

**İMGE KIYMETLENDİRMEDE
POLARİZASYON TEKNİKLERİNİN KULLANIMI**

**POLARIZATION TECHNIQUES IN IMAGE
UNDERSTANDING**

MUHAMMET ÖZBAY

YRD. DOÇ. DR. YAKUP ÖZKAZANÇ
Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

2018

Muhammet ÖZBAY'ın hazırladığı "İmge Kıymetlendirmede Polarizasyon Tekniklerinin Kullanımı" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

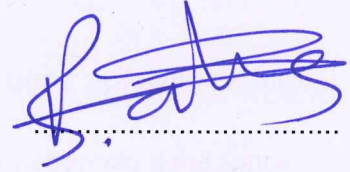
Prof. Dr. Kemal LEBLEBİCİOĞLU
Başkan



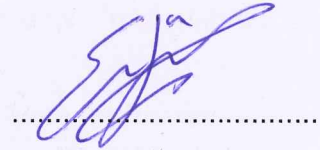
Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ
Danışman



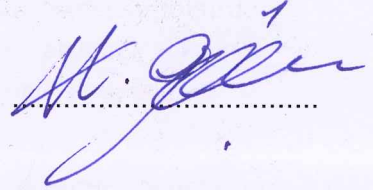
Prof. Dr. Birsen SAKA TANATAR
Üye



Yrd. Doç. Dr. Seniha ESEN YÜKSEL
Üye



Yrd. Doç. Dr. Dinçer GÖKCEN
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kağıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- ☒ **Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**

(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**

(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)

- ☐ **Tezimin/Raporumun tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**

- ☐ **Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

16 / 02 / 2018


(İmza)

Öğrencinin Adı Soyadı

Muhammet ÖZBAY

Her zaman yanımda olan canım aileme...

ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

16 / 02 / 2018



Muhammet ÖZBAY

ÖZET

İMGE KIYMETLENDİRMEDE POLARİZASYONTEKNİKLERİNİN KULLANIMI

Muhammet ÖZBAY

Yüksek Lisans, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

Şubat 2018, 95 sayfa

Polarizasyon, ışığın karakterizasyonu için enerjiye göre daha detaylı fiziksel bir tanımlamadır. Bu nedenle polarize görüntüler geleneksel yöntemle elde edilen görüntülerden daha zengin bilgiler içermektedir. Polarizasyon, çoğu canlı tarafından çıplak gözle fark edilememekte, polarize filtreler gibi ek yardımcı materyaller sayesinde sezimlenebilmektedir.

Polarizasyon üzerinde yapılan ilk bilimsel çalışmalar ise Erasmus Bartholinus (1625-1698) tarafından 1669 yılında kalsit kristali üzerindeki çift kırılma karakteristiğinin ortaya çıkarılması ile başlamıştır. James Clerk Maxwell'in (1831-1879) elektrodinamik teorisi ve on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında Heinrich Hertz'in (1857-1894) gerçekleştirdiği deneysel çalışmalar sayesinde polarizasyon deneylerle de doğrulanmış bir temel üzerine oturtulmuştur.

Polarizasyon görüntüleri, kameraların önüne polarizer konularak basit bir mekanizmayla elde edilebilmektedir. Kameralar vasıtasıyla polarize görüntülerin elde edilebilmesinin kolaylaşması ve polarizasyon ile ilintili görüntülerin geleneksel görüntülerden daha fazla bilgi içermesinden dolayı polarizasyonun bilgisayar görmesinde kullanılması yakın tarihte yaygınlaşmaya başlamıştır. Düz yüzeylerin tespit edilmesi, yüzeylerin yönelme açılarının bulunması, iletken veya yalıtkan

nesnelerin tespiti, görüntülerdeki sis etkisinden dolayı düşen görüş mesafesinin artırılması, derinlik haritalarının oluşturulması, yarı-yansımaların ortadan kaldırılması, görüntülerde nesnelerin kenarlarının bulunması, nesnelerinin 3 boyutlu şekillerinin elde edilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Çalışma kapsamında polarizasyonun tanımının yapıldıktan sonra polarize filtrenin 0° , 45° ve 90° açılarında alınan üç farklı ölçüm kullanılarak Stokes parametreleri ile parametrizasyonunun yapılabileceği gösterilmiştir. Daha sonra polarizasyonun bilgisayar görmesinde kullanımı araştırılmış ve ilgili çalışmalar 4 başlık altında toplanmıştır.

Polarize görüntülerin elde edilebilmesi için bir düzenek oluşturulmuş ve çeşitli saha çalışmaları gerçekleştirilmiştir. İlgili düzenek ile peşi sıra elde edilen polarize görüntülerdeki kaymaların düzeltilmesi için görüntülere imge çakıştırma işlemi uygulanmıştır.

Deneyisel çalışmalarda, ilk olarak polarize görüntüleme üzerinde durulmuş ve polarizasyon ile çeşitli yüzeylerin bölütlenmesi ve görüş mesafesinin artırılması gibi çalışmalar sunulmuştur. Daha sonra saydam ya da yarı saydam yüzeylerde oluşan yansımaların polarizasyon ve bağımsız bileşenler analizi algoritması ile ayrıştırılabileceği gösterilmiştir. İlgili ayrıştırma yönteminin çeşitli senaryolardaki başarımı analiz edilmiştir. Sisten dolayı görüş mesafesinin düştüğü durumlarda polarizasyon ve bağımsız bileşenler algoritması ile görüntülerde netliğin artırılabilceği gösterilmiştir. Bu çalışmaya ek olarak gökyüzü polarizasyon karakteristiği incelenmiştir. Bunun sonucunda, doğrusal polarizasyon derecesi ve açısı bilgilerinin güneşin pozisyonuna bağlı olarak değişimi ortaya konmuştur. Bulutların ise gökyüzünden gelen ışığın polarizasyon derecesini düşürdüğü gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Polarizasyon, Stokes Parametreleri, Polarizasyon Derecesi, Polarizasyon Açısı, İmge Kıymetlendirme, Bilgisayar Görüsü

ABSTRACT

POLARIZATION TECHNIQUES IN IMAGE UNDERSTANDING

Muhammet ÖZBAY

**Master of Science, Department of Electrical and Electronics
Engineering**

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ

February 2018, 95 pages

Polarization provides more detailed description of the light than its energy. For this reason, polarized images contain more information than conventional images. Polarization is not noticeable by the naked eye by most living things, but can be detected by additional auxiliary materials such as polarized filters.

The investigations of polarized light began with the discovery of the phenomenon of double refraction in calcite crystals by Erasmus Bartholinus (1625–1698) in 1669. With foundation of the wave equation by James Clerk Maxwell's (1831–1879) electrodynamic theory and its experimental confirmation by Heinrich Hertz (1857–1894) in the second half of the nineteenth century, polarization has its mathematical bases proven with experiments.

Polarization images can be obtained with a simple mechanism by putting a polarizer in front of the cameras. The use of polarization in computer vision has begun to become widespread in recent years, as the simplicity of obtaining polarized images through cameras and the fact that polarized images contain more information than traditional images. Polarization is used many areas like

detecting flat surfaces, finding surface orientation angles, detecting conductive or insulating objects, increasing the view distance due to the haze effects, creating depth maps, removing semi-reflections in the transparent surfaces, edge detection and constructing 3D shapes of objects.

In this study, after definition of polarization, it has been shown that parameterization can be done with Stokes parameters by using three different measurements taken at 0° , 45° and 90° angles of polarized filter. After that, the use of polarization in computer vision has been investigated and related studies have been collected under four sections.

A test set-up was obtained to take polarized images and various field studies were carried out. An image registration technique has been applied to correct the distortions in the polarized images obtained in a sequential manner with the related test set-up.

In the experimental studies, firstly polarized imaging is emphasized and studies such as segmentation of various surfaces with polarization and increasing of visibility are presented. After that, it has been shown that semi-reflections occurring on transparent or semi-transparent surfaces can be separated by independent components analysis. The performance of the relevant decomposition method has been analysed in various scenarios. It also has been shown that the visibility could be increased by using polarization and independent component analysis when haze occurred in the scene. In addition to this study, the sky polarization characteristics has been investigated. As a result of this, it has been shown that the degree of linear polarization and angle of linear polarization are depend on celestial position of the sun. The degree of linear polarization of a light beam coming from clouds is less than the clear sky.

Keywords: Polarization, Stokes Parameters, Degree of Polarization, Angle of Polarization, Image Enhancement, Computer Vision

TEŞEKKÜR

Bu tezin oluşturulmasında sağladığı katkılardan ötürü tez danışmanım Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKAZANÇ'a teşekkürlerimi sunuyorum. Tez çalışmasında fotoğraf makinasını kullandığım değerli dostum Umut KAYIKCI'ya teşekkür ederim.

Benden sevgilerini esirgemeyen ve bana her zaman destek olan aileme sonsuz teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER TABLOSU

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER TABLOSU	vi
ŞEKİLLER	viii
ÇİZELGELER	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	3
1.2. Tezin Akışı	3
2. POLARİZASYON KAVRAMLARI	4
2.1. Polarizasyon Elipsi	4
2.2. Işığın Polarizasyonunun Değişimi	8
2.2.1. Doğrusal Polarizasyon	11
2.2.2. Eliptik/Dairesel Polarizasyon	11
2.3. Stokes Parametreleri	17
2.3.1. Stokes parametrelerinin türetilmesi	17
2.3.2. Stokes parametrelerinin klasik yöntem ile ölçülmesi	19
2.3.3. Polarizasyonun Stokes parametreleri ile tanımlanması	21
3. BİLGİSAYAR GÖRMESİNDE POLARİZASYON	23
3.1. Bulanıklığın Ortadan Kaldırılması ve Derinlik Haritası	23
3.2. Üç Boyutlu Şekil Elde Etme	27
3.2.1. Tam yansıma durumunda	29
3.2.2. Dağınık yansıma durumunda	30
3.3. Yarı-Yansımaların Birbirinden Ayrılması	30
3.3.1. Korelasyon tabanlı ayırma yöntemi	32
3.3.2. Bağımsız bileşenler analizi ile ayırma yöntemi	33
3.4. Nesne Tespiti	37
3.4.1. Tam yansıma polarizasyonu kullanılarak malzeme tanıma	38
3.4.2. Faz kayması ölçümü ile malzeme tanıma	38
3.4.3. Polarizasyon derecesi ile malzeme tanıma	39

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
4.1. İmge Çakıştırma.....	43
4.1.1. Öznitelik tabanlı	44
4.1.2. Korelasyon tabanlı	46
4.2. Polarize Görüntüleme	47
4.3. Yarı-Yansımaların Ayrıştırılması	52
4.3.1. Bağımsız bileşenler analizi (BBA).....	52
4.3.2. BBA ile yansımaların ayrıştırılması	60
4.4. Sis Etkisinin Ortadan Kaldırılması	74
4.5. Gökyüzü Polarizasyonu	76
4.5.1. Rayleigh gökyüzü modeli.....	76
4.5.2. Gökyüzü polarizasyonu çalışmaları	80
5. SONUÇLAR	88
6. KAYNAKLAR.....	91

ŞEKİLLER

Şekil 1: Polarizasyon elipsi	6
Şekil 2: Örnek elektrik alan bileşenleri.....	7
Şekil 3: Elektrik alan vektör toplamı.....	7
Şekil 4: Apolarize ışık	8
Şekil 5: $\psi = 45$ ile doğrusal polarize ışık.....	8
Şekil 6: Eliptik polarize ışık	8
Şekil 7: Doğrusal polarizasyon genlik değişimi.....	8
Şekil 8: Eliptik polarizasyon genlik değişimi	8
Şekil 9: Sola Eliptik/Dairesel polarizasyon açısı değişimi.....	8
Şekil 10: Referans koordinat sistemi	9
Şekil 11: Işık ve yüzey etkileşimi	9
Şekil 12: Dağıtıcı yüzeyden yansıma [5]	10
Şekil 13: Doğrusal polarize ışık	11
Şekil 14: Birbirine dik iki doğrusal polarizer etkisi.....	11
Şekil 15: Apolarize bir ışığın doğrusal polarize hale getirilmesi.....	12
Şekil 16: Dikey doğrusal polarize ışık.....	12
Şekil 17: Yatay doğrusal polarize ışık.....	12
Şekil 18: Çapraz doğrusal polarize ışık	12
Şekil 19: Apolarize ışığın polarizer filtreler ile filtrelenmesi.....	13
Şekil 20: Faz kaydırıcı kristal.....	15
Şekil 21: Dikey ekseninde bileşeni olan ışığın birefringent malzeme geçmesi.....	16
Şekil 22: Yatay ekseninde bileşeni olan ışığın birefringent malzeme geçmesi.....	16
Şekil 23: Polarizasyon elipsi	19
Şekil 24: Polarize filtre açısına göre piksel enerjisi [15].	24
Şekil 25: En iyi durum, $I \parallel [15]$	25
Şekil 26: En kötü durum, $I \perp [15]$	25
Şekil 27: Netleştirilmiş görüntü [15]	25
Şekil 28: Derinlik haritası [15].....	25
Şekil 29: Sualtı bulanık görüntü [16].....	27
Şekil 30: Sualtı netleştirilmiş görüntü [16].....	27
Şekil 31: Piksel parlaklığı grafiği.....	28

Şekil 32: Yarı-Yansımali imge [16]	31
Şekil 33: İletilen imge [16]	31
Şekil 34: Yansıyan imge [16]	31
Şekil 35: Yarı-Yansımali yüzey modeli [16]	31
Şekil 36: Dönüşüm matrislerin dönme, ölçeklendirme ve yeniden dönme etkileri [23]	35
Şekil 37: İletilen ve yansıyan sahne 1 [23]	37
Şekil 38: İletilen ve yansıyan sahne 2 [23]	37
Şekil 39: İletilen sahne [23]	37
Şekil 40: Yansıyan sahne [23]	37
Şekil 41: VIP SPICE çoklu bant polarimetrik sensör sistemi [28]	39
Şekil 42: Görünür bant orijinal görüntü (Yaz ortamı) [28]	40
Şekil 43: Polarimetrik görüntüler ile elde edilen DoLP imgesi[28]	40
Şekil 44: Görünür bant orijinal görüntü (Kış ortamı) [28]	40
Şekil 45: Polarimetrik görüntüler ile elde edilen DoLP imgesi [28]	40
Şekil 46: Bir ağaç tarafından bir kısmı gölgelenen askeri aracın görünür banttaki orijinal görüntüsü [29]	41
Şekil 47: Görünür bant sahnenin polarimetrik görüntülerinden oluşturulan DoLP imgesi [29]	41
Şekil 48: Test düzeneği	42
Şekil 49: Testlerde kullanılan fotoğraf makinası	42
Şekil 50: Testlerde kullanılan eliptik polarize filtre	42
Şekil 51. Temel dönüşüm hareketleri	44
Şekil 52: Hedef imgesi	45
Şekil 53: Kaynak imgesi	45
Şekil 54: Öznitelik eşleştirme	46
Şekil 55: Dönüştürülmüş kaynak imge	46
Şekil 56: Sisli görüntü	48
Şekil 57: Sis etkisi azaltılmış görüntü	48
Şekil 58: Arkasına renkli kâğıt yerleştirilmiş saydam nesne	49
Şekil 59: Arkasına beyaz kâğıt yerleştirilmiş saydam nesne	49
Şekil 60: Arkaplanına renkli kâğıt yerleştirilmiş sahne DoLP imgesi	49
Şekil 61: Arkaplanına renkli kâğıt yerleştirilmiş sahne AoLP imgesi	49
Şekil 62: Arkaplanına beyaz kâğıt yerleştirilmiş sahne DoLP imgesi	49

Şekil 63: Arkaplanına beyaz kâğıt yerleştirilmiş sahne AoLP imgesi	49
Şekil 64: Cam yüzeyli bina RGB görüntüsü	50
Şekil 65: Cam yüzeyli bina DoLP imgesi	50
Şekil 66: Cam yüzeyli bina AoLP imgesi	50
Şekil 67: Islak yol RGB görüntüsü	51
Şekil 68: Islak yol DoLP işlenmiş görüntüsü	51
Şekil 69: DoLP imgesi	52
Şekil 70: AoLP imgesi	52
Şekil 71: Örnek imge 1 (<i>img1</i>)	59
Şekil 72: Örnek imge 2 (<i>img2</i>)	59
Şekil 73: Doğrusal kombinasyon imgesi 1 (<i>S1</i>)	59
Şekil 74: Doğrusal kombinasyon imgesi 2 (<i>S2</i>)	59
Şekil 75: fastICA kestirim sonucu 1	60
Şekil 76: fastICA kestirim sonucu 2	60
Şekil 77: Işık huzmelerinin saydam bir yüzey üzerinden yansıması ve iletimi	60
Şekil 78: Yarı yansıma polarizasyon imgesi 1	61
Şekil 79: Yarı yansıma polarizasyon imgesi 2	61
Şekil 80: Yarı yansıma imgesi 1	63
Şekil 81: Yarı yansıma imgesi 2	63
Şekil 82: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu	63
Şekil 83: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu	63
Şekil 84: Girdi imgesi 3	63
Şekil 85: Girdi imgesi 4	63
Şekil 86: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu	64
Şekil 87: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu	64
Şekil 88: Geniş açılı yarı yansıma imgesi	64
Şekil 89: Bütün yansıma imgesi 1	65
Şekil 90: Bütün yansıma imgesi 2	65
Şekil 91: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu	65
Şekil 92: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu	66
Şekil 93: Geniş yansıma yüzeyinden kırılan bölüm	66
Şekil 94: Kırılmış imgeden yansıtılan sahne kestirim sonucu	67
Şekil 95: Kırılmış imgeden iletilen sahne kestirim sonucu	67
Şekil 96: Bütün imgeden yansıtılan sahne kestirim sonucu	67

Şekil 97: Bütün imgeden iletilen sahne kestirim sonucu	67
Şekil 98: İletilen suni sahne I_1	68
Şekil 99: Yansıyan suni sahne I_2	68
Şekil 100: Suni doğrusal polarizasyon imgesi 1 (tam iletim).....	68
Şekil 101: Suni doğrusal polarizasyon imgesi 2	68
Şekil 102: fastICA iletilen sahne kestirimi	69
Şekil 103: fastICA yansıyan sahne kestirimi.....	69
Şekil 104: Azami polarizasyon imgesi 1	69
Şekil 105: Azami polarizasyon imgesi 2	69
Şekil 106: fastICA kestirim sonucu 1	70
Şekil 107: fastICA kestirim sonucu 2	70
Şekil 108: fastICA iletilen sahne kestirimi	70
Şekil 109: fastICA yansıyan sahne kestirimi.....	70
Şekil 110: Suni polarizasyon imgesi 1	71
Şekil 111: Suni polarizasyon imgesi 2	71
Şekil 112: Suni polarizasyon imgesi 3	71
Şekil 113: fastICA kestirim sonucu imgesi 1	72
Şekil 114: fastICA kestirim sonucu imgesi 2.....	72
Şekil 115: fastICA kestirim sonucu imgesi 3.....	72
Şekil 116: I_0 imgesi	72
Şekil 117: I_{45} imgesi	72
Şekil 118: I_{90} imgesi	72
Şekil 119: fastICA kestirim imgesi 1	73
Şekil 120: fastICA kestirim imgesi 2	73
Şekil 121: fastICA kestirim imgesi 3	73
Şekil 122: Kalın Yansıtıcı yüzeyden yansımalar ve iletimler	74
Şekil 123: En iyi durum $I \parallel$	75
Şekil 124: En kötü durum $I \perp$	75
Şekil 125: fastICA ile sis etkisi ortadan kaldırılmış sahne.....	76
Şekil 126: Rayleigh gökyüzü modeli geometrisi [37]	77
Şekil 127: Polarizasyon derecesi.....	78
Şekil 128: 180° açıklıkta gökyüzü polarizasyon derecesi [4]	78
Şekil 129: Gökyüzünde polarize olmuş ışığın örüntüsü [38].....	79
Şekil 130: Rayleigh gökyüzü polarizasyon açısı imgesi [39]	80

Şekil 131: Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi renk haritası	81
Şekil 132: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi renk haritası	81
Şekil 133: 0° polarizer açısı ile alınan imge	81
Şekil 134: 45° polarizer açısı ile alınan imge	81
Şekil 135: 90° polarizer açısı ile alınan imge	81
Şekil 136: Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi	82
Şekil 137: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi	82
Şekil 138: Güneşten uzaklaştıkça polarizasyon derecesindeki değişim	83
Şekil 139: Orijinal sahne	83
Şekil 140: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_1	83
Şekil 141: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_2	84
Şekil 142: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_3	84
Şekil 143: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 1	84
Şekil 144: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 2	84
Şekil 145: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 3	84
Şekil 146: t_1 anında güneş pozisyonu	85
Şekil 147: t_2 anında güneş pozisyonu	85
Şekil 148: t_3 anında güneş pozisyonu	85
Şekil 149: Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_1	85
Şekil 150: Polarizasyon açısı imgesi t_1	85
Şekil 151: Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_2	86
Şekil 152: Polarizasyon açısı imgesi t_2	86
Şekil 153: Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_3	86
Şekil 154: Polarizasyon açısı imgesi t_3	86
Şekil 155: Güneşe göre 90° yanca açıda görünür bant sahne	86
Şekil 156: polarizasyon açısı imgesi	86
Şekil 157: Güneşin kameraya göre sağ tarafta olduğu durum	87
Şekil 158: Güneşin kameraya göre sol tarafta olduğu durum	87
Şekil 159: Güneşin kameraya göre sağ tarafta olduğu durumda polarizasyon açısı	87
Şekil 160: Güneşin kameraya göre sol tarafta olduğu durumda polarizasyon açısı	87

ÇİZELGELER

Tablo 1. Dalga plakaları kullanarak polarizasyon dönüşümleri.....	17
---	----



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ψ	Polarizasyon elipsi yönelme açısı
χ	Polarizasyon elipsi eliptiklik derecesi
ρ_d	Yüzey aklığı
c	Işığın vakum içindeki hızı
v	Işığın malzeme içindeki hızı
λ	Işık dalga boyu
η	Malzeme kırıcılık indisi

Kısaltmalar

DoP	Degree of Polarization	Polarizasyon Derecesi
DoLP	Degree of Linear Polarization	Doğrusal Polarizasyon Derecesi
AoP	Angle of Polarization	Polarizasyon Açısı
RGB	Red Green Blue	Kırmızı Yeşil Mavi
LCD	Liquid-Crystal Display	Sıvı Kristal Ekran
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function	Çiftyönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu
SIFT	Scale Invariant Feature Transform	Ölçekten Bağımsız Öznitelik Dönüşümü
SURF	Speeded up Robust Features	Hızlandırılmış Gürbüz Öznitelikler

1. GİRİŞ

Karakteristiğinin anlaşılması ve bilimde bir araç olarak kullanılması amacıyla ışık üzerinde yapılan çalışmalar yüzyıllardır süregelmektedir. Bu kapsamda, ışık üzerinde ortaya atılan teoriler antik yunan tarihine kadar uzanmaktadır. Aristoteles, ışığın aslında beyaz olduğu, renklerin ise karanlık ve aydınlığın karışımıyla ortaya çıktığı teorisini ortaya atmıştır. Arap filozof olan İbn-i Haysem (MS 965-1040) astronomi ve matematik üzerine çalışmalarda bulunmuş, lensler ve aynalar kullanılarak ışık yansıması ve kırılma üzerine deneyler ve gözlemleri de içeren bir kitap yazmıştır. Işığın polarizasyon durumunun incelenmesi ise 1669 yılında Erasmus Bartholin (1625-1698) tarafından kalsit kristallerindeki (kalspar) çift kırılma olgusunun keşfi ile başlamıştır. Bunu Christian Huygens'in (1629-1695) yine kristaller üzerindeki çalışmaları izlemiştir. Huygens'in keşfine göre kalsit krsitalindeki kırılmadan doğan iki ışının her biri, ilgili ışının yönünde döndürülmüş olan ikinci bir kristalden geçirilerek söndürülebilmektedir. Isaac Newton (1642-1727) ise bu fenomeni ışınların "yönü" olduğu varsayımıyla yorumlamıştır [1].

On sekizinci yüzyılda Newton'un desteklediği tanecik modellenli ışık teorisi yürürlükte kalmıştır. Fakat 1801'de Thomas Young (1773-1829) ışığın tanecik yerine dalga modelinde olduğu teorisini ortaya atmıştır. Young, bu modeli ortaya çıkarmak ve ışık girişimini göstermek için çift yarık deneyini geliştirmiştir. 1812'de ise David Brewster (1781-1868) camdan yansıyan ışığın davranışı üzerinde çalışmalar yapmıştır. Yansıma yüzeyi üzerine belirli bir açıda (Brewster açısı) düşüp yansıyan ışık demetinin kalsit kristali ile sönümlendirildiğini keşfetmiştir. Brewster deneylerini devam ettirerek camın kırılma indisi ve Brewster açısı arasında bir bağlantının olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu çalışma, optik camın kırılım indisinin yansıma ile belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Buna paralel olarak Augustin Jean Fresnel (1788-1827) dalga teorisini kırınım problemleri üzerinden teorik olarak açıklamaya çalışmış ve 1818'de Fresnel teorisini ortaya çıkarmıştır. Fresnel ve diğer bilim insanlarının çalışmaları ile ışık dalga teorisi evrensel bir kabul görmüştür [1].

James Clerk Maxwell'in (1831-1879) elektrodinamik teorisiyle ve on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısında Heinrich Hertz'in (1857-1894) deneysel doğrulamasıyla

dalga denklemi için deneylerle de doğrulanmış gerçek bir temel oluşturulmuştur [1].

İnsanlar olarak görmeyi, yoğunluk ve rengin algısı açısından düşünmekteyiz. Geleneksel kameralar ise ilgilenilen bazı dalga bandı üzerindeki optik radyasyonun enerjisini ölçmekte ve bu sayede sahnenin imgesini ortaya çıkarmaktadırlar. Fakat doğada bulunan bazı canlıların insanlar gibi ilgili ortamdan yayılan ışığın enerjisiyle oluşturulan görüntü üzerinden algılama yapmak yerine ışığın polarizasyonunu avlarını veya yönlerini tayin etmek için kullandıkları bilinmektedir. Işık, parlaklık renk ve polarizasyon olmak üzere üç farklı parametre ile modellenmektedir. İnsan gözü ilk iki parametre ile görmeyi sağlamaktadır. Polarizasyon çıplak gözle fark edilememekte, polarize filtreler gibi ek yardımcı malzemeler sayesinde gözlenebilmektedir [2].

Polarizasyon, enerjiye göre ışığın karakterizasyonu için daha genel fiziksel bir tanımlamadır. Bu nedenle polarize görüntüler geleneksel yöntemle elde edilen görüntülerden daha fazla bilgi içermektedirler. Polarizasyon görüntüleri, kameraların önüne polarizer (doğrusal, dairesel, eliptik) konularak basit bir mekanizmayla elde edilebilmektedir. Kameralar vasıtasıyla polarize görüntülerin elde edilebilmesinin kolaylaşması ve polarizasyon ile ilintili görüntülerin geleneksel görüntülerden daha fazla bilgi içermesinden dolayı polarizasyonun bilgisayar görmesinde kullanılması yakın tarihte yaygınlaşmaya başlamıştır. Düz yüzeylerin tespit edilmesi, yüzeylerin yönelme açılarının bulunması, iletken veya yalıtkan nesnelerin tespiti, görüntülerdeki sis etkisinden dolayı düşen görüş mesafesinin artırılması, derinlik haritalarının oluşturulması, yarı-yansımaların ortadan kaldırılması, görüntülerde nesnelerin kenarlarının bulunması, nesnelerinin 3 boyutlu şekillerinin elde edilmesi gibi birçok alanda kullanılmaktadır [4,5].

Polarize filtreler, 1970'lerin başında mekanik olarak döndürülen optik bir eleman olarak kullanılmaktadır. Bu tarihte kullanılan polarimetri elemanları ağırlık, boyut ve titreşim etkilerinin görüntülere yansımalarından dolayı kullanışlı değillerdi. İkinci nesil olarak adlandırılabilir olanlar ise 1980'lerde kullanılmıştır. Bu optik elemanlarda ise optik kısma gelen ışık demeti 3 veya 4 yöne ayrıştırılır ve her kanalın ucunda farklı açılarda bir polarizer ve bir detektör bulunmaktadır. İlgili kanallardan ve polarizerlerden geçip detektörler üzerine düşen ışınlar ile polarizasyon analizi yapılmaktadır. Bu nesil polarimetrik cihazlar da çok fazla yer

kaplamalarından dolayı birçok uygulama için uygun değildir. 1990'larda ise LCD (Liquid-Crystal Display) tipli üçüncü nesil filtreler ortaya çıkmıştır. Alan ve ağırlık bakımından daha elverişli olan bu sistemlerin ise LCD ışık yoğunluğundaki zayıflamadan dolayı tespit mesafesi ve tespit doğruluğu düşmekte ve sistemde gürültüler oluşmaktadır. 1990'ların başında ortaya çıkan alt açıklıklı dördüncü nesil polarizerlerde ise dört parçaya bölünmüş mikro lens dizisi kullanılmaktadır. 2000'li yıllarda ortaya çıkan beşinci nesilde de odak düzlemi dizisi kullanılmaktadırlar. Odak düzlemi dizisi üzerindeki 4 piksellik minyatür polarizasyon kümeleri ile polarizasyonu doğrudan algılayabilmektedirler [6].

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışma kapsamında, imge kıymetlendirme çalışmalarında kullanılan polarizasyon tabanlı yaklaşımların gözden geçirilmesi amaçlanmıştır. Bu çerçevede içinde, derinlik ölçümü, malzeme karakterizasyonu, cisimlerin şeklinin tespiti vb. konular ile ilgili olarak polarizasyondan yararlanılan çalışmalar etüd edilmiş ve polarizasyondan yararlanma konusunda sistematik yaklaşımlar ortaya konmuştur. Bu amaca yönelik olarak, polarizasyon tabanlı bazı imge işleme tekniklerinin geliştirilmesi de hedeflenmiştir.

1.2. Tezin Akışı

Bölüm 1'de polarizasyonun incelenmesindeki tarihi süreç, polarizasyonun çeşitli canlılar ve insanlar tarafından kullanımı, bilgisayar görmesindeki kullanımı ve polarize kameraların gelişme süreci anlatılmaktadır. Bölüm 2'de polarizasyonun dalga denklemleri ile açıklanması, polarize ışığın elde edilmesi ve polarizasyonun Stokes parametreleri ile ölçümü detaylandırılmaktadır. Bölüm 3'te polarizasyonun bilgisayar görüşünde kullanımı çeşitli başlıklar altında toplanmış ve ilgili polarizasyonun çözüm getirdiği problemler ve çözümler ilgili başlıklar altında incelenmiştir. Bölüm 4'te tez kapsamında polarize görüntülerin elde edilmesinde kullanılan yöntemler, deneysel çalışmalar ile elde edilen polarize görüntüleme örnekleri, çift yansımaların ortadan kaldırılması için yapılan çalışmalar, görüntülerdeki sisin ortadan kaldırılması ve gökyüzü polarizasyonunun incelenmesi ile ilgili çalışmalar yer almaktadır. Bölüm 5'te polarizasyon hakkında yapılan ve tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların genel bir değerlendirilmesi bulunmaktadır.

2. POLARİZASYON KAVRAMLARI

İnsan gözünün polarizasyona hassas olmamasından dolayı polarizasyonun fark edilmesi ve üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanması yeniçağ dönemine tekabül etmektedir. Fakat çeşitli böcek türü varlıkların polarizasyonu kullanarak yönlerini ya da avlarını buldukları çeşitli araştırmalarla ortaya çıkarılmıştır. İlkel canlıların polarizasyona duyarlı hücreler ile su altında veya yeryüzünde yaşamlarını devam ettirebilmek (yön ve av bulma) için kullandıkları bilinmektedir [7, 8, 9].

İnsanların polarizasyonu bir araç olarak kullanılmaya Viking'ler döneminde başladığı düşünülmektedir. Vikinglerin gemileriyle İzlanda adasına ulaşmaya çalışırken denizde yollarını bulmaları için polarizasyona duyarlı güneş taşı (sun stone) denen ve yapısında kireç bulunan bir taştan faydalandıkları söylenmektedir [10, 11].

2.1. Polarizasyon Elipsi

Christian Huygens, kristaller yardımıyla ışığın yayılımı üzerine yaptığı çalışmalarla ışığın yalnızca skaler bir değere sahip olmadığını öne süren ilk kişiydi. Işığın sahip olduğu bu vektörel yapıya polarizasyon adı verilmektedir ve ilgili vektörel yapının değişime göre ışığın polarizasyon durumu tanımlanmaktadır.

Optik bir ortamda bağımsız bir şekilde salınım yapan asgari üç bileşen bulunmaktadır ($u_x(r, t)$, $u_y(r, t)$, $u_z(r, t)$). Buna paralel olarak, optiksel yayılımı tanımlamak için de üç bağımsız dalga denklemi gereklidir:

$$\nabla^2 u_i(r, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u_i(r, t)}{\partial t^2}, \quad i = x, y, z \quad (1)$$

Burada v , yayılımının hızını temsil etmektedir ve $\mathbf{r} = \mathbf{r}(x, y, z)$ şeklindedir.

Kartezyen koordinat sisteminde dalga yayılımı z yönünde olduğunda $u_x(\mathbf{r}, t)$ ve $u_y(\mathbf{r}, t)$ çapraz bileşenleri, $u_z(\mathbf{r}, t)$ ise boylamsal bileşeni temsil etmektedir. Bu durumda (1) ile verilen denkleme göre optiksel alan denklemleri denklem (2), (3) ve (4) ile elde edilmektedir.

$$u_x(\mathbf{r}, t) = u_{0x} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_x) \quad (2)$$

$$u_y(\mathbf{r}, t) = u_{0y} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_y) \quad (3)$$

$$u_z(\mathbf{r}, t) = u_{0z} \cos(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} + \delta_z) \quad (4)$$

1818'de Fresnel ve Arago, polarize ışığı kullanarak Young'un girişim deneyi üzerine bir dizi temel inceleme ve araştırma gerçekleştirmiş, deneyler sonucunda boylamsal bileşenin var olmadığı sonucuna varmışlardır. Bu sonuca göre ışık sadece çapraz bileşenlerden oluşmaktadır. Yayılma yönünü z doğrultusunda alındığında uzaydaki optiksel alan denklemleri sadece denklem (5) ve (6) ile ifade edilebilmektedir.

$$u_x(z, t) = u_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \quad (5)$$

$$u_y(z, t) = u_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \quad (6)$$

Burada u_{0x} ve u_{0y} azami genlikleri, $\omega t - kz$ yayıcıyı, δ_x ve δ_y ise fazları ifade etmektedir. Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik alan olmak üzere iki bileşenden oluşmaktadır. Polarizasyon durumu ise elektromanyetik bir dalga'nın elektrik alan bileşeni üzerinden tanımlanmaktadır. Işığın sahip olduğu bu enine dalgalar birbirine dik durumdadırlar ve denklem (7) ve (8) şeklinde ifade edilmektedir.

$$E_x(z, t) = E_{0x} \cos(\tau + \delta_x) \quad (7)$$

$$E_y(z, t) = E_{0y} \cos(\tau + \delta_y) \quad (8)$$

Burada x ve y indisleri, x ve y yönündeki bileşenleri, E_{0x} ve E_{0y} ise alan şiddetini temsil etmektedir. Dalga uzayda ilerledikçe E_x ve E_y vektörel değerleri toplam vektörü, toplam vektör de uzayda gezen noktalarını oluşturmaktadır.

İlgili noktaların oluşturduğu eğrinin türetiminin yapılabilmesi için (7) ve (8) ile verilen denklemler şu şekilde yazılmaktadır;

$$\frac{E_x}{E_{0x}} = \cos\tau \cos\delta_x - \sin\tau \sin\delta_x \quad (9)$$

$$\frac{E_y}{E_{0y}} = \cos\tau \cos\delta_y - \sin\tau \sin\delta_y \quad (10)$$

(9) ve (10) ile verilen denklemler yeniden düzenlendiğinde;

$$\frac{E_x}{E_{0x}} \sin \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \sin \delta_x = \cos \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (11)$$

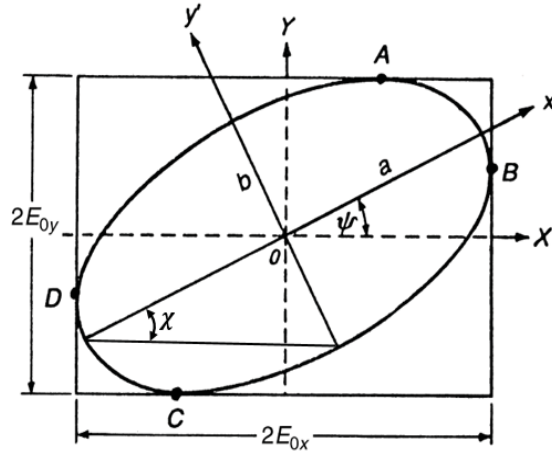
$$\frac{E_x}{E_{0x}} \cos \delta_y - \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta_x = \sin \tau \sin(\delta_y - \delta_x) \quad (12)$$

şeklinde elde edilir. (11) ve (12) ile verilen denklemlerin her iki tarafının da karesi alınıp toplandığında;

$$\frac{E_x^2}{E_{0x}^2} + \frac{E_y^2}{E_{0y}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{0x}} \frac{E_y}{E_{0y}} \cos \delta = \sin^2 \delta \quad (13)$$

elde edilir. Burada, δ faz farkını ifade etmektedir ve $\delta = \delta_y - \delta_x$ olarak tanımlanmaktadır.

Denklem (13) ile verilen eşitlik bir elips denklemini ifade etmektedir ve ışık yayılım yaparken herhangi bir anda optiksel alan tarafından tanımlanan gezinge noktalarını gösterir. Bu karakteristik polarizasyon elipsi olarak adlandırılmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1: Polarizasyon elipsi

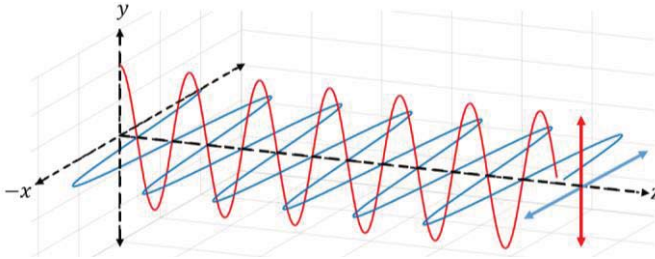
Polarizasyonun tanımlanmasında kullanılan elipsin yönelme açısı (ψ , $0 \leq \psi \leq 90$) ve eliptiklik derecesi (χ , $-45 \leq \chi \leq 45$) olmak üzere iki ana parametresi bulunmaktadır. Yönelme açısı, elipsin eksenlerinin koordinat eksenleriyle arasındaki açısal farkı temsil etmektedir. Eliptiklik derecesi ise elipsin ana eksenlerindeki genişliğin birbirinden farklılaşmasıyla ortaya çıkmaktadır. Yönelme açısı ve eliptiklik derecesi sırasıyla denklem (14) ve denklem (15) ile verilmiştir.

$$\tan 2\psi = \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} \quad (14)$$

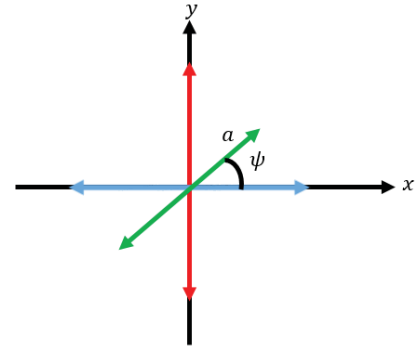
$$\sin 2\chi = \frac{2E_{0x}E_{0y}\sin\delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \quad (15)$$

Polarizasyon anlamında bir ışığın “apolarize”, “doğrusal polarize” ve “eliptik/dairesel polarize” olmak üzere temel üç farklı formu bulunmaktadır.

Doğada 0°K sıcaklığının üzerinde bulunan atomlar titreşim hareketiyle beraber elektromanyetik dalga yayılımı yapmaktadırlar. Sıcaklığın artmasıyla beraber titreşim hareketinin şiddeti de artmaktadır. Kaynaktan yayılan elektromanyetik dalgaların polarizasyon karakteristiğinin daha kolay anlaşılabilmesi açısından ilgili kaynaktan çıkan elektrik alanın iki bileşeni dikkate alınsın (Şekil 2). Şekil 3 ile verilen görsel, gözlemciye doğru yayılım yapan kaynaktan çıkan elektrik alan bileşenlerinin ve anlık toplam vektörün nasıl algıladığını göstermektedir. Kaynaktan çıkan elektrik alan dalgaların genlik, faz ve yönelimlerinin birbirlerinden farklı olmasıyla toplam vektörün anlık yönü ve genliği de değişim göstermektedir. Bu değişimlere göre de kaynağın polarizasyon durumu ortaya çıkmaktadır.



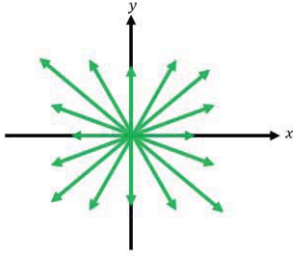
Şekil 2: Örnek elektrik alan bileşenleri



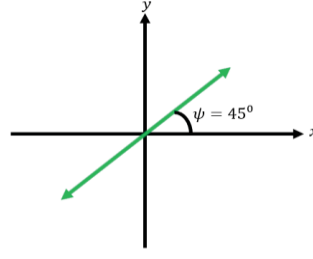
Şekil 3: Elektrik alan vektör toplamı

Vektör boyunun (a) ve vektörün x eksenine ile arasındaki açısının (ψ) rastgele olduğu durumda ilgili kaynaktan çıkan elektromanyetik dalgalar apolarize olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4). ψ açısının sabit olduğu ve a 'nın artıp azalan değerler (Şekil 7) aldığı durumda ise ilgili kaynak doğrusal polarize olarak tanımlanmaktadır ve birbirine dik iki elektromanyetik dalganın genlik ve faz değerlerinin birbirine eşit olduğu durumda elde edilebilmektedir (Şekil 5). Dalgalar arasında faz kayması veya genliklerinin farklı olması durumunda ise ilgili kaynağın polarizasyon durumu

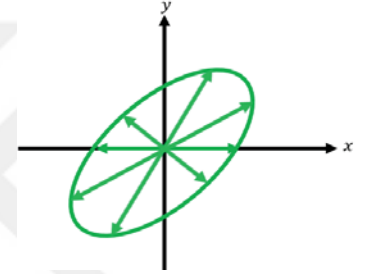
“eliptik polarize” olarak tanımlanmaktadır (Şekil 6). Eliptik polarizasyon durumunda toplam vektörün genlik değerindeki değişim örneği Şekil 8 ile verilmiştir. Dairesel polarizasyon ise eliptik polarizasyonun özel bir durumunu temsil etmektedir. Dairesel polarize ışık, dalga genliklerinin aynı ve faz farkının $\pm 90^\circ$ olduğu durumda elde edilebilmektedir. Bu durumda a değeri sabit, ψ açısı ise doğrusal olarak artmakta (Şekil 9) ya da azalmaktadır. Eliptik/Dairesel polarizasyonun bir başka özel durumu ise ψ açısının artması ya da azalmasına göre ortaya çıkmaktadır. ψ açısının artmakta olduğu durumda ilgili kaynak sağa eliptik/dairesel polarize olarak adlandırılmakta, ψ açısının azalmakta durumunda ise ilgili kaynak sola eliptik/dairesel polarize olarak adlandırılmaktadır.



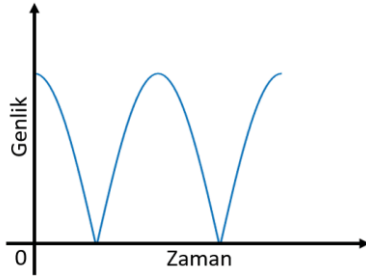
Şekil 4: Apolarize ışık



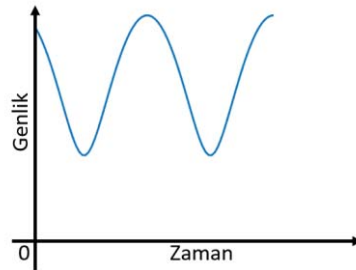
Şekil 5: $\psi = 45$ ile doğrusal polarize ışık



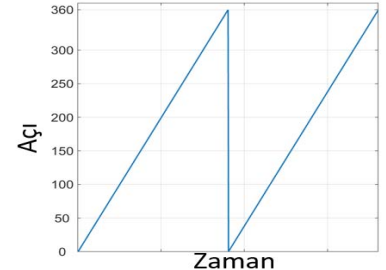
Şekil 6: Eliptik polarize ışık



Şekil 7: Doğrusal polarizasyon genlik değişimi



Şekil 8: Eliptik polarizasyon genlik değişimi



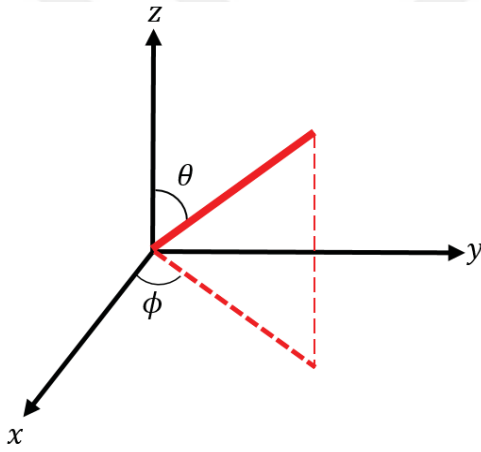
Şekil 9: Sola Eliptik/Dairesel polarizasyon açı değişimi

2.2. Işığın Polarizasyonunun Değişimi

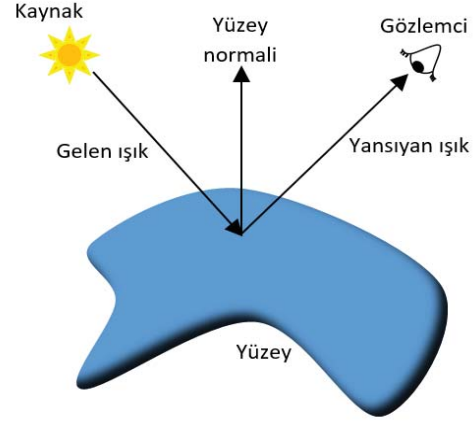
Doğada bulunan ışık kaynaklarının ekseriyeti apolarize durumdadır. Kaynaklardan çıkan ışınların havadaki moleküller ile etkileşiminden ya da çeşitli nesneler üzerinden yansıma, saçılma, kırılma vb. olaylarından sonra polarizasyon durumlarında değişimler meydana gelmektedir. Polarizasyon değişimindeki bu

farklılaşma ilgili ışığın etkileşime girdiği yüzeylere/nesnelere, ilgili ışığın dalga boyuna göre farklılık göstermektedir. Bu etkileşimler ışığın polarizasyon durumunu değiştirdiği gibi polarizasyon şiddetini de etkilemektedir.

Bir ışın demetinin herhangi bir yüzeyle etkileşime girdikten sonraki durumunu etkileyen birden fazla parametre bulunmaktadır. Bunlar, temel olarak, yüzey üzerine düşen ışığın şiddeti, yüzey normali ile yaptığı açı ve ilgili yüzeye ait BRDF (Çift yönlü Yansıma Dağılım Fonksiyonu, **Bidirectional Reflectance Distribution Function**)'dir. BRDF hariç geriye kalan parametreler ışık kaynağına bağlı, BRDF ise yüzeye göre değişimler göstermekte ve farklı şekillerde modellenmektedir [5]. Herhangi bir yüzeye (Şekil 10, Şekil 11) düşen ışığın BRDF değeri denklem (16) ile verilmiştir.



Şekil 10: Referans koordinat sistemi



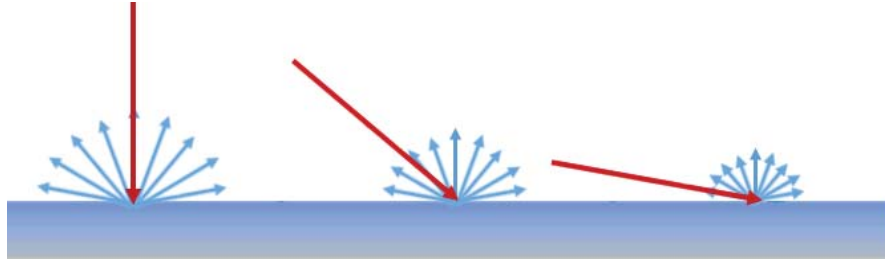
Şekil 11: Işık ve yüzey etkileşimi

$$f(\theta_g, \phi_g; \theta_y, \phi_y) = \frac{L_{yüzey}(\theta_y, \phi_y)}{E_{yüzey}(\theta_g, \phi_g)} \quad (16)$$

$E_{yüzey}(\theta_g, \phi_g)$, yüzeye θ_g ve ϕ_g yönünde düşen ışınma seviyesini, $L_{yüzey}(\theta_y, \phi_y)$ ise yansımadan sonraki ışınım değerini temsil etmektedir.

Yansıma yüzeylerini temel olarak dağıtıcı ve yansıtıcı olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Dağıtıcı yüzey, üzerine düşen ışın demetlerini hangi açıdan gelirlirse gelsinler her yöne yaklaşık olarak eşit miktarda yönlendirmektedir (Şekil 12). Bu nedenle ilgili yüzeyin üzerinde düşen ışınların polarizasyon durumu yansımadan sonra apolarize duruma dönüşmektedir. Bu tarz yüzeyler Lambertian yüzey olarak adlandırılmaktadır. İlgili yüzeylerin BRDF değerleri ve yüzey

yansımından sonraki ışınım değerleri sırasıyla denklem (17) ve (18) ile verilmiştir.



Şekil 12: Dağıtıcı yüzeyden yansıma [5]

$$f(\theta_g, \phi_g; \theta_y, \phi_y) = \frac{\rho_d}{\pi} \quad (17)$$

$$L = \frac{\rho_d}{\pi} I \cos \theta_g \quad (18)$$

ρ_d yüzey aklığını (gelen ışınlarının doğal bir yüzeyden yansıyan yüzdesi) temsil etmektedir [13]. Yansıtıcı yüzeyleri ise tam yansıtıcı ve pürüzlü olmak üzere iki ana başlık altında toplamak mümkündür. Tam yansıtıcı yüzeyler, üzerine düşen ışın demetini ilgili Brewster açısıyla yansıtmaktadır ve yansıyan ışın demeti tam polarize duruma geçmektedir. Pürüzlü yüzeylerden olan yansımalar ise farklı şekillerde modellenmektedir. Bu çeşit yüzeylerden olan yansımalarda yüzeyin durumuna göre yansıyan ışınların polarizasyon derecesi konsepti ortaya çıkmaktadır. Pürüzlü yüzey modellerinde sıklıkla kullanılan Torrance-Sparrow modeli denklem (19) ile verilmiştir.

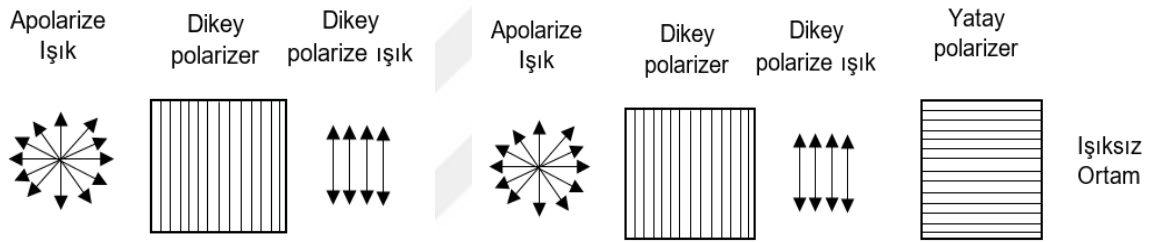
$$f = \frac{F(\theta_g)G(w_g, w_y)D(\theta_y)}{4 \cos \theta_g \cos \theta_y} \quad (19)$$

$F(\theta_g)$, fresnel katsayısını, $G(w_g, w_y)$, gölgeleme ve maskelemeyi kaynaklı geometrik kayıpları, $D(\theta_y)$ mikrofaset yüzeylerin yönelimlerinin dağılımını, $\cos \theta_g$ ve $\cos \theta_y$ ise sırasıyla yüzeylerin ne kadarının kaynak ve gözlemci tarafından görüldüğünü temsil etmektedir.

Yansıma haricinde kaynaklardan çıkan ışınların da bir takım optik filtreler kullanılmasıyla ilgili ışınların polarizasyon durumları üzerinde değişimler yapılabilmektedir.

2.2.1. Doğrusal Polarizasyon

Herhangi bir polarizer kullanmadan doğrudan doğrusal polarize ışık üretmek için çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Stark efekti, Zeeman efekti vb). Fakat polarize ışık elde etmenin geleneksel ve pratik bir yöntemi vardır. Apolarize herhangi bir ışık kaynağının önüne polarizer konulup sadece belirli ekseninde salınım yapan ışık dalgalarının karşı tarafa geçmesi ve diğer ekseninde salınım yapan ışık dalgalarının bloklanması sağlanarak doğrusal polarize olmuş bir ışık elde edilebilmektedir (Şekil 13). Doğrusal polarize olmuş ışığın önüne ilk polarizere göre 90° açısal farkla diğer bir polarizer konulduğunda ise ışığın tamamı bloklanabilmektedir (Şekil 14).



Şekil 13: Doğrusal polarize ışık

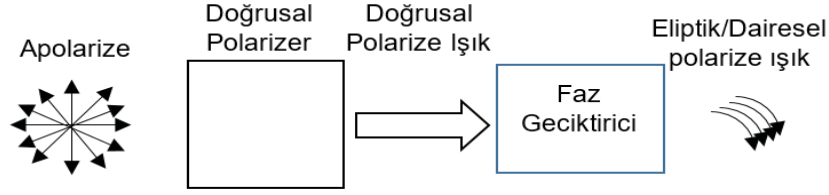
Şekil 14: Birbirine dik iki doğrusal polarizer etkisi

Ticari olarak üretilen polarizerlerin büyük çoğunluğu ikirenkli (dichroic) tabanlı polarizerlerdir. Yönlendirilmiş dikroik mikrokristallerden yapılmış olan yaprak tipli polarizerlerin bilinen ilk örneklerinden olan J-sheet polarizerler mikro kristalli polarizer olarak adlandırılmaktadırlar. Moleküler polarizer olarak adlandırılan polarizerler ise ince uzun dikroik moleküllerinin şeritler şeklinde hizalanması ile elde edilmektedirler [12]. Polarizerden sonra elde edilen ışığın polarizasyon yönü polarizerin yönünün aynısıdır. Polarizerin yönünün değiştirilmesiyle beraber elde edilen ışığın polarizasyon yönü polarizerle aynı şekilde değişmektedir.

2.2.2. Eliptik/Dairesel Polarizasyon

Apolarize bir ışık doğrusal polarizer ve faz kaydırıcı malzemeler ile dairesel polarize hale getirilebilmektedir. Polarizer ile ışığı belli bir açıda doğrusal polarize duruma getirdikten sonra faz geciktirici yardımıyla ilgili ışık eliptik/dairesel polarize olmuş duruma getirilebilmektedir (Şekil 15). Faz geciktirici, elektriksel alan

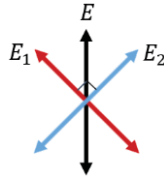
bileşenlerinin bir eksendeki fazının diğer eksene göre geciktirilmesini sağlamaktadır.



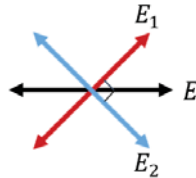
Şekil 15: Apolarize bir ışığın doğrusal polarize hale getirilmesi

Elektriksel alan bileşenleri anlık değerlerinin vektör şeklinde ifade edilebildiği 2.1 numaralı bölümde detaylandırılmıştır. İki boyutlu uzayda herhangi bir vektörün birbirine dik iki eksen ile ifade edilebildiği bilinmektedir. İki ekseninde farklı miktarda faz geciktirici özelliğe sahip malzeme ile toplam elektriksel alan vektörünün ana eksenlerindeki bileşenleri arasında faz farkına sahip olması sağlanmakta, ilgili malzemeden geçtikten sonraki toplam elektriksel alan vektörünün ise zamana göre değişimi eliptik/dairesel polarize hale getirilebilmektedir.

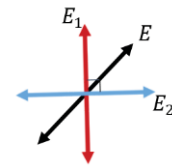
Dikey ve yatay doğrusal polarize ışık vektörlerinin ilgili bileşenleri sırasıyla Şekil 16 ve Şekil 17 görselleri ile verilmiştir.



Şekil 16: Dikey doğrusal polarize ışık



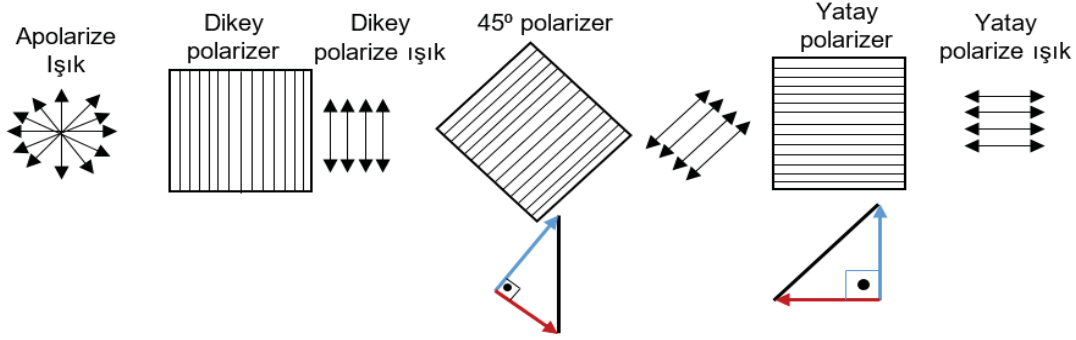
Şekil 17: Yatay doğrusal polarize ışık



Şekil 18: Çapraz doğrusal polarize ışık

Apolarize bir ışığın önüne aralarında 90° açı farkı bulunan iki tane doğrusal polarizer yerleştirildiğinde ilk polarizerden geçen ışığın, diğer polarizerin yöneliminde herhangi bir bileşeni bulunmamasından dolayı karşı tarafa herhangi bir ışığın geçemediği bir önceki bölümde vurgulanmıştı. Fakat iki polarizerin arasında 45° 'lik açıyla bir tane daha polarizer eklendiğinde karşı tarafa son polarizerin açısında doğrusal polarize olmuş belli bir miktar ışık geçmektedir (Şekil 19). Bunun nedeni, ilk polarizerden geçen ve belli bir açıda doğrusal polarize olmuş ışığın toplam vektörünün birbirine dik iki eksendeki bileşenlerine ayrıldığına ilk polarizerin açısının 45° açısal farkında bir bileşen ortaya

çıkılmaktadır. İlgili bileşenin genliği toplam vektörün genliğinin $1/\sqrt{2}$ katına eşittir. Araya konulan doğrusal polarizerin ilgili 45° 'lik açısı değiştirildiğinde karşı tarafa geçen ışık miktarının genliği $\cos(45 - \alpha)$ çarpanı ile azalmaktadır. Sonuç olarak doğrusal polarize olmuş bir ışığın birbiri arasında 90° açı bulunan iki tane bileşenin bulunduğu gerçek testler yardımı ile de desteklenmektedir.



Şekil 19: Apolarize ışığın polarizer filtreler ile filtrelenmesi

Birbirine dik iki eksen arasında faz kayması meydana geldiğinde sonuç olarak elde edilen ışık eliptik polarize hale gelmektedir. Eliptik polarize ışığın özel bir formu olan dairesel polarize ışığın elde edilebilmesi için birbirine dik iki elektriksel alan vektörü bileşeninden bir tanesinin fazının 90° kaydırılması gerekmektedir.

İki elektriksel alan bileşenlerinin tanımlanması denklem (20) ve denklem (21) ile yapılabilmektedir.

$$E_1(t) = E_{01}(t)\cos[\omega t + \delta_1(t)] \quad (20)$$

$$E_2(t) = E_{02}(t)\cos[\omega t + \delta_2(t)] \quad (21)$$

Burada $E_{01}(t)$ ve $E_{02}(t)$ anlık genlik değerlerini, ω anlık açısal frekans değerini, δ_1 ve δ_2 ise faz açılarını göstermektedir. Apolarize ışık doğrusal polarizerden geçtikten sonra elektriksel alan bileşenleri $E_{01}(t) = E_{02}(t)$ ve $\delta_1(t) = \delta_2(t)$ şeklinde olmaktadır. Şekil 18 ile verilen görsel düşünüldüğünde faz geciktirici ile elektriksel alanın E_1 yönünde ilerleyen bileşeninin fazı E_2 yönünde ilerleyen bileşenin fazından 90° geciktirildiğinde ($\delta_1 = \delta_2 + 90^\circ$) elde edilen ışık saat yönünde dairesel polarize olmaktadır. E_2 yönünde ilerleyen bileşeninin fazı E_1 yönünde ilerleyen bileşenin fazından 90° geciktirildiğinde ($\delta_1 = \delta_2 - 90^\circ$) ise elde edilen ışık saat yönünün tersinde dairesel polarize hale gelmektedir. Fazın kaydırılabilmesi için ışığın hızının geciktirilmesi gerekmektedir. Vakum içinde 3×10^8 m/s hızla

hareket eden ışık dalgası, farklı bir malzemenin içinden geçerken hızının azalmaya başladığı bilinmektedir. Işığı bir ekseninde diğer eksene göre 90° faz kayması olacak şekilde geciktiren malzemelere birefringe malzeme denilmektedir.

2.2.2.1. Çift kırılma indisli kristaller

Işık şeffaf bir malzemedan geçtiğinde malzeme içerisindeki atomlar ile etkileşime girmektedir. Bu nedenle de, ilgili malzeme içindeki ışık hızı vakum ya da havadaki hızından daha yavaş olmaktadır. Işığın ilgili malzeme içindeki hızı (v) malzemenin kırılma indisi (η) ile doğrudan ilintilidir (denklem (22)).

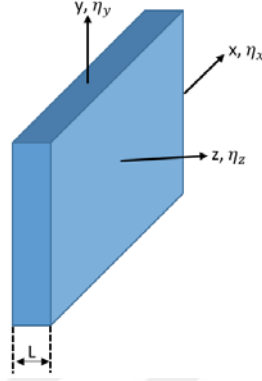
$$v = c/\eta \quad (22)$$

Malzemenin kırıcılık indisinin artması, ışığın hızının azalmasına neden olmaktadır. Aynı şekilde ışık, kırıcılık indisi daha düşük olan bir malzeme içinde kırıcılık indisi yüksek olan malzemeye göre daha hızlı ilerlemektedir. Işığın hızının düşmesi fazında kaymaya neden olmaktadır. Faz kayma miktarı (γ , radyan) malzemenin kırılma indisine, ışığın dalga boyuna (λ) ve ışığın malzeme içinde aldığı yolun uzunluğuna (L) bağlıdır (23).

$$\gamma = \frac{2\pi\eta L}{\lambda} \quad (23)$$

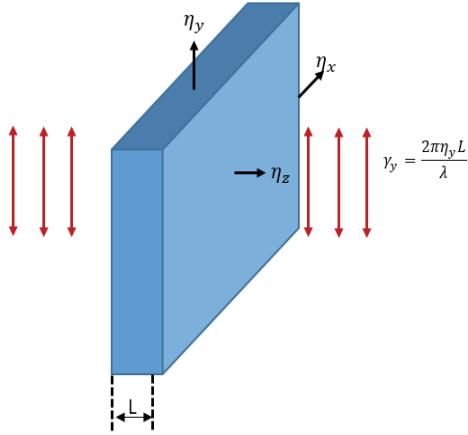
Kristallerin en basit sınıfı kübik simetriye sahip olanlardır. Bir kübik kristalde 3 farklı eksenindeki kırılma indisleri eşittir ($\eta_x = \eta_y = \eta_z$) ve bu tip kristallere optiksel olarak isotropik kristaller denir. Işık, polarizasyon açısına bağlı olmaksızın her ekseninde aynı kırılma indisine uğrar ve hızı dolayısıyla faz kayması bütün eksenlerde aynı olur. Bu nedenle herhangi bir şekilde polarize olmuş veya olmamış bir ışık isotropik kristal içinden geçtikten sonra polarizasyon durumunu korur. İlgili kristallerden ayrı olarak asimetrik optiksel özellik gösteren kristaller de bulunmaktadır. Bu cins kristallere birefringent kristal adı verilmektedir ve bir eksenindeki kırıcılık indisi diğer iki ekseninden farklı ($\eta_x \neq \eta_y = \eta_z$) olmaktadır. Çift kırılma indisine sahip kristallere örnek olarak kuvars, kalsit ve magnezyum Florür (MgF_2) verilebilir. Bu cins malzemelerde ise z ekseninde ilerleyen ışığın x ve y eksenlerindeki bileşenlerinin uğradığı faz kayma miktarları birbirinde farklı olmaktadır.

Kuvars, silikon dioksit içeren sert, beyaz veya renksiz bir mineral, yaygın olarak magmatik, metamorfik ve tortul kayalarda bulunur. Genellikle saf olmayan maddeler (ametist, sitrin ve cairngorm'da olduğu gibi) ile renklendirilmektedir. Kalsit ise kalsiyum karbonattan oluşan beyaz veya renksiz bir mineraldir. Kireçtaşı, mermer ve tebeşir gibi tortul kayaların önemli bir bileşenidir. Kristalleşmiş durumda mağaralarda sarkıtlar/dikitler şeklinde bulunabilir.

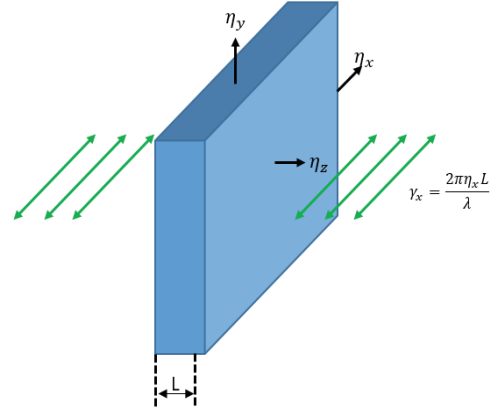


Şekil 20: Faz kaydırıcı kristal

Faz kaymasını bir örnek ile somutlaştırmak gerekirse, z ekseninde ilerleyen bir ışığın y ekseninde ya da x ekseninde tek bileşeni olduğu ve ilgili ışığın birefringent malzemeden geçirildiği varsayalım. Işığın y ekseninde maruz kalacağı faz kayma miktarı $(2\pi\eta_y L)/\lambda$ olacaktır. Faz kaydırıcı birefringent plaka z ekseninde döndürüldüğünde ise ışığın x ekseninden geçerken maruz kalacağı faz kayması miktarı $(2\pi\eta_x L)/\lambda$ şeklinde olmaktadır. Fakat varsayılan ışık, tek eksende bileşeni olmasından dolayı malzemeden geçtikten sonra polarizasyon durumunu koruyacaktır (Şekil 21 ve Şekil 22).



Şekil 21: Dikey ekseninde bileşeni olan ışığın birefringent malzeme geçmesi



Şekil 22: Yatay ekseninde bileşeni olan ışığın birefringent malzeme geçmesi

Her iki ekseninde de bileşeni olan bir ışığın birefringent plakadan geçtikten sonra eksenler arasındaki faz kayma miktarı denklem (24) ile verilmiştir.

$$\Delta\gamma = \gamma_x - \gamma_y = \frac{2\pi L}{\lambda} (\eta_x - \eta_y) \quad (24)$$

Sonuç olarak, doğrusal bir ışık birefringent bir plakadan geçtikten sonra eksenler arasındaki faz kaymasından dolayı polarizasyon durumu değişmektedir.

İki eksen arasında 90° faz kayması sağlayan birefringent dalga plakalar çeyrek dalga plakası, 180° faz kayması sağlayan plakalar ise yarım dalga plakası olarak adlandırılmaktadır. Çeyrek dalga plakası yardımı ile doğrusal polarize olmuş bir dalga dairesel ya da eliptik polarizasyon durumuna, dairesel polarize olmuş bir dalga da doğrusal polarizasyon durumuna çevrilebilmektedir. Ek olarak, doğrusal polarize olmuş bir ışığın doğrusal polarizasyon açısı değeri 0° veya 90° olması durumunda (ışığın yaptığı salınım hareketinin dalga plakasındaki x veya y eksenleri üzerinde olması) dalga plakasının ilgili ışığın polarizasyon durumu üzerinde bir etkisi olmamaktadır. Bunun nedeni ise ışık vektörü bileşenlerinin uğradığı faz kayması miktarının aynı olmasıdır. Birefringent plakalar ile farklı polarizasyon duruma ait dalgaların etkileşimleri Tablo 1 ile verilmiştir.

Girdi	Çıktı
Çeyrek Dalga Plakası	
Doğrusal, $\theta = 45^0$	Sağa Dairesel
Doğrusal, $\theta = -45^0$	Sola Dairesel
Sağa Dairesel	Doğrusal, $\theta = -45^0$
Sola Dairesel	Doğrusal, $\theta = 45^0$
Doğrusal, $\theta \neq 45^0$	Eliptik
Yarım Dalga Plakası	
Doğrusal, θ	Doğrusal, $-\theta$
Sağa Dairesel	Sola Dairesel
Sola Dairesel	Sağa Dairesel
Herhangi bir Dalga Plakası	
Doğrusal, $\theta = -45^0, 90^0$	Değişmez

Tablo 1. Dalga plakaları kullanarak polarizasyon dönüşümleri

2.3. Stokes Parametreleri

2.3.1. Stokes parametrelerinin türetilmesi

Polarizasyon elipsinin elde edilmesi 2.1 numaralı bölümde detaylı bir şekilde verilmişti (denklem (13)). Bu bölümde polarizasyon elipsi denkleminde türetilebilen Stokes parametrelerinin türetilmesi işlemi verilmektedir.

Optik alanın gözlemlenebilirliği açısından, ilgili polarizasyon elipsi denleminin gözlem süresi boyunca bir ortalamasının alınması gerekmektedir. $E_x(t)$ ve $E_y(t)$ periyodik oldukları için ortalama alınan süre bir periyot üzerinden yapılabilmektedir. Zaman ortalaması alındığında ise denklem (13), şu şekilde yazılmaktadır;

$$\frac{\langle E_x^2(t) \rangle}{E_{0x}^2} + \frac{\langle E_y^2(t) \rangle}{E_{0y}^2} - \frac{2\langle E_x(t)E_y(t) \rangle}{E_{0x}E_{0y}} \cos\delta = \sin^2\delta \quad (25)$$

$$\langle E_x(t)E_y(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T E_x(t)E_y(t)dt$$

$$\begin{aligned}
\langle E_x^2(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0x}^2 \\
\langle E_y^2(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0y}^2 \\
\langle E_x(t) E_y(t) \rangle &= \frac{1}{2} E_{0x} E_{0y}
\end{aligned} \tag{26}$$

Denklem (25) $4E_{0x}^2 E_{0y}^2$ ile çarpılıp (26) ile verilen denklemde ilgili yerlere konulduğunda, elektriksel alan denklemi şu şekilde olmaktadır;

$$2E_{0x}^2 E_{0y}^2 + 2E_{0x}^2 E_{0y}^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \delta)^2 \tag{27}$$

Elektriksel alan denklemini parlaklık (intensity) cinsinden ifade edebilmek için denklem (27) ile verilen eşitliğin sol tarafına $E_{0x}^4 + E_{0y}^4$ eklenip çıkarıldığında elde edilen eşitlik deklemler (28) ile verilmiştir.

$$(E_{0x}^2 + E_{0y}^2)^2 - (E_{0x}^2 - E_{0y}^2)^2 - (2E_{0x} E_{0y} \cos \delta)^2 = (2E_{0x} E_{0y} \sin \delta)^2 \tag{28}$$

Bu aşamadan sonra Stokes parametreleri şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$\begin{aligned}
S_0 &= E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\
S_1 &= E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\
S_2 &= 2E_{0x} E_{0y} \cos \delta \\
S_3 &= 2E_{0x} E_{0y} \sin \delta \\
S_0^2 &= S_1^2 + S_2^2 + S_3^2
\end{aligned} \tag{29}$$

S_0 , toplam ışımayı, S_1 , doğrusal yatay ya da dikey polarizasyon miktarını, S_2 , doğrusal -45° ya da 45° polarizasyon derecesini ve son olarak S_3 ise sağa ya da sola dairesel polarizasyon miktarını göstermektedir.

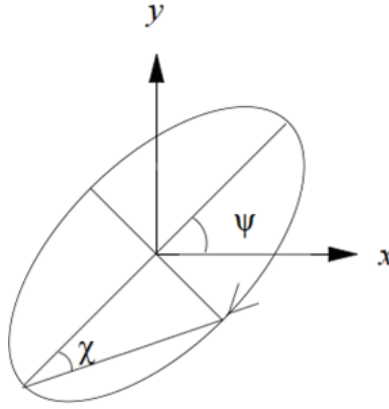
Schwarz eşitsizliği kullanılarak, polarize bir ışığın her hangi bir durumunda denklem (30) ile verilen eşitsizliği sağladığı gösterilebilir.

$$S_0^2 \geq S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 \tag{30}$$

Bu tanımlardan sonra polarizasyon elipsinin Stokes parametreleri yardımıyla yönelme açısı (ψ), eliptiklik açısı (χ) ve polarizasyon derecesi (ρ) şu şekilde tanımlanmaktadır;

$$\begin{aligned}
\tan 2\psi &= \frac{2E_{0x}E_{0y}\cos\delta}{E_{0x}^2 - E_{0y}^2} = \frac{S_2}{S_1} \\
\sin 2\chi &= \frac{2E_{0x}E_{0y}\sin\delta}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} = \frac{S_3}{S_0} \\
\rho &= \frac{I_{Pol}}{I_{Tot}} = \frac{(S_1^2 + S_2^2 + S_3^2)^{1/2}}{S_0}, \quad 0 \leq \rho \leq 1
\end{aligned} \tag{31}$$

Eliptiklik derecesi ve yönelme açısı Şekil 23 ile bir görsel üzerinde verilmiştir.



Şekil 23: Polarizasyon elipsi

2.3.2. Stokes parametrelerinin klasik yöntem ile ölçülmesi

Stokes parametrelerinin ölçülmesi işlemi, optik ışınlarının faz geciktirici (retarder) ve polarizer olarak bilinen iki optik elemandan geçirilmesi ile yapılmaktadır. Geciktirici, elektriksel alan bileşenlerinin arasında bir faz farkı olmasını sağlamaktadır (32).

$$\begin{aligned}
E'_x &= E_x e^{i\frac{\varphi}{2}} \\
E'_y &= E_y e^{-i\frac{\varphi}{2}}
\end{aligned} \tag{32}$$

Bir polarizerin elektriksel alan üzerindeki etkisi denklem (33) ile ifade edilmektedir.

$$E = E'_x \cos\theta + E'_y \sin\theta \tag{33}$$

Elektriksel alan sıralı olarak bu iki bileşenden geçtiğinde, alan üzerindeki toplam değişim denklem (34) ile ifade edilir:

$$E = E'_x e^{i\frac{\varphi}{2} \cos\theta} + E'_y e^{-i\frac{\varphi}{2} \sin\theta} \quad (34)$$

Toplam alanın parlaklık değeri ise, $I = EE^*$ şeklindedir. Bu durumda elde edilen toplam ışımaya denklem (35) ile verilir.

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} \left[(E_x E_x^* + E_y E_y^*) + (E_x E_x^* - E_y E_y^*) \cos 2\theta + (E_x E_y^* + E_y E_x^*) \cos \varphi \sin 2\theta + i(E_x E_y^* - E_y E_x^*) \sin \varphi \cos 2\theta \right] \quad (35)$$

(35) ile verilen denklem Stokes parametreleri ile yazıldığında;

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} [S_0 + S_1 \cos 2\theta + S_1 \cos \varphi \sin 2\theta + S_3 \sin \varphi \cos 2\theta] \quad (36)$$

şeklinde elde edilir. Bu durumda farklı polarizer ve faz-kaydırıcı açılarında elde edilen toplam ışımaya değerleri denklem (37) ile verilmiştir. Denklemde I değerlerinin ilk parametresi doğrusal polarizerin açısını, ikinci parametresi ise faz kaydırıcının açısını temsil etmektedir.

$$\begin{aligned} I(0^\circ, 0^\circ) &= \frac{1}{2} [S_0 + S_1] \\ I(45^\circ, 0^\circ) &= \frac{1}{2} [S_0 + S_2] \\ I(90^\circ, 0^\circ) &= \frac{1}{2} [S_0 - S_1] \\ I(45^\circ, 90^\circ) &= \frac{1}{2} [S_0 + S_3] \end{aligned} \quad (37)$$

Stokes parametrelerinin ilk üç elemanı faz-kaydırıcı olmadan da elde edilebilmektedir.

Bu aşamadan sonra elde edilen dört denklem çözüldüğünde ise Stokes parametreleri şu şekilde olmaktadır;

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0^\circ, 0^\circ) + I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_1 &= I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_2 &= 2I(45^\circ, 0^\circ) - I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \\ S_3 &= 2I(45^\circ, 90^\circ) - I(0^\circ, 0^\circ) - I(90^\circ, 0^\circ) \end{aligned} \quad (38)$$

2.3.3. Polarizasyonun Stokes parametreleri ile tanımlanması

Stokes parametreleri bir vektör halinde denklem (39) ile gösterilebilir.

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ 2E_{0x}E_{0y}\cos\delta \\ 2E_{0x}E_{0y}\sin\delta \end{bmatrix} \quad (39)$$

2.3.3.1. Apolarize ışık

Apolarize ışığın farklı açılardaki faz-kaydırıcı ve polarizer ile ölçülen değerlerinde her hangi bir farklılık görülmemektedir ve elde edilen ışıma değeri denklem (40) ile verilmiştir.

$$I(\theta, \varphi) = \frac{1}{2} S_0$$
$$S_1 = S_2 = S_3 = 0 \quad (40)$$

Apolarize ışık ile elde edilen ışıma değerleri faz-kaydırıcı ve polarizer açılarından bağımsızdır. Bir ışık tam polarize olduğu zaman $S_0 = \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ eşitliği sağlanmaktadır. Işığın polarizasyon derecesi düştükçe (kısmen polarize, partially polarized) $S_0 > \sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}$ eşitsizliği sağlanmaktadır.

2.3.3.2. Doğrusal yatay ve dikey polarize ışık

Doğrusal yatay polarize ışığın y bileşeni sıfıra eşittir ($E_{0y} = 0$). Bütün enerji elektriksel alanın x bileşenindedir ($I_0 = E_{0x}^2$). Doğrusal dikey polarize ışığın da x bileşeni sıfıra eşittir ($E_{0x} = 0$). Bütün enerji elektriksel alanın y bileşenindedir ($I_0 = E_{0y}^2$). Doğrusal yatay polarize ışık denklem (41) ile, doğrusal dikey polarize ışık ise denklem (42) ile verilmiştir.

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (41)$$

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (42)$$

2.3.3.3. Doğrusal 45° ve -45° polarize ışık

Bu durumda ise elektriksel alanın x ve y bileşenlerinin enerjileri birbirine eşit ($E_{0x} = E_{0y} = E_0$), faz farkları ise 45° 'de sıfır ($\delta = 0^\circ$), -45° 'de ise 180 ($\delta = 180^\circ$) olmaktadır. Doğrusal 45° ve doğrusal -45° polarize ışığın Stokes vektörü ile gösterimi sırasıyla denklem (43) ve (44) ile gösterilmiştir.

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I_0 = 2E_0^2 \quad (43)$$

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad I_0 = 2E_0^2 \quad (44)$$

2.3.3.4. Sağa ve sola dairesel polarize ışık

Sağa dairesel polarize durumunda, $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ ve $\delta = 90^\circ$ (denklem (45)), sola dairesel polarize durumunda ise $E_{0x} = E_{0y} = E_0$ ve $\delta = -90^\circ$ (denklem (46)) olmaktadır.

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad I_0 = 2E_0^2 \quad (45)$$

$$s = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}, \quad I_0 = 2E_0^2 \quad (46)$$

3. BİLGİSAYAR GÖRMESİNDE POLARİZASYON

3.1. Bulanıklığın Ortadan Kaldırılması ve Derinlik Haritası

Herhangi bir kaynaktan çıkan ışınlar çeşitli nesnelerle ve havadaki partiküller ile etkileşime girmektedir. Bu sebeple havada bulunan çeşitli partiküllerin (CO₂, H₂O vb.) yoğunluğunun ya da gözlemciye olan mesafenin artmasıyla görüş mesafesi düşmekte, nesnelerin görünümünde bulanıklıklar ortaya çıkmaktadır. Nesnelerin ve havadaki partiküllerden kaynaklı ışınların polarizasyon durumları incelenerek görüş mesafesinin artırılması ve nesnelerin daha net bir şekilde ortaya çıkması sağlanabilmektedir. Nesne görünümündeki bulanıklığın ortadan kaldırılması ve görüş mesafesinin artırılması için genel bir çözüm sağlayan ve literatürde [15] ile sunulan yöntem bu bölümün ilerleyen kısımlarında detaylandırılmıştır.

Bir imge temel olarak, “nesnelerin ışıması” ve “yol ışıması” diye anılan iki ana bileşenden oluşur şeklinde bir tanımlama yapmak mümkündür. Havadaki partiküllerden kaynaklanan ışımlar ise yol ışıması olarak adlandırılmaktadır.

Nesne ışımlarının polarize olmadığı ve doğrudan iletim durumunda da polarizasyon durumlarının değişmediği, yol ışımasının ise kısmi doğrusal polarize olduğu kabul edilmektedir [15].

Yol ışıması, mesafe arttıkça üstel fonksiyon ile artacak (47), nesne ışımları ise mesafe arttıkça üstel fonksiyon ile azalacak (48) şeklinde modellenmektedir.

$$A = A_{\infty}(1 - e^{-\beta z}) = A^{\parallel} + A^{\perp} \quad (47)$$

$$T = Re^{-\beta z} \quad (48)$$

T , nesnelerin ışımasını, A ise yol ışımasını temsil etmektedir. Yol ışımasının yansıma düzlemine dik bir şekilde kısmi doğrusal polarize olduğu varsayılmaktadır. Doğrusal polarize filtre kullanılarak elde edilen imgeler sayesinde görüntülerdeki netliğin artırılması sağlanmaktadır.

Doğrusal polarize filtre, yansıma düzlemine dik duruma getirildiğinde elde edilen toplam ışıma miktarı azami değerine ulaşmaktadır. Bu durumda elde edilen ışıma miktarı denklem (49) ile tanımlanır. Filtre, yansıma düzlemine paralel duruma getirildiğinde ise elde edilen toplam ışıma miktarı asgari değere düşmektedir.

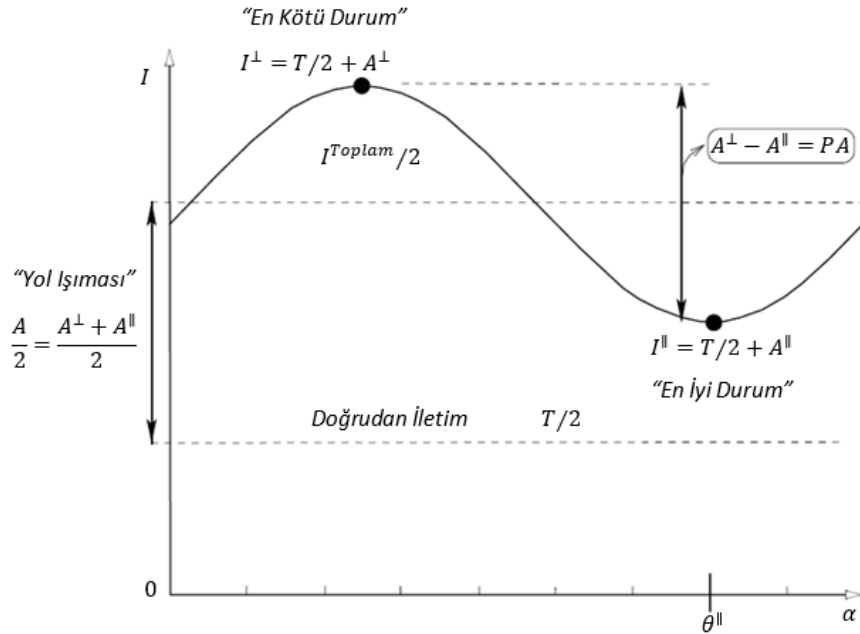
Asgari durumda elde edilen ışınım miktarı da denklem (50) ile ifade edilmektedir. Denklem (51) ile verilen ifade ise yol ışınımının polarize olma miktarını ifade etmek için kullanılmaktadır.

$$I^{\perp} = T/2 + A^{\perp} \quad (49)$$

$$I^{\parallel} = T/2 + A^{\parallel} \quad (50)$$

$$P = \frac{A^{\perp} - A^{\parallel}}{A} \quad (51)$$

Kamera önüne yerleştirilen bir doğrusal polarize filtrenin açısal olarak 360° döndürülüp her açıda bir pikselin üzerine düşen enerji hesaplandığında Şekil 24 ile verilen grafik elde edilmektedir. Yol ışınımı, yansıma düzlemine dik doğrusal polarize olduğu için filtre ile yansıma düzlemi arasındaki açı 90° olduğunda azami enerji elde edilir (Şekil 24).



Şekil 24: Polarize filtre açısına göre piksel enerjisi [15].

Şekil ile verilen doğrudan iletim seviyesi, nesne ışınımını temsil etmektedir. Nesne ışınımının apolarize olduğu varsayıldığı için doğrusal polarize filtrenin herhangi bir açısında polarize filtreden geçebilen nesne ışınımı miktarı ilgili nesnenin ışınımının yarısına eşit olmaktadır ($T/2$). Yol ışınımı mükemmel

polarize olmadığından polarize filtre ile elde edilen asgari ışıma seviyesi ($I^{\parallel}$) doğrudan iletim seviyesine eşit olmamaktadır ($I^{\parallel} \neq T/2$). Polarize filtrenin açıları değiştirilip $I^{\parallel}$ ve $I^{\perp}$ anında iki adet polarize fotoğraf alındıktan sonra ilgili modeller kullanılarak nesne ışımalarına ve yol ışımalarına ulaşılmaya çalışılmaktadır.

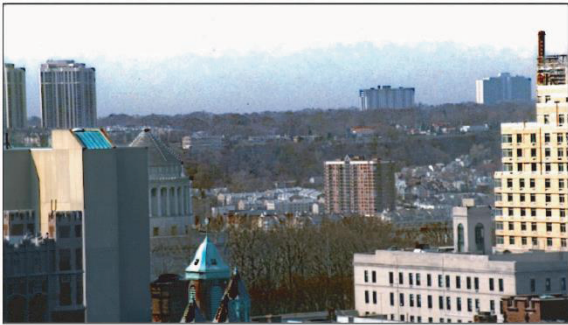
Kullanılan modelde her bir piksel için üç tane bilinmeyen bulunmaktadır (R , A , ve βz). Bu üç değer, bir pikselin parlaklık miktarını ortaya çıkarmaktadır. Fakat A değeri βz ile doğrudan ilintili olduğu için bilinmeyen sayısı temelde iki taneye inmektedir. Denklem (49) ve (50) vasıtası ile bu iki bilinmeyen kestirilebilmekte ve ortamda sis olmadığı durumdaki nesne ışması olan R değerine ulaşılabilmektedir. Bu değerlerden βz ile havadaki moleküllerin ışması elde edilip problemin çözümü için kullanılan model sayesinde sonuç olarak bir derinlik haritası da ortaya çıkmaktadır. Şekil 25 ve Şekil 26 ile verilmiş görüntülerden elde edilen netliği artırılmış görüntü ve derinlik haritası sırasıyla Şekil 27 ve Şekil 28 ile verilmiştir.



Şekil 25: En iyi durum, $I^{\parallel}$ [15]



Şekil 26: En kötü durum, $I^{\perp}$ [15]



Şekil 27: Netleştirilmiş görüntü [15]



Şekil 28: Derinlik haritası [15]

Görüntüde ön tarafta bulunan mavi kubbeli yapının mesafesi derinlik haritasında yüksek çıkmıştır. Aynı şekilde sahnenin sol tarafında bulunan binanın güneş alan

bölgesi uzak mesafe, gölgede kalan bölümü ise yakın mesafe olarak ortaya çıkmıştır.

Havanın polarize olmaması durumunda Şekil 24 ile verilen grafikteki dalgalanma olmayacak ve iki farklı değer elde edilemeyecek ve algoritma başarısız olacaktır. Ek olarak, eğer kamera bakış yönü ışık kaynağına (güneşe) dik ve hava mükemmel polarize ise tek bir polarize filtre ile sis ortadan kaldırılabilir fakat bu durum çok nadir ortaya çıkmaktadır.

Sualtı uygulamalarında obje ışımasındaki mesafe ile ışımanın azalması etkisine (doğrudan iletim, denklem (52)) ek olarak ileri saçılma (forward scattering, denlem (53)) etkileri de eklenmektedir. İleri saçılmadan kasıt, nesnenin etrafının bulanık görünmesi etkileridir (nesneden çıkan ışığın etrafa saçılması) ve mesafe arttıkça etkisi de artmaktadır.

Bu durumda kameraya gelen sinyaller nesne ışımasının doğrudan iletimi ve ileri saçılma etkilerinin toplamından (denklem (54)) oluştuğu varsayılmaktadır. Bundan sonra da efektif nesne ışıması tanımı yapılmakta (denklem (55)) ve toplam nesne ışıması denklem (56) ile modellenmektedir.

$$D(x, y) = L_{object}(x, y) * e^{-\beta z} \quad (52)$$

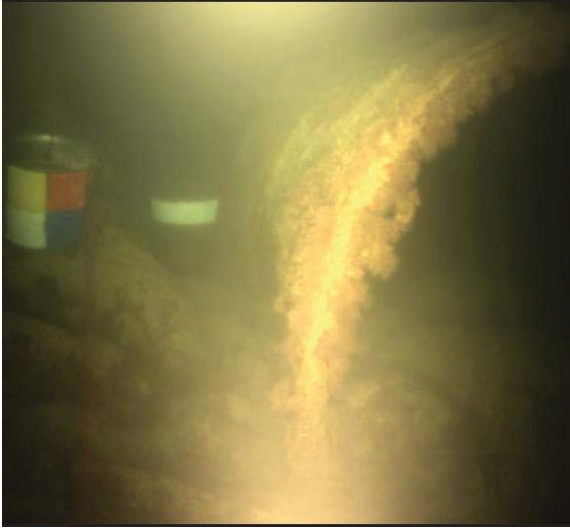
$$F(x, y) = D(x, y) * g_z(x, y) \quad (53)$$

$$S = D + F \quad (54)$$

$$L_{object}^{effective} = L_{object} + L_{object} * g_z \quad (55)$$

$$S = e^{-\beta z} L_{object}^{effective} \quad (56)$$

Bu kısımda odaklanılan nokta L_{object} değeri yerine $L_{object}^{effective}$ değerinin bulunmasıdır. Bunun nedenini ise su altında görüşün düşmesindeki ana nedenin ileri saçılımın olmadığı varsayımdır. Şekil 29 sualtı görüntüsünün netleştirilmiş durumu Şekil 30 ile verilmiştir.



Şekil 29: Sualtı bulanık görüntü [16]



Şekil 30: Sualtı netleştirilmiş görüntü [16]

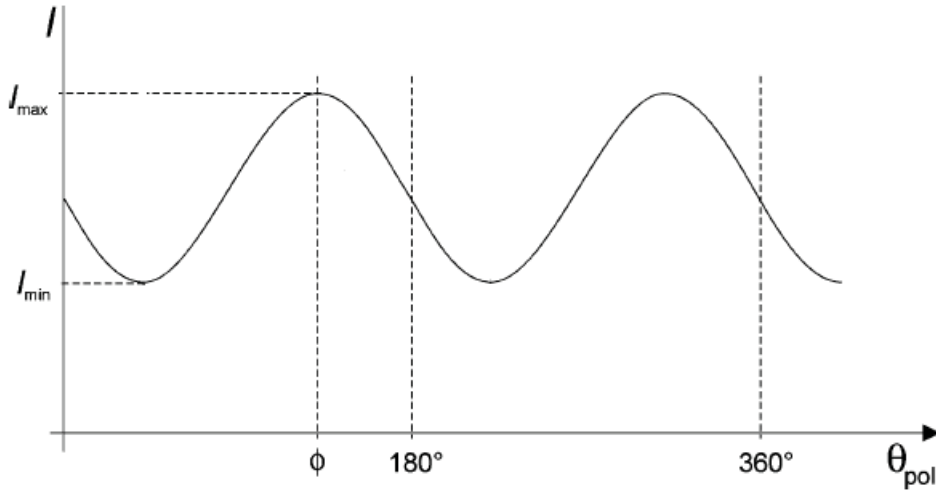
3.2. Üç Boyutlu Şekil Elde Etme

Yansıtıcı yüzeylerin geleneksel ışın tabanlı görüntü oluşturma teknikleri ile 3B şekillerinin çıkartılması, ışınların derinliğe göre değişim bilgisi mevcut olmadığında oldukça zor olmaktadır. Nesne üzerinden yansıyan ışınların polarizasyon durumlarının incelenmesi, ilgili problemin çözümü açısından ilave bir boyut sağlamaktadır. Polarizasyon kullanımının faydalı olabilmesi için nesne üzerinden yansıyan ışığın kısmi doğrusal polarize olması beklenmektedir [19]. İlgili koşulun gerçekleşme durumu ise oldukça yaygın olup 3B şekillerin elde edilmesi için karşılanamayacak herhangi bir kısıtlama getirmemektedir. Bunun nedeni ise ışık kaynaklarının ekseriyetinin apolarize olmasıdır. Apolarize bir ışık, metal ya da iletken olmayan yüzeyler üzerinden yansıdığı anda ise kısmi doğrusal polarize duruma gelmektedir.

Nesne şekli tespitinin hem dağınık yansımaya sahip hem de güçlü yansımaya sahip nesnelerin şekillerinin ortaya çıkarılabilmesi için ortak bir çözüm önerisi sunulması beklenmektedir. Polarizasyon temelli nesne şeklinin ortaya çıkarılması için ışığın, polarizasyon açısının doğru bir şekilde tespit edilmesine olanak sağlayacak kadar yüksek derecede polarize olması gerekmektedir. Nesne üzerinden gelen yansımaların 30° ile 85° açıları arasında olduğu durumlardaki polarizasyon derecesi genellikle yeterli olmaktadır [19].

Polarizasyon incelemesi “parlaklık”, “polarizasyon derecesi” ve “polarizasyon yönü” olmak üzere üç ana başlıktan oluşmaktadır. Polarizasyon yönü imgesindeki parlaklık değerleri açısal bilgi vermekte ve “faz imgesi” olarak ta adlandırılmaktadır. Nesne üzerine düşen apolarize ışığın kısmi doğrusal polarize olmuş olarak yansımından oluşturulan faz imgesi, yüzey normalleri hakkında bilgi vermektedir ve ilgili nesnenin şeklinin ortaya çıkarılabilmesini sağlamaktadır.

Nesnelerin 3B şekillerinin elde edilmesi için literatürde sunulan birden fazla yöntem [17, 18, 20, 21, 22] bulunmakla beraber algoritmaların temelini oluşturan [20] yöntemi bu bölümün ilerleyen kısımlarında detaylandırılmıştır. Önüne doğrusal polarize filtre konulmuş bir kamera ile filtrenin 0 ve 360 açıları arasında sürekli zamanlı olarak çevrilerek elde edilen görüntülerdeki bir pikselin parlaklık değerleri görselleştirildiğinde faz kayması farklı değerlerde olan sinüzoid bir grafik elde edilmektedir (Şekil 31).



Şekil 31: Piksel parlaklığı grafiği

İlgili grafiğin denklem olarak ifadesi (57) ile verilmiştir. Şekli çıkarılacak yüzeylerin dağıtıcı yansımaya (diffuse reflection) sahip olmaması beklenmektedir. Yüzeyden gelen polarize ışınların yoğunluğu, polarizasyon derecesi (59) ve polarizasyon açıları hesaplanabilmektedir. Polarize filtrenin açıları 0°, 45° ve 90° ye ayarlanıp alınan ölçümler ile polarizasyon açısı ve derecesi değerleri sırasıyla denklem (58) ve (59) kullanılarak hesaplanabilmektedir [14]. Fakat bu hesaplamalar gürültüye hassas durumdadırlar. Bu nedenle polarize filtrenin daha küçük açı aralıklarında alınan ölçümlerin “doğrusal-olmayan eğri yakıştırma” algoritmalarıyla ilgili

polarizasyon açısı ve derecesi bilgileri daha gürbüz bir şekilde ortaya çıkartılabilmektedir.

$$I(\theta_{pol}, \phi) = \frac{I^{max} - I^{min}}{2} \cos(2\theta_{pol} - 2\phi) + \frac{I^{max} + I^{min}}{2} \quad (57)$$

$$\phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{I_0 + I_{90} - 2I_{45}}{I_{90} - I_0} \right) + 90^\circ \quad (58)$$

$$\rho = \frac{I^{max} - I^{min}}{I^{max} + I^{min}} = \frac{I_{90} - I_0}{(I_{90} + I_0) \cos 2\phi} \quad (59)$$

3.2.1. Tam yansıma durumunda

Tam yansıma durumunda yansıyan ışık demetleri yansıma düzlemine paralel durumdadırlar. Kamera önüne yerleştirilen doğrusal polarizerin açısı, yüzey yansıma açısına göre 90° olduğunda kamera üzerine düşen ışık miktarı azami değerine ulaşmaktadır.

Yüzeydeki her bir noktanın zenit açısı (θ) polarizasyon derecesi kullanılarak denklem (60) ile hesaplanmaktadır.

$$p_s = \frac{2 \sin^2 \theta \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 - \sin^2 \theta - n^2 \sin^2 \theta + 2 \sin^4 \theta} \quad (60)$$

Denklem (60) incelendiğinde polarizasyon derecesi denkleminin yüzeyin kırılma indisine (η) bağlı olduğu görülmektedir. Fakat ilgili katsayının iletken olmayan malzemeler için 1.3 ve 1.6 arasında olduğu bilinmekle beraber polarizasyon derecesi denkleminin kırılma indisine bağlılığı düşük seviyede kalmaktadır.

Zenit açısının bulunmasından sonra yüzey normalinin hesaplaması denklem (61) ile verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \sin \theta \\ \sin \alpha \sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix} \quad (61)$$

α , Şekil 31 ile verilen grafikteki asgari noktalarda x eksenindeki açıyı temsil etmektedir. Yani α değerinin hesaplanabilmesi için faz değerlerinin bilinmesi gerekmektedir.

3.2.2. Dağınık yansıma durumunda

Dağınık yansıma formu şu şekilde ortaya çıkmaktadır. Yüzey üzerine düşen ışık demeti kırınıma uğrayıp yüzeye nüfuz eder. Yüzey içindeki rastgele saçılmalardan sonra ışık demetinin bir kısmı havaya doğru tekrar kırınıma uğrar ve yüzey sınırında tekrardan kırılarak kısmi doğrusal polarize duruma gelir.

Dağınık yansıma durumunda polarizasyon derecesinin zenit açısına bağlı eşitliği denklem (62) ile ifade edilmiştir.

$$p_d = \frac{(n - 1/n)^2 \sin^2 \theta}{2 + 2n^2 - (n + 1/n)^2 \sin^2 \theta - 4 \cos \theta \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (62)$$

Zenit açısının bulunması denklem (60) çözümü ile aynıdır. Yüzeyin dağınık yansıma yapmasından dolayı tam yansımaya göre polarizasyon açısında 90° fark olmaktadır. Sonuç olarak, Şekil 31 ile verilen α değerine 90° eklenmesi gerekmektedir.

3.3. Yarı-Yansımaların Birbirinden Ayrılması

Çeşitli saydam yüzeylerden (genellikle cam ve su yüzeyi) elde edilen imgeler incelendiğinde imgelerde iki farklı sahnenin olduğu görülmektedir (Şekil 32). Birinci sahne, yansıma yüzeyinin arka bölümünden gelen ışınların oluşturduğu sahne (iletken sahne, Şekil 33), ikinci sahne ise yansıma yüzeyinin üzerinden yansıyan ve kameraya ulaşan ışınların oluşturduğu sahnedir (yansıyan sahne, Şekil 34). Polarizasyon sayesinde çift görüntüye sahip imge üzerinden iletilen ve yansıyan sahnelerin birbirlerinden ayrılması mümkün olmaktadır. Sahnelerin polarizasyon kullanılarak birbirinden ayrıştırılabilmesi için üç koşul bulunmaktadır;

1. Cisimlerden yüzey üzerine düşen ışıkların polarizasyonunun ihmal edilebilir bir seviyede olması ve polarizasyonların temel olarak yüzeyden kaynaklanması gerekmektedir.
2. İletilen ve yansıyan sahnelerin birbirinden bağımsız olması gerekmektedir.
3. İmgenin tamamında her iki sahnenin birleşiminin aynı doğrusal denklem ile ifade edilebilmesi gerekmektedir.



Şekil 32: Yarı-Yansımali imge [16]

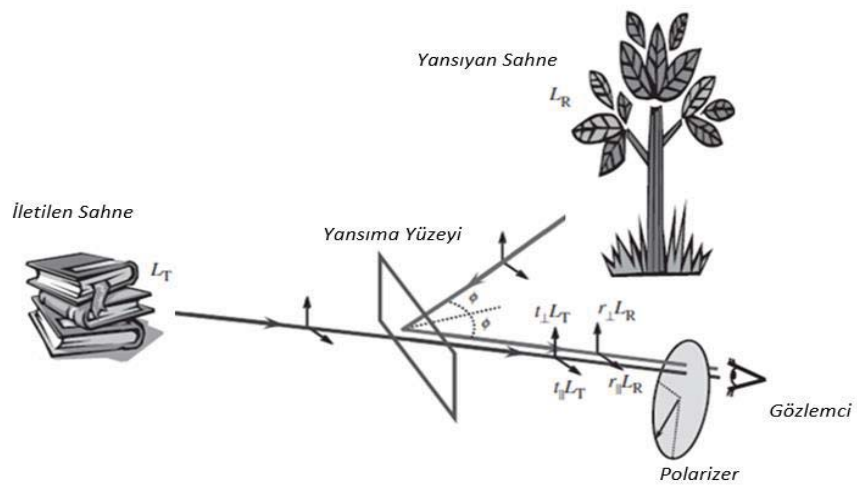


Şekil 33: İletilen imge [16]



Şekil 34: Yansıyan imge [16]

İlgili sahnelerin bir imgede oluşma modeli Şekil 35 ile verilmiştir.



Şekil 35: Yarı-Yansımali yüzey modeli [16]

Yansıma yüzeyinden kaynaklanan polarizasyon durumu yansıyan ve iletilen sahne için farklılıklar arz etmektedir.

3.3.1. Korelasyon tabanlı ayırma yöntemi

Polarize filtrenin yansıma düzlemine dik ve paralel olduğu durumlarda alınan iki imgenin ilgili sahnelerin birleşme modellerinin tanımlanmasıyla beraber iletilen ve yansıyan sahneler birbirlerinden ayrılabilir. Sahnelerin ayrılması için [16] ile sunulan yöntem bu bölümün ilerleyen kısımlarında detaylandırılmıştır.

Polarize filtrenin yansıma düzlemine dik ve paralel olduğu durumlarda elde edilen görüntülerin matematiksel modeli denklem (63) ve (64) ile verilmiştir.

$$I_{\perp} \approx \left(\frac{L_R}{2}\right)r_{\perp} + \left(\frac{L_T}{2}\right)t_{\perp} \quad (63)$$

$$I_{\parallel} \approx \left(\frac{L_R}{2}\right)r_{\parallel} + \left(\frac{L_T}{2}\right)t_{\parallel} \quad (64)$$

İlgili görüntülerdeki ışın miktarları yansıma yüzünün yansıtma ve iletim katsayılarıyla ilintili olmaktadır. $I_{\perp}$ ve $I_{\parallel}$ görüntülerindeki ışın miktarları ilgili şeffaf yüzeyin yansıtıcılık ve iletim katsayılarıyla orantılı olmaktadır. Yansıtıcılık ve iletim katsayıları da yansıma açısına göre değişim göstermektedir ($t_{\perp} \neq t_{\parallel}$ ve $r_{\perp} \neq r_{\parallel}$).

Yansıyan ve iletilen sahnelerden gelen ışınların apolarize olduğu kabul edilmesinden dolayı ilgili sahnelere ait nesne ışınlarının sadece yarısı polarize filtreden geçebilmektedir ($L_T/2$, $L_R/2$).

Denklemlerde altı bilinmeyen iki tane bilinen değişken bulunmaktadır. Fakat $r_{\perp}$, $r_{\parallel}$, $t_{\perp}$ ve $t_{\parallel}$ değerleri Fresnell katsayılarından çıkartılabilmektedir. Yansıma katsayıları ($r_{\perp}$, $r_{\parallel}$, $t_{\perp}$ ve $t_{\parallel}$) yansıma yüzeyinin cinsine de bağlıdır. Yansımaların genel olarak su ve camlardan kaynaklandığı düşünüldüğünde bu tür nesnelerin yansıma katsayıları bilinebilmektedir. Ek olarak yansıma katsayıları ışığın yüzey üzerine gelme açısına (angle of incidence) da bağlı olmaktadır ve bu açının değeri her zaman bilinmemektedir. Bu nedenle açığa bir değer verdikten sonra elde edilen görüntülerin korelasyonuna bakılmaktadır. Açık değiştirilip tekrar tekrar korelasyon hesaplanmakta ve korelasyonun asgari olduğu noktada iki görüntünün de birbirinden ayrıştığı kararlaştırılmaktadır [16]. Bu işlemler gri tonlu imgeler üzerinden yapılmaktadır fakat RGB (Kırmızı Yeşil Mavi, **R**ed **G**reen **B**lue)

görüntülerde her kanal ayrı ayrı işlendikten sonra elde edilen 3 kanalın birleştirilmesiyle sonuç imgelerini RGB olarak elde etmek mümkün olmaktadır.

3.3.2. Bağımsız bileşenler analizi ile ayırma yöntemi

Bağımsız bileşenler analizi (Independent Component Analysis, ICA), birbirinden bağımsız iki kaynağın iki farklı doğrusal denklem ile birleşmesi ile elde edilen yeni verilerin analiz edilerek bağımsız bileşenlere ulaşılmasını sağlamaktadır. Algoritma sadece doğrusal denklem ile elde edilen verileri kullanmaktadır. Yansıyan ve iletilen sahnenin birbirinden ayrılması için bağımsız bileşenler algoritmasının kullanıldığı [23] ile verilen yöntem ilerleyen bölümde detaylandırılmıştır.

İletilen ve yansıyan sahnelerdeki görüntülerin birbirinden ayrılabilmesi için polarize filtre ile her iki sahnenin de farklı ağırlıklarda katkıda bulunduğu iki farklı görüntü alınmaktadır (denklem (65)). Dolayısıyla iki farklı birleşimi temsil eden birleşim matrisinin (denklem (66)) kerte değerinin 2 olması gerekmektedir. İlgili yüzeyden alınan görüntünün polarizasyon durumunun değişmemesi durumunda ilgili matrisin kerte değeri 2 olmamakta ve iletilen ve yansıtılan sahnelerin birbirinden ayrıştırılması işlemi başarısız olmaktadır.

$$y_1 = aP + bR \quad (65)$$

$$y_2 = cP + dR$$

$$A = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (66)$$

Denklem (65) ile verilen eşitlikte altı tane bilinmeyen iki tane bilinen bulunmaktadır. Altı farklı bilinmeyenin iki denklem ile çözülmesi mümkün değildir. Bu nedenle kestirim işlemlerinin kullanılması gerekmektedir.

Elde edilen iki imgenin bir tanesinin ağırlıklandırılıp diğer imgeden çıkarılması yöntemi kullanılarak A matrisinin değerleri elde edilip iki bağımsız kaynak birbirinden ayrıştırılabilmektedir. Fakat bu durum anlık bir çözüm sağlamakta ve farklı durumlarda elde edilen imgelerdeki sahneleri birbirinden ayrılabilmesi için otomatik bir çözüm sunmamaktadır. A matrisinin tersinin bulunabilmesi için otomatik bir yöntemin sunulması gerekmekte ve sahnelerin birbirinden ayrılabilmesi için genel bir çözüm olması gerekmektedir.

Bütün bu varsayımlardan sonra tekil değer ayrıştırma yöntemi ile A matrisi ayrıştırılıp (denklem (67)) her bir ayrışma elemanının ayrı ayrı bulunması amaçlanmaktadır.

$$A = R_1 S R_2 \quad (67)$$

Burada R_1 ve R_2 , ortogonal rotasyon matrisleridir. S ise köşegen (ölçekleme matrisi) bir matristir (Şekil 36).

Birbirinden bağımsız iki kaynağın ortak olasılık dağılımı çizdirildiğinde elde edilen grafik kare şeklinde olmaktadır. Bağımsız kaynaklar çeşitli doğrusal denklemler ile birleştirildikçe elde edilecek dağılımlar dönmekte, ağırlıklandırmaya uğramakta ve bağımsızlık değerleri azalmaktadır. ICA kullanımının temel amacı, çeşitli dönme ve ölçeklendirme dönüşümlerine uğramış bu paralelkenarı tekrardan kare duruma (bağımsız kaynaklar haline getirme) getirmeye çalışmaktır.

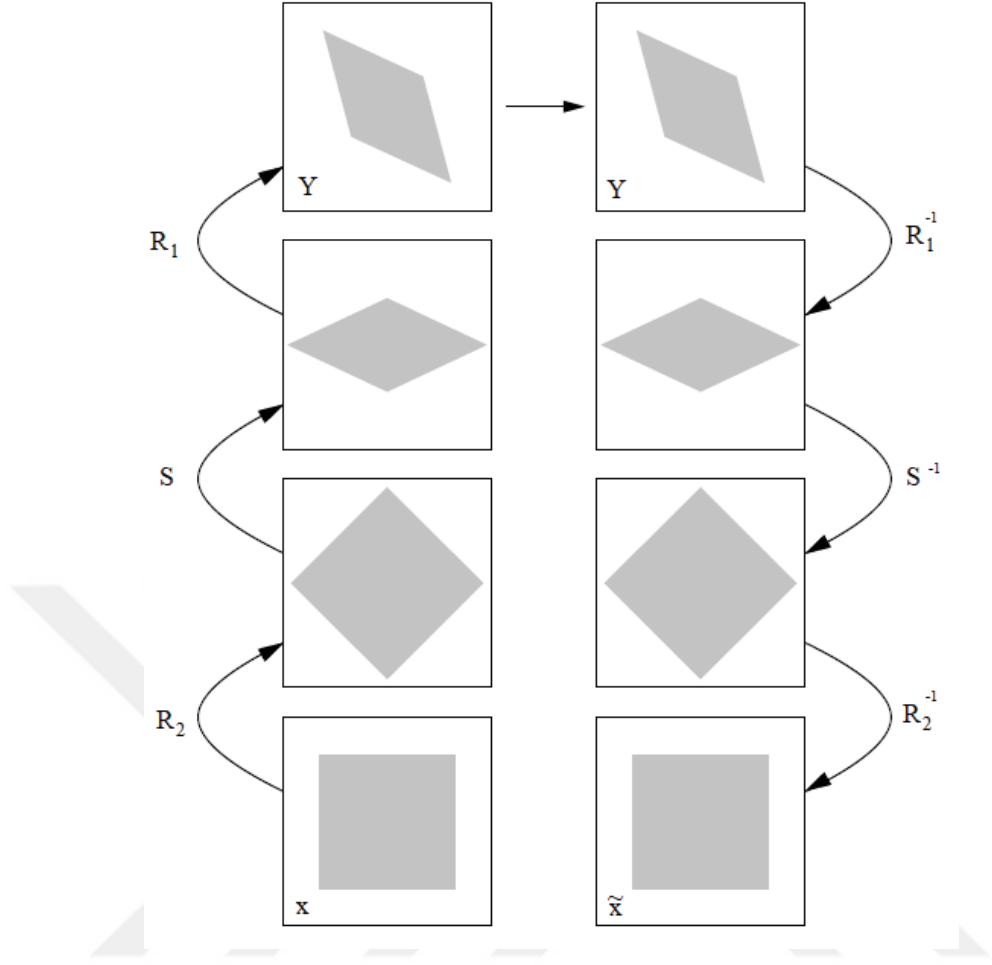
R_1^{-1} matrisinin görevi, paralelkenarın uzun ve kısa eksenini birincil eksene hizalayacak bir dönüşümü uygulamaktır. R_1 matrisinin bulunabilmesi için paralel kenarın azami ve asgari varyansın bulunduğu eksenlerin bulunması ve eksenlerin temel eksen ile olan açısı hesaplanmaktadır. Herhangi bir eksenindeki varyans denklemi (68) ile tanımlanmaktadır. İlgili denklemin türevi alınıp sıfıra eşitlenip çözüldükten sonra θ dönme açısı bulunmaktadır (denklem (69)). Daha sonra R_1 matrisinin kestirimi denklem (70) ile ifade edilmektedir.

$$E(\theta_1) = \sum_1^N \left[(y_1(i) - y_2(i)) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{pmatrix} \right]^2 \quad (68)$$

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\sum_1^N r^2(i) \sin(2\phi_i)}{\sum_1^N r^2(i) \cos(2\phi_i)} \right] \quad (69)$$

$$\phi_i = \tan^{-1}(y_2(i)/y_1(i))$$

$$\widetilde{R}_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) \\ -\sin\theta_1 & \cos(\theta_1) \end{bmatrix} \quad (70)$$



Şekil 36: Dönüşüm matrislerin dönme, ölçeklendirme ve yeniden dönme etkileri [23]

Paralel kenar eksenleri ana eksen üzerine oturtulduktan sonra, paralel kenarın ağırlıklandırılıp elmas şeklini alması gerekmektedir. Her bir eksene ait ölçeklendirme değeri, azami ve asgari varyans ekseni boyunca varyansların hesaplanması ile belirlenir (denklem (71)). Sonuç olarak elde edilen ağırlıklandırma matrisi denklem (72) ile verilmiştir.

$$s_1 = \sum_1^N \left[(y_1(i) - y_2(i)) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) \end{pmatrix} \right]^2 \quad (71)$$

$$s_1 = \sum_1^N \left[(y_1(i) - y_2(i)) \begin{pmatrix} \cos(\theta_1 - \pi/2) \\ \sin(\theta_1 - \pi/2) \end{pmatrix} \right]^2$$

$$\tilde{S} = \begin{bmatrix} s_1^{-1} & 0 \\ 0 & s_2^{-1} \end{bmatrix} \quad (72)$$

Herhangi bir matrisin $\tilde{S}$ matrisi ile çarpılması beyazlatma işlemi olarak ta bilinmektedir.

Son olarak elmas şeklinde getirilen paralelkenarın kare durumuna getirilebilmesi için yeniden dönme işlemine tabi tutulması gerekmektedir. Dönme miktarını bulunması için de dördüncü kuvvetin (denklem (73)) kullanılması gerekir. y'_1 ve y'_2 değerleri, y_1 ve y_2 değerlerinin $\tilde{R}_1$ ve $\tilde{S}$ matrisi ile çarpılarak rotasyon ve ağırlıklandırılma işlemlerinden geçirilmiş durumlarıdır. İlgili denklemin çözümünden elde edilen açı değeri ve dönüşüm matrisi sırası ile denklem (74) ve (75) ile verilmiştir.

$$E(\theta_2) = \sum_1^N \left[(y'_1(i) - y'_2(i)) \begin{pmatrix} \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) \end{pmatrix} \right]^4 \quad (73)$$

$$\theta_2 = \frac{1}{4} \tan^{-1} \left[\frac{\sum_1^N r^2(i) \sin(4\phi_i)}{\sum_1^N r^2(i) \cos(4\phi_i)} \right] \quad (74)$$

$$\phi_i = \tan^{-1}(y'_1(i)/y'_2(i))$$

$$\tilde{R}_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & \sin(\theta_2) \\ -\sin\theta_2 & \cos(\theta_2) \end{bmatrix} \quad (75)$$

Bu yöntem kullanılarak Şekil 37 ve Şekil 38 ile verilen görüntülerin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 39 ve Şekil 40 ile verilmiştir. Yansıyan sahne kestirimi incelendiğinde iletilen sahneden de kalıntılar olduğu, yansıyan sahnenin yüksek doğrulukta ortaya çıkamadığı görülmektedir. Bunun nedeni, ilgili ayrıştırma işlemlerinin belli varsayımlar üzerinden yapıldığı ve gerçek ortamdan alınan verilerin bu varsayımları hatasız karşılayamadığıdır.

Bu çözümde iki belirsizlik ortaya çıkmaktadır. Birincisi, kestirimi yapılan A matrisindeki a ile b 'nin ve c ile d 'nin yerleri değişebilmektedir. Bu durum elde edilen sonuçlar açısından bir problem oluşturmamaktadır. İkincisi ise ölçek belirsizliğidir (denklem (76)).

$$A = \begin{bmatrix} a/\gamma & b/\gamma \\ c/\gamma & d/\gamma \end{bmatrix} \quad (76)$$

Bu belirsizlik ise, sonuç olarak elde edilen bağımsız kaynakların bütün parlaklık aralığına ölçeklendirilmesi ile çözülmektedir.



Şekil 37: İletilen ve yansıyan sahne 1 [23]



Şekil 38: İletilen ve yansıyan sahne 2 [23]



Şekil 39: İletilen sahne [23]



Şekil 40: Yansıyan sahne [23]

3.4. Nesne Tespiti

Herhangi bir sahnedeki nesnelerin ışığı doğal zeminlere kıyasla farklı şekillerde polarize ettikleri göz önünde bulundurularak tespit işlemlerinin performansları polarizasyon kullanılarak artırabilmektedir. Nesnelerin yüzeylerinden yansıyan veya yayılan ışık görünür ve kızılötesi dalga boyundaki spektral bantlarda kısmen polarize olmaktadır. Sonuç olarak, bu tür polarimetrik görüntüleme sistemleri, geleneksel yoğunluk görüntülerinde saptanamayan kontrast seviyelerinin gözlemlenmesiyle farklı malzemelerin karakterizasyonu için kullanılabilir [27].

3.4.1. Tam yansıma polarizasyonu kullanılarak malzeme tanıma

Nesneler üzerinden yansıyan ışığın polarizasyon özelliklerinin kullanılması ile iletken ve iletken olmayan nesneler birbirlerinden ayrılabilir. Apolarize bir ışık kaynağının metaller ve ametaller üzerinden yaptığı tam yansımalarından sonra ışığın polarizasyon karakteristikleri farklı yönde etkilenebilir [24].

Ametaller üzerinden tam yansıma yapan polarize olmayan bir ışık kısmı polarize hale gelmektedir. Fakat metaller üzerinden yansıdığı polarizasyon durumunu korumakta olduğu belirtilmektedir [24]. Bu durumun geçerli olması için de yüzeyin tam yansıma katsayısının dağınık yansıma katsayısından fazla olması gerekmektedir. Kamera önüne eklenen polarize filtrenin döndürülmesi vasıtasıyla ölçülen azami değerin asgari değere oranlanması ile elde edilen değerlerin (değer ne kadar büyük çıkarsa cisim ışığı o kadar yüksek doğrusal polarize ediyor demektir) eşiklenmesi ile sınıflandırma yapılmaktadır (Fresnel Ratio). Metodun çalışabilmesi için gelen ışık açısının $30^\circ < \theta < 80^\circ$ şeklinde olması beklenmektedir. Ayrıca yansıma yapılan yüzeyin dağınık yansıma katsayısı yüksek olduğunda sınıflandırma işlemi hata yapmaktadır. Örneğin dağınık yansıma katsayısı yüksek olan bir kâğıdı metal olarak sınıflandırabilmektedir. Ek olarak, cismin üzerine düşen ışığın apolarize olduğu varsayıldığı için, tersi bir durumda (temiz ya da bulutlu bir havadaki ışık kısmi doğrusal polarize olmaktadır) yine sınıflandırma işlemi hata yapmaktadır [24, 25].

3.4.2. Faz kayması ölçümü ile malzeme tanıma

Metaller ve ametaller üzerine düşen ışık yansıırken sadece polarizasyon durumlarında değil polarizasyon fazlarında da farklı davranışlar sergilemektedirler. Metallerden yansıyan ışığın dik bileşeninde gecikme meydana gelmektedir. Bu da polarizasyon faz açısında kaymalara neden almaktadır. Örnek olarak; metal üzerine düşen kısmi doğrusal polarize bir ışık, eliptik polarize olarak geri yansımaktadır. Geri yansıyan ışıktaki bu faz farkının belirlenmesi ile metal ve ametal sınıflandırması yapılabilir [26]. Bu yaklaşımda literatürde [24] ve [25] ile verilen çalışmalar gibi cismin üzerine düşen ışığın polarize olmaması veya belirli açılarla gelmesi gibi bir zorunluluk bulunmamaktadır.

3.4.3. Polarizasyon derecesi ile malzeme tanıma

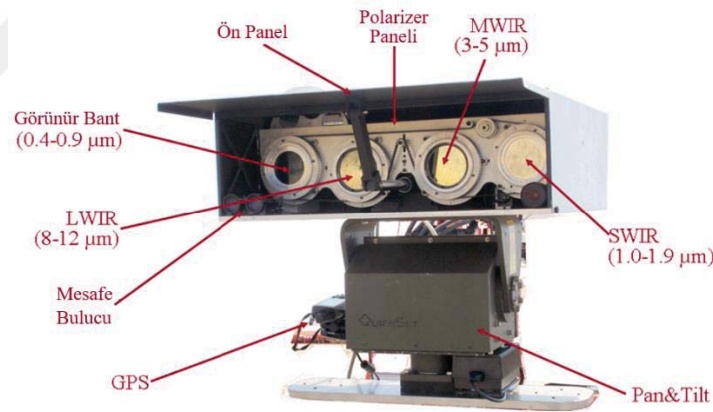
Nesne tespiti performansının artırılması için çeşitli bantlardan elde edilen polarize görüntülerden polarizasyon derecesi (denklem (77)), doğrusal polarizasyon derecesi (denklem (78)) ve polarizasyon açısı (denklem (79)) imgeleri çıkartılmaktadır.

$$DoP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} \quad (77)$$

$$DoLP = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0} \quad (78)$$

$$AoP(\theta) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{S_2}{S_1} \right) \quad (79)$$

Çeşitli bantlarda polarimetrik verilerin eş zamanlı olarak toplanması için kullanılan VIP SPICE sensör sistemi Şekil 41 ile verilmiştir.



Şekil 41: VIP SPICE çoklu bant polarimetrik sensör sistemi [28]

VIP SPICE sensör sistemi görünür bantta, kısa dalga, ortadalga ve uzun dalga kızılötesi bantlarda eş zamanlı olarak ölçüm yapabilmektedir [28]. İlgili sensör sistemi ile yaz ortamında elde edilen görüntüler Şekil 42 ve Şekil 43 ile verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde araç yollarının DoLP imgesinde net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir.



Şekil 42: Görünür bant orijinal görüntü
(Yaz ortamı) [28]

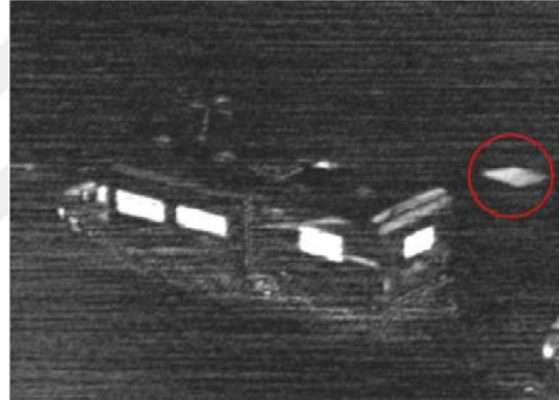


Şekil 43: Polarimetrik görüntüler ile elde
edilen DoLP imgesi[28]

Kış ortamında ise kar üzerine organik cam yerleştirilmiş, görünür bantta polarimetrik görüntüler ile DoLP imgesi elde edilmiştir (Şekil 44 ve Şekil 45).



Şekil 44: Görünür bant orijinal görüntü
(Kış ortamı) [28]



Şekil 45: Polarimetrik görüntüler ile elde
edilen DoLP imgesi [28]

Görüntüler incelendiğinde DoLP imgesinde araç camlarının ve organik camın net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Özellikle organik cam orijinal görüntüde hiç sezilemez durumda iken DoLP imgesinde belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır.

ABD Ordu Araştırma Laboratuvarı, Hava Kuvvetleri Araştırma Laboratuvarı ve Arizona Üniversitesi, 2008 yılında kızılötesi polarizasyon görüntüleme üzerine çeşitli ölçümler alarak deneyler gerçekleştirdiler. Deneyler sonucunda, askeri suni hedef ile doğal arka plan polarizasyon özellikleri arasındaki belirgin farklılıkların var olduğunu ortaya çıkarmışlardır (Şekil 46 ve Şekil 47). Böylece polarize

görüntülemeyle birbirinden farklı hedeflerin ayırt edilebileceğini göstermişlerdir [29].



Şekil 46: Bir ağaç tarafından bir kısmı gölgelenen askeri aracın görünür banttaki orijinal görüntüsü [29]



Şekil 47: Görünür bant sahnenin polarimetrik görüntülerinden oluşturulan DoLP imgesi [29]

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Polarize görüntülerin çekilmesinde kullanılan düzenek Şekil 48 ile verilmiştir. Düzenekte Cannon markasının EOS 700D modeli fotoğraf makinası 18-55 mm lens ile kullanılmıştır (Şekil 49). Polarize filtre olarak ise fotoğraf makinası lensi ile uyumlu ve el yordamıyla çevrilen Hoya markasının 58 mm HD dairesel polarize filtresi kullanılmıştır (Şekil 50). Düzenekte ek olarak bir tane üç-ayak bulunmaktadır. Bu da fotoğraf makinasının sabitlenmesi ve farklı polarizasyon filtresi açısında alınan görüntülerin aynı koşullarda elde edilmesine yardımcı olmaktadır.



Şekil 48: Test düzeneği



Şekil 49: Testlerde kullanılan fotoğraf makinası



Şekil 50: Testlerde kullanılan eliptik polarize filtre

Polarize filtre 0°-360° derece arasında sürekli olarak çevrilebilmekte ve farklı açılarda görüntüler elde edilebilesini sağlamaktadır. Bir açıda görüntü alındıktan

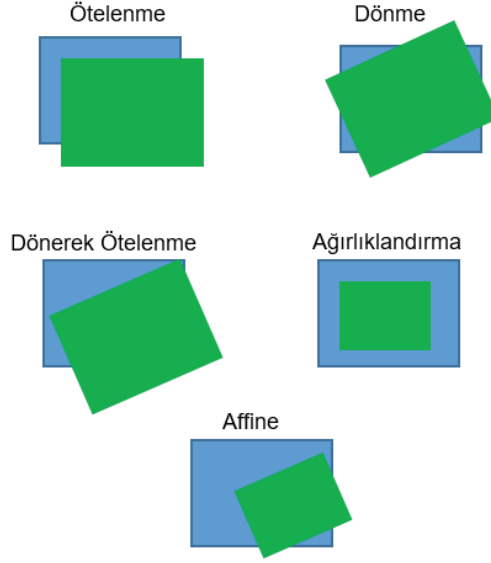
sonra filtre el yordamıyla ilgili diğer açılara çevrildikten sonra tekrardan polarize görüntüler elde edilmektedir. Görüntüler alınırken dairesel polarize filtre kullanılmasının nedeni ise fotoğraf makinasının doğrusal polarize filtre kullanıldığında odaklama problemi yaşamasıdır. Dairesel polarize filtreleme işleminde (polarizasyon bölümünde anlatıldığı gibi) ışık ilk olarak doğrusal polarize filtreden geçirilmektedir. Daha sonra faz geciktirici yardımı ile ışık dairesel polarize hale getirilmektedir. Sonuç olarak fotoğraf makinasının içine giren ışık ilk olarak doğrusal polarize filtreden geçmesinden dolayı ilgili ışıktan oluşturulan imgeler doğrusal polarize imgeler olmaktadır.

Kamera ve polarize filtre ile alınan görüntülerin birbirlerine göre hizalı olmaları (aynı açı ve pozisyondan alınmaları) gerekmektedir. Aksi takdirde ilgili imgelerin birbiri üzerine oturtulmaları (imge çakıştırma) gerekir. Kullanılan test düzeneğinden kaynaklı olarak arka arkaya çekilen polarize görüntüler arasında kaymalar meydana gelmektedir. Bu nedenle her bir görüntü imge çakıştırma işleminden geçirilmiştir. Fakat bazı durumlarda sahnede araç hareketleri, rüzgârdan kaynaklı bitki ve su hareketleri, bulut hareketleri gibi hareketler olmaktadır. İlgili hareketlerin imgenin geneline göre farklı ve rastgele bir karakteristik göstermesinden dolayı imge çakıştırması sonucunda ilgili hareketler ortadan kaldırılamamaktadır. Bu nedenle imgelere çeşitli algoritmalar uygulandığında hareketlerin bulunduğu bölgelerde hatalar ortaya çıkabilmektedir.

4.1. İmge Çakıştırma

Test düzeneğinde tek fotoğraf makinesinin kullanılması ve polarize filtrenin elle çevrilmesinden dolayı peşi sıra alınan polarize görüntüler arasında kameranın bakış açısının etkilenmesinden dolayı farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Görüntülerin üst üste oturtulabilmesi ve yapılan analizlerin doğruluğunun artırılması amacıyla ilgili görüntüler üzerinde imge çakıştırma ön işleminin yapılması gerekmektedir.

Literatürde önerilen yöntemleri öznitelik tabanlı ve korelasyon tabanlı olmak üzere iki temel başlık altında toplamak mümkündür. Fakat her iki grupta kullanılan yöntemlerin iyi performans verebilmesi için çakıştırılacak olan iki imge arasındaki en karmaşık hareketin ne olabileceğinin önceden belirlenmesi ve ilgili algoritmaların ona göre kullanılması gerekmektedir. Kamera hareketinden dolayı görüntüler arasında oluşabilecek değişimler Şekil 51 ile verilmiştir.



Şekil 51. Temel dönüşüm hareketleri

Görselden de anlaşılabileceği üzere fotoğraf çekimi esnasında karşılaşılabilecek muhtemel hareketler, görüntülerin birbirlerine göre ötelenmiş, dönmüş, dönerek ötelenmiş, ağırlıklandırılmış ve affine dönüşümüne uğramış şekilde olabilmektedir. Dönme ve ötelenme hareketleri kameranın fiziksel hareketinden, ağırlıklandırma ise kameranın yakınlaştırma/uzaklaştırma işleminden ya da odak noktasının değişmesinden kaynaklanmaktadır. Kullanılacak çakıştırma algoritmasının işlem yükü ilgili hareket modellerine göre değişebilmektedir. Fakat analizler esnasında zaman kısıtlaması bulunmadığı durumlarda en karmaşık hareket modelinin (afine) tercih edilmesi, imge çakıştırma algoritması sonuçlarının daha verimli olmasını sağlamaktadır.

4.1.1. Öznitelik tabanlı

İmgeler üzerinden çıkarılan noktasal tanımlayıcılar (SIFT, SURF, Harris Corner vb.) sayesinde yapılan imge çakıştırma yöntemleridir [30, 31]. İlgili yöntemler şu şekildedir;

- Eşleme yapılacak olan iki imgeden bir tanesi kaynak imge, diğeri de hedef imge olarak belirlenir
- Kaynak imgesinden noktasal tanımlayıcılar çıkarılır (Kaynak noktaları)
- Kaynak imgesindeki noktasal tanımlayıcıların hedef imgesindeki pozisyonları belirlenir (Hedef noktaları)

- Kaynak noktalarının hedef noktalarına taşınması için gerekli dönüşüm matrisi hesaplanır
- Hesaplanan matrise göre kaynak imgesine dönüşüm matrisi uygulanır

Kaynak imgesindeki noktasal tanımlayıcıların hedef imgesindeki ilgili yerlerinin bulunması temel olarak iki yöntemle yapılabilmektedir. Bunlardan birincisi, kaynak ve hedef imgelerinde aynı yöntem ile noktasal tanımlayıcılar bulup ilgili noktasal tanımlayıcıların karşılıklı eşleştirilmesi şeklinde yapılmaktadır. İkinci olarak, hedef imgesinden çıkarılan noktasal tanımlayıcıların optiksel akış yöntemi (Lukas-Kanade, Horn-Schunck vb.) kullanılarak kaynak imgesinde hangi pozisyonlara taşındıkları belirlenmektedir [32, 33]. Bu aşamada da optiksel akışın hesaplanması için kullanılan yöntemlere göre farklı seviyelerde hatalar ortaya çıkabilmekte ve hesaplanan optiksel akışlarla ilgili hataların düzeltilebilmesi için çeşitli filtreleme yöntemleri uygulanabilmektedir. Devam eden aşamada ise dönüşüm matrisinin daha önceden belirlenen en karmaşık hareket modeline göre kestirimi yapılmaktadır [34]. Dönüşüm matrisinin uygulandığı imge üzerinde de hataların azaltılması amacıyla ara değer bulma işlemleri uygulanabilmektedir.

Örnek bir uygulama olarak, kaynak ve hedef imgelerinden çıkarılan SURF tanımlayıcı noktalarının ilgili imgeler üzerinde gösterimi Şekil 52 ve Şekil 53 ile verilmiştir.



Şekil 52: Hedef imgesi



Şekil 53: Kaynak imgesi

Kaynak ve hedef imge üzerinden çıkarılan tanımlayıcı noktaların eşleştirilmiş hali Şekil 54 ile verilmiştir. İlgili eşleştirme ile dönüşüm matrisi hesaplandıktan sonra ilgili dönüşüm matrisinin kaynak imgesine uygulanmış hali Şekil 55 ile verilmiştir.



Şekil 54: Öznitelik eşleştirme



Şekil 55: Dönüştürülmüş kaynak imge

4.1.2. Korelasyon tabanlı

İmgelerin birbirleri üzerinde kaydırılarak hesaplanan korelasyon matrisinin azami değerinin konumlandığı pozisyonun hesaplanması ile yapılan imge eşleme algoritmalarıdır. Korelasyon işleminin uzamsal düzlemde (denklem (80)) yapılmasının uzun sürmekte fakat ilgili işlemler frekans kümesinde (denklem (81)) daha hızlı bir şekilde yapılabilmektedir.

$$C(x, y) = \frac{\sqrt{\sum_{i,j} (x(i, j) - \bar{x})y(i, j) - \bar{y})}}{\sqrt{\sum_{i,j} x(i, j) - \bar{x}} \sqrt{\sum_{i,j} y(i, j) - \bar{y}}} \quad (80)$$

$$C(x, y) = ifft2(fft2(x)conj(fft2(y))) \quad (81)$$

Denklem (81) yardımıyla hesaplanan korelasyon matrisinin maksimum noktası 1 piksel çözünürlükte sonuçlar vermektedir. Piksel-altı kaymaların istenilen çözünürlükte bulunabilmesi için üst örnekleme (upsampling) yöntemi ile korelasyon matrisi çözünürlüğü artırıldıktan sonra ilgili matrisin azami noktası bulunmaktadır. Bu problem iki farklı şekilde çözülebilmektedir. Birinci çözümde korelasyon matrisinde üst örnekleme yapılmadan önce matrisin azami noktası belirlenir ve daha sonra matris üst örnekleme işlemine sokulur. Üst örnekleme matrisin daha önceden bulunan azami noktası etrafında arama işlemleri ile istenilen çözünürlükte azami nokta bulunmaktadır. İkinci çözüm ise, ters Fourier dönüşümü almak yerine frekans kümesinde çarpımı yapılan iki imgenin faz matrisinden “2B regresyon” yöntemi ile imgeler arası kayma miktarı bulunmaktadır. Dönme ve ağırlıklandırma işlemlerinin frekans kümesindeki karşılıkları sırasıyla denklem (82) ve (83) ile verilmiştir.

$$X = Y(\rho, \theta - \theta_0) \quad (82)$$

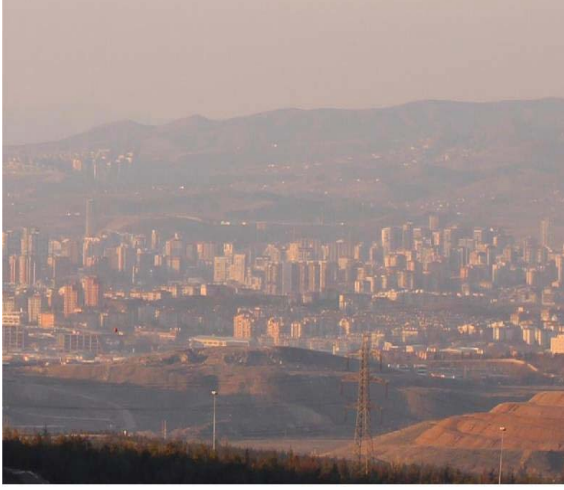
$$X(i, j) = \frac{1}{|ab|} Y\left(\frac{i}{a}, \frac{j}{b}\right) \quad (83)$$

Polarize filtrenin hareket etmesiyle sahnenin çeşitli bölgelerinden kameraya ulaşan ışık miktarında değişim meydana gelmektedir. Korelasyon tabanlı imge çakıştırma işlemleri de genel olarak piksel parlaklıklarına duyarlıdır. İlgili değişimin imge çakıştırma işlemine olumsuz etki oluşturmaması amacıyla tez kapsamında öznitelik tabanlı imge çakıştırma işlemi tercih edilmiştir.

4.2. Polarize Görüntüleme

Polarize görüntülemenin geleneksel görüntülemeden farklılıklarının ve getirilerinin açık bir şekilde ortaya konulabilmesi amacıyla çeşitli sahnelerden polarize görüntüler elde edilmiş ve sonuçlar ilerleyen ayrımlarda verilmiştir.

Birinci senaryo olarak herhangi bir imge işleme algoritması kullanılmadan sadece polarize filtre kullanılarak elde edilebilecek performans artırımına bir örnek sunulmuştur. Görüş mesafesinin düştüğü sisli hava ortamlarında (Şekil 56) netliğin artırılması polarize filtre ile mümkün olmaktadır. Şekil 56 ile verilen görüntü Ankara'da şubat ayında saat 17:00 civarında kamera bakış açısı ile güneş arasında yanca açı yaklaşık olarak 90° olacak şekilde elde edilmiştir. Havada bulunan partiküllerden saçılıp gözlemciye ulaşan ışık kısmi doğrusal polarize durumdadır. Ölçüm cihazına ilgili polarizasyona 90° açıyla duracak bir polarize filtrenin eklenmesi sayesinde ilgili partiküllerden gelen ve netliğin düşmesine sebep olan ışınların ölçüm cihazının detektörüne ulaşan gücü azaltılabilmektedir. Bu sayede ölçüm cihazının detektörüne ulaşan nesne ışımlarının sinyal gürültü oranı artırılmakta ve sahnedeki nesneler daha net bir şekilde ortaya çıkmaktadır (Şekil 57).

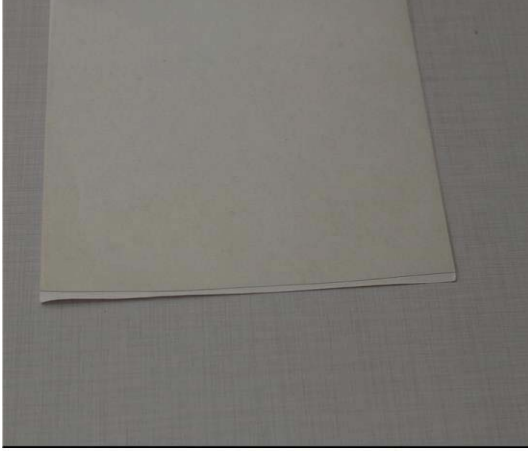


Şekil 56: Sisli görüntü

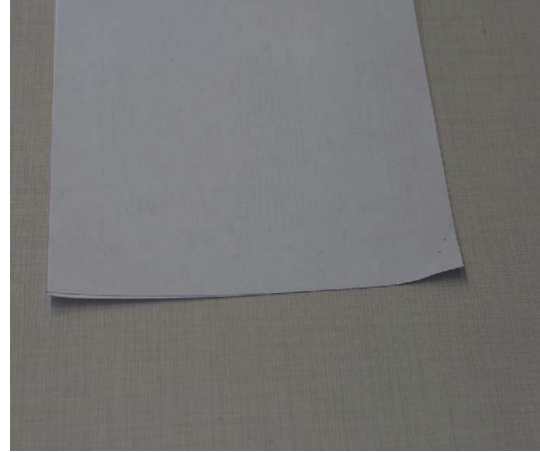


Şekil 57: Sis etkisi azaltılmış görüntü

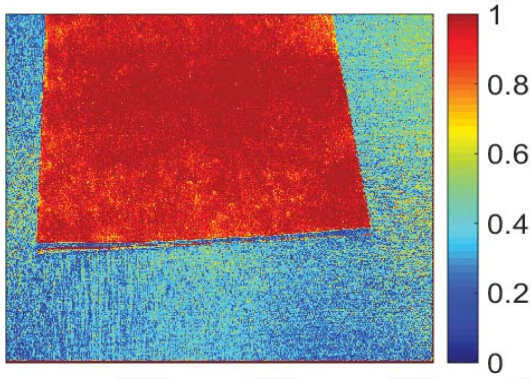
Saydam nesneler (su, cam, plastik cilt kapağı vb.), içlerinden ışığın geçmesine ve arkadaki nesnelerin görülmesine olanak sağlayacak yapıda olmalarından dolayı görünür bantta RGB görüntüler ile tespit edilmeleri zorlaşmaktadır. Örnek olarak masa üzerinde iki farklı renkteki kâğıdın üzerine saydam plastik bir cilt kapağı yerleştirilmiştir (Şekil 58 ve Şekil 59). Geleneksel RGB görüntüleme ile elde edilen imgelerde ilgili saydam nesne tespit edilememektedir. Cilt kapağının ortaya çıkarılmasında polarizasyonun kullanılabilmesinin araştırılması için her iki sahnenin de DoLP ve AoLP imgeleri çıkarılmıştır (Şekil 60, Şekil 61, Şekil 62 ve Şekil 63). Elde edilen sonuçlar incelendiğinde saydam nesnenin hem DoLP imgesinde hem de AoLP imgesinde net bir şekilde ortaya çıktığı görülmektedir. Ek olarak, saydam nesne altına farklı renkte başka nesnelerin yerleştirilmesinin polarize görüntüleme ile ilgili saydam nesnenin tespitini etkilemediği görülmektedir.



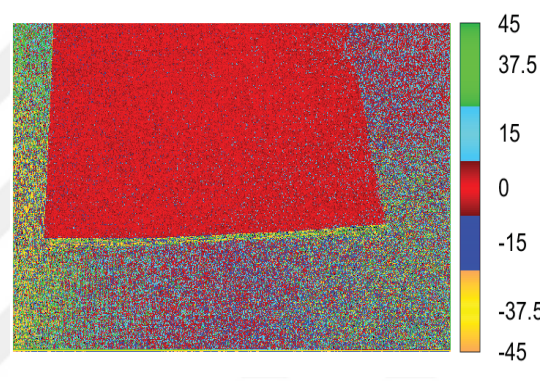
Şekil 58: Arkasına renkli kâğıt yerleştirilmiş saydam nesne



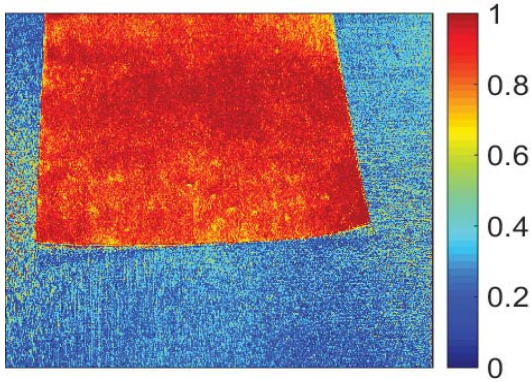
Şekil 59: Arkasına beyaz kâğıt yerleştirilmiş saydam nesne



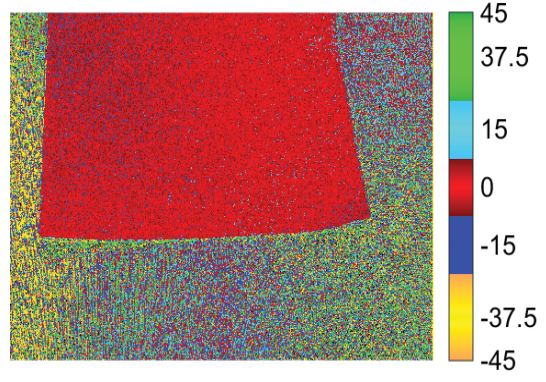
Şekil 60: Arkaplanına renkli kâğıt yerleştirilmiş sahne DoLP imgesi



Şekil 61: Arkaplanına renkli kâğıt yerleştirilmiş sahne AoLP imgesi



Şekil 62: Arkaplanına beyaz kâğıt yerleştirilmiş sahne DoLP imgesi



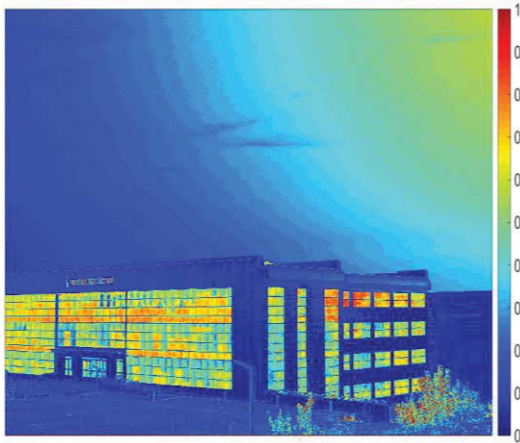
Şekil 63: Arkaplanına beyaz kâğıt yerleştirilmiş sahne AoLP imgesi

Takip eden ayırmada ise yansıtıcı ve soğurucu yüzeylerin tespiti ve bölütlenebilmesi için polarizasyon kullanımı gösterilmektedir. Bu durum için cam yüzeylere sahip etrafında bitkiler olan ve bir kısmı gölgede kalmış bir bina olan sahne tercih

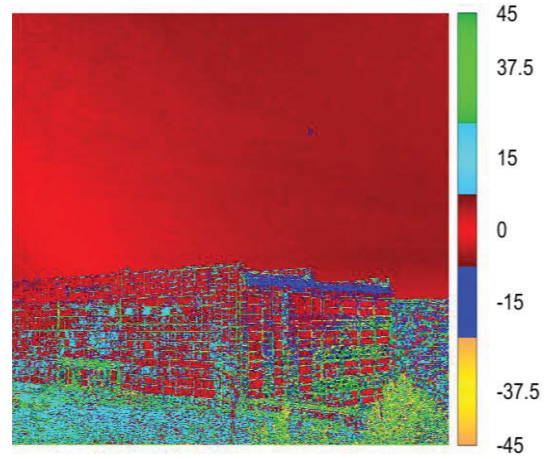
edilmiştir (Şekil 64). Sahne Ankara’da ekim ayında saat 15:30 sularında çekilmiş ve kamera bakış açısıyla güneş arasında yaklaşık olarak 45° açısal fark bulunmaktadır (Güneş, sahnenin sol tarafındadır). İlgili sahne üzerinden elde edilen polarize görüntüler imge çakıştırma işlemi ile birbiri üzerine oturtulmuş ve sahnelerin hizalı olmaları sağlanmıştır. Daha sonra ilgili sahneden DoLP (Şekil 65) ve AoLP (Şekil 66) imgeleri elde edilmiştir. DoLP imgesi incelendiğinde binada bulunan bütün camların (gölgede kalmış ya da kalmamış) net bir şekilde bölümlenebildiği görülmektedir.



Şekil 64: Cam yüzeyli bina RGB görüntüsü



Şekil 65: Cam yüzeyli bina DoLP imgesi



Şekil 66: Cam yüzeyli bina AoLP imgesi

Binanın geriye kalan kısımlarının ise gölgede olsun ya da olmasın aynı karakteristikle ortaya çıktığı görülmektedir.

Sahnede gökyüzünün de güneşten uzaklaştıkça polarizasyon derecesinin arttığı gözlemlenebilmektedir. Sahnenin sağ alt tarafında bulunan ağaç türü bitkilerin polarizasyon derecesi yüksek gelmiştir. Bunun nedeni ise polarize görüntüler eşzamanlı olarak elde edilememekte ve ortamda rüzgâr bulunmasından dolayı ilgili bitkiler hareket etmektedir. Ek olarak, geniş yapraklı bitkilerin de yapraklarından yansımalar meydana gelmektedir. Bu yansımalar da polarizasyon derecesini artıran bir diğer neden olarak karşımıza çıkmaktadır.

Polarize görüntülemenin bir diğer örneği olarak yol üzerinde toplanan suyun tespiti yapılmıştır.

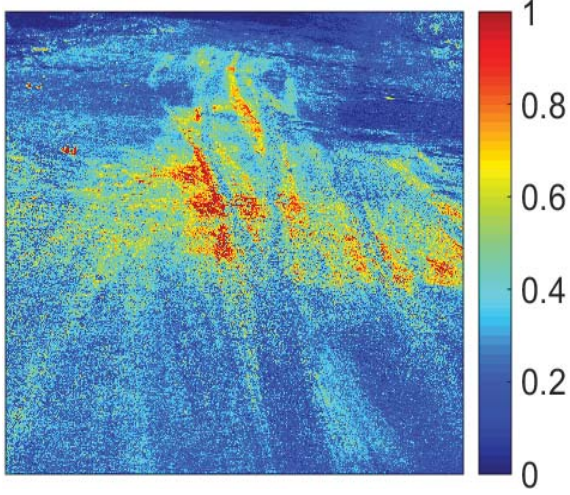


Şekil 67: Islak yol RGB görüntüsü

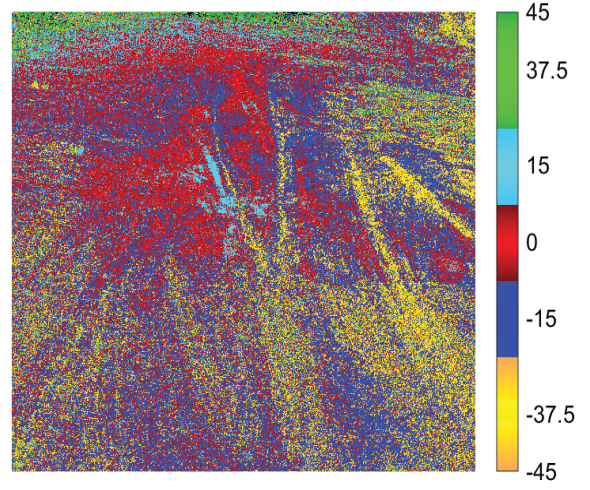


Şekil 68: Islak yol DoLP işlenmiş görüntüsü

Suyun saydam yapıya sahip olmasından dolayı (tek bir renk karakteristiği yoktur) geleneksel RGB görüntüleme ile tespit edilmesi zorlaşmaktadır. Fakat polarizasyon, su yüzeyinin yansıtıcılık özelliği sayesinde tespit probleminin çözümü için ek boyutlar sağlamaktadır. İlgili sahneden alınan görüntüler imge çıkartırma işleminden geçirilip hizalı duruma getirildikten sonra DoLP (Şekil 69) ve AoLP (Şekil 70) imgeleri elde edilmiştir. DoLP imgesi incelendiğinde sahnede suyun bulunduğu kısımların kolaylıkla ayırt edilebildiği görülmektedir. DoLP değerleri 0.6 üzerinde olan piksellerin renkleri gerçek imge üzerinde kırmızı olarak işaretlenmiştir (Şekil 68).



Şekil 69: DoLP imgesi



Şekil 70: AoLP imgesi

4.3. Yarı-Yansımaların Ayırıştırılması

4.3.1. Bağımsız bileşenler analizi (BBA)

Bağımsız bileşenler analizi (Independent Component Analysis, ICA), birbirinden bağımsız iki tane Gauss yapısında olmayan kaynağın doğrusal bir fonksiyon ile birleştirilmiş sonuçlarını kullanarak iki kaynak bilgisinin elde edilmesi yöntemidir. Bağımsız iki kaynağın doğrusal bir fonksiyon ile birleştirilmesi denklem (84) ile verilmiştir. s , kaynakların olduğu dikey bir vektördür. A ise kaynaklar arasındaki doğrusal katsayıları içeren bir matristir. x , kaynakların birleşimini gösteren dikey bir vektörü temsil etmektedir.

$$x = As \quad (84)$$

BBA özel olarak x vektöründen, kaynakların belirgin özelliklerini kullanarak dolaylı yoldan A vektörünü ve daha sonra kaynakları (s) tahmin etmeye çalışmaktadır.

Eğer denklem (85) ile gösterilen eşitlikteki w , A^{-1} in satırlarından biri olsaydı, y değeri bağımsız kaynaklardan bir tanesi olurdu.

$$y = w^T x = \sum_i w_i x_i \quad (85)$$

Buradaki problem; Merkezi Limit Teoremi nasıl kullanılmalıdır ki w , A^{-1} 'in bir satırı olsun. Pratikte böyle bir problemin bir çözümü bulunmamaktadır. Çünkü kaynaklar

ve A hakkında her hangi bir bilgiye sahip değiliz. Bu aşamada çözüm üretilebilmesi için kestirim işlemleri kullanmak gerekmektedir. Değişken değiştirme işlemleri denklem (86) ile verilen gibi yapıldığında, y elemanının aslında kaynaklar ile arasında doğrusal bir ilişki olduğu ortaya çıkmaktadır.

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}^T \mathbf{w}, \quad y = \mathbf{w}^T \mathbf{x} = \mathbf{w}^T \mathbf{A} \mathbf{s} = \mathbf{z}^T \mathbf{s} \quad (86)$$

İki bağımsız rasgele değişkenin toplamı, orijinal değişkenlerden daha Gauss olduğundan $\mathbf{z}^T \mathbf{s}$ diğer bağımsız kaynaklardan daha Gauss olmaktadır ve kaynaklara eşit olduğunda asgari Gauss seviyesine ulaşmaktadır. Sonuç olarak, $\mathbf{z}^T \mathbf{s}$ 'nin Gauss'luk derecesi asgari değere indirildiğinde kaynaklardan birisi elde edilecektir. Bu aşamada Gauss'luk derecesinin ölçülebilmesi için bir metoda ihtiyaç duyulmaktadır. Kurtosis (87) kullanılarak eldeki verinin Gauss'luk derecesi hakkında bilgi alınabilmektedir.

$$kurt(y) = E\{y^4\} - 3(E\{y^2\})^2 \quad (87)$$

Elimizdeki verileri kolaylık açısından sıfır ortalamaya ve 1 varyansa sahip kabul edelim. Bu durumda elde edilen kurtosis denklem (88) ile ifade edilir.

$$kurt(y) = E\{y^4\} - 3 \quad (88)$$

Eğer elimizdeki veriler tam gauss yapısına sahip ise ilgili verilerin kurtosis değeri sıfır olmaktadır. Verilerin Gaussluğu azaldıkça mutlak kurtosis değerleri artacak şekilde pozitif ya da negatif yöne doğru ilerlemektedir. Bu nedenle bir verinin Gauss yapısında olmama durumu kurtosisin mutlak değerleri ile hesaplanmaktadır. Kurtosis doğrusal bir işlemdir [35].

$$kurt(x_1 + x_2) = kurt(x_1) + kurt(x_2)$$

Ortamda iki tane kaynak olduğu varsayıldığında y 'nin hesaplanan kurtosis değeri denklem (89) ile verilmiştir.

$$kurt(y) = kurt(\mathbf{z}^T \mathbf{s}) = kurt(z_1 s_1 + z_2 s_2) = z_1^4 kurt(s_1) + z_2^4 kurt(s_2) \quad (89)$$

Kaynakların, dolayısıyla y 'nin birim varyansa sahip olduğu daha önceden belirtilmişti. Bu durumda $\mathbf{z}$ 'nin birim çember üzerinde olduğu ortaya çıkmaktadır.

$$var(y) = z_1^2 + z_2^2 = 1 \quad (90)$$

Bu aşamada optimizasyon $kurt(y)$ 'nin birim çember üzerinde maksimize edilmesi işlemine dönüşmektedir. Bir ağırlık vektöründen başlanıp $y = \mathbf{w}^T \mathbf{x}$ fonksiyonunun en hızlı artma yönü bulunup $\mathbf{x}$ değerlerine göre optimizasyon yapılmaktadır. $\mathbf{w}^T$ değerleri her basamakta güncellenmektedir.

BBA kestiriminde kurtosis Gauss'luk derecesi ölçümünde gürbüz bir metot değildir. Kestirim işlemleri için başka metotlar (negentropi, maksimum olabilirlik, karşılıklı bilgilerin minimizasyonu) da kullanılabilmektedir [35, 36].

Ön İşleme:

BBA işlemlerinden önce ön işleme yapılması, optimizasyon işlemlerinin daha rahat yapılmasını ve kestirim performansının artmasını sağlamaktadır. Ön işleme yöntemi ise verilerin beyazlatılması (whitening) işlemidir. Beyazlatma ise iki veri arasındaki korelasyonunu asgari değere (sıfıra) indirme işlemidir.

Her iki veri, verilerin kovaryans matrisinin karekökünün tersi ile çarpıldığı zaman iki veri arasındaki korelasyon sıfıra inmektedir. Birbirleri ile korele olan iki verinin kovaryans matrisi örneği denklem (91) ile verilmiştir. Bu iki veri beyazlatma işleminden geçirildikten sonra elde edilen kovaryans matrisi denklem (92) gibi olmaktadır.

$$cov(a, b) = \begin{bmatrix} 0.4934 & 0.0024 \\ 0.0024 & 0.1246 \end{bmatrix} \quad (91)$$

$$cov(a', b') = \begin{bmatrix} 4.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 4.0000 \end{bmatrix} \quad (92)$$

Negentropi:

Gauss yapısında olmama derecesini ölçmek için kullanılabilecek bir diğer metot entropi'dir. Entropi, bilgi teorisinde, değişken gözleminin verdiği bilgi derecesi olarak tanımlanmaktadır. Daha rastgele, yani öngörülemez ve yapılandırılmamış değişken, daha büyük entropi anlamına gelmektedir. Rastgele bir değişkenin entropi değeri denklem (93) ile ifade edilmektedir.

$$H(y) = - \sum_i P(y = a_i) \log P(y = a_i) \quad (93)$$

Burada a_i , olası y değerlerini göstermektedir. Bir Gauss değişkeni, eşit varyansa sahip tüm rastgele değişkenler arasında en büyük entropiye sahiptir. Bu da entropinin nongaussianity derecesini ölçmek için kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Gauss olmayan bir değişken için sıfır olan ve her zaman negatif olmayan bir nongaussianity ölçüsü elde etmek için negentropi olarak adlandırılan diferansiyel entropi tanımının biraz değiştirilmiş hali kullanılır:

$$J(y) = H(y_{gauss}) - H(y) \quad (94)$$

Burada y_{gauss} , y ile aynı kovaryans matrisine sahip olan rastgele Gaussian değişkenini göstermektedir. Denklem ile de anlaşılacağı üzere negentropi, negatif olmayan ve sadece y Gauss dağılıma sahip olduğunda sıfır olan bir değerdir. Fakat negentropinin hesaplanması zor olmaktadır. Bu nedenle negentropinin kestirimi yapılmaktadır. Negentropinin tahmin edilmesi, rastgele değişkenin olasılıksal dağılım fonksiyonunun tahminini (muhtemelen parametrik olmayan) gerektirmektedir [35].

Negentropi yaklaşımı:

Negentropi yaklaşımının klasik bir metodu yüksek dereceden momentler kullanmaktır:

$$J(y) \approx \sum_{i=1}^P k_i [E\{G_i(y)\} - E\{G_i(v)\}]^2 \quad (95)$$

Burada k_i , pozitif bir sabiti, v ise ortalaması sıfır ve birim varyanslı rastgele bir Gauss değişkenini temsil etmektedir. y değişkeninin de sıfır ortalamalı ve birim varyanslı olduğu varsayılmaktadır. G_i 'de quadratik olmayan bir fonksiyonu göstermektedir. Eğer tek bir quadratik olmayan fonksiyon kullanılırsa negentropi yaklaşımı;

$$J(y) \approx [E\{G(y)\} - E\{G(v)\}]^2 \quad (96)$$

şeklinde olmaktadır. Ayrıca denklem (97) ile verildiği gibi çok hızlı büyümeyen G seçildiğinde daha gürbüz tahmin ediciler elde edilir.

$$G_1(u) = \frac{1}{a_1} \log(\cosh(a_1 u)), \quad G_2(u) = -\exp(-u^2/2) \quad (97)$$

4.3.1.1. fastICA

Bir kaynağı bulmak için fastICA:

Tek bir kaynağın bulunmasında tek bir nöron kullanılarak $\mathbf{w}^T \mathbf{x}$ 'nin nangaussianity değerini maksimize edecek $\mathbf{w}$ vektörünü bulmak için optimizasyon problemi çözülmeye çalışılmaktadır. Nangaussianity değerinin ölçülmesi için negentropi ($J(\mathbf{w}^T \mathbf{x})$) kullanılmaktadır. $\mathbf{w}^T \mathbf{x}$ birim varyansa sahip olduğu için $\mathbf{w}$ vektörü de birim çember üzerindedir.

FastICA şu şekilde çıkarılmaktadır;

$\mathbf{w}^T \mathbf{x}$ 'nin negentropi yaklaşımının azami değeri, $E\{G(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}$ 'nin belli optimum değerlerinde elde edilir. Kuhn-Tusker koşuluna göre $E\{(\mathbf{w}^T \mathbf{x})^2\} = \|\mathbf{w}\|^2 = 1$ koşulu altında $E\{G(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}$ 'nin optimum değeri şu şekilde elde edilir;

$$E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - \beta \mathbf{w} = 0 \quad (98)$$

Bu denklem Newton metodu ile çözülebilmektedir. Eşitliğin sol tarafı F ile tanımlanırsa, eşitliğin jacobian matrisi ($JF(\mathbf{w})$) şu şekilde olmaktadır;

$$JF(\mathbf{w}) = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - \beta \mathbf{I} \quad (99)$$

Matris tersinin alınmasını basitleştirmek için (99) ile verilen denklemin ilk teriminin yaklaşımı yapılmaktadır. Yaklaşım; $E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} \approx E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^T\}E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} = E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}\mathbf{I}$ şeklinde olmaktadır. Bu sayede Jacobian, köşegen matris haline gelmekte ve tersi kolaylıkla alınabilmektedir. Bu aşamadan sonra Newton metodunun iterativ denklemi;

$$\mathbf{w}^+ = \mathbf{w} - [E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - \beta \mathbf{w}] / [E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\} - \beta] \quad (100)$$

şeklinde olmaktadır. Elde edilen denklemin her iki tarafı da $\beta - E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}$ ile çarpılarak daha sade hale getirilebilmektedir.

g değerleri negentropi de kullanılan G fonksiyonlarının türevleridir (denklem (101)).

$$\begin{aligned} g_1(u) &= \tanh(a_1 u) \\ g_2(u) &= u \exp(-u^2/2) \\ 1 &\leq a_1 \leq 2 \end{aligned} \quad (101)$$

Bu aşamadan sonra fastICA yönteminin basamakları şu şekilde verilmektedir;

1. $\mathbf{w}$ Başlangıç vektörü seçilir
2. $\mathbf{w}^+ = [E\{\mathbf{x}g(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}] - [E\{g'(\mathbf{w}^T \mathbf{x})\}]\mathbf{w}$
3. $\mathbf{w} = \mathbf{w}^+ / \|\mathbf{w}^+\|$
4. Yakınsama olmadıysa geri 2 ye dön

Birden fazla kaynağı bulmak için fastICA:

Birkaç bağımsız kaynağı tahmin etmek için, bir önceki bölümde anlatılan fastICA algoritmasını birden fazla nöron için (her birinin ağırlığı $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_n$ şeklinde olan) koşturmak gerekmektedir. Vektörlerin aynı maksimum noktasına yakınsamasını önlemek için, her iterasyondan sonra $\mathbf{w}_1^T \mathbf{x}, \dots, \mathbf{w}_n^T \mathbf{x}$ çıktılarının dekorele edilmesi gerekmektedir. Bu işlem de Gram-Schmidt benzeri bir dekorelasyon işlemi ile yapılmaktadır.

Her bir bağımsız kaynağın ayrı ayrı kestirimi yapılır. p tane bağımsız kaynağın tespiti yapıldıktan sonra $(\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_p)$, $\mathbf{w}_{p+1}$ için one-unit fixed-point algoritması kullanılmaktadır. Her bir iterasyondan sonra $\mathbf{w}_{p+1}$ vektöründen, $\mathbf{w}_{p+1}$ vektörünün $\mathbf{w}_p$ ' ye kadar kestirimi yapılan vektörlerin izdüşümleri çıkartılır ve $\mathbf{w}_{p+1}$ normalize edilir:

$$\mathbf{w}_{p+1} = \mathbf{w}_{p+1} - \sum_{j=1}^p \mathbf{w}_{p+1}^T \mathbf{w}_j \mathbf{w}_j \quad (102)$$

$$\mathbf{w}_{p+1} = \mathbf{w}_{p+1} / \sqrt{\mathbf{w}_{p+1}^T \mathbf{w}_{p+1}}$$

fastICA yönteminin işlem basamakları özet olarak şu şekilde verilmektedir:

1. Ölçüm verilerini sıfır ortalamaya sahip olacak şekilde düzenle ve beyazlatma ön-işlemi uygula
2. Kestirimi yapılacak bağımsız bileşen sayısını $m = 2$ olarak seç ve sayacı başlat ($p = 1$)
3. $\mathbf{w}_p$ başlangıç vektörünü seç
4. $\mathbf{w}_p = [E\{xg(\mathbf{w}_p^T \mathbf{x})\}] - [E\{g'(\mathbf{w}_p^T \mathbf{x})\}]\mathbf{w}_p$
5. Ortogonalleştirme;

$$\mathbf{w}_p = \mathbf{w}_p - \sum_{j=1}^{p-1} (\mathbf{w}_p^T \mathbf{w}_j) \mathbf{w}_j$$

6. $\mathbf{w}_p = \mathbf{w}_p / \|\mathbf{w}_p\|$
7. $\mathbf{w}_p$ yakınsamadıysa geri 4'e geri dön
8. $p = p + 1$. Eğer $p \leq m$ ise, 3'e geri dön

4.3.1.2. fastICA örnekleri

Birbirinden bağımsız örnek iki imge Şekil 71 ve Şekil 72 ile verilmiştir. Bu imgelerin denklem (103) ile verilen doğrusal kombinasyonlarıyla yine iki tane farklı imge oluşturulmuştur (Şekil 73 ve Şekil 74).

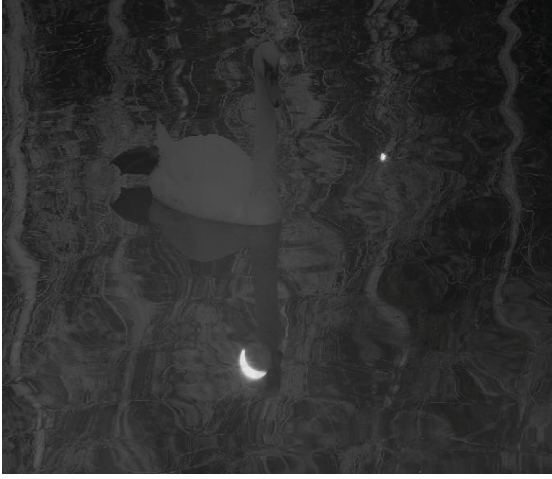
$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 0.6 & 0.4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} img_1 \\ img_2 \end{bmatrix} \quad (103)$$



Şekil 71: Örnek imge 1 (img_1)



Şekil 72: Örnek imge 2 (img_2)



Şekil 73: Doğrusal kombinasyon imgesi 1 (S_1)



Şekil 74: Doğrusal kombinasyon imgesi 2 (S_2)

Doğrusal kombinasyonlu imgeler kullanılarak ICA yöntemi ile elde edilen sonuçlar Şekil 75 ve Şekil 76 ile verilmiştir. Sonuçlardan da görülebileceği üzere, kaynak imgelerinin kestirimi yüksek doğrulukta yapılmıştır.



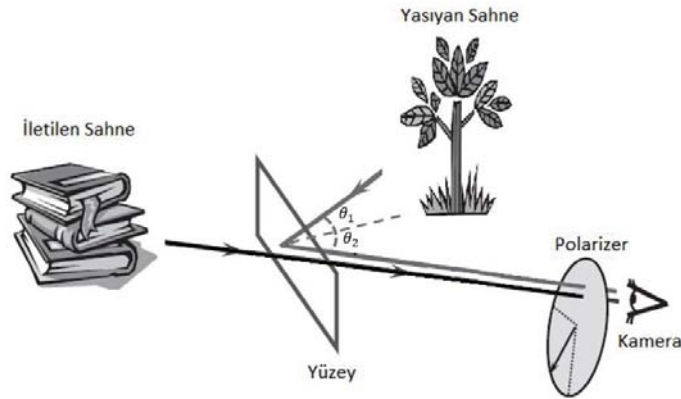
Şekil 75: fastICA kestirim sonucu 1



Şekil 76: fastICA kestirim sonucu 2

4.3.2. BBA ile yansımaların ayrıştırılması

Yansıtıcı ve saydam (su, cam vb.) bir yüzey üzerinden elde edilen bir imge incelendiğinde ilgili imgenin iki farklı bileşeni olduğu görülmektedir. Bunlardan birincisi ilgili yüzey üzerine düşüp yansıyan ışık huzmelerinin oluşturduğu görüntü (yansıyan sahne) diğeri ise yüzeyin arka tarafında kalan bölümdeki nesnelerden gelen ışık huzmelerinin ilgili yüzeyden geçtikten sonra oluşturduğu görüntüdür (iletilen sahne) (Şekil 77).



Şekil 77: Işık huzmelerinin saydam bir yüzey üzerinden yansıması ve iletimi

İlgili yüzey, yansıyan sahneye ve iletilen sahneye farklı şekilde davranmaktadır. Yüzey üzerine temas eden ışık huzmelerinin belirli bir miktarı (yüzey özelliğine ve ışığın ilgili yüzeye düşme açısına göre) karşı tarafa iletilirken belirli bir miktarı ise geri yansımaktadır. Işık huzmeleri karşı tarafa iletilirken ya da yansırken, ilgili

yüzeyin özelliklerine göre polarizasyon değerleri değişmektedir. Dönen bir polarize filtre yardımı ile ilgili yüzeye bakıldığında filtrenin dönmesi ile yüzey üzerindeki sahnelerin karışma miktarları arasında değişimler meydana gelmektedir. Filtrenin iki farklı açığa ayarlanmasıyla her iki sahnenin de farklı miktarlarda katkı sağladığı iki farklı görüntü elde edilebilmektedir (Şekil 78 ve Şekil 79).



Şekil 78: Yarı yansıtıcı polarizasyon imgesi 1



Şekil 79: Yarı yansıtıcı polarizasyon imgesi 2

Yansıma yüzeyinden tam polarizasyon elde edilebildiği durumlarda (tam yansıtıcı yüzey olması, kameranın ışık kaynağına göre konumu ve polarizer filtresi açısı en optimum noktada olduğunda) elde edilen imgelerden bir tanesi tamamen iletilen ve tamamen yansıtılan sahnelerden oluşabilmektedir. Bu durumlarda herhangi bir ayırıştırma algoritması kullanılmadan sadece polarize filtrenin açısı değiştirilerek yansıyan ve iletilen sahneler elde edilebilmektedir. Fakat tam yansıma durumu her zaman ortaya çıkmamaktadır. Çoğu zaman elde edilen görüntülerin ikisinde de iletilen ve yansıyan sahneler farklı ağırlıklarda bulunmaktadır. İmgelerdeki iki bileşenin ağırlıklarını etkileyen ana faktörler ilgili doğrusal polarizasyon açısında ilgili yüzeyin ileticilik ve yansıtıcılık katsayıları ve kamera ile yüzeyden çıkan ışınlar arasındaki açı (θ_2) olarak sıralanabilmektedir [16]. Şekil 78 ile verilen imgede kitaplık, ağaçlardan biraz daha fazla ön planda iken Şekil 79 ile verilen imgede ise camdaki yansıma (ağaçlar), kitaplıktan daha ön plana çıkmıştır.

İletilen ve yansıyan sahnelerin iki farklı polarizasyon açısıyla elde edilen imgelerdeki birleşimleri doğrusal modelle ifade edilebilmektedir [16, 23]:

$$\begin{aligned} Y_1 &= a_1 T + b_1 R \\ Y_2 &= a_2 T + b_2 R \end{aligned} \quad , \quad \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ R \end{bmatrix} \quad , \quad Y = Ab \quad (104)$$

Burada T , iletilen sahneyi, R yansıtılan sahneyi temsil etmektedir. Y_1 ve Y_2 değerleri ise iki farklı polarizer açısıyla elde edilen imgeleri temsil etmektedir. Denklemden iki tane bilinen fakat iki tanesi yansıyan ve iletilen sahneler olmak üzere dört tane de bilinmeyen parametre bulunmaktadır. Bu aşamada ortaya şu problem çıkmaktadır. Birbirinden bağımsız iki bileşenin iki farklı doğrusal denklem ile elde edilen değerlerinden yola çıkılarak ilgili bileşenlere nasıl ulaşılabilir? Bağımsız bileşenler analizi ile birbirinden bağımsız bu iki bileşenin kestirimi yapılabilmektedir.

BBA yöntemi, bağımsız bileşenlerin farklı doğrusal kombinasyonlarla elde edilmiş değerlerini girdi olarak alıp, ilgili bağımsız bileşenlerin kestirimini yapmaya çalışmakta ve çıktı olarak yaptığı kestirimin sonuçlarını vermektedir. BBA algoritmasının farklı nümerik yöntemleri bulunmakla beraber, efektif bir kestirimi fastICA yöntemi yapabilmektedir. Bu çalışma kapsamında imgelerdeki ilgili bileşenlerin ayrılması için de fastICA yöntemi kullanılmıştır.

Kamera ve polarize filtre ile alınan görüntülerin birbirlerine göre hizalı olmaları (aynı açı ve pozisyondan alınmaları) gerekmektedir. Bu nedenle her bir görüntü öznitelik tabanlı imge çakıştırma işleminden geçirilmiştir. Fakat bazı durumlarda sahnede araç hareketleri, rüzgârdan kaynaklı bitki ve su hareketleri, bulut hareketleri gibi hareketler olmaktadır. İlgili hareketlerin imgenin geneline göre farklı ve rastgele bir karakteristik göstermesinden dolayı imge çakıştırması sonucunda ilgili hareketler ortadan kaldırılamamaktadır. Bu nedenle imgelere çeşitli algoritmalar uygulandığında hareketlerin bulunduğu bölgelerde hatalar ortaya çıkmaktadır.

Yansımaların fastICA algoritması ile birbirinden ayrıştırılması için gerçekleştirilen saha uygulamalarında yansıma yüzeyi olarak hem dış hem de iç mekânın görülebildiği cam yüzeyler kullanılmıştır. Görüntülerin elde edilmesinde, bölümün başında tanıtılan düzenek kullanılmıştır. Testler için iki farklı ortam kullanılmış ve her ortamda polarize filtrenin iki farklı açısında ikişer tane polarize görüntü elde edilmiştir. Elde edilen 3 kanallı (RGB) görüntüler tek kanallı (Gri Tonlu) hale getirilmiştir. Daha sonra ilgili görüntüler sıfır ortalamalı ve birim varyanslı iki ayrı vektör haline getirilmiştir. Elde edilen vektörler fastICA algoritmasına girdi olarak verilmiş ve imgelerin bileşenlerinin kestirimleri yapılmıştır. İki farklı yansımadan

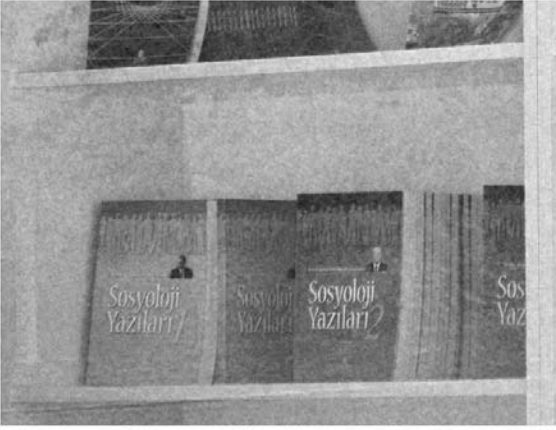
farklı polarize filtre açıları ile elde edilen görüntüler (Şekil 80, Şekil 81, Şekil 84 ve Şekil 85) ve fastICA algoritması ile ilgili görüntülerin kestirim sonuçları sırası ile Şekil 82, Şekil 83, Şekil 86 ve Şekil 87 ile verilmiştir.



Şekil 80: Yarı yansıma imgesi 1



Şekil 81: Yarı yansıma imgesi 2



Şekil 82: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu



Şekil 83: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu



Şekil 84: Girdi imgesi 3



Şekil 85: Girdi imgesi 4



Şekil 86: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu



Şekil 87: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu

Kamera ilgili yüzeye yaklaştıkça yüzeyden dışarı doğru çıkan ışık huzmeleri ile kamera arasındaki açılar yüksek farklılık göstermeye başlayacak ve elde edilecek imgenin farklı bölgelerinde iki sahnenin de farklı ağırlıklandırılmış görüntüleri olmaya başlayacaktır. Şekil 88 ile verilen imgenin sağ bölgesinde, yansıtılan ve iletilen sahnelerin birleşim oranları ile sol bölgesindeki birleşim oranları farklılık göstermektedir.



Şekil 88: Geniş açılı yarı yansıma imgesi

Geniş bir pencereden alınan görüntülerde (Şekil 89, Şekil 90) ise bütün imgeden BBA yardımıyla kestirimi yapılan iletilen ve yansıyan sahne imgeleri sırasıyla Şekil 91 ve Şekil 92 ile verilmiştir. İmgelerden de anlaşılacağı üzere yansıtılan sahnenin bazı bölümleri iletilen sahnede (Şekil 91 1, 2, 3 ve 4 numaralı bölümler), iletilen sahnenin de bazı bölümleri yansıtılan sahnede (Şekil 92 1 numaralı bölüm) kalmıştır.



Şekil 89: Bütün yansıma imgesi 1



Şekil 90: Bütün yansıma imgesi 2



Şekil 91: fastICA iletilen sahne kestirim sonucu



Şekil 92: fastICA yansıtılan sahne kestirim sonucu

Şekil 89 ve Şekil 90 ile verilen imgelerin farklı bölgelerinde iletilen ve yansıtılan sahnelerin farklı doğrusal kombinasyonları ortaya çıkmaktadır. Geniş bir alanda fastICA algoritması uygulandığında, algoritma imgelerin bütünü için genel bir doğrusal kombinasyon vermektedir. Bu nedenle de imgelerin bütün bölgelerinde tam anlamıyla ayırıştırma işlemi yapılamamaktadır.

Geniş bir açıda alınan imgelerin dar açılı görüntülere bölündükten sonra her bir parçanın fastICA algoritmasıyla kestirimi yapıp tekrardan bütün görüntü oluşturulabilmektedir. Şekil 89 ve Şekil 90 ile verilen imgelerin bir bölümü (Şekil 93) kırılarak ve kırılmadan fastICA algoritmasına verildiğinde elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 94, Şekil 95, Şekil 96 ve Şekil 97 ile verilmiştir.



Şekil 93: Geniş yansıma yüzeyinden kırılan bölüm



Şekil 94: Kırpılmış imgeden yansıtılan sahne kestirim sonucu



Şekil 95: Kırpılmış imgeden iletilen sahne kestirim sonucu



Şekil 96: Bütün imgeden yansıtılan sahne kestirim sonucu



Şekil 97: Bütün imgeden iletilen sahne kestirim sonucu

İmgelerden de anlaşılacağı üzere kırpılmış imgelerden elde edilen kestirim sonuçları, bütün imgelerden elde edilen kestirim sonuçlarından (Şekil 91 ve Şekil 92) daha iyi performans vermektedir.

Girdi İmgesi Kriterleri:

- 1) İki görüntünün de birbirlerine göre hizalanmış olmaları (imge çakıştırma) gerekmektedir.
- 2) (104) ile verilen denklemde A matrisinin full rank olması beklenmektedir.
- 3) İki girdi imgesinde de yansıtılan ve iletilen sahnelerin bileşimlerinin olması beklenmektedir (azami polarizasyon açılarında sadece bir tane sahnenin görünmesi BBA algoritmasının istenilen sonucu vermemesine neden olmaktadır (Şekil 104 ve Şekil 105)).
- 4) İki farkı sahnede yüksek polarizasyon derecesine sahip nesnelerin olabildiğince az olması beklenmektedir. Aksi takdirde yüksek polarizasyon derecesine sahip nesneler ait olmadıkları sahneden tam anlamıyla

temizlenememektedir (Şekil 91 2 numaralı bölüm, Şekil 92 1 numaralı bölüm).

Cam yansımasından iki farklı polarizasyon açısıyla elde edilen imgelerin bir tanesinde tam yansıma/iletim ortaya çıkmış diğer görüntüde ise hem iletilen hem de yansıyan sahnenin ortaya çıkma durumu suni örüntüler ile simüle edilmiştir. İletilen ve yansıyan sahneler için kullanılan görüntüler sırasıyla Şekil 98 ve Şekil 99 ile verilmiştir. İletilen ve yansıyan sahnelerin iki farklı doğrusal polarizasyon açısındaki birleşim durumları suni olarak denklem (105) yardımıyla oluşturulmuştur. (Şekil 100 ve Şekil 101).



Şekil 98: İletilen suni sahne I_1



Şekil 99: Yansıyan suni sahne I_2

$$\begin{bmatrix} I'_1 \\ I'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.8 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (105)$$



Şekil 100: Suni doğrusal polarizasyon imgesi 1 (tam iletim)



Şekil 101: Suni doğrusal polarizasyon imgesi 2

Elde edilen görüntüler görüntülere fastICA yöntemi uygulandığında elde edilen sonuçlar Şekil 102 ve Şekil 103 verilmiştir.



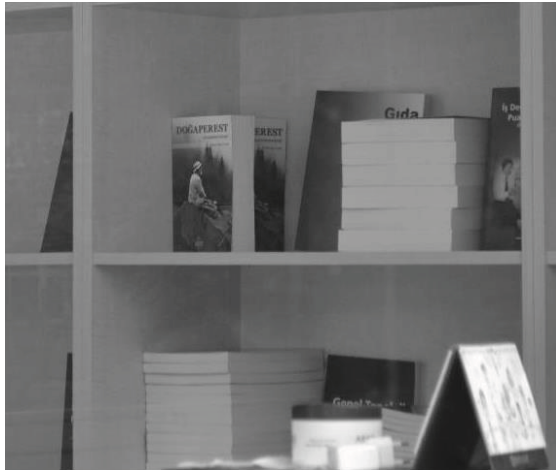
Şekil 102: fastICA iletilen sahne kestirimi



Şekil 103: fastICA yansıyan sahne kestirimi

Görüntülerden de anlaşılacağı üzere fastICA yöntemi suni sahnelerin kestirimini yüksek doğrulukta yapmıştır. Bu aşamada iki farklı sahnenin birbirinden bağımsız olması büyük önem arz etmektedir. İletilen ve yansıyan sahnelerde de yüksek miktarda benzer desenlerin bulunması halinde algoritmanın yüksek performansta kestirim yapamaması beklenmektedir.

Gerçek sahnelerden azami yansımaya sahip görüntüler (Şekil 98 ve Şekil 99) test düzeneği ile elde edildikten sonra fastICA algoritmasının ilgili imgelerde yansıyan ve iletilen sahnelerin kestirimi incelenmiştir. Sahnelerin kestirim sonuçları Şekil 106 ve Şekil 107 ile verilmiştir. Görüntülerden de anlaşılacağı üzere kestirim sonuçlarında yansıtılan ve iletilen sahnelerin kestirimi yüksek doğrulukta yapılamamıştır.



Şekil 104: Azami polarizasyon imgesi 1



Şekil 105: Azami polarizasyon imgesi 2



Şekil 106: fastICA kestirim sonucu 1



Şekil 107: fastICA kestirim sonucu 2

Bu durumun nedeninin ortaya çıkarılması amacıyla bilgisayar ortamında suni görüntüler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Şekil 100 ile verilen görüntüye sıfır ortalamalı, 1 varyans değerine sahip gauss filtre ile yumuşatma işlemi uygulanmış (görüntülere gürültü etkisi eklenmiştir) ve imgeler tekrardan fastICA algoritmasına girdi olarak verilmiştir. İletilen ve yansıyan sahne için algoritma kestirim sonuçları sırası ile Şekil 108 ve Şekil 109 ile verilmiştir.



Şekil 108: fastICA iletilen sahne kestirimi

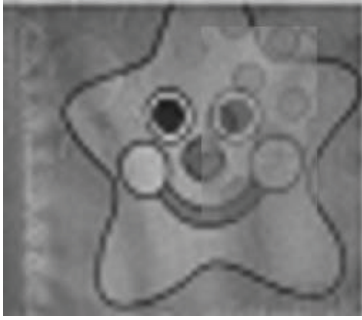


Şekil 109: fastICA yansıyan sahne kestirimi

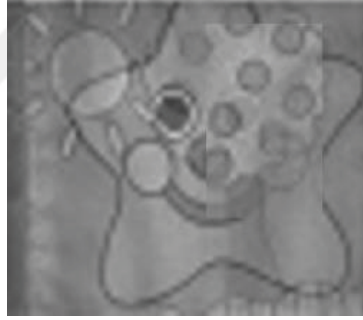
Şekil 108 ve Şekil 109 ile verilen görüntülerden de anlaşılacağı üzere suni sahnelerdeki gibi iletilen ve yansıyan sahnelerdeki birleşim doğrusal denklemler ile net bir şekilde ifade edilebildiğinde fastICA algoritması optimum sonuçları vermektedir. Fakat gerçek bir senaryo düşünüldüğünde farklı polarizasyon açısıyla elde edilen görüntüler gürültü etkilerinden arı değildir. İki farklı sahnenin birleşimlerinin doğrusal bir denklem ile net bir şekilde ifade edilemediği durumlar ortaya çıkmaktadır. Bu aşamada da algoritma kestirim sonuçlarının başarımı azalmaktadır.

Yansıyan ve iletilen sahnelerden ışık demetleri kendi içinde tam anlamıyla benzer polarizasyon özelliklerine sahip olmadığı durumlar oluşabilmektedir. İletilen ya da yansıyan sahnede sahnenin geneline göre farklı bir yapıya sahip malzemelerin (farklı açılarda yerleşmiş yüksek yansımaya değerine sahip yüzeyler gibi) bulunması durumunda ilgili sahneler artık iki bağımsız bileşenden oluşmamaktadır. İletilen sahnede bir tane tam yansımaya yüzeyinin bulunduğu görüntülerin (yansıyan ve iletilen sahnelerle beraber toplamda birbirinden bağımsız 3 bileşen olmaktadır) ayrıştırılabilmesi amacıyla suni sahneler üzerinde testler gerçekleştirilmiştir. Toplamda üç bağımsız bileşenin bulunduğu imgelerin ayrılabilmesi amacıyla polarize filtrenin üç farklı açısında polarimetrik görüntülerin alınması gerekmektedir (değişken sayısı kadar denklem gerekmektedir).

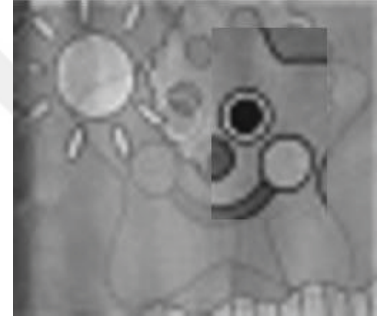
Şekil 71 ve Şekil 72 ile verilen suni sahnelerde bir tane yerel bölgenin imgenin geriye kalan bölgelerine göre farklı ağırlıklandırılmasıyla toplamda üç tane suni polarize görüntü oluşturulmuştur (Şekil 110, Şekil 111 ve Şekil 112).



Şekil 110: Suni polarizasyon imgesi 1

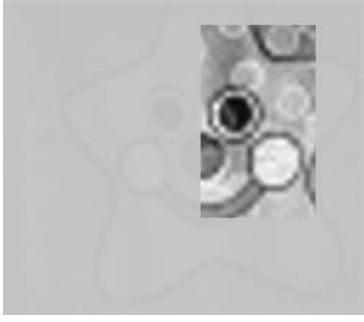


Şekil 111: Suni polarizasyon imgesi 2

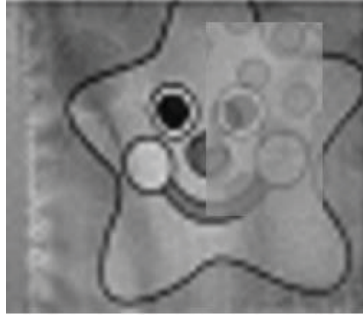


Şekil 112: Suni polarizasyon imgesi 3

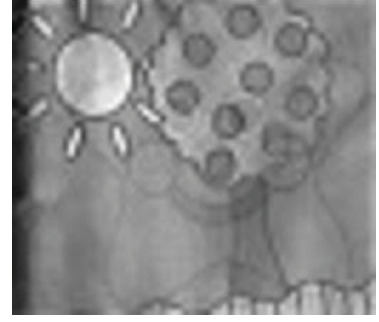
İmgeler fastICA algoritmasına verildiğinde elde edilen kestirim sonuçları Şekil 113, Şekil 114 ve Şekil 115 ile verilmiştir.



Şekil 113: fastICA kestirim sonucu imgesi 1



Şekil 114: fastICA kestirim sonucu imgesi 2



Şekil 115: fastICA kestirim sonucu imgesi 3

Şekil 113 ile verilen kestirim sonucu imgesinden görülebileceği üzere, yerel yansımaların bulunduğu bölüm net bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Fakat Şekil 114 ve Şekil 115 ile verilen imgelerin Şekil 75 ve Şekil 76 imgeleri gibi yüksek doğrulukta ayırtmadığı görülmektedir.

Suni sahnelerin test edilmesinden sonra fastICA algoritması ile gerçek farklı yerel polarize olmuş görüntülerin birbirinden ayrıştırılması incelenmiştir. Doğrusal polarizerin üç farklı açısında alınan görüntüler (Şekil 116, Şekil 117 ve Şekil 118) fastICA algoritmasına girdi olarak verilmiş ve sonuçlar incelenmiştir. Görüntülerdeki düz ve parlak yüzeye sahip masa takvimi camın iletilen sahne tarafında yer almaktadır. Düz şekilli ve yüksek yansıtıcılığa sahip masa takviminin yüzeyi cam yüzeyine göre farklı bir açıda doğrusal polarizasyona sebep olmakta ve o bölgeden gelen ışık huzmeleri görüntünün geri kalanına göre farklı bir doğrusal polarizasyon açısına ve derecesine sahip olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 116: I_0 imgesi



Şekil 117: I_{45} imgesi



Şekil 118: I_{90} imgesi

İlgili görüntüler için fastICA algoritmasında elde edilen kestirim sonuçları Şekil 119, Şekil 120 ve Şekil 121 ile verilmiştir.



Şekil 119: fastICA kestirim imgesi 1



Şekil 120: fastICA kestirim imgesi 2

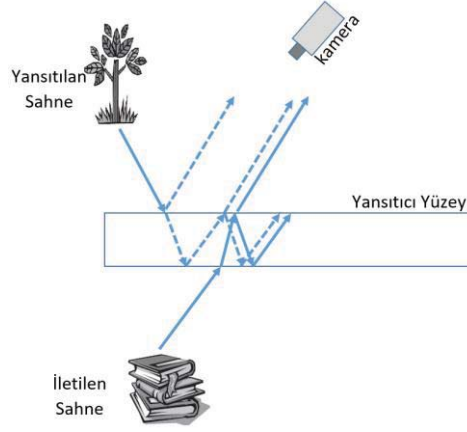


Şekil 121: fastICA kestirim imgesi 3

Kestirim sonuçlarından da anlaşılabileceği üzere sadece yerel yansımanın olduğu masa takvimi bölümü net bir şekilde ortaya çıkmamıştır. fastICA ile yerel yansımaların da bulunduğu geniş açılı görüntülerin ayrıştırılmasında elde edilen sonuçlar beklenen performansı karşılamamıştır.

Ek olarak, görüntüler fastICA algoritmasına girdi olarak verilirken vektörel hale getirilmektedir. Bu aşamada matris elemanlarının vektör olarak yeniden düzenlenmesi işleminde matris indislerinin sırasının değiştirilmesi fastICA algoritması için bir değişiklik arz etmemektedir. Bunun nedeni ise algoritma imgeye ait vektörün elemanlarını bir küme olarak kullanmaktadır. Sadece iki imgede de matris elemanlarının karşılıklı olarak aynı sıralamada olması gerekmektedir.

Bazı durumlarda yansıtıcı yüzeyler kalın olmakta ve yüzey içinde yansıtılan ve iletilen sahneler tekrar tekrar kırınıma uğrayıp karşı tarafa geçmekte ya da yansıtılmaktadır (Şekil 122). Bu da aynı sahnelerin kırınıma uğramış durumlarının üst üste bindiği görüntülerin oluşmasına neden olmaktadır. Sonuç olarak elde edilen görüntüde sadece birer tane iletilen ve yansıtılan sahne olması beklenirken, sahnelerin birden fazla kırınıma uğramış durumları da (sağa ya da sola kaymış şeklinde) görüntü üzerinde belirlemektedir. Bu durumlar genelde çift cam kullanılan binalarda ortaya çıkmaktadır. Tek ve ince cam yansımalarında birden fazla yansıma ve iletim durumları ihmal edilebilir seviyelerde olmaktadır. fastICA yöntemi kullanılırken de yansıma ve iletimlerin birden fazla olmadığı varsayılmıştır.



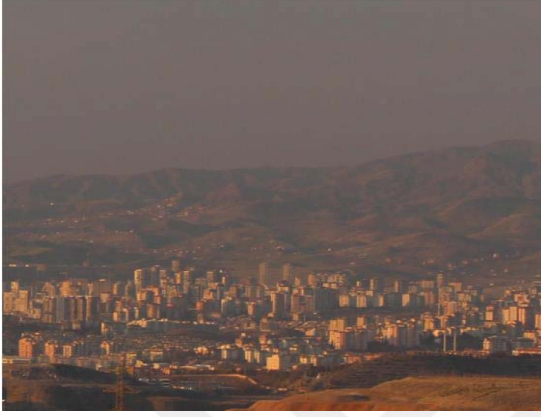
Şekil 122: Kalın Yansıtıcı yüzeyden yansımalar ve iletimler

4.4. Sis Etkisinin Ortadan Kaldırılması

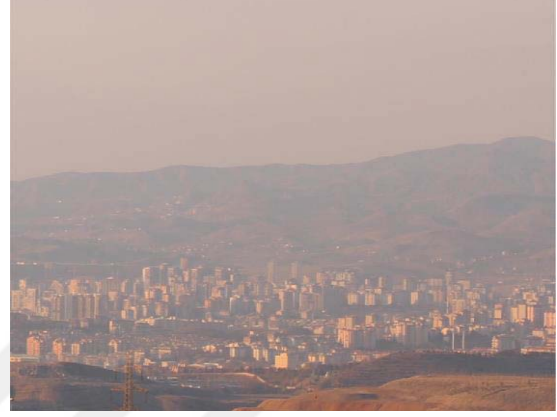
Çeşitli sebeplerle ortaya çıkan sis etkisinden dolayı görüş mesafesini azaldığı ve azalan bu mesafenin çeşitli varsayımlar altında polarizasyon kullanılarak artırılabilceği 3.1 bölümünde detaylı bir şekilde irdelenmişti. Bu işlem yapılırken, nesne ışımalarının apolarize, havadaki partiküllerden gelen ışımaların da yansıma düzlemine dik bir şekilde kısmi doğrusal polarize olduğu varsayımı yapılmaktadır. Ek olarak bu varsayımda her bir pikselin nesne ışımalarından ve hava partiküllerinin ışımalarının toplamından oluştuğu varsayımı yapılmıştır. Fakat nesne üzerine düşen ışınların ilgili nesnenin yüzeyine göre polarize duruma geçme ve nesne üzerinden gelen ışınların da polarize olma durumu bulunmaktadır. Bu durumda uygulanan yöntem hatalı sonuçlar üretebilmektedir.

Çalışmanın bu kısmında görüntülerde oluşan sis etkisinin fastICA algoritması ile ortadan kaldırılma durumu incelenmiş ve elde edilen sonuçlar üzerinden değerlendirmeler yapılmıştır. Öncelikle nesnelerden gözlemciye ulaşan ışınlar ile havadaki partiküllerden gözlemciye ulaşan ışınların polarizasyon durumları gözlenmiştir. Test düzeneği ile polarize filtrenin yansıma eksenine göre 0° ve 90° açılarındaki alınan görüntüler sırası ile Şekil 123 ve Şekil 124 ile verilmiştir. İlgili görüntüler şubat ayında alınmış ve kameranın bakış açısı güneşe göre yanca açıda yaklaşık 90° olarak ayarlanmıştır. Çekilen ortamda sisin az olmasından dolayı elde edilecek polarizasyon derecesi düşük olmaktadır. Fakat kamera bakış açısı güneşe göre 90° açığa ayarlanarak ilgili polarizasyon derecesi azami

seviyeye çıkarılmıştır. Görüntülerden de anlaşılabilirce üzere sahne Şekil 123 ile verilen görüntüde daha net bir şekilde ortaya çıkmışken Şekil 124 ile verilen görüntüde sahne üzerinde tül etkisi gibi bir katman bulunmaktadır. Ede edilen bu görüntüler havadaki partiküllerin kısmi doğrusal polarize olduğu varsayımını desteklemektedir.

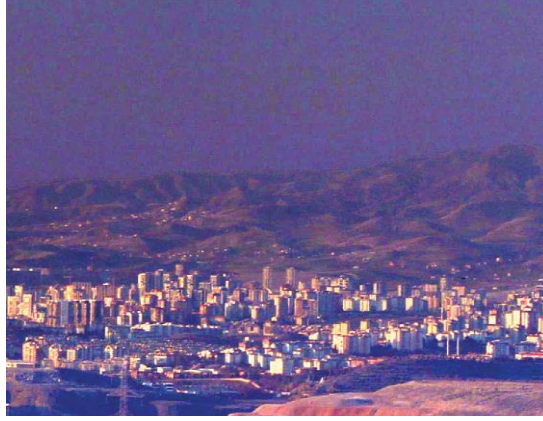


Şekil 123: En iyi durum $I^{\parallel}$



Şekil 124: En kötü durum $I^{\perp}$

Elde edilen polarize görüntüler üzerinde öznitelik tabanlı imge çakıştırma işlemi uygulanmış ve imgeler hizalı duruma getirilmiştir. Bu aşamadan sonra havadaki partiküllerden kaynaklı ışımaların ve nesnelerden gözlemciye ulaşan ışımaların birbirinden bağımsız olduğu varsayımı yapılmıştır. Bu varsayım altında ilgili görüntülerdeki sis etkisinin ortadan kaldırılabilmesi için fastICA algoritmasının kullanılmasının uygun olduğu değerlendirilmiş ve ilgili görüntüler fastICA algoritmasının girdi olarak verilmiştir. Bu aşamada görüntüler RGB'den gri tonlu duruma çevrilmemiş her bir kanal ayrı ayrı fastICA algoritmasına verilmiştir. Daha sonra her bir kanalın kestirim sonuçları birleştirilerek ilgili sahnenin RGB imgesi elde edilmiştir (Şekil 125). Şekil 125 ile verilen kestirim sonucu incelendiğinde, fastICA algoritması ile gerçekleştirilen kestirim işleminin en az sadece polarize filtrenin hareket ettirilmesi vasıtasıyla elde edilebilecek en iyi durum kadar iyi sonuç verdiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 125: fastICA ile sis etkisi ortadan kaldırılmış sahne

4.5. Gökyüzü Polarizasyonu

Güneşten gelen ışınlar atmosfere girmeden önce apolarize durumdadır. Gökyüzü atmosferik bileşenleri (gazlar, ışık parçacıkları, su damlacıkları, buz kristalleri) ile etkileşime girdikten sonra kısmi olarak doğrusal polarize duruma gelmektedir. Açık gökyüzü, güneş pozisyonuna, atmosferin çeşitli bileşenlerinin dağılımına bağlı bir polarizasyon desenine sahiptir [7].

4.5.1. Rayleigh gökyüzü modeli

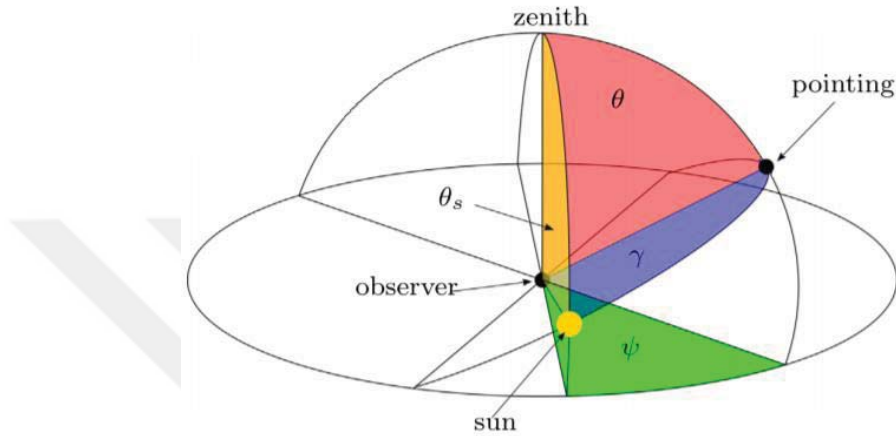
Rayleigh gökyüzü modeli gündüz ortamında gökyüzünün polarizasyon örüntüsünü tanımlamaktadır. Atmosferdeki hava molekülleri, su, toz ve aerosollerden gelen Rayleigh dağılımı gökyüzü ışığının belirli bir polarizasyon modeline sahip olmasına neden olur. Polarizasyon durumu temel olarak partiküllerin boyutuna ve partiküller üzerine düşen ışığın dalga boyuna bağlıdır. Rayleigh saçılımı sadece dalga boyunun partiküllerin boyutundan çok daha küçük olduğunda ortaya çıkmaktadır. Saçılma yoğunluğu büyük dalga boylarına nazaran küçük dalga boylarında daha yüksektir. Bu nedenle gökyüzünden saçılan güneş ışığının mavi renkteki yoğunluğu daha fazladır ve gökyüzünün mavi görünmesine neden olur. Gün doğuşunda veya günbatımında, ışığın yolu yeterince kısa olduğunda, daha büyük dalga boyları hâkim olur ve gökyüzü sarı veya kırmızı renkte gözükür [3].

Gökyüzünün kutuplaşma modeli güneşin gökyüzündeki konumuna bağlıdır. Atmosferden saçılan güneş ışığı her ne kadar polarize olsa da ışık kaynağı (güneş) ile gözlemci arasındaki saçılma açısı 90° olduğunda elde edilen ışık azami polarizasyon derecesine ulaşmaktadır. Güneş ile 90° bakış açısı istikametinden

güneşe doğru ya da güneşin tersi istikametinde gidildikçe polarizasyon derecesi azalmaya ve bakış açısı güneş ya da güneşin 180° açısında olduğunda da asgari değere sahip olmaktadır.

4.5.1.1. Gökyüzü Geometrisi

Gökyüzü polarizasyonunun geometrisi güneş, zenit ve saçılma noktasına dayalı göksel üçgen ile tanımlanmaktadır (Şekil 126).



Şekil 126: Rayleigh gökyüzü modeli geometrisi [37]

Bu modele göre, γ saçılma noktası ve güneş arasındaki açısal uzaklığı, Θ_s güneşin zenite olan açısal uzaklığını ($90^\circ -$ güneş yüksekliği), Θ saçılma noktası ve zenit arasındaki açısal uzaklığı ($90^\circ -$ gözlemlenen yükseklik) ve ψ güneş doğrultusu ve bakış doğrultusunun yer izdüşümleri arasındaki açısal uzaklığı göstermektedir.

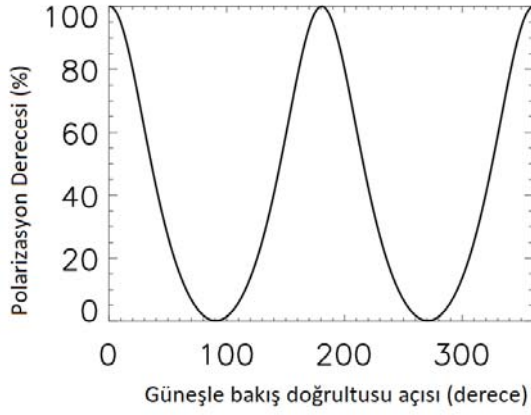
4.5.1.2. Rayleigh polarizasyon derecesi

Rayleigh gökyüzü modeli gökyüzü polarizasyon derecesi denklem (106) ile verilmiştir.

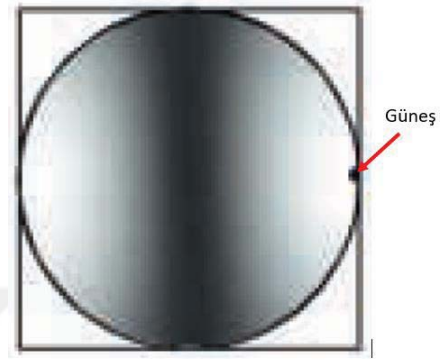
$$\delta = \frac{\delta_{max} \sin^2 \varnothing}{1 + \cos^2 \varnothing} \quad (106)$$

Polarizasyon derecesi bir önceki bölümde anlatıldığı gibi temel olarak güneşten olan açısal uzaklığa bağlıdır. Denklem (106) ile verilen ifadede $\varnothing$ açısı 90° değerini ulaştığında polarizasyon derecesi δ_{max} değerini almakta, $\varnothing$ açısı 0° ya da 180° olduğunda da sıfır değerini almaktadır. Güneş pozisyonu sabit olduğunda bakış açısı 0° 'den 360° 'ye kadar artırıldığında elde edilen polarizasyon derecesi

değerleri grafik şeklinde Şekil 127 ile verilmiştir. Ek olarak gökyüzünün 180° tamamı dikkate alındığında her açıdaki polarizasyon derecesi değerleri Şekil 128 ile görsel olarak verilmiştir. İlgili görselde güneş ufuk çizgisindedir. Şekilde de anlaşılabileceği üzere kuzey-zenit-güney ekseninde polarizasyon derecesi azami değerlerdedir.



Şekil 127: Polarizasyon derecesi



Şekil 128: 180° açıklıkta gökyüzü polarizasyon derecesi [4]

Güneş zenit noktasında olduğunda gözlemlenen nokta ufuk çizgisinde 0° 'den 360° 'ye kadar döndürüldüğünde elde edilen polarizasyon derecesi sabit kalmaktadır. Ufuk çizgisinden zenit noktasına doğru sabit yükseliş açıda ve her yanca açıda aynı polarizasyon derecesi elde edilmektedir (polarizasyon derecesi güneş merkezli dairesel bantlarda sabittir). Gözlemlenen nokta ufuk çizgisinden sabit yanca açıda ve yükseliş açısı artacak şekilde zenit noktasına ilerletildiğinde elde edilen polarizasyon derecesi azalmaktadır.

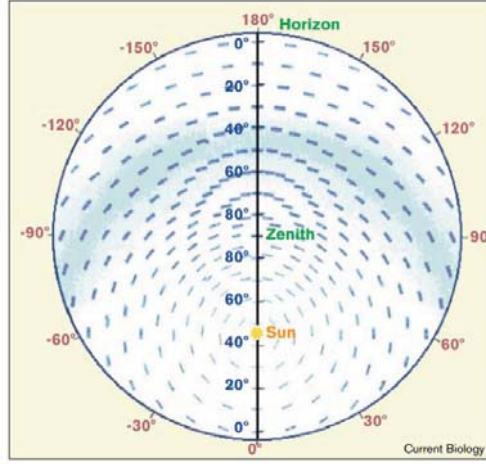
4.5.1.3. Rayleigh polarizasyon açısı

Saçılım düzlemi, güneş, gözlemci ve gözlemlenen nokta (saçılım noktası) arasındaki düzlemdir. Saçılma açısı ise güneş ve saçılım noktası arasındaki açısal uzaklıktır. Saçılma açısı denklemi, kosinüs yasasından faydalanılarak küresel üçgenden çıkarılmaktadır:

$$\cos\zeta = \sin\theta_s \sin\theta \cos\psi + \cos\theta_s \cos\theta \quad (107)$$

Bu denklemde, gözlemlenen nokta ile zenit arasındaki açının 0 (sıfır) olduğu durumda eşitlik bozulmaktadır. Gözlemlenen nokta, gözlemleyici ve güneş ile bir düzlem oluşturulduğunda polarizasyon açısı bu düzleme her zaman dik

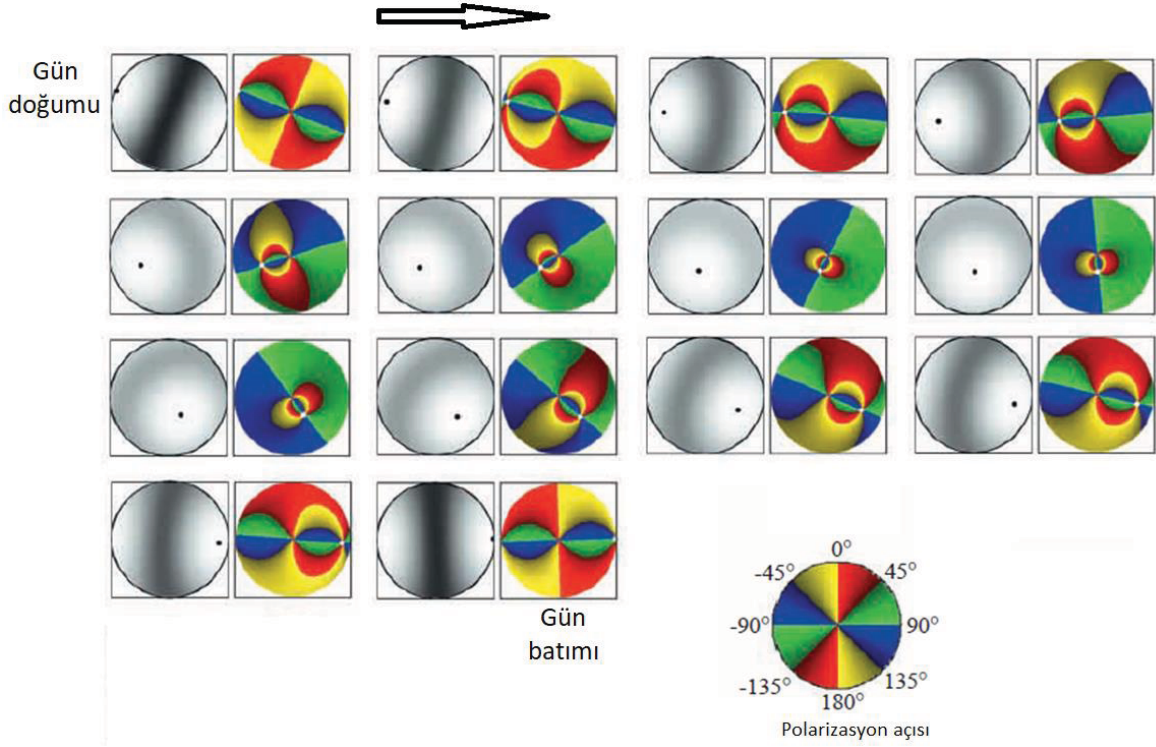
durumdadır [37]. Güneşin gökyüzündeki sabit açısında gökyüzü polarizasyon yönünü gösteren görsel Şekil 129 ile verilmiştir.



Şekil 129: Gökyüzünde polarize olmuş ışığın örüntüsü [38]

Güneşin doğumundan batımına kadar olan sürede belirli aralıklarla gökyüzünün görülen yarım küresi için elde edilen Rayleigh polarizasyon açısı imgeleri Şekil 130 ile verilmiştir. Görselden de anlaşılacağı üzere polarizasyon açısı için zenit ve güneş olmak üzere iki farklı merkez bulunmaktadır. İlgili merkezlerden sadece güneş gün içinde hareketli olduğundan, iki merkez arasındaki doğru gün içinde dönme hareketi sergilemektedir. İlgili dönme hareketinin bazı canlılarda navigasyon için kullanıldığı değerlendirilmiştir [39].

Polarizasyon açısı, güneş ve zenit arasındaki doğru boyunca sıfırdır ve gözlemlenen nokta doğuya doğru saat yönünde hareket ettiğinde polarizasyon açısı da doğuya doğru saat yönünde artar. Güneşin doğumundan itibaren gün batımına kadar olan sürede gökyüzünün Rayleigh modeline göre polarizasyon açısı Şekil 130 ile verilmiştir.



Şekil 130: Rayleigh gökyüzü polarizasyon açısı imgesi [39]

4.5.2. Gökyüzü polarizasyonu çalışmaları

Gökyüzünden elde edilen görüntülerin öznitelik tabanlı bir imge çakıştırma algoritmasıyla çakıştırılması özellikle gökyüzünde bulut olmaması durumunda oldukça zor olmaktadır. Bu nedenle çalışmanın bu kısmında gökyüzü görüntüleri elde edilirken ilgili görüntülerde yeryüzünden bir kısmın bulunmasına dikkat edilmiştir. Bu sayede sahneye öznitelik çıkartılabilecek bir bölüm eklenmiştir. Ek olarak, bulutların genel olarak hareketli ve ilgili hareketin de dağınık ve rastgele olmasından dolayı bulutlu havalarda gökyüzü polarizasyon karakteristiği üzerinde detaylı çalışma fırsatı elde edilememiştir. Bu yönde detaylı bir çalışma yapılabilmesi için eş zamanlı ya da eş zamanlıya yakın polarize görüntüler elde edebilen bir ölçüm sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Gökyüzü polarizasyonunun ölçülmesi ve analiz edilmesi aşamasında ilk olarak gökyüzünün açık ve bulutlu olduğu durumlardaki polarizasyon dereceleri arasındaki farklar gözlenmeye çalışılmıştır. Bu aşamada elde edilen doğrusal polarizasyon derecesi ve açısı imgelerinin farklı değerleri için farklı renkler kullanılarak renklendirilme yapılmış ve ilgili imgelerin anlaşılabilirliğinin artırılması

sağlanmıştır. Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi değerleri 4 farklı renkte, her renk ise kendi içinde 6 farklı ağırlıkladarmaya sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi değerleri de 5 farklı renk ile görselleştirilmiştir. Polarizasyon derecesi ve açısı imgelerinin renk haritaları sırası ile Şekil 131 ve Şekil 132 ile verilmiştir.



Şekil 131: Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi renk haritası



Şekil 132: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi renk haritası

Kısmi bulutlu bir havada test düzeneği ile doğrusal polarizer filtresinin 0° , 45° ve 90° açılarında elde edilen polarize görüntüler sırası ile Şekil 133, Şekil 134 ve Şekil 135 ile verilmiştir. İlgili görüntüler mart ayında ve saat 15:00 sularında, kamera bakış açısı güneşe göre yaklaşık 60° olacak şekilde elde edilmiştir.



Şekil 133: 0° polarizer açısı ile alınan imge

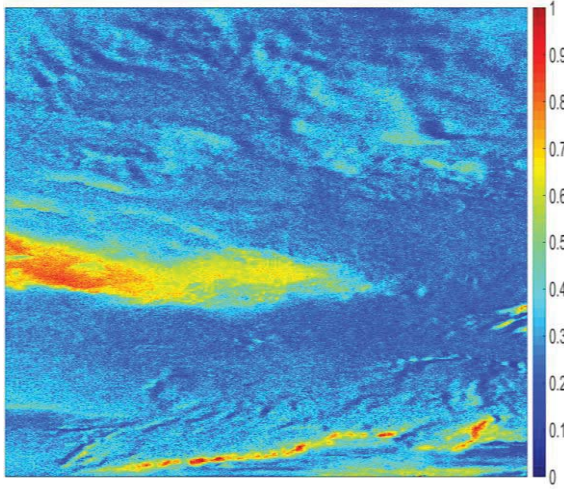


Şekil 134: 45° polarizer açısı ile alınan imge

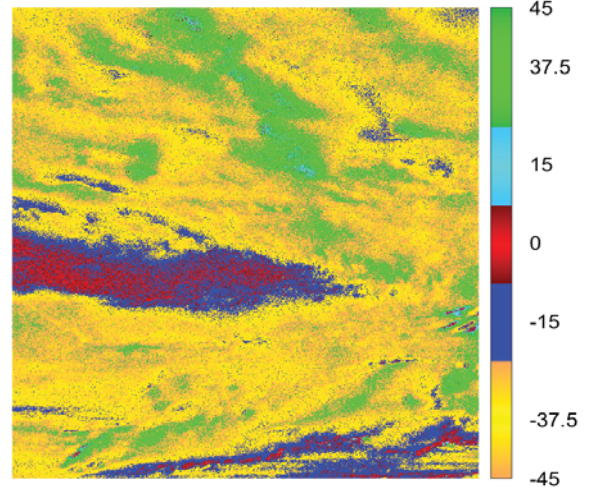


Şekil 135: 90° polarizer açısı ile alınan imge

İlgili görüntüler yardımı ile elde edilen doğrusal polarizasyon derecesi düzgeleştirilmiş imgesi ve doğrusal polarizasyon açısı imgesi Şekil 136 ve Şekil 137 ile verilmiştir.



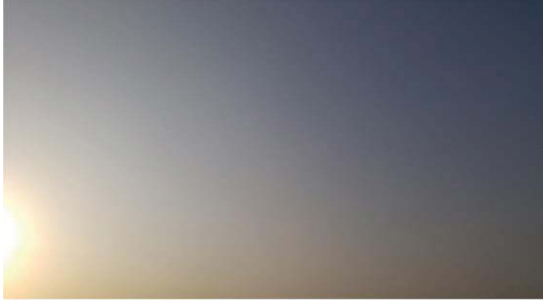
Şekil 136: Doğrusal polarizasyon derecesi imgesi



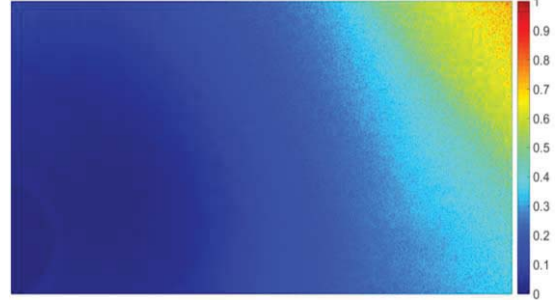
Şekil 137: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi

Görüntülerden anlaşılacağı üzere gökyüzünün açık olduğu durumlarda elde edilen polarizasyon dereceleri bulutlu kısımlara göre daha yüksek olmaktadır. Bulutlar, güneşten gelip atmosferden yansıyan güneş ışınlarının rastgele saçılmasına ve polarizasyon durumlarının değişmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle güneşin navigasyon [7] olarak kullanan bazı canlıların ve cihazların bulutlu havalarda yön bulma kabiliyetleri azalmaktadır.

Gökyüzündeki polarizasyon karakteristiğinin genel olarak güneşe bağlı olduğu belirtilmektedir [7]. Güneş etrafında ve güneşten uzaklaştıkça polarizasyon derecesindeki değişimlerin incelenmesi amacıyla güneşin de içinde bulunduğu polarize görüntüler elde edilmiş ve renklendirilmiş polarizasyon derecesi imgeleri oluşturulmuştur. Renklendirilmiş örnek bir polarizasyon derecesi imgesi Şekil 138.b ile verilmiştir. İlgili görüntü, Ankara'da Beytepe köyü mevkinde haziran ayında ve saat 17:00 civarında çekilmiştir. Çalışmada bu seviyeden sonra verilen bütün görüntüler aynı bölgeden elde edilmiştir. Polarizasyon derecesi imgesinden, güneşten uzaklaştıkça (herhangi bir yönde) elde edilen polarizasyon derecesinin arttığı görülmektedir. Güneşten doğrudan gelen ışınların polarizasyonunun düşük, güneşten çıkıp atmosferden saçıldıktan sonra gelen ışınların ise polarizasyon derecelerinin yüksek olduğu anlaşılmaktadır.



a. Görünür bant imgesi



b. Göreceli polarizasyon derecesi imgesi

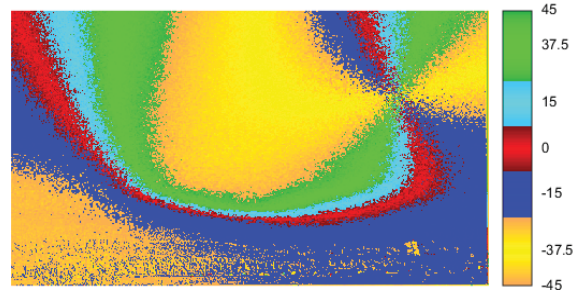
Şekil 138: Güneşten uzaklaştıkça polarizasyon derecesindeki değişim

Gökyüzü polarizasyon derecesinin ufuk çizgisine olan yanca açısına göre değişim gösterdiği (güneş doğuşunda ve batışında) zamanda gökyüzü polarizasyon açısı imgelerinin her birinde rüzgârgülü karakteristiğinin oluştuğu (gerçekleştirilen renklendirme sayesinde) gözlenmiştir. İlgili karakteristiğin değişiminin incelenmesi amacıyla güneş batımına yakın bir zamanda üç farklı zaman aralığında polarize görüntüler elde edilmiş ve polarizasyon açısı imgeleri çizdirilmiştir.

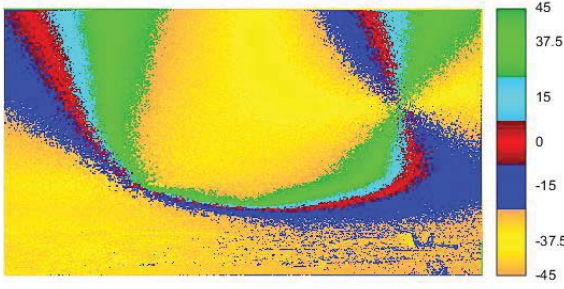
İlgili görüntüler, kamera ile güneş arasındaki yanca açısı sabit kalacak şekilde Şekil 139 ile verilen sahneden alınmış ve renklendirilmiş polarizasyon açısı ve derecesi imgeleri çıkarılmıştır (Şekil 140, Şekil 141 ve Şekil 142). Görüntüler eylül ayında saat 18:30 civarında çekilmiştir. Kameranın bakış açısı yancada güneşe göre yaklaşık olarak 90° olarak ayarlanmıştır.



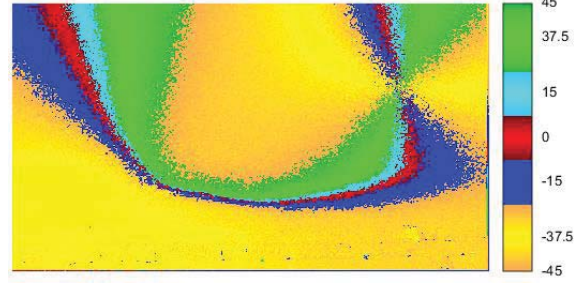
Şekil 139: Orijinal sahne



Şekil 140: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_1

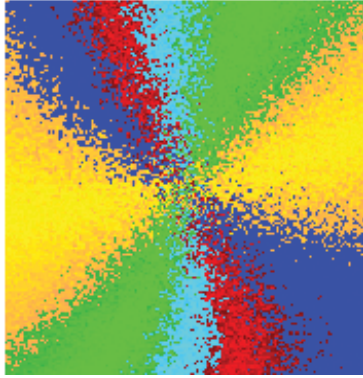


Şekil 141: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_2

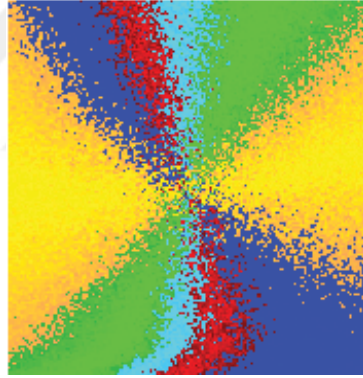


Şekil 142: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi t_3

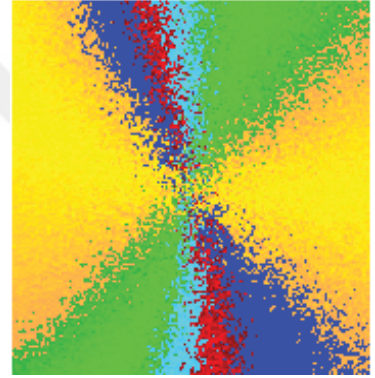
Yukarıda verilen polarizasyon açısı görselleri incelendiğinde güneşin yükseliş eksenindeki açısının azalmasıyla beraber rüzgârgülünün saat yönünde dönmeye başladığı görülmektedir. Bu da güneşin yükseliş eksenindeki değişimin doğrusal polarizasyon açısı imgesindeki dönme miktarı ile ilişkili olduğu anlamına gelmektedir. Rüzgârgülü dönmesinin daha net görülebilmesi için Şekil 140, Şekil 141 ve Şekil 142 ile verilen her bir imgedeki rüzgârgüllerinin merkezlerinden kırılmış hali sırasıyla Şekil 143, Şekil 144 ve Şekil 145 ile verilmiştir.



Şekil 143: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 1



Şekil 144: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 2



Şekil 145: Doğrusal polarizasyon açısı imgesi rüzgârgülü 3

Güneşin batımından sonra da bir süreliğine elde edilebilen rüzgârgülünün güneşin batımına göre nasıl değiştiğinin gözlenebilmesi amacıyla doğrudan güneşinde de bulunduğu polarize görüntüler alınmış ve analiz edilmiştir. İlgili görüntüler güneş batarken ve battıktan sonra toplam üç farklı zaman aralığında alınmıştır (Şekil 146, Şekil 147 ve Şekil 148). İlgili görüntüler kasım ayında alınmıştır. İlk görüntünün alınma saati yaklaşık olarak 18:00'dır ve görüntülerin alınma sırası arasında 5dk süre bulunmaktadır.



Şekil 146: t_1 anında güneş pozisyonu

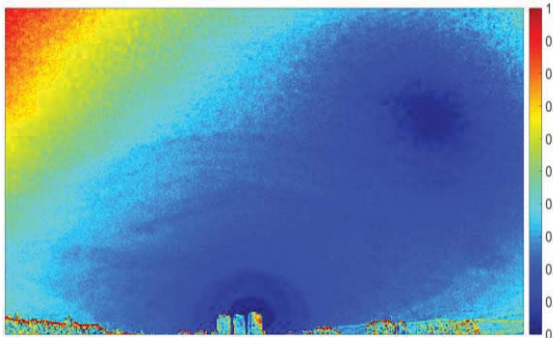


Şekil 147: t_2 anında güneş pozisyonu

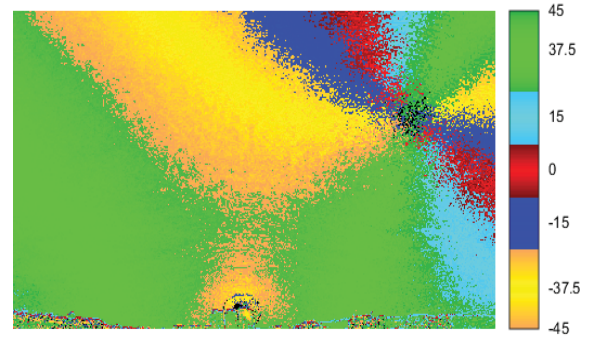


Şekil 148: t_3 anında güneş pozisyonu

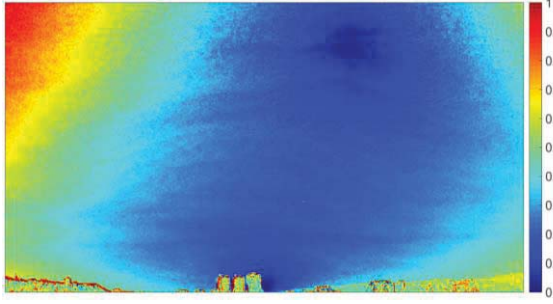
Güneşin her bir pozisyonu için polarizasyon filtresinin 3 farklı açısında (0° , 45° , 90°) alınan görüntülerden oluşturulan polarizasyon derecesi ve açısı imgeleri Şekil 149—Şekil 150, Şekil 151—Şekil 152 ve Şekil 153—Şekil 154 ile verilmiştir.



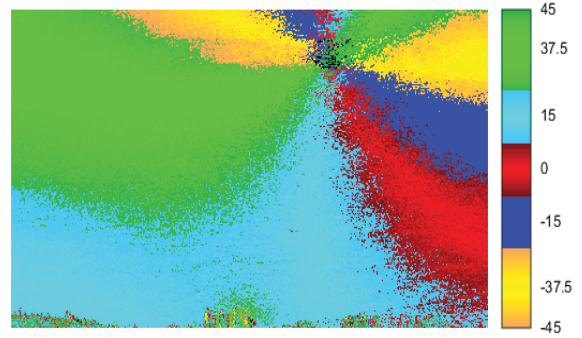
Şekil 149. Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_1



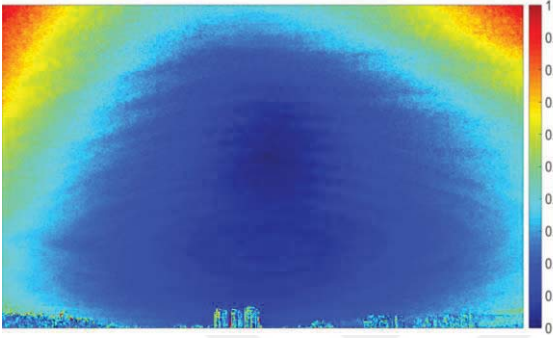
Şekil 150: Polarizasyon açısı imgesi t_1



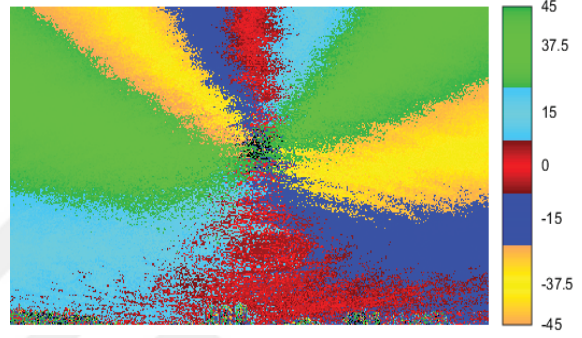
Şekil 151: Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_2



Şekil 152: Polarizasyon açısı imgesi t_2



Şekil 153: Göreceli polarizasyon derecesi imgesi t_3



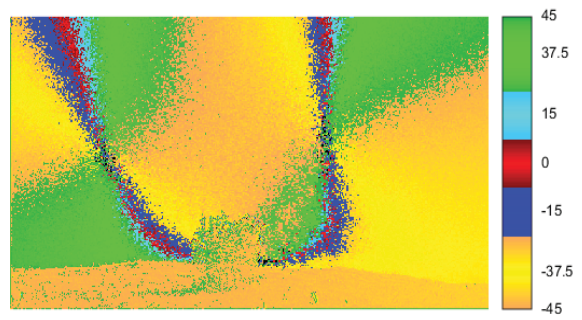
Şekil 154: Polarizasyon açısı imgesi t_3

Alınan görüntülerdeki polarizasyon açısı imgeleri incelendiğinde rüzgârgülü merkezindeki kaymanın güneşin batmasını izlemediği gözlenmiştir. Rüzgârgülü bir önceki çalışmada da olduğu gibi güneş battıkça saat yönünde dönmektedir.

Güneşe göre polarizasyon derecesinin azami olduğu açıda polarizasyon derecesinin durumunun incelenmesi amacıyla güneşe doğru tam 90° yanca açıda alınan polarize görüntüler ile elde edilen polarizasyon açısı imgesi Şekil 156 ile verilmiştir. İlgili görüntü haziran ayında ve saat 17:15 civarında çekilmiştir.



Şekil 155: Güneşe göre 90° yanca açıda görünür bant sahne



Şekil 156: polarizasyon açısı imgesi

Azami açıda polarizasyon açısındaki rüzgârgülünden iki tane ortaya çıktığı gözlenmiş, dolayısıyla polarizasyonun güneşe göre 90° yanca açıda simetrik olduğu değerlendirilmiştir (ilgili karakteristik Rayleigh modelinden de görülmektedir).

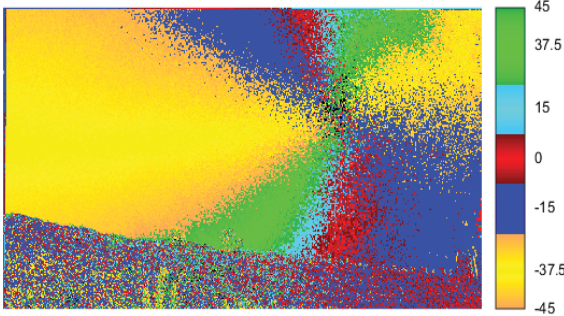
Doğrusal polarizasyon açısı imgeleri ile güneşin kameraya göre yönünün belirlenebilmesi amacıyla çeşitli polarize görüntüler çekilmiş ve analiz edilmiştir. Güneşin, kameraya göre sağ ya da sol taraflarında kalacak şekilde çekilen fotoğraflar ve ilgili imgelerden elde edilen polarizasyon açısı imgeleri sırasıyla Şekil 157—Şekil 159 ve Şekil 158—Şekil 160 ile verilmiştir. İlgili görüntüler haziran ayında ve saat 17:10 civarında çekilmiştir.



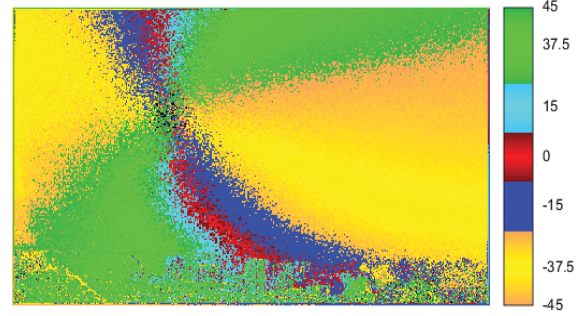
Şekil 157: Güneşin kameraya göre sağ tarafta olduğu durum



Şekil 158: Güneşin kameraya göre sol tarafta olduğu durum



Şekil 159: Güneşin kameraya göre sağ tarafta olduğu durumda polarizasyon açısı



Şekil 160: Güneşin kameraya göre sol tarafta olduğu durumda polarizasyon açısı

Her iki polarizasyon açısı imgelerinden rüzgârgülü merkezinin imgenin merkezine göre güneşin bulunduğu yönde olduğu gözlenmektedir. İlgili karakteristik, güneşe $-90^\circ < \theta < 90^\circ$ yanca açıları için test ediliş ve rüzgârgülü merkezinin sürekli güneşin bulunduğu yönde olduğu gözlenmiştir.

5. SONUÇLAR

Tez kapsamında, ışık polarizasyonunun teorik altyapısının gözden geçirilmesi yapılmış ve bilgisayar görüşünde polarizasyon kullanılarak elde edilen ve edilebilecek olan kazanımlar araştırılmıştır. Polarizasyonun bilgisayar görüşünde çözüm sunduğu problemler çeşitli bölümlere ayrılarak incelenip analiz edilmiştir. Bunlar, görünürlüğün düştüğü havalarda görüş mesafesinin ve netliğin artırılması, nesnelerin üç boyutlu şekillerinin elde edilmesi, çeşitli yansıma yüzeylerindeki çift görüntülerin birbirinden ayrılması ve farklı dalga boylarında (görünür, yakın, orta ve uzun bant kö) insan yapımı ya da iletken nesnelerin sahnedeki görünürlüklerinin artırılması ve tespit edilmesi şeklindedir. Deneysel çalışmalarda görüntülerin hizalanmasında kullanılan igme çakıştırma işlemi anlatıldıktan sonra polarize görüntülemelere örnekler verilmiştir. Daha sonra çeşitli yansıma yüzeylerinde oluşan çift görüntülerin ayrıştırılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Sistem etkisinden dolayı görüş mesafesinin düştüğü durumlarda polarize görüntülemeyle netliğin artırılabilirdiği gösterilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak gökyüzü polarizasyonu incelenmiş, polarizasyon derecesi ve açısı imgelerinin güneşin pozisyonu ve gökyüzünün kapalılık durumuna göre nasıl etkilendiği inceleme altına alınmıştır.

Işığın polarizasyon karakteristiği geleneksel fotoğrafı ile bilgisayar görüşünde çözülmeye çalışılan problemlere ek veriler sağladığı ve problemlerin çözümüne yeni boyutlar kazandırdığı görülmektedir.

Görüş mesafesinin düşmesi durumunda polarizasyon kullanılarak ortama netlik sağlanabilmektedir. Nesnelerden ve nesne harici partiküllerden gelen ışın demetlerinin polarizasyonlarının farklı olduğu varsayıldıktan sonra ilgili ışıklar matematiksel olarak modellenmektedir. Bu model sayesinde elde edilen çözümler ile görüş mesafelerinin hem yeryüzünde hem de sualtında başarıyla artırıldığı, buna ek olarak ise partiküllerin modellenmesi sayesinde derinlik haritalarının başarıyla oluşturulabilirdiği gözlenmiştir. Tam yansıma ya da dağınık yansıma yapan (metal/ametel) nesnelerin üzerine düşürülen ışık demetlerinin geri yansımasındaki polarizasyon derecesi ve açısı değerleri kullanılarak ilgili nesnelerin üç boyutlu şekilleri başarıyla elde edilebilmektedir. Bu çalışmalar için

oluşturulan ortam genel olarak laboratuvar ortamıdır. Deneylerin kontrollü yapılmasına ve modellemede çok fazla kontrol edilemeyen (çevreden ve havadaki moleküllerden gelen yansımalar ve gürültüler vb.) değişken olmamasına dikkat edilmektedir. Farklı bantlarda nesnelerin tespiti için ek bir boyut sunan polarizasyonun çeşitli başarılı örnekleri ortaya konmuş ve ilgili nesne tespit yöntemleri genel anlamda sunulmuştur.

Polarize görüntüler üzerinde çalışmaların yapılabilmesi için fotoğraf makinası ve polarize filtre edinilmiş, polarize filtre elle ayarlanıp çok sayıda polarize görüntü alındıktan sonra üzerlerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Tez kapsamında, görüntüler elde edilirken polarize filtrenin ve fotoğraf makinasının elle kullanımında dolayı oluşan sarsıntılar görüntüler arasında kaymalara sebebiyet verdiği gözlenmiş ve ilgili kaymaların düzeltilebilmesi amacıyla imge çakıştırma algoritmaları kullanılmıştır.

Saydam yansıma yüzeylerinde (cam, su) karşılaşılan çift görüntülerin birbirinden ayrılması problemi üzerinde inceleme ve analizler yapılmış ve çözüm önerileri sunulup gerçek görüntüler üzerinde sonuçları verilmiştir. İlgili yüzeylerden polarize filtrenin farklı açılarında her iki sahnenin de farklı ağırlıklarda bulunduğu iki farklı görüntü elde edilmiş ve BBA algoritması ile yansıtılan ve iletilen sahneler başarıyla birbirinden ayrılabilmiştir. Geniş yansıma yüzeylerindeki görüntülerin ise imgelerin parçalara ayrılarak gerçekleştirilebileceği gösterilmiştir. Geniş sahne içinde bulunan farklı yansıma oranlarına sahip yerel bölgelerin de birbirinden ayrılabilmesi amacıyla çok girdiği BBA algoritması kullanılmış fakat tatmin edici sonuçlar elde edilememiştir. Tam yansıma durumlarında ise BBA algoritmasının sağlıklı sonuçlar vermediği bunun da görüntüler üzerindeki gürültü etkilerinden kaynaklandığı değerlendirilmiştir. Ayrıca suni ve gerçek sahneler üzerinde yapılan testler sonucunda sahnelerin birbirinden yüksek doğrulukta ayrılabilmesi için BBA algoritmasına iletilen ve yansıyan sahnelerin her ikisinin de bulunduğu görüntülerin verilmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, sisten kaynaklı görüş mesafesinin düştüğü durumlarda polarizasyon ve bağımsız bileşenler algoritması ile sahnelerdeki netlik artırılabilmiştir.

Sanedeki çeşitli hareketlerden (bulut hareketleri, ağaç/yaprak hareketleri vb.) dolayı elle ayarlanan polarize filtreler ile alınan görüntülerdeki kaymaların ortadan kaldırılıp sağlıklı bir şekilde analizlerin yapılabilmesi için otomatik bir sistemin

gerekliliği sonucuna varılmıştır. Bu nedenle kapalı havalardaki gökyüzü polarizasyonu çalışmaları genişletilememiştir. Bulutların polarizasyon bakımından incelenmesinde sadece açık gökyüzüne göre daha düşük polarizasyon derecesine sahip olduklarını gösteren çalışmalar yapılabilmiiştir. Bunun yanında açık havada gökyüzünden elde edilen polarizasyon derecesi ve açısı imgeleri ile güneşin yönünün kolaylıkla tayin edilebildiği gösterilmiştir. Güneşin pozisyon bilgisinin yanında, yükseliş açısındaki değişimin de polarizasyon açısı imgelerinde belirli bir karakteristiğe sebep olduğu gözlenmiştir.

Gelecek dönemde, bu çalışmada algoritmaların farklı görüntüler üzerinde denenmesi ve algoritma performanslarının farklı görüntüler üzerinde ne derece benzer sonuçlar verdiğinin incelenmesi bu araştırmaya katkı sağlayacaktır.



6. KAYNAKLAR

- [1] Dennis Goldstein, *Polarized Light*, Marcel Dekker, **2003**.
- [2] G. P. Konnen, *Polarized Light in Nature*, University of Cambridge Press, **1985**.
- [3] M. Minnaert, *The Nature of Light and Colour in the Open Air*, Dover Publications, **1954**.
- [4] Lawrence B. Wolff, Applications of Polarization Camera Technology, *IEEE Expert*, Volume: 10, Issue: 5, **1995**.
- [5] Srinivasa Narasimhan, *Physics based Methods in Vision*, Lecture Notes, **2011**.
- [6] Fu Qiang, Jiang Hui-lin, Duan Jin, Mo chun-he, Zhuang shu-ming, Yang yong-he, Target Detection Technology Based on Polarization Imaging in the Complex Environment, *International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Proc. of SPIE*, Vol. 8905, **2013**.
- [7] Gábor Horváth, Dezső Varju, *Polarized Light in Animal Vision*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, **2004**.
- [8] Nicholas W. Roberts, Megan L. Porter², Thomas W. Cronin, The molecular basis of mechanisms underlying polarization vision, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 366, 627–637, **2011**.
- [9] Uwe Homberg, Stanley Heinze, Keram Pfeiffer, Michiyo Kinoshita, Basil el Jundi, Central neural coding of sky polarization in insects, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 366, 680–687, **2011**.

- [10] Curt Roslund and Claes Beckman, Disputing Viking navigation by polarized skylight, *Applied Optics*, Volume: 33, No: 21, **1994**.
- [11] Gabor Horvath, Andras Barta, Istvan Pomozi, Bence Suhai, Ramon Hegedu, Susanne Akesson, Benno Meyer-Rochow, Rüdiger Wehner, On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 366, 772–782, **2011**.
- [12] W.A. Shurcliff, *Polarized Light: Production and Use*, Havard University Press, **1966**.
- [13] Q. Zheng and R. Chellappa, Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume: 13, Issue: 7, **1991**.
- [14] L. Wolff, Polarization vision: a new sensory approach to image understanding, *Image and Vision Computing*, 15, 81-93, **1997**.
- [15] Yoav Y. Schechner, Srinivasa G. Narasimhan, and Shree K. Nayar, Polarization-based vision through haze, *Optical Society of America*, Vol. 42, No. 3, **2003**.
- [16] Yoav Y. Schechner, Inversion by P4 polarization-picture post processing, *Philosophical Transactions of The Royal Society*, 366, 638–648 **2011**.
- [17] Cong Phuoc Huynh, Antonio Robles-Kelly, Edwin Hancock, Shape and refractive index recovery from single-view polarisation images, *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1229 - 1236, **2010**.

- [18] Ali H. Mahmoud, Moumen T. El-Melegy, and Aly A. Farag, Direct Method for Shape Recovery from Polarization and Shading, *19th IEEE International Conference on Image Processing*, 1769 – 1772, **2012**.
- [19] S. Rahmann and N. Canterakis, Reconstruction of specular surfaces using polarization imaging, *IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, **2001**.
- [20] Gary A. Atkinson, Edwin R. Hancock, Recovery of Surface Orientation from Diffuse Polarization, *IEEE Transactions on Image Processing*, Volume: 15, No. 6, **2006**.
- [21] Olivier Morel, Fabrice Meriaudeau, Christophe Stolz, and Patrick Gorria, Polarization Imaging Applied to 3D Reconstruction of Specular Metallic Surfaces, *Proc. SPIE 5679*, **2005**.
- [22] Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, and Katsushi Ikeuchi, Transparent Surface Modeling from a Pair of Polarization Images, *IEEE Transactions On Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume. 26, No. 1, **2004**.
- [23] Hany Farid and Edward H. Adelson, Separating reflections from images by use of independent component analysis, *Journal of the Optical Society of America*, Volume. 16, Issue 9, pp. 2136-2145, **1999**.
- [24] Lawrence B. Wolff, Classification of Material Surfaces Using the Polarization of Specular Highlights, *Columbia University Academic Commons*, **1988**.
- [25] Lawrence B. Wolff, Polarization-Based Material Classification from specular reflection, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1059 – 1071, **1990**.

- [26] Hua Chen and Lawrence B. Wolff, Polarization phase-based method for material classification and object recognition in computer vision, *Proceedings CVPR IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 128 – 135, **1996**.
- [27] Lin SS, Yemelyanov KM, Pugh EN Jr, Nader Engheta, Separation and contrast enhancement of overlapping cast shadow components using polarization, *Optics Express*, Volume. 14, No. 16, **2006**.
- [28] Daniel A. Lavigne, Mélanie Breton, Georges Fournier, Jean-François Charette, Mario Pichette, Vincent Rivet, Anne-Pier Bernier, Target discrimination of man-made objects using passive polarimetric signatures acquired in the visible and infrared spectral bands, *Proc. SPIE 8160, Polarization Science and Remote Sensing V*, 816007, **2011**.
- [29] Kristan Gurton, Melvin Felton, Robert Mack, Daniel LeMaster, Craig Farlow, Michael Kudenov, Larry Pezzaniti, MidIR and LWIR polarimetric sensor comparison study, *Proc. SPIE 7672, Polarization: Measurement, Analysis, and Remote Sensing IX*, 767205, **2010**.
- [30] David G. Lowe, Distinctive Image Features From Scale-Invariant Keypoints, *International Journal of Computer Vision*, Volume. 60, Issue. 2, pp 91–110, **2004**.
- [31] Herbert Bay, Tinne Tuytelaars, Luc Van Gool Herbert Bay, SURF: Speeded Up Robust Features, *Computer Vision – ECCV*, Volume. 3951, pp. 404–417 **2006**.
- [32] Bruce D. Lucas, Takeo Kanade, An Iterative Image Registration Technique With an Application to Stereo Vision, *7th international joint conference on Artificial intelligence*, Volume. 2, pp. 674-679, **1981**.

- [33] Berthold K.P.Horn, Brian G.Schunck, Determining optical flow: A retrospective, *Artificial Intelligence* 59, pp. 81-8, **1993**.
- [34] Martin A. Fischler, Robert C. Bolles, Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, *Communications of the ACM*, Volume. 24 Issue 6, pp. 381-395, **1981**.
- [35] Aapo Hyvärinen, *Fast and Robust Fixed-Point Algorithms for Independent Component Analysis*, *IEEE Transactions on Neural Networks*, Vol: 10, Issue: 3, **1999**.
- [36] Aapo Hyvärinen and Erkki Oja, *Independent Component Analysis: Algorithms and Applications*, *Neural Networks*, Volume 13, Issues 4–5, pp. 411-430, **2000**.
- [37] M. Illguth, C. Schuler, Ö.Bucak, The effect of optical anisotropies on building glass façades and its measurement methods, *Frontiers of Architectural Research*, Volume 4, Issue 2, pp 119-126, **2015**.
- [38] James L. Gould, Sensory bases of navigation, *Current Biology*, Volume 8, Issue 20, **1998**.
- [39] I. Pomozi, G. Horvath, R. Wehner, How the clear-sky angle of polarization pattern continues underneath clouds: full-sky measurements and implications for animal orientation, *Journal of Experimental Biology*, 204, 2933-294, **2001**.

ÖZGEÇMİŞ

Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Muhammet ÖZBAY
Doğum Yeri : TRABZON
Medeni Hali : Bekar
E-posta : muhammet.ozay@hacettepe.edu.tr
Adresi : Etiler Mahallesi Etiler Caddesi No:34/12
Etimesgut / ANKARA

Eğitim

Lisans : Hacettepe Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Yabancı Dil ve Düzeyi

İngilizce : İyi

İş Deneyimi

NETAŞ A.Ş, (2013-2014)

TÜBİTAK BİLGEM İLTAREN A.Ş, (2014-Devam Ediyor)

Deneyim Alanları

KÖ/EO sistemler, KÖ Elektronik Harp, ED Sistemleri, Sinyal İşleme, Görüntü İşleme, Gömülü Sistemler, C# Arayüz Tasarımı.

Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

Tezden Üretilmiş Yayınlar

Tezden türetilmiş olan ‘Polarizasyon Teknikleri ile Optik Yansımaların Ayırıştırılması’ başlıklı yayın 26. IEEE Sinyal İşleme ve İletişim Uygulamaları Kurultayında sunulmak üzere hakem değerlendirmesine gönderilmiştir.

Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar

-





HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK ve ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 16/02/2018

Tez Başlığı / Konusu: İMGE KIYMETLENDİRMEDE POLARİZASYON TEKNİKLERİNİN KULLANIMI

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 92 sayfalık kısmına ilişkin, 05/02/2018 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 2 'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar hariç/~~dahil~~
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

16.02.2018

Tarih ve İmza

Adı Soyadı: Muhammet ÖZBAY
Öğrenci No: N14127664
Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği
Programı: Elektrik Elektronik Mühendisliği
Statüsü: ☒ Y.Lisans ☐ Doktora ☐ Bütünleşik Dr.

DANIŞMAN ONAYI

UYGUNDUR.

Yrd. Doç. Dr. Yakup ÖZKARANÇ
(Unvan, Ad Soyad, İmza)