11 Filtre Sonuçlarının Robotik Hasat Açısından Değerlendirilmesi

Filtreleme sonuçları yalnızca görüntü kalitesi açısından değil, robotik hasat sistemi için üretilecek hedef veriler açısından da değerlendirilmelidir. Görüntüden elde edilen merkez ve geometrik boyut bilgileri, kamera tabanlı algılama ile robotik hasat sistemi arasındaki veri akışında kullanılabilir [4], [19], [20]. Centroid robotik hedef noktasıyla, majör ve minör eksen uzunlukları ise gripper açıklığıyla ilişkilendirilmiştir.

Çilek merkez noktası robotik sistem için hedef nokta olarak düşünülebilir:

$$P_c = (x_c, y_c) \tag{6.65}$$

Burada P_c, görüntü üzerindeki çilek merkez noktasını ifade eder. Bu nokta daha sonra kamera kalibrasyonu ve koordinat dönüşümü yardımıyla robot koordinat sistemine aktarılabilir.

Boyut bilgisi ise major ve minor eksen değerleriyle ilişkilidir:

$$D_{fruit} \approx \frac{D_{major} + D_{minor}}{2} \tag{6.66}$$

Bu ifade, çileğin yaklaşık boyut bilgisini temsil eder. Elde edilen boyut değeri, gripper açıklığının belirlenmesinde kullanılabilir.

$$G_{open} = D_{fruit} + C_s \tag{6.67}$$

Burada G_{open}, gripper açıklığını; D_{fruit}, çileğin tahmini boyutunu; $C_s$ise çileğin ezilmesini önlemek için bırakılan güvenlik payını ifade eder.

Mean ve Gaussian filtreler gürültüyü azaltmasına rağmen sınırları fazla yumuşatabilir. Sobel, Prewitt ve Laplacian filtreleri sınırları belirginleştirir; ancak çileğin tamamını temsil eden kararlı bir maske üretmekte tek başına yeterli değildir. Unsharp filter ise sınırı güçlendirebilir fakat yüzey dokusu ve gürültüyü de artırabilir.

Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, bu filtreler arasında daha dengeli bir sonuç vermiştir. Robotik hasat sisteminde hedef konum ve kavrama açıklığı gibi kararlar görüntüden çıkarılan geometrik bilgilere dayandırılabilir [4], [19], [20]. Önerilen filtrenin çileğin genel formunu ve merkez bilgisini koruma düzeyi, robotik sisteme aktarılacak verilerin kararlılığı açısından değerlendirilmiştir.

6.12 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde, çilek görüntülerinin filtreleme aşaması farklı klasik filtreler ve önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre üzerinden değerlendirilmiştir. Mean, Gaussian, Median ve Wiener filtreleri temel yumuşatma filtreleri olarak ele alınmıştır. Bu filtreler küçük gürültüleri azaltmada faydalı olsa da bazı durumlarda çilek sınırını yumuşatabilir veya segmentasyon sonucunu değiştirebilir.

Sobel, Prewitt ve Laplacian filtreleri kenar tabanlı sonuçlar üretmiştir. Bu filtreler çilek sınırlarını belirginleştirebilir; ancak çileğin bütün bölgesini ve kararlı bir segmentasyon maskesini tek başına oluşturmak için yeterli değildir. Unsharp filter ise sınır ve detayları artırabilir, fakat aynı zamanda yüzey dokusunu ve gürültüyü de güçlendirebilir.

Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, klasik filtrelere göre daha dengeli bir yapı sunmuştur. Merkez piksele daha yüksek ağırlık verilmesi, çileğin ana formunun korunmasına yardımcı olmuştur. Dış komşuların daha düşük ağırlıkta tutulması ise küçük gürültülerin azaltılmasını sağlamıştır.

Bu yapı sayesinde HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon sonucunda daha temiz ve kararlı bir çilek maskesi elde edilmiştir. Buna bağlı olarak alan, centroid, major eksen ve minor eksen değerleri daha güvenilir hesaplanmıştır. Özellikle robotik hasat açısından centroid noktası hedefleme için, boyut bilgisi ise gripper açıklığının belirlenmesi için doğrudan önem taşımaktadır [4], [19], [20].

Genel olarak önerilen 5×5 filtre, gürültü azaltma, sınır koruma ve ölçüm kararlılığı açısından dengeli bir ön işleme adımı olarak değerlendirilmiştir. Sonraki aşamalarda çileğin

segmentasyonu, boyut hesabı ve robotik toplama kararları için uygun bir filtreleme yaklaşımı olarak kullanılmıştır.

7. OLGUNLUK, BOYUT VE MESAFE TAHMİNİ

Bu bölümde çilek meyvesinin olgunluk durumunun, boyut bilgisinin ve mesafe yaklaşımının görüntü işleme çıktıları üzerinden nasıl değerlendirildiği açıklanmaktadır. Robotik çilek toplama sisteminde yalnızca çileğin görüntü üzerinde bulunması yeterli değildir. Robotun doğru karar verebilmesi için çileğin hasada uygun olup olmadığı, yaklaşık boyutu, görüntü üzerindeki merkezi ve mümkünse kamera sistemine göre konumu belirlenmelidir. Olgunluk, boyut ve mesafe tahmini görüntü işleme ile robotik sistem arasındaki önemli geçiş noktalarından biridir [4], [5], [20].

Olgunluk bilgisi, robotun çileği toplayıp toplamama kararını destekler. Boyut bilgisi, gripper açıklığının belirlenmesi ve çileğin fiziksel ölçüsünün tahmin edilmesi açısından önemlidir. Mesafe bilgisi ise robot kolun çileğe doğru yaklaşma hareketinin planlanması için gereklidir. Bu bölümde renk tabanlı olgunluk analizi, piksel tabanlı boyut hesabı, piksel-milimetre dönüşümü, gerçek ölçü ile karşılaştırma ve stereo kamera ile derinlik bilgisi yaklaşımı birlikte ele alınmaktadır.

Bu tez kapsamında olgunluk ve boyut tahmini, segmentasyon sonucu elde edilen çilek maskesi üzerinden yapılmaktadır. Böylece bütün görüntü yerine yalnızca çileğe ait pikseller değerlendirilir. Bu yaklaşım, arka plan, yaprak ve gölge bölgelerinin analiz sonucunu bozmasını azaltmak için önemlidir. Özellikle renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinde yalnızca çilek bölgesinin kullanılması, daha anlamlı sonuçlar elde edilmesine katkı sağlar [6], [7], [13].

7.1 Çilek Olgunluğunun Renk Uzayları ile Değerlendirilmesi

Çilek olgunluğunun görüntü işleme ile değerlendirilmesinde renk bilgisi temel göstergelerden biridir. Olgunlaşma sürecinde çileğin yüzey rengi yeşil ve beyaz tonlardan kırmızı tonlara doğru değişir. RGB görüntü ilk bilgi kaynağı olarak kullanılabilir; ancak RGB değerleri ışık şiddeti ve gölge değişimlerinden doğrudan etkilenir. Renk tabanlı meyve analizinde HSV renk tonu ve doygunluk bilgisini, CIELab ise renk karşıtlıklarını farklı bileşenler üzerinden değerlendirmeye olanak sağlar [2], [7], [16], [26]. Tezde olgunluk kararı verilirken iki renk uzayından elde edilen bilgiler birlikte incelenmiştir.

HSV renk uzayında Hue bileşeni renk tonunu, Saturation bileşeni rengin doygunluğunu ve Value bileşeni parlaklığı temsil eder. Çilek için kırmızı renk bölgesi belirli Hue ve Saturation aralıklarıyla ayrılabilir. Olgunluk için HSV tabanlı temel karar şu şekilde ifade edilebilir:

$$M_{HSV}(x,y) = \begin{cases} 1, & H_{min} \leq H(x,y) \leq H_{max} \text{ ve } S(x,y) \geq S_{min} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7.1)$$

Bu denklemde $M_{HSV}(x,y)$, HSV tabanlı olgun çilek maskesini ifade eder. Piksel değeri belirlenen kırmızı renk aralığına giriyorsa olgun bölge olarak kabul edilir.

CIELab renk uzayında ise özellikle a^*bileşeni kırmızı–yeşil renk eksenini temsil eder. Pozitif a^*değerleri kırmızı tonların, negatif değerler ise yeşil tonların baskın olduğunu gösterir. CIELab renk uzayında a* bileşeni yeşil–kırmızı eksenini temsil ettiği için kırmızılık yönündeki değişimin sayısal olarak izlenmesine olanak sağlar [16], [26]. Bu tezde a* değeri, çilek bölgesinin olgunluk değerlendirmesine yardımcı bir renk göstergesi olarak kullanılmıştır.

$$M_{Lab}(x,y) = \begin{cases} 1, & a^*(x,y) \geq a^*_{min} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (7.2)$$

Bu denklemde $M_{Lab}(x,y)$, CIELab tabanlı olgunluk maskesini ifade eder. a^*değeri belirlenen eşik değerinin üzerindeyse piksel kırmızı ağırlıklı kabul edilir.

Daha güvenilir bir olgunluk kararı için HSV ve CIELab maskeleri birlikte değerlendirilebilir:

$$M_{ripe}(x,y) = M_{HSV}(x,y) \cap M_{Lab}(x,y) \quad (7.3)$$

Bu işlem hem HSV hem de CIELab koşullarını sağlayan piksellerin olgun çilek bölgesi olarak seçilmesini sağlar. Böylece yalnızca parlaklık veya tek bir renk kanalına bağlı karar verilmez.

Olgunluk oranı, olgun kabul edilen piksellerin toplam çilek alanına oranı ile hesaplanabilir:

$$R_{ripe} = \frac{A_{ripe}}{A_{fruit}} \times 100 \tag{7.4}$$

Burada R_{ripe}, olgunluk oranını; A_{ripe}, olgun kabul edilen kırmızı piksel alanını; A_{fruit}ise tespit edilen toplam çilek alanını ifade eder.

Bu yaklaşımda amaç, çileğin yalnızca görüntüde bulunmasını değil, toplanmaya uygun olup olmadığını da değerlendirmektir. Robotik hasat açısından olgunluk bilgisi toplama kararını doğrudan etkiler. Olgunluk oranı yeterli seviyede olan çilekler hedef olarak seçilebilirken, yeterince olgunlaşmamış meyveler sistem tarafından toplanmayacak şekilde değerlendirilebilir [7], [13], [20].

7.2 Boyut Tespitinde Major ve Minor Eksen Kullanımı

Çilek bölgesi segmentasyon maskesi ile ayrıldıktan sonra meyvenin boyut bilgisini elde etmek için major ve minor eksen uzunlukları kullanılabilir. Major eksen, tespit edilen çilek bölgesinin en uzun yönünü; minor eksen ise buna dik olan daha kısa yönünü ifade eder. Bu değerler MATLAB ortamında regionprops fonksiyonu ile hesaplanabilir [19], [25].

Segmentasyon sonrası elde edilen çilek maskesi şu şekilde düşünülebilir:

$$M_{fruit}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{piksel çilek bölgesine aitse} \\ 0, & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \tag{7.5}$$

Bu maskede 1 değerine sahip pikseller çilek bölgesini oluşturur. Bu bölgenin geometrik özellikleri üzerinden alan, merkez noktası, bounding box, major eksen ve minor eksen değerleri çıkarılabilir.

Çileğin yaklaşık uzunluk ve genişlik bilgisi şu şekilde ifade edilebilir:

$$D_{major} = L_{major} \tag{7.6}$$

$$D_{minor} = L_{minor} \tag{7.7}$$

Burada D_{major}, çileğin uzun eksen boyunca ölçülen yaklaşık boyutunu; D_{minor}ise kısa eksen boyunca ölçülen yaklaşık boyutunu ifade eder. Bu değerler ilk olarak piksel cinsinden elde edilir.

Çileğin ortalama boyutunu temsil etmek için iki eksen değeri birlikte değerlendirilebilir:

$$D_{avg} = \frac{D_{major} + D_{minor}}{2} \tag{7.8}$$

Bu ifade, çileğin genel boyutunu tek bir değerle göstermek için kullanılabilir. Ancak gripper tasarımı açısından major ve minor eksenlerin ayrı ayrı değerlendirilmesi daha doğru olur. Çünkü çilek tam dairesel değildir ve uzunluk-genişlik oranı tutma açıklığını etkileyebilir.

Major ve minor eksen değerleri, yalnızca çileğin boyutunu değil, aynı zamanda meyvenin görüntüdeki yönelimini de anlamaya yardımcı olur. Bu bilgi, robotik hasat sisteminde gripper açıklığının belirlenmesi ve tutma noktasının daha güvenli seçilmesi açısından önemlidir [4], [19], [20].

7.3 Piksel–Milimetre Dönüşümü ve Gerçek Ölçü Karşılaştırması

Görüntü işleme sonucunda elde edilen majör ve minör eksen uzunlukları ilk olarak piksel cinsindedir. Bu değerlerin fiziksel boyut cinsinden ifade edilebilmesi için piksel–milimetre dönüşümü uygulanmıştır. Kamera geometrisi görüntü koordinatlarının fiziksel sistemle ilişkilendirilmesini sağlarken, bölge analizi tespit edilen nesnenin piksel cinsinden geometrik özelliklerini vermektedir [4], [19], [25].

Piksel–milimetre dönüşüm katsayısı, referans olarak alınan fiziksel uzunluğun görüntü üzerinde elde edilen piksel uzunluğuna oranıyla hesaplanmıştır:

$$S = \frac{D_{reference}}{D_{pixel}} \tag{7.9}$$

Burada S, piksel başına düşen milimetre değerini; $D_{referencel}$, kumpasla belirlenen referans uzunluğu; D_{pixel} ise görüntü üzerinden elde edilen piksel uzunluğunu ifade eder.

Piksel cinsinden ölçülen bir boyutun milimetreye çevrilmesi şu şekilde yapılır:

$$D_{mm} = D_{pixel} \cdot S \tag{7.10}$$

Burada D_{mm}, ortak dönüşüm ölçeği altında hesaplanan yaklaşık fiziksel boyut değeridir.

Görüntü işleme sonucunda hesaplanan boyut tahmini ile referans kumpas ölçüsü arasındaki göreli fark aşağıdaki bağıntıyla belirlenmiştir:

$$E = \frac{|\, D_{estimated} - D_{reference} \,|}{D_{reference}} \times 100 \tag{7.11}$$

Burada E, yüzde hata değerini; $D_{estimated}$, görüntü işleme ile hesaplanan değeri; $D_{reference}$ ise kumpasla belirlenen referans boyutu ifade etmektedir.

Çileğin referans boyutları majör ve minör eksen yönlerinde sırasıyla 42.00 mm ve 33.10 mm olarak alınmıştır. Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre sonucunda bu boyutlara karşılık gelen tahmini değerler 42.03 mm ve 33.14 mm olarak hesaplanmıştır. Ortak referans ölçeği altında göreli farklar majör eksen yönünde yaklaşık %0.08, minör eksen yönünde yaklaşık %0.12 ve ortalama %0.10 olarak elde edilmiştir.

Bununla birlikte dönüşüm katsayısının aynı referans görüntü üzerinden belirlenmiş olması nedeniyle bu değerler bağımsız bir boyut doğrulaması olarak değerlendirilmemiştir. Sonuçlar, farklı filtrelerin aynı görüntü ve ortak fiziksel ölçek altındaki göreli davranışlarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Bağımsız ölçüm doğruluğunun belirlenebilmesi için kamera kalibrasyonunun ayrı bir referans nesnesiyle gerçekleştirilmesi ve elde edilen katsayının farklı çilek görüntülerine değiştirilmeden uygulanması gerekmektedir.

7.4 Stereo Kamera ile Mesafe Tahmini

Çileğin yalnızca görüntü üzerindeki konumunun belirlenmesi robotik hasat açısından yeterli değildir. Robot kolun hedefe yaklaşabilmesi için meyvenin kamera sistemine göre derinlik bilgisinin de hesaplanması gerekir. Bu amaçla aynı sahnenin iki farklı kamera tarafından görüntülendiği stereo görüş yaklaşımından yararlanılabilir [4], [19].

Stereo görüntülerde aynı hedef noktasının sol ve sağ görüntülerdeki yatay konumları arasındaki fark disparity olarak adlandırılmaktadır. Disparity değeri Denklem (7.12) kullanılarak hesaplanır.

$$d = x_L - x_R \tag{7.12}$$

Burada d, disparity değerini; x_L, noktanın sol görüntüdeki yatay piksel konumunu; $x_R$ise sağ görüntüdeki yatay piksel konumunu ifade eder. Mesafe hesabında iki görüntüde aynı fiziksel noktaya karşılık gelen koordinatların eşleştirilmesi gerekir.

Derinlik değeri, kamera odak uzaklığı, kameralar arasındaki baz mesafesi ve disparity değeri kullanılarak Denklem (7.13) ile hesaplanmaktadır.

$$Z = \frac{f \cdot B}{d} \tag{7.13}$$

Bu denklemde Z, hedefin kamera sistemine göre derinliğini; f, odak uzaklığını; B, iki kamera arasındaki baz mesafesini; d ise disparity değerini ifade eder. Disparity arttıkça hesaplanan mesafe azalmakta, disparity azaldıkça mesafe artmaktadır.

Segmentasyon sonucunda elde edilen centroid bilgisi stereo derinlik değeriyle birlikte değerlendirildiğinde hedefin üç boyutlu konumu Denklem (7.14) ile ifade edilebilir.

$$P_{fruit} = (X, Y, Z) \tag{7.14}$$

Burada P_{fruit}, çileğin üç boyutlu konumunu ifade eder. X ve Y görüntü üzerindeki konumdan, Z ise stereo derinlik hesabından elde edilir. Bununla birlikte görüntü koordinatlarının doğrudan robot koordinatları olmadığı dikkate alınmalıdır. Bu bilgilerin fiziksel robot hareketinde kullanılabilmesi için kamera kalibrasyonu ve kamera–robot koordinat dönüşümünün ayrıca gerçekleştirilmesi gerekir.

Stereo mesafe yaklaşımının sınırlı ön değerlendirmesi amacıyla hedef, kamera sistemine göre belirlenen farklı referans uzaklıklarda ele alınmıştır. Referans mesafe, kamera sisteminin optik merkezlerinin bulunduğu düzlem ile hedefin merkez noktası arasındaki derinlik doğrultusundaki uzaklık olarak tanımlanmıştır. Bu değerler, stereo görüntülerden hesaplanan mesafelerin karşılaştırılmasında referans olarak kullanılmıştır.

Değerlendirme sırasında iki kameranın aynı yatay düzlemde ve sabit baz mesafesinde bulunduğu kabul edilmiştir. Her referans konum için sol ve sağ görüntülerde hedefe ait merkez noktasının yatay koordinatları belirlenmiştir. Elde edilen x_L ve x_R değerlerinden disparity hesaplanmış, ardından Denklem (7.13) kullanılarak hedefin kamera sistemine göre yaklaşık mesafesi bulunmuştur.

Hesaplanan stereo mesafe ile referans mesafe arasındaki mutlak fark Denklem (7.15) kullanılarak belirlenmiştir.

$$E_{\text{mutlak}} = \left| Z_{\text{hesaplanan}} - Z_{\text{referans}} \right| \tag{7.15}$$

Burada E_{mutlak} milimetre cinsinden mutlak mesafe hatasını, $Z_{\text{hesaplanan}}$ stereo görüntülerden hesaplanan mesafeyi ve Z_{referans} ise karşılaştırmada kullanılan referans mesafeyi ifade etmektedir .

Farklı uzaklıklarda elde edilen sonuçların ortak bir ölçütle karşılaştırılabilmesi amacıyla yüzde mesafe farkı Denklem (7.16) ile hesaplanmıştır.

$$E_{\%} = \frac{\left|Z_{\text{hesaplanan}} - Z_{\text{gerçek}}\right|}{Z_{\text{gerçek}}} \times 100 \tag{7.16}$$

Bu denklemde $E_{\%}$ hesaplanan stereo mesafenin referans mesafeye göre yüzde farkını göstermektedir. Referans mesafe, sol ve sağ görüntülerdeki yatay merkez koordinatları, disparity, hesaplanan mesafe, mutlak fark ve yüzde fark değerleri Bölüm 10'da tablo halinde sunulmuştur.

Değerlendirme beş referans mesafe noktasıyla sınırlıdır. Her mesafe için tekrarlı ölçüm ve standart sapma analizi gerçekleştirilmediğinden, elde edilen değerler stereo kamera sisteminin genel ölçüm doğruluğunu temsil etmemektedir. Sonuçlar, disparity tabanlı mesafe hesabının çalışma kapsamındaki davranışını ve sınırlı örnekler üzerindeki uygulanabilirliğini göstermek amacıyla kullanılmıştır.

Centroid ve derinlik bilgilerinin birlikte değerlendirilmesi, kavramsal robotik sistem için görüntü tabanlı bir hedef konumu oluşturabilir. Ancak bu konumun fiziksel robot hareketine aktarılabilmesi için stereo kamera kalibrasyonu, görüntü düzeltme, koordinat dönüşümü ve gerçek robot sistemi üzerinde deneysel doğrulama yapılması gerekir [4], [19], [20].

7.5 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde çileğin renk tabanlı olgunluk değerlendirmesi, boyut tahmini ve stereo kamera ile mesafe hesabının görüntü işleme çıktıları üzerinden nasıl ele alınabileceği açıklanmıştır. Olgunluk değerlendirmesinde HSV ve CIELab renk uzayları birlikte kullanılarak çilek bölgesindeki kırmızı renk dağılımı incelenmiştir. Kullanılan sınıflandırma, biyolojik olgunluğun bağımsız doğrulaması olarak değil, görüntüdeki renk özelliklerine dayalı bir değerlendirme olarak ele alınmıştır.

Boyut tahmininde segmentasyon sonucunda elde edilen çilek bölgesinin majör ve minör eksen uzunlukları kullanılmıştır. Piksel cinsinden elde edilen değerler referans görüntü üzerinden belirlenen dönüşüm katsayısı yardımıyla milimetre cinsinden ifade edilmiştir. Önerilen 5×5 filtre sonucunda 42.03 mm ve 33.14 mm boyut tahminleri elde edilmiştir. Ancak dönüşüm katsayısının aynı referans görüntü üzerinden belirlenmesi nedeniyle bu sonuçlar bağımsız ölçüm doğrulaması olarak değil, filtrelerin referans görüntüden türetilen eksen bazlı dönüşüm katsayıları altındaki göreli karşılaştırması olarak değerlendirilmiştir.

Stereo kamera ile mesafe tahmini, hedefin görüntü düzlemindeki konumuna ek olarak kamera sistemine göre yaklaşık derinlik bilgisinin elde edilmesi amacıyla ele alınmıştır. Referans mesafeler ile hesaplanan stereo mesafeler arasındaki mutlak ve yüzdesel farklar sınırlı sayıdaki ölçüm noktası üzerinden değerlendirilmiştir. Tekrarlı ölçüm ve standart sapma analizi yapılmadığından sonuçlar sistemin genel mesafe doğruluğunu temsil etmemektedir.

Centroid, boyut ve derinlik bilgileri, kavramsal robotik hasat sisteminin hedefleme ve kavrama aşamalarında kullanılabilecek görüntü tabanlı girdiler olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu bilgilerin doğrudan robot hareketine aktarılabilmesi için kamera kalibrasyonu, kamera–robot koordinat dönüşümü ve fiziksel robot deneylerinin ayrıca gerçekleştirilmesi gerekmektedir [4], [19], [20].

Genel olarak bu bölümde sunulan olgunluk, boyut ve mesafe sonuçları, kullanılan görüntüler ve belirlenen işlem parametreleriyle sınırlıdır. Elde edilen çıktılar yöntemin uygulanabilirliğini göstermekte; farklı çilek çeşitleri, ışık koşulları, kamera açıları ve gerçek saha ortamlarındaki genel başarısını doğrulamamaktadır.

8. ROBOTİK ÇİLEK TOPLAMA SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde, görüntü işleme çıktılarının robotik bir çilek toplama sisteminde nasıl kullanılabileceği açıklanmaktadır. Önceki bölümlerde çileğin görüntü üzerinde tespiti, segmentasyonu, merkez noktası, boyut bilgisi ve olgunluk durumu değerlendirilmiştir. Bu bölümde ise bu bilgilerin robot kol, kamera sistemi ve gripper tasarımı ile ilişkisi ele alınmıştır.

Robotik çilek toplama sistemi; algılama, karar verme ve fiziksel toplama aşamalarından oluşur. Algılama aşamasında kamera ile çilek görüntüsü alınır. Karar verme aşamasında görüntü işleme sonuçlarına göre çileğin konumu, boyutu ve olgunluk durumu belirlenir. Fiziksel toplama aşamasında ise robot kol ve uç efektör, belirlenen hedefe göre hareket eder [4], [14], [20].

Bu sistemde temel amaç, çileğin zarar görmeden tespit edilmesi, uygun noktadan kavranması ve toplanmasıdır. Çilek yumuşak yapılı bir meyve olduğu için gripper tasarımında temas yüzeyi, parmak geometrisi ve uygulanan kuvvet önemlidir. Uç efektör tasarımı, yalnızca mekanik taşıma görevi için değil, meyvenin ezilmeden tutulması için de değerlendirilmelidir [5], [12].

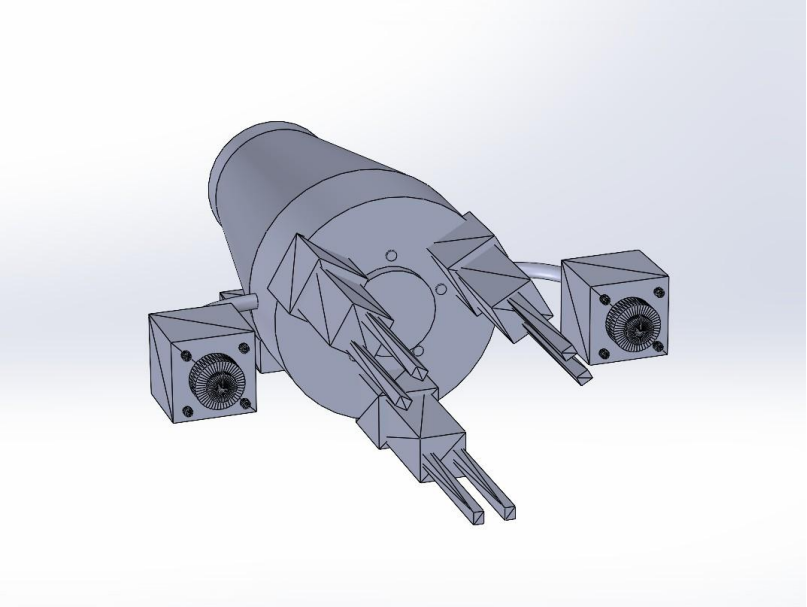
8.1 Robotik Hasat Sisteminin Genel Tasarım Yapısı

Robotik hasat sisteminin genel yapısı kamera, görüntü işleme birimi, robot kol ve gripper mekanizmasından oluşmaktadır. Kamera sistemi çileğin görüntüsünü alır ve bu görüntü MATLAB ortamında işlenir. Görüntü işleme sonucunda çileğin merkez noktası, yaklaşık boyutu ve olgunluk durumu elde edilir.

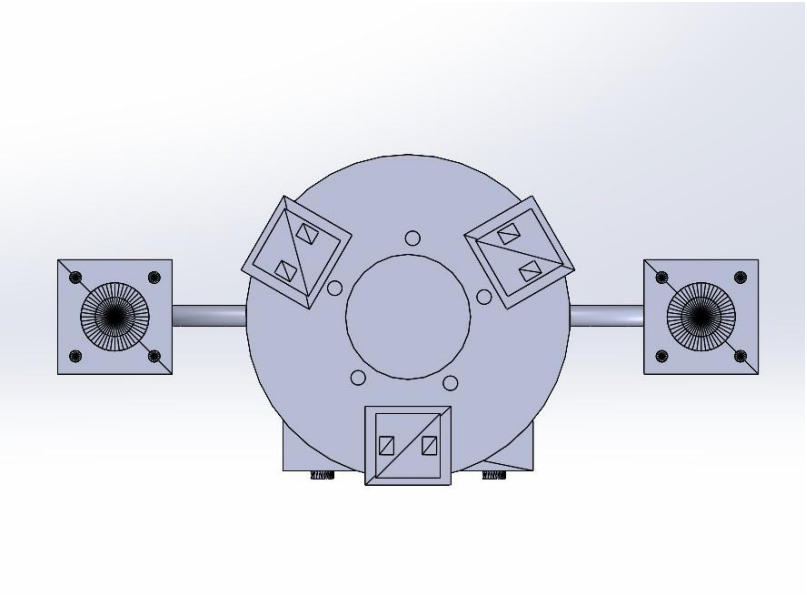
Sistemin genel çalışma akışı şu şekilde düşünülebilir:

Görüntü Alma → Görüntü İşleme → Hedef Belirleme → Robot Hareketi → Tutma ve Toplama

Bu akışta görüntü alma aşaması sistemin ilk giriş verisini oluşturur. Görüntü işleme aşamasında çilek bölgesi ayrılır ve gerekli geometrik özellikler çıkarılır. Hedef belirleme aşamasında centroid noktası robot kol için yaklaşma noktası olarak değerlendirilir. Boyut bilgisi ise gripper açıklığının belirlenmesine yardımcı olur.



Şekil 8.1: İlk tasarım denemeleri Solidwork kullanarak çizim oluşturulması



Şekil 8.2: Tasarım denemeleri önden kesit görüntüsü

Robotik sistem açısından çileğin yalnızca görüntüde bulunması yeterli değildir. Çileğin konumu, boyutu ve olgunluk durumu birlikte değerlendirilmelidir. Olgun olmayan meyvelerin

toplanmaması, olgun meyvelerin ise zarar verilmeden tutulması gerekir. Görüntü işleme çıktıları doğrudan robotik karar sürecine bağlanır.

Genel tasarımda kamera sistemi algılama görevini, MATLAB tabanlı görüntü işleme karar üretme görevini, robot kol konumlandırma görevini ve gripper fiziksel temas görevini üstlenir. Bu yapı, çilek hasadında insan müdahalesini azaltmayı ve daha kontrollü bir toplama süreci oluşturmayı amaçlamaktadır [4], [14], [20].

8.2 Robot Kol ve Uç Efektör Yerleşimi

Robot kol, görüntü işleme sistemi tarafından belirlenen çilek konumuna ulaşmak için kullanılan ana hareket mekanizmasıdır. Uç efektör ise robot kolun en sonunda yer alan ve çilekle fiziksel temas kuran bölümdür. Uç efektör yerleşimi, kamera görüş alanı, gripper hareketi ve çileğe yaklaşma yönü birlikte düşünülmelidir [4], [14], [20].

Görüntü işleme sonucunda elde edilen çilek merkez noktası robotik sistem için hedef nokta olarak kullanılabilir:

$$P_{hedef} = (X_{fruit}, Y_{fruit}, Z_{fruit}) \tag{8.1}$$

Burada P_{hedef}, robot kolun ulaşması gereken üç boyutlu hedef noktayı ifade eder. X_{fruit} ve Y_{fruit}görüntü üzerindeki konum bilgisinden, Z_{fruit}ise mesafe veya derinlik bilgisinden elde edilir.

Uç efektörün görevi, robot kol hedef noktaya yaklaştıktan sonra çileği uygun temas yüzeylerinden kavramaktır. Bu yapıda kameranın uç efektöre yakın yerleştirilmesi, çileğin hedef noktasının daha doğru takip edilmesine yardımcı olur. Ancak kamera, gripper parmaklarının hareketini engellemeyecek şekilde konumlandırılmalıdır.

Robot kol ve uç efektör yerleşiminde temel amaç, çileğe doğrudan ve kontrollü bir yaklaşma sağlamaktır. Çilek yumuşak yapılı olduğu için tutma sırasında fazla kuvvet uygulanmamalı ve temas yüzeyi geniş tutulmalıdır. Robotik çilek hasadında meyveye yaklaşma ve kavrama

süreçleri, hassas ürün yapısına uygun bir uç efektör düzeni gerektirir [5], [12]. Gripper parmaklarının konumu, kamera yerleşimi ve robotun yaklaşma doğrultusu aynı uç efektör tasarımı içinde birlikte değerlendirilmiştir.

Bu yerleşim sayesinde görüntü işleme ile elde edilen merkez noktası robot kolun yönlendirilmesinde, boyut bilgisi ise gripper açıklığının belirlenmesinde kullanılabilir. Böylece algılama ve mekanik toplama süreci aynı sistem içinde birbirine bağlanmış olur.

8.3 Kamera Entegreli Uç Efektör ve Kamera Montaj Yapısı

Kamera entegreli uç efektör tasarımında amaç, çileğin robotik toplama işlemi sırasında mümkün olduğunca net ve doğrudan görüntülenmesini sağlamaktır. Kamera geometrisi ile robotik hasat sistemlerinde görüntü tabanlı algılama arasındaki ilişki, hedef bilgisinin fiziksel sisteme aktarılmasında temel bir bağlantı oluşturur [4], [14], [20]. Kameraların uç efektöre yakın konumlandırılması, görüntü işleme çıktıları ile robot hareketinin aynı uç yapı üzerinden ilişkilendirilmesini destekleyen bir tasarım tercihi olarak ele alınmıştır.

Tasarımda kameraların gripper hareket alanını engellemeyecek şekilde konumlandırılması gerekir. Kamera görüş açısı, çileğin tamamını görebilecek genişlikte olmalı; aynı zamanda tutucu parmaklar görüntü alanını kapatmamalıdır. Kamera montajı, uç efektörün yan veya üst bölgelerine yerleştirilecek destek bağlantılarıyla yapılabilir.

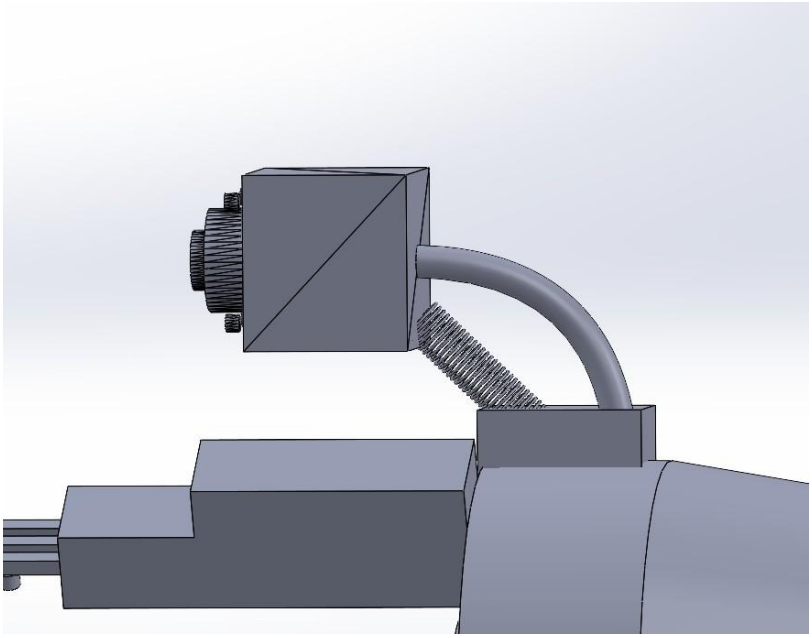
Stereo kamera kullanılması durumunda sağ ve sol kamera arasında belirli bir baz mesafesi bulunur:

$$B = | C_R - C_L | \tag{8.2}$$

Burada B, iki kamera arasındaki baz mesafesini; $C_R$sağ kamera konumunu, $C_L$ise sol kamera konumunu ifade eder. Bu mesafe, stereo derinlik hesabında kullanılacak temel parametrelerden biridir.

Kamera montaj yapısında rijitlik önemlidir. Kamera konumu çalışma sırasında değişirse görüntü işleme sonuçları ve derinlik hesabı hatalı olabilir. Kamera bağlantısının titreşimi azaltacak ve sabit görüş açısı sağlayacak şekilde tasarlanması gerekir.

Bu yerleşim sayesinde çileğin görüntüsü toplama noktasına yakın bir konumdan alınabilir. Böylece centroid, boyut ve olgunluk bilgileri robot kolun hedefleme sürecine daha güvenilir şekilde aktarılabilir. Robotik hasat sistemlerinde kamera ile algılama ve uç efektörle kavrama, hedef meyve üzerinde ardışık çalışan iki temel süreçtir [4], [14], [20]. Kameraların gripper ile aynı uç yapı üzerinde konumlandırılması, algılama ve kavrama bileşenlerini tek bir mekanik düzen içinde bütünleştirmek amacıyla tercih edilmiştir.



Şekil 8.3: Kamera yerleşimi

8.4 Gripper Tasarım Yaklaşımı

Gripper, robotik çilek toplama sisteminde meyve ile doğrudan temas eden mekanizmadır. Tasarımda yalnızca çileği kavramak değil, aynı zamanda meyveye zarar vermeden tutmak amaçlanmalıdır. Çilek yumuşak ve hassas bir yapıya sahip olduğu için sert, dar ve yüksek basınç oluşturan tutucu yüzeyler uygun değildir [5], [12].

Gripper tasarımında temel yaklaşım, çileği birkaç farklı temas noktasından dengeli şekilde kavramaktır. Üç veya dört parmaklı yapı, çileğin çevresinden desteklenmesini sağlayabilir. Parmakların meyve etrafına simetrik yerleştirilmesi, tutma sırasında oluşabilecek kayma ve dönme etkilerini azaltır.

Tutma açıklığı, görüntü işleme sonucunda elde edilen boyut bilgisine göre belirlenebilir:

$$G_{open} = D_{fruit} + C_s \tag{8.3}$$

Burada G_{open}, gripper açıklığını; D_{fruit}, görüntü işleme ile tahmin edilen çilek boyutunu; $C_s$ise güvenlik payını ifade eder. Bu güvenlik payı, parmakların çileğe doğrudan baskı yapmasını azaltmak için kullanılır.

Tutma kuvveti de çileğin zarar görmemesi açısından sınırlandırılmalıdır:

$$F_{grip} \leq F_{max} \tag{8.4}$$

Bu denklemde F_{grip}, gripper tarafından uygulanan tutma kuvvetini; F_{max} ise çileğe zarar vermeden uygulanabilecek maksimum kuvvet sınırını ifade eder.

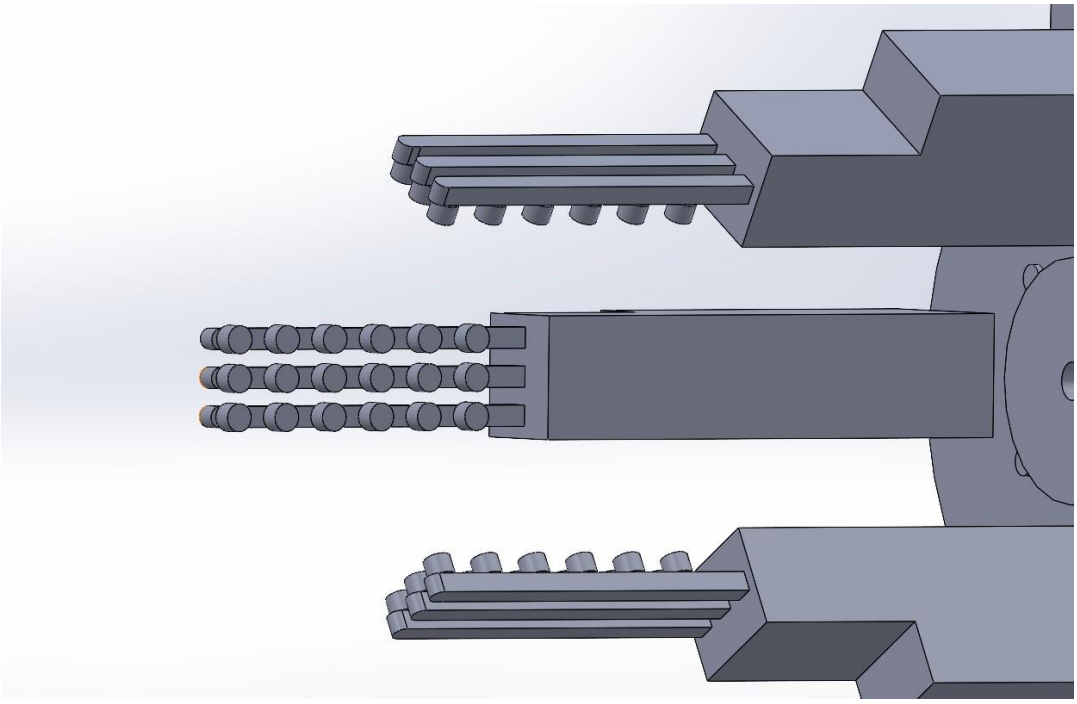
Gripper tasarımında parmakların ileri–geri hareket edebilmesi, farklı boyuttaki çileklere uyum sağlamayı kolaylaştırır. Ayrıca parmak uçlarının geniş ve yumuşak temas yüzeyine sahip olması, kuvvetin tek bir noktada yoğunlaşmasını önler. Böylece çileğin ezilme riski azaltılır ve daha güvenli bir tutma işlemi elde edilir.

Önerilen gripper yaklaşımı, görüntü işleme ile elde edilen boyut bilgisine uyum sağlayabilen, simetrik yerleşimli ve yumuşak temas yüzeyli bir tutucu yapı olarak değerlendirilmiştir.

8.5 Yumuşak Temas Yüzeyli Parmak Ucu Tasarımı

Çilek hassas ve kolay zarar görebilen bir meyve olduğu için gripper parmak uçlarının yumuşak temas yüzeyine sahip olması gerekir. Sert ve dar temas yüzeyleri, tutma kuvvetini küçük bir

alanda yoğunlaştırarak ezilme veya yüzey deformasyonu oluşturabilir. Parmak ucu tasarımında geniş, esnek ve meyve yüzeyine uyum sağlayabilen bir yapı tercih edilmelidir [5], [12].



Şekil 8.4: Yumuşatıcı kauçuk parmak ucu tasarımı

Temas basıncı genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$P = \frac{F}{A} \tag{8.5}$$

Burada P, temas basıncını; F, uygulanan tutma kuvvetini; Aise temas alanını ifade eder. Temas alanı arttıkça aynı kuvvet daha geniş bir yüzeye dağılır ve çilek üzerindeki basınç azalır.

Parmak uçlarının küçük sivri uçlar yerine genişletilmiş, yuvarlatılmış veya yumuşak yüzeyli olması daha uygundur. Böylece tutma sırasında kuvvet tek bir noktada toplanmaz. Özellikle top şeklinde veya gecko benzeri geniş uçlu parmak tasarımları, çileğin yüzeyine daha dengeli temas sağlayabilir.

Parmak uçlarının esnek malzemeden üretilmesi de tutma güvenliğini artırır. Esnek yapı, çileğin yüzey formuna uyum sağlar ve küçük boyut farklılıklarında tutma işlemini daha kontrollü hale getirir. Bu yapı aynı zamanda kaymayı azaltarak meyvenin daha düşük kuvvetle tutulmasına yardımcı olur.

Yumuşak temas yüzeyli parmak ucu tasarımı, robotik hasat sisteminde çileğin zarar görmeden tutulması için önemli bir tasarım unsurudur. Görüntü işleme ile elde edilen boyut bilgisi gripper açıklığını belirlerken, yumuşak parmak uçları bu tutma işleminin güvenli şekilde gerçekleşmesini destekler.

8.6 SolidWorks Tabanlı Kavramsal Tasarım

Robotik çilek toplama sisteminin uç efektör yapısı, SolidWorks ortamında kavramsal olarak modellenebilir. Bu modelleme aşamasında amaç, sistemin üretime hazır son tasarımını oluşturmak değil; kamera yerleşimi, gripper geometrisi, parmak hareketi ve genel mekanik düzeni görsel olarak değerlendirmektir.

Kavramsal tasarımda uç efektör; ana gövde, kamera bağlantı noktaları, tutucu parmaklar ve parmak uçlarından oluşur. Ana gövde robot kolun son bağlantı noktasına bağlanacak şekilde düşünülür. Kamera yapısı ise çileği görebilecek ve gripper hareketini engellemeyecek konumda yerleştirilir.

Tutucu parmakların çilek etrafında simetrik yerleşmesi hedeflenmiştir. Üç parmaklı yapıda parmaklar yaklaşık 120° aralıklarla konumlandırılabilir:

$$\theta = \frac{360^\circ}{3} = 120^\circ \tag{8.6}$$

Bu yerleşim, çileğin farklı yönlerden dengeli tutulmasına yardımcı olur. Dört parmaklı yapı kullanıldığında ise parmaklar yaklaşık 90° aralıklarla yerleştirilebilir:

(8.7)

$$\theta = \frac{360^\circ}{4} = 90^\circ$$

SolidWorks tasarımında parmakların ileri–geri hareket edebilecek şekilde düzenlenmesi, farklı boyuttaki çileklere uyum sağlamayı kolaylaştırır. Parmak uçlarında geniş ve yumuşak temas yüzeylerinin kullanılması ise meyvenin ezilme riskini azaltır.

Bu kavramsal model, görüntü işleme çıktıları ile mekanik tasarım arasındaki ilişkiyi göstermek için kullanılmıştır. Centroid bilgisi robot kolun hedef noktasını, boyut bilgisi gripper açıklığını, kamera yerleşimi ise algılama doğruluğunu etkiler. Robotik hasat sisteminde kamera yerleşimi, kavrama yapısı ve mekanik bütünleşme birbirini etkileyen tasarım unsurlarıdır [4], [5], [12], [20]. SolidWorks tabanlı kavramsal tasarım, önerilen uç efektör ve gripper yapısının geometrik yerleşimini somutlaştırmak amacıyla kullanılmıştır.

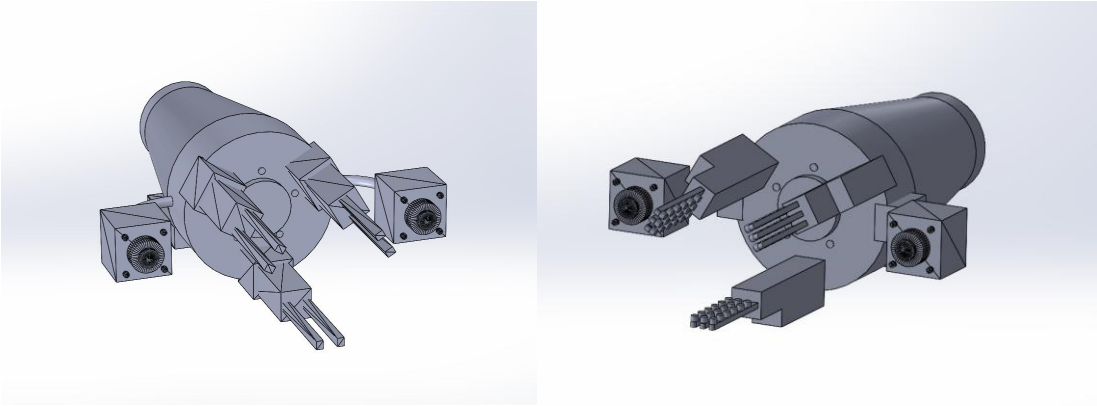
8.7 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde robotik çilek toplama sistemi, kamera, robot kol, uç efektör ve gripper tasarımı açısından değerlendirilmiştir. Görüntü işleme sonucunda elde edilen centroid, boyut ve olgunluk bilgileri robotik sistemin karar ve hareket aşamalarıyla ilişkilendirilmiştir.

Robot kol, çileğin belirlenen hedef noktasına ulaşmak için kullanılırken, uç efektör meyveyle doğrudan temas eden bölüm olarak ele alınmıştır. Kamera entegreli yapı, çileğin toplama noktasına yakın bir konumdan görüntülenmesini sağlar. Bu durum, hedefleme ve konumlandırma doğruluğu açısından önemlidir.

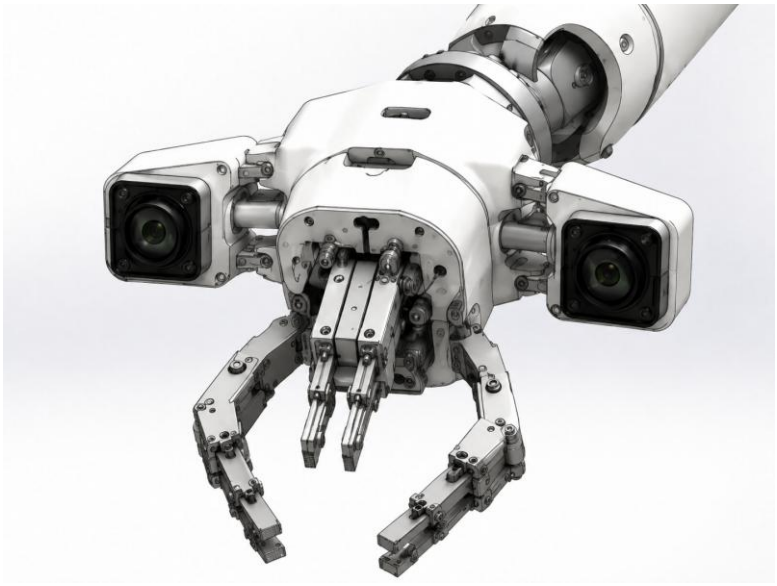
Gripper tasarımında çileğin hassas yapısı dikkate alınmıştır. Simetrik yerleşimli üç veya dört parmaklı yapı, meyvenin dengeli tutulmasını sağlayabilir. Yumuşak ve geniş temas yüzeyli parmak uçları ise tutma kuvvetinin çilek üzerinde tek bir noktada yoğunlaşmasını önler.
SolidWorks tabanlı kavramsal tasarım, sistemin mekanik düzenini görselleştirmek için kullanılmıştır. Bu tasarım sayesinde kamera konumu, gripper yapısı, parmak hareketi ve robot kol bağlantısı birlikte değerlendirilebilmiştir.

Genel olarak robotik tasarımın amacı, görüntü işleme çıktılarının fiziksel toplama hareketine dönüştürülmesini sağlamaktır. Görüntüden çıkarılan konum, boyut ve karar bilgileri robotik hasat sisteminin farklı aşamalarında kullanılabilecek girdiler oluşturabilir [4], [5], [12], [20]. Centroid bilgisi robot kol hedefiyle, boyut bilgisi gripper açıklığıyla ve olgunluk bilgisi toplama kararıyla ilişkilendirilmiştir.

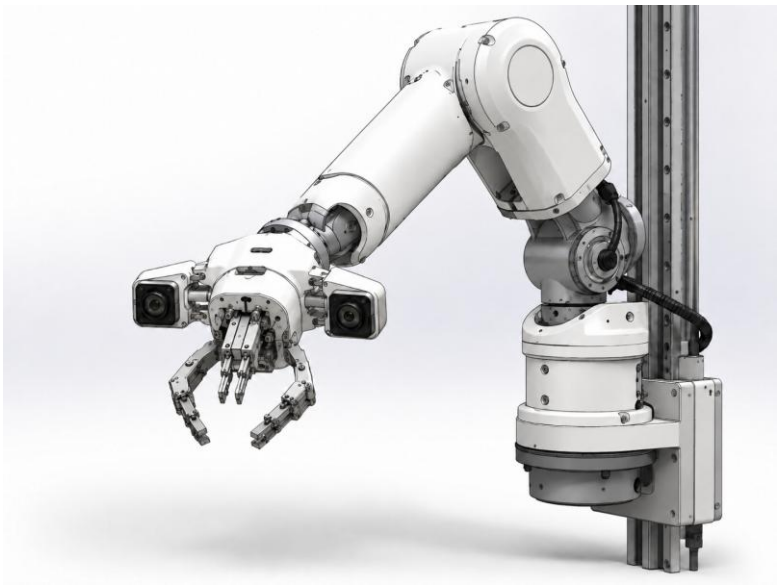


Şekil 8.5: Tasarım çizimleri

Şekil 8.5, iki farklı çizim evresini göstermektedir. Soldaki tasarım sadece çilek meyvesi için 120° açıklık ile 3 parmak ucu şeklinde ilk tasarım evresidir. Sağdaki tasarım ise, parmak ucu sayısını 50% arttırıp, uç kısım dizaynını değiştirilmesiyle elde edilmiştir ve toplamda 9 parmak ucu tasarlanmıştır.



Şekil 8.6: Konsept dizayn olarak giydirilmiş kafa tutucu yapısı



Şekil 8.7: Konsept dizayn olarak giydirilmiş nihai model yapısı

Şekil 8.6 ve şekil 8.7 ise potansiyel son tasarımın koruma kabukları ile yaratılacak prototip modelleri göstermektedir. Bu dizaynlar canlıya alınmadan konsept olarak tasarlanmıştır. Nihai model, genel gövde yapısı, hareket biçimleri ilerideki potansiyel çalışmalar ile şekillenecektir.

9. GÖRÜNTÜ İŞLEME VE ROBOTİK TASARIMIN ENTEGRASYONU

Bu bölümde, görüntü işleme aşamasından elde edilen bilgilerin robotik çilek toplama sistemiyle nasıl ilişkilendirileceği açıklanmaktadır. Önceki bölümlerde çileğin tespiti, segmentasyonu, merkez noktası, boyut bilgisi ve olgunluk durumu değerlendirilmiştir. Bu bölümde ise bu çıktıların robot kol hareketi, gripper açıklığı ve toplama kararı üzerindeki etkisi ele alınmıştır.

Robotik hasat sisteminde görüntü işleme yalnızca çileği görüntü üzerinde bulmak için kullanılmaz. Aynı zamanda robotun hangi noktaya hareket edeceğini, gripperın ne kadar açılacağını ve meyvenin toplanıp toplanmayacağını belirleyen temel verileri üretir. Görüntü işleme ve robotik tasarım birbirinden ayrı değil, aynı sistemin birbirini tamamlayan iki aşaması olarak değerlendirilmelidir [4], [14], [20].

Genel entegrasyon süreci şu şekilde düşünülebilir:

Görüntü İşleme Çıktıları → Robotik Karar → Robot Hareketi → Tutma ve Toplama

Bu akışta centroid bilgisi robot kol için hedef noktayı, boyut bilgisi gripper açıklığını, olgunluk bilgisi ise toplama kararını destekler. Böylece görüntüde elde edilen sayısal bilgiler fiziksel toplama hareketine dönüştürülür.

9.1 Görüntü İşleme Çıktılarının Robotik Sisteme Aktarılması

Görüntü işleme sonucunda çileğe ait temel bilgiler çıkarılır. Bu bilgiler; merkez noktası, boyut, alan, olgunluk durumu ve varsa derinlik bilgisidir. Robotik sistemin bu verileri kullanabilmesi için görüntü üzerindeki çıktılar hedef bilgisine dönüştürülmelidir.

Görüntü işleme çıktıları genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$O_{image} = \{x_c, y_c, D_{major}, D_{minor}, R_{ripe}, Z\} \tag{9.1}$$

Burada x_c ve y_c çileğin görüntü üzerindeki merkez noktasını, D_{major} ve D_{minor}çileğin boyut bilgisini, R_{ripe}olgunluk oranını ve Zmesafe bilgisini ifade eder.

Bu çıktılar robotik sistem için karar verisine dönüştürülür:

$$O_{robot} = \{P_{target}, G_{open}, C_{harvest}\} \tag{9.2}$$

Burada P_{target}robot kolun hedef noktasını, G_{open}gripper açıklığını ve $C_{harvest}$toplama kararını ifade eder.

Centroid bilgisi robot kolun çileğe yaklaşacağı hedef noktayı belirler. Boyut bilgisi, gripper açıklığının çileği ezmeden kavrayacak şekilde ayarlanmasına yardımcı olur. Olgunluk bilgisi ise meyvenin toplanmaya uygun olup olmadığını belirlemek için kullanılır.

Bu yapı sayesinde görüntü işleme aşamasında elde edilen bilgiler yalnızca analiz sonucu olarak kalmaz. Robot kolun hareket planına, gripper kontrolüne ve hasat kararına doğrudan aktarılır. Kamera tabanlı algılama ile bölge analizi sonucunda elde edilen veriler robotik hasat sisteminin karar ve hareket aşamalarına aktarılabilir [4], [19], [20]. Algılama, karar verme ve fiziksel toplama aşamaları aynı sistem akışı içinde birbirine bağlanmıştır.

9.2 Centroid, Boyut ve Olgunluk Bilgisinin Robotik Kararlarda Kullanılması

Görüntü işleme sonucunda elde edilen centroid, boyut ve olgunluk bilgileri robotik sistemin temel karar verilerini oluşturur. Centroid noktası robot kolun çileğe yaklaşacağı hedef bölgeyi belirlerken, boyut bilgisi gripper açıklığının ayarlanmasında kullanılır. Robotik hasat sistemlerinde görüntüden çıkarılan hedef bilgileri, meyvenin seçilmesi ve toplama sürecinin başlatılması için karar girdisi olarak değerlendirilebilir [4], [19], [20]. Olgunluk bilgisi, çileğin hedef olarak seçilip seçilmeyeceğini belirleyen karar sürecini desteklemek amacıyla kullanılmıştır.

Çileğin görüntü üzerindeki merkez noktası şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_c = (x_c, y_c) \tag{9.3}$$

Bu nokta, çilek bölgesinin merkezini gösterir. Robotik sistemde bu bilgi, hedef noktanın belirlenmesi için kullanılır. Stereo kamera veya derinlik bilgisi eklendiğinde hedef nokta üç boyutlu hale gelir:

$$P_{target} = (X_c, Y_c, Z_c) \tag{9.4}$$

Burada X_c, $Y_c$ve Z_c, çileğin robotik sistemde kullanılabilecek hedef konumunu ifade eder. Boyut bilgisi, major ve minor eksen değerlerinden elde edilebilir:

$$D_{fruit} \approx \frac{D_{major} + D_{minor}}{2} \tag{9.5}$$

Bu değer, çileğin yaklaşık boyutunu temsil eder. Gripper açıklığı ise çileğin ezilmesini önlemek için güvenlik payı eklenerek belirlenebilir:

$$G_{open} = D_{fruit} + C_s \tag{9.6}$$

Burada G_{open}, gripper açıklığını; $C_s$ise güvenlik payını ifade eder. Bu yaklaşım, gripperın çileğe doğrudan baskı yapmasını azaltır.

Olgunluk bilgisi ise toplama kararında kullanılır:

$$C_{harvest} = \begin{cases} 1, & R_{ripe} \geq R_{min} \\ 0, & R_{ripe} < R_{min} \end{cases} \tag{9.7}$$

Burada $C_{harvest}$, toplama kararını; R_{ripe}, hesaplanan olgunluk oranını; R_{min}ise toplama için gereken minimum olgunluk eşiğini ifade eder.

Bu yapı sayesinde sistem yalnızca çileği tespit etmekle kalmaz; aynı zamanda çileğin uygun hedef noktası, yaklaşık boyutu ve toplanmaya uygunluğu hakkında karar üretir. Böylece görüntü işleme çıktıları robot kol hareketi ve gripper kontrolü için kullanılabilir hale gelir.

9.3 Kamera Koordinatından Robot Koordinatına Geçiş

Görüntü işleme sonucunda elde edilen merkez noktası ilk olarak piksel koordinatlarında bulunur. Ancak robot kolun hareket edebilmesi için bu noktanın robot koordinat sistemine dönüştürülmesi gerekir. Bu dönüşüm, kamera kalibrasyonu ve koordinat dönüşüm ilişkileri kullanılarak yapılabilir [4], [19].

Görüntü üzerindeki merkez noktası şu şekilde ifade edilir:

$$P_{image} = (x_c, y_c) \tag{9.8}$$

Bu nokta, çileğin görüntü düzlemindeki merkez konumunu gösterir. Derinlik bilgisi de eklendiğinde nokta kamera koordinat sisteminde üç boyutlu hale getirilebilir:

$$P_{camera} = (X_c, Y_c, Z_c) \tag{9.9}$$

Kamera koordinatındaki noktanın robot koordinat sistemine aktarılması şu şekilde ifade edilebilir:

$$P_{robot} = R \cdot P_{camera} + T \tag{9.10}$$

Burada P_{robot}, robot koordinat sistemindeki hedef noktayı; R, kamera ve robot koordinat sistemleri arasındaki dönüşüm matrisini; Tise öteleme vektörünü ifade eder.

Homojen dönüşüm formu ile bu işlem şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} X_r \\ Y_r \\ Z_r \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \tag{9.11}$$

Bu dönüşüm sayesinde görüntü işleme ile bulunan çilek merkezi, robot kolun fiziksel ortamda ulaşabileceği bir hedef noktaya çevrilir. Böylece sistem yalnızca görüntü üzerinde çileği tespit etmekle kalmaz, aynı zamanda robotun hareket edeceği gerçek konumu da belirleyebilir.

Robotik hasat açısından bu adım kritik öneme sahiptir. Çünkü koordinat dönüşümündeki hata, robot kolun çileğe yanlış noktadan yaklaşmasına neden olabilir. Kamera yerleşimi, kalibrasyon ve robot koordinat sistemi arasındaki ilişki doğru kurulmalıdır [4], [19], [20].

9.4 Entegre Robotik Toplama İşlem Sırası

Entegre robotik toplama süreci, görüntü alma aşamasından başlayarak çileğin tespit edilmesi, uygun hedef noktanın belirlenmesi ve gripper ile tutulmasına kadar devam eden sıralı bir yapıya sahiptir. Bu süreçte görüntü işleme çıktıları, robotik sistemin hareket ve karar adımlarına dönüştürülür [4], [14], [20].

Sistemin genel işlem sırası şu şekilde ifade edilebilir:

$$I_{RGB} \rightarrow I_{filtered} \rightarrow M_{fruit} \rightarrow O_{image} \rightarrow O_{robot} \rightarrow \text{Toplama İşlemi}$$

Burada I_{RGB} giriş görüntüsünü, $I_{filtered}$ filtrelenmiş görüntüyü, M_{fruit} segmentasyon maskesini, O_{image} görüntü işleme çıktılarını ve O_{robot} robotik sistem için oluşturulan hedef verileri ifade eder.

Toplama işlemi genel olarak şu adımlardan oluşur:

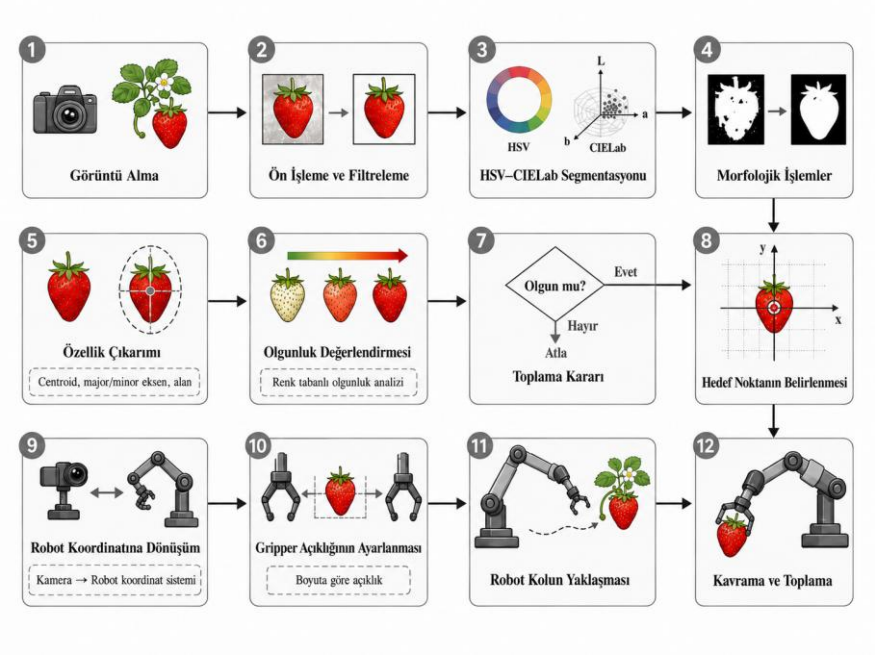
Tespit → Olgunluk Kararı → Hedef Nokta → Yaklaşma → Tutma → Toplama

İlk aşamada kamera ile çilek görüntüsü alınır ve önerilen filtreleme işlemi uygulanır. Daha sonra HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon ile çilek bölgesi ayrılır. Segmentasyon sonucunda centroid, major eksen, minor eksen ve olgunluk oranı hesaplanır.

Olgunluk oranı yeterli seviyedeyse çilek toplama için uygun kabul edilir. Bu durumda centroid noktası robot kolun hedef noktası olarak kullanılır. Boyut bilgisi gripper açıklığının belirlenmesine yardımcı olur. Derinlik veya mesafe bilgisi de eklendiğinde robot kol çileğe üç boyutlu olarak yaklaşabilir.

Son aşamada gripper, belirlenen açıklık değerine göre çileği kavrar. Yumuşak temas yüzeyli parmak uçları sayesinde tutma kuvveti daha geniş bir alana yayılır ve çileğin zarar görme riski azaltılır. Böylece görüntü işleme, karar verme ve mekanik toplama adımları tek bir robotik hasat akışı içinde birleştirilmiş olur.

Şekil 9.1 bize görüntünün ilk sisteme dahil olmasından itibaren geçtiği işlemleri ve bu işlemler sonucu robotun ilgili meyve kararı sonucu toplama işlemenin karar mekanizmasını özet şekilde göstermektedir.



Şekil 9.1: Sistemin çalışma adımları

9.5 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde, görüntü işleme çıktılarının robotik çilek toplama sistemiyle nasıl entegre edilebileceği açıklanmıştır. Segmentasyon sonucunda elde edilen centroid, boyut, olgunluk ve mesafe bilgileri robotik karar sürecinin temel verileri olarak değerlendirilmiştir.

Centroid bilgisi robot kolun hedef noktasını belirlemek için kullanılırken, major ve minor eksen değerleri gripper açıklığının ayarlanmasına katkı sağlar. Olgunluk oranı ise çileğin toplanıp toplanmayacağına karar vermek için kullanılmıştır. Bu yapı sayesinde sistem yalnızca çileği algılayan değil, aynı zamanda toplama kararını destekleyen bir yapıya dönüşmektedir.

Kamera koordinatından robot koordinatına geçiş, görüntüde bulunan çilek merkezinin fiziksel ortamda ulaşılabilir bir hedef noktaya çevrilmesini sağlar. Bu dönüşüm doğru yapılmadığında robot kol çileğe hatalı yaklaşabilir. Kamera yerleşimi, kalibrasyon ve koordinat dönüşümü robotik hasat sisteminin önemli adımlarıdır.

Genel olarak bu bölüm, görüntü işleme ile mekanik tasarım arasındaki bağlantıyı ortaya koymaktadır. Görüntü işleme tarafında elde edilen sayısal veriler, robot kol hareketi, gripper açıklığı ve toplama kararı için kullanılabilir hale getirilmiştir. Kamera tabanlı algılama, görüntüden özellik çıkarımı ve robotik hasat süreci birbirini tamamlayan aşamalar halinde ele alınabilir [4], [14], [19], [20]. Algılama, karar verme ve fiziksel toplama adımları bütünleşik bir sistem akışı içinde birleştirilmiştir.

10. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLAR

Bu bölümde, MATLAB tabanlı görüntü işleme iş akışından elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilmiştir. Aynı çilek görüntüsü üzerinde farklı filtreler uygulanmış, daha sonra HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon, morfolojik düzenleme ve özellik çıkarımı işlemleri gerçekleştirilmiştir. Böylece her filtrenin segmentasyon maskesi, boyut hesabı, merkez noktası ve genel ölçüm başarısı üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.

Deneysel değerlendirme yalnızca görsel sonuçlara göre yapılmamıştır. Filtrelerin başarısı; alan, çevre, centroid, major eksen, minor eksen, referans boyutlara göre göreli fark ve centroid sapması gibi sayısal değerlerle birlikte incelenmiştir. Bu yaklaşım, filtrelerin aynı referans görüntü ve ortak işlem akışı altındaki davranışlarının birlikte değerlendirilmesini sağlar.

10.1 Deneysel Görüntü ve MATLAB İş Akışı

Deneysel çalışmada aynı çilek görüntüsü tüm filtreler için ortak giriş görüntüsü olarak kullanılmıştır. Böylece sonuçlar arasındaki farkın farklı görüntülerden değil, uygulanan filtrelerden kaynaklanması sağlanmıştır. Görüntü işleme zincirinde filtreleme ve iyileştirme adımlarını segmentasyon ve bölge ölçümü takip edebilir; MATLAB ortamı bu işlemlerin aynı çalışma akışında uygulanmasına olanak sağlar [19], [25], [27]. Görüntü önce MATLAB ortamına aktarılmış, ardından filtreleme, renk uzayı dönüşümü, segmentasyon, morfolojik işlem ve özellik çıkarımı adımları uygulanmıştır.

Genel MATLAB iş akışı şu şekilde özetlenebilir:

$$I_{RGB} \rightarrow I_{filtered} \rightarrow HSV/CIELab \rightarrow M_{fruit} \rightarrow M_{clean} \rightarrow F_{features}$$

Burada I_{RGB} orijinal RGB görüntüyü, $I_{filtered}$ filtrelenmiş görüntüyü, M_{fruit} segmentasyon sonucunda elde edilen çilek maskesini, M_{clean}morfolojik işlemler sonrası temizlenmiş maskeyi ve $F_{features}$özellik çıkarımı sonuçlarını ifade eder.

Her filtre için aynı segmentasyon ve morfoloji adımları kullanılmıştır. Bu durum, filtrelerin etkisini adil şekilde karşılaştırmak için önemlidir. Çünkü değiştirilen temel parametre filtreleme

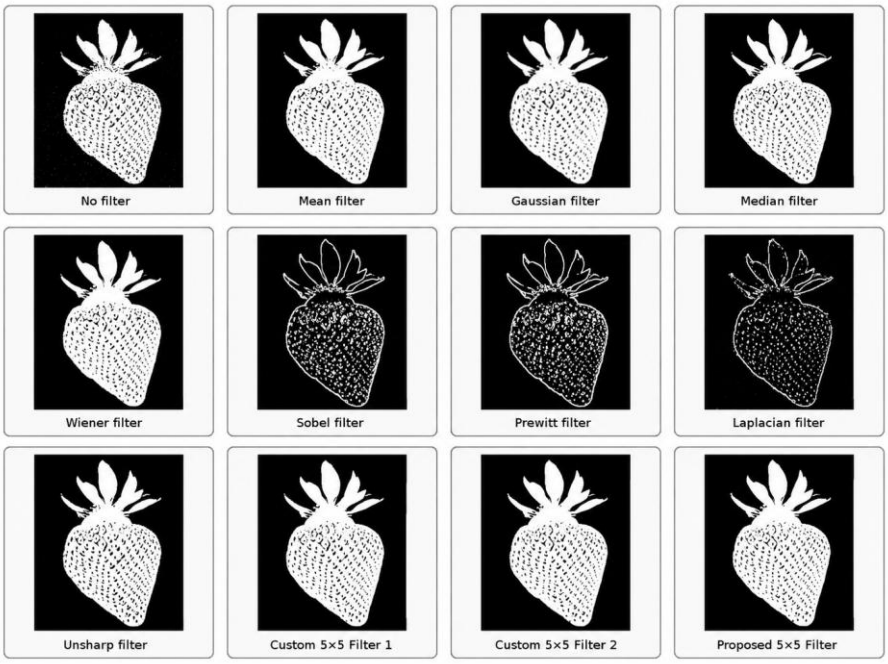
adımıdır. Son maskeden area, perimeter, centroid, major axis length ve minor axis length değerleri elde edilmiştir.

Bu bölümde kullanılan sonuçlar, filtrelerin yalnızca görüntüyü ne kadar iyi gösterdiğini değil, çileğin gerçek boyutuna ve merkez noktasına ne kadar yakın sonuç verdiğini de göstermektedir. Deneysel sonuçlar, görüntü işleme başarısı ile robotik hasat sistemine aktarılabilirlik açısından birlikte değerlendirilmiştir.

10.2 Filtreleme ve Segmentasyon Sonuçları



Şekil 10.1: Filtre sonuçları



Şekil 10.2: Segmentasyon sonuçları

Aynı çilek görüntüsü üzerinde farklı filtreler uygulanmış ve her filtreleme sonucundan sonra aynı HSV–CIELab segmentasyon adımları kullanılmıştır. Böylece elde edilen farkların segmentasyon yönteminden değil, doğrudan filtreleme etkisinden kaynaklanması sağlanmıştır. Filtreler; gürültü azaltma, sınır koruma, renk bilgisini koruma, maske kalitesi ve robotik hasada uygunluk açısından değerlendirilmiştir.

Mean filter görüntüyü yumuşatmış, ancak çilek sınırında bulanıklaşmaya neden olmuştur. Gaussian filter daha dengeli bir yumuşatma sağlamış ve çileğin genel formunu mean filtera göre daha iyi korumuştur. Median filter, küçük izole gürültüleri azaltırken sınır bilgisini daha kararlı tutmuştur. Wiener filter yerel değişimlere göre işlem yaptığı için bazı bölgelerde başarılı sonuç vermiş, ancak performansı görüntüdeki gürültü yapısına bağlı kalmıştır.

Sobel, Prewitt ve Laplacian filtreleri çilek sınırlarını daha görünür hale getirmiştir. Fakat bu filtreler renk bilgisini korumadığı için HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon için tek başına yeterli olmamıştır. Unsharp filter sınır ve detayları artırmıştır; ancak aynı zamanda yüzey dokusunu ve küçük gürültüleri de güçlendirebilmiştir.

Custom 5×5 filtreler ve önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, klasik filtrelere göre daha dengeli sonuç vermiştir. Özellikle önerilen 5×5 filtre, küçük gürültüleri azaltırken çileğin sınırını, genel formunu ve renk bilgisini korumuştur. Segmentasyon sonucunda daha temiz ve kararlı bir çilek maskesi elde edilmiştir.

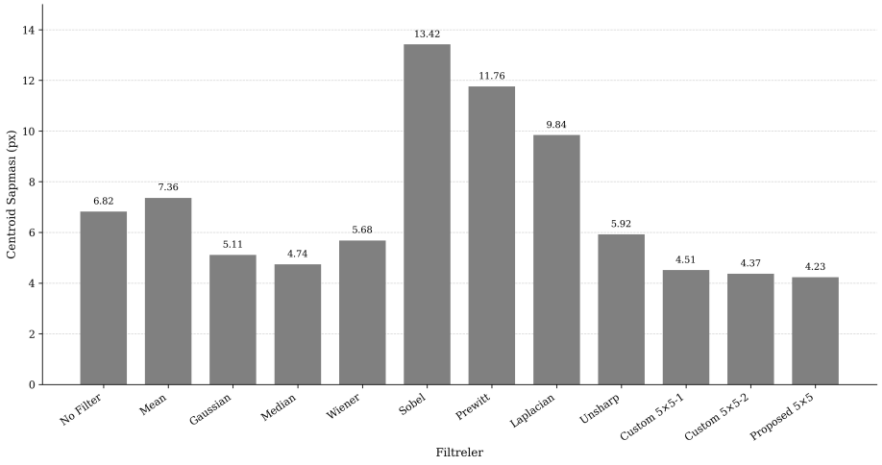
Tablo 10.1: Filtrelerin genel performans karşılaştırılması

Filtre	Gürültü Azaltma	Sınır Koruma	Renk Koruma	Segmentasyon Kalitesi	Robotik Uygunluk
No filter	Düşük	Orta	Yüksek	Orta	Orta
Mean filter	Orta	Düşük-Orta	Orta	Orta	Orta
Gaussian filter	İyi	Orta	İyi	İyi	İyi
Median filter	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Wiener filter	İyi	Orta	Orta-İyi	İyi	Orta-İyi
Sobel filter	Düşük	İyi	Düşük	Zayıf	Düşük
Prewitt filter	Düşük	İyi	Düşük	Zayıf	Düşük
Laplacian filter	Düşük-Orta	Orta	Düşük	Zayıf-Orta	Düşük
Unsharp filter	Düşük	İyi	Orta	Orta	Orta
Custom 5×5 Filter 1	İyi	İyi	İyi	İyi	İyi
Custom 5×5 Filter 2	Çok iyi	İyi	İyi	Çok iyi	Çok iyi
Proposed 5×5 Filter	Çok iyi	Çok iyi	İyi	Çok iyi	Çok iyi

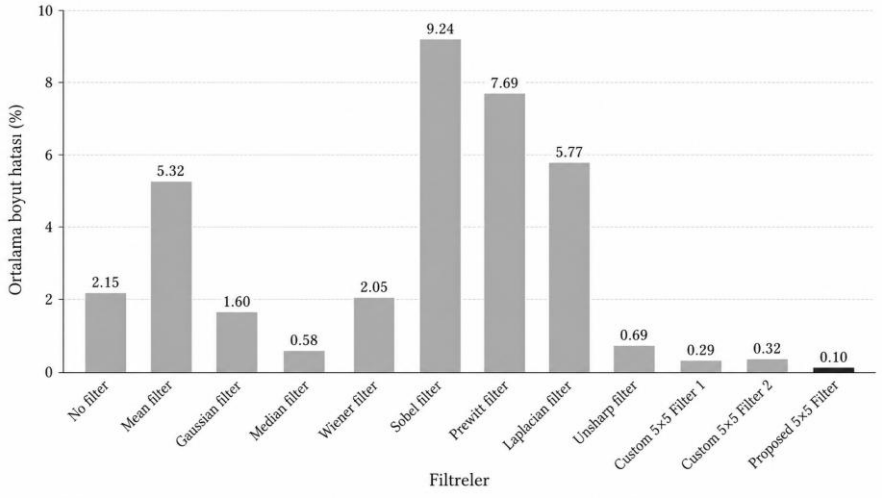
Tablo 10.1'e göre edge-based filtreler sınırları belirginleştirse de color-based segmentasyon için zayıf kalmıştır. Klasik smoothing filtreleri genel olarak daha kullanılabilir sonuçlar vermiştir. Ancak en dengeli sonuç, gürültü azaltma ve sınır koruma etkisini birlikte sağlayan önerilen 5×5 filtre ile elde edilmiştir.

10.3 Özellik Çıkarımı ve Ölçüm Sonuçları

Segmentasyon ve morfolojik işlemlerden sonra elde edilen temiz maske üzerinden çileğe ait geometrik özellikler çıkarılmıştır. Bu aşamada MATLAB regionprops fonksiyonu kullanılarak alan, çevre, centroid, major axis length ve minor axis length değerleri hesaplanmıştır [19], [25]. Bu değerler, hem görüntü işleme başarısını hem de robotik hasat için kullanılabilecek hedef ve boyut bilgilerini gösterir.



Şekil 10.3: Merkez sapması sonuçları



Şekil 10.4: Ortalama boyut göreli farkı

Özellik çıkarımı genel olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$F_{features} = \{A, P, C, L_{major}, L_{minor}\} \tag{10.1}$$

Burada A alanı, P çevreyi, C centroid noktasını, L_{major} major eksen uzunluğunu ve L_{minor} minor eksen uzunluğunu ifade eder.

Tablo 10.2: MATLAB özellik çıkarımı sonuçları

Özellik	MATLAB Çıktısı
Çilek Alanı	52538.00 piksel
Çilek Perimeter	965.18 piksel
Center X	308.96 piksel
Center Y	475.33 piksel
Major axis uzunluğu	300.55 piksel
Minor axis uzunluğu	236.96 piksel

Tablo 10.2'de verilen alan değeri, segmentasyon maskesi içinde çileğe ait toplam piksel sayısını göstermektedir. Çevre değeri, tespit edilen çilek sınırının uzunluğunu ifade eder. Centroid değeri ise çilek bölgesinin görüntü üzerindeki merkez noktasını verir.

$$C = (x_c, y_c) \tag{10.2}$$

Bu çalışmada centroid noktası şu şekilde elde edilmiştir:

$$C = (308.96,\ 475.33) \tag{10.3}$$

Major ve minor eksen uzunlukları, çileğin yaklaşık uzunluk ve genişlik bilgisini temsil eder. Bu değerler piksel cinsinden elde edilmiştir ve gerçek ölçüyle karşılaştırma yapılabilmesi için milimetreye dönüştürülmüştür.

$$L_{major} = 300.55 \text{ px} \tag{10.4}$$

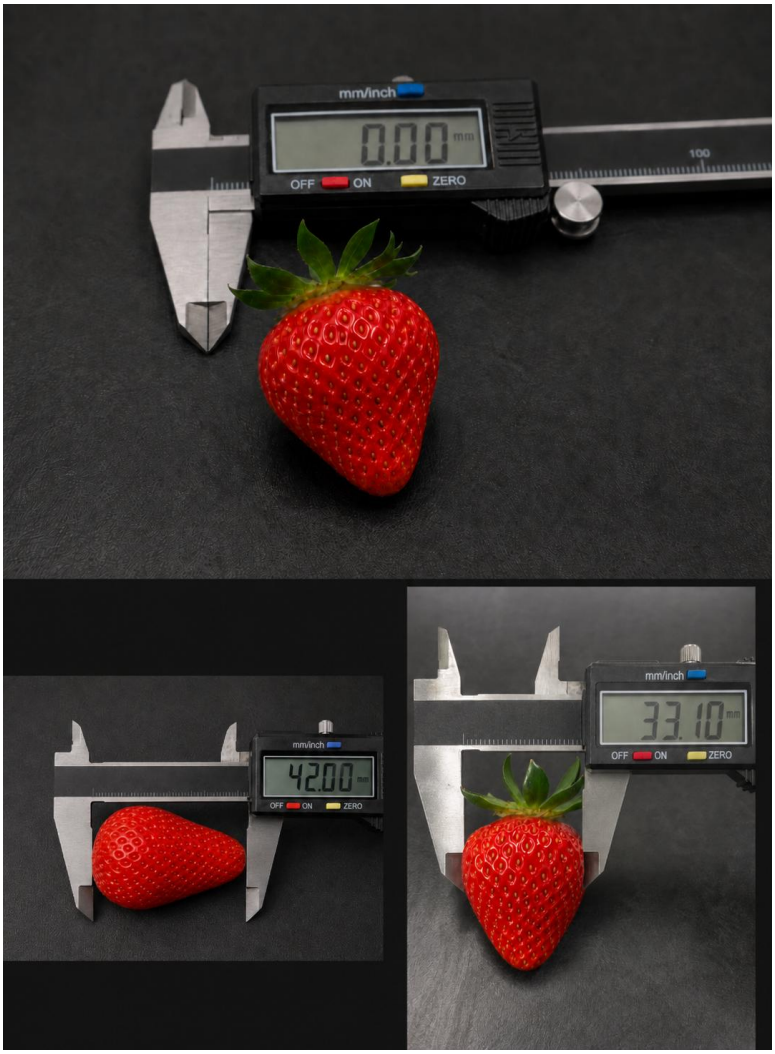
$$L_{minor} = 236.96 \text{ px} \tag{10.5}$$

Bu sonuçlar, önerilen 5×5 filtre sonrası elde edilen maskenin çilek formunu düzenli şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Centroid değeri robot kol için hedef noktası olarak, major ve minor eksen değerleri ise gripper açıklığının belirlenmesi için kullanılabilir.

10.4 Gerçek Ölçü ile Görüntü İşleme Sonuçlarının Karşılaştırılması

Görüntü işleme sonucunda elde edilen boyut değerleri, gerçek çilek ölçüleri ile karşılaştırılmıştır. Gerçek ölçümler kaliper ile alınmış ve çileğin X yönündeki uzunluğu 42.00

mm, Y yönündeki uzunluğu ise 33.10 mm olarak belirlenmiştir. Böylece her filtre sonucunda elde edilen ölçümlerin gerçek değere ne kadar yaklaştığı değerlendirilmiştir.



Şekil 10.5: Kumpas ile yapılan ölçüm

Boyut hata oranı şu şekilde hesaplanmıştır:

$$E = \frac{| D_{estimated} - D_{reference} |}{D_{reference}} \times 100 \tag{10.6}$$

Burada E, görüntü işleme sonucunda elde edilen boyut tahmini ile referans kumpas ölçüsü arasındaki göreli farkı, $D_{estimated}$ görüntü işleme sonucunda hesaplanan boyutu, $D_{reference}$ ise kumpas ile belirlenen referans boyutu ifade etmektedir. Piksel–milimetre dönüşüm katsayısı referans görüntü üzerinden belirlendiği için hesaplanan değerler bağımsız bir ölçüm doğrulaması olarak değil, filtre sonuçlarının ortak bir fiziksel ölçek üzerinde karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır..

Tablo 10.3: Filtre sonuçlarının referans boyutlara göre karşılaştırılması

Filtre	X Boyut Tahmini (mm)	Y Boyut Tahmini (mm)	Ortalama Göreli Fark (%)	Boyut Farkı Sınıfı
No filter	41.23	32.29	2.15	Orta
Mean filter	44.22	34.88	5.32	Yüksek
Gaussian filter	42.78	33.54	1.60	Orta
Median filter	42.29	33.26	0.58	Düşük
Wiener filter	42.95	33.71	2.05	Orta
Sobel filter	38.67	29.61	9.24	Yüksek
Prewitt filter	39.29	30.14	7.69	Yüksek
Laplacian filter	40.04	30.83	5.77	Yüksek
Unsharp filter	41.80	32.81	0.69	Düşük
Custom 5×5 Filter 1	42.21	33.08	0.29	Düşük
Custom 5×5 Filter 2	42.11	33.19	0.32	Düşük
Proposed 5×5 Filter	42.03	33.14	0.10	Düşük

Boyut farkı sınıflandırmasında %1'in altındaki değerler düşük, %1–5 arasındaki değerler orta, %5'in üzerindeki değerler yüksek göreli fark olarak değerlendirilmiştir. Bu sınıflandırma yalnızca çalışma içerisindeki filtre sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.

Tablo 10.3 incelendiğinde, kenar tabanlı Sobel, Prewitt ve Laplacian filtrelerinin referans boyutlara göre en yüksek göreli farkları oluşturduğu görülmektedir. Bu filtreler görüntü sınırlarını belirginleştirmesine rağmen, renk tabanlı segmentasyon için gerekli olan bölge bütünlüğünün ve renk dağılımının değişmesine neden olmuştur. Bu durum çilek maskesinin majör ve minör eksen uzunluklarını doğrudan etkilemiştir.

Mean filtrede sınırların yumuşaması nedeniyle boyut değerlerinin referans ölçülerden uzaklaştığı görülmüştür. Gaussian ve Wiener filtreler orta seviyede göreli fark üretirken, Median ve Unsharp filtreler daha düşük boyut farkları oluşturmuştur. Custom 5×5 filtreler ile önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre ise kullanılan görüntü ve segmentasyon parametreleri altında referans boyutlara daha yakın sonuçlar vermiştir.

Önerilen 5×5 filtre sonucunda majör ve minör eksenlere karşılık gelen boyut tahminleri sırasıyla 42.03 mm ve 33.14 mm olarak hesaplanmıştır. Kullanılan referans tabanlı piksel–milimetre dönüşümü altında ortalama göreli fark %0.10 olarak bulunmuştur. Bununla birlikte dönüşüm katsayısının aynı referans görüntü üzerinden belirlenmiş olması nedeniyle bu değer bağımsız bir boyut doğrulaması olarak değerlendirilmemiştir. Sonuç, farklı filtrelerin aynı görüntü ve referans görüntüden türetilen eksen bazlı dönüşüm katsayıları altında oluşturduğu boyut değişimlerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır. Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtrenin, incelenen referans görüntü üzerinde sınır korunumu ve boyut kararlılığı açısından dengeli bir sonuç verdiği görülmüştür.

Filtrelerin centroid konumu üzerindeki etkisi, milimetre cinsinden fiziksel hata yerine referans centroid noktasına göre piksel tabanlı sapma kullanılarak Şekil 10.3'te ayrıca değerlendirilmiştir.

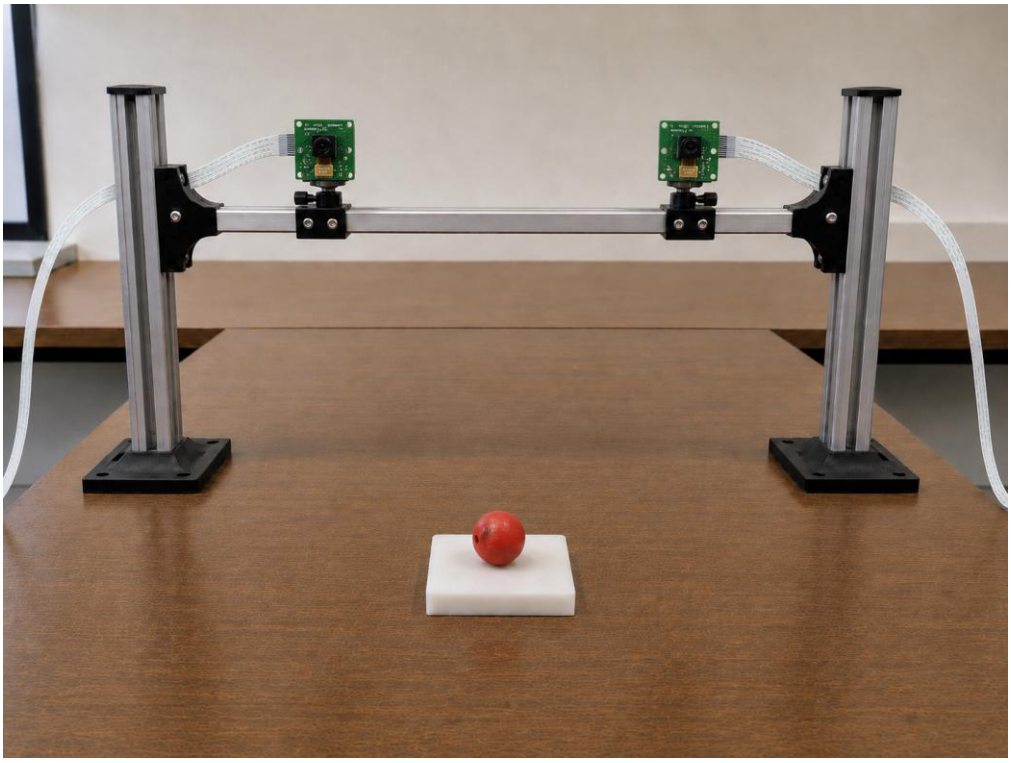
10.5 Stereo Kamera ile Mesafe Ölçüm Sonuçları

Stereo kamera tabanlı mesafe ölçüm yönteminin deneysel olarak değerlendirilmesi amacıyla çilek, kamera sisteminden bilinen farklı uzaklıklara yerleştirilmiştir. Her deney konumunda kamera sistemi ile çileğin merkez noktası arasındaki gerçek mesafe fiziksel olarak ölçülmüş, ardından sol ve sağ kamera görüntülerinden hesaplanan stereo mesafe ile karşılaştırılmıştır.

Mesafe hesabında sol ve sağ görüntülerde aynı çileğe ait merkez noktasının yatay piksel koordinatları kullanılmıştır. Sol görüntüden elde edilen yatay koordinat X_L, sağ görüntüden elde edilen yatay koordinat ise X_R, olarak belirlenmiştir. Bu iki değer arasındaki fark kullanılarak

disparity değeri hesaplanmış ve Bölüm 7.4'te açıklanan stereo derinlik bağıntısı yardımıyla çileğin kamera sistemine olan mesafesi bulunmuştur.

Deney süresince kameralar arasındaki baz mesafesi, görüntü çözünürlüğü, kamera yerleşimi ve odak ayarları sabit tutulmuştur. Böylece farklı deneyler arasında yalnızca çileğin kamera sistemine olan gerçek uzaklığı değiştirilmiş ve mesafe hesabının farklı konumlardaki davranışı incelenmiştir.



Şekil 10.6: Mesafe ölçüm düzeneği, Rasberry Pi 4B ve kamera modülleri

Şekil 10.6'da stereo kamera sistemi, hedef çilek ve gerçek mesafenin belirlenmesinde kullanılan fiziksel ölçüm düzeni gösterilmiştir. Gerçek mesafe, stereo kamera sisteminin referans düzlemi ile çileğin segmentasyon sonucu belirlenen merkez noktası arasındaki derinlik doğrultusunda ölçülmüştür.

Tablo 10.4: Gerçek ve stereo kamera ile hesaplanan mesafe sonuçlarının karşılaştırılması

Deney No	Gerçek Mesafe (mm)	Sol Görüntü xL (px)	Sağ Görüntü xR (px)	Disparity d (px)	Hesaplanan Mesafe (mm)	Mutlak Hata (mm)	Hata Oranı (%)
1	400.00	726.95	553.05	173.90	402.53	2.53	0.63
2	500.00	709.70	570.30	139.40	502.15	2.15	0.43
3	600.00	698.60	581.40	117.20	597.27	2.73	0.46
4	700.00	689.65	590.35	99.30	704.93	4.93	0.70
5	800.00	684.10	595.90	88.20	793.65	6.35	0.79
Ortalama	—	—	—	—	—	3.74	0.60

Tablo 10.5 incelendiğinde stereo kamera sistemiyle hesaplanan mesafe değerlerinin fiziksel olarak ölçülen gerçek mesafelere yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. En düşük mutlak hata mm gerçek mesafede 2.15 mm olarak, en yüksek mutlak hata ise 800 mm gerçek mesafede 6.35 mm olarak belirlenmiştir. Deneylerin ortalama mutlak hata değeri 3.74 mm, ortalama yüzde hata oranı ise % **0.60** olarak hesaplanmıştır.

Gerçek mesafe arttıkça sol ve sağ görüntüler arasındaki disparity değerinin azaldığı görülmüştür. Disparity değerinin küçülmesi, piksel koordinatlarında oluşabilecek küçük değişimlerin hesaplanan derinlik sonucu üzerindeki etkisini artırmıştır. Bu nedenle daha uzak mesafelerde ölçüm hassasiyetinin yakın mesafelere göre değişebileceği değerlendirilmiştir.

Elde edilen deneysel sonuçlar, stereo kamera yönteminin yalnızca teorik olarak açıklanmadığını, bilinen gerçek mesafelerle karşılaştırılarak uygulamalı olarak değerlendirildiğini göstermektedir. Hesaplanan derinlik bilgisi, robot kolun çileğe yaklaşma mesafesinin belirlenmesinde kullanılabilecek bir giriş verisi olarak değerlendirilmiştir.

10.6 Önerilen 5×5 Filtrenin Genel Başarımı

Filtre sonuçları birlikte değerlendirildiğinde önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtrenin en dengeli sonucu verdiği görülmüştür. Bu değerlendirme yalnızca görüntünün görsel kalitesine göre değil; göreli fark, centroid sapması, segmentasyon kararlılığı ve olgunluk değerlendirmesi birlikte dikkate alınarak yapılmıştır.

Filtre sonuçları; boyut tahminlerinin referans ölçülere göre göreli farkı, segmentasyon maskesinin bütünlüğü ve centroid konumundaki değişim birlikte değerlendirilerek karşılaştırılmıştır. Kullanılan ölçütler, filtrelerin aynı referans görüntü ve ortak işlem akışı altındaki davranışlarını karşılaştırmak amacıyla ele alınmıştır.

Önerilen 5×5 filtre için temel sonuçlar şu şekildedir:

Tablo 10.5: Önerilen merkez ağırlıklı 5x5 filtrenin referans görüntü üzerindeki temel sonuçları

Ölçüt	Sonuç
Majör eksen boyut tahmini	42.03 mm
Minör eksen boyut tahmini	33.14 mm
Majör eksen göreli farkı	%0.08
Minör eksen göreli farkı	%0.12
Ortalama boyut göreli farkı	%0.10
Centroid koordinatı	(308.96, 475.33) px
Referans centroid	(312.40, 477.80) px
Centroid sapması	4.23 px
Segmentasyon değerlendirmesi	Maske bütünlüğü korunmuştur
Genel değerlendirme	Referans görüntü üzerinde dengeli sonuç

Milimetre cinsinden boyut değerleri, referans görüntü üzerinden elde edilen piksel–milimetre dönüşüm katsayısı kullanılarak hesaplanmıştır. Bu nedenle göreli fark değerleri bağımsız bir ölçüm doğrulaması olarak değil, filtre sonuçlarının referans görüntüden türetilen eksen bazlı dönüşüm katsayıları altındaki karşılaştırması olarak değerlendirilmiştir. Centroid sapması görüntü düzleminde piksel cinsinden verilmiştir.

Bu sonuçlara göre önerilen filtre, referans boyutlarına yakın boyut değerlerini üretmiştir. Custom 5×5 Filter 1 centroid sapması bakımından daha düşük bir değer verse de önerilen 5×5 filtre boyut kararlılığı, merkez kararlılığı ve segmentasyon kalitesi birlikte değerlendirildiğinde daha dengeli bir performans göstermiştir.

Genel olarak önerilen 5×5 filtre, küçük gürültüleri azaltmış, çilek sınırını korumuş ve HSV–CIELab segmentasyonu için yeterli renk bilgisini sağlamıştır. Görüntüden çıkarılan konum ve geometrik bilgiler, robotik hasat sisteminde hedefleme ve kavrama kararlarıyla ilişkilendirilebilir [4], [19], [20]. Önerilen görüntü işleme akışı; hedef noktası, gripper açıklığı ve olgunluk kararı için kullanılabilecek sayısal çıktılar üretmiştir.

10.7 Bölüm Değerlendirmesi

Bu bölümde farklı filtrelerin çilek segmentasyonu ve geometrik özellik çıkarımı üzerindeki etkileri aynı referans görüntü ve ortak HSV–CIELab segmentasyon akışı kullanılarak karşılaştırılmıştır. Böylece filtreleme aşamasının maske bütünlüğü, eksen uzunlukları ve centroid konumu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Mean filtrede sınırların yumuşaması nedeniyle boyut tahminlerinin referans değerlerden uzaklaştığı görülmüştür. Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler sınırları belirginleştirmesine rağmen renk tabanlı segmentasyon sonucunda daha yüksek boyut farkları ve centroid sapmaları üretmiştir. Gaussian, Median, Wiener ve Unsharp filtreler ise daha dengeli sonuçlar vermiştir.

Custom 5×5 filtreler ve önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, kullanılan görüntü ve segmentasyon parametreleri altında düşük boyut farkları üretmiştir. Önerilen filtre sonucunda 42.03 mm ve 33.14 mm boyut tahminleri elde edilmiş, centroid sapması 4.23 px olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar bağımsız bir fiziksel doğruluk doğrulaması olarak değil, filtrelerin ortak referans ve ölçek altındaki göreli karşılaştırması olarak değerlendirilmiştir.

Sonuç olarak önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtrenin, incelenen referans görüntü üzerinde maske bütünlüğü, boyut kararlılığı ve centroid konumu arasında dengeli bir sonuç ürettiği görülmüştür. Bununla birlikte ana filtre karşılaştırmasının tek referans görüntü üzerinde gerçekleştirilmiş olması nedeniyle yöntemin farklı görüntü, ışık ve arka plan koşullarındaki genel başarısı hakkında kesin bir genelleme yapılmamıştır. Ek çilek görüntüleri üzerindeki piksel tabanlı uygulamalar EK B'de sunulmuştur.

11.TARTIŞMA

11.1 Filtre Sonuçlarının Genel Yorumu

Deneysel sonuçlar, filtreleme aşamasının çilek tespiti ve özellik çıkarımı üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermiştir. Aynı görüntü, aynı HSV–CIELab segmentasyon adımları ve aynı morfolojik işlemler kullanılmış olmasına rağmen, filtre değiştiğinde elde edilen maske ve ölçüm sonuçları da değişmiştir. Bu durum, filtreleme adımının yalnızca görsel bir iyileştirme değil, ölçüm doğruluğunu etkileyen temel bir ön işleme aşaması olduğunu göstermektedir.

Mean filter küçük gürültüleri azaltmasına rağmen çilek sınırını fazla yumuşatmıştır. Gaussian ve Median filtreler daha dengeli sonuçlar vermiştir. Wiener filter ise yerel istatistiklere göre çalıştığı için bazı bölgelerde başarılı olsa da genel performansı görüntüdeki gürültü yapısına bağlı kalmıştır.

Klasik yumuşatma filtrelerinin yanında, kenar bilgisini koruyarak yumuşatma yapmayı amaçlayan farklı yaklaşımlar da bulunmaktadır. Bilateral filtre, uzamsal yakınlık ile piksel değerleri arasındaki benzerliği birlikte değerlendirerek görüntüyü yumuşatırken belirgin sınırların korunmasını hedeflemektedir [28]. Bilateral filtre deneysel karşılaştırmaya dahil edilmemiştir; ancak elde edilen sonuçlar, çilek sınırlarının korunması açısından kenar koruyucu yumuşatma yöntemlerinin ilerleyen çalışmalarda ayrıca karşılaştırılabileceğini göstermektedir.

Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler çilek sınırını belirginleştirmiştir. Ancak bu filtreler renk bilgisini korumadığı için HSV ve CIELab tabanlı segmentasyon için tek başına yeterli olmamıştır. Unsharp filter sınır ve detayları artırmış, fakat yüzey dokusu ve küçük gürültüleri de güçlendirebildiği için kararlı maske üretiminde sınırlı kalmıştır.

11.2 Önerilen 5×5 Filtrenin Değerlendirilmesi

Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, klasik filtrelere göre daha dengeli bir sonuç üretmiştir. Bu filtrenin temel avantajı, merkez piksel bilgisini korurken yakın komşularla yumuşatma sağlamasıdır. Böylece çileğin genel formu ve sınır yapısı korunmuş, aynı zamanda küçük gürültüler azaltılmıştır.

Gerçek ölçü değerleri 42.00 mm ve 33.10 mm olarak referans alınmıştır. Önerilen 5×5 filtre sonucunda majör ve minör eksenlere karşılık gelen boyut tahminleri sırasıyla 42.03 mm ve 33.14 mm olarak elde edilmiştir. Referans görüntü üzerinden belirlenen referans görüntüden türetilen eksen bazlı dönüşüm katsayıları altında X yönündeki göreli fark %0.08, Y yönündeki göreli fark %0.12 ve ortalama göreli fark %0.10 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte dönüşüm katsayısının aynı referans görüntü üzerinden belirlenmiş olması nedeniyle bu değerler bağımsız bir ölçüm doğrulaması olarak değerlendirilmemiştir.

Önerilen filtre sonucunda centroid koordinatı (308.96, 475.33) px olarak hesaplanmış ve (312.40, 477.80) px referans centroid noktasına göre sapma yaklaşık 4.23 px olarak bulunmuştur. Bu değer fiziksel robot konum hatasını değil, görüntü düzlemindeki göreli centroid değişimini ifade etmektedir. Sonuçlar, önerilen filtrenin incelenen referans görüntü üzerinde maske bütünlüğü, boyut kararlılığı ve centroid konumu arasında dengeli bir sonuç ürettiğini göstermektedir.Özellikle centroid ve boyut değerlerinin kararlı olması, robot kol hedeflemesi ve gripper açıklığının belirlenmesi açısından önemlidir [4], [19], [20].

11.3 Robotik Hasat Açısından Değerlendirme ve Sınırlamalar

Robotik hasat uygulamasında görüntü işleme çıktıları doğrudan mekanik harekete dönüşür. Hatalı segmentasyon, yanlış centroid hesabı veya bozulmuş boyut bilgisi robot kolun yanlış hedefe yönelmesine neden olabilir. Önerilen 5×5 filtre, incelenen referans görüntü üzerinde dengeli bir ön işleme sonucu vermiştir. Centroid bilgisi robot kol için hedef noktayı, major ve minor eksen değerleri ise gripper açıklığını destekler. Olgunluk bilgisi de çileğin toplanıp toplanmayacağına karar verilmesi için kullanılabilir.

Çilek bölgesindeki kırmızı piksel oranı, renk tabanlı olgunluk değerlendirmesi için kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan karar ölçütleri Tablo 11.1’de verilmiştir.

Tablo 11.1: Renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinde kullanılan karar ölçütleri

Kırmızı Bölge Oranı (%)	Olgunluk Sınıfı	Açıklama
%0–49	Olgunlaşmamış	Kırmızı renk dağılımı sınırlıdır
%50–79	Yarı olgun	Kırmızı renk kısmen baskındır
%80–100	Olgun	Kırmızı renk meyve bölgesinde baskındır
Meyve dışı bölge	Değerlendirme dışı	Yaprak ve arka plan bölgeleri sınıflandırmaya dahil edilmez

Görüntü işleme tarafında elde edilen renk, boyut ve centroid bilgileri, kavramsal robotik toplama sisteminin karar aşamalarında kullanılabilecek giriş verileri olarak değerlendirilmiştir. Bölüm 5.12'de tanımlanan kırmızı bölge oranına dayalı sınıflandırma ölçütleri Tablo 11.1'de verilmiştir. Bu ölçütler, görüntü içerisindeki renk dağılımının değerlendirilmesine yönelik olup çileğin biyolojik olgunluğunun bağımsız olarak doğrulandığını göstermemektedir.

Çalışmanın bazı sınırlamaları bulunmaktadır. Ana filtre karşılaştırması kontrollü bir görüntü işleme akışı ve tek referans görüntü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ek çilek görüntüleri üzerinde segmentasyon ve piksel tabanlı özellik çıkarımı uygulanmış olsa da farklı ışık, gölge, yaprak örtüşmesi, kamera açısı ve arka plan koşulları sistematik olarak karşılaştırılmamıştır. Bu nedenle elde edilen sonuçlar kullanılan görüntüler ve belirlenen işlem parametreleriyle sınırlı olarak değerlendirilmiştir.

Çalışmada stereo kamera yaklaşımı sınırlı sayıdaki referans mesafe üzerinde incelenmiştir. Bununla birlikte gerçek bir robotik uygulamada yalnızca iki kameradan görüntü alınması yeterli değildir. Kamera iç parametrelerinin, iki kamera arasındaki geometrik ilişkinin ve kamera sistemi ile robot koordinat sistemi arasındaki dönüşümün birlikte belirlenmesi gerekir. Stereo görüş kalibrasyonu ile robot kinematik kalibrasyonunun birlikte ele alınması, görüntüden elde edilen konum bilgisinin manipülatör hareketine aktarılmasındaki konumsal uyumun geliştirilmesi açısından önemlidir [29].

Çok kameralı meyve lokalizasyonu, aynı meyvenin farklı kamera görüntüleri arasında eşleştirilmesi ve üç boyutlu konumunun tahmin edilmesi amacıyla robotik hasat sistemlerinde kullanılan yaklaşımlardan biridir [30]. Bu tezde önerilen çift kameralı yapı kavramsal tasarım ve sınırlı mesafe değerlendirmesi düzeyinde ele alınmıştır. Sistemin gerçek robotik uygulamadaki konum doğruluğunun belirlenebilmesi için kamera kalibrasyonu, görüntü eşleme, tekrarlı mesafe ölçümleri ve robot koordinatlarına dönüşüm adımlarının fiziksel deneylerle doğrulanması gerekmektedir.

Bu çalışmanın kapsamının literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılabilmesi için kullanılan veri miktarı, yöntem, değerlendirme ölçütleri ve elde edilen sayısal sonuçlar birlikte incelenmiştir. Literatürdeki çalışmaların bir kısmı etiketlenmiş büyük veri kümeleriyle meyve tespitine, bir kısmı fiziksel ve kimyasal ölçümlerle olgunluk tahminine, bir kısmı ise robotik sistem üzerinde üç boyutlu konum belirlemeye odaklanmaktadır. Bu nedenle farklı çalışmalarda sunulan başarı değerleri doğrudan aynı ölçüt olarak değerlendirilmemiş, karşılaştırma çalışma kapsamı ve doğrulama düzeyi üzerinden yapılmıştır.

Tablo 11.2: Çalışmanın seçili literatürle kapsam ve sayısal değerlendirme açısından karşılaştırılması

Çalışma	Kullanım Yöntemi	Veri veya Deney Kapsamı	Bildirilen Sonuç	Bu Tezle Karşılaştırılması
Yu. vd [3]	Mask R-Cnn ile olgun ve olgunlaşmamış çilek tespiti ve segmentasyonu	100 test görüntüsü	Hassasiyet %95.78, duyarlılık %95.41 ve MIoU %89.85	Etiketlenmiş görüntülerle eğitilen derin öğrenme modelidir. Bu tezde eğitim veri kümesi kullanılmamış, klasik filtrelerin tek referans görüntü üzerindeki etkisi karşılaştırılmıştır.
Basak vd. [13]	RGB, HSV ve HSL renk özellikleriyle MLR ve SVM-R modelleri	Altı olgunluk aşamasında toplam 600 çilek	HSV tabanlı SVM-R modelinde test aşamasında TSS için $R^2 = 0.792$, pH için $R^2 = 0.726$	Olgunluk renk bilgisinin yanında TSS ve pH ölçümleriyle doğrulanmıştır. Bu tezdeki olgunluk değerlendirmesi yalnızca renk dağılımına dayanmaktadır.
Ge vd. [37]	YOLOv4, RGB-D kamera ve yedi farklı 3B konum belirleme yöntemi	Varsayılan kamera modunda 267 çilek	Konumlandırma oranı kamera moduna göre %89.2–%98.9; işlem süresi yönteme göre 0.2–325.2 ms	Fiziksel RGB-D kamera verileri ve çok sayıda hedef kullanılmıştır. Bu tezde stereo mesafe değerlendirmesi sınırlı referans noktalarıyla gerçekleştirilmiştir.
Bu tez	MATLAB, klasik filtreler, Merkez ağırlıklı 5x5 filtre, HSV-CIELab segmentasyonu	Bir ana referans görüntüsü ve iki ek uygulama görüntüsü	Ana referans görüntüsünde 4.23 px centroid sapması ve %0.10 ortalama göreli boyut farkı	Sonuçlar ortak referans ölçeği altındaki filtre karşılaştırmasını göstermektedir; bağımsız genel tespit veya fiziksel ölçüm doğruluğu olarak değerlendirilmemiştir.

Tablo 11.2 incelendiğinde, literatürdeki çalışmaların bu tezden daha geniş veri kümeleri ve bağımsız doğrulama ölçütleri kullandığı görülmektedir. Bu nedenle bu tezde elde edilen göreli boyut farkları ile literatürdeki hassasiyet, duyarlılık, R^2 veya konumlandırma oranları doğrudan karşılaştırılabilir değildir. Veri miktarı ve deneysel doğrulama bakımından bu çalışmanın kapsamı daha sınırlıdır. Çalışmanın temel katkısı literatürdeki derin öğrenme veya fiziksel robot sistemlerinden daha yüksek başarı sağladığını göstermek değil; farklı ön işleme filtrelerinin aynı referans görüntü ve ortak segmentasyon akışı altındaki etkilerini sayısal olarak karşılaştırmak ve elde edilen çıktıları kavramsal robotik hasat tasarımıyla ilişkilendirmektir.

11.4 Bölüm Değerlendirmesi

Genel olarak değerlendirildiğinde, önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtrenin incelenen referans görüntü ve kullanılan segmentasyon parametreleri altında gürültü azaltma, sınır koruma, renk bilgisinin sürdürülmesi ve geometrik özelliklerin kararlılığı arasında dengeli bir sonuç verdiği görülmüştür. Mean ve Gaussian filtreler sınırların yumuşamasına neden olurken, Sobel, Prewitt ve Laplacian gibi kenar tabanlı filtreler renk tabanlı segmentasyon için gerekli bölge bütünlüğünü yeterli düzeyde koruyamamıştır. Bu değerlendirme, önerilen filtrenin tüm görüntüleme koşullarında üstün olduğunu değil, mevcut deney düzeninde karşılaştırılan filtreler arasında uygun bir denge oluşturduğunu göstermektedir.

Filtreleme sonrasında elde edilen ikili maskenin özellik çıkarımına hazırlanmasında morfolojik düzenleme işlemleri de önemli rol oynamıştır. Matematiksel morfolojide erozyon, genişleme, açma ve kapama işlemleri, görüntü bölgelerinin geometrik yapısının düzenlenmesi ve küçük istenmeyen bölgelerin azaltılması amacıyla kullanılan temel yöntemlerdir [31], [32]. Bu çalışmada morfolojik işlemler, filtreleme yöntemlerinin yerine geçen bağımsız bir çözüm olarak değil, segmentasyon maskesini özellik çıkarımı öncesinde düzenleyen destekleyici bir işlem aşaması olarak uygulanmıştır.

Kenar bilgisinin doğrudan çıkarılmasına yönelik yöntemler ise renk tabanlı segmentasyondan farklı bir amaç taşımaktadır. Canny yöntemi, kenar noktalarının belirlenmesi ve görüntü üzerindeki sınırların konumlandırılması için geliştirilen temel yaklaşımlardan biridir [33]. Perona ve Malik tarafından önerilen anizotropik difüzyon yöntemi ise görüntü yumuşatılırken anlamlı bölge sınırlarının korunmasını amaçlayan bir difüzyon modeli sunmaktadır [34]. Bu yöntemler mevcut filtre karşılaştırmasına dahil edilmemiştir. Bununla birlikte önerilen 5×5 filtrenin sınır koruma davranışının gelecekte Canny tabanlı kenar ölçütleri ve kenar koruyucu difüzyon yöntemleriyle karşılaştırılması, yöntemin farklı görüntü koşullarındaki davranışının daha ayrıntılı değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Sonuç olarak önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, MATLAB tabanlı çilek segmentasyonu ve geometrik özellik çıkarımı için kullanılabilecek bir ön işleme yöntemi olarak değerlendirilmiştir. Elde edilen boyut tahminleri ve centroid değerleri, bağımsız bir fiziksel doğruluk doğrulaması

olarak değil, ortak referans görüntü ve ölçek altında filtrelerin göreli davranışını gösteren sonuçlar olarak ele alınmıştır. Bu çıktılar, gerekli kamera kalibrasyonu, koordinat dönüşümü ve fiziksel robot doğrulamalarının gerçekleştirilmesi durumunda robot kol ve gripper kontrolüne giriş verisi sağlayabilecek görüntü tabanlı bilgiler olarak değerlendirilebilir.

12.SONUÇ VE GELECEK ÇALIŞMALAR

12.1 Genel Sonuçlar ve Tezin Katkıları

Bu tez çalışmasında, çilek meyvesinin görüntü işleme yöntemleriyle tespit edilmesi, geometrik özelliklerinin çıkarılması, renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi ve elde edilen bilgilerin robotik hasat sistemiyle ilişkilendirilmesi ele alınmıştır. MATLAB ortamında RGB görüntü üzerinde filtreleme, HSV ve CIELab renk uzaylarına dönüşüm, renk tabanlı segmentasyon, morfolojik düzenleme ve özellik çıkarımı işlemlerinden oluşan bir görüntü işleme akışı oluşturulmuştur.

Mean, Gaussian, Median, Wiener, Sobel, Prewitt, Laplacian, Unsharp ve özel 5×5 filtreler aynı referans görüntü ve ortak segmentasyon akışı içerisinde karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, filtre seçiminin segmentasyon maskesinin bütünlüğünü, majör ve minör eksen uzunluklarını ve centroid konumunu etkilediğini göstermiştir. Önerilen merkez ağırlıklı 5×5 filtre, kullanılan referans görüntü ve işlem parametreleri altında gürültü azaltma, sınır koruma ve geometrik özelliklerin kararlılığı arasında dengeli bir sonuç vermiştir.

Kumpasla belirlenen 42.00 mm ve 33.10 mm referans ölçülerine karşılık, önerilen filtre sonucunda 42.03 mm ve 33.14 mm boyut tahminleri elde edilmiştir. Referans görüntü üzerinden belirlenen piksel–milimetre ölçeği altında ortalama göreli fark %0.10 olarak hesaplanmıştır. Bununla birlikte bu değer, bağımsız kamera kalibrasyonuna dayanan bir ölçüm doğrulaması olarak değil, filtre sonuçlarının ortak fiziksel ölçek altında karşılaştırılması amacıyla değerlendirilmiştir. Önerilen filtre için centroid koordinatı (308.96, 475.33) px, referans centroid noktasına göre sapma ise yaklaşık 4.23 px olarak hesaplanmıştır. Bu değer fiziksel robot konum hatasını değil, görüntü düzlemindeki göreli centroid değişimini ifade etmektedir.

Ana filtre karşılaştırması tek referans çilek görüntüsü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yöntemin farklı çilek görüntülerindeki davranışını incelemek amacıyla iki ek görüntü üzerinde segmentasyon ve piksel tabanlı özellik çıkarımı uygulanmış; elde edilen alan, çevre, centroid, majör eksen ve minör eksen sonuçları EK B'de sunulmuştur. Bu uygulamalar yöntemin farklı örnekler üzerinde de uygulanabildiğini göstermiş, ancak farklı ışık ve saha koşullarındaki genel başarının doğrulanması olarak değerlendirilmemiştir.

Renk tabanlı olgunluk değerlendirmesi, çilek bölgesindeki kırmızı piksel oranına dayalı deneysel karar eşikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı renk dağılımlarına sahip birden fazla çileğin aynı görüntü içerisinde değerlendirildiği ek uygulama EK C'de verilmiştir. Bu sonuçlar görüntü tabanlı renk sınıflandırmasını göstermekte olup biyolojik olgunluğun Brix, sertlik veya uzman değerlendirmesiyle bağımsız doğrulaması niteliğinde değildir.

Stereo kamera yaklaşımı sınırlı sayıdaki referans mesafe üzerinde değerlendirilmiş; gerçek mesafe ile hesaplanan mesafe arasındaki farklar karşılaştırılmıştır. Robotik bölümde ise çift kameralı uç efektör ve çok parmaklı gripper yapısı kavramsal olarak tasarlanmıştır. Tezin temel katkısı, farklı filtrelerin çilek segmentasyonu ve geometrik özellik çıkarımı üzerindeki etkilerini aynı işlem akışı içerisinde karşılaştırması ve elde edilen görüntü tabanlı çıktıların gelecekte geliştirilebilecek robotik hasat sistemiyle nasıl ilişkilendirilebileceğini ortaya koymasıdır.

12.2 Gelecek Çalışmalar

Gelecek çalışmalarda sistemin daha fazla çilek görüntüsü üzerinde test edilmesi gerekmektedir. Farklı aydınlatma koşulları, gölge etkileri, yaprak örtüşmesi, farklı olgunluk seviyeleri, arka plan yapıları ve kamera açıları değerlendirmeye dahil edilmelidir. Böylece önerilen filtre ve segmentasyon yaklaşımının farklı görüntüleme koşullarındaki davranışı daha kapsamlı biçimde incelenebilir.

HSV ve CIELab eşik değerleri daha geniş bir görüntü veri seti kullanılarak yeniden belirlenebilir. Ayrıca klasik görüntü işleme yöntemlerinin derin öğrenme tabanlı çilek tespit modelleriyle karşılaştırılması, yöntemlerin veri gereksinimi, açıklanabilirlik, işlem yükü ve tespit performansı açısından birlikte değerlendirilmesine katkı sağlayabilir.

Renk tabanlı olgunluk değerlendirmesinin farklı görüntü alma koşullarında tekrarlanabilir hale getirilebilmesi için renk ölçüm sürecinin kontrollü olarak oluşturulması gerekmektedir. Aydınlatma koşullarının, görüntüleme geometrisinin ve CIE temelli renk tanımlamalarının birlikte değerlendirilmesi, renk bilgilerinin karşılaştırılabilir biçimde yorumlanması açısından önemlidir [35]. Bu nedenle gelecek çalışmalarda sabit aydınlatma düzeneği, referans renk kartı ve kamera renk kalibrasyonu kullanılarak HSV ve CIELab tabanlı olgunluk sınıflandırmasının

farklı çilek örnekleri üzerinde doğrulanması önerilmektedir. Ayrıca görüntü tabanlı sınıflandırmanın Brix değeri, sertlik ölçümü veya uzman değerlendirmesi gibi bağımsız olgunluk ölçütleriyle karşılaştırılması gerekmektedir.

Robotik çilek hasadında görüntüden elde edilen konum bilgisinin fiziksel toplama noktasına dönüştürülmesi, algılama sistemi ile robotik hareket arasındaki temel bağlantıyı oluşturmaktadır. Çileğin meyve ekseni ve toplama noktasının gerçek zamanlı olarak belirlenmesine yönelik çalışmalarda, görsel konum bilgisinin robotik hedefleme sürecinde kullanılması ele alınmıştır [36]. Üç boyutlu konum belirleme çalışmalarında ise görüntü üzerinde tespit edilen hedef bölge ile derinlik bilgisinin birlikte değerlendirilerek robot manipülatörüne 3B hedef konumu sağlanması incelenmiştir [37]. Görüntü sistemi, gripper ve hasat mekanizmasının aynı uç efektör yapısı üzerinde bütünleştirildiği çilek toplama sistemlerinde konumlandırma, kavrama ve meyvenin ayrılması işlemleri birlikte ele alınmıştır [38]. Bu doğrultuda, tez kapsamında elde edilen centroid ve boyut bilgilerinin gelecekte üç boyutlu konum belirleme ve sensör destekli gripper kontrolüyle birleştirilmesi önerilmektedir.

Robotik sistem tarafında stereo kamera veya derinlik kamerası kullanılarak çileğin 3B konumu daha ayrıntılı biçimde hesaplanabilir. Bunun için kamera iç ve dış parametrelerinin belirlenmesi, stereo kamera kalibrasyonu, kamera–robot koordinat dönüşümü ve tekrarlı mesafe ölçümleri gerçekleştirilmelidir. Gripper üzerine kuvvet veya basınç sensörleri eklenerek meyveye uygulanan temas kuvveti kontrol edilebilir. Sistemin gerçek bir robot kol üzerinde test edilmesi, görüntü işleme çıktılarının yaklaşma, kavrama ve toplama performansına etkisinin deneysel olarak değerlendirilmesini sağlayacaktır.

Genel olarak bu çalışma, MATLAB tabanlı çilek segmentasyonu, merkez ağırlıklı 5×5 filtre yaklaşımı ve kavramsal robotik hasat sistemi entegrasyonu için temel bir yapı sunmaktadır. Daha geniş görüntü veri setleri, bağımsız boyut kalibrasyonu, kontrollü olgunluk doğrulaması ve fiziksel robot deneyleriyle sistemin sera veya tarla koşullarındaki uygulanabilirliği gelecekte daha kapsamlı biçimde değerlendirilebilir.

13.KAYNAKLAR

[1] **A. Bhargava and A. Bansal**, "Fruits and vegetables quality evaluation using computer vision: A review," *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, vol. 33, no. 3, pp. 243–257, 2021.

[2] **E. Mavridou, E. Vrochidou, G. A. Papakostas, T. Pachidis, and V. G. Kaburlasos,** "Machine vision systems in precision agriculture for crop farming," *Journal of Imaging,* vol. 5, no. 12, article 89, 2019.

[3] **Y. Yu, K. Zhang, L. Yang, and D. Zhang,** "Fruit detection for strawberry harvesting robot in non-structural environment based on Mask R-CNN," *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 163, article 104846, 2019.

[4] **R. Hartley and A. Zisserman,** Multiple View Geometry in Computer Vision, 2nd ed. Cambridge University Press, 2004.

[5] **Y. Xiong, Y. Ge, L. Grimstad, and P. J. From,** "An autonomous strawberry-harvesting robot: Design, development, integration, and field evaluation," *Journal of Field Robotics,* vol. 37, no. 2, pp. 202–224, 2020.

[6] **M. Rizzo, M. Marcuzzo, A. Zangari, A. Gasparetto, and A. Albarelli,** "Fruit ripeness classification: A survey," *Artificial Intelligence in Agriculture,* vol. 7, pp. 44–57, 2023.

[7] **S. Cubero, N. Aleixos, E. Moltó, J. Gómez-Sanchis, and J. Blasco,** "Advances in machine vision applications for automatic inspection and quality evaluation of fruits and vegetables," *Food and Bioprocess Technology,* vol. 4, no. 4, pp. 487–504, 2011.

[8] **W. K. Pratt,** Digital Image Processing: PIKS Scientific Inside, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2007.

[9] **W. Burger and M. J. Burge,** Principles of Digital Image Processing: Core Algorithms. London, UK: Springer, 2009.

[10] **M. Sonka, V. Hlavac, and R. Boyle,** Image Processing, Analysis, and Machine Vision, 4th ed. Stamford, CT, USA: Cengage Learning, 2015.

[11] **Y. Xiong, P. J. From, and V. Isler,** "Design and evaluation of a novel cable-driven gripper with perception capabilities for strawberry picking robots," in Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 2018.

[12] **J. Shintake, V. Cacucciolo, D. Floreano, and H. Shea,** "Soft robotic grippers," *Advanced Materials,* vol. 30, no. 29, article 1707035, 2018.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

[13] **J. K. Basak, B. G. K. Madhavi, B. Paudel, N. E. Kim, and H. T. Kim,** "Prediction of total soluble solids and pH of strawberry fruits using RGB, HSV and HSL colour spaces and machine learning models," *Foods,* vol. 11, no. 14, article 2086, 2022.

[14] **K. Kapach, E. Barnea, R. Mairon, Y. Edan, and O. Ben-Shahar,** "Computer vision for fruit harvesting robots—State of the art and challenges ahead," *International Journal of Computational Vision and Robotics,* vol. 3, no. 1/2, pp. 4–34, 2012.

[15] **R. Kirk, G. Cielniak, and M. Mangan,** "Lab*Fruits: A rapid and robust outdoor fruit detection system combining bio-inspired features with one-stage deep learning networks," *Sensors,* vol. 20, no. 1, article 275, 2020.

[16] **G. Wyszecki and W. S. Stiles,** Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, 2nd ed. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, 1982.

[17] **G. Sharma and H. J. Trussell,** "Digital color imaging," *IEEE Transactions on Image Processing,* vol. 6, no. 7, pp. 901–932, 1997.

[18] **A. Gongal, S. Amatya, M. Karkee, Q. Zhang, and K. Lewis,** "Sensors and systems for fruit detection and localization: A review," *Computers and Electronics in Agriculture,* vol. 116, pp. 8–19, 2015.

[19] **R. M. Haralick and L. G. Shapiro,** Computer and Robot Vision, Vol. 1. Reading, MA, USA: Addison-Wesley, 1992.

[20] **C. W. Bac, E. J. Van Henten, J. Hemming, and Y. Edan,** "Harvesting robots for high-value crops: State-of-the-art review and challenges ahead," *Journal of Field Robotics,* vol. 31, no. 6, pp. 888–911, 2014.

[21] **A. K. Jain,** Fundamentals of Digital Image Processing. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1989.

[22] **R. C. Gonzalez and R. E. Woods,** Digital Image Processing, 4th ed. Pearson, 2018.

[23] **S. Das, A. Nath, and N. Neog,** "A comparative study of different noise filtering techniques in digital image processing," *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering,* vol. 3, no. 5, 2015.

[24] **N. Otsu,** "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics,* vol. 9, no. 1, pp. 62–66, 1979.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

[25] **MathWorks,** "regionprops: Measure properties of image regions," MATLAB Image Processing Toolbox Documentation, MathWorks, accessed 2026.

[26] **G. Sharma, Ed.,** Digital Color Imaging Handbook. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2003.

[27] **MathWorks,** "Image filtering and enhancement," MATLAB Image Processing Toolbox Documentation, MathWorks, accessed 2026.

[28] **C. Tomasi and R. Manduchi,** "Bilateral filtering for gray and color images," in Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 839–846, 1998.

[29] **C. K. Au, S. H. Lim, M. Duke, Y. C. Kuang, M. Redstall, and C. H. Ting,** "Integration of stereo vision system calibration and kinematic calibration for an autonomous kiwifruit harvesting system," *International Journal of Intelligent Robotics and Applications,* vol. 7, pp. 350–369, 2023.

[30] **S. S. Mehta and T. F. Burks,** "Multi-camera fruit localization in robotic harvesting," *IFAC-PapersOnLine,* vol. 49, no. 16, pp. 90–95, 2016.

[31] **P. Soille,** Morphological Image Analysis: Principles and Applications, 2nd ed. Berlin, Germany: Springer, 2004.

[32] **J. Serra,** Image Analysis and Mathematical Morphology. London, UK: Academic Press, 1982.

[33] **J. Canny,** "A computational approach to edge detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986.

[34] **P. Perona and J. Malik,** "Scale-space and edge detection using anisotropic diffusion," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,* vol. 12, no. 7, pp. 629–639, 1990.

[35] **R. W. G. Hunt and M. R. Pointer,** Measuring Colour, 4th ed. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011.

[36] Y. Yu, K. Zhang, H. Liu, L. Yang, and D. Zhang, "Real-Time Visual Localization of the Picking Points for a Ridge-Planting Strawberry Harvesting Robot," IEEE Access, vol. 8, pp. 116556–116568, 2020.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

[37] Y. Ge, Y. Xiong, and P. J. From, “Three-dimensional location methods for the vision system of strawberry-harvesting robots: development and comparison,” Precision Agriculture, vol. 24, pp. 764–782, 2023.

[38] Z. Sobol, S. Kurpaska, P. Nawara, N. Pedryc, G. Basista, J. Tabor, T. Hebda, and M. Tomasik, “Prototype of a New Head Grabber for Robotic Strawberry Harvesting with a Vision System,” Sensors, vol. 24, no. 20, article 6628, 2024.

EKLER

EKLER

EK A: MATLAB Filtreleme kodu

```
clc;
clear;
close all;

%% 1. Görüntü okuma
imageName = 'strawberry.jpg';
I = imread(imageName);

if size(I,3) == 1
    I = cat(3,I,I,I);
end

I = im2double(I);

%% 2. Gerçek ölçüm bilgileri
realMajor_mm = 42.00;
realMinor_mm = 33.10;
% Filtre sonuçlarının karşılaştırılmasında kullanılan referans centroid
referenceCentroid_px = [312.40, 477.80];
% Kalibrasyon için referans piksel değerleri
% Kendi önerilen filtre sonucundan aldığın değerlere göre güncellenebilir
refMajor_px = 300.55;
refMinor_px = 236.96;

mmPerPx_X = realMajor_mm / refMajor_px;
mmPerPx_Y = realMinor_mm / refMinor_px;
mmPerPx_avg = mean([mmPerPx_X, mmPerPx_Y]);

%% 3. Özel 5x5 filtre maskeleri
K1 = [1 1 1 1 1;
      1 2 2 2 1;
      1 2 4 2 1;
```

```
        1 2 2 2 1;
        1 1 1 1 1];

K1 = K1 / sum(K1(:));

K2 = [1 1 1 1 1;
        1 2 3 2 1;
        1 3 8 3 1;
        1 2 3 2 1;
        1 1 1 1 1];

K2 = K2 / sum(K2(:));

K3 = [0 1 1 1 0;
        1 2 4 2 1;
        1 4 12 4 1;
        1 2 4 2 1;
        0 1 1 1 0];

K3 = K3 / sum(K3(:));

%% 4. Filtre isimleri
filterNames = {
    'No Filter'
    'Mean Filter'
    'Gaussian Filter'
    'Median Filter'
    'Wiener Filter'
    'Sobel Filter'
    'Prewitt Filter'
    'Laplacian Filter'
    'Unsharp Filter'
    'Custom 5x5 Filter 1'
    'Custom 5x5 Filter 2'
```

```
    'Proposed 5x5 Filter'
};

%% 5. Sonuç değişkenleri
results = table();

outputFolder = 'MATLAB_Results';
if ~exist(outputFolder, 'dir')
    mkdir(outputFolder);
end

%% 6. Tüm filtreleri sırayla uygula
for i = 1:length(filterNames)

    currentFilter = filterNames{i};

    %% 6.1 Filtreleme
    Ifiltered = applySelectedFilter(I, currentFilter, K1, K2, K3);

    %% 6.2 HSV ve CIELab segmentasyon
    [maskHSV, maskLAB, maskCombined] = segmentStrawberry(Ifiltered);

    %% 6.3 Morfolojik iyileştirme
    maskFinal = cleanMask(maskCombined);

    %% 6.4 Özellik çıkarımı
    stats = regionprops(maskFinal, ...
        'Area', ...
        'Perimeter', ...
        'Centroid', ...
        'MajorAxisLength', ...
        'MinorAxisLength', ...
        'BoundingBox', ...
        'Orientation');
```

```
if isempty(stats)

    area_px = NaN;
    perimeter_px = NaN;
    centroid_x = NaN;
    centroid_y = NaN;
    major_px = NaN;
    minor_px = NaN;

    major_mm = NaN;
    minor_mm = NaN;

    majorDifference_percent = NaN;
    minorDifference_percent = NaN;
    averageSizeDifference_percent = NaN;

    centroidDeviation_px = NaN;

else

    % En büyük bölgeyi seç
    [~, idx] = max([stats.Area]);
    fruit = stats(idx);

    area_px = fruit.Area;
    perimeter_px = fruit.Perimeter;

    centroid_x = fruit.Centroid(1);
    centroid_y = fruit.Centroid(2);

    major_px = fruit.MajorAxisLength;
    minor_px = fruit.MinorAxisLength;
```

```
    % Referans görüntü üzerinden tanımlanan dönüşüm
    major_mm = major_px * mmPerPx_X;
    minor_mm = minor_px * mmPerPx_Y;

    % Referans boyutlara göre yüzde fark
    majorDifference_percent = ...
        abs(major_mm - realMajor_mm) / realMajor_mm * 100;

    minorDifference_percent = ...
        abs(minor_mm - realMinor_mm) / realMinor_mm * 100;

    averageSizeDifference_percent = mean( ...
        [majorDifference_percent, minorDifference_percent]);

    % Referans centroid noktasına göre Öklid uzaklığı
    centroidDeviation_px = hypot( ...
        centroid_x - referenceCentroid_px(1), ...
        centroid_y - referenceCentroid_px(2));

end

%% 6.5 Sonuçları tabloya ekleme
newRow = table( ...
    string(currentFilter), ...
    area_px, ...
    perimeter_px, ...
    centroid_x, ...
    centroid_y, ...
    major_px, ...
    minor_px, ...
    major_mm, ...
    minor_mm, ...
    majorDifference_percent, ...
    minorDifference_percent, ...
```

```
    averageSizeDifference_percent, ...
    centroidDeviation_px, ...
    'VariableNames', { ...
    'Filter', ...
    'Area_px', ...
    'Perimeter_px', ...
    'Centroid_X_px', ...
    'Centroid_Y_px', ...
    'MajorAxis_px', ...
    'MinorAxis_px', ...
    'MajorAxis_mm', ...
    'MinorAxis_mm', ...
    'MajorDifference_percent', ...
    'MinorDifference_percent', ...
    'AverageSizeDifference_percent', ...
    'CentroidDeviation_px'});

results = [results; newRow];
    %% 6.6 Görselleri kaydetme
    figure('Visible','off');

    subplot(2,3,1);
    imshow(I);
    title('Original Image');

    subplot(2,3,2);
    imshow(Ifiltered);
    title(currentFilter);

    subplot(2,3,3);
    imshow(maskHSV);
    title('HSV Mask');

    subplot(2,3,4);
```

```
imshow(maskLAB);
title('CIELab Mask');

subplot(2,3,5);
imshow(maskCombined);
title('Combined Mask');

subplot(2,3,6);
imshow(maskFinal);
title('Final Mask');

saveas(gcf, fullfile(outputFolder, currentFilter + "_Result.png"));
close;

%% 6.7 Tespit sonucunu çizdirme
figure('Visible','off');
imshow(I);
hold on;

if ~isempty(stats)
    rectangle('Position', fruit.BoundingBox, ...
              'EdgeColor', 'g', ...
              'LineWidth', 2);

    plot(centroid_x, centroid_y, 'r+', ...
         'MarkerSize', 12, ...
         'LineWidth', 2);

    text(centroid_x + 10, centroid_y, ...
         sprintf('C = (%.2f, %.2f)', centroid_x, centroid_y), ...
         'Color', 'yellow', ...
         'FontSize', 10, ...
         'FontWeight', 'bold');
```

```
        title(['Final Detection - ', currentFilter]);
    end

    hold off;
    saveas(gcf, fullfile(outputFolder, currentFilter + "_Detection.png"));
    close;

end

%% 7. Sonuçları kaydetme
writetable(results, ...
    fullfile(outputFolder, 'Filter_Comparison_Results.xlsx'));

disp('Filter comparison results:');
disp(results);

%% 8. En düşük ortalama boyut farkına sahip sonuç
[~, lowestDifferenceIdx] = min( ...
    results.AverageSizeDifference_percent, ...
    [], ...
    'omitnan');

lowestDifferenceResult = results(lowestDifferenceIdx, :);

disp('Lowest average size difference result:');
disp(lowestDifferenceResult);

%% 9. Ortalama boyut farkı grafiği
figure;

bar(results.AverageSizeDifference_percent, ...
    'FaceColor', [0.5 0.5 0.5]);

set(gca, 'XTick', 1:height(results));
```

```
set(gca, 'XTickLabel', results.Filter);


xtickangle(45);
ylabel('Ortalama Boyut Göreli Farkı (%)');
title('Filtrelere Göre Ortalama Boyut Göreli Farkı');
grid on;


saveas(gcf, fullfile( ...
    outputFolder, ...
    'Average_Size_Difference_Comparison.png'));


%% 10. Centroid sapması grafiği
figure;


bar(results.CentroidDeviation_px, ...
    'FaceColor', [0.5 0.5 0.5]);


set(gca, 'XTick', 1:height(results));
set(gca, 'XTickLabel', results.Filter);


xtickangle(45);
ylabel('Centroid Sapması (px)');
title('Filtrelere Göre Referans Merkezden Centroid Sapması');
grid on;


saveas(gcf, fullfile( ...
    outputFolder, ...
    'Centroid_Deviation_Comparison.png'));


disp('Processing completed. Results saved in MATLAB_Results folder.');
%% ========================================================================
%% Local Functions
%% ========================================================================
```

```
function Ifiltered = applySelectedFilter(I, filterName, K1, K2, K3)

    switch filterName

        case 'No Filter'
            Ifiltered = I;

        case 'Mean Filter'
            h = fspecial('average', [5 5]);
            Ifiltered = imfilter(I, h, 'replicate');

        case 'Gaussian Filter'
            Ifiltered = imgaussfilt(I, 1.0);

        case 'Median Filter'
            Ifiltered = zeros(size(I));
            for c = 1:3
                Ifiltered(:,:,c) = medfilt2(I(:,:,c), [5 5]);
            end

        case 'Wiener Filter'
            Ifiltered = zeros(size(I));
            for c = 1:3
                Ifiltered(:,:,c) = wiener2(I(:,:,c), [5 5]);
            end

        case 'Sobel Filter'
            gray = rgb2gray(I);
            edgeImage = edge(gray, 'sobel');
            Ifiltered = cat(3, edgeImage, edgeImage, edgeImage);
            Ifiltered = im2double(Ifiltered);

        case 'Prewitt Filter'
            gray = rgb2gray(I);
```

```
            edgeImage = edge(gray, 'prewitt');
            Ifiltered = cat(3, edgeImage, edgeImage, edgeImage);
            Ifiltered = im2double(Ifiltered);

        case 'Laplacian Filter'
            gray = rgb2gray(I);
            h = fspecial('laplacian', 0.2);
            lap = imfilter(gray, h, 'replicate');
            lap = mat2gray(abs(lap));
            Ifiltered = cat(3, lap, lap, lap);

        case 'Unsharp Filter'
            Ifiltered = imsharpen(I, ...
                'Radius', 2, ...
                'Amount', 1);

        case 'Custom 5x5 Filter 1'
            Ifiltered = imfilter(I, K1, 'replicate');

        case 'Custom 5x5 Filter 2'
            Ifiltered = imfilter(I, K2, 'replicate');

        case 'Proposed 5x5 Filter'
            Ifiltered = imfilter(I, K3, 'replicate');

        otherwise
            Ifiltered = I;
    end

end

function [maskHSV, maskLAB, maskCombined] = segmentStrawberry(I)

    %% HSV dönüşümü
```

```
    hsvImage = rgb2hsv(I);

    H = hsvImage(:,:,1);
    S = hsvImage(:,:,2);
    V = hsvImage(:,:,3);

    % Kırmızı renk HSV uzayında iki bölgede bulunabilir
    redMask1 = H >= 0.00 & H <= 0.08;
    redMask2 = H >= 0.92 & H <= 1.00;

    maskHSV = (redMask1 | redMask2) & ...
              S > 0.25 & ...
              V > 0.15;

    %% CIELab dönüşümü
    labImage = rgb2lab(I);

    L = labImage(:,:,1);
    a = labImage(:,:,2);
    b = labImage(:,:,3);

    % a kanalı kırmızı-yeşil ayrımında etkilidir
    maskLAB = a > 18 & ...
              L > 15 & ...
              b > 0;

    %% HSV + CIELab birleşimi
    maskCombined = maskHSV & maskLAB;

end

function maskClean = cleanMask(mask)

    maskClean = logical(mask);
```

```
    % Küçük gürültüleri kaldır
    maskClean = bwareaopen(maskClean, 300);

    % Boşlukları doldur
    maskClean = imfill(maskClean, 'holes');

    % Kenarları düzenle
    se1 = strel('disk', 3);
    se2 = strel('disk', 6);

    maskClean = imopen(maskClean, se1);
    maskClean = imclose(maskClean, se2);

    % En büyük nesneyi bırak
    cc = bwconncomp(maskClean);

    if cc.NumObjects > 0
        numPixels = cellfun(@numel, cc.PixelIdxList);
        [~, idx] = max(numPixels);

        tempMask = false(size(maskClean));
        tempMask(cc.PixelIdxList{idx}) = true;

        maskClean = tempMask;
    end

end
```

```
clc;
clear;
close all;

%% 1. Görüntünün okunması
imageName = 'strawberry.jpg';
```

```
I = imread(imageName);


if size(I,3) == 1
    I = cat(3, I, I, I);
end


I = im2double(I);
grayImage = rgb2gray(I);


%% 2. Çıktı klasörü
outputFolder = 'Ek_Kod_1_Kenar_Filtreleri';


if ~exist(outputFolder, 'dir')
    mkdir(outputFolder);
end


%% 3. Orijinal renkli görüntüden HSV maskesi
hsvImage = rgb2hsv(I);


H = hsvImage(:,:,1);
S = hsvImage(:,:,2);
V = hsvImage(:,:,3);


redMask1 = H >= 0.00 & H <= 0.08;
redMask2 = H >= 0.92 & H <= 1.00;


maskHSV = (redMask1 | redMask2) & ...
          S > 0.25 & ...
          V > 0.15;


%% 4. Orijinal renkli görüntüden CIELab maskesi
labImage = rgb2lab(I);


L = labImage(:,:,1);
```

```
a = labImage(:,:,2);
b = labImage(:,:,3);

maskLAB = a > 18 & ...
          L > 15 & ...
          b > 0;

%% 5. HSV ve CIELab maskelerinin birleştirilmesi
baseColorMask = maskHSV & maskLAB;

baseColorMask = bwareaopen(baseColorMask, 300);
baseColorMask = imfill(baseColorMask, 'holes');
baseColorMask = imclose(baseColorMask, strel('disk', 6));

%% 6. Kenar filtreleri
filterNames = {
    'Sobel'
    'Prewitt'
    'Laplacian'
};

resultsEdge = table();

for i = 1:numel(filterNames)

    currentFilter = filterNames{i};

    %% 6.1 Kenar görüntüsünün oluşturulması
    switch currentFilter

        case 'Sobel'

            edgeResponse = edge(grayImage, 'sobel');
            edgeDisplay = edgeResponse;
```

```
    case 'Prewitt'

        edgeResponse = edge(grayImage, 'prewitt');
        edgeDisplay = edgeResponse;

    case 'Laplacian'

        hLaplacian = fspecial('laplacian', 0.2);

        laplacianResponse = imfilter( ...
            grayImage, ...
            hLaplacian, ...
            'replicate');

        laplacianResponse = mat2gray(abs(laplacianResponse));

        thresholdValue = graythresh(laplacianResponse);
        edgeResponse = laplacianResponse > thresholdValue;
        edgeDisplay = laplacianResponse;

end

%% 6.2 Kenarların renk maskesi çevresinde sınırlandırılması
colorSupport = imdilate( ...
    baseColorMask, ...
    strel('disk', 15));

edgeResponse = edgeResponse & colorSupport;

%% 6.3 Kenarların bölge maskesine dönüştürülmesi
edgeResponse = bwareaopen(edgeResponse, 20);

edgeResponse = imdilate( ...
```

```
    edgeResponse, ...
    strel('disk', 2));

edgeResponse = imclose( ...
    edgeResponse, ...
    strel('disk', 12));

edgeRegion = imfill(edgeResponse, 'holes');

%% 6.4 Renk ve kenar bilgilerinin birlikte kullanılması
maskFinal = edgeRegion & ...
            imdilate(baseColorMask, strel('disk', 5));

maskFinal = imclose( ...
    maskFinal, ...
    strel('disk', 6));

maskFinal = imfill(maskFinal, 'holes');
maskFinal = bwareaopen(maskFinal, 300);

maskFinal = keepLargestObject(maskFinal);

%% 6.5 Özellik çıkarımı
stats = regionprops(maskFinal, ...
    'Area', ...
    'Perimeter', ...
    'Centroid', ...
    'MajorAxisLength', ...
    'MinorAxisLength', ...
    'BoundingBox', ...
    'Orientation');

if isempty(stats)
```

```
        area_px = NaN;
        perimeter_px = NaN;
        centroid_x = NaN;
        centroid_y = NaN;
        major_px = NaN;
        minor_px = NaN;
        orientation_deg = NaN;

    else

        [~, largestIndex] = max([stats.Area]);
        fruit = stats(largestIndex);

        area_px = fruit.Area;
        perimeter_px = fruit.Perimeter;

        centroid_x = fruit.Centroid(1);
        centroid_y = fruit.Centroid(2);

        major_px = fruit.MajorAxisLength;
        minor_px = fruit.MinorAxisLength;
        orientation_deg = fruit.Orientation;

    end

    %% 6.6 Sonuç tablosunun oluşturulması
    newRow = table( ...
        string(currentFilter), ...
        area_px, ...
        perimeter_px, ...
        centroid_x, ...
        centroid_y, ...
        major_px, ...
        minor_px, ...
```

```
    orientation_deg, ...
    'VariableNames', { ...
    'Filter', ...
    'Area_px', ...
    'Perimeter_px', ...
    'Centroid_X_px', ...
    'Centroid_Y_px', ...
    'MajorAxis_px', ...
    'MinorAxis_px', ...
    'Orientation_degree'});

resultsEdge = [resultsEdge; newRow];

%% 6.7 İşlem aşamalarının kaydedilmesi
figure('Visible', 'off');

subplot(2,3,1);
imshow(I);
title('Orijinal Görüntü');

subplot(2,3,2);
imshow(edgeDisplay, []);
title([currentFilter, ' Filtre Sonucu']);

subplot(2,3,3);
imshow(maskHSV);
title('HSV Maskesi');

subplot(2,3,4);
imshow(maskLAB);
title('CIELab Maskesi');

subplot(2,3,5);
imshow(edgeRegion);
```

```
title('Kenar Bölgesi');


subplot(2,3,6);
imshow(maskFinal);
title('Nihai Maske');


exportgraphics( ...
    gcf, ...
    fullfile( ...
        outputFolder, ...
        sprintf('%s_Islem_Asamalari.png', currentFilter)), ...
    'Resolution', 300);


close;


%% 6.8 Tespit sonucunun kaydedilmesi
figure('Visible', 'off');
imshow(I);
hold on;


if ~isempty(stats)


    rectangle( ...
        'Position', fruit.BoundingBox, ...
        'EdgeColor', 'g', ...
        'LineWidth', 2);


    plot( ...
        centroid_x, ...
        centroid_y, ...
        'r+', ...
        'MarkerSize', 12, ...
        'LineWidth', 2);
```

```
        text( ...
            centroid_x + 10, ...
            centroid_y, ...
            sprintf('(%.2f, %.2f)', centroid_x, centroid_y), ...
            'Color', 'yellow', ...
            'FontSize', 10, ...
            'FontWeight', 'bold');

    end

    title([currentFilter, ' Filtresi ile Tespit']);
    hold off;

    exportgraphics( ...
        gcf, ...
        fullfile( ...
            outputFolder, ...
            sprintf('%s_Tespit_Sonucu.png', currentFilter)), ...
        'Resolution', 300);

    close;

end

%% 7. Sonuçların kaydedilmesi
disp(resultsEdge);

writetable( ...
    resultsEdge, ...
    fullfile(outputFolder, 'Kenar_Filtreleri_Sonuclari.xlsx'));

writetable( ...
    resultsEdge, ...
    fullfile(outputFolder, 'Kenar_Filtreleri_Sonuclari.csv'));
```

```
disp('Sobel, Prewitt ve Laplacian analizleri tamamlandı.');

%% ========================================================================
%% Yerel fonksiyon
%% ========================================================================

function outputMask = keepLargestObject(inputMask)

    outputMask = false(size(inputMask));

    connectedComponents = bwconncomp(inputMask);

    if connectedComponents.NumObjects == 0
        return;
    end

    objectAreas = cellfun( ...
        @numel, ...
        connectedComponents.PixelIdxList);

    [~, largestIndex] = max(objectAreas);

    outputMask( ...
        connectedComponents.PixelIdxList{largestIndex}) = true;

end
```

```
clc;
clear;
close all;

%% 1. Görüntünün okunması
imageName = 'straw_05_combine.jpg';
Ioriginal = imread(imageName);
```

```
if size(Ioriginal,3) == 1
    Ioriginal = cat(3, Ioriginal, Ioriginal, Ioriginal);
end

I = im2double(Ioriginal);

%% 2. Çıktı klasörü
outputFolder = 'Ek_Kod_2_Olgunluk_Analizi';

if ~exist(outputFolder, 'dir')
    mkdir(outputFolder);
end

%% 3. Önerilen 5x5 filtre
K3 = [0 1 1 1 0;
      1 2 4 2 1;
      1 4 12 4 1;
      1 2 4 2 1;
      0 1 1 1 0];

K3 = K3 / sum(K3(:));

Ifiltered = imfilter(I, K3, 'replicate');

%% 4. HSV tabanlı kırmızı bölge maskesi
hsvImage = rgb2hsv(Ifiltered);

H = hsvImage(:,:,1);
S = hsvImage(:,:,2);
V = hsvImage(:,:,3);

redMask1 = H >= 0.00 & H <= 0.08;
redMask2 = H >= 0.92 & H <= 1.00;
```

```
maskHSV = (redMask1 | redMask2) & ...
        S > 0.25 & ...
        V > 0.15;

%% 5. CIELab tabanlı kırmızı bölge maskesi
labImage = rgb2lab(Ifiltered);

L = labImage(:,:,1);
a = labImage(:,:,2);
b = labImage(:,:,3);

maskLAB = a > 18 & ...
        L > 15 & ...
        b > 0;

%% 6. Kırmızı bölgenin belirlenmesi
redMask = maskHSV & maskLAB;

redMask = bwareaopen(redMask, 20);
redMask = imclose(redMask, strel('disk', 2));

%% 7. Görüntüdeki meyve sayısı
fruitCount = 6;

fruitNumber = (1:fruitCount)';
area_px = zeros(fruitCount,1);
centroid_x = zeros(fruitCount,1);
centroid_y = zeros(fruitCount,1);
major_px = zeros(fruitCount,1);
minor_px = zeros(fruitCount,1);
redRatio_percent = zeros(fruitCount,1);
maturityClass = strings(fruitCount,1);
```

```
boundingBoxes = zeros(fruitCount,4);
fruitMasks = false(size(redMask,1), size(redMask,2), fruitCount);

%% 8. Altı çileğin kullanıcı tarafından işaretlenmesi
figure;
imshow(Ioriginal);

title({ ...
    'Her çileğin dış sınırını serbest elle işaretleyiniz.', ...
    'Yaprakları meyve alanına dahil etmeyiniz.'});

for k = 1:fruitCount

    disp(['Meyve ', num2str(k), ...
          ' sınırını işaretleyiniz ve çift tıklayarak tamamlayınız.']);

    roi = drawfreehand( ...
        'Label', num2str(k), ...
        'FaceAlpha', 0.05);

    wait(roi);

    currentFruitMask = createMask(roi);
    fruitMasks(:,:,k) = currentFruitMask;

    stats = regionprops(currentFruitMask, ...
        'Area', ...
        'Centroid', ...
        'MajorAxisLength', ...
        'MinorAxisLength', ...
        'BoundingBox');

    if isempty(stats)
```

```
    area_px(k) = NaN;
    centroid_x(k) = NaN;
    centroid_y(k) = NaN;
    major_px(k) = NaN;
    minor_px(k) = NaN;
    redRatio_percent(k) = NaN;
    maturityClass(k) = "Belirlenemedi";

    continue;

end

[~, largestIndex] = max([stats.Area]);
fruit = stats(largestIndex);

area_px(k) = fruit.Area;
centroid_x(k) = fruit.Centroid(1);
centroid_y(k) = fruit.Centroid(2);
major_px(k) = fruit.MajorAxisLength;
minor_px(k) = fruit.MinorAxisLength;
boundingBoxes(k,:) = fruit.BoundingBox;

%% 8.1 Meyve içindeki kırmızı yüzey oranı
redPixels = nnz(redMask & currentFruitMask);
totalFruitPixels = nnz(currentFruitMask);

if totalFruitPixels > 0

    redRatio_percent(k) = ...
        100 * redPixels / totalFruitPixels;

else

    redRatio_percent(k) = NaN;
```

```
    end

    %% 8.2 Olgunluk sınıfının belirlenmesi
    if redRatio_percent(k) >= 80

        maturityClass(k) = "Olgun";

    elseif redRatio_percent(k) >= 50

        maturityClass(k) = "Yarı olgun";

    else

        maturityClass(k) = "Olgunlaşmamış";

    end

end

close;

%% 9. Meyve bazlı sonuç tablosu
maturityResults = table( ...
    fruitNumber, ...
    area_px, ...
    centroid_x, ...
    centroid_y, ...
    major_px, ...
    minor_px, ...
    redRatio_percent, ...
    maturityClass, ...
    'VariableNames', { ...
    'Meyve_No', ...
```

```
    'Alan_px', ...
    'Centroid_X_px', ...
    'Centroid_Y_px', ...
    'Major_Eksen_px', ...
    'Minor_Eksen_px', ...
    'Kirmizi_Bolge_Orani_percent', ...
    'Olgunluk_Sinifi'});

disp(maturityResults);

%% 10. Genel olgunluk dağılımı
classNames = [
    "Olgunlaşmamış"
    "Yarı olgun"
    "Olgun"
];

classCounts = [
    sum(maturityClass == "Olgunlaşmamış")
    sum(maturityClass == "Yarı olgun")
    sum(maturityClass == "Olgun")
];

maturitySummary = table( ...
    classNames, ...
    classCounts, ...
    'VariableNames', { ...
    'Olgunluk_Sinifi', ...
    'Meyve_Sayisi'});

disp(maturitySummary);

%% 11. Sonuç görüntüsünün oluşturulması
figure('Visible', 'off');
```

```
imshow(Ioriginal);
hold on;


for k = 1:fruitCount


    if isnan(area_px(k))
        continue;
    end


    rectangle( ...
        'Position', boundingBoxes(k,:), ...
        'EdgeColor', 'yellow', ...
        'LineWidth', 2);


    plot( ...
        centroid_x(k), ...
        centroid_y(k), ...
        'c+', ...
        'MarkerSize', 10, ...
        'LineWidth', 2);


    text( ...
        boundingBoxes(k,1), ...
        max(1, boundingBoxes(k,2) - 10), ...
        sprintf( ...
            '%d - %s - %.2f%%', ...
            k, ...
            maturityClass(k), ...
            redRatio_percent(k)), ...
        'Color', 'white', ...
        'BackgroundColor', 'black', ...
        'FontSize', 9, ...
        'FontWeight', 'bold');
```

```
end

title('Çileklerin Renk Tabanlı Olgunluk Analizi');
hold off;

exportgraphics( ...
    gcf, ...
    fullfile(outputFolder, 'Coklu_Olgunluk_Analizi.png'), ...
    'Resolution', 300);

close;

%% 12. Kırmızı maske görüntüsünün kaydedilmesi
figure('Visible', 'off');

subplot(1,3,1);
imshow(Ioriginal);
title('Orijinal Görüntü');

subplot(1,3,2);
imshow(redMask);
title('Kırmızı Bölge Maskesi');

subplot(1,3,3);
imshow(any(fruitMasks,3));
title('İşaretlenen Çilek Bölgeleri');

exportgraphics( ...
    gcf, ...
    fullfile(outputFolder, 'Olgunluk_Analizi_Asamalari.png'), ...
    'Resolution', 300);

close;
```

```
%% 13. Sonuçların kaydedilmesi
excelFile = fullfile( ...
    outputFolder, ...
    'Coklu_Olgunluk_Analizi_Sonuclari.xlsx');

writetable( ...
    maturityResults, ...
    excelFile, ...
    'Sheet', 'Meyve_Bazli_Sonuclar');

writetable( ...
    maturitySummary, ...
    excelFile, ...
    'Sheet', 'Genel_Dagilim');

writetable( ...
    maturityResults, ...
    fullfile(outputFolder, ...
    'Coklu_Olgunluk_Analizi_Sonuclari.csv'));

disp('Çoklu olgunluk analizi tamamlandı.');
```

```
clc;
clear;
close all;

%% 1. Kalibrasyon görüntüsü
calibrationImageName = 'calibration_reference.jpg';

Icalibration = imread(calibrationImageName);

if size(Icalibration,3) == 1
    Icalibration = cat( ...
        3, ...
        Icalibration, ...
```

```
        Icalibration, ...
        Icalibration);
end

%% 2. Referans nesnenin gerçek uzunluğu
% Bu değer cetvel, kumpas veya kalibrasyon nesnesinden alınmalıdır.
knownReferenceLength_mm = 20.00;

%% 3. Kalibrasyon çizgisinin seçilmesi
figure;
imshow(Icalibration);

title({ ...
    'Gerçek uzunluğu bilinen referans aralığını işaretleyiniz.', ...
    sprintf('Girilen gerçek uzunluk: %.2f mm', ...
    knownReferenceLength_mm)});

calibrationLine = drawline;

wait(calibrationLine);

linePosition = calibrationLine.Position;

referenceLength_px = hypot( ...
    linePosition(2,1) - linePosition(1,1), ...
    linePosition(2,2) - linePosition(1,2));

close;

%% 4. Tek piksel-milimetre dönüşüm oranı
mmPerPx = knownReferenceLength_mm / referenceLength_px;

fprintf('Referans uzunluk: %.2f mm\n', ...
    knownReferenceLength_mm);
```

```
fprintf('Referans piksel uzunluğu: %.4f px\n', ...
    referenceLength_px);

fprintf('Piksel-milimetre oranı: %.8f mm/px\n', ...
    mmPerPx);

%% 5. Kalibrasyon sonucunun kaydedilmesi
save( ...
    'Independent_Calibration.mat', ...
    'knownReferenceLength_mm', ...
    'referenceLength_px', ...
    'mmPerPx');

%% 6. Doğrulama görüntüleri
% Bütün görüntüler aynı kamera, lens, çözünürlük, çekim mesafesi
% ve görüntü düzleminde elde edilmelidir.

testImages = {
    'strawberry_test_01.jpg'
    'strawberry_test_02.jpg'
    'strawberry_test_03.jpg'
};

%% 7. Kumpasla ölçülen gerçek değerler

realMajor_mm = [
    a1
    a2
    a3
];

realMinor_mm = [
    b1
```

```
    b2
    b3
];

numberOfTests = numel(testImages);

%% 8. Sonuç değişkenleri
testNumber = (1:numberOfTests)';
imageNames = string(testImages);

major_px = zeros(numberOfTests,1);
minor_px = zeros(numberOfTests,1);

calculatedMajor_mm = zeros(numberOfTests,1);
calculatedMinor_mm = zeros(numberOfTests,1);

majorAbsoluteError_mm = NaN(numberOfTests,1);
minorAbsoluteError_mm = NaN(numberOfTests,1);

majorError_percent = NaN(numberOfTests,1);
minorError_percent = NaN(numberOfTests,1);

averageError_percent = NaN(numberOfTests,1);

%% 9. Çıktı klasörü
outputFolder = 'Ek_Kod_3_Bagimsiz_Kalibrasyon';

if ~exist(outputFolder, 'dir')
    mkdir(outputFolder);
end

calibrationSize = size(Icalibration);

%% 10. Test görüntülerinin değerlendirilmesi
```

```
for i = 1:numberOfTests

    Itest = imread(testImages{i});

    if size(Itest,3) == 1
        Itest = cat(3, Itest, Itest, Itest);
    end

    %% 10.1 Görüntü çözünürlüğünün kontrol edilmesi
    if size(Itest,1) ~= calibrationSize(1) || ...
       size(Itest,2) ~= calibrationSize(2)

        error([ ...
            'Test görüntüsünün çözünürlüğü kalibrasyon ', ...
            'görüntüsüyle aynı değildir: ', ...
            testImages{i}]);

    end

    %% 10.2 Çilek sınırının işaretlenmesi
    figure;
    imshow(Itest);

    title({ ...
        ['Test görüntüsü ', num2str(i)], ...
        'Çileğin dış sınırını işaretleyiniz.'});

    fruitROI = drawfreehand( ...
        'FaceAlpha', 0.05);

    wait(fruitROI);

    fruitMask = createMask(fruitROI);
```

```
close;

%% 10.3 Özellik çıkarımı
stats = regionprops(fruitMask, ...
    'Area', ...
    'Centroid', ...
    'MajorAxisLength', ...
    'MinorAxisLength', ...
    'BoundingBox', ...
    'Orientation');

if isempty(stats)

    major_px(i) = NaN;
    minor_px(i) = NaN;

    calculatedMajor_mm(i) = NaN;
    calculatedMinor_mm(i) = NaN;

    continue;

end

[~, largestIndex] = max([stats.Area]);
fruit = stats(largestIndex);

major_px(i) = fruit.MajorAxisLength;
minor_px(i) = fruit.MinorAxisLength;

%% 10.4 Aynı dönüşüm oranının uygulanması
calculatedMajor_mm(i) = major_px(i) * mmPerPx;
calculatedMinor_mm(i) = minor_px(i) * mmPerPx;

%% 10.5 Kumpas ölçümleriyle hata hesabı
```

```
if isfinite(realMajor_mm(i))

    majorAbsoluteError_mm(i) = abs( ...
        calculatedMajor_mm(i) - realMajor_mm(i));

    majorError_percent(i) = ...
        majorAbsoluteError_mm(i) / ...
        realMajor_mm(i) * 100;

end

if isfinite(realMinor_mm(i))

    minorAbsoluteError_mm(i) = abs( ...
        calculatedMinor_mm(i) - realMinor_mm(i));

    minorError_percent(i) = ...
        minorAbsoluteError_mm(i) / ...
        realMinor_mm(i) * 100;

end

if isfinite(majorError_percent(i)) && ...
   isfinite(minorError_percent(i))

    averageError_percent(i) = mean([ ...
        majorError_percent(i), ...
        minorError_percent(i)]);

end

%% 10.6 Major ve minor eksenlerin çizilmesi
centroid = fruit.Centroid;
```

```
orientationRad = deg2rad(-fruit.Orientation);

majorHalfLength = fruit.MajorAxisLength / 2;
minorHalfLength = fruit.MinorAxisLength / 2;

majorX = [
    centroid(1) - majorHalfLength * cos(orientationRad)
    centroid(1) + majorHalfLength * cos(orientationRad)
];

majorY = [
    centroid(2) - majorHalfLength * sin(orientationRad)
    centroid(2) + majorHalfLength * sin(orientationRad)
];

minorOrientationRad = orientationRad + pi/2;

minorX = [
    centroid(1) - minorHalfLength * cos(minorOrientationRad)
    centroid(1) + minorHalfLength * cos(minorOrientationRad)
];

minorY = [
    centroid(2) - minorHalfLength * sin(minorOrientationRad)
    centroid(2) + minorHalfLength * sin(minorOrientationRad)
];

figure('Visible', 'off');
imshow(Itest);
hold on;

rectangle( ...
    'Position', fruit.BoundingBox, ...
    'EdgeColor', 'yellow', ...
```

```
    'LineWidth', 2);


plot( ...
    majorX, ...
    majorY, ...
    'r-', ...
    'LineWidth', 2);


plot( ...
    minorX, ...
    minorY, ...
    'c-', ...
    'LineWidth', 2);


plot( ...
    centroid(1), ...
    centroid(2), ...
    'g+', ...
    'MarkerSize', 12, ...
    'LineWidth', 2);


text( ...
    10, ...
    25, ...
    sprintf( ...
        'Major: %.2f mm | Minor: %.2f mm', ...
        calculatedMajor_mm(i), ...
        calculatedMinor_mm(i)), ...
    'Color', 'white', ...
    'BackgroundColor', 'black', ...
    'FontSize', 10, ...
    'FontWeight', 'bold');


title(sprintf( ...
```

```
        'Bağımsız Kalibrasyon Sonucu - Test %d', ...
        i));

    hold off;

    exportgraphics( ...
        gcf, ...
        fullfile( ...
            outputFolder, ...
            sprintf('Test_%02d_Boyut_Sonucu.png', i)), ...
        'Resolution', 300);

    close;

end

%% 11. Sonuç tablosunun oluşturulması
calibrationResults = table( ...
    testNumber, ...
    imageNames, ...
    major_px, ...
    minor_px, ...
    calculatedMajor_mm, ...
    calculatedMinor_mm, ...
    realMajor_mm, ...
    realMinor_mm, ...
    majorAbsoluteError_mm, ...
    minorAbsoluteError_mm, ...
    majorError_percent, ...
    minorError_percent, ...
    averageError_percent, ...
    'VariableNames', { ...
    'Deney_No', ...
    'Goruntu_Adi', ...
```

```
    'Major_Eksen_px', ...
    'Minor_Eksen_px', ...
    'Hesaplanan_Major_mm', ...
    'Hesaplanan_Minor_mm', ...
    'Kumpas_Major_mm', ...
    'Kumpas_Minor_mm', ...
    'Major_Mutlak_Hata_mm', ...
    'Minor_Mutlak_Hata_mm', ...
    'Major_Hata_percent', ...
    'Minor_Hata_percent', ...
    'Ortalama_Hata_percent'});

disp(calibrationResults);

%% 12. Sonuçların kaydedilmesi
writetable( ...
    calibrationResults, ...
    fullfile( ...
        outputFolder, ...
        'Bagimsiz_Kalibrasyon_Sonuclari.xlsx'));

writetable( ...
    calibrationResults, ...
    fullfile( ...
        outputFolder, ...
        'Bagimsiz_Kalibrasyon_Sonuclari.csv'));

disp('Bağımsız piksel-milimetre kalibrasyonu tamamlandı.');
```

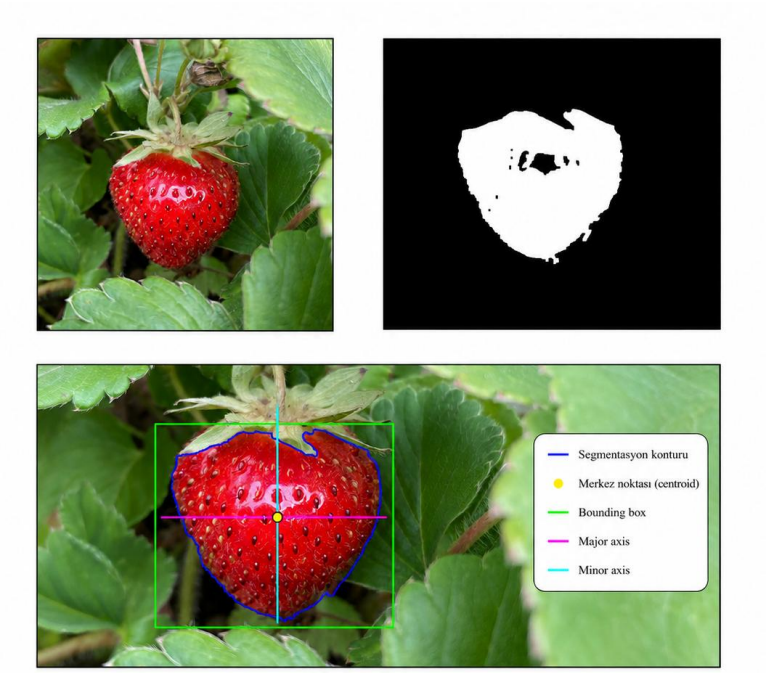
EK B. FARKLI ÇİLEK GÖRÜNTÜLERİ ÜZERİNDE EK GÖRÜNTÜ İŞLEME ÇALIŞMALARI

Tezin ana filtre karşılaştırmasında, filtre değişiminin segmentasyon ve özellik çıkarımı üzerindeki etkisini aynı koşullar altında incelemek amacıyla tek bir referans çilek görüntüsü kullanılmıştır. Bu sayede görüntü, eşik değerleri ve morfolojik işlem adımları sabit tutularak farklı filtre çıktıları karşılaştırılmıştır.

Görüntü işleme akışının farklı görüntülerdeki davranışını gözlemlemek amacıyla Strawberry 02 ve Strawberry 04 olarak adlandırılan iki ek görüntü üzerinde de uygulama gerçekleştirilmiştir. Bu görüntüler aynı temel filtreleme, HSV–CIELab segmentasyonu, morfolojik temizleme ve özellik çıkarımı aşamalarından geçirilmiştir.

Ek görüntülerde çilek bölgesine ait alan, çevre, centroid, majör eksen, minör eksen ve sınırlayıcı kutu değerleri piksel cinsinden hesaplanmıştır. Bu örnekler için bağımsız fiziksel boyut ölçümü ve piksel–milimetre doğrulaması yapılmadığından, elde edilen eksen uzunlukları gerçek boyut ölçümü olarak değerlendirilmemiştir.

Ek uygulamaların amacı, görüntü işleme adımlarının farklı çilek görüntülerine uygulanması sonucunda elde edilen piksel tabanlı çıktıları sunmaktır. İki ek görüntüden elde edilen sonuçlar, yöntemin farklı ışık, arka plan ve görüntüleme koşullarındaki genel başarısının doğrulanması anlamına gelmemektedir.



Özellik	Değer
Alan	125484 px^2
Çevre	1601.55 px
Merkez Noktası	(467.86, 575.60) px
Major Axis	442.90 px
Minor Axis	398.29 px
Bounding Box	445 × 419 px
Kırmızı Bölge Oranı	98.76%

Şekil E.B.1: Çilek 02 ek çalışma

Tablo B.1: Strawberry 02 MATLAB özellik çıkarımı sonuçları

Özellik	MATLAB Çıktısı
Çilek Alanı	125484.00 piksel
Çilek Perimeter	1601.55 piksel
Centroid X	467.86 piksel
Centroid Y	575.60 piksel
Major eksen uzunluğu	442.90 piksel
Minor eksen uzunluğu	398.29 piksel
Bounding Box	445 × 419 piksel

Strawberry 02 görüntüsü üzerinde uygulanan görüntü işleme akışı sonucunda çilek bölgesi arka plandan ayrılmış ve geometrik özellikler piksel tabanlı olarak çıkarılmıştır. Çilek bölgesinin alanı 125484.00 piksel, çevresi 1601.55 piksel olarak hesaplanmıştır. Merkez noktası C = (467.86, 575.60) piksel konumunda elde edilmiştir. Major ve minor eksen uzunlukları sırasıyla 442.90 piksel ve 398.29 piksel olarak belirlenmiştir. Elde edilen eksen değerleri, Strawberry 02 örneğinin görüntü düzleminde geniş ve dolgun bir geometrik yapıya sahip olduğunu göstermektedir.





Özellik	Değer
Alan	142180 px²
Çevre	1558.60 px
Merkez Noktası	(721.73, 892.46) px
Major Axis	532.77 px
Minor Axis	358.86 px
Bounding Box	546 × 396 px
Kırmızı Bölge Oranı	96.66%

Şekil E.B.2: Çilek 04 ek çalışma

Tablo B.2: Strawberry 04 MATLAB özellik çıkarımı sonuçları

Özellik	MATLAB Çıktısı
Çilek Alanı	134887.00 piksel
Çilek Perimeter	3081.44 piksel
Center X	715.85 piksel
Center Y	882.02 piksel
Major axis uzunluğu	556.77 piksel
Minor axis uzunluğu	340.37 piksel
Bounding Box	561 × 392 piksel

Strawberry 04 görüntüsünde çileğin doğal ortamda farklı bir açıyla görüntülenmesine rağmen hedef bölge segmentasyon sonucunda ayrılmış ve geometrik özellikleri hesaplanmıştır. Çilek alanı 134887.00 piksel ve çevre uzunluğu 3081.44 piksel olarak elde edilmiştir. Merkez noktası C = (715.85, 882.02) piksel konumunda hesaplanmıştır. Major eksen uzunluğu 556.77 piksel, minor eksen uzunluğu ise 340.37 piksel olarak belirlenmiştir. Strawberry 04 örneğinin major ve minor eksenleri arasındaki fark, meyvenin görüntü üzerinde daha yatay ve uzun bir geometrik yapı göstermesinden kaynaklanmaktadır.

Tablo B.3: Ek çilek görüntülerinde önerilen 5×5 filtre için temel sonuçlar

Ölçüt	Strawberry 02	Strawberry 04
Alan	125484.00 px²	134887.00 px²
Çevre	1601.55 px	3081.44 px
Center X	467.86 px	715.85 px
Center Y	575.60 px	882.02 px
Major axis	442.90 px	556.77 px
Minor axis	398.29 px	340.37 px
Bounding Box	445 × 419 px	561 × 392 px
Segmentasyon sonucu	Hedef bölge ayrıldı	Hedef bölge ayrıldı
Özellik çıkarımı	Piksel Tabanlı Değerler elde edildi	Piksel tabanlı değerler elde edildi

Önerilen görüntü işleme akışı Strawberry 02 ve Strawberry 04 görüntülerine uygulandığında, her iki görüntüde de çilek olarak değerlendirilen hedef bölge ayrılmış ve bu bölgelere ait piksel

tabanlı geometrik özellikler hesaplanmıştır. Görüntülerin çözünürlükleri, çekim açıları ve meyvelerin görüntü içerisindeki büyüklükleri farklı olduğundan, elde edilen piksel değerleri doğrudan birbirleriyle fiziksel boyut karşılaştırması amacıyla kullanılmamıştır. Ayrıca referans bölge maskeleriyle doğruluk karşılaştırması yapılmadığından bu sonuçlar segmentasyon başarı oranı olarak değerlendirilmemiştir.

Tablo B.4: Ek çilek görüntülerinin olgunluk değerlendirmesi

Görüntü	Kırmızı Bölge Oranı (%)	Renk Dağılımı	Rank Tabanlı Değerlendirme
Strawberry 02	98.76	Kırmızı renk baskın	Renk tabanlı olgun
Strawberry 04	97.23	Kırmızı renk baskın	Renk tabanlı olgun

Renk tabanlı değerlendirmede segmentasyon sonucunda elde edilen çilek bölgeleri içerisindeki kırmızı piksel dağılımı incelenmiştir. Strawberry 02 için kırmızı bölge oranı %98.76, Strawberry 04 için ise %97.23 olarak hesaplanmıştır. Kullanılan deneysel karar ölçütlerine göre her iki görüntü de renk tabanlı olarak olgun sınıfında değerlendirilmiştir. Bununla birlikte bu sınıflandırma; Brix, pH, sertlik ölçümü veya uzman değerlendirmesiyle karşılaştırılmadığından meyvelerin biyolojik olgunluğunun bağımsız doğrulaması olarak kabul edilmemiştir.

Tablo B.5: Ana ve ek çilek çalışmalarının genel karşılaştırılması

Çilek Görüntüsü	Çalışmadaki Kullanımı	Boyut Analizi	Merkez Bilgisi	Olgunluk Değerlendirmesi	Çalışma Kapsamı
Ana referans çilek	Ana filtre karşılaştırması	Piksel ve referans ölçekli tahmin	Referans centroid ile karşılaştırıldı	Renk tabanlı	Ana referans görüntüsü
Strawberry 02	Ek görüntü işleme uygulaması	Piksel tabanlı	Centroid çıkarıldı	Renk tabanlı olgun	Ek uygulama görüntüsü
Strawberry 04	Ek görüntü işleme uygulaması	Piksel tabanlı	Centroid çıkarıldı	Renk tabanlı olgun	Ek uygulama görüntüsü

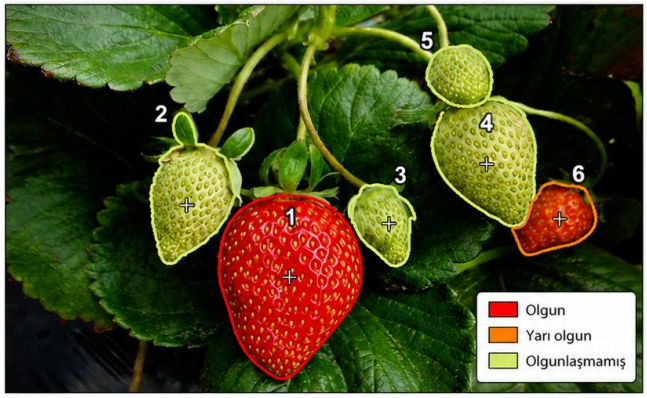
Tablo B.5'te ana referans görüntüsü ile ek görüntülerin çalışmadaki kullanım amaçları ayrı olarak gösterilmiştir. Ana referans görüntüsü filtrelerin ortak koşullar altında karşılaştırılmasında kullanılırken, Strawberry 02 ve Strawberry 04 görüntüleri yalnızca ek uygulama örnekleri olarak değerlendirilmiştir. Ek görüntüler üzerinde bağımsız boyut doğrulaması, referans maske karşılaştırması veya tekrarlı deney yapılmadığından bu görüntüler genel yöntem doğrulaması olarak ele alınmamıştır.

EK C. FARKLI OLGUNLUK DÜZEYLERİNE SAHİP ÇİLEKLERİN AYNI GÖRÜNTÜ ÜZERİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu ek çalışmada, aynı görüntü içerisinde farklı olgunluk seviyelerinde bulunan çilek meyveleri birlikte değerlendirilmiştir. Görüntüde toplam 6 çilek meyvesi belirlenmiştir. Meyveler renk dağılımına göre incelendiğinde, merkezde yer alan büyük kırmızı çileğin yüksek kırmızı yüzey oranına sahip olduğu ve olgun sınıfta değerlendirilebileceği görülmüştür. Sağ alt kısımda bulunan küçük kırmızımsı çilek ise tam kırmızı görünüm göstermemekle birlikte belirgin renk dönüşümü içerdiğinden yarı olgun / geçiş aşamasında değerlendirilmiştir. Diğer dört küçük çilek açık sarı-yeşil tonlarda olduğundan olgunlaşmamış sınıfta değerlendirilmiştir.

Bu değerlendirmede, önceki bölümlerde tanımlanan renk tabanlı yaklaşım esas alınmıştır. Buna göre kırmızı bölge oranı %50'nin altında olan meyveler olgunlaşmamış, %50–79 aralığında olan meyveler yarı olgun ve %80 ve üzerinde olan meyveler olgun olarak sınıflandırılmıştır. Bu görüntü, sistemin yalnızca tek bir olgun çilek üzerinde değil, aynı görüntü içindeki farklı olgunluk seviyelerine sahip çoklu meyveler üzerinde de yorum yapılabildiğini göstermesi açısından ek bir örnek oluşturmaktadır.,





Meyve No	Renk Durumu	Olgunluk Sınıfı
1	Kırmızı baskın	Olgun
2	Açık yeşil/sarı	Olgunlaşmamış
3	Açık yeşil/sarı	Olgunlaşmamış
4	Açık yeşil/sarı	Olgunlaşmamış
5	Açık yeşil/sarı	Olgunlaşmamış
6	Kırmızımsı/turuncu	Yarı olgun

Şekil E.C.1: Farklı olgunluk seviyelerindeki çileklerin aynı görüntü üzerinde birlikte görünümü

Tablo C.1: Karma görüntüdeki çileklerin renk tabanlı olgunluk değerlendirmesi

Meyve No	Görüntüdeki Konum	Baskın Renk Özelliği	Yaklaşık Kırmızı Bölge Oranı	Olgunluk Sınıfı	Açıklama
1	Merkezde, büyük meyve	Yoğun kırmızı	%80 ve üzeri	Olgun	Görüntüdeki en belirgin ve en gelişmiş çilektir
2	Sol tarafta	Açık sarı-yeşil	%50'nin altı	Olgunlaşmamış	Kırmızı renklenme yok denecek kadar azdır
3	Sağ üstte	Açık sarı-yeşil	%50'nin altı	Olgunlaşmamış	Yüzeyin büyük kısmı açık renklidir
4	Üst orta bölgede, küçük meyve	Yeşilimsi-açık ton	%50'nin altı	Olgunlaşmamış	Gelişimini tamamlamamış küçük meyvedir
5	Orta-alt bölgede, küçük meyve	Açık yeşil / sarı ton	%50'nin altı	Olgunlaşmamış	Renk dönüşümü oldukça sınırlıdır
6	Sağ altta, küçük meyve	Kırmızımsı / turuncumsu	%50–79	Yarı olgun	Renk dönüşümü başlamış, ancak tam olgun görünümde değildir

Tablo C.1 değerlendirildiğinde, aynı görüntü içinde farklı olgunluk seviyelerinde bulunan çileklerin renk bilgisi kullanılarak sınıflandırılabildiği görülmektedir. Görüntüde yalnızca bir adet tam olgun çilek bulunurken, bir adet meyve yarı olgun geçiş aşamasında, dört adet meyve ise olgunlaşmamış sınıfta değerlendirilmiştir. Bu sonuç, önerilen renk tabanlı yaklaşımın aynı sahne içerisindeki çoklu çilekler üzerinde de uygulanabildiğini göstermektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Mustafa BİLGİÇ

Doğum tarihi ve yeri :

e-posta :

Öğrenim Bilgileri

Derece	**Okul/Program**	**Yıl**
Y. Lisans	Balıkesir Üniversitesi/ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü	
Lisans	Yeditepe Üniversitesi/ Makine Mühendisliği bölümü	2018
Lise	Özel Özlüce Şahinkaya Lisesi - Sayısal	2012