

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**METALİK PARÇALARIN KUSUR TESPİTİNDE GÖRÜNTÜ
TONLARI KULLANILARAK DOĞRUSALLAŞTIRMA
TABANLI KARMA BİR YÖNTEM GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

Muhammed KOTAN

**Enstitü Anabilim Dalı : BİLGİSAYAR VE BİLİŞİM
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Cemil ÖZ

Haziran 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.



Muhammed KOTAN

22/06/2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ve doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Cemil ÖZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamın şekillenmesinde büyük katkıları olan, titizlikle beni yönlendiren kıymetli hocalarım Doç. Dr. Mehmet Recep BOZKURT ve Dr. Öğr. Üyesi Serap KAZAN'a teşekkür ederim.

Görüntü alma sisteminin oluşturulmasında emeği geçen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1505 projesi kapsamındaki 5160018 proje numaralı proje ekibine katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince tüm zorlukları benimle göğüsleyen ve hayatımın her evresinde bana destek olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu çalışmanın kısmi olarak desteklenmesine olanak sağlayan TÜBİTAK (Proje No: 5160018) ve Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Komisyon Başkanlığı'na (Proje No: 2020-7-25-2) teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
SUMMARY	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
1.1. Yapılan Katkılar ve Tez Organizasyonu	8
BÖLÜM 2.	
LİTERATÜR ÖZETİ	9
2.1. GTŞE Yöntemleri Literatür Çalışması	9
2.2. Yüzey Kontrolü Üzerine Yapılan Çalışmalar	15
BÖLÜM 3.	
GÖRÜNTÜ TONLARINDAN ŞEKİL ELDE ETME ALTYAPISI	19
3.1. Doğrusallaştırma Tabanlı Yaklaşımlar	22
3.1.1. Pentland yaklaşımı	23
3.1.2. Tsai-Shah yaklaşımı	24
3.1.3. Geliştirilen yöntem	25

BÖLÜM 4.

ALGORİTMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI	28
4.1. Sentetik Görüntü Üretimi ve Performans Karşılaştırması	29
4.2. Mevcut Veri Setleri Kullanılarak Performans Karşılaştırması	36

BÖLÜM 5.

METAL BİLEŞENLER İÇİN YÜZEY KUSUR TESPİT SİSTEMİ	46
5.1. Görüntü Alma Sistemi	48
5.2. Kusur Tespitine Yönelik Görüntü İşleme Yazılımı Geliştirilmesi	55
5.2.1. LED bölgelerinin sırayla yakılması sonucu oluşan görüntü üzerinde kusur tespiti	55
5.2.2. LED bölgelerinin aynı anda yakılması sonucu oluşan görüntü üzerinde kusur tespiti	60
5.2.3. Gradyan özellikleri kullanılarak farklı şekilde kusur tespit çalışmaları	62
5.3. Arayüz Geliştirilmesi	64

BÖLÜM 6.

YÜZEY YÖNELEMİ ANALİZİ İÇİN 3B ORTAMDA MODELLENMİŞ SİSTEM VE RENK İŞLEME ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ	69
--	----

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
----------------------------	----

KAYNAKLAR	87
-----------------	----

ÖZGEÇMİŞ	99
----------------	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

2B	: 2 boyutlu
2D	: 2 dimensional
3B	: 3 boyutlu
3D	: 3 dimensional
BRDF	: Çift Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu (Bidirectional Reflectance Distribution Function)
CNN	: Evrimsel Sinir Ağları (Convolutional Neural Network)
CPU	: Merkezi İşlem Birimi (Central Processing Unit)
CV	: Bilgisayar Görmesi (Computer Vision)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DEM	: Sayısal Yükselti Modeli (Digital Elevation Model)
DVM	: Destek Vektör Makineleri (Support Vector Machine)
F	: Fourier dönüşümü
F^{-1}	: Ters Fourier dönüşümü
F_c	: Filtreleme katsayısı
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü (Fast Fourier Transform)
GA	: Genetik Algoritma
GigE	: Gigabit Ethernet
GLCM	: Gri seviye eş oluşum matrisi (Gray Level Co-occurrence Matrix)
GTŞE	: Görüntü Tonlarından Şekil Elde Etme
GY	: Geliştirilen Yöntem
I	: Görüntü yoğunluğu
ICA	: Bağımsız Bileşen Analizi (Independent Component Analysis)
k-NN	: k-En Yakın Komşu (k-Nearest Neighborhood)
ls	: Boşluklama katsayısı

L	: Aydınlatma yönü vektörü
L2	: Öklid norm (Euclidean norm)
LED	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
MAD	: Ortalama Mutlak Sapma (Mean Absolute Deviation)
MSE	: Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error)
n	: Yüzey normal vektörü
OCR	: Optik Karakter Tanıma (Optical Character Recognition)
p	: x yönünde yüzey gradyan vektörü
P	: Pentland algoritması
PC	: Kişisel Bilgisayar (Personel Computer)
PSNR	: Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal to Noise Ratio)
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimisation)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
q	: y yönünde yüzey gradyan vektörü
R	: Yansıtma fonksiyonu
RGB	: Kırmızı-Yeşil-Mavi (Red-Green-Blue)
SA	: Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing)
SAFS	: Tonlamadan Şekil ve Albedo (Shape and Albedo from Shading)
SAR	: Sentetik Açıklıklı Radar (Synthetic Aperture Radar)
SDK	: Yazılım Geliştirme Kiti (Software Development Kit)
SFS	: Tonlamadan Şekil (Shape From Shading)
SLAM	: Eşzamanlı Yerelleştirme ve Haritalama (Simultaneous Localization and Mapping)
SSIM	: Yapısal Benzerlik İndeksi (Structural Similarity Index)
TS	: Tsai-Shah algoritması
YSA	: Yapay Sinir Ağı (Artificial Neural Networks)
Z	: Yüzey derinliği
ρ	: Albedo değeri
σ	: Yüzey açısı (Slant)
τ	: Yüzey açısı (Tilt)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. X'den şekil elde etme yöntemleri	2
Şekil 1.2. Görüntü tonlarından şekil elde etme yöntemi	3
Şekil 1.3. Örnek endüstriyel kalite kontrol sistemi	7
Şekil 4.1. Üretilen sentetik görüntüler	30
Şekil 4.2. Sentetik görüntülere ait gerçek yüzey şekilleri	30
Şekil 4.3. Seçilen yöntemlerin sentetik görüntüler için oluşturdukları 3B yüzeyler	30
Şekil 4.4. Algoritmaların oluşturduğu derinlik haritalarına göre yeniden üretilmiş gri seviye görüntüler	31
Şekil 4.5. Küre şeklinin yakınsanması	32
Şekil 4.6. Çadır şeklinin yakınsanması	32
Şekil 4.7. Hata ve benzerlik tabanlı değerlendirmelerin grafiksel gösterimleri	34
Şekil 4.8. Veri Seti 1'den seçilen görüntüler	37
Şekil 4.9. Veri Seti 2'den seçilen görüntüler	37
Şekil 4.10. Veri Seti 1 için oluşturulan derinlik haritaları	38
Şekil 4.11. Veri seti 2 için oluşturulan derinlik haritaları	39
Şekil 4.12. Geliştirilen yöntem ve Tsai-Shah arasındaki derinlik farkları	40
Şekil 4.13. Veri Seti 1 için algoritmaların ürettiği gri-seviye görüntüler	41
Şekil 4.14. Veri Seti 2 için algoritmaların ürettiği gri-seviye görüntüler	41
Şekil 4.15. Geliştirilen ve Tsai-Shah yöntemleri ile üretilen derinlik haritalarına karşılık gelen görüntüler arasındaki farklar (GY-TS)	43
Şekil 4.16. Hesaplanan derinlik verilerine ortalama filtre uygulanmaksızın elde edilen derinlik görüntüleri	45
Şekil 5.1. Yüzey kontrolünde kullanılabilir örnek metalik bileşenler	47
Şekil 5.2. Seçilen metalik parçanın kalite kontrolü gerçekleştirilecek yüzeyi ve hata örnekleri	48
Şekil 5.3. Proje kapsamında tasarlanan görüntü alma sistemleri	49

Şekil 5.4. Parçanın kavisli yüzeyinin çizgi taramalı kamera ile elde edilmiş görüntüsü	50
Şekil 5.5. Aydınlatma donanımının görüntü alma sistemi üzerindeki görüntüsü	51
Şekil 5.6. Motor, enkoder ve incelenecek parçanın entegrasyonu	52
Şekil 5.7. Kontrol kartının görüntü alma sistemi üzerindeki görüntüsü	53
Şekil 5.8. Görüntü alma düzeneği genel bağlantı şeması	53
Şekil 5.9. Sistemin genel işleyiş şeması	54
Şekil 5.10. LED bölgelerinin sırayla ve aynı anda yakılması ile oluşan örnek görüntüler	56
Şekil 5.11. LED bölgelerinin sırayla yakılması ile elde edilen Şekil 5.10(a). için oluşturulan derinlik haritası	56
Şekil 5.12. Kavisli yüzey için tahmin edilen 3B şekil	57
Şekil 5.13. Derinlik haritasına ait gri seviye görüntü	57
Şekil 5.14. Ön işleme adımları uygulanmış filtrelenmiş görüntü	57
Şekil 5.15. Eşik değeri uygulanmasıyla elde edilen gürültü içeren kusur bölgeleri ikili (binary) görüntüsü	58
Şekil 5.16. Yapısal eleman örneği	59
Şekil 5.17. Gürültüden arındırılmış kusur bölgelerini gösteren ikili (binary) görüntü	60
Şekil 5.18. Kusur yerlerinin nesne görüntüsü üzerinde gösterilmesi	60
Şekil 5.19. LED bölgelerinin aynı anda yakılması ile elde edilen görüntü (Şekil 5.10(b).) için oluşturulan derinlik haritası	61
Şekil 5.20. Eşik değeri uygulanmasıyla elde edilen gürültü içeren kusur bölgeleri ikili (binary) görüntüsü	61
Şekil 5.21. Gürültüden arındırılmış kusur bölgelerini gösteren ikili (binary) görüntü	61
Şekil 5.22. Kusur yerlerinin nesne görüntüsü üzerinde gösterilmesi	62
Şekil 5.23. Silindirik yanal yüzeye sahip bileşenlerin çizgi taramalı kamera kullanılarak elde edilmiş görüntüsü	62
Şekil 5.24. Parça örneğinin x-y yönlerinde gradyan görüntüleri ve gradyan büyüklüğü görüntüsü	63
Şekil 5.25. Ortalama filtre uygulanmış gradyan büyüklüğü görüntüsü	63

Şekil 5.26. Kenar bulma adımları uygulanmasının ardından elde edilen görüntü	64
Şekil 5.27. Morfolojik işlemler sonrasında kusur yerlerinin belirginleştirilmesi	64
Şekil 5.28. Nesne görüntüsü üzerinde kusur yerlerinin işaretlenmesi	64
Şekil 5.29. Geliştirilen arayüz	65
Şekil 5.30. Kameradan alınan görüntü ve görüntüye ait özelliklerin gösterilmesi ...	66
Şekil 5.31. Oluşan ara görüntülerin arayüz üzerinde izlenmesi	67
Şekil 5.32. İncelenen parçanın kusur bulma yazılımına göre sonuç kararının ve görüntülerinin sunulması	67
Şekil 6.1. İç bükey-dış bükey belirsizliği. Aynı yüzey aydınlatma yönüne göre bir krater veya volkan görüntüsü oluşturmaktadır	69
Şekil 6.2. GTŞE yöntemleri için iç bükey-dış bükey olma belirsizliği durumu	70
Şekil 6.3. Çukur ve tümsek bölge içeren sentetik oluşturulmuş yüzey örneği	71
Şekil 6.4. Yüzeyin (Şekil 6.3.) gri seviye oluşturulmuş görüntüsü ve Pentland algoritmasına göre oluşturulan yüzey tahmini	72
Şekil 6.5. Aynı yüzeyin (Şekil 6.3.) tepe noktasından noktasal ışık kaynağı ile aydınlatılması sonucu oluşan gri seviye görüntüsü ve Pentland algoritmasına göre oluşturulan yüzey tahmini	72
Şekil 6.6. Kırmızı, yeşil ve mavi renkte aydınlatılan duvar	73
Şekil 6.7. Blender 3B modelleme ortamında gerçekleştirilen sahne tasarımı	74
Şekil 6.8. 3B modelleme ortamında yüzey tasarımı ve örnek yansıma görüntüsü ...	74
Şekil 6.9. Yüzeyin farklı renklerle aydınlatılması	75
Şekil 6.10. Renk karışımları	76
Şekil 6.11. Kırmızı, yeşil ve mavi renklerle aydınlatılan yüzeyin renk bantlarına ayrıştırılması	76
Şekil 6.12. Renk bilgisi işlendikten sonra yüzey tahmini	77
Şekil 6.13. Yüzey yansıtıcılığı katsayısının değişmesiyle elde edilebilir farklı yansıma görüntüleri	77
Şekil 6.14. Sadece çukur içeren sentetik oluşturulmuş yüzey	78
Şekil 6.15. Yüzeyin (Şekil 6.14.) noktasal ışık kaynağı ile tepe noktasından aydınlatılması sonucu oluşan görüntüsü	79
Şekil 6.16. Tek çukur içeren yüzey görüntüsünün 6 farklı GTŞE yöntemine göre oluşturulmuş yüzey şekilleri	79

Şekil 6.17. Tek çukur içeren yüzeyin kırmızı, yeşil ve mavi renk ile aynı anda aydınlatılmış görüntüsü	80
Şekil 6.18. Kırmızı, yeşil ve mavi renklerle aydınlatılan yüzey görüntüsünün (Şekil 6.14.) renk bantlarına ayrıştırılması	80
Şekil 6.19. Siyah renge göre çukur bölge analizi	81
Şekil 6.20. Renk analizi sonrası ayarlanan tahmini parlaklık görüntüsü	81
Şekil 6.21. Tonlamaların ayarlanması sonucu yeni parlaklık değerlerine göre oluşan yüzey	82
Şekil 6.22. Renk analizi yapıldıktan sonra 6 farklı GTŞE yöntemine göre tahmin edilen yeni yüzey şekilleri	82

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1. Bazı güncel Bilgisayar Görmesi uygulamaları	1
Tablo 1.2. TÜBİTAK 1505 projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar	6
Tablo 2.1. Çözüm arama yöntemlerine göre GTŞE sınıflandırma örneği	10
Tablo 2.2. Çözüm arama yöntemlerine göre diğer bir GTŞE sınıflandırması	12
Tablo 3.1. Algoritma adımları	27
Tablo 4.1. Sentetik görüntü üretimi formülasyonu	29
Tablo 4.2. MAD, MSE ve L2 sonuçları	33
Tablo 4.3. PSNR ve SSIM sonuçları	33
Tablo 4.4. Performans testleri özet tablosu	33
Tablo 4.5. Algoritmalar için harcanan süre ve CPU zamanı	35
Tablo 4.6. Kullanılan veri setleri ve görüntü özellikleri	36
Tablo 4.7. MAD, MSE ve L2 sonuçları	44
Tablo 4.8. PSNR ve SSIM sonuçları	44
Tablo 4.9. Performans testleri özet tablosu	44
Tablo 5.1. Bazı yapısal elemanlar ve özellikleri	59
Tablo 5.2. Arayüz üzerindeki bölmeler ve işlevleri	65
Tablo 6.1. Renk karışım tablosu	76

ÖZET

Anahtar kelimeler: Görüntü tonlarından şekil elde etme, görüntü işleme, görüntü alma, görüntü tanıma, kusur tespiti, yüzey kontrolü, 3B şekil oluşturma, 3B modelleme, yüzey yönelimi analizi.

Nesnelerin veya sahnelerin üç boyutlu (3B) şekilleri kendilerine ait görüntü veya görüntülerden elde edilebilir. Görüntü tonlarından şekil elde etme (GTŞE) (shape from shading - SFS) yöntemleri şekil bilgisini elde etmek için görüntüdeki tonlama farklılıklarını kullanır. Bu tez çalışmasında, yansıma denkleminin doğrusallaştırılması tabanlı yöntemler sınıfına dayalı yüzey tahmini yapan karma bir GTŞE algoritması sunulmuştur. Geliştirilen karma algoritmada, gri seviye bir görüntünün merkezi gradyanlarını ve Fourier dönüşümlerini kullanarak iyi bir başlangıç yüzey bilgisi oluşturulmakta ve 3B şekil yinelemeli olarak elde edilmektedir. Karma algoritma, fonksiyonel olarak üretilen sentetik yüzeylere ve literatürde yer alan farklı veri setlerine uygulanmıştır. Oluşturulan yüzeyler aynı görüntüler için diğer doğrusallaştırma tabanlı algoritmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Algoritmaların ürettikleri derinlik haritaları ve bunlara karşılık gelen gri seviye görüntüleri literatürdeki beş farklı metrik kullanılarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar tablo haline getirilmiş ve grafiksel olarak detaylı bir şekilde görselleştirilmiştir. Kullanılan algoritmaların hesaplama süreleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre önerilen algoritma tahmin edilen şekillerin yüzeylerindeki bozulmaları önlemekte ve düşük parametrelerde daha iyi sonuçlar üretmektedir.

Bu tez çalışmasının bir sonraki aşamasında ise geliştirilen GTŞE algoritması küçük metalik parçaların kalite kontrolüne uygulanmıştır. Metal parçaların görüntülerinin elde edilmesi için proje kapsamında bir görüntü alma sistemi gerçekleştirilmiş ve parça görüntüleri üzerinde GTŞE yöntemi uygulanmasıyla şekil bilgileri elde edilmiştir. Ardından ön işleme adımları ve morfolojik yöntemler yardımıyla bu şekil bilgisinden yüzeyin kusurlu bölgeleri tespit edilerek geliştirilen bir arayüz yardımıyla gerçek zamanlı gösterimi sağlanmıştır.

Son olarak ise GTŞE yöntemlerinin temel problemlerinden olan yüzey yönelimi belirsizliğine 3B modelleme ortamında bir çözüm önerisi sunulmuştur. Farklı yönlerden üç farklı renk bandında aydınlatılan yüzey üzerinde oluşan renk desenleri algoritmik olarak işlenmiş ve yüzey bölgelerinin yönelimleri hakkında yorum yapılmıştır. Literatürdeki beş farklı GTŞE yönteminin geliştirilen algoritma yardımıyla daha doğru yüzey tahmini yaptığı detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

DEVELOPMENT OF A LINEARIZATION BASED HYBRID METHOD USING IMAGE TONES FOR THE SURFACE INSPECTION OF METALLIC PARTS

SUMMARY

Keywords: Shape from shading, image processing, image acquisition, pattern recognition, defect detection, surface inspection, 3D reconstruction, 3D modelling, surface orientation analysis.

3D shapes of objects or scenes in an image can be obtained from its image or images. The shape-from-shading (SFS) technique uses the pattern of shading in the image to obtain shape information. In this thesis, a hybrid SFS method based on methods which are included in the linearization-based classification of SFS algorithms is presented. Our aim is to use the Fourier coefficients of central differences obtained from the gray-level image as prior knowledge. By using functionally generated surfaces and different data sets in the literature, we compare the proposed method with other linearization-based approaches. Five different evaluation metrics were applied to recovered depth maps and corresponding gray-level images. We tabularly and graphically present the results, and also specify required time. As a result of the tests, the proposed method can prevent the fluctuations on the surfaces and obtain better 3D reconstruction results at low parameters.

In the second stage of this thesis, the developed SFS method is specialized for the quality control of metallic parts, which is a real world industrial problem. An image acquisition system is proposed to capture the images of metal components and shape information is obtained by using SFS methods. Then, with the help of pre-processing steps and morphological methods, defective areas of the surface are detected by using the estimated shape information. Real-time monitoring of the results is also provided with a developed interface.

Finally, a solution to the ambiguity of the surfaces being concave or convex, which is one of the main problems of SFS methods, is proposed in 3D modeling environment. Color patterns, formed on the surface illuminated with different colors of illumination from different directions, are processed algorithmically and information about the orientations of the surface regions are obtained. We show in detail that five different SFS methods make more accurate surface estimation with the help of developed algorithm.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

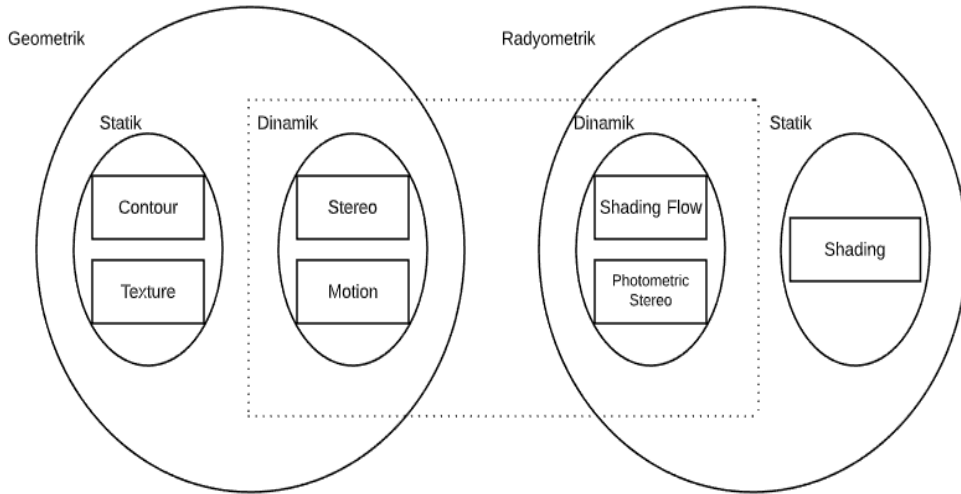
Bilgisayar görmesi (Computer Vision - CV), insan görüşü yeteneklerinin taklit edilerek sistemlere kazandırılmasıyla görüntü ve video gibi görsel sayısal girdilerden anlamlı bilgiler elde etmelerini sağlayan ve bu bilgilere dayanarak eylemler gerçekleştirebilen veya önerilerde bulunan bir bilgisayar bilimi alanı ve bilimsel araştırma disiplini. Bilgisayar görmesinin amacı sayısal görüntü girdilerinden faydalı bilgilerin çıkarılmasıdır [1]. Çıkarılan bilgi; üç boyutlu (3B) modeller, kamera pozisyonu, nesne algılama, nesne tanıma, görüntü içeriğini gruplandırma, görüntülerde arama yapma, nesne veya metinlerin tanımlanması gibi birçok anlam ifade edebilir [2, 3]. Bilgisayarlı görme, çok çeşitli uygulamalara sahiptir ve ulaşım, tarım, jeoloji, biyometri, endüstriyel kalite kontrolü, otonom araçlar, robotik ve sanal gerçeklik gibi birçok alanda kullanılmaktadır [3, 4]. Günümüzde uygulanan bilgisayar görmesi uygulamalarından bazıları Tablo 1.1.'deki gibi sıralanabilir.

Tablo 1.1. Bazı güncel Bilgisayar Görmesi uygulamaları [3].

<i>Uygulama</i>	<i>Örnek kullanım</i>
Optik karakter tanıma (OCR)	Otomatik plaka tanıma
Makine muayenesi	Metal yüzeylerde kusur arama
Satış	Otomatik ödeme şeritleri için nesne tanıma
3B model oluşturma	Havadan çekilen fotoğraflardan 3B modellerin oluşturulması
Tıbbi görüntüleme	Ameliyat öncesi ve sonrası görüntülerin kaydedilmesi
Otomotiv güvenliği	Beklenmedik engelleri tespit etme
Hareket eşleştirme	Bilgisayar tarafından oluşturulan görüntüleri canlı çekim görüntüleri ile birleştirme
Hareket yakalama	Bilgisayar animasyonu için aktörleri yakalamak amacıyla birden çok kameradan izlenebilen yansıtıcı işaretçiler veya diğer görme tabanlı teknikler kullanma.
Gözetim	İzinsiz giriş yapanları izleme, karayolu trafiğini analiz etme, boğulanları tespit etmek için havuzları izleme.
Parmak izi tanıma ve biyometri	Adli uygulamaların yanı sıra otomatik erişim yetkisi verme.

Bu çalışmada, temel bilgisayar görmesi uygulamalarından 3B şekil oluşturma ve yüzey muayenesi konularında çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Görüntülerdeki nesne veya yüzeylerin gerçek 3B şekillerinin elde edilmesi, araştırmacılar için her zaman ilgi çekici bir konu olmuş ve literatürde sıklıkla çalışılmıştır. Genel olarak literatürde X'den şekil elde etme başlığı altında birçok değişik yöntem mevcuttur [5, 6]. X yerine tonlama (shading), stereo, doku (texture), gölge (shadows), hareket (motion) vb. yöntem başlıklarından biri gelebilir. X'den şekil elde etme yaklaşımları Şekil 1.1.'deki gibi sınıflandırılabilir.



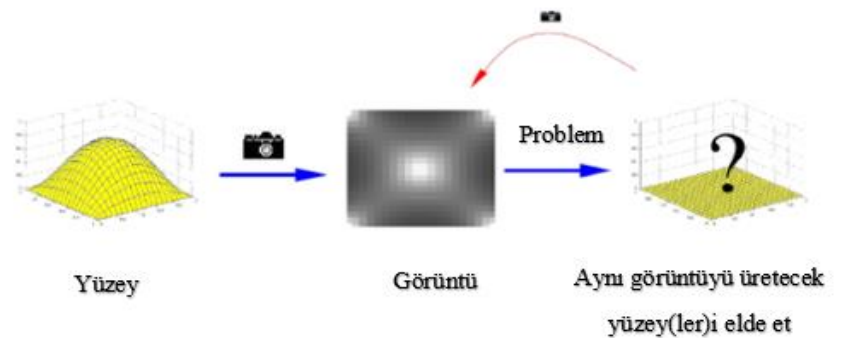
Şekil 1.1. X'den şekil elde etme yöntemleri [6, 7].

Geometrik bilgiler, projeksiyon geometrisi ve noktalara ait yansımaların görüntü düzlemi üzerindeki koordinatlarına göre konumları vb. özelliklere dayanır. Radyometrik bilgiler ise şekil, sahne yüzeyinin pozisyonu ve yansıtma karakteristiklerinin yanı sıra aydınlatma koşulları, ortam özellikleri, sensör karakteristikleri gibi birçok sahne özelliği ile bağlantılıdır [6].

Bu çalışmada, 3B yüzey elde etmek için görüntü tonlarından şekil elde etme (Shape from shading-SFS) (GTŞE) yöntemi seçilmiştir. GTŞE problemi ilk olarak 1970'lerde Horn tarafından ortaya atılmıştır [8]. Horn, karakteristik şeritler

kullanarak görüntü tonlarından şekil elde etme yaklaşımını formüle etmiş ve çözüm önerisi yapmıştır. Karakteristik şerit, şeritin başlangıç noktasındaki değerler bilirse yüzey derinliği ve yönelimin hesaplanabileceği görüntü üzerindeki bir çizgidir. Gürültülü verilerden karakteristik şeritleri hesaplamak için yöntemler tartışılmış ve tarama elektron mikroskobunda görüntüleme ve Ay topografisinin oluşturulması gibi çeşitli özel durumlar araştırılmıştır.

GTŞE yöntemleri nesneye ait 2B görüntü üzerinden tekrar orijinal 3B sahneyi doğru bir şekilde elde etme problemine çözüm aramaktadır. GTŞE yöntemi ile görüntüdeki yüzey şeklinin 3B olarak çıkarılmasında nesne üzerinde oluşan yansımaları kullanılmaktadır. Tonlamadan şekil bilgisinin elde edilebilmesi görüntü yoğunluğuyla yüzey şeklinin arasındaki ilişkiye dayanmaktadır. Görüntü üzerindeki bir noktadaki ışımaya; yüzey normali, aydınlanma yönü ve yüzey materyaline bağlı olan yüzey yansıtıcılık değeri kullanılarak hesaplanabilir. Her bir noktadaki ışımaya değeri hesaplandıktan sonra görüntüye ait yansımaları haritası elde edilebilir. Kamera cihazı 3B bir sahnenin 2B olarak görüntülenmesini sağlarken GTŞE teknikleri ise Şekil 1.2.'de gösterildiği gibi 2B bir görüntüden 3B sahnenin elde edilmesinde kullanılan tersine bir yöntemdir.



Şekil 1.2. Görüntü tonlarından şekil elde etme yöntemi [9].

GTŞE yöntemleri literatürde çözüm arama yaklaşımlarına göre farklı şekillerde sınıflandırılmaktadır. Bazı sınıflandırma çalışmaları ve bu sınıflandırmalara ait yöntem örnekleri Tablo 2.1. ve Tablo 2.2.'de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasında öncelikle görüntü yansıtma denklemini (Image Irradiance Equation) yakınsama ve doğrusallaştırma tabanlı çözüm arayan yöntemler incelenmiş ve algoritmaların şekil yakınsamalarını iyileştirecek bir yöntem önerilmiştir. Geliştirilen GTŞE yönteminin temelini oluşturan Tsai ve Shah [10] algoritması ve Fourier dönüşümlerinden esinlenen Pentland [11] algoritması inceleme çalışmalarında görüntü yansıtma denkleminin doğrusallaştırılması ile çözüme yakınsayan yöntemler başlığı altında incelenmektedir [12, 13]. Pentland, yüzey gradyanları terimleriyle yansıtma fonksiyonunun doğrusal yaklaşımını kullanmış ve her bir noktadaki derinlik için kapalı bir form çözüm elde etmek amacıyla lineer fonksiyona Fourier dönüşümü uygulamıştır. Tsai ve Shah ise çalışmalarında öncelikle gradyanın ayrık yaklaşımını uygulamış, ardından yansıtma fonksiyonunun doğrusal yaklaşımını direkt olarak derinlik terimleriyle ele almışlardır. Her iki yöntemin karşılaştırması ayrıca Tsai ve Shah'ın çalışmasında ayrı bir başlık olarak sunulmuştur.

Tsai ve Shah çalışmasındaki “Bizim durumumuzda giriş imgesi hakkında ön bilgi olmaksızın derinliğin en iyi başlangıç tahmini $Z(x, y)$ her bir piksel için sıfırdır.” bilgisinden esinlenerek iyi bir ön bilgi içeren bir algoritma oluşturulması amaçlanmaktadır. Tsai-Shah algoritması ikinci dereceden denklemleri çözmek için Newton yöntemini kullanır. Başlangıç değerleri kesin çözüme yakın olduğu zaman ve özellikle çok iyi verildiği durumlarda Tsai-Shah algoritması çözüme çok hızlı yakınsar. Ancak Newton yöntemi her zaman yakınsanmayı garanti etmez. Bu yüzden Tsai-Shah algoritması başlangıç tahminine Pentland algoritmasından daha duyarlıdır [14]. Bu çalışmada gri seviye görüntünün nümerik gradyanlarının farklı uzamsal katsayılarını kullanarak öncelikle Tsai-Shah algoritması olmak üzere algoritmalar için iyi bir doğrusal ön bilgi sağlanmıştır. Böylece hem 3B oluşum iyileştirilmiş hemde nesne üzerinde oluşan bozulmaların önüne geçilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca iterasyon sayısını düşürerek daha az iterasyonla daha iyi sonuçlar elde edilebileceği gösterilmiştir. Geliştirilen yöntemin diğer GTŞE yöntemleriyle karşılaştırılması amacıyla fonksiyonel olarak üç adet yüzey üretilmiştir. Ayrıca literatürdeki 3B oluşum amacıyla kullanılan çeşitli veri setlerinden farklı özelliklerde görüntüler seçilmiştir. Kullanılan veri setleri Xiong ve ark. [15] tarafından sağlanan “From

Shading to Local Shape” veri seti ve Grosse ve ark. [16] tarafından sağlanan “MIT Intrinsic” veri setidir. Geliştirilen algoritmanın üretilen ve seçilen görüntüler için tahmin ettiği yüzey derinliği, Tsai-Shah algoritması ve Pentland algoritmasının tahmin ettikleri derinlik değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmaların sentetik görüntüler üzerinde değerlendirilmesi, mevcut doğruluğu bilinen derinlik verilerinden dolayı yalnızca görsel olarak yorumlamanın dışında, daha sayısal ve güvenilir karşılaştırmalar yapılabilmesine imkan sağlamıştır. Algoritmaların performans karşılaştırmaları, literatürde sıklıkla kullanılan karşılaştırma metriklerinden olan; ortalama mutlak sapma (mean absolute deviation - MAD), ortalama karesel hata (mean squared error - MSE), tepe sinyal-gürültü oranı (peak signal-to-noise ratio - PSNR), yapısal benzerlik indeksi (structural similarity index - SSIM) ve Öklid norm (L2) terimleriyle olmak üzere beş farklı metrik kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Benzer bir MAD yöntemi GTŞE yöntemlerinin temel inceleme ve performans değerlendirme çalışmalarından olan [12, 13] çalışmalarında da kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, algoritma üzerinde önerilen yaklaşımın kullanılan görüntülerin çoğunda 3B oluşumunu iyileştirdiğini, nesne yüzeyindeki gürültüleri azalttığını ve daha az iterasyon sayısında daha iyi sonuçlar elde ettiğini göstermektedir.

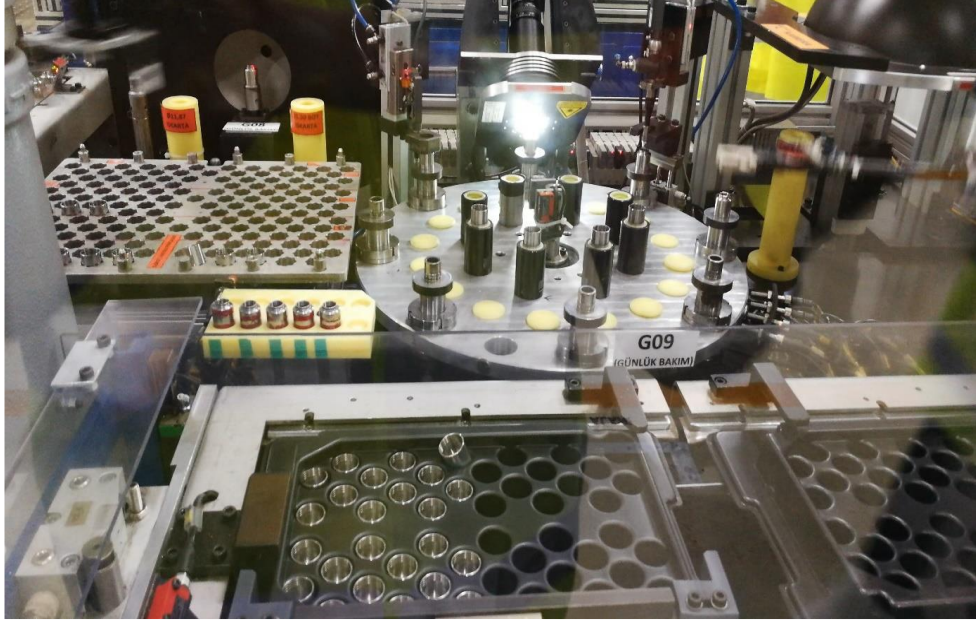
Tez çalışmasının ikinci kısmı, ortaya konulan karma GTŞE yönteminin metalik parçalar için geliştirilen bir kalite kontrol sistemindeki uygulama süreçlerini kapsamaktadır. Günümüz endüstrisi yüksek hassasiyetli kaliteli parçalara ihtiyaç duymaktadır. Genellikle seri üretimde kalite kontrolünün yorgunluk, dalgınlık vb. insan hatalarının önüne geçerek, bilgisayarlı sistemlerle ve özellikle bilgisayar görmesi yolu ile yapılması gerekmektedir. Metal parçalarının kalite kontrolünün bilgisayar görmesi yolu ile gerçekleştirilmesi, çözümü zor bir problemdir. Şekil 1.3.’de küçük metalik bileşenlerin kontrolü için kullanılan örnek bir iş istasyonu gösterilmiştir. Geliştirilen algoritma, metalik parçaların yüzey hatalarının tespiti için kullanılarak endüstriyel bir problemin çözümüne uygulanmıştır. Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 1505 projesi kapsamında desteklenen sanayi ile iş birliği çerçevesinde bir görüntü alma ve işleme sistemi geliştirilmiştir. Proje kapsamında kusur tespit sistemi için görüntü alma aşamasında

kullanılabilir donanımsal bir sistem önerilmiş ve kusur yerlerinin tespitini sağlamak amacıyla geliştirilen GTŞE algoritması ile birlikte GTŞE yöntemleri, Fotometrik Stereo ve Derin Öğrenme kullanan kusur tespit çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Doktora öğrencisi ve danışman öğretim üyesi tarafından proje içerisinde gerçekleştirilen çalışmalar Tablo 1.2.'de özetlenmiştir.

Tablo 1.2. TÜBİTAK 1505 projesi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar.

<i>Adı-Soyadı</i>	<i>Projedeki Görevi</i>	<i>Gerçekleştirilen Çalışmalar</i>
Cemil ÖZ (Danışman)	Proje Yöneticisi	
Muhammed KOTAN (Doktora öğrencisi)	Yardımcı Personel	<ol style="list-style-type: none"> 1. Firmada mevcut kullanılan sistemin incelenmesi 2. Mevcut sistemin parametre ayarlarının incelenmesi 3. Mevcut sistemin donanımsal bileşenlerinin çalışma yapısının incelenmesi 4. Tonlamadan şekil elde etme algoritmalarına dayalı kusur tespit yazılımı gerçekleştirilmesi 5. .Net ortamında arayüz geliştirilmesi

Tez kapsamında önerilen 3B oluşturma algoritması, yeni geliştirilen bu sisteme uyarlanarak parçalara ait 3B derinlik haritaları elde edilmiş ve derinlik bilgisinden yola çıkarak kusurlu bölgeler tespit edilmiştir. Ayrıca donanımsal ve yazılımsal bileşenlerin kolayca yönetilebildiği bir arayüz tasarlanmıştır. Sistemin detayları 5. Bölüm'de anlatılmaktadır. Çalışmanın bu kısmının hedef çıktısı; metalik parçalarının kalite kontrolü için bilgisayar görmesi kullanılarak bir kalite kontrol sistemi oluşturmak ve görüntü işleme yazılımını geliştirmektir.



Şekil 1.3. Örnek endüstriyel kalite kontrol sistemi.

Son olarak GTŞE yaklaşımlarının temel problemlerinden biri olan yüzeyin iç bükey-dış bükey olma belirsizliği problemi ele alınmıştır. Görüntü üzerindeki parlaklık değerleri yorumlanırken aydınlatma koşullarına bağlı olarak yüzey noktalarının yönelimlerinde belirsizlikler oluşabilmektedir. Bu durum; algoritmaların yüzey noktalarının yönelimini yanlış tahmin etmesine ve hatalı 3B yüzey oluşturmalarına sebep olmaktadır. 6. Bölüm’de bu yüzey yönelimi belirsizliği durumları için 3B modelleme ortamında modellenmiş bir sistem önerisi yapılmış ve üzerinde örnek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Nesne yüzeyi, 3B modelleme ortamında konumları belli olan üç farklı renkte (Kırmızı, Yeşil ve Mavi) ışık kaynağı ile aydınlatılmış ve renklerin yüzey üzerinde oluşturdukları desenler algoritmik olarak incelenerek nesne yüzeyinin yönelimi belirlenmiştir. Geliştirilen renk analiz algoritması, aydınlatma yönünden bağımsız olarak nesne yüzeyindeki çukur ve tümsekleri başarılı bir şekilde ayırt etmektedir. Tez kapsamında geliştirilen doğrusallaştırma tabanlı yöntemin ve literatürdeki mevcut beş farklı GTŞE yönteminin bu geliştirilen renk analizi ile yüzey yönelimi belirleme algoritması yardımıyla daha doğru yüzey tahmini yaptıkları detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

1.1. Yapılan Katkıları ve Tez Organizasyonu

Tez kapsamında yapılan çalışmalar aşağıda listelenmiştir:

- 1- Gri seviye görüntü piksellerinin nümerik gradyanları ve Fourier dönüşümleri kullanılarak doğrusallaştırma tabanlı karma bir 3B şekil elde etme algoritması geliştirilmesi.
- 2- Sentetik yüzeyler üretilerek ve literatürdeki farklı veri setleri kullanılarak geliştirilen yöntemin diğer doğrusallaştırma tabanlı yöntemlerle karşılaştırılması
- 3- Metalik bileşenlerin yüzey kontrolü için proje ekibi dahilinde bir görüntü alma ve işleme sisteminin tasarlanması.
- 4- Tasarlanan kusur tespit sistemi kullanılarak alınan görüntüler üzerinde geliştirilen GTŞE yönteminin kullanılmasıyla kusur yerlerinin tespit edilmesi.
- 5- Yüzeyin iç bükey veya dış bükey olma belirsizliğinin çözülebilmesi için 3B modelleme ortamında bir çözüm önerisinin sunulması ve renk desenlerini inceleyen algoritma geliştirerek yüzey yöneliminin doğru tahmin edilmesinin sağlanması

Tez içeriğinin geri kalanı ise şu şekilde özetlenebilir: 2. Bölüm'de literatürdeki GTŞE yöntemleri ve kusur tespit çalışmaları incelenmiştir. 3. Bölüm'de temel GTŞE yaklaşımlarının, doğrusallaştırma tabanlı sınıflandırılan yöntemlerin ve önerilen yöntemin matematiksel ve algoritmik alt yapıları açıklanmıştır. 4. Bölüm'de üretilen sentetik görüntüler ve veri setlerinden seçilen görüntüler üzerinde algoritmaların başarımları ayrıntılı olarak sunulmuştur. 5. Bölüm'de metalik parçaların yüzey kontrolü için bütün bir sistem önerisi yapılmış, geliştirilen algoritma üretim aşamasındaki metal parçaların yüzeylerindeki kusurların tespit edilmesi endüstriyel probleminde kullanılmıştır. 6. Bölüm'de GTŞE yaklaşımlarının temel problemlerinden biri olan yüzey noktasının iç bükey veya dış bükey olma belirsizliği probleminde 3B modelleme ortamı kullanılarak bir çözüm önerisi sunulmuştur. Son bölümde ise yapılan çalışmaların sonuçları tartışılmış ve önerilerde bulunulmuştur.

BÖLÜM 2. LİTERATÜR ÖZETİ

GTŞE yöntemleri çoğunlukla tek bir görüntü üzerindeki gölgeleme varyasyonlarını ipucu olarak kullanan görüntüden 3B'ye doğru tersine bir problemdir. Eğer yüzey üzerindeki her bir noktada yüzey normaleri biliniyorsa, yüzey geometrisi ölçeklendirilebilir. Bu nedenle GTŞE algoritmalarının çoğu yüzey normalerinin oluşturulmasını araştırmaktadır [17].

Tek bir görüntüden tonlama farklılıklarını kullanarak yüzey elde etme problemi, çok sayıda bilinmeyen parametreleri barındırdığından dolayı bu gibi tersine problemleri çözmek için uygun varsayımlar yapılması gerekir. Bu nedenle, çözüme giderken algoritmik anlamda sürekli farklı yaklaşımlar öne sürülmüş ve çok geniş bir yöntem havuzuna sahip olmuştur. Ayrıca GTŞE yöntemi ile elde edilen 3B yüzey bilgileri; yüzey topografisi ve arazi analizi [18-22], biyometrik çalışmalar [23-25], endüstriyel kalite kontrolü [7, 26], tıbbi teşhis ve tedavi gibi [27, 28] birçok farklı alanda da kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasının konusu karma bir GTŞE yöntemi geliştirilmesi ve GTŞE yöntemlerinin metalik parçaların yüzey kontrolünde kullanılması üzerine olduğu için literatür çalışmaları iki ayrı başlık olarak ele alınmıştır. Öncelikle GTŞE yöntemlerinin gelişimi incelenmiş, ardından yüzey kontrolü ve kusur tespiti üzerine yapılan çalışmalara odaklanılmıştır.

2.1. GTŞE Yöntemleri Literatür Çalışması

Bu bölümdeki literatür çalışmasında GTŞE yöntemlerinin genel algoritmik ve matematiksel gelişimleri incelenmiş ve son güncel çalışmalara değinilmiştir. Ayrıca

bu çalışmanın da temelindeki doğrusallaştırma tabanlı yöntemlerin kullanıldığı çalışmalardan detaylı olarak bahsedilmiştir.

Zhang ve ark. [12] GTŞE algoritmalarını dört sınıf altında ele alarak altı tane iyi bilinen GTŞE algoritmasını analiz etmişlerdir. Seçtikleri altı algoritmayı sentetik ile gerçek görüntüler üzerinde derinlik bilgisinin ortalama hatası, standart sapma hatası, yüzey gradyan (p, q) ortalama hatası ve CPU zamanı parametreleri üzerinden karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Durou ve ark. [13] ise Zheng ve ark. [12] çalışması üzerine bazı güncellemeler getirerek bir önceki dört sınıfa ayrılan yöntemleri üç sınıf başlığı olacak şekilde ayırmışlardır. Her bir sınıftan seçilen yöntemlerin kısa birer tanımlamasını yapmış, temel varsayımlarını ve matematiksel yaklaşımını açıklamışlardır. Ayrıca verim ve doğruluk üzerine testler uygulamışlardır. [12] ve [13] referans numaralı inceleme çalışmalarından elde edilen bazı yöntem sınıflandırmaları Tablo 2.1. ve Tablo 2.3.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Çözüm arama yöntemlerine göre GTŞE sınıflandırma örneği [12].

<i>Minimizasyon</i>	<i>Yayılm</i>	<i>Yerel</i>	<i>Doğrusal</i>
Ikeuchi&Horn(1981)	Horn(1970)	Pentland(1984)	Pentland(1989)
Brooks&Horn(1985)	Rouy&Tourin(1992)	Lee&Rosenfeld(1985)	Tsai&Shah(1994)
Frankot&Chellappa(1988)	Dupuis&Oliensis(1992)		
Horn(1989)	Kimmel&Bruckstein(1992)		
Malik&Maydan(1989)	Bichsel&Pentland(1992)		
Szeliski(1991)			
Zheng&Chellappa(1991)			
Leclerc&Bobick(1991)			
Lee&Kuo(1993)			
Vega&Yang(1993)			

Yukarıdaki sınıflandırmalara göre GTŞE algoritmaları nümerik tabanlı yaklaşımlar olarak ele alındığında genel anlamda dört başlık altında incelenebilir: Minimizasyon yaklaşımları, yayılım yaklaşımları, yerel yaklaşımlar ve doğrusal yaklaşımlar. Minimizasyon yaklaşımları; tüm görüntü üzerinde iyi tanımlanmış bir enerji fonksiyonunu minimize ederek nesnenin şeklini oluşturur. Belirlenen parlaklık, düzlük vb. sabitler arasındaki ilişki sonucunda oluşturulan enerji fonksiyonuna göre çözüm üretilmektedir. Oluşturulacak şekil ise bu sabitler arasındaki enerji

fonksiyonunun minimize edilmesi ile hesaplanmaktadır [29, 30]. Yayılım yaklaşımları, görüntüdeki en parlak veya en karanlık gibi özel noktalar olarak tanımlanmış bir iç eğriden başlar ve şekil bilgisini tüm görüntü üzerine yayar [29]. Yerel yaklaşımlar, yüzey tipi varsayımına dayalı olarak şekli türetir. Ölçülen yoğunluğun türevleri, bu varsayılan küresel yüzeyler ile eşleştirilerek şekil elde edilmeye çalışılır [29]. Bu tez çalışmasının temelindeki doğrusal yaklaşımlar ise yansıtma fonksiyonunun doğrusallaştırılmasına dayalı olarak çözüm üretirler [12]. Bu yöntemler, yansıtma haritasını eğilimler veya derinlik yönünde doğrusallaştırır. Doğrusal model çözülebilir ve nesne şekli hesaplanabilir.

Bu sınıflandırmalara ait ilk yaklaşımlara bakılırsa Horn'un ilk önerdiği [8] karakteristik şerit yöntemi aslında bir yayılım yöntemi sayılabilir. Karakteristik şeritin yönü, yoğunluk gradyanların yönü olarak belirtilir. Yüzey gradyanlarını elde eden ilk minimizasyon yaklaşımlarından biri Ikeuchi ve Horn [31] çalışmasıdır. Parlaklık ve düzlük olmak üzere iki kısıt belirtmişlerdir. Parlaklık kısıtı, üretilen şeklin giriş görüntüsünün her bir yüzey noktası için aynı parlaklığı üretmesini gerektirir. Düzlük kısıtı ise yumuşatılmış bir yüzey oluşumunu sağlar. Şekil bu iki kısıttan oluşan bir enerji fonksiyonunun minimize edilmesiyle elde edilir. Bunları kullanarak Brooks ve Horn [32] aynı enerji fonksiyonunu yüzey normali terimleriyle minimize etmişlerdir. Frankot ve Chellepa [33] bütünleşik yüzeyler ($Z_{xy} = Z_{yx}$) elde edebilmek için bir yöntem kısıt geliştirerek doğruluk ve verimlilik yönünden [32] algoritması üzerinde gelişme göstermiştir. Daha sonraları Horn [34] düzlük kısıtını bir bütünleşebilirlik kısıtıyla değiştirmiştir. Szeliski [35] hiyerarşik temel ön koşullu bir yöntem ile çözüme ulaşmayı hızlandırmıştır. Zheng ve Chellepa [36] oluşturulan görüntü ile giriş görüntüsünün yoğunluk gradyanlarının x ve y yönlerinde birbirine yakın olmalarını gerektiren bir yoğunluk gradyan kısıtı oluşturmuşlardır. Oliensis [37] yüzey şeklinin tekil noktalardan (en yüksek parlaklığa sahip noktalar) elde edilebileceğini gözlemlemiş ve bu fikre dayalı Dupuis ve Oliensis [38, 39] GTŞE'yi optimal kontrol problemi olarak formüle ederek nümerik yöntemlerle çözmüşlerdir. Pentland'ın [40] yerel yaklaşımı 3B şekil bilgisini yoğunluk, ilk türev ve ikinci türevi kullanarak elde etmiştir. Pentland, yüzeyin her noktasını küresel bir şekil olarak varsaymıştır. Aynı küresel varsayım altında Lee ve Rosenfeld [41] yoğunluğun ilk

türevini kullanarak ışık kaynağı koordinat sistemindeki yüzeyin eğim açıları olan (slant σ ve tilt τ) açılarını kullanarak 3B şekil elde etmişlerdir. Pentland [11], çalışmasında yüzey gradyanları terimleriyle yansıtma fonksiyonunun doğrusal yaklaşımını kullanmış ve her bir noktadaki derinlik için kapalı bir form çözüm elde etmek amacıyla lineer fonksiyona Fourier dönüşümünü uygulamıştır. Tsai ve Shah [10], öncelikle gradyanın ayırık yaklaşımını uygulamışlar ardından yansıtma fonksiyonunun doğrusal yaklaşımını direkt olarak derinlik terimleriyle ele almışlardır. Algoritmaları her noktadaki derinliği Jacobi iteratif şeması kullanarak elde etmiştir.

Tablo 2.2. Çözüm arama yöntemlerine göre diğer bir GTŞE sınıflandırması [13].

<i>Kısmi diferansiyel denklemler tabanlı</i>	<i>Optimizasyon tabanlı</i>	<i>Görüntü yansıtma denklemini yakınsama</i>
Horn(1975)	Ikeuchi&Horn(1981)	Pentland(1984)
Oliensis(1991)	Brooks&Horn(1985)	Lee&Rosenfeld(1985)
Brooks ve ark.(1992)	Lee(1985)	Pentland(1989)
Rouy&Tourin(1992)	Frankot&Chellappa(1988)	Tsai&Shah(1994)
Oliensis&Dupuis(1993)	Horn(1990)	Hayakawa&Nishida(1994)
Ishii&Ramaswamy(1995)	Szeliski(1991)	Ulich(1998)
Kimmel&Bruckstein(1995)	Leclerc&Bobick(1991)	
Camilli&Falcone(1996)	Zheng&Chellappa(1991)	
Falcone&Sagona(1997)	Lee&Kuo(1993)	
Kimmel&Sethian(2001)	Worthington&Hancock(1999)	
Falcone ve ark.(2003)	Daniel&Durou(2000)	
Tankus ve ark.(2005)	Crouzil ve ark.(2003)	
Prados&Faugeras(2005)	Courteille ve ark.(2006)	

Yukarıda bahsedilen algoritmaların ilk zamanki gelişimlerinin ardından GTŞE yöntemleri, çözüm ararken karşılaştıkları problemlerin ve parametrelerin çokluğundan dolayı oldukça fazla araştırma konusuna ilham kaynağı olmuştur. Yüzey yansıtıcılık oranı [42, 43], yüzey yansıtması (genellikle Lambert modeli kullanılır) [44, 45], minimizasyon yaklaşımlarındaki kısıtlar [31, 33], kısmi diferansiyel denklemler çözüm yaklaşımları [13], aydınlanma konumu [36], projeksiyon türü [46, 47], belirsizlik problemi [48, 49] vb. konularda çalışmalar yapılmıştır. GTŞE yönteminin güçlü yanlarını diğer 3B oluşturma teknikleri ile birleştirme çalışmaları da oldukça ilgi çekici bulunmuştur. Özellikle GTŞE ve stereo

yaklaşımlarını birleştiren birçok çalışma gerçekleştirilmiştir: Haines ve ark. [50] Gauss yayılımı kullanarak GTŞE bilgisini stereo ile birleştiren bir yöntem geliştirmişlerdir. Mostafa ve ark. [51] genişletilmiş bir Kalman filtresi ve ileri beslemeli yapay sinir ağı yardımıyla 3B oluşumu iyileştiren düşük seviye görme modülleri, stereo ve GTŞE'yi birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir. Sakarya ve Erkmen [52] yerel GTŞE ile birleştirilmiş bir fotometrik stereo yaklaşımı geliştirmişlerdir.

Bu geniş çalışma alanında, optimizasyon ve makine öğrenmesine dayalı yöntemler literatürdeki yerlerini almışlardır. Sinirsel ağlar [53, 54], Genetik algoritma (GA) [55], Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO) [56], Tabu arama [48], Benzetilmiş Tavlama (Simulated Annealing - SA) [57] tabanlı yöntemler çalışılmıştır. Son zamanlarda ise derin sinirsel ağlarla 3B oluşum yöntemleri üzerine çalışmalar hızla devam etmektedir [58, 59].

Bahsedilen analitik çözümler, algoritmik gelişmeler, optimizasyon teknikleri ve öğrenmeye dayalı yöntemlerin yanı sıra 3B oluşturma tekniklerinin kullanılması ile elde edilen derinlik bilgileri, çok çeşitli alanlarda ve birçok farklı uygulamalarda kullanılmıştır. Tankus ve ark. [60] tıbbi endoskopi gibi gerçek yaşam uygulamaları için perspektif GTŞE'nin uygulanabilirliğini incelemişlerdir. Bu çalışma kapsamında yapılan Kotan ve Öz [7] çalışmasında, endüstriyel bileşenler için minimizasyon tekniğine dayalı bir yöntemle yüzey kalite kontrolü gerçekleştirilerek doğrusallaştırma yöntemleriyle sonuçları karşılaştırılmıştır. Gallen ve ark. [61] tarihi nesnelerin sayısal görüntüleme tekniği ve sanal nesnelerin online teslimatı üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Ciaccio ve ark. [62] tedavi edilmeyen çölyak hastalarının normal hastalara göre daha büyük ve çeşitli olan ince bağırsak mukoza dokuları üzerinde çalışma yaparak GTŞE ilkelerine dayalı 3B modellemenin sınıflandırma doğruluğunu arttırdığını savunmuşlardır. Han ve Zhu [63] 2B kumaş görüntüsünü ve 3B kumaş yüzeyini temsil etmek için iki katmanlı üretken bir model sunmuşlardır. Jiang ve ark. [64] GTŞE yöntemi kullanarak yüz üzerindeki ince geometrik detayları bulmaya çalışmışlardır. Kazmi ve ark. [65] eskizlerden mantıklı insan karakter modelleri oluşturmak için, genelleştirilmiş silindirler ve küpler gibi

geometrik şekilleri GTŞE algoritmalarıyla birleştiren karma bir yaklaşım önermişlerdir. Snape [66] 2B bir görüntüden yüz şeklinin oluşturulmasında GTŞE yöntemine istatistiksel bir model dahil etmiştir. Ayrıca normalleri Öklit uzayına yansıtmanın istatistiksel modelin yüz şeklini düzeltme yeteneğini geliştirdiğini öne sürmüştür.

Geliştirilen yöntemin temelindeki Pentland ve Tsai-Shah algoritmaları yaklaşık 25 yıllık yöntemler olmasına ve kendisinden sonra oldukça farklı GTŞE yöntemleri ortaya çıkmasına rağmen iyi sonuçlar üretmeleri, basit altyapıları ve uyarlama kolaylığından dolayı çalışmalarda halen tercih edilmektedir. Salary ve ark. [67] Fonksiyonel elektriksel özelliklerin çevrimiçi görüntülenmesini incelemiş ve çevrimiçi görüntülerden kesit profillerini oluşturmak için Pentland ve Tsai-Shah yöntemlerini testlerinde kullanmışlardır. Pradhan ve ark. [68] uydu görüntülerinden 3B şekil elde etmek için Pentland algoritması ve diğer bazı GTŞE yöntemlerini kullanmışlardır. Ghayourmanesh ve Zahng [69], Pentland doğrusal GTŞE algoritmasının daha gelişmiş yinelemeli bir tekniğini geliştirmişlerdir. Sentetik Açıklıklı Radar (SAR) görüntüleri için denklemler ve geometrik modeller çıkarmışlardır. Fanany ve Kumazawa [70], 3B şekil inşa etmek için geri yayımlı model kullanan yeni bir yapay sinir ağı önermiş ve öğrenmeyi Tsai-Shah algoritmasından elde edilen derinlik haritalarına dayandırmışlardır. Yöntemleri GTŞE derinlik haritasını yumuşatmış ve hataları düzeltmiştir. Zhang ve ark. [71] dört çeşit meyve üzerinde Tsai-Shah algoritmasıyla yükseklik ve normalleri elde etmiş, ve kamerayla alınan meyve görüntülerindeki kıvrımlardan kaynaklanan istenmeyen etkileri düzeltmek için bir yöntem önermişlerdir. Turan ve ark. [72], doktora daha sezgisel ve doğru teşhislerinde yardımcı olabilecek özellikle endoskopik kapsül robotlar için geliştirilmiş RGB-Depth SLAM (simultaneous localization and mapping) yöntemi önermişler ve derinlik haritalarının tahmininde Tsai-Shah yönteminden faydalanmışlardır. Tsai-Shah yöntemi ardışık endoskopik görüntülerin derinlik haritalarının çıkarsanmasında kullanılmıştır. Zhang ve Negahdaripour [73], su altındaki nesnelerin 3B şeklini elde etmede Tsai-Shah algoritmasının geliştirilmesine dayalı iki yöntem denemişlerdir. Fanany ve ark. [74] çalışmalarında yüz inşası için bir sinirsel ağ öğrenme şeması sunmuşlardır. Derinlik

haritalarını elde etmek için Tsai-Shah algoritması kullanılmıştır. Kong [26], Tsai-Shah yöntemine dayalı önermesiyle baskı devre üzerindeki lehim noktalarının yeniden oluşturma çalışmasını gerçekleştirmiştir. Cadavid ve Abdel-Mottaleb [23] çalışmalarında her bir video çerçevesinde yer alan kulak nesnelерinin modellenmesinde Tsai-Shah tarafından geliştirilen algoritmayı kullanmışlardır. Barron ve Malik [43] çalışmaları albedonun eşsiz veya bilinmesi gerekliliği varsayımını ele almış ve “shape and albedo from shading (SAFS)” problemini tanıtmışlardır. Çalışmalarındaki model Tsai-Shah yönteminin geliştirilmiş bir versiyonudur. Turan ve ark. [75] çalışmalarında 2B endoskopik görüntülerden 3B elde etmek için Tsai-Shah yöntemini kullanarak eğitilmiş öğrenmeye dayalı bir yöntem sunmuşlardır. Wang ve ark. [76] akışkan yüzeyini hesaplamak ve yeniden canlandırmak için video tabanlı akışkan yüzeyi oluşumunu ve popüler akışkan animasyon modellerini birleştiren karma bir yöntem önermişlerdir. Her bir video çerçevesine karşılık akışkan yüzeyin yüksekliği Tsai-Shah GTŞE yöntemi ile tahmin edilmiştir. Yang ve ark. [77] ark kaynağı robotu için 3B oluşum teknolojisine dayanan yeni bir kaynak algılama sistemi kurmuşlardır. Kaynak dikişinin 3B şeklini oluşturmada Tsai-Shah kullanılmıştır. Kumar S. ve Kumar M. [78] Tsai-Shah doğrusal yaklaşımını genelleştirilmiş Lambert yansıtma haritası ile birlikte kullanmışlardır. Eğitilen ağın girişı olarak GTŞE ile elde edilen yoğun derinlik haritası kullanılmış ve son derinlik haritasının elde edilmesinde bu eğitilen ağ kullanılmıştır. Algoritmalar ayrıca bazı çalışmalarda karşılaştırma amaçlı olarak da kullanılmıştır [7, 12, 13, 79, 80, 81].

2.2. Yüzey Kontrolü Üzerine Yapılan Çalışmalar

Günümüz endüstrisi yüksek hassasiyette parçalara ihtiyaç duymaktadır. Bu yüzden üretilen parçaların kalite kontrolü gerçekleştirilerek kaliteli parçaların sürekliliği ve hatanın sifira indirilmesi istenmektedir. Ürünlerde hata incelemesi, üretim sürecindeki önemli bir aşamadır ve her bir parçada kalite standardını yakalamak zor bir iştir. Bununla birlikte, inceleme işlemleri çoğu durumda insanlar tarafından yapılan zaman alıcı bir süreçtir. İnsan denetimi yetersiz kalabilmekte, yorgunluk ve dalgınlık gibi sebeplerden dolayı doğruluk derecesi düşük olabilmektedir. Ayrıca,

inceleme çalışanlarının eğitime ihtiyacı vardır ve becerilerin geliştirilmesi zaman alıcı bir iştir. Bilgisayarlara kıyasla insanların çalışma zamanı oldukça kısadır [82]. Bu nedenle seri üretimde kalite kontrolünün genellikle bilgisayar görmesi yolu ile yapılması gerekmektedir.

Metalik yüzeylerin kalite kontrolünün bilgisayar görmesi yolu ile gerçekleştirilmesi, çözümü zor bir problemidir. Pürüzsüz yüzeylerle karşılaştırıldığında, metalik bir yüzeyde kusur tespitini zorlaştıran düzensiz aydınlatma, güçlü yansıma ve arka plan gürültüsü gibi bazı sorunlar oluşabilmektedir. Yüzey kusur tespit teknikleri, temel olarak geleneksel görüntü işleme ve makine öğrenmesine dayalı yöntemler olarak ayrılabilir [83]. Geleneksel görüntü işleme yöntemleri, kusurları tespit etmek ve bölümlenmek için bölgesel kusurlar tarafından yansıtılan özellikleri kullanır. Kenar bulma, morfolojik işlemler, Otsu yöntemi, kontrast ayarlama, eşik değer yöntemi, Kittler yöntemi, Fourier dönüşümü, dalgacık dönüşümü, Gabor dönüşümü, Gaussian karmaşık entropi modeli gibi yöntemler bu geniş yöntem havuzundan bazılarıdır. Makine öğrenmesi tabanlı yöntemler ise genellikle özellik çıkarma ve örüntü sınıflandırma iki aşama barındırır. Giriş imgesinin karakteristiği analiz edilerek kusur bilgisini tanımlayan özellik vektörü tasarlanır ve ardından özellik vektörü kusurun olup olmadığını belirlemek üzere eğitilen sınıflandırıcı bir modele verilir. Bu tez çalışmasında ise öncelikle GTŞE algoritması yardımıyla nesnenin 3B şeklinin tahmin edilmesi, ardından geleneksel görüntü işleme yöntemleri kullanılarak kusur bölgelerinin tespiti amaçlanmaktadır.

Literatürde metal ve çeşitli farklı yüzeylerin kusurlarını tespit etmek için yapılan birçok çalışma vardır. Pishyar ve Emadi [84] çelik levhaların kalitesi için kusur tespitlerinde Yapay Sinir Ağları (YSA), Destek Vektör Makineleri (DVM), Gabor Filtresi gibi yöntemleri detaylı bir şekilde karşılaştırmışlardır. Deshmukh ve ark. [85] Gri seviyeli görüntülerdeki kusurları bulmak için Medyan filtresi, Gabor filtresi ve Bağımsız Bileşen Analizi yöntemlerini karşılaştırmışlardır. Jonker ve ark. [86] metal parçalardaki kusurları ayırt etmek için örüntü tanıma sistemlerinden faydalanmışlardır. Choi ve ark. [87] Laplasian filtreleme yöntemi ile çelik çubuklardaki kusurları tespit etmişlerdir. Morala ve ark. [88] Dalgacık

dönüşümünden faydalanarak Haralick özelliklerinin çıkarılması ile pürüzlü yüzey tespitini gerçekleştirmişlerdir. Wang ve ark. [89] çelik toplar üzerindeki yüzey kusurlarını tespit etmişlerdir. Dome (Kubbe) aydınlatma sistemi ile gölgelenme problemini ortadan kaldırmışlardır. Senthikumar ve ark. [90] yinelemeli eşikleme tekniği kullanarak metal yüzeylerdeki çatlak ve büzülmelerin gerçek zamanlı tespitini yapmışlardır. Raheja ve ark. [91] Gabor filtresi ve gri seviye eş oluşum matrisleri (GLCM) yaklaşımını doku kusur tespiti için kullanmışlar ve GLCM kullanımının kusur tespitinde daha iyi sonuçlar verdiğini göstermişlerdir. Aarthi ve ark. [92] 2B ayrık dalgacık dönüşümü kullanarak metallerde kusur tespiti için bir teknik geliştirmişlerdir. Sivabalan ve ark. [93] yüzey analizi için Gabor dalgacık dönüşümü ve Gaussian filtreleme kullanmışlardır. Choi ve ark. [94] çelik tabakalar üzerindeki çatlakların tespiti için Gabor filtresi ve çift eşik değeri yöntemi kullanmışlardır. Rahaman ve ark. [95] seramik üzerine görüntü arttırma, gürültü azaltma ve kenar tespiti içeren görüntü işleme yöntemlerini kullanarak kusur tespit tekniği önermişlerdir. Wang ve ark. [96] mekanik parçaların yüzey kusur analizinde, öncelikle kusur üzerindeki gürültüleri elimine etmek için ortalama filtre uygulamış, ardından segmentasyon eşik değerleri uygulayarak mekanik parçanın yüzey kusurlarını ayırmışlardır. Malekian ve ark. [97] sayısal görüntü analiz tekniklerini kullanarak, sıcak çelik levhalar üzerindeki yüzey çatlaklarının otomatik olarak tespit edilmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Dalgacık dönüşümü, morfolojik işlemler, kenar tespiti, k-means kümeleme ve YSA sınıflandırıcısı kullanmışlardır. Sarosi ve ark. [98] kızıl ötesi görüntüler kullanarak metal levhalar üzerindeki yüzey kusurlarının tespit edilmesi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Sharma ve Thind [99] görüntü işleme kullanarak metallerdeki paslanmanın tespiti ile ilgili tekniklerin araştırmasını yapmışlardır. Zheng ve ark. [100] genetik algoritmaları kullanarak metal yüzeylerdeki kusurların otomatik olarak tespitini sağlamışlardır. Lohade ve Chopade [101] farklı eşikleme teknikleri kullanarak metal yüzeylerdeki kusur tespitini bulan bir çalışma yapmışlardır. Luiz ve ark. [102] bilgisayar görmesi ve YSA kullanarak haddelenmiş çelik yüzeylerdeki çeşitli kusurları tespit etmişlerdir. Pernkopf ve O'Leary [103] metalik yüzeylerin görmeye dayalı analizi için kullanılan üç farklı tipteki görüntü alma yöntem grubunu incelemiştir. Luo ve He [104] sıcak şekilde rulo haline getirilen çelik levhalar için bilgisayar görmesine dayalı bir hata

tespit yöntemi geliştirmiştir. Yuan ve ark. [105] hata tespiti için Otsu eşikleme yönteminin gelişmiş bir versiyonunu kullanmışlardır. Shen ve ark. [106] rulman yüzeyleri üzerindeki deformasyon, pas, çizik gibi çeşitli hataların tespiti için bir makina görmesi yöntemi geliştirmiş ve özel bir görüntü alma sistemi ile hataların görünümelerini arttırmışlardır.

Kusur tespit çalışmalarında %85-99 arasında başarımlar gösteren yöntemler literatürde sunulmuştur [85, 91, 93, 107, 108]. Son zamanlarda evrişimsel sinir ağlarına (Convolutional neural networks - CNN) dayalı bazı kusur tespit yöntemleri de literatürde sıklıkla çalışılmaya başlanmıştır [83, 109, 110, 111].

Bu tez çalışmasında ele alındığı gibi 3B oluşum yöntemleri de yüzey inceleme çalışmalarında kullanılmaktadır. Landström ve ark. [112] çizgi taramalı kamera ve farklı renklerde iki ışık kaynağından oluşan fotometrik stereo kurulumu ile döküm çelik üzerindeki küçük köşe çatlaklarını kontrol eden bir yöntem sunmuşlardır. Kang ve ark. [113] çelik bir yüzey üzerindeki kusurların tespiti için yöntem ve donanım önermesi yapmışlardır. Çok bantlı fotometrik stereo tekniğı kullanarak düz çelik yüzey üzerinde 3B karakteristikleri kullanarak kusur tespit sistemi geliştirmişlerdir. [7] çalışmasında endüstriyel bileşenlerin yüzey kalite kontrolü için bileşen görüntüleri üzerinde minimizasyon ve doğrusallaştırma tabanlı GTŞE yöntemleri kullanılarak elde edilen derinlik haritaları kusur tespitinde kullanılmış ve yöntemlerin başarımları karşılaştırılmıştır. Quanying ve ark. [114] kaynak bölgesinin görüntüsünü bir optik algılama yöntemiyle kaydedip, 3B Şekil parametrelerini tek bir görüntüye dayanan bir GTŞE yöntemi ile hesaplayarak otomatik bir inceleme sistemi önermişlerdir. Kong [26], GTŞE yöntemine dayalı olarak baskı devre üzerindeki lehim bağlantı yüzeylerini incelemiştir. Podrekar ve ark. [115] fotometrik stereo konfigürasyonu ile farklı yönelimdeki aydınlatmaları kullanarak her bir ilaç tableti için 4 farklı görüntü almışlardır. Elde edilen derinlik haritalarını test aşamalarında elde edilen tablet modeliyle karşılaştırarak ön tanımlı eşik değerine göre kusurlu veya kusursuz ayrımı yapmışlardır.

BÖLÜM 3. GÖRÜNTÜ TONLARINDAN ŞEKİL ELDE ETME ALTYAPISI

Bilgisayar grafikleri alanı, genellikle görüntü oluşum sürecinin benzetimi ile ilgilenir. 3B yüzey geometrisi, aydınlanma yönü ve yüzey yansıtıcılığı verildiği zaman kamera cihazının işlevine benzer bir şekilde görüntüler oluşturulur. Ancak GTŞE yöntemleri prensibine göre görüntü, aydınlanma modeli ve yüzey yansıtıcılığı modeli verildiğinde yüzey geometrisinin elde edilmesi amaçlanır [17].

Bir görüntüden elde edilen yoğunluk değeri; ortamdaki aydınlanma, nesnenin yüzey yansıtıcılığı, nesnenin yüzey geometrisi ve görüntü yakalama cihazının özellikleri gibi temel faktörlere dayalıdır. Aydınlatma faktörü değeri; yön, konum ve spektral enerji dağılımı gibi özellikleriyle tanımlanabilir. Nesnenin yüzey yansıtıcılığı, GTŞE literatüründe çoğunlukla albedo değeri olarak geçmekte ve bilgisayar grafikleri alanı içerisinde yüzey yansıtma katsayısı olarak ele alınmaktadır. Bilinmeyen parametrelerinin çokluğundan dolayı bu gibi şekil elde etme problemlerinde bazı uygun varsayımlar yapılması gerekir.

Üzerinde işlem yapılan görüntü birkaç yönden ifade edilebilir: derinlik $Z(x,y)$, yüzey normali (n_x, n_y, n_z) , yüzey gradyanı (p, q) , yüzey eğim açıları olan slant (σ) ve tilt (τ) vs. [12].

$n = (n_x, n_y, n_z)$ değeri yüzeyin (x, y, z) noktasındaki yüzey normalini veren birim vektör olmak üzere yüzey oryantasyonu her bir (x, y, z) noktasındaki yüzey normalinin tanımlanmasıyla elde edilebilir. Hesaplamalarda n , kendi tilt (τ_n) ve slant (σ_n) açılarıyla $n = (\tau_n, \sigma_n)$ olarak da gösterilebilir. Küresel ve Kartezyen koordinatlar arası ilişkiden dolayı normal vektörü Denklem 3.1'de gösterildiği gibi tanımlanabilir.

$$n = (n_x, n_y, n_z) = [\sin\sigma_n \cos\tau_n, \sin\sigma_n \sin\tau_n, \cos\sigma_n]^T \quad (3.1)$$

Burada τ_n , x eksenine ve normalin x-y düzlemine projeksiyonu arasındaki açıdır. σ_n ise z eksenine ve normal arasındaki açıdır.

Yüzey oryantasyonunun bir diğer gösterimi ise gradyan gösterimidir. Yüzey değeri $Z = Z(x, y)$ olarak verildiğinde $(x, y, Z(x, y))$ noktasındaki gradyan (p, q) değerleri x ve y yönlerindeki kısmi türevlerdir.

$$p = \frac{\partial Z(x,y)}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$q = \frac{\partial Z(x,y)}{\partial y} \quad (3.3)$$

$(1,0,p)$ ve $(0,1,q)$ yüzey eğilimi vektörleri, (x, y, z) noktasındaki tanjant düzlemi üzerindeki vektörler olduğundan dolayı bu eğimlerin vektörler çarpımı tanjant düzlemine dik bir vektör üretecektir. Ardından bu sonuç vektörü birim uzunluğunda normal vektörüne dönüştürülür. Birim normal vektörü yüzey gradyanları terimleriyle Denklem 3.4'deki gibi gösterilebilir.

$$n = \frac{1}{\sqrt{1+p^2+q^2}} [-p, -q, 1]^T \quad (3.4)$$

Genel olarak yüzey yansıtıcılığı, yansıtılan yönün ve olay yönünün bir fonksiyonudur. Bu nedenle yönlü bir özelliktir. Karmaşık yüzeylerin görünüşünü modelleyebilmek için bu yüzeylerden ışığın yansımalarının tam olarak tanımlanması gerekir. Bu amaçla, İki Yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu (Bidirectional Reflectance Distribution Function-BRDF) yüzeyin görünüşünü modellemek için kullanılmaktadır [116, 117]. Teorik olarak BRDF; gelen ışık vektörü, giden ışık (bakış) vektörü, dalga boyu ve yüzey pozisyonu gibi birçok faktöre bağlıdır [117].

Gri seviyeli bir görüntüdeki piksel değerleri aslında o noktadaki kodlanmış ışık miktarına karşılık gelmektedir. Bu değerler yüzey özellikleri ve ışık kaynağı arasındaki ilişki ile belirlenmektedir [30]. Yansıtma haritası, yüzeyden yansıtılan ışığın oranını fonksiyonel olarak belirtir. Görünen yüzeyin yoğunluğu direkt olarak yüzey radyansı (yüzeyden yansıtılan ışık miktarı) ile orantılıdır. Orantılı sabitlerin bir olarak ayarlanması ve uygun optik seçimleriyle birlikte görüntü yoğunluğu ve yansıtma haritası Denklem 3.5’de gösterildiği gibi eşit sayılabilir [118].

$$I(x, y) = R(x, y, z) \quad (3.5)$$

Burada $I(x, y)$ görüntü yoğunluk değerini, $R(x, y, z)$ ise yansıtma haritasını temsil etmektedir. Yansıma modelleri GTŞE’de kullanılan temel şekil oluşturma modelleridir. En çok kullanılan modellerden biri Lambert modelidir. Lambert yüzeyler, ışığı tüm yönlerde yansıtan dağınık yansımaya sahip yüzeylerdir. Yüzey elemanı üzerine düşen enerji miktarı ile ışık kaynağı konumundan görülen yüzey elemanı alanı orantılıdır. Yoğunluk değeri, aydınlanma yönü ve yüzey normali arasındaki açıya bağlıdır. Böylelikle Lambert varsayımına göre (x, y, z) noktasındaki yansıma bir θ açısı ve ρ yüzey yansıtıcılığının (albedo) bir fonksiyonudur. Lambert modeli aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$R(x, y, z) = \rho \cos \theta \quad (3.6)$$

ρ değeri albedo, θ ise aydınlanma yönü ve yüzey normali arasındaki açıdır.

θ açısı, (x, y, z) yüzey noktasına göre tüm görünür yüzey noktaları aynı yönden aynı miktarda ışık almaktadır varsayımı altında sabit olarak düşünülebilir ancak ilgilenilen yüzeye göre ρ değeri farklı noktalarda farklı değerler alabilir. Bazı GTŞE algoritmaları problemi kolaylaştırmak adına sabit ρ varsayımı yapmaktadır. Kosinüs değerini hesaplamak için normalize edilmiş normal vektörü ve aydınlatma vektörleri kullanılabilir. Birim vektörlerin kullanılmasıyla Denklem 3.6 aşağıdaki gibi (Denklem 3.7) yazılabilir.

$$R_{\rho,I}(p, q) = \rho L^T n = \frac{\rho}{\sqrt{1+p^2+q^2}} L^T [-p, -q, 1]^T \quad (3.7)$$

Yüzey yansıtıcılığı ve aydınlatma yönü verildiğinde gradyan uzayında tanımlı (p, q) noktasında tanımlı $R_{p,I}$ yansıtma haritası, yüzey normali ve aydınlatma yönünün noktasal çarpımının albedo ile ölçeklenmiş terimleriyle ifade edilebilir. Üretilen gri seviye görüntü ve kamera tarafından alınan ışık miktarı doğrudan orantılı olduğundan görüntü parlaklığı ve yansıtma denklemi arasındaki ilişki Denklem 3.8'deki gibi verilebilir.

$$I(x, y) = R_{\rho,I}(p, q) \quad (3.8)$$

Denklem 3.6 birçok GTŞE algoritmasının başlangıç noktasıdır. Ancak, bilinmeyen $Z = Z(x, y)$ yüzeyinin gradyanları olan $p(x, y)$ ve $q(x, y)$ değerleri doğrusal olmayan kısmi diferansiyel denklemdir ve kısmi diferansiyel eşitliğin bağlı olduğu sınır koşulları, aydınlanma yönü ve yüzey yansıtıcılığı gibi genellikle bilinmeyen değerlere bağlıdır. Bu yüzden birçok çalışmaya ilham kaynağı olmuş büyük matematiksel karmaşa içermektedir. GTŞE yaklaşımları 2. Bölüm'de anlatıldığı üzere çözüm arama yöntemlerine göre farklı sınıflar altında listelenmektedirler. Tezin buradan sonraki kısmında bu çalışmanın temelini oluşturan yansıtma denkleminin doğrusallaştırılması çalışmaları ele alınmıştır.

3.1. Doğrusallaştırma Tabanlı Yaklaşımlar

Doğrusal yaklaşımlar yansıtma denkleminin doğrusallaştırılması ile doğrusal olmayan problemi indirgemeye çalışır. Bu metotlar yansıtma haritasını eğilimler veya derinlik yönünde doğrusallaştırır. Doğrusallaştırılmış modeller çözülebilir ve nesnenin şekli hesaplanabilir. Pentland ve Tsai-Shah'a ait doğrusal yaklaşımlar yansıtma haritasının doğrusallığından yola çıkarak 3B şekli elde etmektedirler.

3.1.1. Pentland yaklaşımı

Pentland, Fourier dönüşümü kullanan ve yinelemeli bir yapıda olmayan kapalı form bir çözüm üretmiştir. Denklem 3.5'deki görüntü parlaklık denklemi aşağıdaki gibi (Denklem 3.9) yazılabilir.

$$I(x, y) = \frac{\rho \sin \sigma \cos \tau + q \sin \sigma \sin \tau + \cos \sigma}{\sqrt{1+p^2+q^2}} \quad (3.9)$$

Albedo değeri sabit varsayılır ve göz ardı edilebilir. Denklem 3.9'un Taylor serisi açılımları alınarak ve yüksek seviyeli terimlerin çıkarılmasıyla denklem indirgenir. Ayrıca Lambert bir yüzey için $p_0 = q_0 = 0$ değerinde Denklem 3.10 elde edilir [17].

$$I(x, y) = \cos \sigma + p \cos \tau \sin \sigma + q \sin \tau \sin \sigma \quad (3.10)$$

Ardından her iki tarafın Fourier dönüşümlerinin alınması ve denklemlerin düzenlenmesi ile Denklem 3.11 elde edilir [17].

$$F_Z(w_x, w_y) = \frac{F_I}{-jw_x \cos \tau \sin \sigma - jw_y \sin \tau \sin \sigma} \quad (3.11)$$

F_I verilen görüntünün, F_Z ise derinlik haritası $Z(x, y)$ 'nin Fourier dönüşümleridir. Ardından ters Fourier dönüşümü alınmasıyla $Z(x, y)$ derinliği Denklem 3.12 kullanılarak elde edilir [17].

$$Z(x, y) = F^{-1} \{F_Z(w_x, w_y)\} \quad (3.12)$$

Pentland tarafından da vurgulandığı üzere bu yaklaşımın temel sorunlarından biri, yansıtma haritasındaki ikinci dereceden terimler baskın olduğunda “frekans çiftlemesi” (frequency doubling) oluşmasıdır. Böyle bir durumda elde edilen yüzey, aydınlanma koşullarıyla tutarlı olmayacaktır.

3.1.2. Tsai-Shah yaklaşımı

Tsai ve Shah ise ilk önce p ve q gradyanlarının ayrık yaklaşımını ardından yansıma fonksiyonunu doğrusallaştırmak için $Z(x, y)$ derinliğini kullanmışlardır. Algoritmaları, her noktadaki derinliği Jacobi iteratif şemasını kullanarak elde etmiştir. [10, 12, 13, 119].

Yansıma fonksiyonu Lambert olarak kabul edilirse Tsai-Shah $f = I - R$ fonksiyonunu $(k - 1)$. iterasyonda elde edilen yüzey olan Z^{k-1} civarında Z terimleriyle doğrusallaştırmayı amaçlar. Gradyan değerlerinin Z terimleriyle ayrık yaklaşımları Denklem 3.13 ve Denklem 3.14'deki gibi gösterilebilir.

$$p = \frac{\partial Z}{\partial x} = Z(x, y) - Z(x - 1, y) \quad (3.13)$$

$$q = \frac{\partial Z}{\partial y} = Z(x, y) - Z(x, y - 1) \quad (3.14)$$

Denklem 3.5'deki yansıma denklemi aşağıdaki şekilde tekrardan yazılabilir:

$$\begin{aligned} 0 &= f[I(x, y), Z(x, y), Z(x - 1, y), Z(x, y - 1)] \\ &= I(x, y) - R(Z(x, y) - Z(x - 1, y), Z(x, y) - Z(x, y - 1)) \end{aligned} \quad (3.15)$$

Denklem 3.15 Taylor serisi açılımları ile genişletilirse yeni elde edilen denklem Jacobi yinelemeli yöntemiyle çözülebilir. Verilen Z^0 başlangıç yaklaşımı ile (k) . iterasyondaki $Z^k(x, y)$ yüzeyi önceki yüzey tahminlerini kullanarak elde edilebilir. Bu amaçla Denklem 3.15'ün Taylor serisi açılımları Denklem 3.16 olarak indirgenir. Jacobi açılımlarının detayları ve denklemlerin basitleştirilmesi adımları için Tsai ve Shah [10] çalışması incelenebilir.

$$0 = f(Z(x, y)) \approx f(Z^{k-1}(x, y)) + (Z(x, y) - Z^{k-1}(x, y)) \frac{d}{dZ(x, y)} f(Z^{k-1}(x, y)) \quad (3.16)$$

(k). iterasyondaki derinlik haritası Denklem 3.17 ve Denklem 3.18 kullanılarak doğrudan çözülebilir.

$$Z^k(x, y) = Z^{k-1}(x, y) + \frac{-f(Z^{k-1}(x, y))}{\frac{d}{dZ(x, y)}f(Z^{k-1}(x, y))} \quad (3.17)$$

Burada,

$$\frac{df(Z^{k-1}(x, y))}{dZ(x, y)} = -\left(\frac{(ps+qs)}{\sqrt{p^2+q^2+1}\sqrt{p_s^2+q_s^2+1}} - \frac{(p+q)(pp_s+qq_s+1)}{\sqrt{(p^2+q^2+1)^3}\sqrt{p_s^2+q_s^2+1}}\right) \quad (3.18)$$

Ardından $Z^0 = 0$ yüzey varsayımı yapılarak sonuç yüzeyi $Z(x, y)$, Denklem 3.17 kullanılarak yinelemeli olarak elde edilir. Tsai-Shah algoritmasının Pentland algoritması ile karşılaştırılması ayrıca bir bölüm olarak Tsai ve Shah çalışmasında sunulmuştur.

3.1.3. Geliştirilen yöntem

Geliştirilen yöntem GTŞE teknikleri arasında sıklıkla kullanılan yöntemlerden olan Tsai-Shah [6] algoritmasına bir ön bilgi sağlayarak hesaplanan derinlik verisini iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Pentland'ın [11] varsayımından esinlenerek gri seviye görüntü üzerinden hesaplanan nümerik gradyanların Fourier dönüşüm katsayılarını bir ön bilgi olarak Tsai-Shah algoritmasına vererek sonuçları incelenmiştir. Böylece Z^1 yüzeyi için doğrusallaştırılmış gri seviye nümerik gradyanları bir ön bilgi sağlamaktadır. Öncelikle görüntü matrisinin nümerik gradyanları hesaplanmaktadır. Bir fonksiyonun nümerik gradyanı fonksiyonun belirli noktadaki bilinen değerlerini kullanarak her bir boyut için kısmi türev değerlerini tahmin etme yöntemidir.

İki değişkenli bir $F(x, y)$ fonksiyonu için p_x , yatay x yönündeki farklılıkları gösteren $\frac{\partial F}{\partial x}$; q_y , dikey y yönündeki farklılıkları gösteren $\frac{\partial F}{\partial y}$ gradyanlar olmak üzere her biri $F(x, y)$ 'nin artan değerleri yönüne işaret eden vektörler topluluğu olarak

düşünülebilir. $M \times N$ boyutundaki bir görüntünün gri seviye görüntüsü için p_x ve q_y yönlü nümerik gradyan matrislerinin hesaplanmasında Denklem 3.19 ve Denklem 3.20 kullanılabilir.

$$p_x(x, y) = \frac{I(x, y+1) - I(x, y-1)}{2} \quad (3.19)$$

$$q_y(x, y) = \frac{I(x+1, y) - I(x-1, y)}{2} \quad (3.20)$$

Görüntü kenarları boyunca var olan değerler için tek yönlü farklılıklar düşünülebilir. Örneğin;

$$p_x(x, 1) = \frac{I(x, 2) - I(x, 1)}{2} \quad (3.21)$$

$$p_x(x, N) = \frac{I(x, N) - I(x, N-1)}{2} \quad (3.22)$$

Ardından elde edilen nümerik gradyanlar matrisine Fourier dönüşümleri uygulanmıştır.

$$p_{fx} = FFT(p_x) \quad (3.23)$$

$$q_{fy} = FFT(q_y) \quad (3.24)$$

Yeni oluşturulan Fourier tabanlı gradyanlar matrisi p_{fx} ve q_{fy} Denklem 3.17 hesaplanmasında kullanılmaktadır. Böylece Z^0 yüzeyi için ilk bilgi elde edilmiş olur. Ardından 3.13 ve 3.14 denklemleri yardımıyla yeni yönelimler hesaplanır ve yüzey hesaplama işlemi yinelemeli adımlar kullanılarak belirlenen iterasyon sayısınca yürütülür. Geliştirilen yöntemin algoritması Tablo 3.1.'de sunulmuştur.

Tablo 3.1. Algoritma Adımları

<u>Girişler:</u>	$L(x,y,z)=$ aydınlanma yönü(eğer bilinmiyorsa literatürde tahmin etme yöntemleri bulunmaktadır.) $I(x,y)$ = gri seviye giriş imgesi ls = boşluklama katsayısı fc =filtreleme katsayısı $maxIter$; / maksimum iterasyon sayısı
<u>Hesapla:</u>	$[M N]=boyut(I)$; $p_x(i,j)=I(i,j+1)-I(i,j-1)/2$ $q_y(i,j)=I(i+1,j)-I(i-1,j)/2$ $p_{fx}=fft(p_x)$ $q_{fy}=fft(q_y)$ $p^0 = p_{fx}, q^0 = q_{fy}$ $D = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}, sx = x/D, sy=y/D, sz=z/D$ $Z^0(M,N)=f(I(x,y),p^0,q^0,p_s,q_s)$ for $k=1:maxIter$ $R=(I+pp_s+qq_s)/\sqrt{(p^2 + q^2 + 1)(p_s^2 + q_s^2 + 1)}$ $f=I-R$ $dfz=-1.\{(p_s + q_s)/\sqrt{(p^2 + q^2 + 1)(p_s^2 + q_s^2 + 1)}$ $\quad -(p+q)(p p_s + q q_s + 1)/\sqrt{(p^2 + q^2 + 1)^3 (p_s^2 + q_s^2 + 1)}\}$ $Z(i,j) = Z(i,j)+-f(Z(i,j))/dfz$ $p=Z(i,j)-Z(i-1,j)$ $q=Z(i,j)-Z(i,j-1)$ end YüzeyYumuşatma($Z(x,y),fc$) DerinlikNormalizasyonu ($Z(x,y),Z_{max}, Z_{min}$)
<u>Çıkış:</u>	$Z(x,y)$

BÖLÜM 4. ALGORİTMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Algoritmaların farklı koşullar altındaki performanslarının incelenmesi ve karşılaştırılmaları amacıyla iki farklı yol izlenmiştir. Öncelikle fonksiyonel olarak üç adet sentetik yüzey üretilmiştir. İkinci olarak ise literatürdeki 3B oluşum üzerine kullanılan iki farklı veri setinden çeşitli özelliklerde görüntüler seçilmiştir. Pentland, Tsai-Shah ve geliştirilen yöntemin üretilen sentetik yüzeyler ve veri setlerinden seçilen hazır görüntüler üzerindeki başarımları ve sonuçları incelenmiştir. Sentetik yüzeylerin üretimi ve algoritmaların geliştirilmesi MATLAB [120] programlama platformu üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Pentland algoritması yinelemeli bir yapıya sahip olmadığından iterasyon sayısı parametresi yalnızca Tsai-Shah ve geliştirilen yöntem için kullanılmaktadır. Çeşitli farklı görüntüler üzerinde yapılan testler sonucunda ortak iterasyon sayısı 25 olarak seçilmiştir. Yakınsaklık daha düşük iterasyonlarda da elde edilebilir.

Aydınlatma yönü değerleri sentetik görüntüler ve Veri Seti 2 için [17] ve [36] çalışmasından faydalanılarak tahmin ettirilmekte ve aynı yön değerleri üç algoritma için birlikte kullanılmaktadır. Veri Seti 1 için ise yazarlar tarafından sağlanan bilinen aydınlatma yönü değerleri kullanılmıştır.

Görüntüler algoritmalara arka planlarıyla birlikte verilmiştir. Pentland algoritması sonuçları için herhangi bir yumuşatma filtresi uygulanmamış ve Fourier dönüşümleri sonuçları doğrudan görselleştirilmiştir. Tsai-Shah ve geliştirilen yöntem kodlanırken elde edilen sonuçlara Orta değer filtre (median) uygulanarak sonuçlar görselleştirilmiştir. Her bir çıkış pikseli 3x3 komşuluğundaki karşılık gelen piksellerin orta değerini içermektedir.

Çalışmanın buradan sonraki karşılaştırmalı kısımlarında Pentland algoritması P, Tsai-Shah algoritması TS ve geliştirilen yöntem GY olarak kısaltılmaktadır.

4.1. Sentetik Görüntü Üretimi ve Performans Karşılaştırması

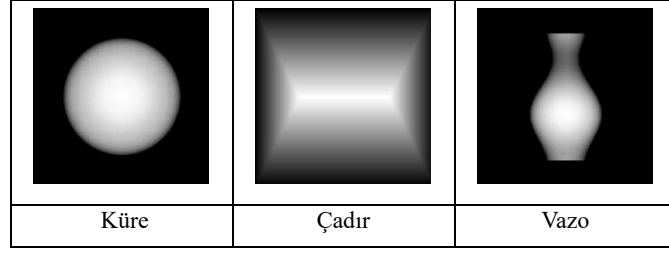
TS algoritması, sentetik görüntüler üzerinde nicel olarak en iyi sonuçları veren ve en çok kullanılan algoritmalardan biridir [12, 13]. İterasyonlu bir yapıya sahip olan bu algoritma bazen çözümden sapmalar gösterir. Bu durum, yazarların da önerdiği üzere iterasyonu belirli bir adımdan sonra sabitleyerek önlenabilir [10, 13].

Performans testleri GTŞE çalışmalarında sıklıkla tercih edilen ve fonksiyonel olarak üretilebilen üç yüzey şekli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir görüntü farklı boyut ve zorluk seviyelerinde üretilmiştir. Yüzeylerin oluşturulma formülasyonları ve seçilen yüzeyleri kullanan bazı referans çalışmaları Tablo 4.1.'de verilmiştir. Fourier tabanlı iklendirme adımının TS ve P algoritmaları ile karşılaştırılmaları öncelikle bu üretilen üç sentetik yüzey kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

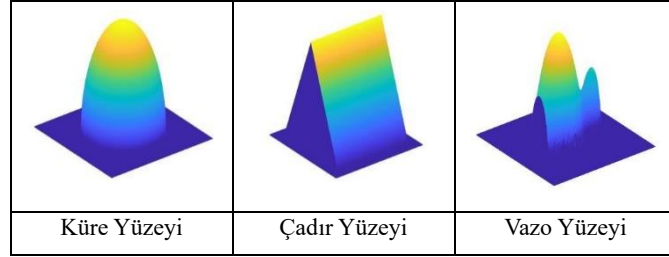
Tablo 4.1. Sentetik görüntü üretimi formülasyonu

<i>Sentetik Görüntü</i>	<i>Genel Formülasyon</i>	<i>GTŞE literatüründeki kullanım örneği</i>
Küre (1501x1501)	$Z(x, y) = \sqrt{r^2 - y^2 - x^2}$, r: yarıçap {r=50, (x,y) ∈ [-75, 75] X R }	[10, 52, 121]
Çadır (256x256)	$Z(x, y) = \min\{-2 x + 2a, - y + a\}$ {a=12,8, (x,y) ∈ [-12,8, 12,8] X R }	[13, 122, 123]
	[13] çalışmasında önerilen ve [124] çalışmasında verilen formüllere göre üretilmiştir:	[12, 13, 125]
Vazo (360x360)	$Z(x, y) = \sqrt{f(\bar{x})^2 - y^2}$ $f(\bar{x}) = \alpha_1\bar{x}^6 + \alpha_2\bar{x}^5 + \alpha_3\bar{x}^4 + \alpha_4\bar{x}^3 + \alpha_5\bar{x}^2 + \alpha_6\bar{x} + \alpha_7$ { (x,y) ∈ [-6,4, 6,4] X R; $\bar{x} = x/12.8$; $\alpha_1=-138,24$; $\alpha_2= 92,16$; $\alpha_3=84,48$; $\alpha_4=- 48,64$; $\alpha_5=17,60$; $\alpha_6=6,40$; $\alpha_7= 3.20$ }	

Tablo 4.1.'de verilen formülasyonlara göre üretilen sentetik görüntüler Şekil 4.1.'de gösterilmiştir. Bu imgelere ait gerçek yüzey şekilleri ise Şekil 4.2.'de sunulmuştur.

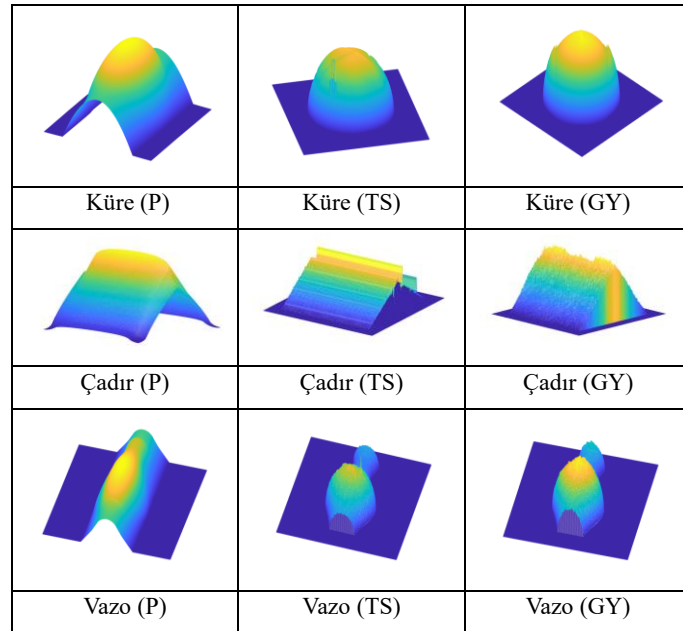


Şekil 4.1. Üretilen sentetik görüntüler.



Şekil 4.2. Sentetik görüntülere ait gerçek yüzey şekilleri.

Algoritmaların Şekil 4.1.'deki görüntüler için oluşturdukları yüzey şekilleri sırasıyla Şekil 4.3.'de verilmiştir. Ayrıca oluşturulan derinlik haritalarına ait sonuç gri seviye görüntüleri de Şekil 4.4.'de sunulmuştur. Tüm görüntüler, algoritmalara arka planlarıyla birlikte verilmiştir. Farklı görüntüler için farklı filtreleme katsayıları seçilmiş olmasına rağmen algoritmaların birbirlerine karşı performansını etkilememek için her bir görüntü algoritmalara eşit şartlarda verilmiştir.



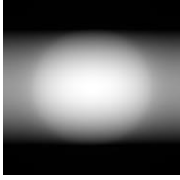
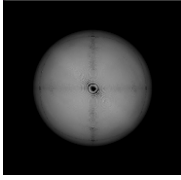

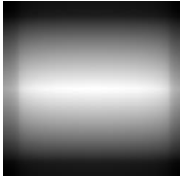
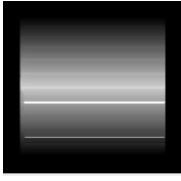
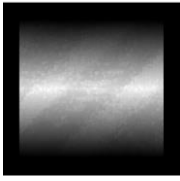
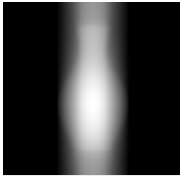
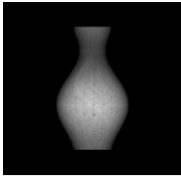
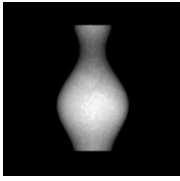
Şekil 4.3. Seçilen yöntemlerin sentetik görüntüler için oluşturdukları 3B yüzeyler.

Aydınlatma konumları:

$$L_{Küre} = [-0,9424; \sim 0,0000; 0,3343], L_{Çadır} = [0,8834; 0,0383; 0,4670],$$

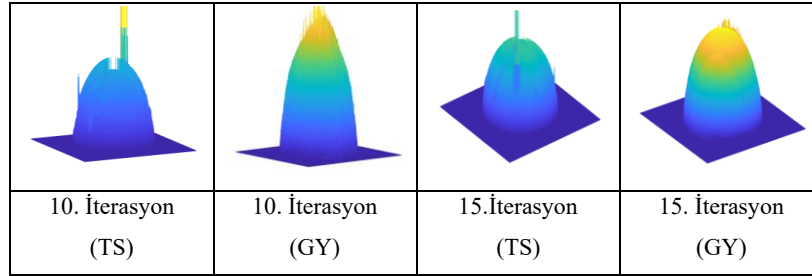
$$L_{Vazo} = [\sim 0,0000; 0,9733; 0,2295]$$

GTŞE algoritmaları kullanılarak benzersiz ve yegane bir çözüm elde etmek zor bir problem olduğundan dolayı bir görüntü için çok iyi çalışan bir algoritma, başka bir görüntü için aynı performansı sağlamayabilir. Şekil 4.3.'de P algoritması vazo yüzeyi için en kötü performansı vermiş olsa da (sayısal karşılaştırmalar Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'de verilmiştir) diğer yüzeyler için kabul edilebilir bir performans sağlamıştır. Aynı zamanda geliştirilen Fourier tabanlı iklendirme yönteminin nesne sınırlarındaki titreşimleri yumuşattığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.3.'de küre yüzeyinin tepe kısmında ve çadır yüzeyinin kenarlarında bu iyileştirmeler açıkça görülmektedir. Ayrıca önerilen yöntemin küre, çadır ve vazo yüzeyleri için bu iyileştirme etkisi Şekil 4.4.'de daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bu yüzeyler TS algoritması ile karşılaştırıldığında aynı değerde çok düşük yumuşatma parametreleri ve iterasyon sayısı altında Fourier tabanlı önbilgi sağlandığında daha yakınsak görülmektedir.

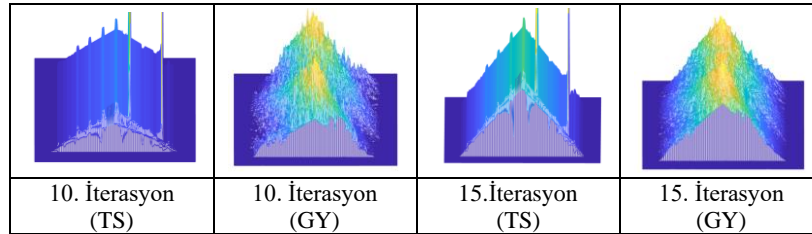
		
Küre (P)	Küre (TS)	Küre (GY)
		
Çadır (P)	Çadır (TS)	Çadır (GY)
		
Vazo (P)	Vazo (TS)	Vazo (GY)

Şekil 4.4. Algoritmaların oluşturduğu derinlik haritalarına göre yeniden üretilmiş gri seviye görüntüler.

Testler sırasında önerilen yöntemin TS üzerine etkisini genellikle birkaç iterasyon sonrasında gösterdiği gözlemlenmiştir. Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da küre ve çadır görüntüsü için TS ve GY'nin 10. ve 15. iterasyonlarda oluşturduğu yüzeyler gösterilmektedir. Sonuçlardan anlaşılan önerilen yöntem düşük iterasyonlarda TS algoritmasından daha iyi yakınsayabilmektedir. P yöntemi yinelemeli bir yapıda olmadığı için sonuçlar aynı kalmaktadır. İterasyon sayısının artırılmasının sonuçları her zaman iyileştirmeyeceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Algoritmalar sapmalar gösterebilir. Bu gibi durumlarda iterasyon sayısı iyi sonuç elde edilen bir değere sabitlenebilir.



Şekil 4.5. Küre şeklinin yakınsanması.



Şekil 4.6. Çadır şeklinin yakınsanması.

Nitel olarak karşılaştırmaların yanı sıra algoritmalar nicel olarak da değerlendirilmiştir. Sentetik görüntülerin gerçek olması gereken derinlik matrisi verileri elde edilebilir olduğundan dolayı algoritmaların oluşturduğu derinlik haritalarını ve gri seviye görüntüleri değerlendirmek için beş farklı metrik kullanılmıştır: MAD, MSE, L2, PSNR ve SSIM. MAD, MSE ve L2 metrikleri hata tabanlı oldukları için bu yöntemler referans derinliği ve oluşturulan derinlikler için uygulanmıştır. Referans ve oluşturulan derinlik haritaları sırasıyla Şekil 4.2.'de ve Şekil 4.3.'de verilmiştir. Daha küçük bir değer daha az hata oranını göstermektedir.

Hata bazlı sonuçlar Tablo 4.2.'de verilmiştir. PSNR ve SSIM metrikleri ile gri seviye görüntüler arasındaki benzerlik ölçüldüğü için ikinci grup bir performans değerlendirmesi olarak ele alınmıştır. Referans ve elde edilen gri seviye görüntüleri sırasıyla Şekil 4.1. ve Şekil 4.4.'de verilmiştir. Daha yüksek değer görüntülerin daha benzer olduğu anlamına gelmektedir. Benzerlik bazlı sonuçlar Tablo 4.3.'de verilmiştir. Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'deki her bir görüntü için P, TS ve GY uygulanarak elde edilen en iyi yakınsama değeri kalın olarak gösterilmiştir.

Tablo 4.2. MAD, MSE ve L2 sonuçları

Sentetik Görüntü	MAD			MSE			L2		
	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>
Küre	0,0011	0,0625	0,0101	0,0626	0,0089	0,0004	366,93	135,03	22,70
Çadır	0,0457	0,0512	0,0301	0,0379	0,0091	0,0030	46,62	24,34	13,06
Vazo	0,0629	0,0500	0,0158	0,0344	0,0057	0,0006	64,64	26,31	8,31

Tablo 4.3. PSNR ve SSIM sonuçları

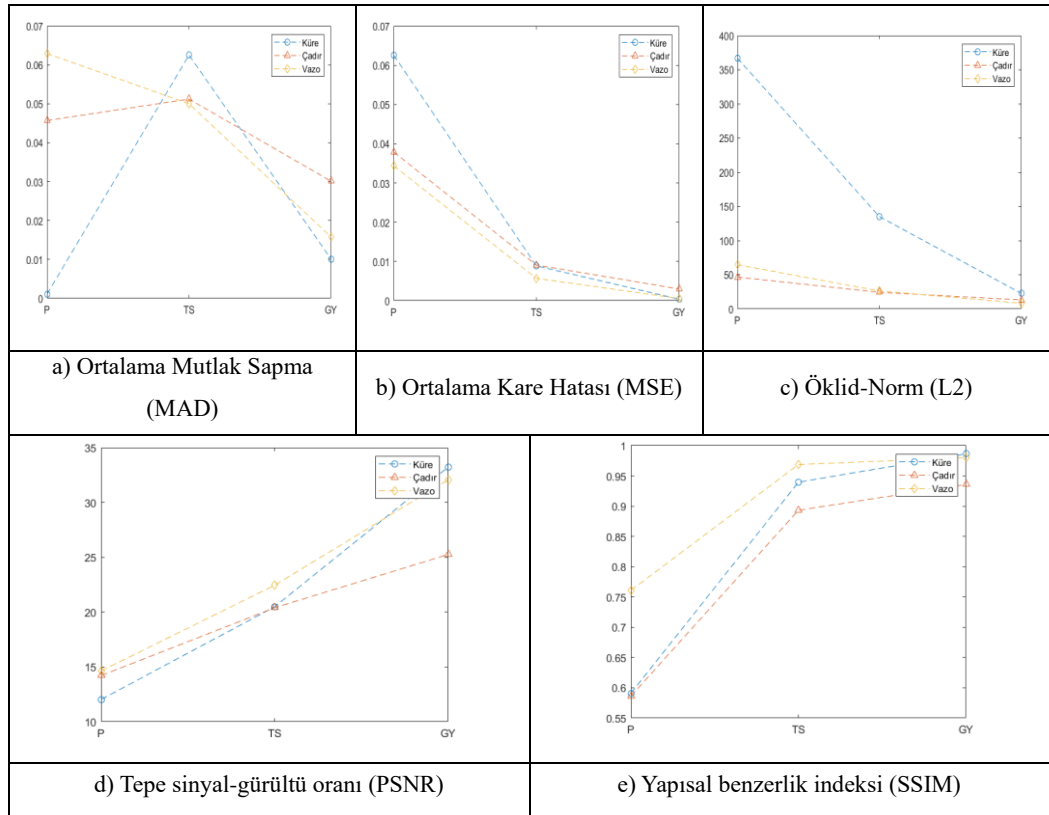
Sentetik Görüntü	PSNR			SSIM		
	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>
Küre	12,0322	20,4860	33,2230	0,5909	0,9397	0,9864
Çadır	14,2093	20,3976	25,2539	0,5862	0,8933	0,9359
Vazo	14,6315	22,4488	32,0632	0,7609	0,9688	0,9802

Yukarıdaki değerlendirme tablolarına göre her bir görüntü için oluşturulan ve önerilen yöntemin performans oranını gösteren özet tablo Tablo 4.4.'te sunulmuştur.

Tablo 4.4. Performans testleri özet tablosu

Sentetik Görüntü	<i>MAD</i>	<i>MSE</i>	<i>L2</i>	<i>PSNR</i>	<i>SSIM</i>	<i>GY-Başarım</i>
Küre	<i>P</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	4/5
Çadır	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Vazo	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
<i>Başarım Yüzdesi</i>	% 66,6	%100,0	%100	%100,0	%100	% 93,33

Tablo 4.4.'te geliştirilen yöntemin üç sentetik görüntü üzerinde uygulandığında aynı iterasyon sayısı ve aynı yumuşatma katsayıları altında çoğunlukla daha iyi sonuçlar elde ettiği gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar, GTŞE algoritmalarının tutarsızlığını kanıtlar niteliktedir. Bir görüntü için iyi çalışan bir algoritma, farklı koşullar altındaki aynı görüntü için veya aynı koşullar altındaki farklı görüntüler için daha kötü performans gösterebilmektedir. P ve TS algoritmalarının farklı aydınlatma yönleri altındaki performanslarını incelemek için Zhang ve ark. [12] çalışması incelenebilir. Farklı iterasyon sayısı ve filtreleme katsayısı seçilerek yüzeyler için daha iyi performans değerleri elde edilebilir. Ancak iterasyonların sabitliğini sürdürülebilmek için tüm sentetik görüntüler üzerinde aynı sabit iterasyon sayısı kullanılmıştır. Tablo 4.2. ve Tablo 4.3.'deki değerlerin grafiksel gösterimleri Şekil 4.7.'de sunulmuştur. Eğrilerdeki her farklı şekil bir sentetik görüntüyü temsil etmektedir ve açıklamaları grafiklerin sağ üst kısmında verilmiştir. Daha açıklayıcı olabilmesi için farklı renklendirmeler kullanılmıştır. Mavi renk küre yüzeyini, kırmızı renk çadır yüzeyini ve sarı renk ise vazo yüzeyini temsil etmektedir.



Şekil 4.7. Hata ve benzerlik tabanlı değerlendirmelerin grafiksel gösterimleri.

Fourier tabanlı yaklaşımlar genellikle zaman harcadıkları için gerekli süre ve CPU zamanı verileri de Tablo 4.5.'de gösterilmiştir. (Sistem özellikleri: Intel i7-9700K CPU@3.60 GHz [8 CPUs], 32 GB DDR4-3200 MHz). Fonksiyonları çalıştırmak için gerekli süreleri ölçmek amacıyla MATLAB *timeit* fonksiyonu kullanılmıştır. *timeit* fonksiyonu ölçülmek istenen fonksiyonu birkaç defa çağırarak ve her biri için geçerli ölçümlerin ortalamasını döndürmektedir. Karşılaştırmalarda kullanılan her bir GTŞE algoritmasına *timeit* fonksiyonu uygulanmış ve tipik yürütme süreleri saniye olarak döndürülmüştür. CPU zamanı ölçümleri için de yine MATLAB *cputime* fonksiyonundan faydalanılmıştır. *cputime* fonksiyonu, toplam CPU zamanını döndürür. Eğer ölçülen fonksiyon işlem çekirdeklerini eşit bir şekilde kullanıyorsa bu değer yanıltıcı olabilir.

Tablo 4.5. Algoritmalar için harcanan süre ve CPU zamanı

Sentetik Görüntüler	Süre (sn.)			CPU-Zamanı (sn.)		
	<i>P</i>	<i>TS(it:25)</i>	<i>GY(it:25)</i>	<i>P</i>	<i>TS(it:25)</i>	<i>GY(it:25)</i>
Küre (1501x1501)	0,0723	1,7151	3,5450	0,468	10,2969	19,4375
Çadır (256x256)	0,0017	0,0351	0,0972	0,031	0,2344	0,7656
Vazo (360x360)	0,0027	0,0431	0,1983	0,015	0,1406	1,1719

* it: İterasyon sayısı.

Tablo 4.5.'deki değerler paralel programlama vb. tekniklerle çok daha kısaltılabilir. Zaman ölçümü, yöntemler için gerekli süreler hakkında genel bir fikir oluşturması amacıyla gerçekleştirilmiştir. GY ile küre yüzeyinin elde edilmesi en uzun süren işlem olmuştur. Bunun başlıca nedeni yüksek boyutta olması ve ön bilgi oluşturma aşamasındaki gradyan ve Fourier dönüşümü hesaplamalarından dolayıdır. Zhang ve ark. [12] TS algoritmasını örneklerinde en hızlı yöntemlerden biri olarak listelemelerine rağmen itersayon sayısını tam olarak belirtmemişlerdir. Daha düşük bir iterasyon sayısı belirlendiğinde TS ve GY süreleri ciddi oranda düşecektir. Tablo 4.5.'in amacı algoritmaların zaman yönünden tam bir karşılaştırmasını yapmak yerine farklı boyuttaki farklı yüzeyler için algoritma yürütme zamanları hakkında bir

fikir vermektir. Bu nedenle de TS ve GY için iterasyon değeri 25 olarak belirlenmiştir. Burada temel gerçekleştirilmek istenen hedef 3B yüzey oluşumunun kalitesinin incelenmesidir.

4.2. Mevcut Veri Setleri Kullanılarak Performans Karşılaştırması

3B yüzey oluşulması üzerine literatürde birçok çalışma gerçekleştirilmiş ve bu çalışmalar neticesinde araştırmacılara değerlendirmelerinde yardımcı olması için farklı veri setleri oluşturulmuştur. Bu veri setleri içerdikleri çeşitli giriş görüntüleri, görüntü maskeleri, derinlik haritaları, aydınlanma yönleri gibi veriler sayesinde değerlendirme aşamalarında doğruluğu bilinen veriler sunmakta ve karşılaştırma aşamalarında daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. P, TS ve GY yöntemlerinin karşılaştırmasında literatürdeki iki farklı veri setinden seçilen görüntüler kullanılmıştır. Kullanılan veri setleri ve görüntülere ait bilgiler Tablo 4.6.'da verilmiştir.

Veri Seti 1: [15] “From Shading to Local Shape” veri seti.

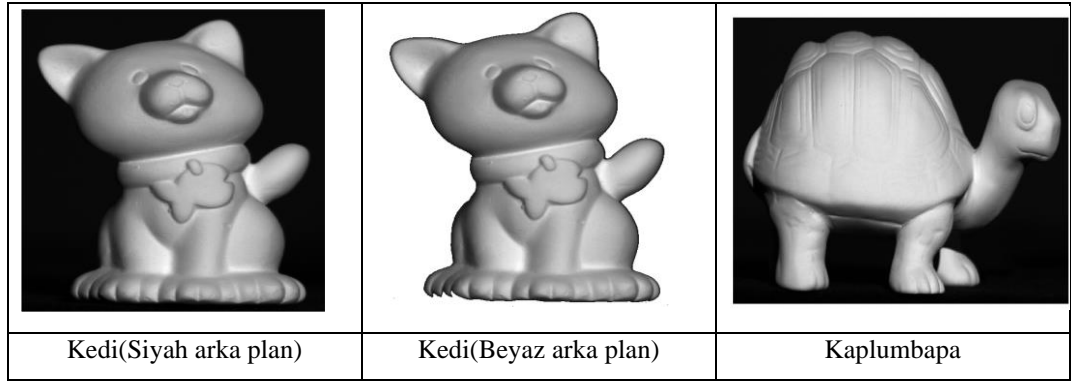
Veri Seti 2: [16] “MIT Intrinsic Images” veri seti.

Tablo 4.6. Kullanılan veri setleri ve görüntü özellikleri

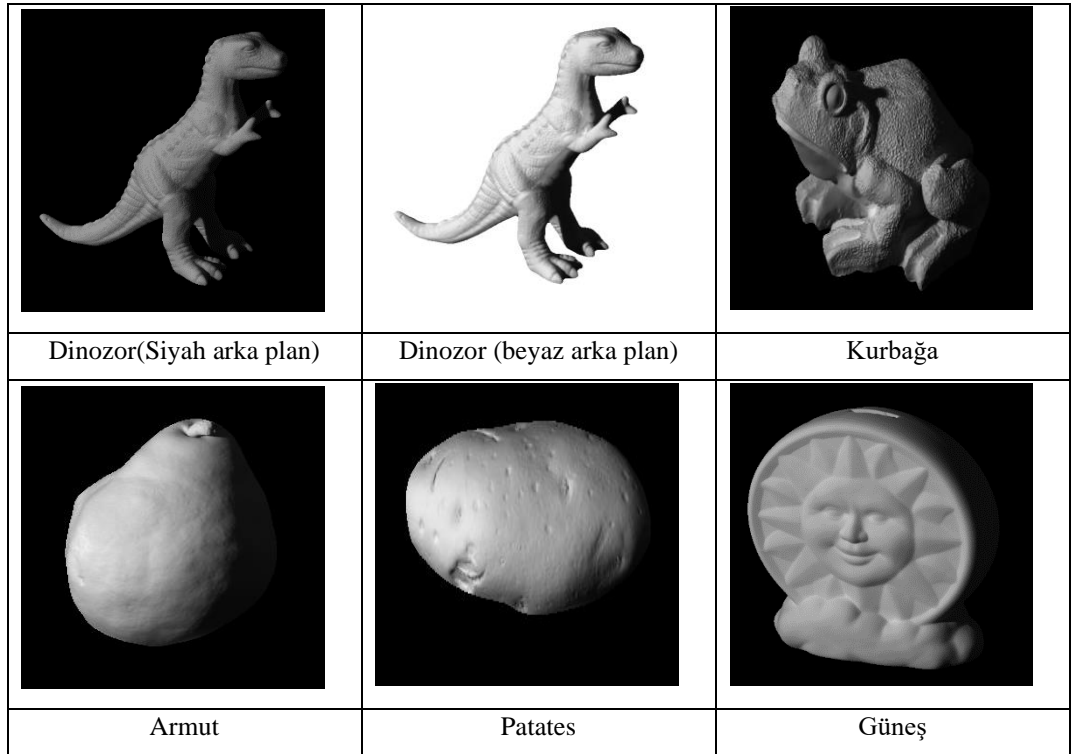
Veri Seti	Giriş Görüntüsü	Aydınlanma Yönü	Arka Plan
From Shading to Local Image	<i>Kedi</i>	[0,1949; 0,2419; 0,9270]	<i>Siyah</i>
	<i>Kedi</i>	[0,1949; 0,2419; 0,9270]	<i>Beyaz</i>
	<i>Kaplumbağa</i>	[0,1590; 0,2789; 0,9431]	<i>Siyah</i>
MIT Intrinsic*	<i>Dinozor</i>	[0,8551; 0,4618; 0,2353]	<i>Siyah</i>
	<i>Dinozor</i>	[0,8551; 0,4618; 0,2353]	<i>Beyaz</i>
	<i>Kurbağa</i>	[0,8644; 0,3968; 0,3086]	<i>Siyah</i>
	<i>Armut</i>	[0,8639; 0,3909; 0,3174]	<i>Siyah</i>
	<i>Patates</i>	[0,9324; 0,0331; 0,3598]	<i>Siyah</i>
	<i>Güneş</i>	[0,7786; 0,4086; 0,4761]	<i>Siyah</i>

* Aydınlatma yönleri için tahmin ettirilen değerler kullanılmıştır.

Bu veri setlerinden seçilen gri-seviye görüntüler kullanılarak yöntemlerin ürettiği 3B derinlik haritaları ve gri-seviye görüntüler, veri setinden sağlanan doğruluğu bilinen tonlama görüntüleri ile karşılaştırılarak 3B oluşturma performansları ölçülmüştür. Yeniden yapılandırma hatasının, tahmin edilen normal haritanın bir tonlama görüntüsüne yeniden dönüştürülerek eldeki gerçek verilerle karşılaştırılmasıyla ölçülmesi çalışmalarda tercih edilen yöntemlerden biridir [15]. Veri setlerinden seçilen görüntüler Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.'da sunulmuştur.

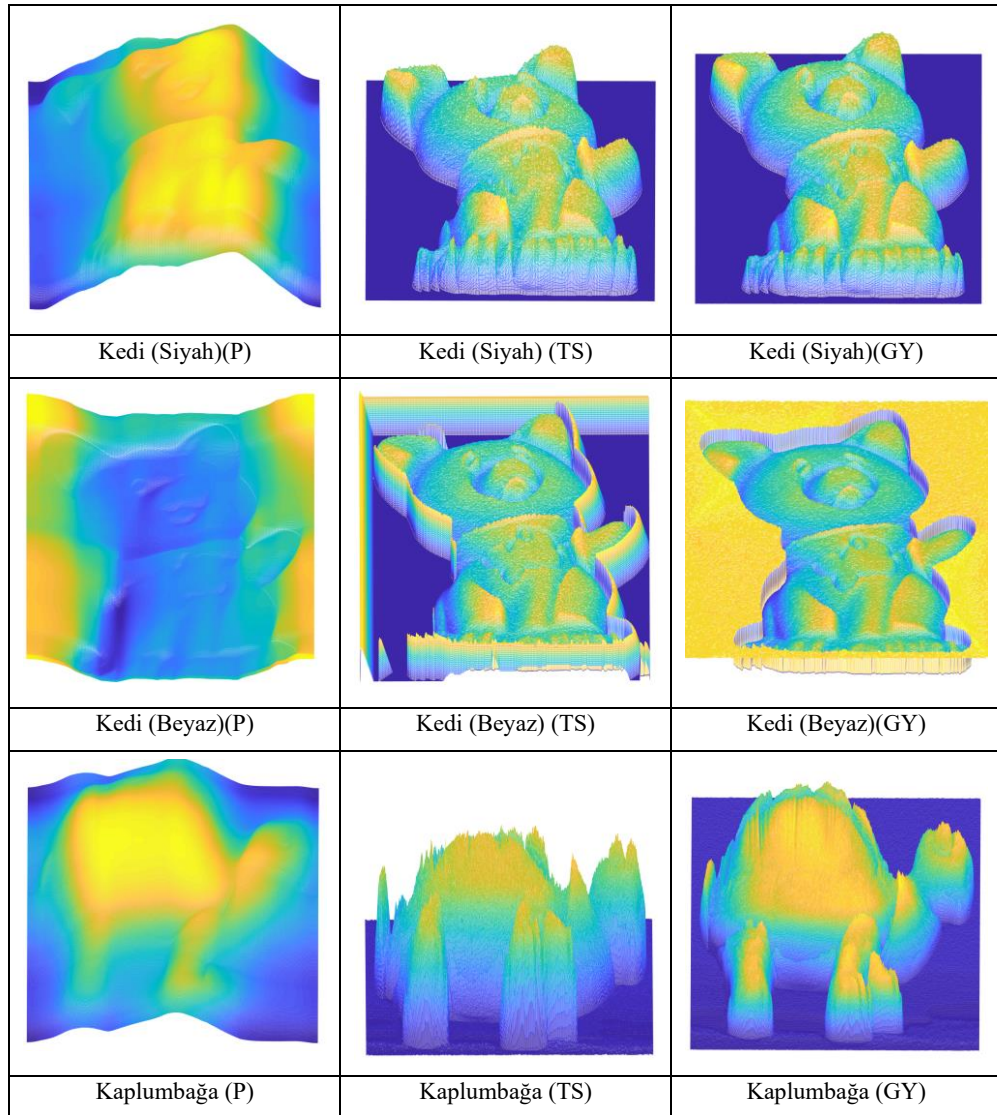


Şekil 4.8. Veri Seti 1'den seçilen görüntüler.

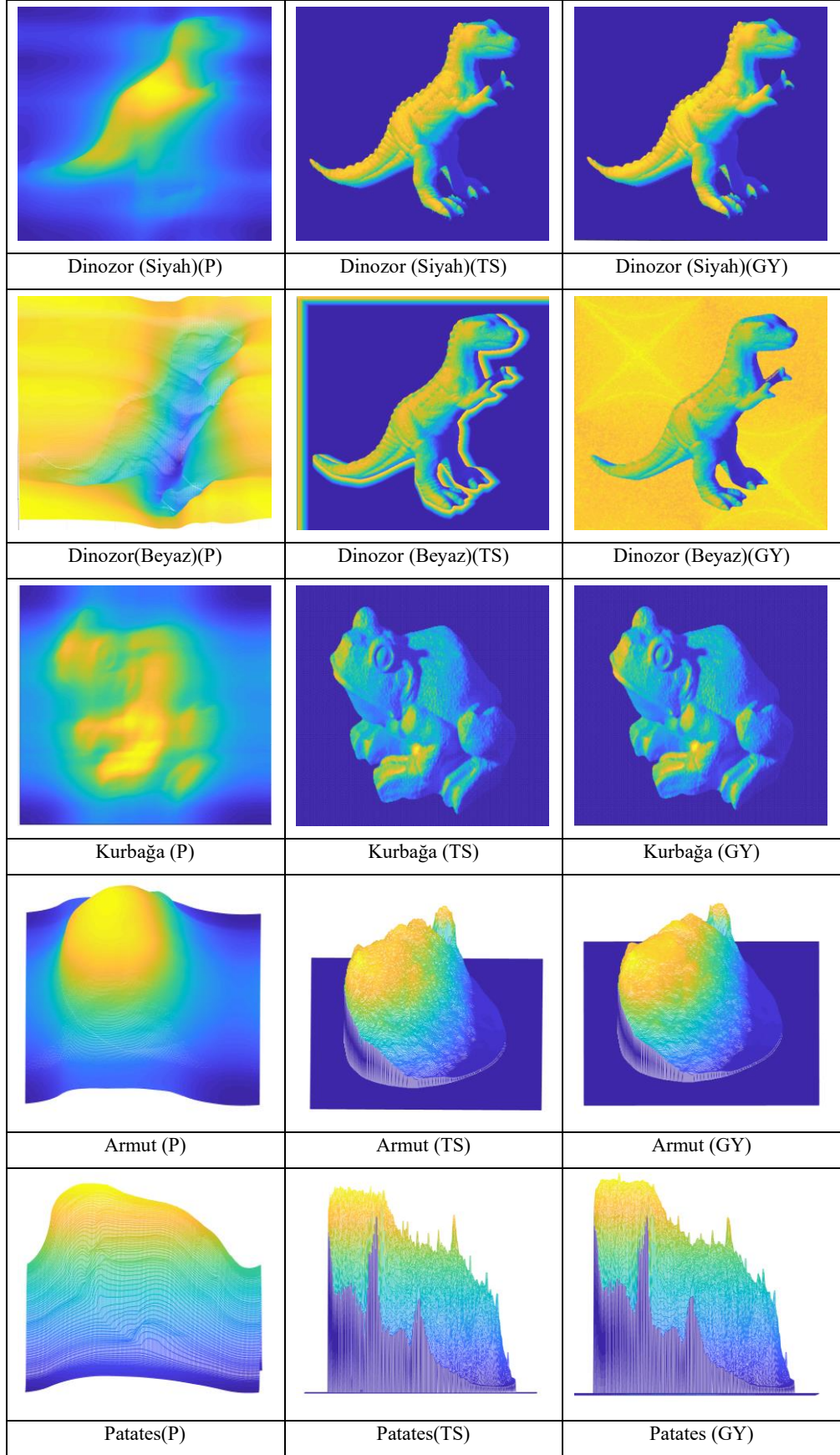


Şekil 4.9. Veri Seti 2'den seçilen görüntüler.

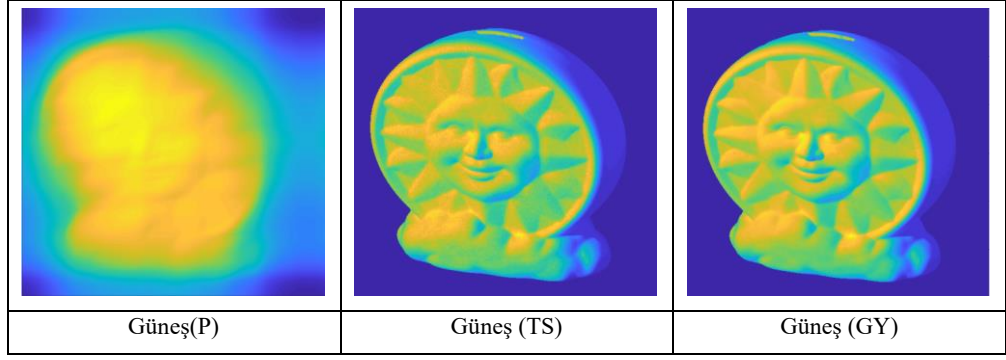
Hem bilinen hem de tahmin edilen aydınlatma yönleri kullanılarak algoritmaların farklı durumlar altında performansları da incelenmiştir. Ayrıca her iki veri setinden seçilen bazı görüntüler hem siyah (maske görüntüsü dışındaki tüm piksellerin gri seviye değerleri 0 yapılmıştır) hem beyaz arka planlı (maske görüntüsü dışındaki tüm piksellerin gri seviye değerleri 255 yapılmıştır) olmak üzere iki farklı şekilde algoritmalara verilmiş ve farklı arka plan durumu olması koşullarında algoritmaların başarımları değerlendirilmiştir. Seçilen görüntülerin giriş olarak verilmesi ile algoritmaların oluşturdukları derinlik haritaları Veri Seti 1 için Şekil 4.10.'da ve Veri Seti 2 için Şekil 4.11.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Veri Seti 1 için oluşturulan derinlik haritaları.

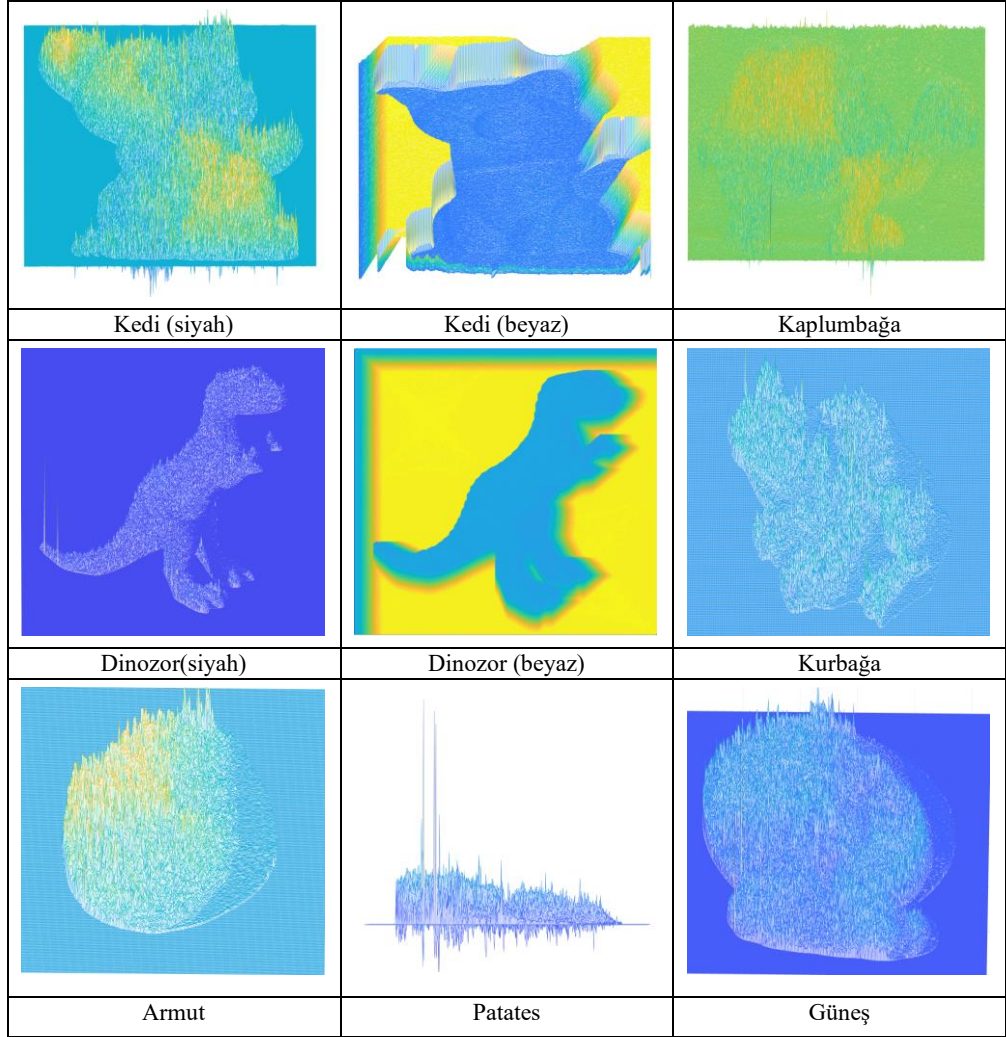


Şekil 4.11. Veri seti 2 için oluşturulan derinlik haritaları.












Şekil 4.11. (Devamı).

Her iki veri seti için GY ve TS algoritmalarının oluşturdukları derinlik haritalarının arasındaki fark derinliği haritaları Şekil 4.12.'de gösterilmiştir.






Şekil 4.12. Geliştirilen yöntem ve Tsai-Shah arasındaki derinlik farkları.


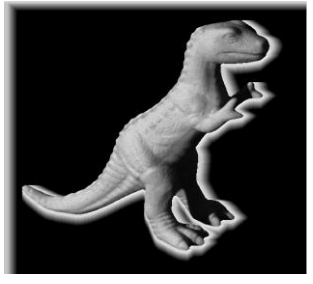
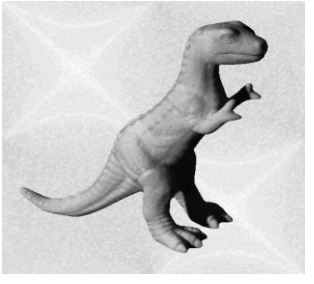

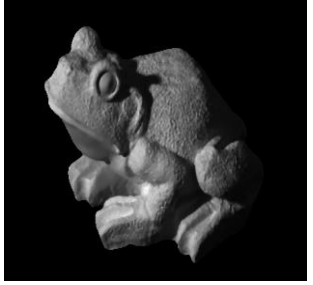

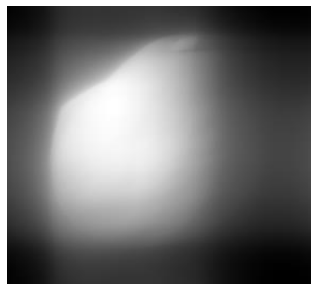
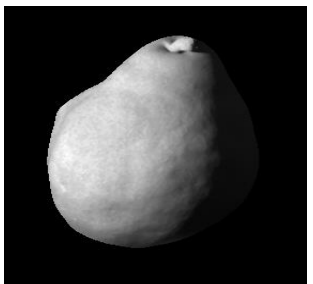
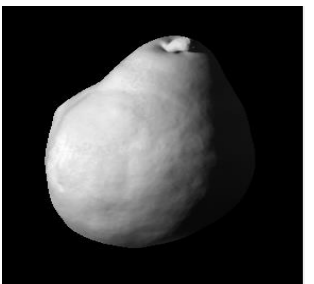
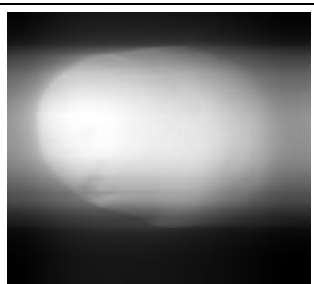





Derinlik haritalarında gösterilen sonuçlara karşılık gelen gri-seviye görüntüler Veri Seti 1 için Şekil 4.13., Veri Seti 2 için Şekil 4.14.'de gösterilmiştir.

		
Kedi(siyah) (P)	Kedi(siyah) (TS)	Kedi(siyah) (GY)
		
Kedi(beyaz) (P)	Kedi(beyaz) (TS)	Kedi(beyaz) (GY)
		
Kaplumbağa(P)	Kaplumbağa(TS)	Kaplumbağa(GY)

Şekil 4.13. Veri Seti 1 için algoritmaların ürettiği gri-seviye görüntüler.

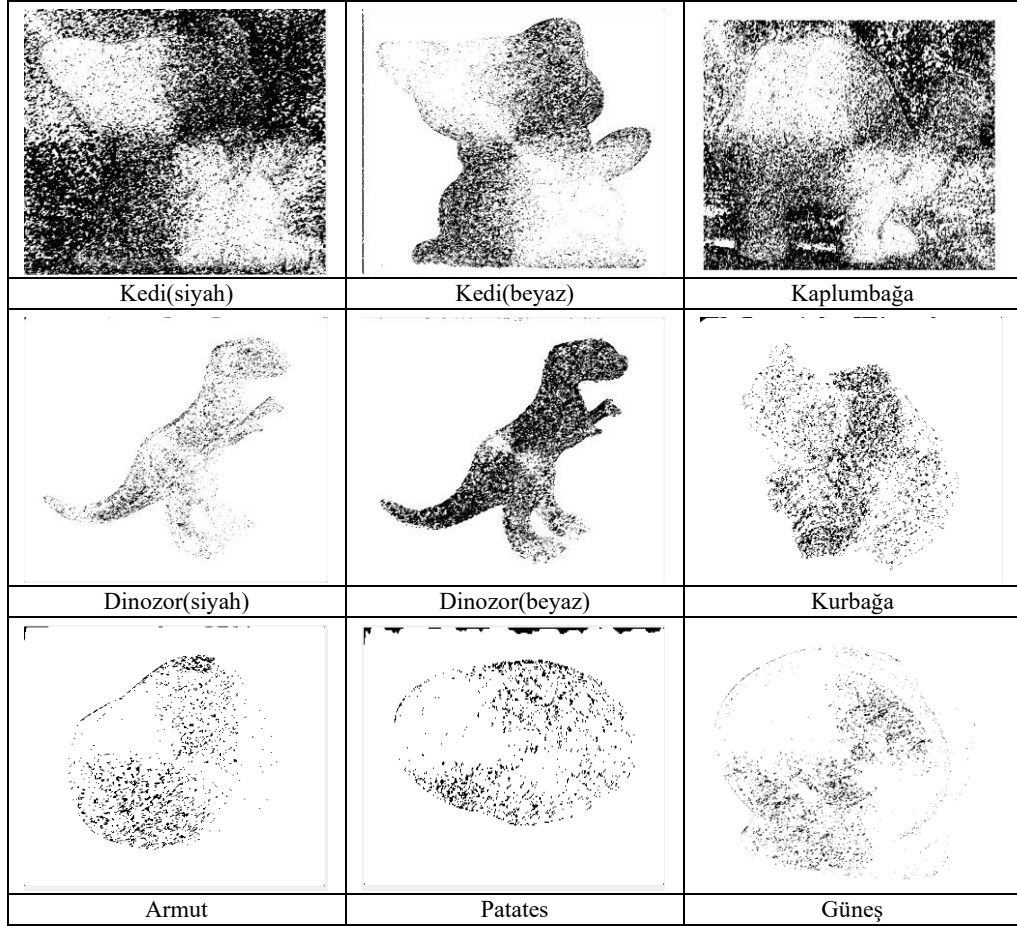
		
Dinozor(Siyah)(P)	Dinozor(Siyah)(TS)	Dinozor(Siyah)(GY)

Şekil 4.14. Veri Seti 2 için algoritmaların ürettiği gri-seviye görüntüler.

		
Dinozor(beyaz)(P)	Dinozor(beyaz)(TS)	Dinozor(beyaz)(GY)
		
Kurbağa(P)	Kurbağa(TS)	Kurbağa(GY)
		
Armut(P)	Armut(TS)	Armut(GY)
		
Patates(P)	Patates(TS)	Patates(GY)
		
Güneş(P)	Güneş(TS)	Güneş(GY)

Şekil 4.14. (Devamı)

GY ve TS algoritmaları sonuçlarının farkını gösteren gri seviye görüntüler ayrıca Şekil 4.15.'de sunulmuştur.



Şekil 4.15. Geliştirilen ve Tsai-Shah yöntemleri ile üretilen derinlik haritalarına karşılık gelen görüntüler arasındaki farklar (GY-TS).

Veri setleri tarafından sağlanan görüntüler ile üretilen görüntüler arasındaki hata oranlarının MAD, MSE ve L2 değerleri Tablo 4.7.'de sunulmuştur. Üretilen gri seviyeleri arasındaki benzerlik oranlarını gösteren PSNR ve SSIM değerleri ise Tablo 4.8.'de verilmiştir. Ayrıca tüm değerlendirme sonuçları Tablo 4.9.'da özetlenmiştir.

Elde edilen sonuçlardan yapılan çıkarımlara göre GY daha pürüzsüz yüzey tahminlerinde daha iyi sonuçlar üretmektedir. Ayrıca giriş görüntüsü siyah ve beyaz arka planlı olarak verildiğinde TS yöntemi kadar etkilenmemektedir. Arka plan eklenmesi P algoritması performansını doğrudan etkilemektedir.

Tablo 4.7. MAD, MSE ve L2 sonuçları

Sentetik Görüntüler	MAD			MSE			L2		
	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>
Kedi(siyah)	0,053	0,009	0,004	0,104	0,0003	0,0002	161,06	7,60	5,55
Kedi(beyaz)	0,041	0,021	0,034	0,104	0,325	0,004	154,38	274,62	32,09
Kaplumbağa	0,079	0,038	0,00005	0,059	0,003	0,0002	113,27	34,91	5,93
Dinozor(siyah)	0,018	0,006	0,001	0,047	0,0001	~0,0	86,13	3,58	1,37
Dinozor(beyaz)	0,015	0,108	0,0124	0,040	0,666	0,013	79,73	428,74	62,47
Kurbağa	0,025	0,005	0,0020	0,1210	0,0010	0,0009	121,63	2,50	2,16
Armut	0,024	0,004	0,0016	0,0594	0,0001	~0,0	64,65	1,90	2,07
Patates	0,008	0,00005	0,0030	0,0647	0,0001	0,0001	60,41	0,74	1,67
Güneş	0,100	0,007	0,0018	0,0827	0,0002	0,0001	137,10	5,73	4,72

Tablo 4.8. PSNR ve SSIM sonuçları

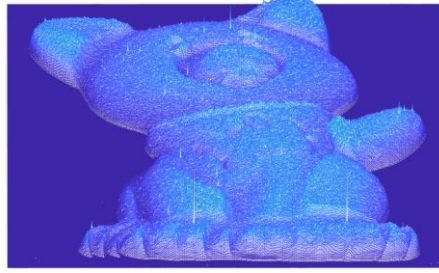
Sentetik Görüntüler	PSNR			SSIM		
	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>
Kedi(siyah)	9,81	34,94	35,37	0,386	0,949	0,952
Kedi(beyaz)	9,801	4,871	23,062	0,661	0,535	0,886
Kaplumbağa	12,259	24,156	35,805	0,511	0,929	0,940
Dinozor(siyah)	13,272	37,709	42,735	0,115	0,982	0,991
Dinozor(beyaz)	13,906	1,763	18,628	0,820	0,227	0,818
Kurbağa	9,171	29,991	30,345	0,106	0,921	0,928
Armut	12,259	38,845	40,348	0,280	0,963	0,984
Patates	11,890	37,984	38,088	0,301	0,957	0,974
Güneş	10,827	36,302	39,010	0,410	0,945	0,982

Tablo 4.7. ve Tablo 4.8.'de gösterilen sonuçlara göre geliştirilen algoritmanın başarımı Tablo 4.9. da sunulmuştur.

Tablo 4.9. Performans testleri özet tablosu

Sentetik Görüntü	<i>MAD</i>	<i>MSE</i>	<i>L2</i>	<i>PSNR</i>	<i>SSIM</i>	<i>GY Başarım</i>
Kedi(siyah)	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Kedi(beyaz)	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	4/5
Kaplumbağa	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Dinozor(siyah)	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Dinozor(beyaz)	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>P</i>	4/5
Kurbağa	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Armut	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	4/5
Patates	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>TS</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	3/5
Güneş	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	<i>GY</i>	5/5
Başarım Yüzdesi	% 77,7	%100,0	%77,7	%100,0	%88,8	% 88,8

TS algoritması ile elde edilen derinlik verileri genel sınırları belirlemekte ve ardından uygun yumuşatma ve filtreleme adımları ile şekil yaklaşımı gsterilmektedir. Geliştirilen karma algoritmada gradyan ve Fourier dnşmlerinin kullanılması ile TS iin gerekli olan filtreleme işlemi uygulanmaksızın derinlik hakkında bilgi edinilebilir. 25 iterasyon sonrası hiçbir filtreleme adımı uygulanmaksızın elde edilen derinlik verisi şekil 4.16.'da görselleştirilmiştir.



GY

şekil 4.16. Hesaplanan derinlik verilerine ortalama filtre uygulanmaksızın elde edilen derinlik görüntüsü.

BÖLÜM 5. METAL BİLEŞENLER İÇİN YÜZEY KUSUR TESPİT SİSTEMİ

Endüstriyel otomasyon, bilgisayar görmesinin başlıca uygulama alanlarından bir tanesidir. Birçok sektör için imalat süreci, kalite kontrol işlemini de içeren sürekli olarak devam eden bir süreçtir. Dolayısıyla, bilgisayar görmesine dayalı kalite kontrol sistemi imalat sürecine entegre ve eş-zamanlı bir şekilde yürütülmesi gereken bir alt süreç olarak değerlendirilir. Hassas elektronik donanım, tekstil ürünleri, metalik aksam, cam ürünleri ve makina parçaları üretimi gibi birçok imalat sürecinde bilgisayar görmesi yöntem ve araçlarının kullanımı verimlilik ve kalite yönetimi açısından önemli faydalar sağlamaktadır.

Bilgisayar görmesine dayalı kalite kontrol sistemleri; insan hatalarının önüne geçmek, kusurun hızlı ve doğru şekilde ayırt edilebilmesi, üretim hızını ve kalitesini arttırabilmek vb. amaçlar için endüstriyel alanlarda sıklıkla tercih edilmektedir. Görüntü alma ve alınan görüntüyü işleme adımlarından oluşan böyle bir sistem için en önemli bileşenlerden biri görüntü işleme yöntemleriyle hata tespiti yapmaya uygun görüntülerin elde edileceği bir görüntü alma düzeneğine sahip olunmasıdır. Görüntü alma sürecinin performansı, başta aydınlatma olmak üzere görüntülerinin elde edilmesi gereken cisimlerin şekli, geometrisi ve hammaddesi, görüntü alma düzeneğinin esneklik kabiliyeti, kullanılacak kamera ve lenslerin parametreleri, ortam ışığı gibi birçok etkenin birlikte değerlendirilerek uyum içinde işletilmesine bağlıdır. Metal, cam, tekstil, plastik gibi farklı hammaddelerden oluşan cisimlerin ortam aydınlatmasına karşı farklı duyarlılıkları olabilmekte, özellikle metal cisimler çok yüksek düzeyde yansıma yapabilmektedir. Bunun yanında, çok küçük boyutlara sahip cisimlerin kontrolü için kullanılacak kamera ve lenslerin oldukça yakın mesafeden yüksek çözünürlüklü görüntüler elde edebilecek özellikte olmaları da bilgisayar görmesine dayalı kalite kontrol sistemlerinin performansı açısından büyük öneme sahiptir. Endüstriyel amaçlı olarak kullanılması beklenen bilgisayar destekli

kalite kontrol sistemleri, çoğu durumda çok sayıda üretilen parçalardaki hata tespitini seri olarak gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Bu nedenle görüntü alma sürecinin gerçek zamanlı ya da gerçek zamana yakın şekilde yapılmasını gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında yüzey kusur tespiti için kullanılan örnek cisimler, kavisli ve her açıdan görüntülenemeyecek bir yapıda olan, oldukça küçük yüzeylere sahip metalik otomobil bileşenleridir. Otomobil sektöründe ve genellikle seri üretimde kullanılan parçaların kalite kontrolünün hızlı bir şekilde ve bilgisayar görmesi yolu ile yapılması gerekmektedir. Metal otomobil parçalarının kalite kontrolünün bilgisayar görmesi yolu ile gerçekleştirilmesi zor bir problemdir. Tez çalışmasının bu bölümündeki hedef; otomatik olarak tespit edilen hataların kabul edilebilir değerde olması, hata yerinin doğru olarak tespit edilmesi ve hata tespiti için geçen zamanın makul değere sahip olmasıdır. Öncelikli olarak görüntü alma sisteminin donanım bileşenlerinin teknik özellikleri ve kullanım amaçları belirtilmiştir. Bu aşamada kullanılan endüstriyel kameralar, görüntü alma kartları, iş istasyonları, kontrol bilgisayarı ve bağlantılar anlatılmıştır. Ardından bu donanımsal bileşenlerin uygun şekilde birleştirilmesi ile oluşan görüntü alma sistemi tanıtılmıştır. Görüntü alma sistemi donanımsal olarak oluşturulduktan sonra, TÜBİTAK destekli projeye dayalı bu çalışmanın proje ortağı firma bünyesinde tedarik edilen metalik parçaların belirli yanal yüzeylerinin kalite kontrolü sağlanmıştır. Şekil 5.1.'de örnek metalik bileşenler gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Yüzey kontrolünde kullanılabilir örnek metalik bileşenler [126].

Şekil 5.1.'deki her bir parça birbirinden farklı boyut ve yüzeylere sahiptir. Bu nedenle, kusur tespit sisteminin seçilen bileşene göre özel olarak tasarlanması ve bakış açısı vb. parametrik özelliklerinin iyi ayarlanmış olması gerekmektedir. Tez içerisinde kusur tespiti için kullanılacak metal parçanın kalite kontrolü gerçekleştirilecek olan yüzeyi ve hata örnekleri Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. Seçilen metalik parçanın kalite kontrolü gerçekleştirilecek yüzeyi ve hata örnekleri.

Kusur tespitinin gerçekleştirilebilmesi için Bölüm 2.'de detayları anlatılan geliştirilen GTŞE algoritması kullanılmaktadır. Ayrıca Tsai-Shah ve Frankot-Chellappa GTŞE algoritmaları da testlerde kullanılmıştır. Nesne görüntüsünden ve ışık bilgisinden faydalanılmasıyla nesne yüzeyinin derinlik haritası elde edilerek, özellik çıkartma ve morfolojik işlemler yardımıyla bu derinlik haritasından kusurlu bölgelerin tespit edilmesi yazılımı gerçekleştirilmiştir. Son olarak ise donanımsal ve yazılımsal bütünlük sağlayan .Net ortamında tasarlanmış bir arayüz geliştirilmiştir. Bu arayüz kullanılarak kalite kontrol istasyonunda işlem gören tüm parçalara ait istatistiksel bilgiler saklanmakta, aktif parçanın üzerinde tespit edilen hataların tanımlandığı sonuç görüntüleri otomasyon ekranlarında gerçek zamanlı olarak takip edilmekte ve görüntüler detaylı olarak kaydedilmektedir.

5.1. Görüntü Alma Sistemi

Görüntü almak üzere geliştirilen mekanik düzenek, döndürülebilir ve farklı yönlerde hareket ettirilebilir bağlantılı parçalara sahip olarak tasarlanmıştır. Proje ekibince TÜBİTAK destekli gerçekleştirilen proje kapsamında oluşturulan görüntü alma sistemlerinin genel görünümü Şekil 5.3.'de gösterilmiştir.

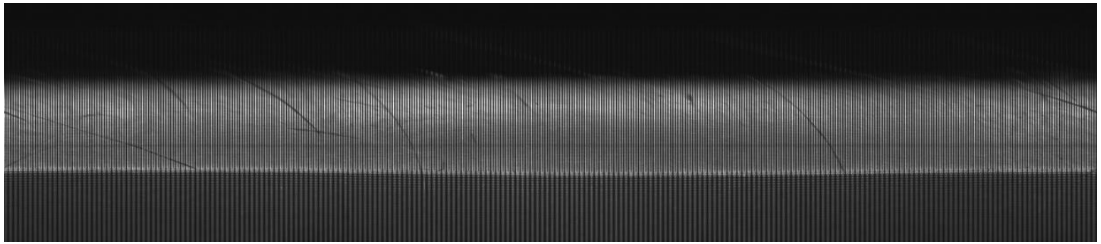


Şekil 5.3. Proje kapsamında tasarlanan görüntü alma sistemleri.

Görüntü alma sistemi temel olarak aşağıdaki donanımsal bileşenlerden oluşmaktadır.

- 1- Çizgi Taramalı (LineScan) Kamera
- 2- Kamera lensi ve aparatları
- 3- Işıklendirme sistemi
- 4- Motor ve Enkoder
- 5- Kontrol Kartı
- 6- Bağlantı kabloları

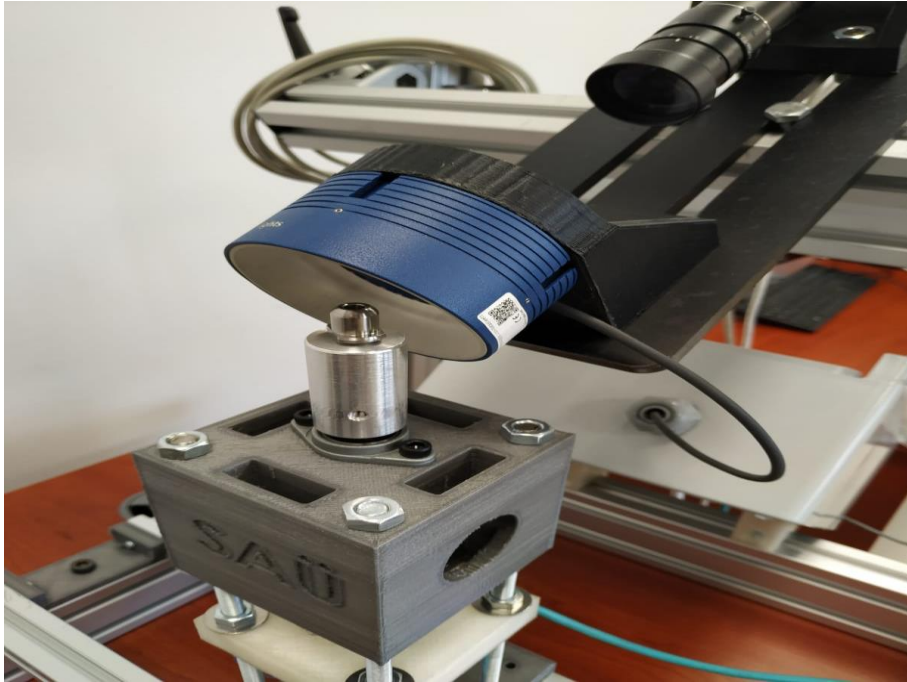
Kamera olarak yüksek çözünürlüklü endüstriyel çizgi taramalı kamera kullanılmıştır. 2048 piksel çözünürlüğe sahip ve renksiz çekim yapan bu kamera GigE Vision 2.0 standardını desteklemektedir. Kamera tetikleme sinyallerinin bozulmadan iletebilmesi için RS-422 haberleşme protokolü kullanılmaktadır. Çizgi çekme tetiklemesi yapıp yeterli sayıda görüntü alınca birleştirilmiş görüntüler ethernet aracılığıyla bilgisayara aktarılmaktadır. Kamera ayarlarının kamera firmasının kendisine ait yazılımı kullanılarak gerçekleştirilebilmesinin yanı sıra sağlanan yazılım geliştirme kitleri (SDK) kullanılarak bu çalışma kapsamında geliştirilen arayüz üzerinden de kamera ayarlamaları yapılabilmektedir. Bir rotasyonda 36000 adet kare dalga üreten enkoder kullanılarak kamera ve ışıklandırmaların tetiklenmesi sağlanmıştır. Şekil 5.4.'de parçanın incelenecek yüzeyinin elde edilmiş örnek bir görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.4. Parçanın kavisli yüzeyinin çizgi taramalı kamera ile elde edilmiş görüntüsü.

Görüntü alma sistemi, cisimlerden ya da ortamdaki yansıyan her türlü istenmeyen ışığı yok edecek şekilde baskın olan ve aynı zamanda görüntü alma alanındaki hedef bölgeleri düzgün dağılan şekilde ışıklandıran bir aydınlatma bileşenine sahip

olmalıdır. Bu çerçevede, bilgisayar görmesine dayalı olarak hata tespiti yapılacak olan metalik parçanın kavisli üst yüzeyinin uygun görüntülerini alabilmek amacıyla, yanıp sönmeleri kontrol edilebilen LED'ler ile donatılmış bir ışıklandırma olan halka aydınlatma sistemi kullanılmıştır. Kullanılan aydınlatma bileşeni dört bölgeye sahiptir ve her bir bölgesi birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Bu sayede tek kamera ile bir cismin 4 farklı yönden görüntüsü kolaylıkla elde edilebilir. Şekil 5.5.'te aydınlatma sisteminin kurulan mekanik düzenek üzerindeki görüntüsü verilmiştir. Atmosferik etkiler, lens ile obje arası mesafenin az olması ve yüksek ışık altında görüntü alınması gerektiğinden aydınlatma cisimden 50 mm uzaklığa yerleştirilmiştir. Sistemin en zayıf halkası olan aydınlatma, sistemin çalışma hızını belirlemektedir.

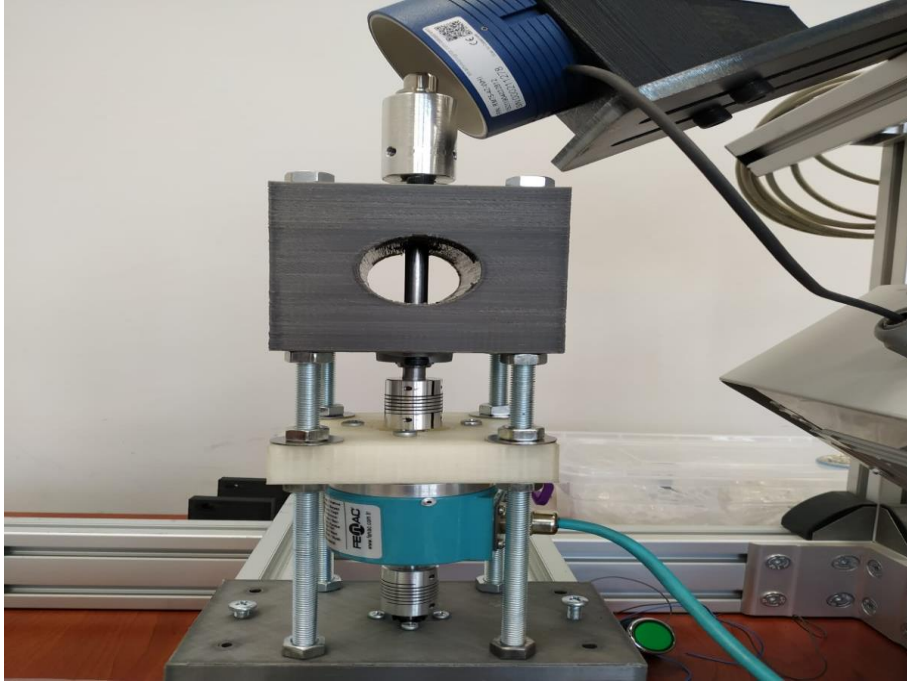


Şekil 5.5. Aydınlatma donanımının görüntü alma sistemi üzerindeki görüntüsü.

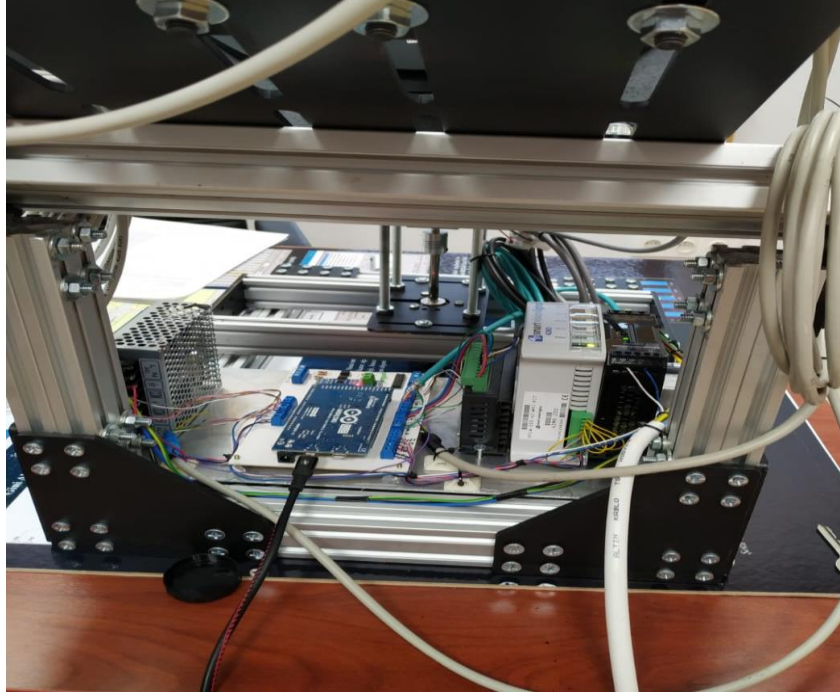
Metalik parça görüntü alma sürecinde parçayı üzerine yerleştiği platform ile birlikte döndürmek üzere redüktörlü DC motor ve parçanın dönüş sırasındaki konumunu öğrenmek için programlanabilir enkoder kullanılmıştır. Parçanın dönme esnasındaki titreşimi, kamera görüntüsünü doğrudan etkileyeceğinden dolayı incelenecek

parçanın platform üzerindeki salınımları engellenmiştir. Motor ve enkoderin kurulan mekanik düzeneğe monte edilmiş hali Şekil 5.6.'da verilmiştir.

Kamera, enkoder, motor, aydınlatma ve görüntü işleme yazılımını senkronize etmek üzere görüntü alma sürecini kontrol eden elektronik bir kontrol kartı tasarlanmıştır. Görüntü alma sürecinde kamera, motor ve enkoderin senkronize şekilde çalışmasını sağlayıp, aydınlatma cihazını da tetiklemek suretiyle uygun nitelikte görüntüler alınabilmesi açısından elektronik kontrol devresinin tasarımının dikkatli bir şekilde yapılması gerekmektedir. Şekil 5.7.'de kontrol kartı devresinin görüntüsü verilmiştir.

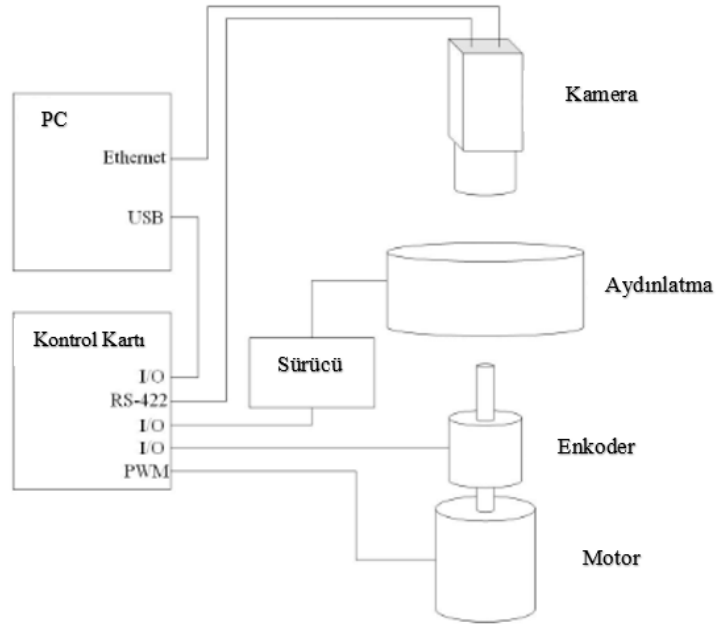


Şekil 5.6. Motor, enkoder ve incelenecek parçanın entegrasyonu.



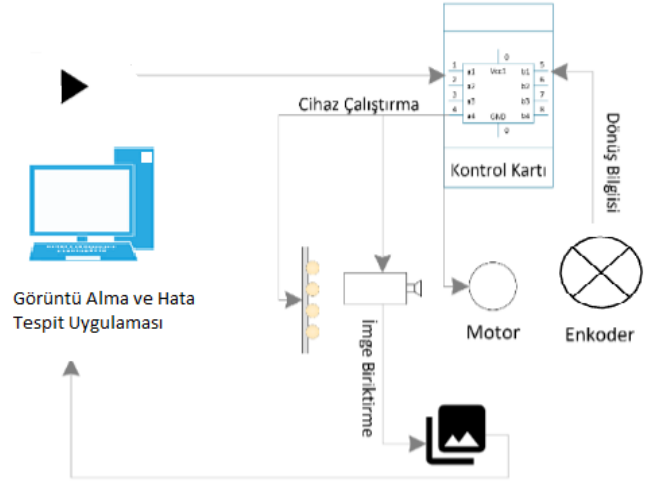
Şekil 5.7. Kontrol kartının görüntü alma sistemi üzerindeki görüntüsü.

Yukarıda detayları verilen bileşenlerden oluşan görüntü alma düzeneğinin genel bağlantı şeması Şekil 5.8.'de sunulmuştur.



Şekil 5.8. Görüntü alma düzeneği genel bağlantı şeması.

Yüzeyin düzgün ince şeritler halinde görüntülenebilmesi için, cisim bir motor yardımı ile döndürülmekte ve dönerken kat edilen yol enkoder yardımı ile çok hassas bir şekilde ölçülmektedir. Bu sistemin uyumlu ve doğru çalışabilmesi kontrol kartı ile sağlanmaktadır. Kontrol kartı bir PC üzerinden gelen başla komutu ile beraber motoru PWM sinyali ile sabit hızda sürmektedir. Enkoderden gelen sinyaller vasıtasıyla yüzeyin aynı kabul edilebilecek şeridinden farklı yönlerden aydınlatılmış görüntüler alınmaktadır. Bir görüntü için önce aydınlatma cihazının bir bölgesine enerji verilmekte, daha sonra kameraya görüntü alması için sinyal gönderilmektedir. Bu işlem yüzeyin bir şeridinde, ışıklandırmanın dört bölgeden oluşmasından dolayı, farklı ışıklandırma bölgeleri yakılmak üzere 4 kez yapılmaktadır. Bu sırada kamerada biriken görüntüler görüntü alma işlemi sonunda iş istasyonuna aktarılmakta ve hata tespit algoritması girişine uygun hale getirilmektedir. Sistemin genel işleyişi Şekil 5.9.'da verilmiştir.



Şekil 5.9. Sistemin genel işleyiş şeması.

Yaklaşık olarak 3 saniyelik bir motor çevrimi sonucunda 2048x11000 piksellik bir görüntü elde edilmekte ve işlenmek üzere saklanmaktadır.

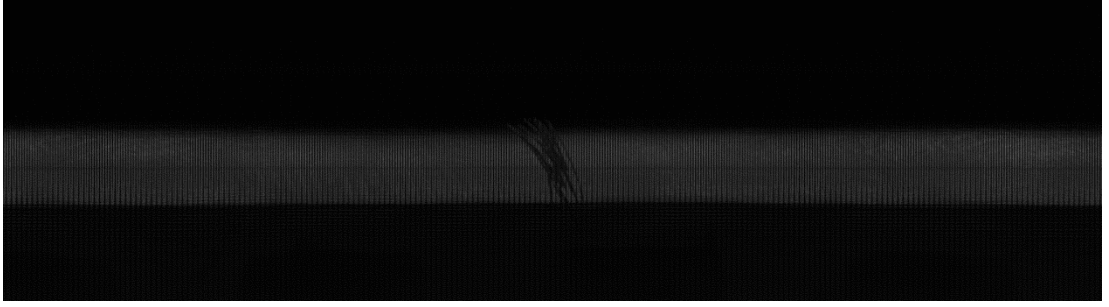
5.2. Kusur Tespitine Yönelik Görüntü İşleme Yazılımı Geliştirilmesi

Metalik parça görüntüleri elde edilirken özel tasarımı LED'lerin dört bölgeye ayrılarak belli sürelerde sırayla yakılması veya tüm bölgelerin aynı anda yakılması olmak üzere yüzey şeklinin doğru tahmin edilmesine yönelik iki farklı görüntü elde edilmesi söz konusudur. Bu çalışmada çok ışıklı ve tek ışıklı olmak üzere iki farklı kullanım için de kusur tespitine yönelik incelemeler gerçekleştirilmiştir. Görüntü alınması aşamasından kusur bölgelerinin işaretlenmesine kadar olan işlem adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir.

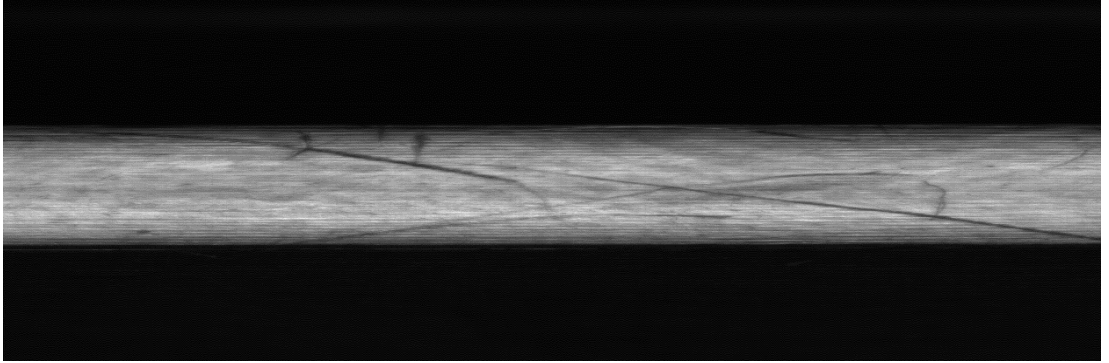
- 1- L Aydınlatma matrisinin ayarlanması (Tek Işık/ Çok Işık)
- 2- GTŞE algoritması kullanarak nesne derinlik haritasının oluşturulması
- 3- Derinlik haritası üzerinde özellik çıkarma/morfolojik işlemlerin uygulanması
- 4- Kusurlu bölgenin maske görüntüsünün oluşturulması
- 5- Kusur bölgelerinin alanının hesaplanması
- 6- Sonuç görüntüsünün oluşturulması

5.2.1.LED bölgelerinin sırayla yakılması sonucu oluşan görüntü üzerinde kusur tespiti

Kusur tespit çalışmalarında kurulumu Bölüm 5.1'de anlatılan görüntü alma sistemi kullanılarak elde edilen metalik parçanın görüntüleri kullanılmıştır. LED'lerin 4 farklı yönden sırayla yakılması ile elde edilen birleşik görüntü ile tüm LED bölgelerinin aynı anda yakılması ile elde edilen tek ışıklı görüntü üzerinde algoritmaların farklılaştırılması ile iki şekilde kusur tespiti gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10.'da aydınlatma sisteminin LED bölgelerinin sırayla ve aynı anda yakılması ile elde edilen görüntü örnekleri sunulmuştur.



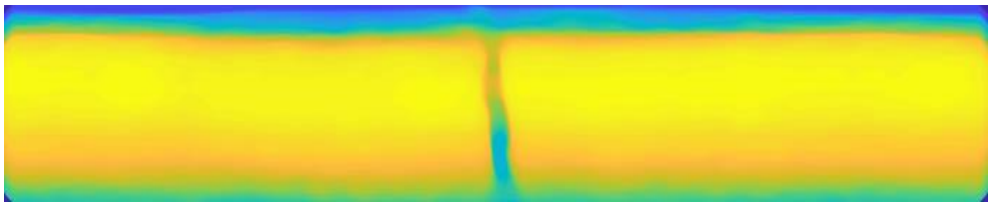
(a) LED bölgelerinin sırayla yakılması ile oluşan örnek birleşik görüntü



(b) LED bölgelerinin aynı anda yakılması ile oluşan örnek görüntü

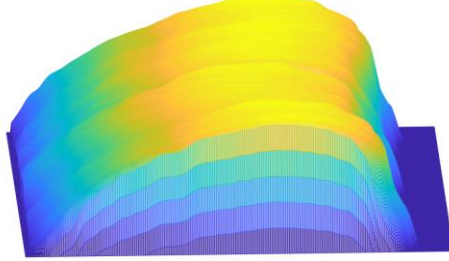
Şekil 5.10. LED bölgelerinin sırayla(a) ve aynı anda(b) yakılması ile oluşan örnek görüntüler.

Tercih edilen aydınlatma ile elde edilen görüntüler üzerinde detayları anlatılan geliştirdiğimiz GTŞE yöntemi kullanılmıştır. Sıralı LED yakılmasında aydınlatma matrisi $L=[1 \ 0 \ 3; -1 \ 0 \ 3; 0 \ 1 \ 3; 0 \ -1 \ 3]$ olarak alınmıştır. Değerler 4 farklı konumda bulunan aydınlatmaları temsil etmektedir. Tek yönlü aydınlatmada ise L aydınlatma matrisi $L=[0 \ 0 \ 3]$ olarak düşünülebilir. Bazı durumlarda determinant hesaplamalarını düzenlemek ve sıfıra bölme hatalarını önlemek için aydınlatmanın x ve y değerlerine çok küçük miktarda eklemeler yapılabilir. Şekil 5.10(a).’da gösterilen LED’lerin sıralı yakılması ile elde edilen görüntü için önerilen GTŞE yönteminin oluşturduğu derinlik haritası Şekil 5.11.’de gösterilmiştir.



Şekil 5.11. LED bölgelerinin sırayla yakılması ile elde edilen Şekil 5.10(a). için oluşturulan derinlik haritası.

Seçilen parçanın üst kavisli yüzeyi üzerinde kusur tespiti yapılmak istenmektedir. Yukarıdaki derinlik haritasının oluşturduğu nesnenin tahmini 3B görüntüsü Şekil 5.12.'de verilmiştir. Nesne yüzeyine benzer şekilde kavisli bir yüzey tahmini yapılmıştır.



Şekil 5.12. Kavisli yüzey için tahmin edilen 3B şekil.

Derinlik haritasının gri seviye görüntüsü Şekil 5.13.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.13. Derinlik haritasına ait gri seviye görüntü.

Tahmin edilen yüzey derinlik haritasına ön işleme adımları uygulanmasıyla (ortalama filtreleme veya medyan filtreleme tercih edilebilir.) yüzey yumuşatılmış ve Şekil 5.14.'de gösterilen filtrelenmiş görüntü elde edilmiştir.



Şekil 5.14. Ön işleme adımları uygulanmış filtrelenmiş görüntü.

Yumuşatılmış nesne derinlik haritası üzerinde parametrik olarak belirlenebilen piksel komşuluğunda ortalama maksimum değer bulunur. Piksellerin derinlik değerlerine göre bu ortalama değer kullanılarak bir farklılık matrisi oluşturulmaktadır.

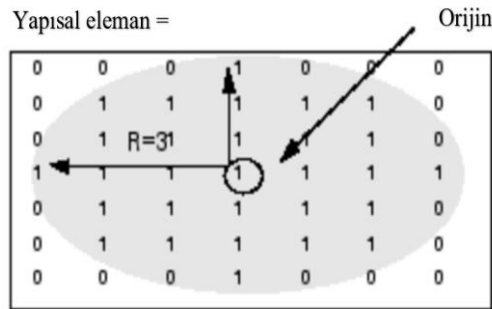
Parametrik olarak eşik değeri belirlenir ve bu eşik değeri kullanılarak farklılık matrisi üzerinde eşik değerini geçemeyen piksellerin ikili değer maske matrisi oluşturulur. Şekil 5.14.'te yumuşatılmış derinlik bilgisinden elde edilen gri seviye görüntüsü için eşik değeri uygulandıktan sonraki gürültülü örnek ikili görüntü Şekil 5.15.'de verilmiştir.



Şekil 5.15. Eşik değeri uygulanmasıyla elde edilen gürültü içeren kusur bölgeleri ikili (binary) görüntüsü.

Eşik değeri uygulanması sonucu elde edilen ikili görüntüye ardından morfolojik işlemler uygulanır. Morfolojik işlemler temel küme işlemlerine dayanan, görüntüdeki sınırlar (borders), iskelet (skeleton) gibi yapıların tanımlanması ve çıkartılması, gürültü giderimi gibi uygulamalar için kullanılmaktadır. Görüntü işlemede genellikle, morfolojik süzgeçleme, inceltme, budama gibi ön/son işlem olarak da sıkça kullanılır. Uygulamada Morfolojik işlemlerden olan Aşındırma (Erosion) ve Yayma (Dilation) yöntemlerini kullanılmıştır. Aşındırma işlemi nesnenin sınırlarındaki piksellerin kaldırılması ile ele alınan bölgenin sınır bölgelerinin aşındırılmasında kullanılmaktadır. Yayma ise görüntüdeki nesnenin sınırlarına pikseller ekleyerek bölgenin sınırlarının genişletilmesinde kullanılmaktadır. Eklenecek veya kaldırılacak piksel sayısı görüntüyü işlemek için kullanılacak yapısal elemanların şekil ve boyutuna bağlıdır [127]. Morfolojik işlemlerin önemli bir kısmı, girdi görüntüsünü araştırmak için kullanılan yapılandırma elemanlarıdır. Yapılandırma elemanı, işlenmekte olan görüntüdeki pikseli tanımlayan ve her pikselin işlenmesinde kullanılan konumu tanımlayan bir matristir. Genellikle, giriş görüntüsünde işlemek istenilen nesnelere aynı boyutta ve şekilde bir yapılandırma ögesi seçilir. Örneğin, görüntüdeki çizgileri bulmak için çizgisel bir yapılandırma ögesi oluşturulabilir. Düz ve düz olmayan olmak üzere iki tür yapılandırma elemanı kullanılabilir. Düz bir yapılandırma elemanı, true değerdeki piksellerin morfolojik hesaplamaya dahil edildiği ve false değerdeki piksellerin kullanılmadığı, 2B veya

çok boyutlu ikili değerli bir komşuluktur. Yapılandırma ögesinin orta pikseli, işlenmekte olan görüntüdeki pikseli tanımlar. Hem ikili hem de gri tonlamalı görüntülerle düz yapılandırma öğeleri kullanılabilir [128]. $r = 3$ yarıçaplı bir yapısal eleman örneği Şekil 5.16.'daki gibi gösterilebilir.



Şekil 5.16. Yapısal eleman örneği [119].

MATLAB ortamında çok farklı yapısal elemanlar kullanılabilir. Bunlardan bazıları Tablo 5.1.'de gösterilmiştir [129].

Tablo 5.1. Bazı yapısal elemanlar ve özellikleri.

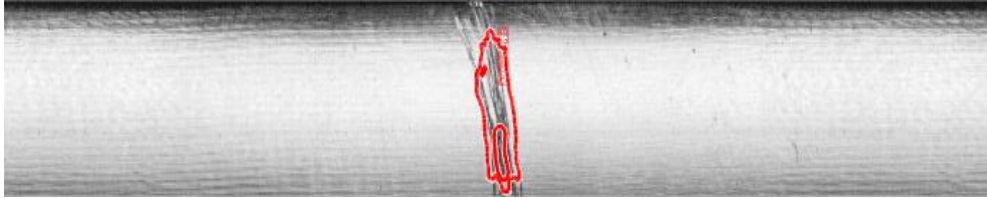
<i>Yapısal Eleman</i>	<i>Özellik</i>
Diamond	Orijinden uzaklığı belirten r yarıçaplı elmas şekilli yapısal eleman.
Disk	r yarıçaplı n adet çizgiden oluşan disk şekilli yapısal eleman.
Octagon	Yapısal elemanın merkezinden sekizgenin köşelerine olan mesafeyi belirten r yarıçaplı sekizgen şeklinde yapısal eleman.
Line	Komşu merkeze göre simetrik doğrusal yapısal eleman.
Rectangle	Belirtilen uzunluklarda dikdörtgen şeklinde yapısal eleman.
Square	Belirtilen genişlikte kare şeklinde yapısal eleman.
Cube	Belirtilen genişliklerde 3B küp şeklinde yapısal eleman.
Cuboid	Belirtilen uzunluklarda 3B kubik yapısal eleman.
Sphere	r yarıçaplı küresel yapısal eleman.

Disk şekilde 3 yarıçaplı yapısal eleman kullanılarak ve görüntü sınırlarındaki gürültülerin giderilmesi ile gürültülü ikili görüntüden Şekil 5.17.'deki kusur yeri maske görüntüsü elde edilir.



Şekil 5.17. Gürültüden arındırılmış kusur bölgelerini gösteren ikili (binary) görüntü.

Sonuç olarak Şekil 5.10(a).’da verilen LED’lerin sıralı olarak yakılması ile elde edilen nesne görüntüsünün kusur işleme algoritmasının işlenmesi sonucu oluşan sonuç görüntüsü Şekil 5.18.’de verilmiştir.

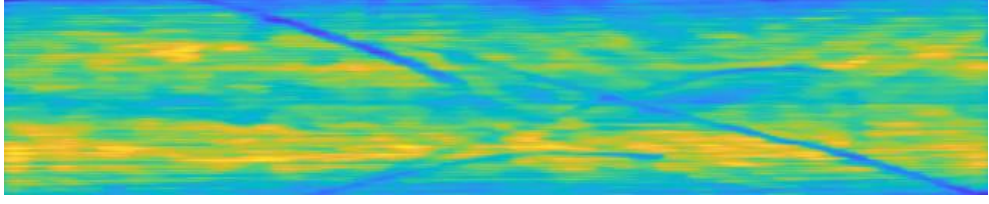


Şekil 5.18. Kusur yerlerinin nesne görüntüsü üzerinde gösterilmesi.

LED bölgelerinin sırayla yakılması işlemi birkaç yönden avantaj sağlamaktadır. Öncelikle aydınlatma yönü bilgileri tam verildiği için yüzey normali hesaplamaları daha doğru sonuçlar vermektedir. İkinci olarak ise kusur yerinin kalem izi, leke gibi derinlik içermeyen hatalardan ayırt edilmesi sağlanabilir. Tüm LED bölgeleri aynı anda yakıldığı zaman ışığın tam tepeden vurduğu varsayımı yapılmaktadır. Bu ise sistemdeki aydınlatma durumunu tam olarak karşılamamaktadır.

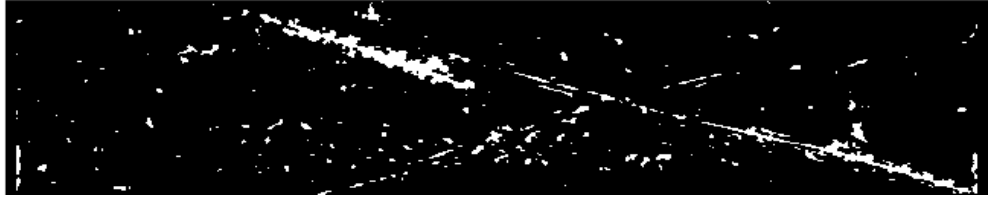
5.2.2.LED bölgelerinin aynı anda yakılması sonucu oluşan görüntü üzerinde kusur tespiti

Tüm LED’lerin aynı anda yakılması ile görüntü alınması için $L(x, y, z)$ aydınlatma matrisinin tek bir (x, y, z) konumundan ışık sağladığı varsayılmıştır. Şekil 5.10(b).’de verilen tüm aydınlatmaların aynı anda yakılmasıyla elde edilen nesne görüntüsünün önerilen GTŞE algoritması uygulanması sonucu elde edilen derinlik haritası görüntüsü Şekil 5.19.’da gösterilmiştir.



Şekil 5.19. LED bölgelerinin aynı anda yakılması ile elde edilen görüntü (Şekil 5.10(b).) için oluşturulan derinlik haritası.

Uygun ön işleme ve filtreleme adımları ile birlikte belirli eşik değerinin altındaki değerler elimine edilir. Bu eleme işlemi sonucunda kusur tahmin edilen bölgelere ait ikili maske görüntüsü elde edilmektedir. Şekil 5.20.'de eşik değeri 0,8 uygulanması ile elde edilen ikili kusur görüntüsü verilmiştir.



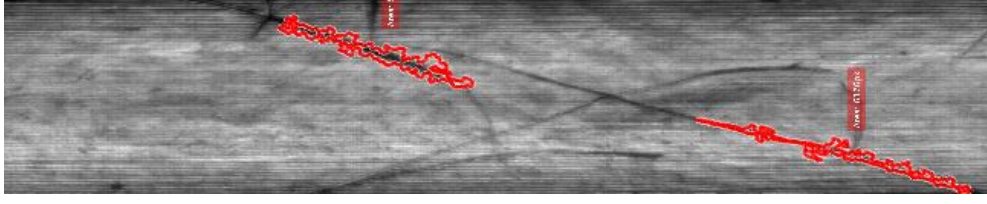
Şekil 5.20. Eşik değeri uygulanmasıyla elde edilen gürültü içeren kusur bölgeleri ikili(binary) görüntüsü.

Ardından gürültü içeren kusur görüntüsüne detayları anlatılan morfolojik adımlar ve $r = 3$ yarıçaplı disk türünde yapısal eleman uygulanması ile Şekil 5.21.'deki gürültüsüz kusur bölgesi görüntüsü elde edilir. Bu morfolojik adımlar sırasında kullanılan yapısal eleman ve morfolojik adımların değerleri değiştirilerek kusur ayırımının hassasiyet derecesi ayarlanabilir.



Şekil 5.21. Gürültüden arındırılmış kusur bölgelerini gösteren ikili (binary) görüntü.

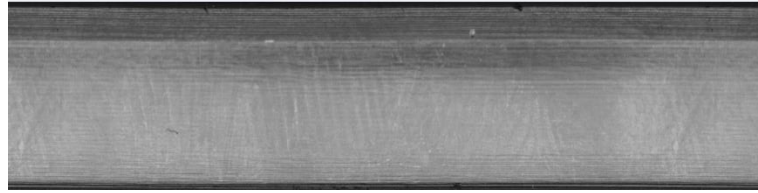
Şekil 5.21.'deki görüntü elde edildikten sonra görüntü üzerinde nesne ayırımı yapılarak alan hesabı yapılmakta ve kusur yerleri işaretlenmektedir. İkili görüntüye göre işaretlenmiş sonuç görüntüsü Şekil 5.22.'de verilmiştir.



Şekil 5.22. Kusur yerlerinin nesne görüntüsü üzerinde gösterilmesi.

5.2.3. Gradyan özellikleri kullanılarak farklı şekilde kusur tespit çalışmaları

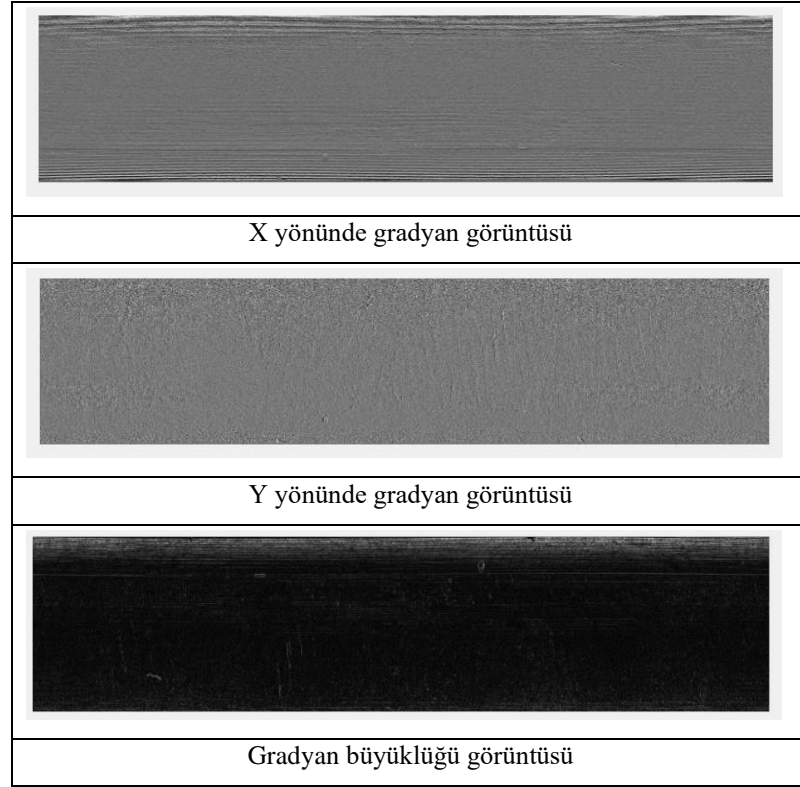
Tez çalışması içerisinde kusur tespiti için farklı yüzeye sahip metalik bileşenlerin görüntülerinin MATLAB ortamında elde edilen yönlü gradyanları ve gradyan büyüklüğü görüntüleri üzerinde özellik çıkarma ve morfolojik işlemler uygulanarak farklı bir şekilde kusur tespiti deneme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kalite kontrolünde kullanılacak veri seti örneği Şekil 5.23.'de gösterilmiştir.



Şekil 5.23. Silindirik yanal yüzeye sahip bileşenlerin çizgi taramalı kamera kullanılarak elde edilmiş görüntüsü.

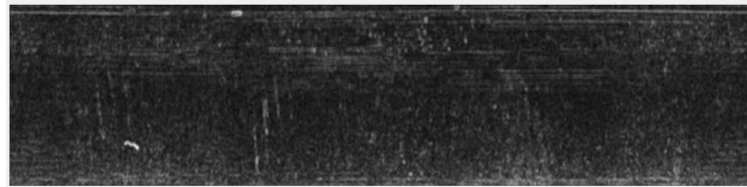
Parçaya ait yönlü gradyan matrisleri ve gradyan büyüklüğü bilgileri farklı özellikteki kusurların tespitinde kullanılabilir. Şekil 5.23.'de gösterilen yüzey görüntüsünden elde edilen derinlik haritası için x ve y yönlü gradyan görüntüleri ve gradyan büyüklüğü görüntüleri Şekil 5.24.'de verilmiştir.

Derinlik haritasından elde edilen görüntünün gradyan büyüklüğü üzerinde ortalama filtreler kullanımıyla Şekil 5.25.'deki gibi yumuşatılmış gradyan büyüklüğü görüntüsü elde edilir.



Şekil 5.24. Parça örneğinin x – y yönlerinde gradyan görüntüleri ve gradyan büyüklüğü görüntüsü.

Yumuşatılmış görüntü üzerinde öncelikle kenar bulma yöntem adımları uygulanır ve görüntü sınırları ikili görüntüden çıkartılır. Şekil 5.26.'da kenar bulma adımlarından sonraki örnek görüntü verilmiştir. Ardından eşik değeri belirlenerek morfolojik adımlar uygulanır. Görüntü içerisinde tespit edilen nesnelerin (kusurları belirtir) bu morfolojik aşındırma ve yayma adımları yardımıyla kopuk pikselleri bağlanır, ardından iç bölge analizinde kusur yerleri maske görüntüsü Şekil 5.27.'deki gibi elde edilir.



Şekil 5.25. Ortalama filtre uygulanmış gradyan büyüklüğü görüntüsü.

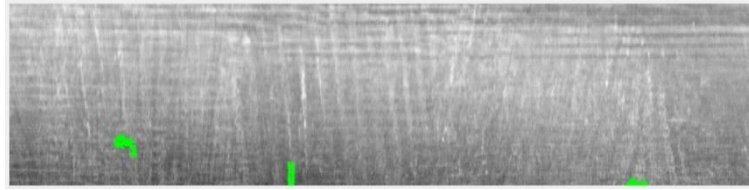


Şekil 5.26. Kenar bulma adımları uygulanmasının ardından elde edilen görüntü.



Şekil 5.27. Morfolojik işlemler sonrasında kusur yerlerinin belirginleştirilmesi.

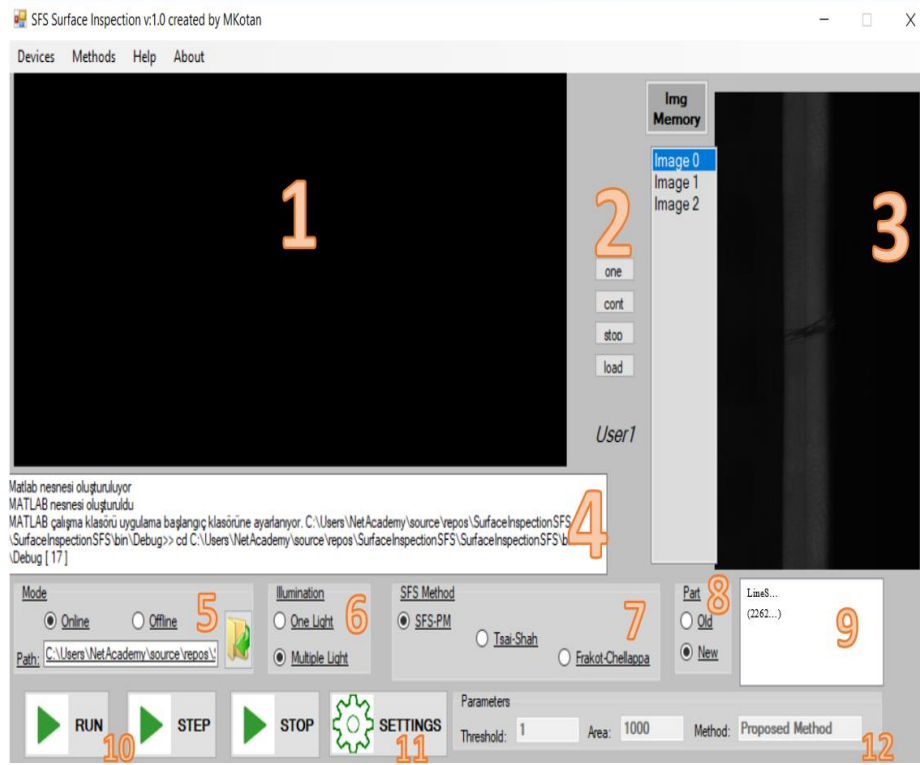
Kusurlu bölgelerin koordinatlarına göre orijinal görüntü üzerinde bu bölgeler işaretlenmektedir. Şekil 5.28.'de işaretlenmiş bölgeler gösterilmiştir.



Şekil 5.28. Nesne görüntüsü üzerinde kusur yerlerinin işaretlenmesi.

5.3. Arayüz Geliştirilmesi

Görüntü alma ve görüntü işleme adımlarının bir arada işlenebilmesi ve süreç takibinin sağlanması gereksinimi, kusur tespiti çalışması için bir arayüz ihtiyacı oluşturmuştur. C# programlama dili kullanılarak Visual Studio [130] ortamında geliştirilen arayüzün örnek görüntüsü Şekil 5.29.'da gösterilmiştir. Numaralandırılmış bölümlerin işlevleri Tablo 5.2.'deki gibi özetlenebilir.



Şekil 5.29. Geliştirilen arayüz.

Tablo 5.2. Arayüz üzerindeki bölmeler ve işlevleri.

Bölme No	İşlevi
1	Kamera görüntüleri anlık olarak izlenebilmektedir.
2	Kamera ayarları için oluşturulmuştur. Tek ve sürekli görüntü alımı test edilmekte ayrıca kamera için konfigürasyon dosyası yüklenebilmektedir.
3	Giriş imgesi, oluşan ara imgeler ve sonuç imgesinin görüntülenebilmesini sağlamaktadır.
4	Bilgi ekranı olup program içerisinde gerçekleşen eylemler hakkında bilgi ekranı oluşturmaktadır.
5	Kusur tespitinin kamera ile eş zamanlı (Online) veya bir dosyadan görüntü okunmasıyla (Offline) ilgili seçimin yapılmasını sağlamaktadır. Offline mod için görüntülerin okunacağı dosya yolu seçilebilmektedir.
6	Aydınlatma LED'lerinin sıralı veya hepsinin aynı anda yakıldığı durumu göstermektedir.
7	Kullanılacak GTŞE algoritmasının seçilebilmesini sağlamaktadır. SFS-PM: Doktora çalışması içerisinde detayları anlatılan geliştirilen algoritma Tsai-Shah: Tsai-Shah doğrusallaştırma tabanlı yinelemeli GTŞE algoritması Frankot-Chellappa: Frankot-Chellappa minimizasyona dayalı GTŞE algoritması
8	İleriye yönelik uygulamalarda parçanın seçilebilmesi için eklenmiştir.
9	Sistemde aktif olarak ekli kameralarının listelenmesi ve seçilebilmesi için kullanılmaktadır. Kamera seçildikten sonra program içerisinde seçilen kamera için bir kamera nesnesi oluşturulur.

Tablo 5.2. (Devamı).

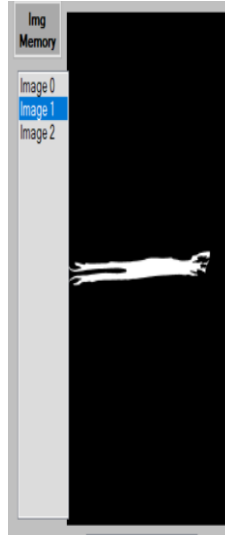
Bölme No	İşlevi
10	Görüntü alımının (kameradan veya dosyadan) sürekli devam edeceği (RUN) veya tek bir görüntü için işlem yapıldıktan sonra durulacağını (STEP) belirtmektedir.
11	Eşik değeri, kusur büyüklüğü gibi parametrelerin girilebildiği ayarlar sayfasını açmaktadır. Parametrelerin değiştirilmesi için admin yetkisi gerekmektedir.
12	Anlık olarak aktif olan parametre değerlerini göstermektedir.

Kameranın tetiklenmesinin ardından kamera konfigürasyonuna göre belirli sayıda çekilen line (çizgi) görüntülerinden oluşturulan resim, kamera kütüphanesi ile sağlanan nesnelere yardımcıyla arayüz üzerinden görüntülenebilmektedir. Şekil 5.30.'da kusur tespiti yapılan yüzeyin kamera kütüphanesi kullanılarak görüntülenmesi sunulmuştur.



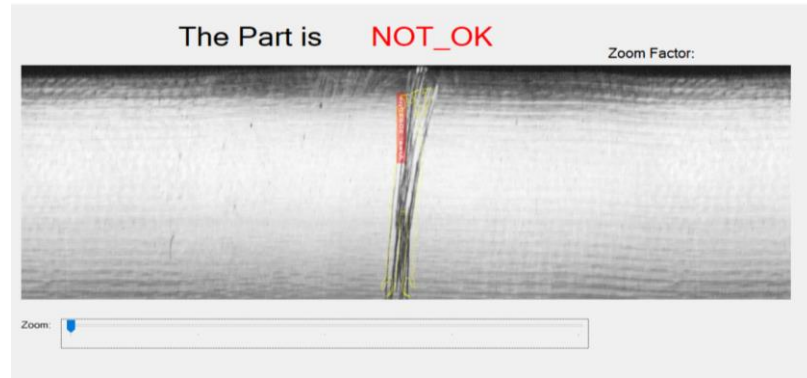
Şekil 5.30. Kameradan alınan görüntü ve görüntüye ait özelliklerin gösterilmesi.

Kusur tespiti yapılırken oluşturulan ara görüntüler 3 numaralı Image Memory bölmesinden ayrıca görüntülenebilir. Şekil 5.31.'de kusur yerinin maske görüntüsü sunulmuştur.



Şekil 5.31. Oluşan ara görüntülerin arayüz üzerinde izlenmesi.

Son olarak ise kusur tespiti algoritmasının işlenmesinin ardından parçanın kullanılabilir veya ıskarta olması durumu kararı verilir ve sonuç ekranı üzerinde kullanıcıya gösterilir. Şekil 5.32.'de sonuç ekranı gösterilmiştir. Yakınlaşabilme özelliği kullanılarak kusur yeri ayrıca detaylı incelenebilir.



Şekil 5.32. İncelenen parçanın kusur bulma yazılımına göre sonuç kararının ve görüntülerinin sunulması.

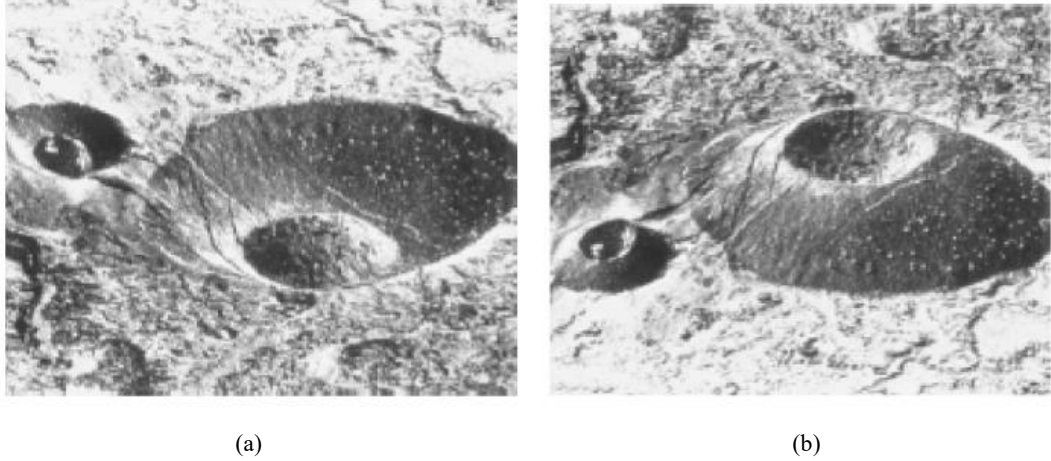
Genel olarak geliştirilen arayüz aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 1- Görüntü alma sistemi ile haberleşip görüntü çekimi için kamera tetikleme yapılması
- 2- LED aydınlatma modunun ayarlanması
- 3- Çekilen görüntülerin sırasıyla işlenebildiği bir görüntü yığını içermesi

- 4- Kamera görüntüsünün anlık olarak izlenebilmesi
- 5- Kusur tespiti algoritması işlenirken oluşan ara görüntülerin izlenebilmesi
- 6- Dosyadan görüntü okunabilmesi ve üzerinde kusur tespiti algoritmasının işlenmesi
- 7- Konfigürasyon dosyasından otomatik değerlerin okunması
- 8- Giriş, ara imgeler ve sonuç imgesinin disk üzerinde saklanması.
- 9- Sonuç görüntüleri kaydedilirken oturum, versiyon, yöntem, tarih ve sonuç bilgileri ile birlikte saklanması.
- 10- Aygıtlar (kamera, lens, aydınlatma, enkoder, kontrol kartı vb.) için bilgi ve konfigürasyon ekranlarına sahip olunması
- 11- Parametre değişiklikleri için kullanıcı yetkilendirme
- 12- Hata tespit yöntemi sonuçlarını ayrıntılı inceleme ekranları

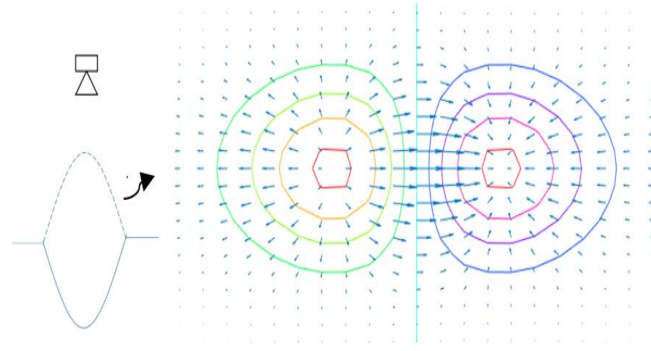
BÖLÜM 6. YÜZEY YÖNELİMİ ANALİZİ İÇİN 3B ORTAMDA MODELLENMİŞ SİSTEM VE RENK İŞLEME ALGORİTMASI GELİŞTİRİLMESİ

İç bükey veya dış bükey olma belirsizliği psikolojide değinilen konulardan biridir. İnsanların bir görüntüye bakarken ışık kaynağının sahneyi üst tarafından aydınlatması varsayımlarından dolayı oluşmaktadır [131]. Bu belirsizlik problemi açıklanırken Şekil 6.1.'deki görüntü ele alınabilir.



Şekil 6.1. İç bükey-dış bükey belirsizliği. Aynı yüzey aydınlatma yönüne göre bir krater (a) veya volkan (b) görüntüsü oluşturmaktadır [40, 131].

Yüzeylerin iç bükey/dış bükey olma belirsizliği, GTŞE algoritmaları için olası farklı çözümlere yol açmaktadır. Genellikle ışık kaynağının konumuna göre nesne yüzeyinde oluşan tonlamalar GTŞE algoritmalarının yüzey hakkında hatalı yorum yapmasına neden olabilmektedir. Şekil 6.2.'de iç bükey-dış bükey olma belirsizliği durumu gösterilmiştir.

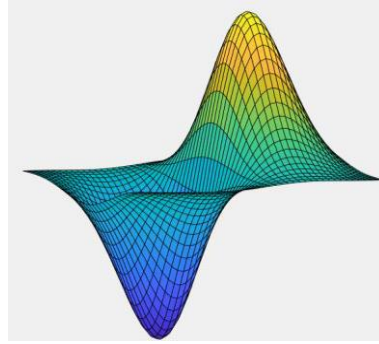


Şekil 6.2. GTŞE yöntemleri için iç bükey veya dış bükey olma belirsizliği durumu.

Şekil 6.2.'de tek bir gri-seviye görüntü kullanıldığında tonlama değişimlerine göre yüzey yöneliminin yeşil renkte gösterilen girintili veya mavi renkte gösterilen çıkıntılı olabileceği şeklinde farklı yüzey şekli tahmini yapılabilir. Literatürde bu problemin çözümü için bazı çalışmalar yapılmıştır [131]. Ortak aydınlatma, ara yansımalar [132, 133] ve ışık kaynağı zayıflatma faktörü tanıtılması [134] bunlardan bazılarıdır. Quéau ve ark., [135] GTŞE'nin bu belirsizlik durumları karşısında sorun yaşadığını belirterek birden fazla görüntülü GTŞE yöntemine dayalı bir yöntem geliştirmişlerdir. Parados ve Faugeras [9] GTŞE'de en sık karşılaşılan problemlerden birinin iç bükey ve dış bükey olma belirsizliği olduğunu vurgulamışlardır. Buradaki belirsizlik aydınlatma parametrelerinin tahminindeki bir değişiklikten dolayıdır. Bu şekil belirsizlikler genelleştirilebilir. Belhumeru ve ark. [136] ne gölgelendirme ne de tonlamaların tek bir bakış açısından nesnenin gerçek 3B yapısını yansıtamadığını vurgulamışlardır. Breuss ve ark. [137] Perspektif GTŞE yaklaşımları üzerinde belirsizlik analiz yapmış ve içbükey / dışbükey belirsizlikleri dahil olmak üzere aydınlık azaltma faktörünü de ele alarak tüm belirsizliklerin perspektif GTŞE modeli kullanılarak tamamen ortadan kalkıp kalkmadığı sorusuna cevap aramışlardır. Araştırmalarının sonucunda belirsizlik durumlarının hala meydana geldiğini ve pratik hesaplamalarda ortaya çıktığını göstermişlerdir. Bunun üzerine karmaşık yüzeyler için bir algoritma önermişlerdir. Zhu ve Shi [138] yerel belirsizliği çözmek için grafik teorisine ve tekil noktalar arasındaki ilişkiye dayalı bir yöntem önermişlerdir. Abada ve ark. [139], Shi ve Zhu'nun tekil noktaların kullanımının yeterli olmadığını

ve bu belirsizliği çözmek için nesne üzerinde daha fazla bilgi gerektirdiğini savunmuşlardır.

Bu çalışmada özellikle yüzey inceleme çalışmalarında kullanılan ışığın yüzeye tam tepeden vurduğu durumlarda yüzey belirsizliğine dayalı hatalı 3B oluşumu önlemek için üç farklı renkte aydınlatmaya dayalı bir sistem önermesi yapılmıştır. Örneğin Şekil 6.3.'te verilen yüzey ele alınabilir.

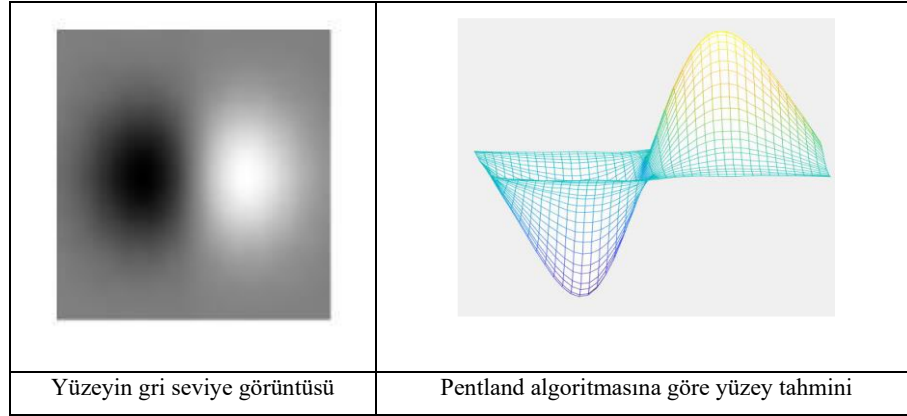


Şekil 6.3. Çukur ve tümsek bölge içeren sentetik oluşturulmuş yüzey örneği.

Yüzeyin girinti ve çıkıntılarının açıkça belli olduğu ve aydınlatma yönünün iyi bilindiği durumlarda yukarıdaki yüzey şeklinin elde edilmesinde tonlama bilgisinden faydalanıldığı zaman herhangi büyük bir sorun oluşmayacaktır. Yukarıdaki yüzey Denklem 6.1'deki formülasyon kullanılarak elde edilebilir.

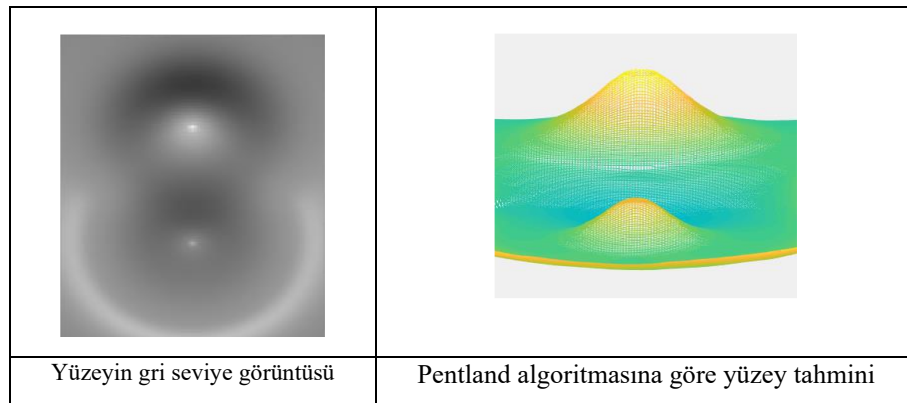
$$Z = x * e^{(-x^2 - y^2)}. \{x, y \mid x, y \in R \text{ ve } x, y = [-2, 2]\} \quad (6.1)$$

Şekil 6.3.'teki yüzeyin örnek gri seviye görüntüsü ve yüzeyin Pentland algoritmasına göre şekil tahmini Şekil 6.4.'te verilmiştir.



Şekil 6.4. Yüzeyin (Şekil 6.3.) gri seviye oluşturulmuş görüntüsü ve Pentland algoritmasına göre oluşturulan yüzey tahmini.

Şekil 6.4.'te görüldüğü üzere çukur yüzeyin koyu, tümsek yüzeyin daha aydınlık verilmesi ile görüntüdeki yüzey uygun bir şekilde tahmin edilmiştir. Şekil 6.3.'teki yüzey farklı konumlardan aydınlatıldığında farklı görüntüler elde edilmekte ve yüzey hatalı bir şekilde tahmin edilmektedir. Şekil 6.5.'te aynı yüzeyin gözlemci yönü değiştirilmeden noktasal bir ışık kaynağı tarafından tepeden aydınlatıldığı durum ele alınmıştır. Bu gibi bir durumda oluşacak gri-seviye görüntü ve bu görüntüye ait Pentland algoritmasının yüzey hesaplaması Şekil 6.5.'de gösterildiği gibi hatalı olmaktadır.



Şekil 6.5. Aynı yüzeyin (Şekil 6.3.) tepe noktasından noktasal ışık kaynağı ile aydınlatılması sonucu oluşan gri seviye görüntüsü ve Pentland algoritmasına göre oluşturulan yüzey tahmini.

Bu çalışmanın amacı, yüzeyin aynı anda farklı renkte ışık kaynakları tarafından aydınlatılmasıyla yüzey üzerinde oluşan renk dağılımlarının algoritmik olarak işlenmesi ve GTŞE algoritmalarına yüzey noktalarının yönelimi hakkında bir ön bilgi

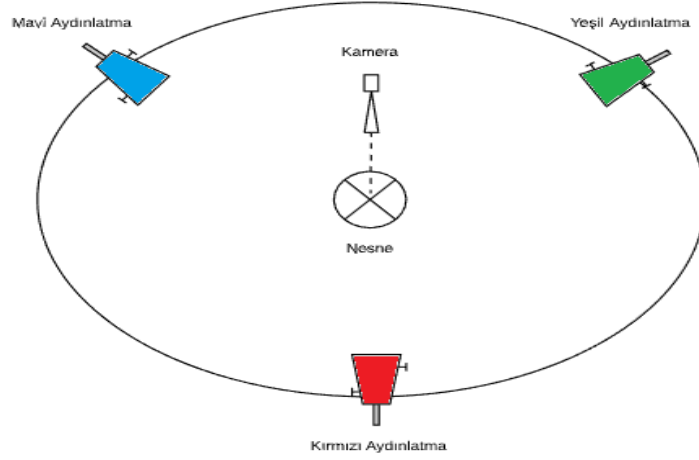
sağlanmasıdır. Özellikle kalite kontrolü yapılacak yüzeyler için uygun donanımsal birimler kullanılması ve yansımaların ortadan kaldırılmasıyla bu renk bilgisi algoritması yüzey yönelimlerinin veya kusurlu bölgelerin tespitinde kullanılabilir. Şekil 6.6.'daki kırmızı, yeşil ve mavi renkte aydınlatılan duvar yüzeyi incelenebilir. Tüm renkler beraber vurduğu zaman beyaz görünen duvar yüzeyi araya bir engel girdiği zaman yüzeye çarpan renklerin karışımı sonucu oluşan yeni rengi yansıtmaktadır.



Şekil 6.6. Kırmızı, yeşil ve mavi renkte aydınlatılan duvar. Araya engel girmesiyle farklı renkte ışıkların birleşmesi sonucunda duvarda farklı renk desenleri oluşmaktadır.

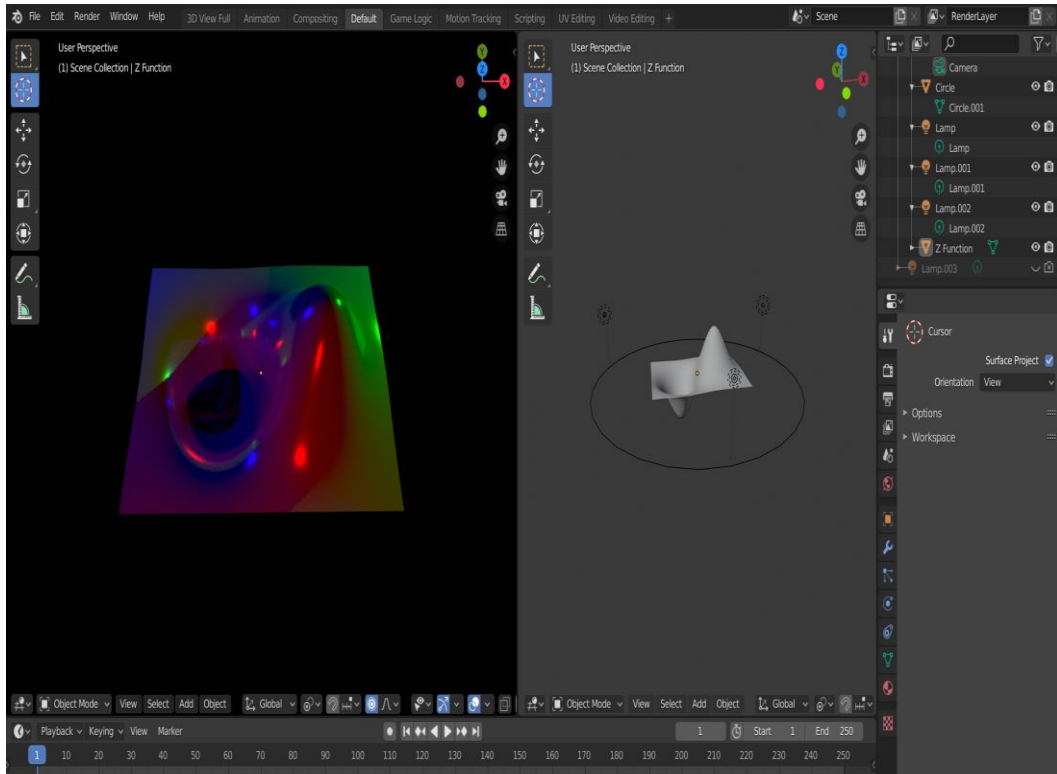
Renk yansımalarını incelemek üzere görüntülerin alınacağı örnek yüzey şekli ve sahne tasarımı Blender [140] 3B modelleme ortamı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. 3B modelleme ortamında tasarlanan renkli aydınlatmalar, yüzeyin belirli küçük bir

miktar üzerinde konumlandırılmıştır ($z=5$). Sahne tasarımı Şekil 6.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.7. Blender 3B modelleme ortamında gerçekleştirilen sahne tasarımı.

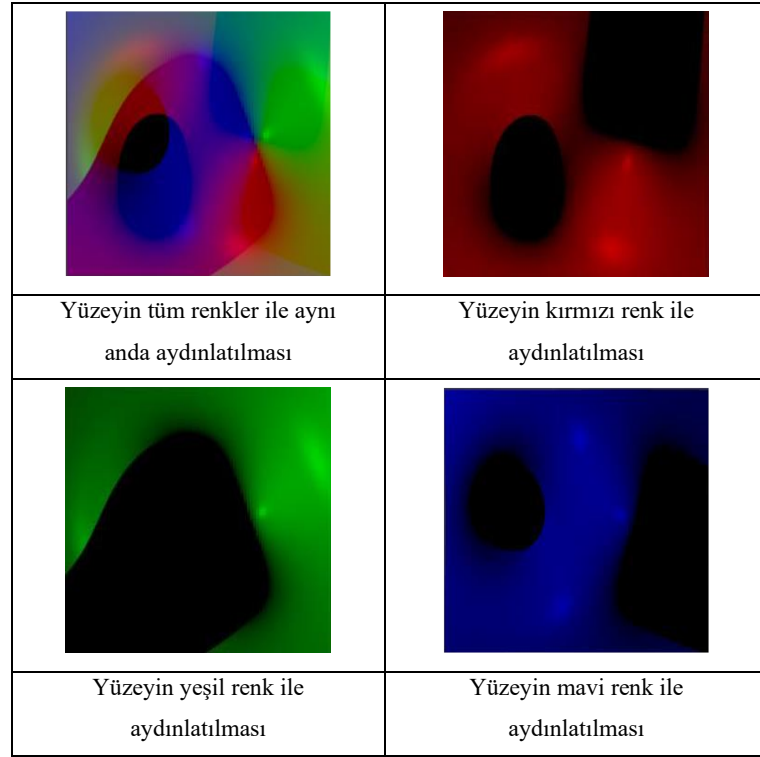
Tasarımı verilen sahnenin Blender modelleme ortamında gerçekleştirilmesi ve renkli aydınlatmaların hesaplanmasıyla (render) yüzey üzerinde oluşan örnek renk yansımaları Şekil 6.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.8. 3B modelleme ortamında yüzey tasarımı ve örnek yansıma görüntüsü.

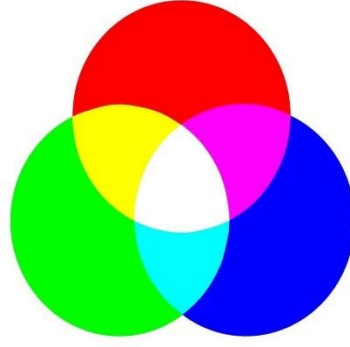
Şekil 6.3.'de gösterilen yüzeyin üç farklı yönden kırmızı, yeşil ve mavi renklerde aydınlatmalar kullanılarak aynı anda aydınlatılması ve ayrı ayrı olarak aydınlatılması sonucu elde edilen görüntüler Şekil 6.9.'da gösterilmiştir. Geliştirilen algoritma renkli giriş görüntüsünü tüm renk bantlarına göre ayırmakta ve renk dağılım maskelerini oluşturmaktadır.

Kırmızı, yeşil ve mavi aydınlatmaların beyaz renkteki nesne üzerine aynı anda vurmasıyla beraber yansıma etkileri ortadan kaldırıldığında oluşacak renk desenleri Şekil 6.10.'daki renk karışım bilgisinden anlaşılmaktadır.



Şekil 6.9. Yüzeyin farklı renklerle aydınlatılması.

Renk karışım tablosu Tablo 6.1.'de verilmiştir. Blender 3B modelleme ortamında aydınlatılan Şekil 6.3.'deki yüzey üzerinde oluşacak renk yansımalarının geliştirilen uygulama içerisinde hesaplanan bant görüntüleri Şekil 6.11.'de gösterilmiştir. Renk bantlarındaki beyaz bölgeler ilgili rengin olduğu, siyah bölgeler ise rengin olmadığı alanları göstermektedir.

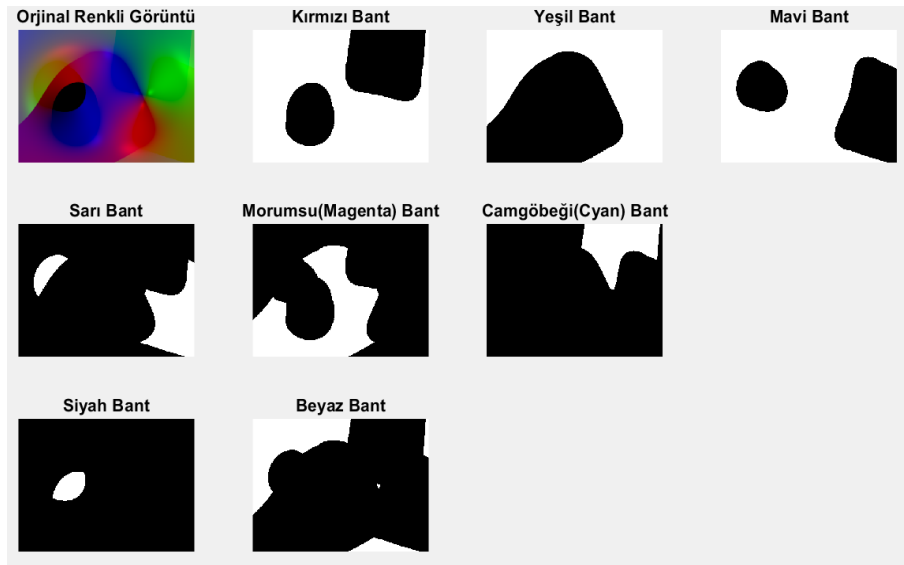


Şekil 6.10. Renk karışımları.

Tablo 6.1. Renk karışım tablosu.

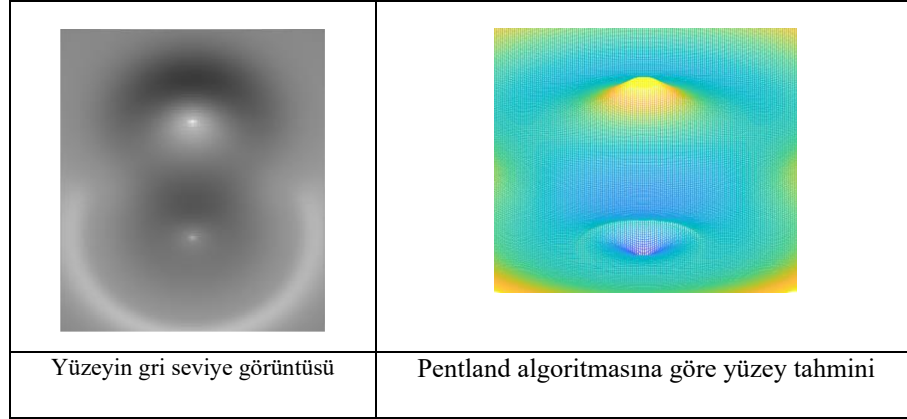
<i>Yüzey üzerine düşen renk</i>	<i>Oluşan yeni renk</i>
Yeşil + Mavi	Camgöbeği (<i>Cyan</i>)
Kırmızı + Yeşil	Sarı (<i>Yellow</i>)
Kırmızı + Mavi	Morumsu (<i>Magenta</i>)
Kırmızı + Yeşil + Mavi	Beyaz (<i>White</i>)
Hiçbir renk değmiyorsa	Siyah (<i>Black</i>)

Kırmızı, yeşil ve mavi renklerin hiçbirinin vurmadığı siyah bant, kırmızı ve yeşil rengin beraber vurduğu sarı bant, kırmızı ve mavi rengin beraber vurduğu morumsu (Magenta) bant, yeşil ve mavi renklerin beraber vurduğu camgöbeği (Cyan) bant ve her üç rengin beraber vurduğu yüzey ise beyaz bant olarak ayrıştırılmıştır.



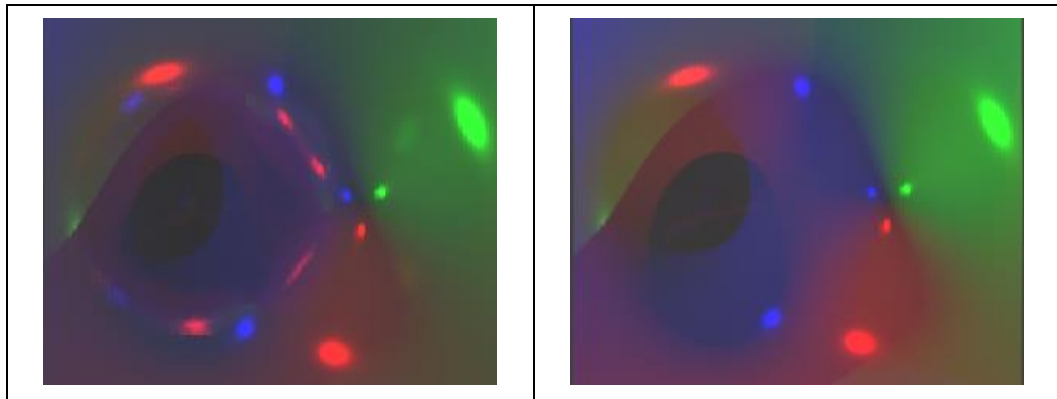
Şekil 6.11. Kırmızı, yeşil ve mavi renklerle aydınlatılan yüzeyin (Şekil 6.9.) renk bantlarına ayrıştırılması.

Renk bilgisinin doğru işlenmesi sayesinde yüzeyin farklı konumlardan aydınlatılması ile birbirinden farklı görüntüler elde edilse dahi GTŞE algoritmaları içbükey ve dışbükey bölgeleri doğru ayırt edebilir ve çukur veya tümsek bölgeler hakkında doğru yorum yapabilir. Renk bilgisi işlendikten sonra Şekil 6.5.'te gösterilen hatalı yüzey tahmini Şekil 6.12.'deki gibi daha doğru olarak yorumlanmıştır.



Şekil 6.12. Renk bilgisi işlendikten sonra yüzey tahmini.

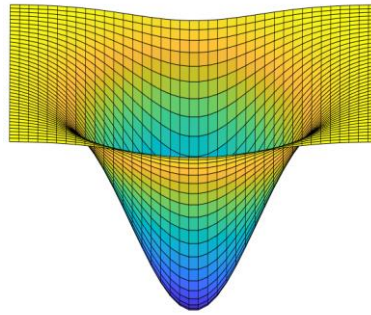
Geliştirilen renk algoritmasında kullanılan yüzeyler yansıtıcılık katsayısı çok düşük olan, mat ve beyaz renkli yüzey varsayımına dayalıdır. Blender 3B modelleme ortamında aynı yüzeyin farklı yansıtıcılık katsayılarına sahip olduğu zaman yüzey üzerinde oluşabilecek farklı yansımaları gösteren örnek görüntüleri Şekil 6.13.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.13. Yüzey yansıtıcılığı katsayısının değişmesiyle elde edilebilir farklı yansımaya görüntüleri.

Beyaz renkten farklı bir yüzey olması durumunda yüzeyin yansıtacağı renk bantları dikkate alınmalıdır. Farklı renkte yüzeyler veya metal bileşenler gibi yüzey yansıtıcılığı fazla olan yüzeyler ele alındığı zaman yansımaların engellenmesi ve renk algoritmasının görüntüye göre özelleştirilmesi gerekmektedir. Bu bölümde geliştirilen algoritma, beyaz renkte ve yüzey yansıtıcılığı çok düşük olan bir yüzey varsayımına dayalıdır. Uygun aydınlatma koşulları ve yansımaların önlenmesi durumunda geliştirilen renk bantlarının analizi yöntemi, yüzey yönelimlerinin anlaşılması ve endüstriyel kalite kontrolü sistemlerinde vuruks, çizik, çukur, çatlak vb. kusurların tespit edilmesi gibi uygulamalarda kullanılabilir.

GTŞE algoritmalarının tonlama duyarlılığını ve renk bilgisinin algoritmalar üzerindeki etkinliği göstermek için Şekil 6.14.'teki sadece çukur içeren yüzey kullanılmıştır. Yüzey tepeden aydınlatıldığında iç bükey veya dış bükey yüzey noktaları tam olarak anlaşılammaktadır. Bu yüzeye ait tepe noktasından aydınlatılmış gri-seviye görüntü beş farklı GTŞE algoritmasına önce renk bilgisi olmaksızın ardından renk bilgisi ile beraber verilerek sonuçlar incelenmiştir.

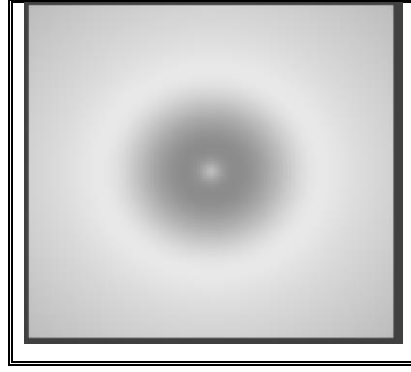


Şekil 6.14. Sadece çukur içeren sentetik oluşturulmuş yüzey.

Şekil 6.14.'te gösterilen yüzey Denklem 6.2 ile elde edilmiştir.

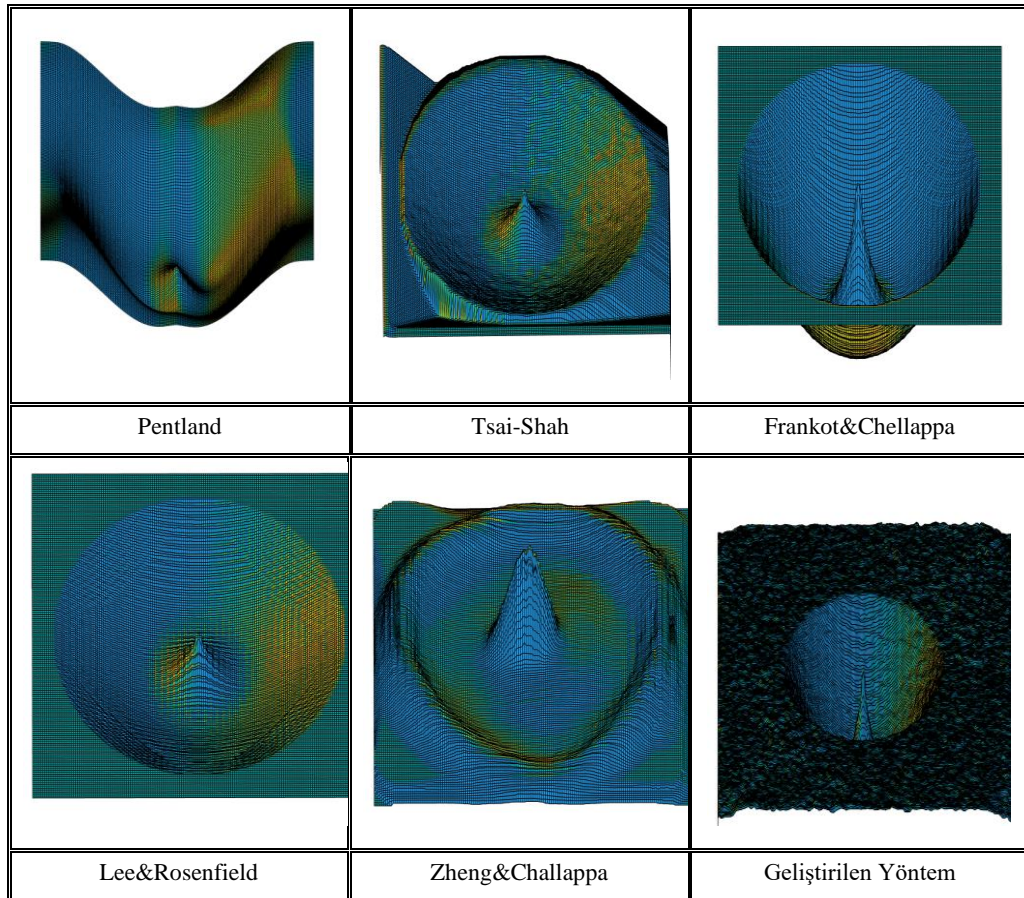
$$Z = -2/e^{(x+0.1)^2+y^2}. \{x, y \mid x, y \in R \text{ ve } x, y = [-2, 2]\} \quad (6.2)$$

Yüzeyin tam tepe noktasından noktasal ışık kaynağı kullanılarak aydınlatılması sonucu Şekil 6.15.'teki görüntü elde edilmiştir.



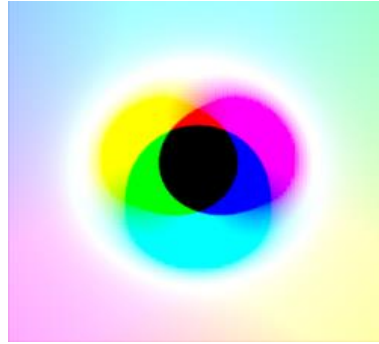
Şekil 6.15. Yüzeyin (Şekil 6.14.) noktasal ışık kaynağı ile tepe noktasından aydınlatılması sonucu oluşan görüntüsü.

Birçok GTŞE algoritması, aydınlatma yönü doğru verildiği halde yüzeyin en çukur noktasında parlaklık arttığından dolayı yüzeyin bu nokta etrafında yükselmeye başladığını varsaymaktadır. Renk bilgisi verilmeksizin Şekil 6.15.'teki görüntü için seçilen beş farklı GTŞE algoritması ve geliştirilen GTŞE algoritmasının ürettiği sonuç yüzeyleri Şekil 6.16.'da gösterilmiştir.



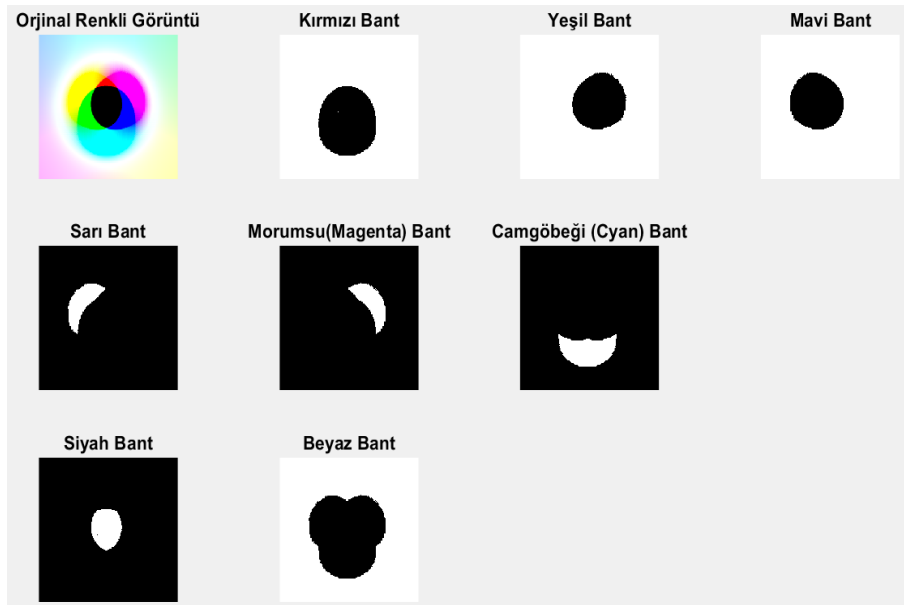
Şekil 6.16. Tek çukur içeren yüzey görüntüsünün 6 farklı GTŞE yöntemine göre oluşturulmuş yüzey şekilleri.

Yukarıdaki sonuçlar gözlemsel olarak değerlendirildiği zaman kullanılan GTŞE algoritmalarının çukur bölgenin merkezindeki parlaklığı bir yükselme olarak değerlendirdiği ve yanlış yüzey ürettikleri anlaşılmaktadır. Şekil 6.14.'de gerçek yüzey şekli ve Şekil 6.15.'te tepe noktasından çekilmiş gri-seviye görüntüsü verilen yüzey için 3B modelleme ortamında kırmızı, yeşil ve mavi renkte aydınlatmalarla elde edilen renk yansımaları görüntüsü Şekil 6.17.'te verilmiştir.



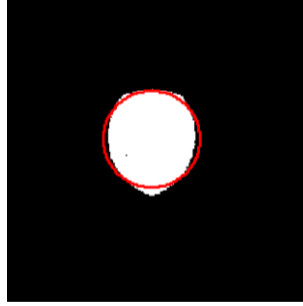
Şekil 6.17. Tek çukur içeren yüzeyin kırmızı, yeşil ve mavi renk ile aynı anda aydınlatılmış görüntüsü.

Yukarıdaki kırmızı, yeşil ve mavi renkte aydınlatmalar ile aynı anda aydınlatılmış görüntünün geliştirilen uygulama içerisinde renk bantlarına ayrıştırılmış görüntüleri Şekil 6.18.'de gösterilmiştir.



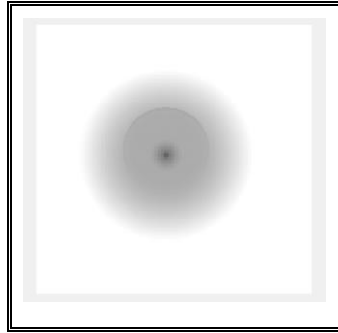
Şekil 6.18. Kırmızı, yeşil ve mavi renklerle aydınlatılan yüzey görüntüsünün (Şekil 6.14.) renk bantlarına ayrıştırılması.

Geliştirilen renk işleme algoritması siyah renk bant bilgisini kullanarak çukur bölgeyi kolaylıkla tespit edebilmektedir. Şekil 6.19.'da siyah çukur bölgenin analizi gösterilmiştir.



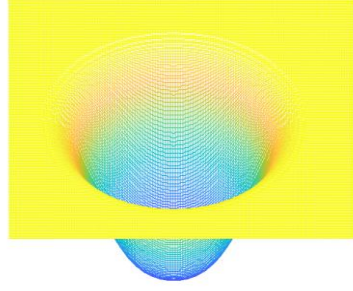
Şekil 6.19. Siyah renge göre çukur bölge analizi.

Renk bantlarına göre ayrıştırılan görüntü üzerindeki çukur ve parlak bölgelerin yeni gri seviye tahmini değerleri hesaplanmakta ve GTŞE algoritmasına bilgi olarak verilmektedir. Şekil 6.20.'de tahmini gri seviye görüntü oluşturulmuştur.



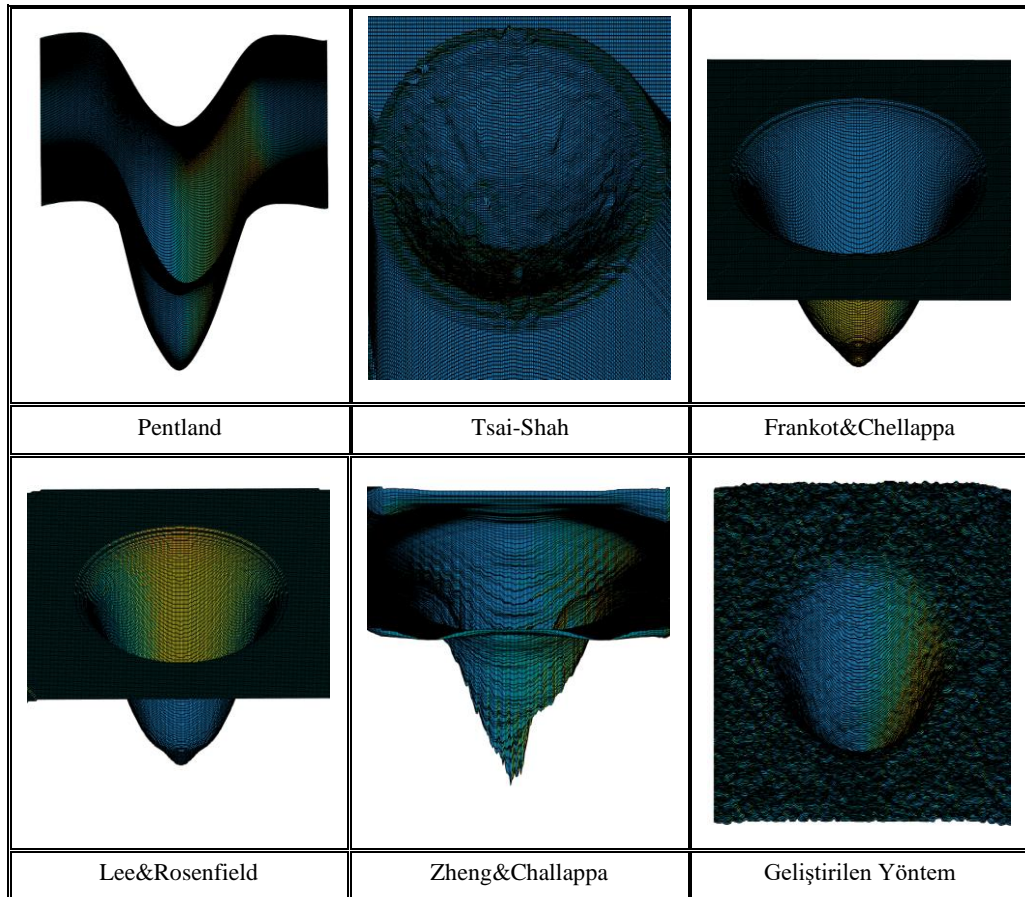
Şekil 6.20. Renk analizi sonrası ayarlanan tahmini parlaklık görüntüsü.

Renk bilgisinin yorumlanması ile yeni oluşan tonlamalara göre üretilen derinlik görüntüsü Şekil 6.21.'de verilmiştir.



Şekil 6.21. Tonlamaların ayarlanması sonucu yeni parlaklık değerlerine göre oluşan yüzey.

Şekil 6.15.'de verilen görüntü için Şekil 6.16.'da hatalı yüzeyler üreten seçilen 5 GTŞE algoritmasının ve geliştirilen algoritmanın aynı yüzey için geliştirilen renk algoritmasını kullanarak oluşturdukları yeni yüzeyler Şekil 6.22.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Renk analizi yapıldıktan sonra 6 farklı GTŞE yöntemine göre tahmin edilen yeni yüzey şekilleri.

Algoritmaların çukur bölgenin merkezindeki tonlamaları yükselme olarak algılamasıyla hatalı ürettikleri yüzey şekilleri geliştirilen renk algoritması kullanılarak iyileştirilmiştir. Renk bantlarının analizi ile renkli aydınlatma kaynaklarının konumları bilindiğinden dolayı yüzey noktalarının yönelimleri kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Renk yansımalarını işleme adımları şu şekilde özetlenebilir:

Renk yansımaları görüntüsü analiz edilerek yüzey renk bantlarına ayrıştırılır. Renk desenlerini ve aydınlatma yönlerini kullanarak piksellere ait yüzey noktasının yönü belirlenir. Siyah bölgeler tespit edilerek bu bölgelerin (çukur olarak yorumlanmaktadır) merkez ve yarıçap büyüklüğü hesaplanır. Siyah bölgedeki en dış sınır piksellerin gri seviye değerleri hesaplanır. Siyah bölgede bulunan pikseller çevre piksellerin minimum değerinin üzerinde ise bu bölgenin çukur olduğu varsayımından dolayı derinlik değeri komşu pikseller ile arasındaki fark hesaplanarak komşu piksellerin altına düşürülür.

3B modelleme ortamında hazırlanan yukarıdaki sistem kullanılarak yüzeylerin iç bükey-dış bükey olma belirsizliğine bir çözüm önerisi sunulmuştur. Belirli bir yükseklikte ve konumda 3 farklı renk ile aydınlatılan yüzeyin gri seviye ve renk yansımaları görüntüleri doğru bir şekilde yorumlandığında çukur, tümsek ve eğimli bölgeler aydınlatma yönünden bağımsız olarak daha doğru tahmin edilmiştir. Beş adet seçilen GTŞE algoritması ve detayları 3.Bölüm'de anlatılan geliştirilen algoritma, önce renk yansımaları bilgisi olmaksızın seçilen sentetik yüzeye uygulanmış ardından geliştirilen renk yansımaları algoritması ile birlikte tekrar aynı yüzey için uygulanarak sonuçları karşılaştırılmıştır. Geliştirilen yöntem, GTŞE algoritmalarının yüzey üzerindeki yönelimleri doğru hesaplamalarını ve gerçek yüzeye daha yakınsak yüzeyler üretmelerini sağlamıştır.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Gri seviye bir görüntüden nesnelerin yüzey derinlik haritalarını tahmin eden ve bu bilgiyi, metalik endüstriyel parçalarının kusur tespitinde kullanan bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Görüntüdeki sahnenin 3B derinlik bilgisinin elde edilmesi için GTŞE yöntemi tercih edilmiş ve literatürde sıklıkla kullanılan GTŞE yöntemlerinden olan Tsai-Shah ve Pentland algoritmaları temel alınarak bu algoritmaları iyileştiren ve nesnenin 3B şeklinin tahmin edilmesindeki bozulmaları önleyen numerik gradyanların Fourier dönüşümünü esas alan karma bir yöntem önerilmiştir. Geliştirilen GTŞE algoritması, 3 adet fonksiyonel olarak üretilebilen farklı boyutlarda yüzeyler ve 3B oluşturma çalışmalarında kullanılan çeşitli veri setlerinden alınan görüntüler kullanılarak Pentland ve Tsai-Shah algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Algoritmaların sentetik yüzeyler için elde ettiği derinlik haritaları ve gri seviye görüntüleri karşılaştırmak için literatürde sıklıkla kullanılan 5 farklı metrik uygulanmıştır. Bu metrikler ortalama mutlak sapma (MAD), ortalama karesel hata (MSE), Öklid norm (L2), tepe sinyal-gürültü oranı (PSNR) ve yapısal benzerlik indeksi (SSIM) metrikleridir. MAD, MSE ve L2 metrikleri tahmin edilen ve gerçek değerler arasındaki hata oranının ölçülmesinde, PSNR ve SSIM metrikleri ise algoritmaların ürettikleri gri seviye görüntüler ile gerçek gri seviye görüntüler arasındaki benzerlik oranının tahmin edilmesinde kullanılmıştır. Değerlendirme sonuçlarına göre fonksiyonel üretilen yüzeylerde %93,3 başarımla, veri setlerinden seçilen görüntüler üzerinde ise %88,8 başarımla elde edilmiştir. Karşılaştırma sonuçları tablolarda detaylı bir şekilde sunulmuştur. Ayrıca algoritmalar için gerekli çalışma süreleri ve CPU sürelerine de değinilmiştir. Fourier dönüşümü uygulanmış görüntü merkezi gradyanlarının kullanılması ile Tsai-Shah algoritmasının başlangıçta sıfır varsayılan ilk adımını değiştirerek 3B oluşum iyileştirilmiş ve algoritmaların farklı koşullar altında şekil tahmin etmeleri için iyi bir ön bilgi sunulmuştur. Birkaç iterasyon sonrasında önerilen yöntemin 3B şekile daha iyi yakınsadığı ve şekil yüzeyindeki bozulmaları azalttığı gözlemlenmiştir.

Geliştirilen algoritma tezin ikinci aşamasında endüstriyel bir problem olan metalik parçaların kusur tespiti probleminde kullanılmak üzere özelleştirilmiştir. TÜBİTAK destekli proje kapsamında proje ekibince bir görüntü alma sistemi geliştirilmiş ve detayları tez içerisinde sunulmuştur. Bu özel tasarım sistemden çizgi taramalı kamera ile elde edilen nesne görüntüleri, geliştirilen 3B oluşturma algoritması başta olmak üzere GTŞE algoritmaları ile işlenmiş ve derinlik haritaları elde edilmiştir. Ardından bu derinlik haritalarına ön işleme ve morfolojik işlem adımları uygulanarak kusur yerleri belirlenmiş ve görüntü üzerinde işaretlenmiştir. Ayrıca donanım ve yazılımın senkronizasyonunu sağlayan, görüntü alma, görüntüyü işleme, kusur yerlerini işaretleme adımlarını gerçekleştiren ve sonuç görüntüsünü detaylı olarak inceleyebilmek üzere kullanıcıya sunan bir arayüz geliştirilmiştir. Geliştirilen sistem kullanılarak yüksek yansıtıcı metal ürünlerin henüz üretim bandındayken yüzey kalite kontrolü gerçekleştirilebilir ve ürünün sağlam veya ıskarta olma kararı yaklaşık 6 saniye ve daha düşük süreler içerisinde verilebilir. Proje kapsamında metal yüzeyler için geliştirilen sistem, uygun aydınlatma koşulları altında parametrik değerleri düzenlenerek farklı türde materyaller için de yüzey kalite kontrolü amacıyla kullanılabilir. Işık yansımalarını önleyen daha gelişmiş aydınlatma sistemleri kullanılarak parça yüzeyinin daha hassas görüntüleri elde edilebilir ve yüzey kontrol sisteminin farklı çevresel koşullar altındaki başarımları artırılabilir. GTŞE yöntemleri genellikle tek bir görüntü üzerinden 3B şekil elde etmeye çalışır. Bu nedenle kalite kontrolü gerçekleştirilecek ürün üzerinde olası boya vb. lekelerin mevcut olduğu durumlarda lekeli bölgeler tümsek veya çukur gibi algılanabilir. Ürünün farklı yönlerden görüntülerinin de alınmasıyla ve Fotometrik Stereo gibi farklı 3B şekil elde etme yöntemleri ile birleştirilerek ürün üzerindeki istenmeyen boya lekeleri gibi kusur dışı istenmeyen durumlar da tespit edilebilir. Ayrıca 6. Bölümde anlatılan bir sistem kullanılarak farklı bantlarda aydınlatılan yüzey üzerinde yansımalar engellendiğinde yüzey yönelimleri doğru analiz edilebilir.

Tez çalışmasının son aşamasında ise GTŞE yöntemlerinin başlıca problemlerinden biri olan içbükey-dışbükey olma belirsizliği problemi ele alınmıştır. 3B modelleme ortamında üretilen sentetik, beyaz ve mat yüzeyler; kırmızı, yeşil ve mavi renklerde 3 farklı aydınlatma ile eş zamanlı olarak aydınlatılmış ve yüzey üzerinde oluşan renk

desenleri analiz edilerek yüzeyin aydınlatma yönünden bağımsız olarak çukur ve tümsek bölgelerinin doğru analiz edilmesi sağlanmıştır. Yüzeyin tam tepe noktasından beyaz renkte aydınlatılmış görüntüsü, giriş görüntüsü olarak literatürdeki temel 5 farklı GTŞE algoritmasına ve tez kapsamında geliştirilen doğrusallaştırma tabanlı algoritmaya verilerek algoritmaların yüzey şeklini tahmin etmeleri sağlanmıştır. Aydınlatma yönü ve tonlamadan dolayı 6 GTŞE algoritmasının başlangıçta hatalı ürettiği yüzey şekilleri geliştirilen renk yansımalarını işleyen algoritmanın kullanılması ile iyileştirilmiş ve aydınlatma yönünden bağımsız olarak algoritmaların daha doğru bir yüzey tahmini yapmaları sağlanmıştır. Renk yansımaları işlenirken mat ve beyaz renkte yüzey varsayımları yapılmıştır. Metal benzeri yansıtıcılığı yüksek olan yüzeyler için renklerin yansımalarından dolayı oluşabilecek karmaşık görüntüler incelenmiş ve yansılardan dolayı yeterli başarımlar elde edilememiştir. Sonraki çalışmalarda yansımaların engellenmesi, algoritmada yapılacak iyileştirmeler ve incelenecek yüzeye göre özelleştirmeler ile geliştirilen algoritmanın metal vb. farklı özellikte parça ve yüzeyler için de kullanılabilir olması sağlanabilir. Bu şekilde bir sistem tasarımı yansımalar uygun bir şekilde önlendiği zaman öncelikle kusur tespit sistemleri ve yüzey analizi çalışmaları olmak üzere birçok alanda kullanılabilir olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Prince, S. J., Computer vision: models, learning, and inference. Cambridge University Press, 2012.
- [2] Solem, J. E., Programming Computer Vision with Python: Tools and algorithms for analyzing images, O'Reilly Media, Inc, 2012.
- [3] Szeliski, R., Computer vision: algorithms and applications. Springer Science and Business Media, 2010.
- [4] Forsyth, D. A., Ponce, J., Computer vision: a modern approach. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
- [5] Cryer, J. E., Tsai, P., Shah, M., Combining shape from shading and stereo using human visual model. UCF Technical Report, Florida, 1992.
- [6] Negahdaripour, S., Revised definition of optical flow: Integration of radiometric and geometric cues for dynamic scene analysis. IEEE T. Pattern Anal., 20(9), 961-979,1998.
- [7] Kotan, M., Öz, C., Surface inspection system for industrial components based on shape from shading minimization approach. Opt. Eng., 56(12), 2017.
- [8] Horn, B.K.P., Shape from Shading: A Method for Obtaining the Shape of a Smooth Opaque Object from One View. Massachusetts Institute of Technology, 1970.
- [9] Prados, E., Faugeras, O., Shape From Shading. İçinde: Handbook of Mathematical Models in Computer Vision, Springer, 375–388, 2006.
- [10] Tsai, P. S., Shah, M., Shape from shading using linear approximation. Image Vision Comput., 12(8), 487–498, 1994.
- [11] Pentland, A., Shape information from shading: a theory about human perception. Spatial vision, 4(2-3), 165-182, 1989.

- [12] Zhang, R., Tsai, P. S., Cryer, J. E., Shah, M., Shape-from-shading: a survey. *IEEE T. Pattern Anal.*, 21(8), 690-706, 1999.
- [13] Durou, J. D., Falcone, M., Sagona, M., Numerical methods for shape-from-shading: A new survey with benchmarks. *Comput. Vis. Image Und.*, 109(1), 22-43, 2008.
- [14] Suri, J. S., Wilson, D., Laxminarayan, S., *Handbook of biomedical image analysis (Vol. 1)*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [15] Xiong, Y., Chakrabarti, A., Basri, R., Gortler, S. J., Jacobs, D. W., ve Zickler, T., *From Shading to Local Shape*, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2014.
- [16] Grosse, R., Johnson, M. K., Adelson, E. H., ve Freeman, W. T., Ground truth dataset and baseline evaluations for intrinsic image algorithms, *Proceedings of the International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 2009.
- [17] Elhabian, S. Y., *Hands on shape from shading*. Computer Vision and Image Processing (CVIP) Laboratory, University of Louisville, Louisville, Teknik Rapor No. SFS08, 2008.
- [18] Worthington, P. L., Hancock, E. R., Surface topography using shape-from-shading. *Pattern Recogn.*, 34(4), 823-840, 2001.
- [19] Bors, A. G., Hancock, E. R., Wilson, R. C., Terrain analysis using radar shape-from-shading. *IEEE T. Pattern Anal.*, 25(8), 974-992, 2003.
- [20] Wu, B., Liu, W. C., Grumpe, A., Wöhler, C., Shape and albedo from shading (SAfS) for pixel-level DEM generation from monocular images constrained by low-resolution DEM. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, ISPRS Archives.*, Temmuz, 41, 521–527, 2016.
- [21] Wilson, R. C., Hancock, E. R., A radar reflectance model for terrain analysis using shape from shading. *10th International Conference on Image Analysis and Processing, IEEE*, 868-873, 1999.
- [22] Hashemi, L., Azizi, A., Hashemi, M. H., Implementation of a single photo shape from shading method for the automatic DTM generation. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, ISPRS Archives*, 34(3/B), 71-74, 2002.

- [23] Cadavid, S., Abdel-Mottaleb, M., 3-D ear modeling and recognition from video sequences using shape from shading. *IEEE T. Inf. Foren. Sec.*, 3(4), 709-718, 2008.
- [24] Wu, J., Smith, W. A., Hancock, E. R. (2007). Gender Classification using Shape from Shading. *BMVC 2007 Bildiriler Kitabı*, 1-10, 2007.
- [25] Kemelmacher-Shlizerman, I., Basri, R., 3D face reconstruction from a single image using a single reference face shape. *IEEE T. Pattern Anal.*, 33(2), 394-405, 2010.
- [26] Kong, F. H., A new method of inspection based on shape from shading. 2008 Congress on Image and Signal Processing, 2, 291-294, IEEE, Mayıs, 2008.
- [27] Yamany, S. M., Farag, A. A., A system for human jaw modeling using intra-oral images. 20th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society Bildiriler Vol. 20, Biomedical Engineering Towards the Year 2000 and Beyond, Bildiriler Kitabı, Hong Kong, China, 2, 563-566. 1998.
- [28] Ciaccio, E. J., Bhagat, G., Lewis, S. K., Green, P. H., Use of shape-from-shading to characterize mucosal topography in celiac disease videocapsule images. *World journal of gastrointestinal endoscopy*, 9(7), 310, 2017.
- [29] Suri, J. S., Wilson, D., Laxminarayan, S., *Handbook of biomedical image analysis (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [30] Karaman, M., İki boyutlu görüntülerden üç boyutlu şekil elde etme. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2009.
- [31] Ikeuchi, K., Horn, B. K., Numerical shape from shading and occluding boundaries. *Artif. Intell.*, 17(1-3), 141-184, 1981.
- [32] Brooks, M. J., Horn, B. K., Shape and source from shading. In *Proceedings of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 932-936, 1985.
- [33] Frankot, R. T., Chellappa, R., A method for enforcing integrability in shape from shading algorithms. *IEEE T. Pattern Anal.*, 10(4), 439-451, 1988.
- [34] Horn, B. K., Height and gradient from shading. *Int. J. Comput. Vision*, 5(1), 37-75, 1990.
- [35] Szeliski, R., Fast shape from shading. *Computer Vision, Graphics, Image Processing: Image Understanding*, 53(2), 129-153, 1991.

- [36] Zheng, Q., Chellappa, R., Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading. *IEEE T. Pattern Anal.*, 13(7), 680-702, 1991.
- [37] Oliensis, J., Shape from shading as a partially well-constrained problem. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing: Image Understanding*, 54, 163-183, 1991.
- [38] Dupuis, P., Oliensis, J., Direct method for reconstructing shape from shading. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 453-454, 1992.
- [39] Oliensis, J., & Dupuis, P., A global algorithm for shape from shading. *4th International Conference on Computer Vision*, IEEE, 692-701, 1993.
- [40] Pentland, A. P., Local shading analysis. *IEEE T. Pattern Anal.*, (2), 170-187, 1984.
- [41] Lee, C. H., Rosenfeld, A., Improved methods of estimating shape from shading using the light source coordinate system. *Artif. Intell.*, 26(2), 125-143, 1985.
- [42] Vogel, O., Valgaerts, L., Breuß, M., Weickert, J., Making shape from shading work for real-world images. *Joint Pattern Recognition Symposium*, Springer, Berlin, Heidelberg, 191-200, 2009.
- [43] Barron, J. T., Malik, J., High-frequency shape and albedo from shading using natural image statistics. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2521–2528, 2011.
- [44] Lee, K. M., Kuo, C. C. J., Shape from shading with a generalized reflectance map model. *Comput. Vis. Image Und.*, 67(2), 143-160, 1997.
- [45] Yang, Z. M., Zhao, H. D., A new RBF reflection model for shape from shading. *3D Research*, 8(3), 33, 2017.
- [46] Tankus, A., Sochen, N., Yeshurun, Y., Shape-from-shading under perspective projection. *Int. J. Comput. Vision*, 63(1), 21-43, 2005.
- [47] Hasegawa, J. K., Tozzi, C. L., Shepe from Shading with perspective projection and camera calibration. *Comput. Graph.*, 20(3), 351-364, 1996.
- [48] Abada, L., Aouat, S., Tabu search to solve the shape from shading ambiguity. *Int. J. Artif. Intell. T.*, 24(05), 2015.

- [49] Abada, L., Aouat, S., Improved shape from shading without initial information. *Front. Comput. Sci-Chi.*, 11(2), 320-331, 2017.
- [50] Haines, T. S., Wilson, R. C., Integrating stereo with shape-from-shading derived orientation information. *British Machine Vision Conference*, 2, 910-919, 2007.
- [51] Mostafa, M. H., Yamany, S. M., Farag, A. A., Integrating stereo and shape from shading. *International Conference on Image Processing, IEEE*, 3, 130-134, 1999.
- [52] Sakarya, U., Erkmen, İ., An improved method of photometric stereo using local shape from shading. *Image Vision Comput.*, 21(11), 941-954, 2003.
- [53] Jiang, T., Liu, B., Lu, Y., Evans, D., A neural network approach to shape from shading. *Inter. J. Comput. Math.*, 80(4), 433-439, 2003.
- [54] Ben-Arie, J., Nandy, D., A neural network approach for reconstructing surface shape from shading. *International Conference on Image Processing. ICIP98*, 2, 972-976, 1998.
- [55] Saito, H., Usami, K., Shape from shading using genetic algorithm. *IECON'93-19th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 1620-1625, 1993.
- [56] Zhi-Ming, C., Jian-Zhong, C., Jin-Qiu, H., A novel 3D reconstruction algorithm based on hybrid immune particle swarm optimization. *29th Chinese Control Conference-CCC'10*, 2010.
- [57] Ma, J., Zhao, P., Gong, B., A shape-from-shading method based on surface reflectance component estimation. *9th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, 1690-1693, 2012.
- [58] Yang, D., Deng, J., Shape from shading through shape evolution. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE*, 3781-3790, 2018.
- [59] Eigen, D., Puhrsch, C., Fergus, R., Depth map prediction from a single image using a multi-scale deep network. *Adv. Neur. In.*, 2366-2374, 2014.
- [60] Tankus, A., Sochen, N., Yeshurun, Y., Perspective shape-from-shading by fast marching. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition-CVPR*, (1), 43-49, 2004.

- [61] Gallen, R., Eastop, D., Bozia, E., Barmpoutis, A., Digital imaging: the application of shape-from-shading to lace, seals and metal objects. *Journal of the Institute of Conservation*, 38(1), 41-53, 2015.
- [62] Ciaccio, E. J., Tennyson, C. A., Bhagat, G., Lewis, S. K., Green, P. H., Use of shape-from-shading to estimate three-dimensional architecture in the small intestinal lumen of celiac and control patients. *Comput. Meth. Prog. Bio.*, 111(3), 676-684, 2013.
- [63] Han, F., Zhu, S. C., Cloth representation by shape from shading with shading primitives. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition -CVPR'05(1)*, 1203-1210, 2005.
- [64] Jiang, L., Zhang, J., Deng, B., Li, H., Liu, L., 3d face reconstruction with geometry details from a single image. *IEEE T. Image Processing*, 27(10), 4756-4770, 2018.
- [65] Kazmi, I. K., You, L., Zhang, J. J., A hybrid approach for character modeling using geometric primitives and shape-from-shading algorithm. *Journal of Computational Design and Engineering*, 3(2), 121-131, 2016.
- [66] Snape, P., A study of statistical methods for facial shape-from-shading, Bireysel Rapor, Imperial Collage London, 2012
- [67] Salary, R. R., Lombardi, J. P., Rao, P. K., Poliks, M. D., Online monitoring of functional electrical properties in aerosol jet printing additive manufacturing process using shape-from-shading image analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139(10), 2017.
- [68] Pradhan, R., Ghose, M. K., Jeyaram, A., Extraction of depth elevation model (DEM) from high resolution satellite imagery using shape from shading approach. *International Journal of Computer Applications*, 7(12), 40-46, 2010.
- [69] Ghayourmanesh, S., Zahng, Y., Shape from shading of SAR imagery in fourier space. In *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 835-837, 2007.
- [70] Fanany, M. I., Kumazawa, I., A neural network for recovering 3D shape from erroneous and few depth maps of shaded images. *Pattern Recogn. Lett.*, 25(4), 377-389, 2004.
- [71] Lu, J., Zhang, S., Shi, L., Hou, D., Wang, X., Automatic correction of the adverse effects of light on fruit surfaces using the shape-from-shading method. *Czech J. Food Sci.*, 36(1), 37-43, 2018.

- [72] Turan, M., Almalioglu, Y., Araujo, H., Konukoglu, E., Sitti, M., A non-rigid map fusion-based direct SLAM method for endoscopic capsule robots. *International journal of intelligent robotics and applications*, 1(4), 399-409, 2017.
- [73] Zhang, S., Negahdaripour, S., Recovery of 3D depth map from image shading for underwater applications. *Oceans' 97. MTS/IEEE Conference Proceedings, IEEE*, 1, 618-625, 1997.
- [74] Fanany, M. I., Ohno, M., Kumazawa, I., A scheme for reconstructing face from shading using smooth projected polygon representation NN. *International Conference on Image Processing*, 2, 305–308, 2002.
- [75] Turan, M., Almalioglu, Y., Gilbert, H., Araujo, H., Konukoglu, E., Sitti, M., Magnetic-visual sensor fusion based medical SLAM for endoscopic capsule robot. *arXiv preprint arXiv:1705.06196*, 2017.
- [76] Wang, C., Wang, C., Qin, H., & Zhang, T. Y. (2017). Video-based fluid reconstruction and its coupling with SPH simulation. *The Visual Computer*, 33(9), 1211-1224, 2017.
- [77] Yang, L., Li, E., Long, T., Fan, J., Mao, Y., Fang, Z., Liang, Z., A welding quality detection method for arc welding robot based on 3D reconstruction with SFS algorithm. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 94(1-4), 1209-1220, 2018.
- [78] Kumar, S., Kumar, M., Application of neural network in integration of shape from shading and stereo. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 24(2), 129-136, 2012.
- [79] Zeng, G., Matsushita, Y., Quan, L., Shum, H. Y., Interactive shape from shading. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05)*, 1, 343-350, 2005.
- [80] Martínez, G., Frerichs, J. G., Joeris, K., Konstantinov, K., Scheper, T., Three-Dimensional Shape Estimation of BHK Cell Clusters from a Still Image Based on Shape from Shading for In-SITU Microscopy. *IEEE International Conference on Acoustics Speech and Signal Processing Proceedings, IEEE*, 2, 581–584, 2006.
- [81] Worthington, P. L., Hancock, E. R., New constraints on data-closeness and needle map consistency for shape-from-shading. *IEEE T. Pattern Anal.*, 21(12), 1250-1267, 1999.
- [82] Huang, S. H., Pan, Y. C., Automated visual inspection in the semiconductor industry: A survey. *Comput. Ind.*, 66, 1-10, 2015.

- [83] Tao, X., Zhang, D., Ma, W., Liu, X., Xu, D., Automatic metallic surface defect detection and recognition with convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 8(9), 1575, 2018.
- [84] Pishyar, E., Emadi, M., Investigation of different algorithms for surface defects of steel sheet for quality. *International Journal of Computer Applications*, 149(6), 33-37, 2016.
- [85] Deshmukh, R. S., Deshmukh, P. R., Taley, A. M., Comparison analysis for efficient defect detection algorithm for gray level digital images using median filters Gabor filter and ICA. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2(1), 2012.
- [86] Jonker, P. P., Duin, R. P., de Ridder, D., Pattern recognition for metal defect detection. *Steel Grips*, 1(1), 20-23, 2003.
- [87] Choi, S. H., Yun, J. P., Seo, B., Park, Y. S., Kim, S. W., Real-time defects detection algorithm for high-speed steel bar in coil. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 21, 1307-6884, 2007.
- [88] Morala-Argueello, P., Alegre, E., Suarez, S., Gonzalez-Castro, V., Qualitive surface roughness evaluation using haralick features and wavelet transform. *Annals of DAAAM & Proceedings*, 20(1), 2009.
- [89] Wang, Z., Xing, Q., Fu, L., Sun, H., Realtime vision-based surface defect inspection of steel balls. *Transactions of Tianjin University*, 21(1), 76-82, 2015.
- [90] Senthikumar, M., Palanisamy, V., Jaya, J., Metal surface defect detection using iterative thresholding technique. *Second International Conference on Current Trends In Engineering and Technology-ICCTET 2014*, IEEE, 561-564, 2014.
- [91] Raheja, J. L., Kumar, S., Chaudhary, A., Fabric defect detection based on GLCM and Gabor filter: A comparison. *Optik*, 124(23), 6469-6474, 2013.
- [92] Aarthi, T., Karthi, M., Abinesh, M., Detection and analysis of surface defects in metals using wavelet transform. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(6), 147-158, 2013.
- [93] Sivabalan, K. N., Gnanadurai, D., Efficient defect detection algorithm for gray level digital images using Gabor wavelet filter and Gaussian filter. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 3(4), 3195-3202, 2011.

- [94] Choi, D., Jeon, Y. J., Yun, J. P., An Algorithm for detecting seam cracks in steel plates, *Word Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.6, pp. 1478-1481, December 2012.
- [95] Rahaman, G. M., Hossain, M., Automatic defect detection and classification technique from image: a special case using ceramic tiles. *International Journal of Computer Science and Information Security*, 1(1), 2009.
- [96] Wang, C., Guan, S., Li, W., Hong, B., Liang, H., Surface Defect Detection Method of Mechanical Parts Based on Target Feature. 6th International Conference on Mechatronics, Materials, Biotechnology and Environment (ICMMBE 2016), Atlantis Press, 2016.
- [97] Malekian, V., Amirfattahi, R., Rezaeian, M., Aghaei, A., Rahimi, P., Automatic detection and localization of surface cracks in continuously cast hot steel slabs using digital image analysis techniques. *International Journal of Iron & Steel Society of Iran*, 9(1), 30-40, 2012.
- [98] Sárosi, Z., Knapp, W., Kunz, A., Wegener, K., Detection of surface defects on sheet metal parts by using one-shot deflectometry in the infrared range. *Infrared Camera Applications Conference 2010*, 243-254, ETH Zurich, IWF, 2010.
- [99] Sharma, V., Thind, T., Techniques for detection of rusting of metals using image processing: A survey. *International Journal of Emerging Science and Engineering*, 1, 60-62, 2013.
- [100] Zheng, H., Kong, L. X., & Nahavandi, S., Automatic inspection of metallic surface defects using genetic algorithms. *J. Mater. Process. Tech.*, 125, 427-433, 2002.
- [101] Lohade, D.M., & Chopade, P.B., Metal Inspection for Surface defect Detection by Image Thresholding. *Special Issue on International Journal of Electrical, Electronics and Computer Systems*, 2016.
- [102] Luiz, A. M., Flávio, L. P., Paulo, E. A., Automatic detection of surface defects on rolled steel using computer vision and artificial neural networks. *IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, IEEE*, 1081-1086, 2010.
- [103] Pernkopf, F., O'Leary, P., Image acquisition techniques for automatic visual inspection of metallic surfaces. *NDT & E International*, 36(8), 609-617, 2003.
- [104] Luo, Q., He, Y., A cost-effective and automatic surface defect inspection system for hot-rolled flat steel. *Robot. Cim-Int. Manuf.*, 38, 16-30, 2016.

- [105] Yuan, X. C., Wu, L. S., Peng, Q., An improved Otsu method using the weighted object variance for defect detection. *Appl. Surf. Sci.*, 349, 472-484, 2015.
- [106] Shen, H., Li, S., Gu, D., Chang, H., Bearing defect inspection based on machine vision. *Measurement*, 45(4), 719-733, 2012.
- [107] Tikhe, C., Chitode, J. S., Metal surface inspection for defect detection and classification using Gabor filter. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3, 13702, 2014.
- [108] Sadeghi, M., Memarzadehzavareh, F., Flaws detection in steel plates using Gabor wavelet. *Life Science Journal*, 10(2s), 352-355, 2013.
- [109] Natarajan, V., Hung, T. Y., Vaikundam, S., Chia, L. T., Convolutional networks for voting-based anomaly classification in metal surface inspection. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, IEEE, Toronto, Kanada, 986-991, 2017.
- [110] Wang, T., Chen, Y., Qiao, M., Snoussi, H., A fast and robust convolutional neural network-based defect detection model in product quality control. *The Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 94(9-12), 3465-3471, 2018.
- [111] Cha, Y. J., Choi, W., Suh, G., Mahmoudkhani, S., Büyüköztürk, O., Autonomous structural visual inspection using region-based deep learning for detecting multiple damage types. *Comput-Aided Civ. Inf.*, 33(9), 731-747, 2018.
- [112] Landstrom, A., Thurley, M. J., Jonsson, H., Sub-millimeter crack detection in casted steel using color photometric stereo. *International Conference on Digital Image Computing: Techniques and Applications (DICTA)*, IEEE, 1-7, 2013.
- [113] Kang, D., Jang, Y. J., Won, S., Development of an inspection system for planar steel surface using multispectral photometric stereo. *Opt. Eng.*, 52(3), 039701, 2013.
- [114] Quanying, D., Shanben, C., Tao, L., Inspection of weld shape based on the shape from shading. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 27(7-8), 667-671, 2006.
- [115] Podrekar, G., Tomažević, D., Likar, B., Usenik, P., Model based visual inspection of pharmaceutical tablets with photometric stereo. *Fifteenth IAPR International Conference on Machine Vision Applications (MVA)*, IEEE, 133-136, 2017.

- [116] Nicodemus, F., Richmond, J., Hsia, J., Ginsberg, I., Limperis, T., Geometric considerations and nomenclature for reflectance. Monograph 160, National Bureau of Standards (US), Washington, 1977.
- [117] Kurt, M., Bilgisayar grafiklerinde yeni bir ışıklandırma modeli. Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uluslararası Bilgisayar Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2007.
- [118] homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/MARBLE. Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- [119] Hu, Q., Shou, Z., He, L., Cai, Q., Qu, M., Zhang, Y., Three-dimensional characterization method of pile–rock interface roughness based on fractal geometry. *Arab. J. Geosci.*, 12(18), 599, 2019.
- [120] MATLAB, Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.
- [121] Yuen, S. Y., Tsui, Y. Y., Chow, C. K., A fast marching formulation of perspective shape from shading under frontal illumination. *Pattern Recogn. Lett.*, 28(7), 806-824, 2007.
- [122] Tozza, S., Falcone, M., Analysis and approximation of some shape-from-shading models for non-Lambertian surfaces. *J. Math. Imaging Vis.*, 55(2), 153-178, 2016.
- [123] Quéau, Y., Durou, J. D., Aujol, J. F., Variational methods for normal integration. *J. Math. Imaging Vis.*, 60(4), 609-632., 2018.
- [124] Ascher, U. M., Carter, P. M., A multigrid method for shape from shading. *SIAM J. Numer. Anal.*, 30(1), 102-115, 1993.
- [125] Breuß, M., Cristiani, E., Durou, J. D., Falcone, M., Vogel, O., Numerical algorithms for perspective shape from shading. *Kybernetika*, 2, 2009.
- [126] www.cengizmakina.com.tr/teknoloji/urunler. Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- [127] www.mathworks.com/help/images/morphological-dilation-and-erosion.html. Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- [128] www.mathworks.com/help/images/structuring-elements.html. Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- [129] <https://www.mathworks.com/help/images/ref/strel.html>. Erişim Tarihi: 31.01.2020.

- [130] <https://azureforeducation.microsoft.com/devtools>. Erişim Tarihi: 31.01.2020.
- [131] Huang, R., Shape from Shading under Relaxed Assumptions. University of York, Department of Computer Science, Doktora Tezi, 2012.
- [132] Forsyth, D. A., Variable-source shading analysis. *Int. J. Comput. Vision*, 91(3), 280-302, 2011.
- [133] Forsyth, D., Zisserman, A., Reflections on shading. *IEEE T. Pattern Anal.*, (7), 671-679, 1991.
- [134] Prados, E., Faugeras, O., Shape from shading: a well-posed problem?. *IEEE computer society conference on computer vision and pattern recognition (CVPR'05)*, IEEE, 2, 870-877, 2005.
- [135] Quéau, Y., Mérou, J., Durou, J. D., & Cremers, D., Dense multi-view 3D-reconstruction without dense correspondences. *arXiv preprint arXiv:1704.00337*, 2017.
- [136] Belhumeur, P. N., Kriegman, D. J., Yuille, A. L., The bas-relief ambiguity. *Int. J. Comput. Vision*, 35(1), 33-44, 1999.
- [137] Breuß, M., Cristiani, E., Durou, J. D., Falcone, M., Vogel, O., Perspective shape from shading: Ambiguity analysis and numerical approximations. *SIAM J. Imaging Sci.*, 5(1), 311-342, 2012.
- [138] Zhu, Q., Shi, J., Shape from shading: Recognizing the mountains through a global view. *Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'06)*, IEEE, 2, 1839-1846, 2006.
- [139] Abada, L., Aouat, S., Bourahla, O., Boundary conditions for Shape from Shading. *arXiv preprint arXiv:1607.03289*, 2016.
- [140] <https://www.blender.org>. Erişim Tarihi: 31.01.2020.

ÖZGEÇMİŞ

Muhammed Kotan, 02.02.1989'da Muş'ta doğdu. İlköğretim ve lise eğitimini Muş'ta tamamladı. 2007 yılında başladığı Sakarya Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü'nü 2011 yılında bitirdi. Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisans eğitimine 2011 yılında başladı ve aynı yıl içerisinde Afyon Kocatepe Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2012 yılında Öğretim Üyesi Yetiştirme (ÖYP) programı kapsamında Sakarya Üniversitesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü'ne Araştırma Görevlisi olarak atandı. 2014 yılında yüksek lisans eğitimini tamamlayarak akabinde yine Sakarya Üniversitesi Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Bölümü'nde doktora eğitimine başladı. Halen Sakarya Üniversitesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır.