

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

**ASTEROİTLERİN POLARİMETRİK GÖZLEMLERİ İÇİN TFOSC
UYUMLU OPTİK POLARİMETRE TASARIMI**

Gizem KAHYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

2015

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

**ASTEROİTLERİN POLARİMETRİK GÖZLEMLERİ İÇİN TFOSC
UYUMLU OPTİK POLARİMETRE TASARIMI**

Gizem KAHYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**(Bu tez TÜBİTAK 1001 tarafından 113F263 nolu proje ile ve TÜBİTAK Ulusal
Gözlemevi tarafından 14BRTT150-665 numarası ile desteklenmiştir.)**

2015

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ASTEROİTLERİN POLARİMETRİK GÖZLEMLERİ İÇİN TFOSC
UYUMLU OPTİK POLARİMETRE TASARIMI

Gizem KAHYA

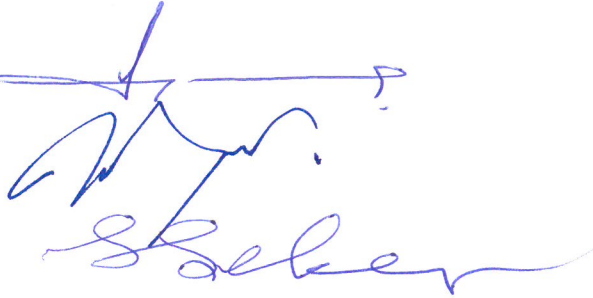
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez 14/12/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği/~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Selçuk HELHEL

Doç. Dr. Volkan BAKIŞ

Prof. Dr. Selim ŞEKER



ÖZET

ASTEROİTLERİN POLARİMETRİK GÖZLEMLERİ İÇİN TFOSC UYUMLU OPTİK POLARİMETRE TASARIMI

Gizem KAHYA

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Doç. Dr. Selçuk HELHEL
Aralık 2015, 91 sayfa

Dünya'ya Yaklaşan Asteroitlerin (DYA) bazı fiziksel parametrelerinin incelenmesi (albedo, taksonomi, çap, porozite vs.) hem Dünya'daki yaşam hem de yakın gelecekteki yeni maden kaynakları (uzay madenciliği) açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda astrofizik kaynakların yer tabanlı gözlemleri ile GAIA ve Spektrum-X-Gamma benzeri astrofizik uzay programlarının entegrasyonu gerekmektedir. Bu entegrasyonun ülkemizdeki temsilcisi TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi TUG olup, TUG'da kullanılan teleskoplardan en büyüğü RTT150'dir. RTT150 ile birlikte çalışan TFOSC ("TUG" Sönük Nesne Spektrograf ve Kamera) bu teleskop üzerindeki en önemli odak düzlemi aletlerinden biridir. TFOSC'a entegre edilecek bir polarimetre ise düşünülen ortak çalışma programları bakımından TÜBİTAK'ın elini daha da güçlendirecektir. Bu çalışma ile TUG'a adı geçen yeteneğin kazandırılması hedeflenmiştir. Dünya çapındaki gözlemlerinde gök cisimlerinden gelen ışığın kutuplanma (polarizasyon) oranı hesabı için polarimetri yöntemini kullanan WeDoWo (Wollaston Tipi İkili Takoz) prizması kullanılmaktadır. Tasarlanan polarimetrenin cihazsal ve sistematik hataları polarize ve polarize olmayan standart yıldızlar gözlemlenerek belirlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda kutuplanma oranının hatası %0,2 ve kutuplanma açısının hatası 1,9 derece olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan optik sistemin iletim parametresi (t)'nin 0,5 değerinde (ideal) olduğu saptanmıştır.

Tezin birinci bölümünde kutuplanmanın genel tanımı, tarihsel gelişimi, astronomideki uygulama alanı ve Dünya çapındaki gözlemlerindeki polarimetreler; ikinci bölümünde kutuplanmanın matematiksel tanımı ve asteroitlerin kutuplanması, üçüncü bölümde ZEMAX ile sistemin optik tasarımı; dördüncü bölümde kullanılan cihazlar hakkında genel bilgi, mevcut sistemin optik ve mekanik limitleri, kalibrasyon ve hata analizi, beşinci bölümde ise sonuçlar ele alınmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Polarimetre, Çizgisel Kutuplanma, Asteroit, Astrofizik Cihazlar, WeDoWo, TFOSC, RTT150, TUG.

JÜRİ: Doç. Dr. Selçuk HELHEL (Danışman)

Prof. Dr. Selim ŞEKER

Doç. Dr. Volkan BAKIŞ

ABSTRACT

DESIGN OF TFOSC COMPATIBLE OPTIC POLARIMETER FOR POLARIMETRIC OBSERVATIONS OF ASTEROIDS

Gizem KAHYA

M. Sc. Thesis in Department of Electrical - Electronical Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Selçuk HELHEL

December 2015, 91 pages

Investigation and determination of physical parameters (albedo, taxonomy, diameter, porosity, etc.) of Near Earth Object (NEO) have great importance for Earth life and new mineral resources (space mining) in near future. In this regard, integration of ground-based observations of astrophysical sources with astrophysical space programs (such as GAIA and Spectrum-X-Gamma programs) is required. TUBITAK National Observatory is the representative of Turkey in through this mission. The largest telescope used in TUBITAK National Observatory is RTT150 and TFOSC (“TUG” Faint Object Spectrograph and Camera) is one of its main focal plane instruments. TFOSC integrated polarimeter will strengthen of the hand of TUBITAK in aforementioned common programs. With this study it is aimed to gain talent to TUG. Lots of observatories around the world use WeDoWo (Wedge Double Wollaston) type polarimeters for the polarization ratio calculation of light from celestial objects. Instrumental and systematic errors of designed polarimeter were determined by observing both polarized and unpolarized standard stars. As a result of these observations, error of polarization rate as 0,2% and error of polarization angle as $1,9^0$ have been obtained. Transmission parameters of the designed optical system, (t), has been determined as 0,5 which about ideal value.

In the first part of the thesis; General description of the polarization, historical developments, application area in astronomy and polarimeters in observatories of worldwide, in the second part; mathematical definition of polarization and polarization of asteroids, in the third part; optical design of the system with ZEMAX, in the fourth part; general information about used equipment, optical and mechanical limits of the current system, calibration and error analysis, and in the fifth part; the results were discussed.

KEYWORDS: Polarimeter, Linear polarization, Asteroid, Astrophysical Equipment, WeDoWo, TFOSC-WP, RTT150, TUG.

COMMITTEE: Assoc. Prof. Dr. Selçuk HELHEL (Supervisor)

Prof. Dr. Selim ŞEKER

Assoc. Prof. Dr. Volkan BAKIŞ

ÖNSÖZ

Bu araştırma için çalışmalarımda beni yönlendiren, bilgi ve tecrübesi ile karşılaştığım zorlukları aşmamda bana destek olan Akdeniz Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyelerinden çok değerli danışman hocam Doç. Dr. Selçuk HELHEL'e teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım eleştiri ve önerileriyle ışık tutan ve çok önemli katkılarda bulunan değerli hocam Baş Uzman Dr. İrek HAMİTOĞLU'na, Fizik mühendisi Cevdet BAYAR'a ve tüm TUG personeline teşekkür ederim.

Tüm eğitim hayatım boyunca beni sabırla, muhteşem bir özveri ve inançla destekleyen başta annem Selma UYAR olmak üzere tüm aileme teşekkürü bir borç bilirim. Son olarak, hayatıma girdiği andan beri sevgisini, sabrını ve desteğini esirgemeyen Oğuzhan OKUYAN'a teşekkür ederim.

Bu konu, TFOSC (TUG (TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi) Sönük Nesne Spektrograf ve Kamera) odak düzlemi aleti uyumlu optik polarimetre tasarımı yapmak ve tasarlanan bu polarimetre ile bir elektromanyetik dalga olan ışığın kutuplanma özelliğinden yararlanılarak hedefteki asteroitlerin ve Dünya'ya yaklaşan küçük nesnelerin fizik parametrelerini (örneğin; albedo (yansıtabilirlik), çap, asteroitlerin taksonomisi (sınıflandırılması), porozite (gözeneklilik) vb. özelliklerini) incelemek amacıyla seçilmiştir. Türkiye için bir ilk olan bu çalışma ile Dünya'ya Yaklaşan Asteroit'lerin bazı fiziksel parametrelerinin belirlenmesine imkan sağlanacaktır ve uzay madenciliği konusu daha da önem kazanacaktır. Bu çalışma esnasında TUG Bakırlitepe yerleşkesinde 2500m yükseklikte bulunan RTT150 teleskobundaki TFOSC odak düzlemine takılan WeDoWo prizması (TFOSC-WP) ile gözlemler yapılmıştır.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI.....	4
2.1. Kutuplanmanın Genel Tanımı ve Çeşitleri	4
2.1.1. Çizgisel kutuplanma.....	9
2.1.2. Dairesel kutuplanma	9
2.1.3. Eliptik kutuplanma.....	9
2.2. Polarize Işığın Matematiksel İfadesi.....	10
2.2.1. Stokes parametreleri.....	10
2.2.2 Mueller Matrisi	12
2.3. Asteroitlerin Kutuplanması	13
2.3.1. Uzanım Açısı.....	13
2.3.2. Albedo.....	14
2.3.3. Fotometrik sistemler	16
2.3.4. Asteroitlerin parlaklıkları	17
3. TASARIM.....	18
3.1. Tasarımda Malzeme Seçimi.....	20
3.1.1. Çift kırılmalı prizmalar	20
3.2. ZEMAX ile Sistemin Optik Tasarımı	24
3.3. Mekanik Tasarımlar	33
3.3.1. Tutucu (Holder) üretimi	33
3.3.2. Yatay ve dikey yarık tasarım ve temini	33
3.3.3. İğne deliği (pinhole) tasarım ve temini	34
3.4 Tasarımın Uygulanma Aşaması	35
4. MATERYAL VE METOT	40
4.1. Ölçme Düzenegi.....	40
4.1.1. RTT150.....	41
4.1.2. TFOSC (TUG Sönük Nesne Tayfçeker ve Kamerası).....	45
4.1.3. CCD Kamera.....	51
4.2 Mevcut Sistemin Yetenekleri ve Sınırlamaları	53
4.2.1 RTT150'nin Limitleri ve Hassasiyeti	53
4.3. Ölçme Yöntemi	55
4.3.1. Gözleme Hazırlık Aşaması	55
4.3.2. Asteroit gözlemleri ve gözlem tekniği	59
4.3.3. Gözlemsel Verilerin Bilimsel Analizi.....	61
4.3.4. Ortanca (Median) Filtre	63
4.4. Kalibrasyon ve Hata Analizi	64
4.4.1. İdeal olmayan Wollaston prizmasının etkilerinin düzeltilmesi.....	64

4.4.2. Cihazsal kutuplanmanın düzeltilmesi	66
4.5 Asteroitlerin Fizik Parametrelerinin Hesaplanması	69
5. BULGULAR	72
5.1. Test ve Kalibrasyon İçin Seçilen Standart Yıldızların Polarimetrik Gözlemlerinin Sonuçları	72
5.2. DYA'ların Polarimetrik Gözlemlerinin Sonuçları	73
6. SONUÇ	76
7. KAYNAKLAR	77
8. EKLER	82
EK-1 ZEMAX AutoCAD Çizimleri	82
EK-2 RTT150, TFOSC-WP Gözlem Kılavuzu	86
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

c	: Işık Hızı
CaCO ₃	: Kalsit
dB	: Desibel
E	: Elektrik Alan
f	: Frekans
kG	: Kilo Gauss
LiNbO ₃	: Lityum Niobat
m	: Kadir
MgF ₂	: Magnezyum
n	: Kırılma indisi
nm	: nano metre
λ	: Dalga Boyu
α	: Yıldızın sağaçıklığı
δ	: Yıldızın dikaçıklığı
σ	: Hata
μm	: mikro metre
v	: Elektromanyetik Dalganın İlerleme Hızı
Υ	: Koç noktası

Kısaltmalar

AFOSC	: The Asiago Faint Object Spectrograph and Camera
ALFOSC	: Andalusia Faint Object Spectrograph and Camera
BTA	: Big Telescope Alt-azimuth
CCD	: Charge Coupled Device
DDE	: Diferensiyel Deklinasyon
DEC	: Deklinasyon
DIMM	: Differential Image Motion Monitor
DRA	: Diferensiyel Sağ Açıklık
DYA	: Dünya'ya Yakın Asteroit
DYKN	: Dünya'ya Yaklaşan Küçük Nesnelere
ESA	: European Space Agency
ESO	: European Southern Observatory
FOCAS	: Faint Object Camera and Spectrograph for the Subaru Telescope
FORS	: Focal Reducer and Low Dispersion Spectrograph
FWHM	: Full Width at Half Maksimum
GAIA	: Global Astrometric Interferometer for Astrophysics
Hz	: Hertz
IAU	: International Astronomical Union
IEEE	: Institute of Electrical and Electronical Engineers
IRAF	: Image Reduction and Analysis Facility
LDE	: Lens Data Editor
LSST	: Large Synoptic Survey Telescope

MP	: Minor Planet
M	: Mueller
NOT	: Nordic Optical Telescope
P	: Kutuplanma
PA	: Kutuplanma Açısı
RA	: Sağ Açıklık
RTT150	: 150 cm çaplı Rus - Türk Teleskobu
S	: Stokes
SCORPIO	: Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations
S/G	: Sinyalin Gürültüye Oranı
sn	: Saniye
TUG	: TÜBİTAK (Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu) Ulusal Gözlemevi
TFOSC	: TUG Sönük Nesne Spektrograf ve Kamera
TFOSC-WP	: TFOSC Wollaston Prizma
UT	: Evrensel Zaman
VLT	: Very Large Telescope
Wedge	: Takoz
WeDoWo	: Wollaston Tipi İkili Takoz

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Rastgele kutuplu ışık.....	5
Şekil 2.2. Çizgisel kutuplu ışık	5
Şekil 2.3. Kutuplayıcı ve kutuplayıcı için geçirme eksenini.....	6
Şekil 2.4. Gelen, yansıyan ve kırılan ışık için elektrik alan vektörünün bileşenleri.....	7
Şekil 2.5. Dairesel kutuplanmanın şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.6. Eliptik kutuplanmanın şematik gösterimi	10
Şekil 2.7. Kutuplanmanın elips özelliği (Tinbergen 1996).....	11
Şekil 2.8. Güneş - Asteroid - Gözlemci arasındaki uzanım açısı.....	14
Şekil 2.9. Albedo.....	15
Şekil 2.10. Bessel BVRI filtre dalgaboyu aralıkları.....	16
Şekil 3.1. Wollaston tipi ikili takozun optik şeması	19
Şekil 3.2. Sıradan ve sıradan olmayan ışınlar	20
Şekil 3.3. Glan tipi prizma	21
Şekil 3.4. Wollaston tipi prizma.....	21
Şekil 3.5. Yaygın kullanılan prizma çeşitleri	22
Şekil 3.6. Örnek bir Wollaston prizması (Edmund Optics 2015)	23
Şekil 3.7. Rochon polarizörü.....	23
Şekil 3.8. Mercek bilgi editörü.....	25
Şekil 3.9. ZEMAX genel alan bilgisi	26
Şekil 3.10. ZEMAX Genel bilgi ekranında veri girişi	27
Şekil 3.11. Dalgaboyu (Wavelength) bilgisi iletişim kutusu	27
Şekil 3.12. Değer fonksiyonu editörü	28
Şekil 3.13. Etkin odak uzaklığı işlemci editörü	28
Şekil 3.14. ZEMAX'ta çalışma ekranı	29
Şekil 3.15. Sistemin üç boyutlu analiz çıktısı	29
Şekil 3.16. Takoz ve Wollaston çıkışındaki ışınların farklı açıdan görünüşü.....	30
Şekil 3.17. Çift kırılma özelliğinin ZEMAX'ta uygulanması	30
Şekil 3.18. ZEMAX'ta nokta gösterimi.....	31
Şekil 3.19. Dikey kutuplanma konfigürasyonu.....	31
Şekil 3.20. Yatay kutuplanma konfigürasyonu	31
Şekil 3.21. Tasarımın simulasyon sonuçları	32
Şekil 3.22. WeDoWo, tutucusu ile gösterilmekte	33
Şekil 3.23. Dikey yarık	33
Şekil 3.24. Yatay yarık.....	33
Şekil 3.25. İğne deliği (Pinhole)	34
Şekil 3.26. Yarık ve pinhole'un takıldığı odak düzlemi.....	34
Şekil 3.27. WeDoWo'nun filtre tekerine eklenmiş hali.....	35
Şekil 3.28. WeDoWo'nun takılı bulunduğu sistem	35
Şekil 3.29. WeDoWo polarimetresinin ZEMAX'ta optik tasarım sonuçları	36

Şekil 3.30. TFOSC sisteminin optik şeması	37
Şekil 3.31. WeDoWo sisteminin optik şeması.....	38
Şekil 3.32. TFOSC-WP sisteminin optik şeması	38
Şekil 3.33. 0°de pinhole ile alınmış test görüntüsü	39
Şekil 3.34. 90°de pinhole ile alınmış test görüntüsü	39
Şekil 3.35. 180°de pinhole ile alınmış test görüntüsü	39
Şekil 3.36. 270°de pinhole ile alınmış test görüntüsü	39
Şekil 4.1. Bakırlıtepe TUG yerleşkesi ve RTT150 kubbe içi genel görünüm	40
Şekil 4.2. TUG Bakırlıtepe yerleşkesinde bulunan bazı teleskoplar.....	41
Şekil 4.3. RTT150 Teleskop binasının şeması.....	42
Şekil 4.4. Cassegrain ve Coude odaklarının optik ışın yolu	43
Şekil 4.5. f/8 sisteminin enerji konsantrasyon fonksiyonu grafiği.....	44
Şekil 4.6. U bandı.....	49
Şekil 4.7. B bandı.....	49
Şekil 4.8. V bandı.....	50
Şekil 4.9. R bandı.....	50
Şekil 4.10. 0 - 14 sn.....	50
Şekil 4.11. 0 - 22 sn.....	50
Şekil 4.12. 0 - 400 sn.....	50
Şekil 4.13. -100° C'de dalgaboyuna karşı kuantum etkinliğinin grafiği	52
Şekil 4.14. TFOSC CCD'si ile alınmış örnek polarimetrik flat görüntüsü	53
Şekil 4.15. Ekvatoryal koordinat sistemi ve yıldız zamanının gösterimi.....	57
Şekil 4.16. mp423 asteroidi için örnek jpl Horizon's sorgusu	59
Şekil 4.17. Bias (Temel düzey) görüntülerinden master bias görüntüsünün elde edilmesi	62
Şekil 4.18. IRAF, imstat komutu ile ham ve master bias görüntülerinin istatistikleri	62
Şekil 4.19. CCD kalibrasyon şematığı	63
Şekil 4.20. TFOSC - WP ile asteroid takibi	64
Şekil 4.21. BVRI bantlarında TFOSC - WP ile alınmış polarize olmayan standart yıldızların lineer kutuplanma derecelerinin dağılımı	68
Şekil 4.22. Uzanım açısına karşı kutuplanma derecesinin grafiği	70
Şekil 4.23. P_{min} , P_{max} , h ve a_{inv} grafik üzerinde gösterimi	70
Şekil 5.1. Gözlenen ve tablolanmış değerlerin kutuplanma derecesi ve kutuplanma oranı arasındaki farklar.....	73
Şekil 5.2. S-sınıfı asteroidler için polarizasyon derecesi-uzanım açısı.....	74
Şekil 5.3. Düşük, orta ve yüksek albedo özelliğine sahip asteroidler.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1. TFOSC sistemine benzeyen ve polarimetreye sahip olan Dünya'daki teleskop örnekleri	3
Çizelge 2.1. Bazı çiftkırılma özelliği gösteren kristallerin 589,3 nm'de kırılma indisleri	8
Çizelge 2.2. Stokes için normalize edilmiş polarizasyon durumları	12
Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin 0,63 μm 'de çiftkırılma değeri ve kırılma indisleri	24
Çizelge 3.2. Yarık bilgileri.....	34
Çizelge 4.1. RTT150 teleskobunun temel boyut ve özellikleri.....	42
Çizelge 4.2. RTT150 teleskobunun optik özellikleri	44
Çizelge 4.3. RTT150 teleskobunun sahip olduğu odak düzlemi aletleri	44
Çizelge 4.4. TFOSC'da kullanılacak optik ağırlar	48
Çizelge 4.5. TFOSC'da kullanılan CCD kameranın özellikleri.....	49
Çizelge 4.6. TFOSC'da kullanılan kalibrasyon tayf lambaları ve özellikleri.....	51
Çizelge 4.7. V-bandında gözlenebilecek güçlü polarize standart yıldızlar	55
Çizelge 4.8. Polarize olmayan standart yıldızlar.....	56
Çizelge 4.9. Astronomide yaygın kullanılan koordinat sistemleri.....	57
Çizelge 4.10. Toplam 14 gözlem gününün özet tablosu	58
Çizelge 4.11. İletim katsayısı, cihazsal polarizasyon derecesi ve ilgili açılar	66
Çizelge 4.12. V-bandında güçlü polarize yıldızların gözlem sonuçları	69
Çizelge 4.13. Ortalama G değerleri	71
Çizelge 5.1. V-bandında standart yıldızların fizik parametrelerinin sonuçları	72
Çizelge 5.2. Gözlemlenen üç DYA'nın albedo, spektral tür ve çapları	74

1. GİRİŞ

Kutuplanma, birden fazla yönde titreşen dalgaların bir özelliğidir. Işık benzeri elektromanyetik dalgalar kutuplanma özelliği gösterir. Polarizasyon, elektrik alan vektörünün zamanla değişen yönünü ve göreceli genliğini tanımlar. Özellikle, uzayda sabit bir noktadaki vektörün ucu aracılığıyla zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilir (Balanis 1989). Kutuplanma, gözlemlenen kaynağın bazı fiziksel özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Dolayısıyla kutuplanma bilgisini veren polarimetri yöntemi, astronominin gelişimine önemli ölçüde katkıda bulunmuştur (Trippe 2013).

İnsan gözünün duyarlı olduğu aralığa optik (görünür) bölge denir. Bu tez kapsamında optik bölgede çalışılmıştır.

Işık, elektromanyetik dalganın özel bir halidir ve doğal ışık polarize değildir. Rastgele polarize olmuş dalga bileşenleri içeren doğal ışık (örneğin, Güneş ışığı) bir asteroit üzerine düştüğünde, asteroitin fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişime uğrar ve yansıma yolu ile yeniden yayılır. Bu ışık demeti, üzerine düştüğü cismin fizik parametrelerini veren bilgileri içermektedir. Bu polarimetrenin temel çalışma prensibidir. Maddelerin optik özelliklerini ölçmek ve uzaklıkları, sönüklükleri nedeniyle doğrudan görüntülenmeleri mümkün olmayan gök cisimlerinin bazı fiziksel parametrelerini belirlemek için polarimetre cihazı kullanılabilir.

Yıldız bilimi anlamına gelen ve temel bilimlerin atası olan astronomi (gökbilim), genel anlamda, evrende bulunan her çeşit maddenin dağılımını, hareketini, kimyasal bileşimini, evrimini, fiziksel özelliklerini ve birbirleriyle olan etkileşimlerini inceleyen bilim dalıdır. Astronomi; kullanılan inceleme yöntemi, amaç ve konuya göre iç içe girmiş birkaç dala ayrılır. Temel Astronomi, Astrofizik ve Uzay Bilimleri bu dalların başlıcalarıdır. Pozitif bir bilim dalı olan astronominin astroloji ile hiç bir ilgisi yoktur.

Tarihsel olarak polarize ışığın araştırmaları, Rasmus Bartholinus tarafından 1669'da çift kırılmalı İzlanda Sparı'nın (bir çeşit kristal görünümlü mineral) nasıl çift görüntü oluşturduğunun keşfedilmesi; kutuplanma'nın 1670'li yıllarda Christiaan Huygens tarafından küresel ve eliptik dalga şeklinin yorumlanması ve kutuplayıcı sınırlarındaki sönümlemelerinin keşfi ile başlamıştır. Kutuplanma ismi Etienne-Louis Malus (1809)'dan gelmektedir (Clarke 2010). Malus, cam, su vb. gibi dielektrik yüzeylerden yansıma ve kırılma yoluyla (çizgisel) kutuplanmış ışığın deneysel olarak nasıl üretileceğini göstermiştir. Augustine Jean Fresnel ışığın kutuplanma özelliğinin nicel/sayısal analizini yapmaya devam etmiştir. Fresnel, çizgiselden dairesel ve daireselden de çizgisel kutuplanmaya dönüşümü sağlayan ve Fresnel Rhomb adıyla anılan bir cihaz yapmayı başarmıştır. 1850 yılında optik biliminin tarihsel gelişiminde temel kavramlar George Gabriel Stokes'un çalışmalarından elde edilmiştir. 1852'de Stokes, polarize ışık ışınları üzerinde çalışmış ve gürültü benzeri sinyallerin (kısmi) kutuplanmasını tanımlamak için dört parametre ortaya koymuştur. Bu parametreler, kutuplanmış ışığı tanımlamamızı sağlayan Stokes parametreleridir. Stokes parametreleri akı ölçümü ile doğrudan bağlantılıdır (Trippe 2013).

Astronomide ilk polarimetrik gözlem 1811 yılında François Arago tarafından yapılmıştır (Clarke 2010). Malus, yaptığı cam yüzeyden yansıyan Güneş ışığının

kutupluluk özelliği ile Ay'dan yansıyan Güneş ışığının benzer özellik taşıyıp taşımadığını görmek için teleskobunu Ay'a yöneltmiştir. O dönemde fotografik kayıt yöntemi olmadığından, kutupluluk ölçümleri görsel olarak yapılmıştır ve bu çalışmalar aydınlık nesnelere sınırlı olmuştur. Astronomide polarimetri uygulamaları 19. yüzyıla kadar devam etmiştir. Arago 1850'li yıllarda Ay'ın kutuplanma sonuçlarını yayınlamıştır (Arago 1855a). Arago, kuyruklu yıldızların kutuplanmasında gözlemiştir (Arago 1855b). Diğer astronomlar, Angelo Secchi ve Lord Rosse bu tür Ay gözlemlerine katkıda bulunmuşlardır. Malesef, bu ilk astronomik uygulamaların sonuçlarını yorumlamak, altında yatan fiziğin karmaşık olması nedeniyle zor olmuştur. 19. yüzyılın ortalarında kutuplanma olgusu yeni bir kavram olarak ele alınmaya başlanmıştır. 1908'de Hale, Güneş lekelerinin dairesel kutuplanmasını iki farklı yönde (zıt yönlerde) gözlemeyi başarmıştır. Bu gözlemlerdeki tayfsal çizgilerdeki kaymalardan, astronomik nesnelere (örneğin Güneş'in) manyetik alanın varlığını ortaya çıkarmıştır. Hale, Mount Wilson'daki tayf çekerin (Spektrograph) önüne dönen Fresnel Rhomb ve bir Nikol prizma koyarak Güneş lekelerinde Zeeman etkilerini gözlemleyebilmiştir¹.

Astronomide bu alandaki teknik gelişmeler Stokes'tan yaklaşık yetmiş beş yıl sonra Lyot ile başlamıştır. 1923'te Lyot Venüs'ten saçılan Güneş ışığının kutupluluğu üzerine çalışmıştır. Bu durum astronomide, etkin tekniklerinden biri olan polarimetrenin başlangıcı olmuş ve 1940'dan sonra hızlanarak devam etmiştir. 1980'lerde ise astronomi, mühendisliğin bir dalı olmuştur². 1942 yılında, kutuplanma kavramı net bir şekilde Institute of Radio Engineers (IRE, günümüzde IEEE) tarafından tanımlanmıştır. 1946 yılına gelindiğinde Chandrasekhar, astronomide Stokes parametrelerini ortaya koymuş ve yıldız ışığının çizgisel kutuplanmasını öngörmüştür. 1949'da Hiltner ve Hall, Chandrasekhar'ın öngörüsünü doğrulamak için yıldızlararası kutuplanmayı bulmuştur. 1957 yılına gelindiğinde, polarize astronomik radyo dalgalarının ilk tespiti yapılmıştır. 1972'de Kolombiya üniversitesinden bir takım, Yengeç (Crab) Nebulası'ndan polarize X-ray emisyonları tespit etmiştir. 1973 yılında, Uluslararası Astronomi Birliği (International Astronomical Union-IAU) eliptik kutuplanma için IEEE terimlerini onaylamıştır. 1974'te ise astronomik polarimetri için ilk kitap yayımlanmıştır. 2002 yılına gelindiğinde, Stokes parametrelerinin ilk 150.yılı olması sebebiyle uluslararası bir konferansta astronomide polarimetrenin gelişimi tartışılmıştır (Tinbergen 1996).

Dünya'daki büyük teleskopların çoğunda FOSC (Sönük Nesne Spektrograf ve Kamera) türüne benzer odak düzlemi aletleri kullanılmaktadır. Bu aletler "odak indirgeme çarpanlı" aletlerdir. Bu tür cihazlarda WeDoWo (Wollaston Tipi İkili Takoz) tabanlı polarimetre sıklıkla kullanılmaktadır. Türkiye'de TUG'da RTT150 teleskobunda takılı bulunan TFOSC (TUG Sönük Nesne Spektrograf ve Kamera) sistemine benzeyen ve polarimetreye sahip Dünya'daki teleskoplar Çizelge 1'de verilmiştir. 1.8m Asiago teleskobundaki AFOSC (Asiago Faint Object Spectrograph and Camera) gibi polarimetreye sahip birçok teleskop WeDoWo (Wollaston Tipi İkili Takoz) ya da tek bir Wollaston prizması ile donatılmıştır. Bunlar NOT (Nordic Optical Telescope)'daki ALFOSC (Andalucia Faint Object Spectrograph and Camera) (Pernechele vd 2003),

¹ http://polarisation.eu/projectdir/FutureOfPolarimetry_Landi.ppt, 18.11.2015

² <http://tr.wikipedia.org/wiki/Astronomi>, 15.10.2014

BTA (Big Telescope Alt-azimuth)'daki SCORPIO (Spectral Camera with Optical Reducer for Photometric and Interferometric Observations) (Gorosabel vd 2014), SUBARU teleskobundaki FOCAS (Faint Object Camera and Spectrograph for the Subaru Telescope) (Afanasiev ve Amirkhanyan 2012), VLT (Very Large Telescope)'deki FORS1 (Focal Reducer and Low Dispersion Spectrograph) (Kawabata vd 2003) ve diğerleri, Çizelge 1'de verilmiştir.

Çizelge 1. TFOSC sistemine benzeyen ve polarimetreye sahip olan Dünya'daki teleskop örnekleri

Adı	Boyutu	Gözlemevi	Yeri
AFOSC	1.82 m	Asiago	İtalya
ALFOSC	2.56 m	Roque de los Muchachos	Kanarya Adaları
SCORPIO	6 m	Special Astrophysical Observatory	Rusya
FOCAS	8 m	National Astronomical Observatory of Japan	Hawaii
FORS1 ve FORS2	8.2 m	European Southern, ESO	Şili

Tezin ikinci bölümünde kutuplanmanın genel tanımı ve matematiksel ifadesi ve çeşitlerinden bahsedilmiştir. Tezin üçüncü bölümünde malzeme seçimi, optik tasarım parametreleri ve yapılan ek mekanik tasarımlar açıklanmıştır. Tezin dördüncü bölümünde ölçme düzeneği açıklanmış ve yetenek ve sınırlarından bahsedilmiştir. Polarimetre ile gözlem tekniğine, hata analizi ve kalibrasyon adımlarına yer verilmiştir. Tezin beşinci bölümünde tasarlanan TFOSC-WP ile yapılan gözlemlerden elde edilen bulgular tartışılmıştır. Tezin son bölümünde ise yapılan çalışma ve ulaşılan sonuçlar tartışılmış, gelecekte neler yapılabileceği değerlendirilmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER VE KAYNAK TARAMALARI

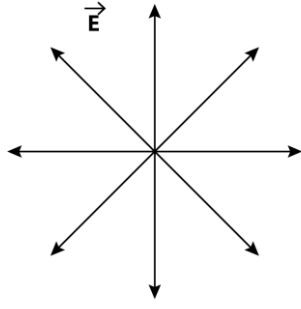
Elektromanyetik dalgalar maddesel ortamlarda olduğu gibi boşlukta da yayılabilirler. Elektromanyetik dalgaların özellikleri şu şekilde özetlenebilir.

- Elektromanyetik dalgalar boşlukta ışık hızı (c) ile ilerler.
- Belli bir ortamda ilerleyen elektromanyetik dalganın ilerleme hızı (v), n ortamın kırılma indisi olmak üzere, $v = c/n$ şeklindedir.
- Elektromanyetik dalgaların, elektrik ve manyetik alanları birbirlerine ve yayılma doğrultusuna dik olarak titreşirler.
- Boşlukta ilerleyen elektromanyetik dalgaların frekansı (f) ve dalga boyu (λ) arasında, $c = \lambda f$ bağıntısı geçerlidir.
- Elektromanyetik dalgaların elektrik ve manyetik alanları aynı fazda salınım yaparlar.
- Boşlukta ilerleyen elektromanyetik dalgaların genlikleri arasında $E = \lambda f$ bağıntısı vardır.
- Elektromanyetik dalgalar üst üste binme ilkesine uyarlar.

Girişim, kırınım ve kutuplanma olayları ışığın dalga karakteri ile açıklanır. Girişim ve kırınım, hem enine hem de boyuna dalgalarda gözlenebilen olaylardır. Ancak kutuplanma sadece enine dalgalara ait bir özelliktir. Bu nedenle ışık dalgalarında kutuplanma (polarizasyon) gözlenir. Yayılma doğrultusuna paralel olarak titreşen (salınım yapan) dalgalara boyuna dalgalar denir. Gaz ya da sıvı içindeki ses dalgaları boyuna dalgalara örnektir. Boyuna dalgalarda kutuplanma gerçekleşmez. Yayılma doğrultusuna dik olarak titreşen dalgalara ise enine dalgalar denir. Su dalgaları ve elektromanyetik dalgalar enine dalgalardır. Kutuplanma enine dalgalarda gözlenir. Bu nedenle, kutuplanma terimi, enine dalgaların yoluna dik bir düzlemdeki titreşim hareketinin mümkün tüm yönelimlerini tanımlar.

2.1. Kutuplanmanın Genel Tanımı ve Çeşitleri

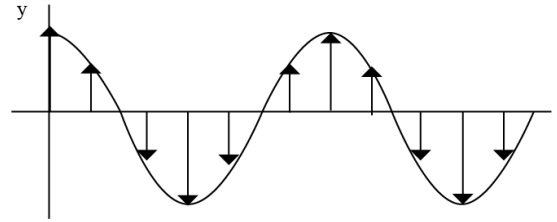
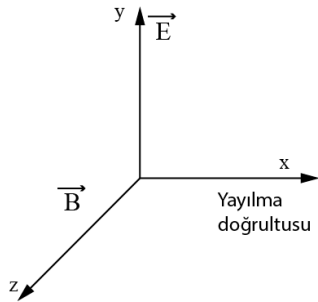
Sıradan bir ışık kaynağından çıkan ışık ışınları, ışık kaynağındaki atomlar tarafından yayınlanan çok sayıda dalgadan oluşmuştur. Her atom, elektrik alan vektörü belli bir yönde olan bir elektromanyetik dalga üretir. Bileşke elektromanyetik dalga, farklı yönlerde titreşen dalgaların üst üste binmiş halidir. Böyle bir ışık kaynağından çıkan ışık dalgasının elektrik alan vektörünün mümkün olan tüm yönlerde bileşeni vardır ve her yönde aynı olasılıkla titreşir. Bir ışık dalgasının kutuplanma yönü olarak elektrik alan vektörünün titreştiği yön seçilir. Sıradan bir ışık kaynağından çıkan ışık ışınlarına rastgele kutuplu ya da kutuplanmamış ışık denir (Ozansoy 2008).



Şekil 2.1. Rastgele kutuplu ışık

Şekil 2.1’de, yayılma doğrultusu sayfa düzleminden dışarı doğru olan kutuplanmamış/rastgele kutuplu ışık görülmektedir. Her bir elektrik alan vektörü, her bir atom tarafından oluşturulmuş bağımsız elektrik alan vektörlerini göstermektedir. Bileşke alan \vec{E} , bu elektrik alan vektörlerinin toplamıdır.

Eğer \vec{E} , uzayda belli bir noktada hep aynı yöne titreşiyorsa, böyle dalgaya çizgisel kutuplu ya da düzlem kutuplu dalga denir. Elektrik alanın titreşim doğrultusu ile yayılma doğrultusunun oluşturduğu düzleme kutuplanma düzlemi denir. Şekil 2.2’de çizgisel kutuplu bir dalga gösterilmektedir. Elektrik alan sürekli olarak y-doğrultusunda titreşmektedir, yayılma doğrultusu x’dir ve xy-düzlemi de kutuplanma düzlemidir.

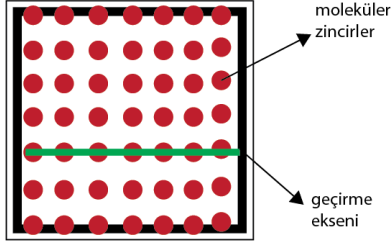


Şekil 2.2. Çizgisel kutuplu ışık

Kutuplanmamış bir ışık demetinden çizgisel kutuplu demet elde etmek mümkündür. Bu, mümkün olan tüm yönlerde titreşim yapan bileşke elektromanyetik dalga içinde, elektrik alan vektörleri belli bir yönde titreşim yapanları seçip, diğer tüm yönlerde titreşim yapanları çıkarmakla mümkün olur. Kutuplanmamış ışıktan çizgisel kutuplu ışık elde etmek için kullanılan dört yöntem aşağıda açıklanmaktadır.

- i. Seçici soğurma
- ii. Yansıma
- iii. Çift Kırılma
- iv. Saçılma

i. Seçici soğurma ile kutuplanma: Kutuplanmamış ışıktan, sadece belli bir yönde titreşen elektromanyetik dalgayı seçerek, kutuplanmış ışık elde eden malzemelere kutuplayıcı (polarizör) denir. Şekil 2.3'te verilen kutuplayıcı için geçirme eksenini yatay doğrultudadır.



Şekil 2.3. Kutuplayıcı ve kutuplayıcı için geçirme eksenini

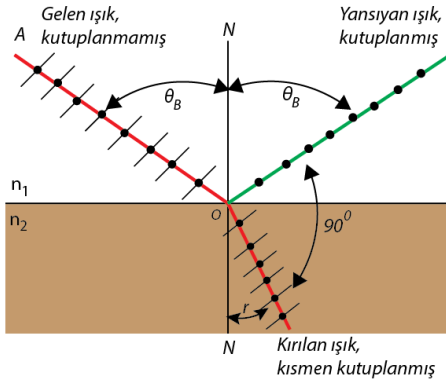
Elektronlar, moleküler zincirler boyunca kolayca hareket edebilirler. Bir elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörü bu zincirlere paralel ise (ya da başka bir deyişle geçirme eksenine dik ise), bu elektromanyetik dalganın elektrik alanı elektronlarla etkileşir. Elektronlar, elektromanyetik dalganın enerjisini soğururlar, böylece geçen dalganın genliği çok azalmış olur. Ancak, gelen dalganın elektrik alan vektörü, bu moleküler zincirlere dik ise (geçirme eksenine paralel ise), elektronlarla etkileşme çok azdır ve gelen dalganın büyük kısmı geçer. Yani, kutuplayıcılarda moleküler zincire dik doğrultudaki elektrik alan vektörleri bileşenleri geçer, diğerleri büyük ölçüde soğurur.

Kutuplanmamış ışığı bir kutuplayıcıdan geçirip, kutuplayıcıyı 0° 'den 180° 'ye çevirdiğimizde ışığın şiddeti çevirme açısına bağlı olmaz, her bir açıda geçen ışığın şiddeti aynıdır. Çünkü elektrik alan vektörü mümkün bütün yönlerde aynı olasılıkla titreşir. Bu ışık demetinin kutuplanmış olup olmadığını anlamak için ikinci bir kutuplayıcı kullanmamız gerekir. Bu ikinci kutuplayıcıyı çevirdiğimizde, ışık şiddeti bir maksimum ile sıfır arasında değişiyorsa ışık demeti kutuplanmıştır denir. Bu şekilde kullanılan ikinci kutuplayıcıya analizör denir.

ii. Yansıma ile kutuplanma: Kutuplanmamış bir ışık demetinin saydam bir yüzeyden yansıdığını varsayalım. Gelme açısına bağlı olarak yansıyan ışık, ya kutuplanır, ya kısmen kutuplanır ya da kutuplanmaz. Saydam bir yüzeye gelen ve yansıyan ışık demeti için elektrik alan vektörü iki bileşene ayrılabilir. Bu iki bileşen: Yansıma düzlemine paralel (ya da sayfa düzlemine dik) bileşen ve yansıma düzlemine dik olan bileşen (yayıma doğrultusuna dik) şeklindedir. Işık dalgası saydam yüzeye ulaştığında, dalganın elektrik alanı elektronları ivmelendirir. İvmelenen elektronlar ışıma yaparlar, böylelikle yansıyan ve kırılan dalgalar oluşur.

Şekil 2.4'ten ilk olarak birinci bileşene bakıldığında, gelen ışık demetinin bu bileşeni tarafından hızlandırılan elektronların yansıyan dalgaya dik olarak hareket ettiği görülür. Gelen dalganın çok küçük bir miktarı elektronlar tarafından soğurur, bu nedenle gelen dalganın bu bileşeninin meydana getirdiği yansıma oldukça güçlüdür. İkinci bileşen tarafından hızlandırılan elektronlar, yansıyan dalgaya paralel hareket ederler. Bu durumda gelen dalganın büyük bir kısmını elektronlar soğurduğu için yansıma zayıftır.

- Kutuplanmamış bir ışık demeti yansıtıcı yüzeye 0° veya 90° ile geldiğinde yansıyan ışık kutuplanmaz.
- Diğer geliş açıları için yansıyan ve kırılan ışık demetleri kısmen kutupludur, yani yansıyan ve kırılan ışık demetlerinin elektrik alan vektörlerinin iki bileşeni vardır.
- Yansıyan ve kırılan ışık arasındaki açı 90° olduğunda yansıyan ışığın, elektrik alan vektörünün sadece yansıma düzlemine paralel bileşeni vardır. Bu bileşen güçlü bir yansıma oluşturur. Bu durumda yansıyan ışık yansıma düzlemine paralel doğrultuda çizgisel kutuplanmıştır. Bu durumdaki gelme açısına Brewster açısı (θ_B) denir.



Şekil 2.4. Gelen, yansıyan ve kırılan ışık için elektrik alan vektörünün bileşenleri

Gelme açısı θ_B olduğunda yansıyan ışık tamamen kutuplanmıştır. Şekil 2.4'teki duruma Denklem 2.1'deki Snell Kanunu uygulandığında ve Denklem 2.2'de ilgili değerler yerine yazıldığında Denklem 2.3 elde edilmiş olur.

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin r \quad (2.1)$$

$$\theta_B + 90^\circ + r = 180^\circ \rightarrow \theta_B + 90^\circ = 180^\circ \rightarrow \sin r = \cos \theta_B \quad (2.2)$$

$$n_1 \sin \theta_B = n_2 \sin r \rightarrow n_1 \sin \theta_B = n_2 \cos \theta_B \rightarrow \frac{n_2}{n_1} = \tan \theta_B \quad (2.3)$$

Özel olarak birinci ortam Denklem 2.4'teki gibi seçilirse Denklem 2.5 elde edilir.

$$n_1 = 1 \text{ ve } n_2 = n \quad (2.4)$$

$$\tan \theta_B = n \quad (2.5)$$

Verilen bir madde için kırılma indisi (n), dalga boyu (λ) ile değiştiği için Brewster açısı (θ_B) dalga boyu ile değişir³.

iii. Çift kırılma: Kristallerin çoğu “çift kırıcı” özellik gösterirler. Çift kırıcılık, ışığı iki demet haline getirmektedir. Bunun sebebi, ışığın çift kırıcılık özelliği taşıyan kristaller içindeki her doğrultuda aynı hızla yayılmamasıdır. İkiye ayrılan ışığın her iki kısmı da kutuplanır. Gelme düzlemine dik olarak kutuplanmış ışına sıradan ışın (ordinary-ray), paralel olarak kutuplanmış ışına ise sıradışı ışın (extra ordinary-ray) denir. Çift kırıcı kristallerde, iki demetin birleştiği bir doğrultu bulunur. Bu doğrultuya “optik eksen” denir. Çizelge 2.1’de bazı çift kırılma gösteren kristallerin kırılma indisleri verilmektedir (Raymond ve Beicher 2007). Bu tez kapsamında tasarımda çift kırılma özelliğine sahip olan Kalsit (CaCO_3) malzemesi kullanılmıştır.

Çizelge 2.1. Bazı çiftkırılma özelliği gösteren kristallerin 589,3 nm’de kırılma indisleri

Kristal	n_o	n_e	n_o/n_e
Kalsit (CaCO_3)	1,658	1,486	1,116
Quartz (SiO_2)	1,544	1,553	0,994
Sodyum Nitrat (NaNO_3)	1,587	1,336	1,188
Sodyum Sülfür (NaSO_3)	1,565	1,515	1,0333
Çinko Klorür (ZnCl_2)	1,687	1,713	0,985
Çinko Sülfür (ZnS)	2,356	2,378	0,991

iv. Saçılma: Saçılma, kutuplanma oluşturmak için en iyi bilinen mekanizmalardan biridir. Işık, gaz gibi parçacıklar sistemine girdiğinde, ortamdaki elektronlar ışığın bir kısmını soğurup sonra tekrar yayarlar. Işığın ortam tarafından soğurulması ve tekrar yayınlanmasına saçılma denir. Saçılma ile kutuplanma, saçılma açısı 90° ve kutuplanma derecesi %50’yi geçebilen durumlarda maksimum seviyeye ulaşmaktadır. Bu durum, Dünya’daki bir gözlemciye tepeden ulaşan Güneş ışığının kısmen polarize oluşu nedenidir. Kutuplanma spektrumu, saçılma ortamı hakkında birçok önemli bilgiler içerir. Bu nedenle Güneş ışığının ya da yıldız ışığının saçılmasının polarimetrisi Güneş dışı gezegenlerin atmosferlerinin karakterizasyonu için çok güçlü bir yöntemdir (Snik 2009).

Kutuplanma eliptik, çizgisel/lineer ve dairesel kutuplanma olmak üzere üç çeşittir. Bu tez kapsamında ışığın çizgisel kutuplanma özelliğinden faydalanılmıştır.

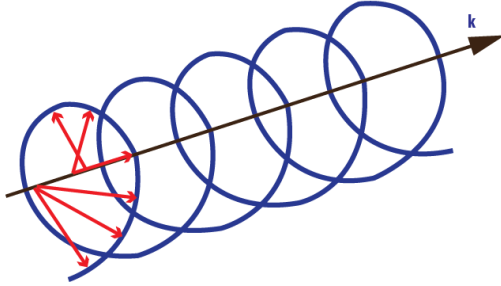
³ <http://80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/aozansoy/kutuplanma.pdf>, 17.10.2015

2.1.1. Çizgisel kutuplanma

Sıradan bir ışık demeti, ışık kaynağındaki atomlar tarafından yayınlanan dalgalardan oluşur. Her bir dalga'nın kutuplanma yönü, elektrik alanın titreşim yaptığı yön olarak tanımlanır. Verilen herhangi bir noktada ve herhangi bir anda, bu elektrik alan vektörlerinin hepsi toplanarak bir bileşke elektrik alan vektörünü oluşturur. Eğer bileşke elektrik alan E , belirli bir noktada her zaman aynı yönde titreşiyorsa, çizgisel kutuplanmıştır denir.

2.1.2. Dairesel kutuplanma

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi aynı genlikte ve faz farkı 90° olan dalgalar dairesel polarizeli dalgalar olarak adlandırılırlar. Bir dalga'nın dairesel kutuplu olduğunu söyleyebilmek için elektrik alan vektörünün ucunun uzayda dairesel bir eğri çiziyor olması gerekir. Böyle bir dalga'nın elektrik alan şiddeti her zaman aynı genliktedir ve elektrik alan vektörünün uzayda yönelimi bir dairesel eğri olarak tanımlanan bir tavrıla zamanla sürekli olarak değişir. Bir dalga'nın elektrik alan vektörü saat yönünde bir rotasyona sahipse, sağ-el (saat yönü), saat yönünün tersi bir rotasyona sahip bir dalga ise sol-el kutuplanmasına sahiptir denir (Balanis 1989).

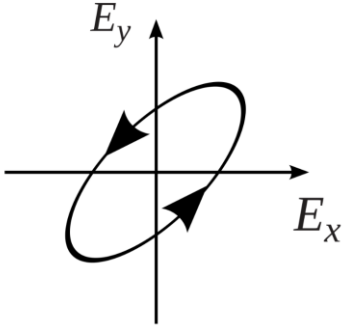


Şekil 2.5. Dairesel kutuplanmanın şematik gösterimi

2.1.3. Eliptik kutuplanma

İki bileşen arasındaki faz farkı tam olarak 90° ve bu bileşenlerin genlikleri farklı ise bu dalgalara eliptik kutuplu dalga denir (Şekil 2.6). Eliptik kutupluluk elektromanyetik dalga'nın en genel halidir. Işığın en genel gösterimi eliptik şeklinde tanımlanmaktadır. Bunun anlamı, E bileşke elektrik alan vektörünün hem dönmesi hem de büyüklüğünün değişmesidir. Böylece, eliptik gösterimde elektrik alanın E vektörünün ucunun sürekli olarak bir elips çizdiği varsayılır⁴ (Hecht 2002). Elektrik vektörü saat yönünde hareket ediyor ise, sağ-el eliptik kutuplanma; saat yönünün tersi ise sol-el eliptik kutuplanmaya sahiptir denir (Balanis 1989).

⁴ <https://www.cis.rit.edu/class/simg303/Notes/Ch7-PropagationofWaves.pdf>, 09.10.2015



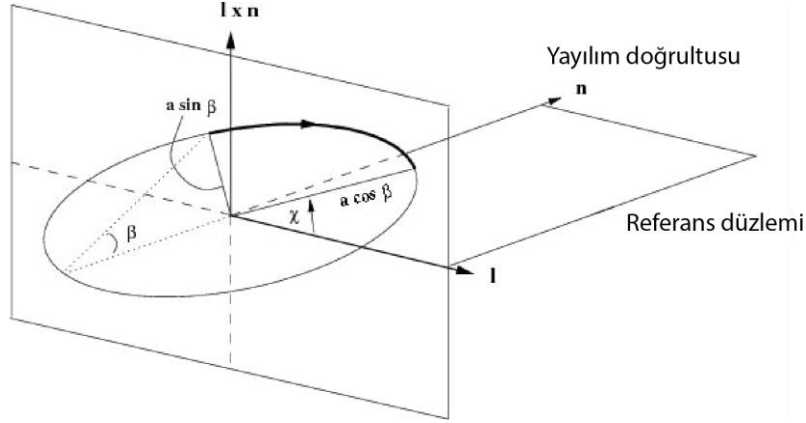
Şekil 2.6. Eliptik kutuplanmanın şematik gösterimi

2.2. Polarize Işığın Matematiksel İfadesi

Polarimetre, elektromanyetik dalgaların kutuplanmasını ölçmede kullanılan bir cihazdır. Alışlagelmiş gözlem teknikleri (fotometri, spektroskopi) ile ulaşılamayan fiziksel süreçler hakkında bilgi verir (Tauri 2010).

2.2.1. Stokes parametreleri

Astronomik görüntülerden elektromanyetik dalgaların kutuplanma bilgisini almak için, George Gabriel Stokes (1852) tarafından tanımlanan ve Chandrasekhar (1946) tarafından astronomiye uyarlanan Stokes vektörleri kullanılır. Stokes parametrelerinin her biri, birim zamanda, belirli bir frekans aralığında, birim alana düşen radyasyon enerjisi olarak belirtilir. Stokes parametreleri, tamamen polarize olmayan (kısmi polarize) ışığın kutuplanma durumunu tanımlayan parametreler (S_0, S_1, S_2, S_3) veya (I, Q, U, V) vektörler ile gösterilir (Göğüsdere 2006). Stokes vektörü genellikle sütun matrisi ile ifade edilir. Bu elemanlar vektör satır matrisi olarak da yazılabilirler. Ancak literatürde sütun matrisi olarak yazılması tercih edilir (Tinbergen 1996). Çizgisel kutuplanma oranı hesabı için öncelikle Stokes parametreleri Denklem 2.6'da (Stokes 1852; Chandrasekhar 1946) gösterildiği gibi elde edilir. Burada I (Intensity) toplam kutuplanma şiddetini, Q ve U ise (2-boyutlu) çizgisel kutuplanmanın durumunu tanımlamaktadır. Tüm bu parametreler ışığın dalga boyuna bağlıdır. Pratikte, Stokes vektörleri I ile normalize edilir (toplam akıya bölünür). Bu nedenle bu parametrelerin değerleri -1 ile +1 aralığında değer alır (Snik vd 2009).



Şekil 2.7. Kutuplanmanın elips özelliği (Tinbergen 1996)

$$\begin{pmatrix} I \\ Q \\ U \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a^2 \\ a^2 \cos 2\beta \cos 2\chi \\ a^2 \sin 2\beta \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

Şekil 2.7’de, χ , kutuplanma açısı ve $\tan \beta$, elipsin eksen oranı olmak üzere; %100 çizgisel, %100 dairesel ve %100 eliptik kutuplanma için Stokes parametreleri incelendiğinde, çizgisel kutuplanma durumunda, $\sin \beta = 0$ veya $\cos \beta = 0$ ’dır. Bu iki durumda $\sin 2\beta = 0$, dolayısıyla $V=0$ olur. $Q = a^2 \cos 2\chi$ ve $U = a^2 \sin 2\chi$ şekline gelir. a ile belirtilen nicelik, elektrik alanın titreşen genliği ile ilişkilidir. χ , seçilen referans yönü ile elipsin yönelme açısı; kutuplanmanın azimutu veya kutuplanma açısı olarak ifade edilir. Q ve U birimleri, vektörün $(a^2, 2\chi)$ kartezyen bileşenleridir. $q=Q/I$ ve $u=U/I$, astronomiksel polarimetrede genel bir gösterim şeklindedir. Polarizasyon elipsinde dikkat edildiğinde χ ’in orijini isteğe bağlı olarak seçilir. Dairesel kutuplanmada $\sin \beta = \pm \cos \beta$ ya da $\sin 2\beta = \pm 1$, $Q=U=0$ ve $|V| = a^2 = I$ ’dir. Eliptik kutuplanma sıfır olmayan Q , U , V ile ifade edilir. %100 kutuplanma durumunda Stokes parametreleri arasında $Q^2 + U^2 + V^2 = I^2$ ilişkisi vardır (Tinbergen 1996).

Kutuplanmayı ölçmek için uygun parametre ışık şiddetidir. Kutuplayıcı elemanlardan oluşan karmaşık sistemlerden çıkan dalganın en son halini ölçmek için matrisler kullanılır. Bu matrisler sayesinde sistemin matematiksel olarak modellenmesi basitleştirilecektir (Hecht 2002). Stokes matrisinin ilk üç elemanı kaydedilen akı değerleri aracılığıyla belirlenir. Çizgisel kutuplanma durumunda V ile tanımlanan dairesel kutuplanma değeri sıfır olur. Bu durumda ilgili Stokes parametreleri (I, Q, U) Denklem 2.7’den elde edilir. Ardından çizgisel kutuplanma derecesi (P_l) Denklem 2.8’den ve cihazın referans düzleminde kutuplanmanın konum açısı (θ) Denklem 2.9 aracılığıyla hesaplanır. Kutuplanmanın derecesinin hatası (σ_p) Denklem 2.10’dan ve kutuplanmanın konum açısının hatası (σ_θ) Denklem 2.11’den hesaplanmıştır (Shakhovskoy ve Efimov 1972, Fornasier vd 2006). Polarize olmayan ışığın Stokes parametrelerinden $Q=U=V=0$ ’dır.

$$\vec{S} = \begin{bmatrix} I \\ Q \\ U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{0^0} + I_{90^0} \text{ veya } I_{45^0} + I_{135^0} \\ I_{0^0} - I_{90^0} \\ I_{45^0} - I_{135^0} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$P_L = \frac{\sqrt{Q^2 + U^2}}{I} \quad (2.8)$$

$$\theta_L = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{U}{Q} \right) \quad (2.9)$$

$$\sigma_P = \frac{|Q\partial Q + U\partial U|}{P} \quad (2.10)$$

$$\sigma_\theta = \frac{28,65 \times \sigma_P}{P} \quad (2.11)$$

Denklem 2.12 ile Stokes parametrelerinin toplam akı değerine bölünerek normalize değerlerinin elde edilmesi (q, u, v) gösterilmiştir. Çizgisel kutuplanma için q ve u değişkenleri önem kazanır. Çizelge 2.2’de ise normalize edilmiş kutuplanma durumları gösterilmektedir. Kutuplanmanın normalize edilen değeri +1 ile -1 arasında değer almaktadır.

$$q = \frac{Q}{I}, \quad U = \frac{U}{I}, \quad V = \frac{V}{I} \quad (2.12)$$

Çizelge 2.2. Stokes için normalize edilmiş kutuplanma durumları

Tanım	Stokes
Polarize olmayan	(1, 0, 0, 0)
0° Çizgisel	(1, 1, 0, 0)
90° Çizgisel	(1, -1, 0, 0)
45° Çizgisel	(1, 0, 1, 0)
-45° Çizgisel	(1, 0, -1, 0)
Eliptik	(1, q, u, v)

2.2.2 Mueller Matrisi

Uzayın belli bir haciminde yayılan ışın (boş ya da bir tür malzeme ortamı içerebilir) giriş ve çıkış ışınması olarak Stokes parametreleri ile ifade edilir. Herhangi bir eliptik kutuplanma diğer eliptik kutuplanma şekillerine dönüştürülebilir ya da ortam aracılığıyla kutuplu hale getirilebilir. Bu durumda giriş-çıkış Stokes parametreleri arasındaki dönüşüm çizgiseldir (Denklem 2.13). Giriş-çıkış Stokes vektörü dört vektör olarak düzenlendiği zaman, dönüşüm matrisi olacaktır. Stokes vektörleri gerçek sayılardır. Mueller matrisinin tüm elemanları da gerçek sayılardır. Denklem 2.14’te Stokes’tan Mueller matrisine dönüşüm formülü verilmiştir.

Optiğin cihazsal kutuplanması, gelen işareti bozmaktadır. Bu nedenle, TFOSC-WP'nin kalibrasyonu için standart yıldızların kutuplanma değerlerinden elde çıkış Stokes vektörlerinden Mueller matrisi aracılığıyla giriş Stokes vektörleri elde edilmiştir. Bu işlem Bölüm 4.4.2'de matematiksel olarak açıklanmıştır.

$$S_{out} = M \cdot S_{in} \quad (2.13)$$

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

S_{out} çıkış, S_{in} giriş, M ise Mueller matrisidir. m_{11} pozitif olmak zorundadır. Diğer elemanlar pozitif ya da negatif olabilir (Tinbergen 1996).

2.3. Asteroitlerin Kutuplanması

Asteroitlerin fiziksel parametrelerinin belirlenmesi astrofiziğin temel araştırma konularından biridir. Spektroskopi yöntemi asteroitlerin yüzey yapısının ve mineralojisinin keşfinde güçlü bir araç olmuştur. Mineraller, görsel ve yakın-kızılötesi bölgede tayfta karmaşık yapılar sergiler. Tayfsal alanda geniş emilim bandları mineralojik bileşeni belirlemeye ve nesnelerin yüzey modellenmesinde fayda sağlamıştır (Birlan vd 2006).

Kapsamlı olarak DYKN (Dünya'ya Yakın Küçük Nesnelere)'nin optik özellikleri ve yüzey yapıları (Lupishko ve Di Martino 1998, Lupishko 2007, Binzel vd 2002, Binzel vd 2004) makalelerinde verilmiştir. Asteroitlerin yüzey yapıları ve bazı fiziksel özellikleri spektroskopi yöntemi haricinde polarimetri yöntemi ile de belirlenebilir.

2.3.1. Uzanım Açısı

Asteroit-Güneş-Gözlemci arasındaki açıya uzanım açısı (phase angle) denir. Şekil 2.8 ile gösterilmektedir. Uzanım açısı-Kutuplanma eğrisine bağlı bir fonksiyon olarak kutuplanma derecesinin değişimi, asteroidin şekli ve yüzeyinin fiziksel özellikleri hakkında faydalı bilgiler sağlar. Aynı zamanda polarimetrik yöntemden asteroidin sınıfı belirlenebilir. Çünkü aynı özellikteki nesnelere benzer polarimetrik özellikler ve benzer yüzey özellikleri gösterir (Muinonen vd 2002, Penttilä vd 2005, Gil-Hutton 2007).

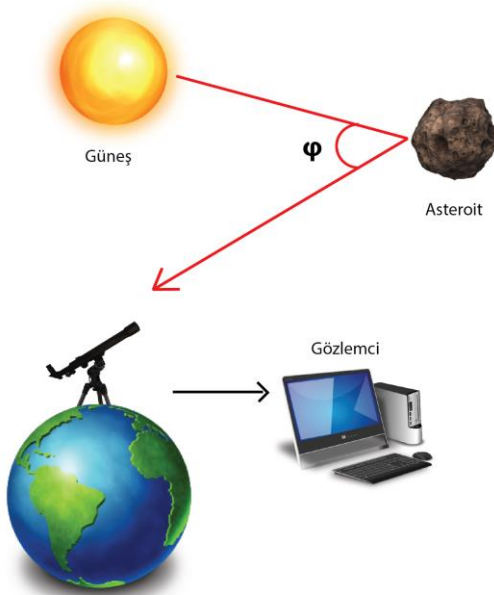
Asteroitlerin farklı uzanım açısına bağlı yapılan polarimetrik gözlemlere göre çizgisel kutuplanma oranı hesaplanır. Elde edilen çizgisel kutuplanma uzanım açısına bağımlılığına göre asteroidin taksonomi sınıfını çıkarılır (Cañada-Assandri vd 2012).

Asteroitlerin düzenli ve sistematik olarak polarimetrik gözlemleri, Dünya çapında ortak yürütülen bilim grupları (Ukrayna, Rusya, İtalya, Arjantin, ESO) tarafından yapılmaktadır. Uzun süren araştırmalar sonucunda polarimetrik asteroit araştırmaları, çeşitli taramalarda (survey) yayınlanmıştır. Bu taramalarda (Cañada-

Assandri vd 2012, Masiero vd 2012, Gil-Hutton ve Cañada-Assandri 2012, Fornasier vd 2006, Lupishko ve Belskaia 1983) ve APD (The Asteroid Polarimetric Database)'de asteroidlerin polarimetrik sonuçları Lupishko ve Vasiliev (2012) tarafınan yayınlanmıştır. Makaleye, NASA PDS (Planetary Data System) üzerinden erişilebilir⁵. Bu makaleye göre, yaklaşık 300 tane farklı boyut ve özelliklerdeki asteroidlerin bazı fiziksel parametreleri polarimetri yönteminden elde edilmiştir ve bunlardan yaklaşık on beş tanesi DYA'dır.

Günümüzde ışığın kutuplanma özelliği kullanılarak herhangi bir asteroidin bazı fiziksel özellikleri (albedo, çap, mineraloji, porozite vb.) belirlenebilir. Dünya'ya çarpma tehlikesi olan asteroidlerin ve onların çaplarının belirlenmesi günümüzde astronomi alanında önem arz eden bir konudur.

Şekil 2.8'de gösterildiği gibi, Güneş-Asteroid-Gözlemci arasındaki uzanım açısı (ϕ)-kutuplanma eğrisine bağlı fonksiyon, kutuplanma derecesindeki değişimi, asteroidin şeklini, asteroidin yüzey özellikleri hakkında faydalı bilgiler sağlamaktadır ve aynı zamanda polarimetrik yöntemden asteroidin sınıfını karakterize etmeye olanak tanımaktadır (Cellino 2013).



Şekil 2.8. Güneş - Asteroid - Gözlemci arasındaki uzanım açısı

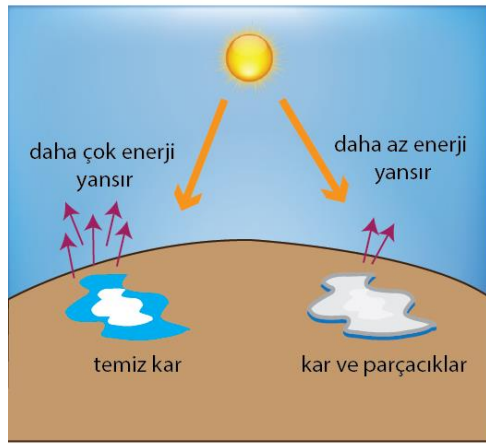
2.3.2. Albedo

Albedo (yansıtılabilirlik), yüzeylerin yansıtma gücü veya bir yüzeyin üzerine düşen elektromanyetik enerjiyi yansıtma kapasitesidir. Örneğin, bir gök cisminin üzerine düşen Güneş ışığının geri yansıma oranıdır. Birimsiz bir niceliktir. 0 ile 1 arasında bir değer alır. Sıfır (0) değeri üzerine düşen tüm ışığı yansıtmadığı; bir (1)

⁵ <http://sbn.psi.edu/pds/resource/apd.html>, 09.11.2014

değeri ise üzerine düşen tüm ışığı yansıtabilir olduğu anlamına gelmektedir. Genel olarak Güneş ışığını yansıtma kapasitesi için kullanılır. Albedo, cismin yüzey dokusuna, rengine ve yüzey alanına bağlı olarak değişir. Elektromanyetik tayfın tümünde veya belirli bir bölümünde hesaplanabilir.

Uzaydan gezegenimize bakıldığında, bulutlar parlak, okyanus yüzeyi ise genelde koyu olarak görünmektedir. Beyaz bulutlar üzerlerine düşen ışığın büyük bölümünü yansıtırlar; yani albedoları yüksektir. Deniz yüzeyi ise üzerine düşen ışığın büyük bölümünü emer, ancak çok küçük bölümünü yansıtır; yani albedosu düşüktür. Gezegenimizin yüzeyinde en yüksek albedo oranına sahip olan cisimler arasında kar ve kum sayılabilir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Albedo

Asteroitler katı kayalı nesnelere dir. Asteroitlerin albedoları onların fiziksel özellikleri hakkında bilgi elde etmek için kullanılabilir. Üzerlerine düşen Güneş ışınlarının enerji dağılımlarını değiştirerek ve onları polarize ederek yansıtırlar. Ortaya çıkan bu değişim asteroidin fiziksel özelliklerine bağlıdır. Teleskoplar ile ayrıntılı olarak yüzey ve fiziksel parametreleri kesin olarak çıkarılmayan uzak ve sönük gök cisimleri için onların albedolarının araştırılması önemlidir. Örneğin; mutlak albedo, dış Güneş sistemi nesnelere nin yüzeyinin buz yapısını gösterebilir. Değişen uzanım açısına göre değişen albedo, onların katı yapısı hakkında bilgi verir. Satürn'ün uydusu Enceladus, Güneş sistemindeki albedosu en yüksek uydulardan biridir. Üzerine gelen elektromanyetik dalganın %99'unu geri yansıtılmaktadır. Diğer önemli bir yüksek albedolu cisim Eris'tir ve albedosu %96'dır. Güneş sisteminin dışında ve asteroid kuşağındaki birçok nesnenin albedoları 0,05'e kadar inmektedir⁶.

Astronomide kullanılan iki yaygın albedo türü vardır. Bunlardan ilki ve önemli olanı geometrik albedodur. Bu özellik tamamen, Güneş ışığının kayanın yüzeyinden tekli ya da çoklu saçılmasına bağlıdır. Öte yandan albedo bilgisi, kayanın boyutunu belirlemede, görsel dalgaboyunda doğru fotometrik ölçümlere bağlıdır. Bu durum, Dünya'ya çarpma tehlikesi olan asteroidlerin fizik parametrelerini belirlemek için

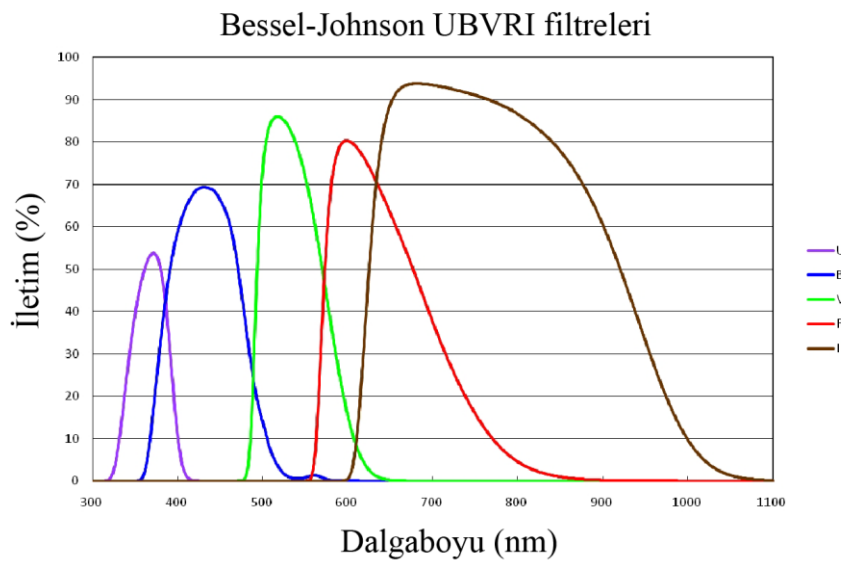
⁶ <https://en.wikipedia.org/wiki/Albedo>, 08.10.2015

özellikle önemlidir. Son yıllarda Dünya'ya çarpma tehlikesi ile ünlenmiş olan Apophis (99942) asteroidi için VLT (Very Large Telescope) teleskobunda polarimetrik gözlemler yapılmıştır (Delbo 2007). Bu çalışma ile yeterli büyüklükteki teleskoplar ile, böyle küçük nesnelere albedo ve boyutunun polarimetri yöntemi kullanılarak belirlenebildiğini göstermektedir. Diğerleri ise Bond albedosudur (yansımış elektromanyetik enerjinin toplamının ölçümü). Astronomik (geometrik) albedo, mutlak parlaklık (absolute magnitude) ve çap arasındaki ilişki Denklem 2.15 ile verilmiştir. Burada A, astronomik albedo; D kilometre türünden çap; H ise mutlak parlaklıktır (Bruton 2008).

$$A = \left(\frac{1329 \times 10^{-H/5}}{D} \right)^2 \quad (2.15)$$

2.3.3. Fotometrik sistemler

Fotometrik sistemler, gözlenen cisme ilişkin bazı fiziksel parametreler (sıcaklık, yüzey çekim ivmesi, metal bolluğu gibi) konusunda bilgi edinilmesini sağlar. Belirlenen fiziksel parametrenin niteliği ve duyarlılığı sistemden sisteme değişiklik gösterir. Ayrıca gözlenen cismin niteliği de önemlidir. Bazı sistemler sıcak yıldızların gözlemlerinde kullanılırken bazıları soğuk yıldızların gözlemlerinde kullanılır. Fotometrik sistemler üç ana kategoriye ayrılabilir: Geniş bant (wide band) sistemler (duyarlı oldukları dalga boyu aralıkları $400\text{\AA} < \lambda < 1000\text{\AA}$ sistemler), orta bant (intermediate band) sistemler (duyarlı oldukları dalga boyu aralıkları $70\text{\AA} < \lambda < 400\text{\AA}$ sistemler) ve dar bant (narrow band) sistemler (duyarlı oldukları dalga boyu aralıkları $\lambda < 70\text{\AA}$ sistemler). Bu sistemlere ek olarak bir de çok geniş (ultrawide) band sistemler bulunmaktadır. Bu sistemler, Sloan, Hipparcos gibi otomatik gökyüzü tarama projelerinde kullanılmaktadır. Ayrıca fotometrik sistemler kullanıcıların katkılarına açık ve kapalı olmalarına göre açık ve kapalı sistemler olarak da sınıflandırılmaktadır (Bessell 2005). Şekil 2.10'da Bessel (UBVRI) bant genişlikleri görülmektedir.



Şekil 2.10. Bessel BVRI filtre dalgaboyu aralıkları

2.3.4. Asteroitlerin parlaklıkları

Asteroitler sönük gök cisimleridir. Bu nedenle, onların görünür parlaklıkları, aslında gerçek parlaklıklarını pek yansıtmamaktadır. Yıldızların birbirlerine göre gerçek parlaklıklarını ifade edebilmek için gökbilimciler yeni bir ölçek olan mutlak parlaklığı (M) oluşturmuşlardır. Bir yıldızın mutlak parlaklığı, onun gözlemciye 10 parsek (1 parsek = 3,26 ışık yılı) uzaklıkta olduğu varsayılarak hesaplanır. Eğer 10 parsek uzaktan baksaydık Güneş bize 4,45 Kadir parlaklıkta ve Avcı Takımyıldızı'nın en parlak yıldızı olan Rigel -8 Kadir olarak görünürdü. Asteroitler için mutlak parlaklık (H), sıfır (0) derece uzanım açısında (Yer-asteroit-Güneş) ve Güneş'ten bir (1) AB (Astronomi Birimi) uzaklıktaki görünür parlaklıktır. Mutlak parlaklık, asteroitler için aynı zamanda büyüklük ölçeğidir. Eğer asteroidin albedosu (asteroidin üzerine gelen Güneş ışığının ne kadarını yansıttığı, yansıtılabilirlik) tam olarak biliniyorsa çapı da bilinebilir. Çoğu asteroidin albedosu tam olarak bilinmiyor olsa dahi çoğunun albedosu 0,05-0,25 aralığındadır. Buna göre mutlak parlaklığı bilinen bir asteroidin aynı zamanda kabaca büyüklüğü bilinmektedir.

Asteroitlerin çoğunluğu sırasıyla uzaklıkları 1,6 ve 5,2 AB olan Mars ve Jüpiter gezegenleri arasında, kendi isimleriyle anılan bir kuşakta bulunmaktadırlar. Büyük gezegenler gibi asteroitlerde Güneş etrafında bağımsız elips yörüngelerde dolanmaktadırlar. Böyle olmakla beraber, Mars ile Jüpiter arasında tanımlanan kuşağın dışına taşan ve Dünya'ya yaklaşan asteroidler de vardır. Bir kısmı Dünya'yı tehdit edecek kadar yakın geçen bu gök cisimleri de bulunmaktadır.

Günümüzde bilinen DYN (Dünya'ya Yakın Nesne) sayısı 30 Nisan 2015 itibariyle, 12628 tanesi keşfedilmiş durumdadır. DYA'ladan 871 tanesi, 1 km ya da daha geniş çapa sahip olan asteroitlerdir. Ayrıca, 1580 tanesi DYA olarak sınıflandırılmış durumdadır⁷.

⁷ <http://neo.jpl.nasa.gov/faq/#howmany>, 07 Mayıs 2015.

3. TASARIM

Polarimetri, Güneş sistemindeki küçük gezegenlerin belirlenmesi zor olan bazı özellikleri hakkında, uzaktan gözlemler sayesinde bilgi veren çok kullanışlı bir tekniktir. Astronomide kullanılan polarimetreler, bir nesnenin fizik parametreleri olan albedo (yansıtılabilirlik oranı), çap, şekil, taksonomi (sınıflandırma), kimyasal bileşenler, yüzey geometrisi-porozite gibi özellikleri hakkında bilgi elde etmemizi sağlayan cihazdır.

Polarimetreler, bir tür polarizör olan prizmalardan oluşurlar (örneğin: MgF_2 , $CaCO_3$, $LiNbO_3$, Fused Silica). Bu maddeler kutuplanma bileşeninin yönelimine bağlı olarak kırılma indisine sahiptir. Etkili bir polarimetre yapabilmek için en ideal yol bu maddeleri birleştirmektir (Oliva 1997).

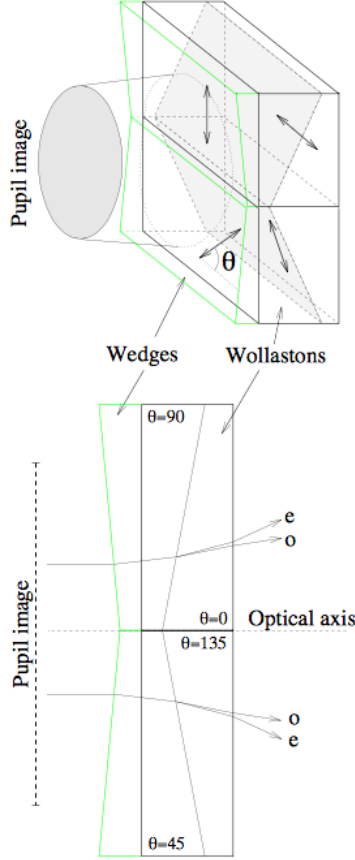
Bu tezde TFOSC uyumlu polarimetre tasarımı ile ışığın kutuplanma özelliğinden yararlanarak hedefteki asteroitlerin bazı fiziksel parametreleri incelenmiştir. Asteroitlerin çizgisel kutuplanma ölçümlerini gerçekleştirmek için, birbirine yapışık iki adet Wollaston prizması ve iki adet wedge (takoz), ticari bir yazılım olan ZEMAX optik tasarım programında, herhangi bir dönen parçaya gerek olmadan, RTT150-TFOSC sistemine uygun olarak tasarlanmıştır. Optik parçalar St. Petersburg'da bulunan ELAN Ltd.'den temin edilmiştir. Stokes parametrelerinin (I, Q ve U) değerleri, sıradan ve sıradışı ışınların foton sayımları alınarak hesaplanmıştır.

TUG'da (TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi) bulunan RTT150 (Rus-Türk 1.5m Teleskobu) teleskobunda mevcut olan sisteme en uygun polarimetrenin Fused silica ile $CaCO_3$ (Kalsit) birleştirilerek yapılabileceği Oliva (1997) makalesi referans alınarak belirlenmiştir. Seçim kriterlerinde, çalışılan dalgaboyu olan $0,63\mu m$ 'de Kalsit'in çiftkırılma değerinin fazla olması ve Bakırli-tepe koşullarına (basınç, nem, sıcaklık vb.) uygunluk etkili olmuştur.

WeDoWo prizması, iki adet takoz ve iki adet Wollaston prizmasına sahiptir. Wollaston prizması temel olarak, gelen ışığı sıradan-ışın (o-ray) ve sıradışı ışın (e-ray) olacak şekilde iki farklı ışına böler. Prizmanın yapısı, çalışma mekanizması (Helhel vd 2015)'de verilmektedir. Polarimetri yöntemi yüksek S/G (Sinyal/Gürültü) oranı gerektirdiğinden geniş toplama alanı sağlayan büyük çaplı teleskoplar için tasarlanması avantajlıdır (Oliva 1997). Bu nedenle TUG'da bulunan RTT150, polarimetre için uygun büyüklüğe sahip bir teleskoptur.

Işık bileşenlerine matematiksel olarak erişmek için kutuplandırıcılar dört temel fiziki mekanizmadan yararlanırlar. Bunlar sırası ile seçici soğurma, yansıma, saçılma ve çift kırılmadır (Bkz. Bölüm 2.1). Tamamı için geçerli ve altı çizilmesi gereken temel özellik ise (rastgele polarize olmuş ışık demeti içinden bilinen bir bileşeni seçebilmek için) her birinin bir miktar asimetric yapıda olması zorunluluğudur (Hecht 2002). Bu çalışmada, bahsi geçen yöntemlerden çift kırılma mekanizmasına dayalı olan ilk defa (Oliva 1997) tarafından gerçekleştirilen WeDoWo yapısı kullanılmıştır. Çift kırılma ve ilgili optik etkiler (optik rotasyon gibi) maddeden geçen ışığın kutuplanmasındaki değişimlerle ölçülür. Bu WeDoWo'nun dayandığı temel mantıktır.

Şekil 3.1’de WeDoWo (Wollaston Tipi İkili Takoz) prizmasının optik şeması gösterilmektedir. Prizmanın ilk bileşeni, takozun (wedge) giriş yüzeyine paraleldir. İkinci prizma çıkış yüzeyine paralel bir optik eksene sahiptir ve bu eksen prizma eksenine diktir (Oliva 1997).



Şekil 3.1. Wollaston tipi ikili takozun optik şeması

Wollaston tabanlı WeDoWo prizmasına düşen ışın eş zamanlı olarak (0° , 90°) ve (45° , 135°) derecelerde polarize olan dört farklı görüntüye ayrılır. Stokes vektörünün ilk üç elemanı, eş zamanlı alınan verilerden herhangi bir $\lambda/2$ dönen parçaya ya da diğer hareketli parçalara gerek olmadan belirlenebilir (Oliva 1997). WeDoWo, optik eksenin altındaki ve üstündeki tüm ışınları saptıran ve paralel ışın demetini bölen iki kenardan oluşan bir cihazdır. Işınlar 45 derece eğimli, iki Wollaston prizması içine girdikten sonra, dört adet farklı açıda görüntü olarak prizmadan çıkar. Bu görüntüler, gelen ışığın kutuplanma oranına ve açısına bağlıdır. Bu dört görüntü bir diziye karşılık gelmektedir. Bu nedenle polarizörün (0° , 90°) ve (45° , 135°)’lerdeki performansını ölçmek için, ilk üç Stokes parametresine ihtiyaç duyulur. WeDoWo prizmasına gelen ışık prizmaya paralel olmalıdır. Prizma gelen bu paralel ışını, iki adet farklı ışına ayırarak ışın bölücü görevi yapar.

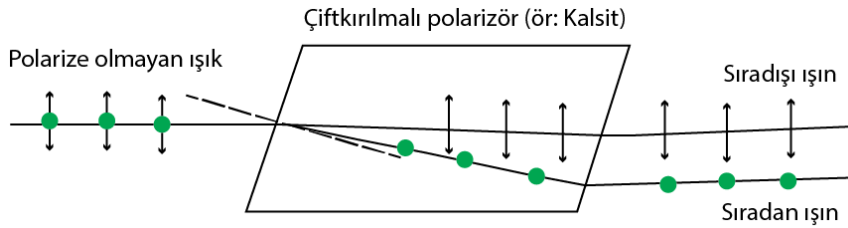
3.1. Tasarımda Malzeme Seçimi

Çiftkırılma, bir ışının “anizotropik” maddelerden geçerken iki ışına ayrışmasıdır. Kalsit (CaCO_3), MgF_2 (Magnezyum Florid) gibi maddeler doğada çift kırılma özelliği ile bilinen maddelere örnektir (Hecht 2002). Işık bu tür maddelerden geçince çift kırılmaya uğrar ve sonuçta maddeden ikiye ayrılarak çıkar. Bu ışınlardan biri “sıradan-ışın” diğeri “sıradışı-ışın” olarak adlandırılır (Hecht 2002). Bu iki tip ışın çift görüntü elde etmeye yarar. Sıradan-ışın (ordinary-ray) malzeme izotropik gibi davranır, sıradışı-ışın (extra ordinary-ray) ise tamamen farklıdır ve onun kristale girdiği anda yönü değişir. Bu ışınlar çizgisel kutupludur ve düzlemleri birbirine diktir (Freeman ve Hull 2003). Takoz malzemesi olarak Fused Silica seçilmiştir. Fused Silica, genellikle yüksek su içeriğine sahip ve hiçbir metalik kirlilik içermeyen bir malzemedir. Wollaston prizmasının malzemesi Kalsit’tir. Çevre koşullarına uygunluğu ve prizmadan çıkan e-ray ve o-ray arasındaki açılmanın fazla olması sebebiyle tasarımda seçilmiştir.

3.1.1. Çift kırılmalı prizmalar

Polarimetri yöntemi, sönük ve uzak cisimlerin diğer gözlem metotları ile elde edilemeyen bilgilerini verir. Bu bilgileri elde etmek için prizmalar kullanılır. Genellikle en sık kullanılan prizmalar Şekil 3.2’den de görüldüğü gibi ışığı iki bileşene ayırma özelliği ile bilinen Wollaston, Rochon, Glan tipi prizmalardır.

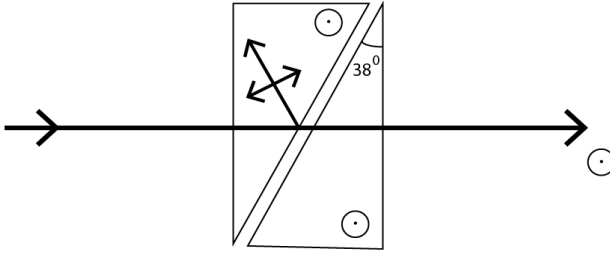
Sıradışı ışın (e-ray), kristalin içinde kırılmaya uğrayarak yolu ve yönü değişen ışındır. Sıradan ışın (o-ray) ise tam aksine kristalin içinden kırılmadan aynı doğrultuda yoluna devam eden ışındır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Sıradan ve sıradan olmayan ışınlar

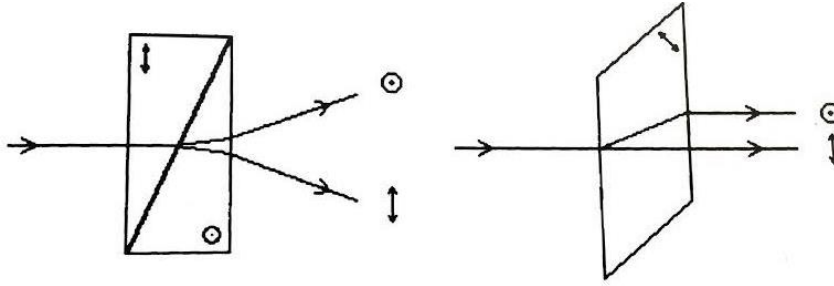
Aynı nesneden iki adet görüntü üretebilen doğal kristallerin varlığı bilinmektedir. Bu kristaller arasından en meşhuru ve doğada nadir bulunan, kırılğan ve pahalı olan Kalsit’tir. Çift kırıcı ortamın optik özellikleri birçok standart optik kitabında tanımlanmıştır (Leroy 2000). Böyle bir çift kırılmalı ortamda ışığın hızı, kutuplanma durumuna ve giren ışının yönüne bağlıdır.

Işık, optik eksene paralel ilerlerken olağan dışı bir durum yoktur. Ancak diğer durumlarda, kutuplanma durumuna bağlı olarak ortam iki farklı kırılma indisine ve gecikmeye sahipmiş gibi davranır. Çift kırılmalı malzemelerden genellikle kalsit, fizik ve astronomi alanındaki polarimetrelerde sıklıkla kullanılmaktadır. Şekil 3.3’te Glan-Foucault polarizörü görülmektedir. Şekil 3.4’te klasik Wollaston prizması polarizörü görülmektedir, Kalsit prizmalarının çeşitli kombinasyonları kullanılabilir.



Şekil 3.3. Glan tipi prizma

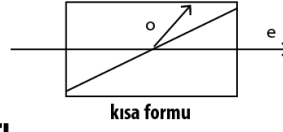
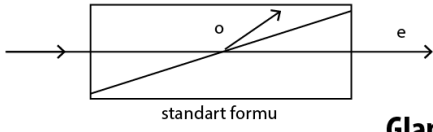
İnce bir çift kırılma düzlemi optik eksene paralel olarak kesildiği zaman, polarize olan bileşenlerin ayrılması durumunda düzlemin dikliğinin ışın geçişine etkisi bariz değildir. Fakat, bileşenlerden birinin geciktiriciliği bir diğerine göre farklıdır.



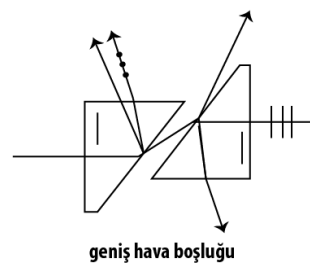
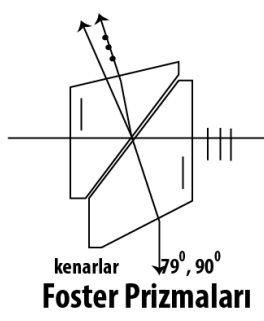
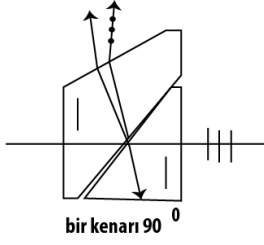
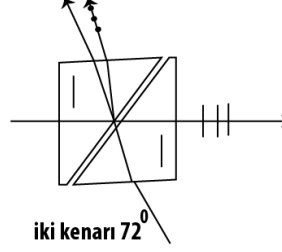
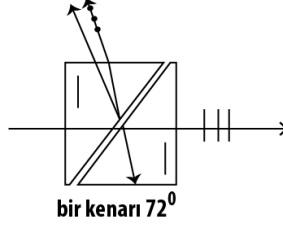
Şekil 3.4. Wollaston tipi prizma

Şekil 3.4 gelen ışının bir Wollaston polarizörü ile açısal bölünmesi (solda) ve Kalsit tarafından çizgisel bölünmesi (sağda) (Leroy 2000). Şekil 3.5'te kullanılacak tasarıma bağlı olarak değişebilen prizma türleri görülmektedir (Tinbergen 1996).

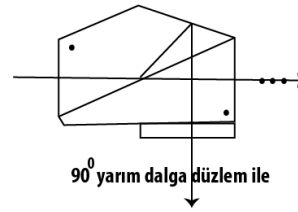
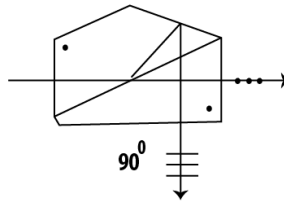
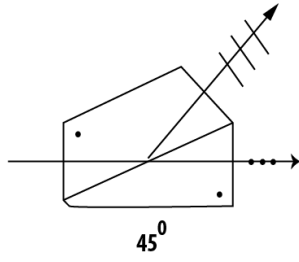
Glan Thompson Prizmaları



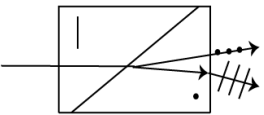
Glan Prizmaları



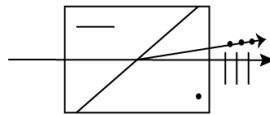
Foster Prizmaları



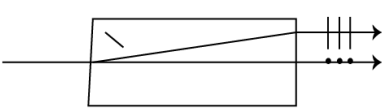
Wollaston



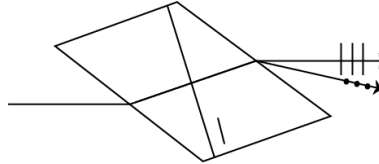
Rochon



Kalsit



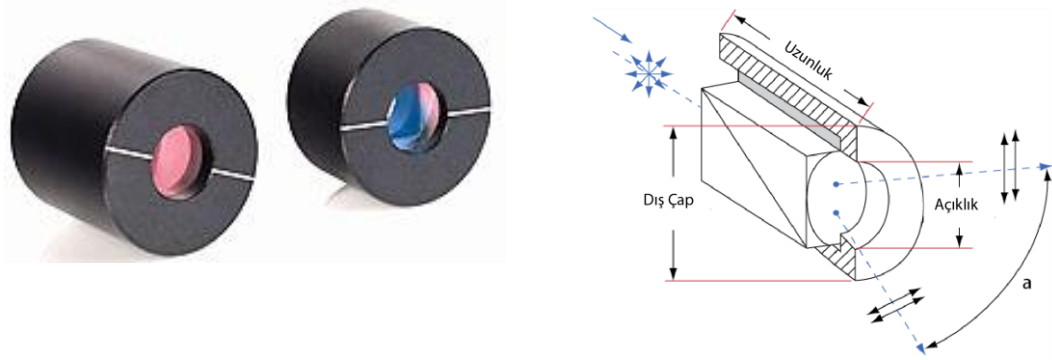
Brewster polarizörü



Şekil 3.5. Yaygın kullanılan prizma çeşitleri

Wollaston Prizması:

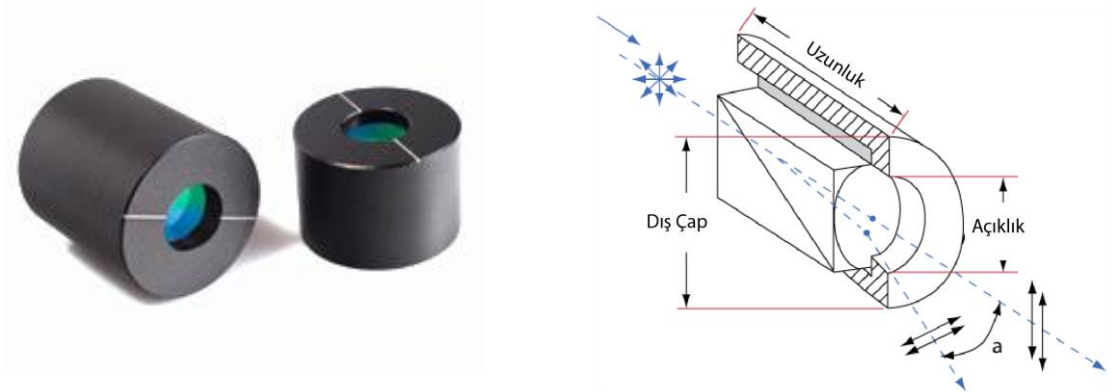
Wollaston polarizörü, birbirine yapışık iki adet dik açıda prizmadan oluşur (Şekil 3.6). Genellikle polarizör camı olarak Kuartz ya da Kalsit malzemesi tercih edilir. Işık polarizörden geçerken sıradan ve sıradan olmayan ışık arasında simetrik bir sapma meydana gelir. Sıradan ve sıradan olmayan ışınlar arasındaki açılma Kalsit malzemesinde daha çok olmaktadır. Bu açıklık prizmaların açısına ve dalgaboyuna bağlıdır. Çıkan ışınlar çizgisel kutuplanmıştır. Aynı zamanda eşit şiddette akı ve geniş açısal sapmaya sahiptir. (Clarke 2010, Edmund Optics 2015).



Şekil 3.6. Örnek bir Wollaston prizması (Edmund Optics 2015)

Rochon Prizması:

Rochon polarizörü 1783'te keşfedilmiştir ve birbirine optik olarak birbiriyle bağlantılı iki çift kırılmalı prizmadan oluşmaktadır. Kalsit gibi çift kırılma özelliğine sahip iki farklı prizmanın bileşiminden oluşan optik bir polarizördür. Birçok açıdan Wollaston ile benzerlik taşımaktadır. Sıradan ve sıradan olmayan ışınlar ilk prizma boyunca aynı doğrultuda kalır. İkinci prizmaya ulaşmasıyla, sıradan ışın kırılma indisinde bir değişim olmaz, sapmadan prizma boyunca yoluna devam eder. Oysa sıradışı ışınlar yüzeyde kırılır. Aslında Wollastonun şeması, taslağı, yapısı 90° döndürüldüğünde Rochon diyagramına benzemektedir. Yine her iki bileşen de iletilir. O-ray düz ilerler, e-ray çıkıştaki iki ışın arasındaki açı değerine bağlı olarak sapar. Bu açı değeri de prizmanın açı seçimine bağlıdır. Şekil 3.7'de örnek bir Rochon polarizörü görülmektedir.



Şekil 3.7. Rochon polarizörü

Glan tipi prizma:

Glan-tipi polarizörler, geniş spektral aralık, yüksek sönümlenme oranı ya da yüksek kutuplanma hassasiyeti gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Glan-Taylor polarizörler morötesinden yakın kızılötesi bölgesine sıradışı ışını ileten orta güçte polarizörlerdir. Prizmanın açısı yaklaşık olarak 38° 'dir (Şekil 3.3).

Çizelge 3.1'de bazı malzemelerin çiftkırılma değerleri ve kırılma indisleri verilmiştir. Görüldüğü gibi Kalsit'in çift kırılması diğer prizmalara göre daha çoktur. Bu durum tasarlanacak sistemde kalsit malzemesinin seçilme sebeplerinden biri olmuştur⁸.

Çizelge 3.1. Bazı malzemelerin $0,63 \mu\text{m}$ 'de çiftkırılma değeri ve kırılma indisleri

Kristal	n_o	n_e	Çiftkırılma ($D=n_e-n_o$)
Kalsit (CaCO_3)	1,6557	1,4852	- 0,1705
Quartz (SiO_2)	1,5427	1,5518	+ 0,009
MgF_2	1,3836	1,3957	+ 0,012
LiNbO_3	2,286	2,203	- 0,086

Wollaston prizması tasarımında bu çift kırılmalı malzemeler arasından Kalsit tercih edilmiştir. Tercih sebebi o-ray ve e-ray arasındaki farkın en fazla olması ve Bakırlıtepe çevre koşullarına en uygun prizma türü olmasıdır. Çizelge 3.1'den de görüldüğü gibi kırılma indisleri ve kırılma indisleri arasındaki fark (D) prizma seçiminde önemli parametrelerdir.

3.2. ZEMAX ile Sistemin Optik Tasarımı

ZEMAX, günümüzde tüm Dünya'da kullanılan/bilinen bir optik tasarım programıdır. Optiğin olduğu çoğu alanda bu program araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir.

ZEMAX, ışığın kutuplanmasını, ışınların yolunu, pozisyonunu ve açısını, kırılma ve yansımayı, optik yol farkını, bozulmaları ve görüntü biçimini, kaplamaların geçirgenliğini ve emilimini, saçılmayı, mercek yüzeylerindeki sapmaları, farklı dalga boylarının farklı odaklanmasını, çeşitli sapmaların çözünürlükteki etkisini, optimizasyon ve performans parametrelerini hesaplayan, optik sistemlerin tasarımında kullanılan çok güçlü ve kullanıcı dostu, analiz ve optimizasyon yapılabilen bir optik tasarım programıdır.

ZEMAX'ta farklı modlarda tasarım yapılabilmektedir. Bunlar; Sıralı (Sequential)-karışık sıralı (Mixed Sequential) ya da sıralı olmayan-sıralı olmayan (Non-Sequential) mod olmak üzere iki tanedir. Sıralı modda, yayılan tüm ışınlar yerel bir koordinat sistemi kullanarak yerleşmiş olan yüzeylerden meydana gelir. Sıralı olmayan modda ise, optik bileşenler yüzeyler veya katı cisimler olarak gerçek üç boyutlu nesnelere gibi modellenirler (Arora 2014).

⁸ http://www.mt-berlin.com/frames_cryst/descriptions/birefringent.htm, 11.11.2015.

WeDoWo prizmasının parametrelerini, optik performansını değerlendirebilmek için ZEMAX Optik tasarım programı kullanılması uygun görülmüştür (Pernechele vd 2012). ZEMAX tasarımının AutoCAD çizim çıktıları Ek-1’de verilmektedir.

Bu tezde ZEMAX ile WeDoWo prizması (TFOSC-WP) tasarlanmış ve performans analizi yapılmış ve tasarımdaki sınırlayıcı parametreler belirlenmiştir. Bu çalışmada WeDoWo prizması, (Oliva 1997) makalesi revize edilerek ve ZEMAX’ın, *ZEMAX13 Release-2* sürüm numaralı optik tasarım programı kullanılarak geliştirilmiştir.

ZEMAX simetri üzerine çalışan bir programdır. Dalgaboyu ZEMAX’ta mikron’dur. Tasarımda elde edilen dört görüntünün çakışmasını önlemek ve prizma arayüzündeki ışınların optik eksenin altına ve üstüne yayılması için çeşitli ek mekanik tasarımlar kullanılmıştır. Bunlar “Tasarım” bölümünde açıklanmıştır.

WeDoWo prizmasının geliştirilmesi

Tez çalışmasında kullanılacak dalgaboyu belirlenmiş ve prizmanın boyutları TFOSC sistem boyutlarına göre hesaplanmıştır. Prizmanın camı 2500m’deki Bakırlitepe Yerleşkesinin çevre ve hava koşullarına uygun olacak şekilde (basınç, nem, sıcaklık değişimi vb.) literatüre uygun olacak şekilde seçilmiştir (Oliva 1997). Tasarımda kullanılacak prizma türü, ışınları Wollaston çıkışında ikiye ayrılacak ışınlar arasındaki mesafe parametresi öncelik alınarak belirlenmiştir. Tasarlanan polarimetre afocal bir sistemdir (odaksızdır). Tasarımda, interferometrede kullanılan lazer’in dalga boyu olan $0,6328 \mu\text{m}$ kullanılmıştır.

WeDoWo prizması tasarımında sınırlayıcı parametrelerin tanımlanması:

ZEMAX programında TFOSC sistemine uyumlu optik tasarımın parametreleri tanımlanırken, “Genel Sistem Bilgisi” (General System Data), “Alan Bilgisi” (Field Data) ve “Dalgaboyu Bilgisi” (Wavelength Data) iletişim kutuları ile “Değer Fonksiyonu Editörü” (Merit Function Editor) ve “Mercek Bilgi Editörü” (Lens Data Editor) kullanılmıştır.

Genel Sistem Bilgisi: Açıklık tipi (aperture type), açıklık değeri (aperture value), sisteme ilişkin notlar, sistemde kullanılan birimler vb. hakkında genel bilgilerin belirlenebildiği bir iletişim kutusudur (ZEMAX User’s Guide 2013).

Surf	Type	Comment	Radius	Thickness	Glass	Semi-Diameter	Conic	Par 0 (unused)	Par 1 (unused)	Par 2 (unused)
OBJ	Standard		Infinity	Infinity		0.000	0.000			
1	Standard		Infinity	20.000		12.000 U	0.000			
2*	Tilted			3.500	F_SILICA	6.000 U			0.000	-0.0
3*	Tilted			0.000		6.000 U			0.000	0.0
*	Birefringent In		Infinity	7.000	CALCITE	6.000 U	0.000	7.000	0	0.0
5#	Birefringent Out		Infinity	0.000	CALCITE	6.000 U	0.000			
6#	Birefringent In		Infinity	7.000	CALCITE	6.000 U	0.000	7.000	1	1.0
7*	Birefringent Out		Infinity	74.000		6.000 U	0.000			
8	Paraxial			216.700		12.000 U			216.700	F
IMA	Standard		Infinity	-		6.230	0.000			

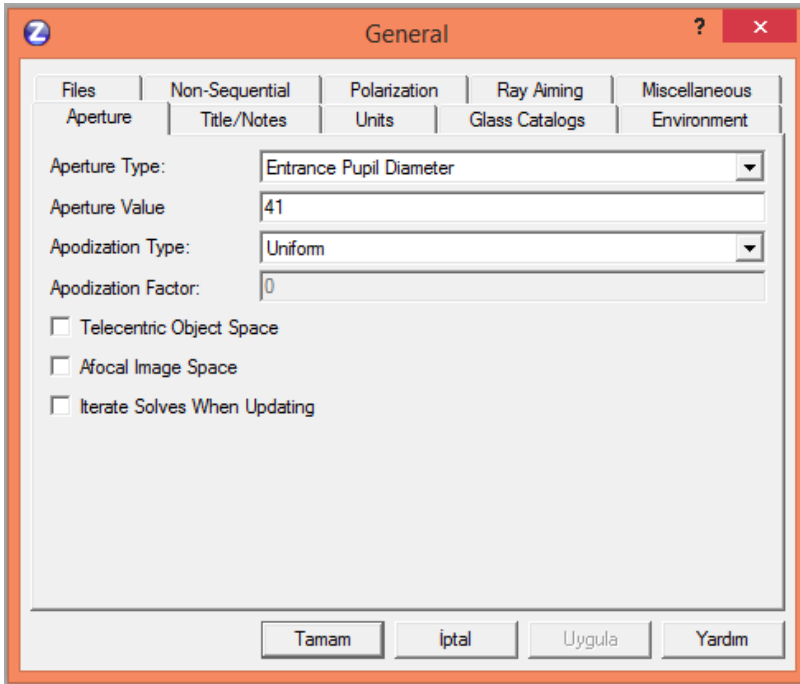
Şekil 3.8. Mercek bilgi editörü

ZEMAX'ta Mercek Bilgi Editörü (Lens Data Editör (LDE)) penceresinde çalışılacak olan yüzeyler kullanıcı tarafından oluşturulur ve “Surf: Type” bölümünden uygun yüzey seçimi yapılır. Şekil 3.8’de görüldüğü gibi tasarımda çiftkırılmalı (Birefringent In/Out) malzeme seçimi yapılmıştır. Işının hem girişinde hem de çıkışında çiftkırılmalı malzeme tercih edilmiştir. Ardından “Thickness” bölümünden iki yüzey arası mesafe, “Glass” bölümünden kullanılacak malzemeler olan Takoz için Fused Silica (F_Silica) ve Wollastonlar için “Calcite” malzemesi, “Semi-diameter” bölümünden çap bilgileri sisteme tanıtılmıştır (Şekil 3.8).

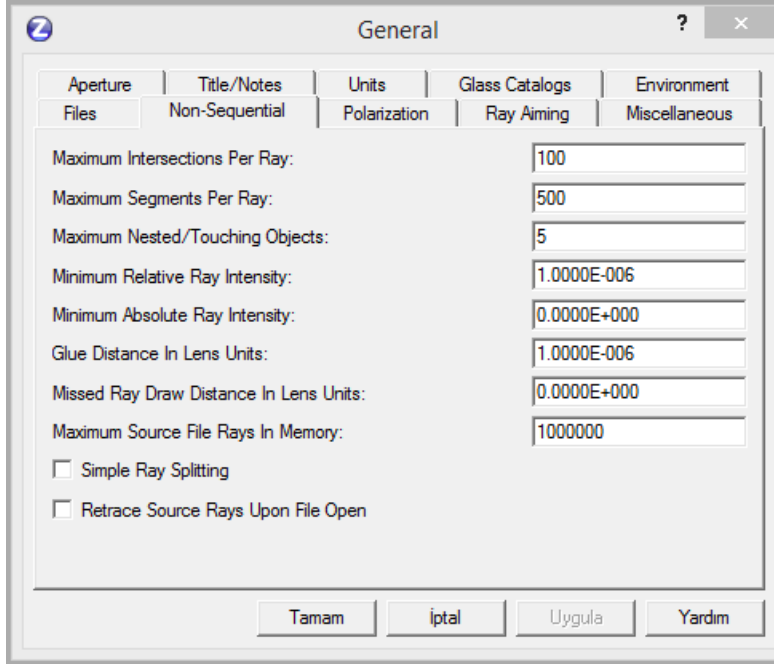
Şekil 3.9’daki ve Şekil 3.10’daki “General” sekmesinden demet başlangıç çapı değerleri, kullanılacak birimlerin ve yüzeylerin seçilmesi gibi bir çok işlemin yapılması mümkündür.

Alan bilgisi (Field Data): Işın takibi için görüntü düzleminde kullanılacak alan noktalarının sayısının, tipinin ve ağırlığının belirtildiği iletişim kutusudur.

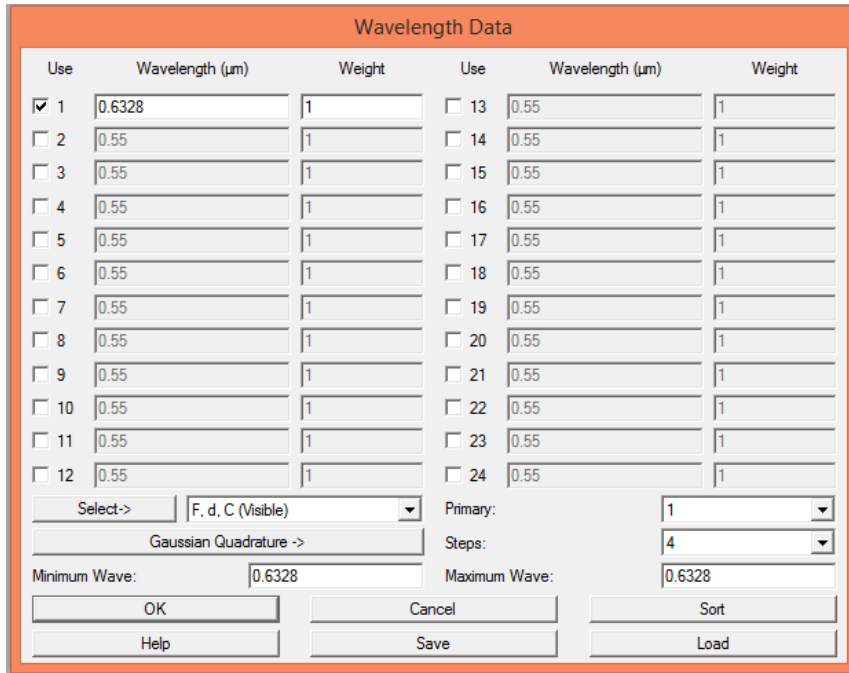
Dalgaboyu Bilgisi (Wavelength): Optik sistemde kullanılacak dalgaboyu sayısı, dalgaboylarının değerlerinin ve ağırlıklarının belirlenebileceği iletişim kutusudur. ZEMAX'ta kullanılan dalga boyu mikrondur. Görsel dalgaboyu olan $0,6328 \mu\text{m}$ dalga boyu kullanılmıştır. Dalgaboyu bilgisi iletişim kutusunun dalgaboyu tanımlamaları sonrasındaki görünümü Şekil 3.11’deki gibidir.



Şekil 3.9. ZEMAX Genel alan bilgisi



Şekil 3.10. ZEMAX Genel bilgi ekranında veri girişi



Şekil 3.11. Dalgaboyu (Wavelength) bilgisi iletişim kutusu

Değer Fonksiyonu Editörü (Merit Function Editor): Sistemin optimizasyonu sırasında kullanılacak değer fonksiyonlarını tanımlamak, değiştirme ve gözden geçirmek için kullanılan editördür. Bu editörde, sistemin değer fonksiyonu tanımlanırken operand (işlemci) kullanılır. Sistemin optimizasyonu esnasında değer fonksiyonunda tanımlanmış işlemler göz önünde alınarak optimizasyon yapılmaktadır.

Tez çalışmasında kullanılan işlemciler, işlemcilerin görevleri ve işlemcilere atanan değerler ile ilgili bilgiler ilerleyen sayfalarda anlatılmıştır. Şekil 3.12’de değer fonksiyonu editörünün görünümü ve WeDoWo sistemi tasarımında kullanılan işlemciler sunulmuştur.

Oper #	Type	Cfg#	
1: CONF	CONF	1	
2: DMFS	DMFS		
3: DMFS	DMFS		

Şekil 3.12. Değer fonksiyonu editörü

Etkin odak uzaklığı işlemcisi (Effective Focal Length Operand-EFFL): Optik sistemin odak uzaklığı, sistemin ışığı ne kadar güçlü olarak yakınsadığının veya ıraksadığının ölçümüdür. Kısa odak uzaklığı olan bir sistem gelen ışınlarını daha yakın bir mesafeye odaklar ve uzun odak uzaklığına sahip bir sisteme oranla daha güçlü bir optik güce sahiptir. Etkin odak uzaklığı, WeDoWo ile düzgün görüntü elde edilebilen ve optik sistemde istenen yerlere düşürülebilen uzaklıktır. EFFL, EFL değerinin tanımlandığı işlemcisidir. Tez çalışmasında, prizma tasarımında EFFL değeri 216,7 mm olarak seçilmiştir (Şekil 3.13).

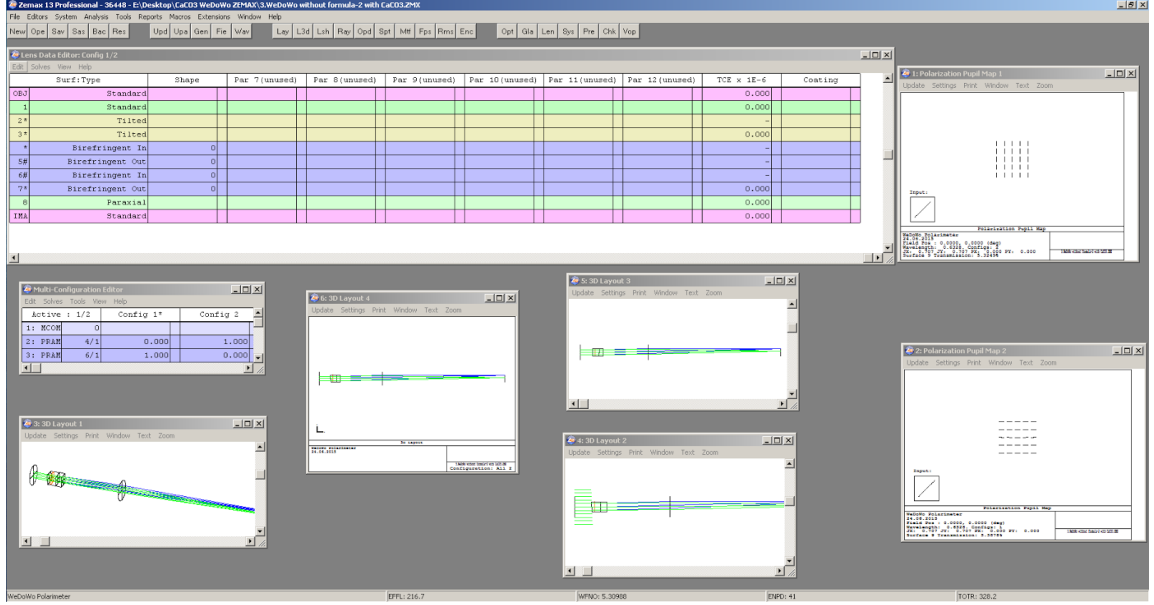
```

GENERAL LENS DATA:

Surfaces          :          9
Stop              :          4
System Aperture  : Entrance Pupil Diameter = 41
Glass Catalogs   : BIREFRINGENT SCHOTT INFRARED
Ray Aiming       : Off
Apodization      : Uniform, factor = 0.00000E+000
Temperature (C)  : 2.00000E+001
Pressure (ATM)   : 1.00000E+000
Adjust Index Data To Environment : Off
Effective Focal Length : 216.7 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 216.7 (in image space)
Back Focal Length  : 290.7
Total Track       : 328.2
Image Space F/#   : 5.285366
Paraxial Working F/# : 5.285366
Working F/#      : 5.309879
Image Space NA    : 0.09418034
Object Space NA   : 2.05e-009
Stop Radius       : 20.5
Paraxial Image Height : 0
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 41
Entrance Pupil Position : 22.40217
Exit Pupil Diameter : 66.4241
Exit Pupil Position : -351.034
Field Type        : Angle in degrees
Maximum Radial Field : 0
Primary Wavelength : 0.6328 µm
Lens Units        : Millimeters
Angular Magnification : 0

Fields           : 1
  
```

Şekil 3.13. Etkin odak uzaklığı işlemci editörü

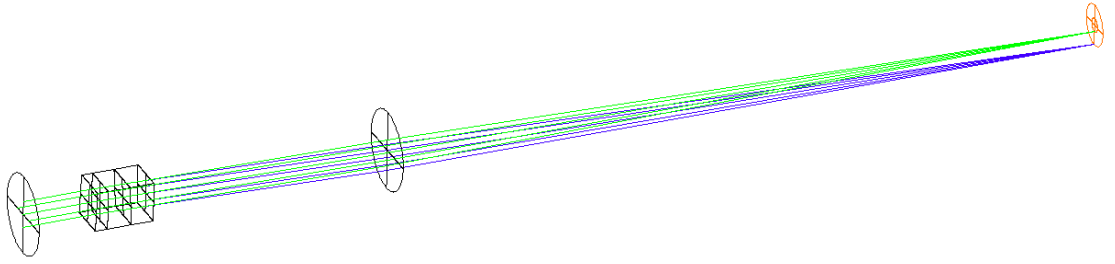


Şekil 3.14. ZEMAX'ta çalışma ekranı

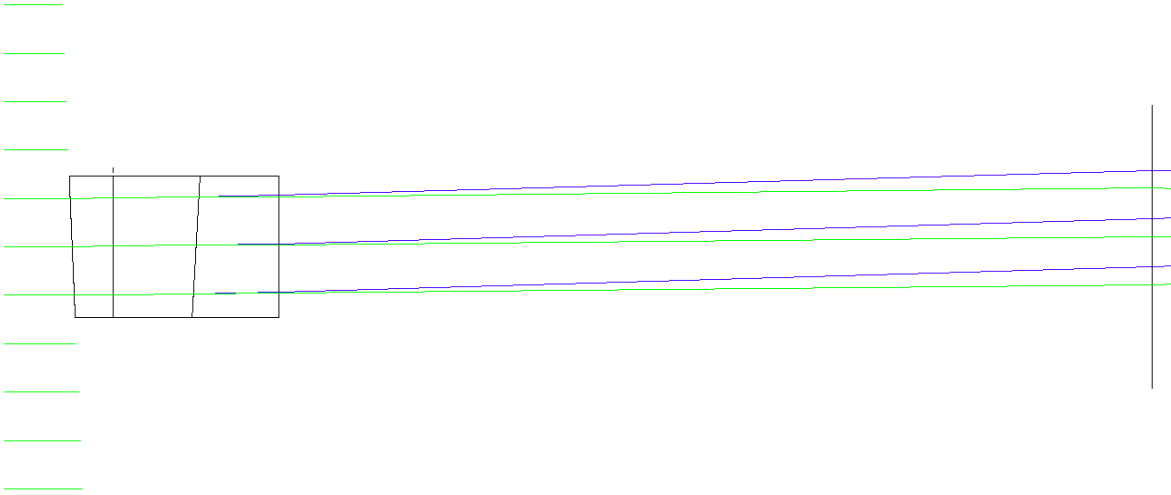
Şekil 3.14'de ZEMAX'taki ana çalışma ekranı görülmektedir. Mercek bilgi editörü, kutuplanmanın nokta gösterimleri, sistemin üç boyutlu analiz sonuçları tek bir ekranda görülmektedir.

Sistemin optimizasyonu:

Tasarımın ZEMAX ile analiz sonuçları Şekil 3.15'te görülmektedir. Sisteme giren tek bir ışından, sistem çıkışında iki adet ışın oluşumu görülmektedir (Şekil 3.16).

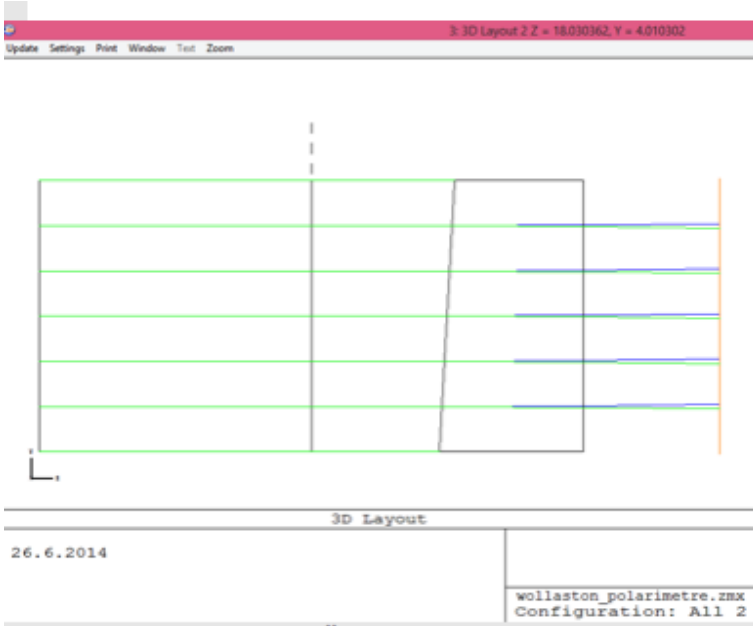


Şekil 3.15. Sistemin üç boyutlu analiz çıktısı

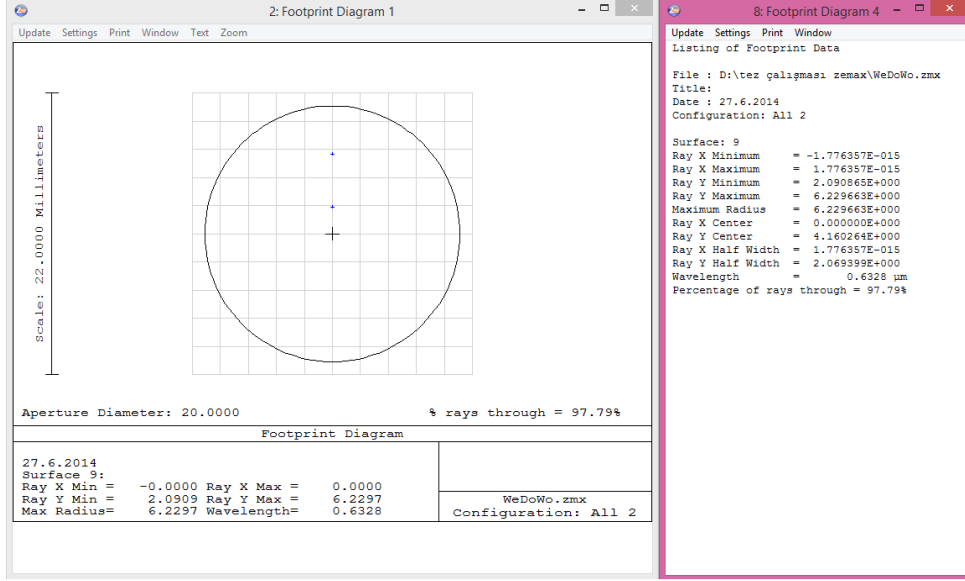


Şekil 3.16. Takoz ve Wollaston çıkışındaki ışınların farklı açıdan görünüşü

Wollaston'dan çıkan ışınların çift kırılmaya uğramış hali Şekil 3.17'de mavi ve yeşil renkli ışınlarla görülmektedir.

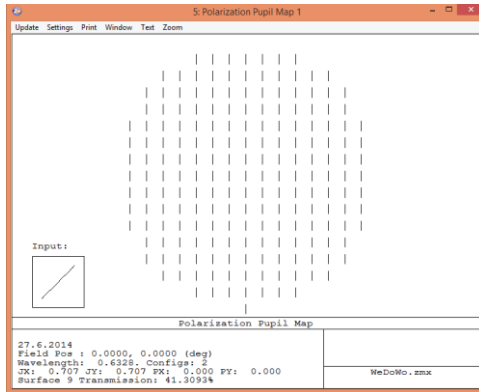


Şekil 3.17. Çift kırılma özelliğinin ZEMAX'ta uygulanması

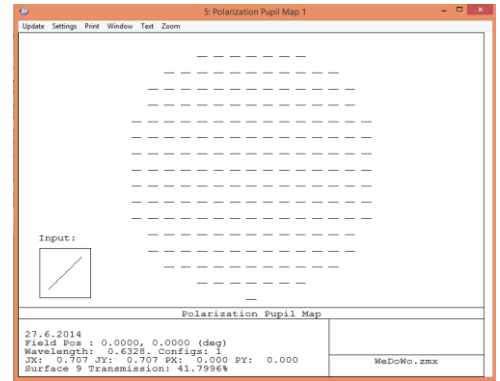


Şekil 3.18. ZEMAX'ta nokta gösterimi

Şekil 3.18'de kutuplanmış görüntülerin CCD (Charged Coupled Device) üzerinde optik ekseninden ne kadar uzaklıkta oluştuğu görülmektedir. Optik eksenin hemen üzerindeki nokta, 0° kutuplu olan görüntüyü temsil eder ve optik eksenin uzaklığı +2 mm'dir. Diğer nokta ise optik eksenin +6 mm uzaklıktadır ve 90° çizgisel kutuplu görüntüyü temsil etmektedir. Bu sistemin simetriği optik eksenin altında da mevcuttur. 45° ve 135° derecelerde polarizasyona sahip görüntüler sırasıyla -2 mm ve -6 mm'de oluşmaktadır. Bu şekilde WeDoWo ile eş zamanlı olarak (0° , 90°) ve (45° , 135°)'lerde aynı ayna dört adet görüntü elde edilmektedir.



Şekil 3.19. Dikey kutuplanma konfigürasyonu



Şekil 3.20. Yatay kutuplanma konfigürasyonu

Şekil 3.19 – Y ekseni boyunca (polarizör eksenine dik) çizgisel polarize olmuş tek bir ışının CCD üzerindeki görüntüsüdür ve Şekil 3.20 – x ekseni boyunca (polarizör eksenine paralel) çizgisel kutuplu olmuş tek bir ışının CCD üzerindeki görüntüsüdür. Şekil 3.21'de ise tasarımın simülasyon sonuçları listelenmiştir.

```

8: System Data
Update Settings Print Window

File : E:\Desktop\CaCO3 WeDoWo ZEMAX\3.WeDoWo without formula-2 with CaCO3.ZMX
Title: WeDoWo Polarimeter
Date : 24.06.2015
Configuration 1 of 2

LENS NOTES:

Notes...

GENERAL LENS DATA:

Surfaces          :          9
Stop              :          4
System Aperture  : Entrance Pupil Diameter = 41
Glass Catalogs   : BIREFRINGENT SCHOTT INFRARED
Ray Aiming       : Off
Apodization      : Uniform, factor = 0.000000E+000
Temperature (C)  : 2.000000E+001
Pressure (ATM)   : 1.000000E+000
Adjust Index Data To Environment : Off
Effective Focal Length : 216.7 (in air at system temperature and pressure)
Effective Focal Length : 216.7 (in image space)
Back Focal Length  : 290.7
Total Track       : 328.2
Image Space F/#   : 5.285366
Paraxial Working F/# : 5.285366
Working F/#       : 5.309879
Image Space NA    : 0.09418034
Object Space NA   : 2.05e-009
Stop Radius       : 20.5
Paraxial Image Height : 0
Paraxial Magnification : 0
Entrance Pupil Diameter : 41
Entrance Pupil Position : 22.40217
Exit Pupil Diameter : 66.4241
Exit Pupil Position : -351.034
Field Type        : Angle in degrees
Maximum Radial Field : 0
Primary Wavelength : 0.6328 µm
Lens Units        : Millimeters
Angular Magnification : 0

Fields           : 1
Field Type       : Angle in degrees
#       X-Value   Y-Value   Weight
1       0.000000  0.000000  1.000000

Vignetting Factors
#       VDX       VDY       VCX       VCY       VAN
1 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000 0.000000

Wavelengths     : 1
Units: µm
#       Value     Weight
1       0.632800  1.000000

```

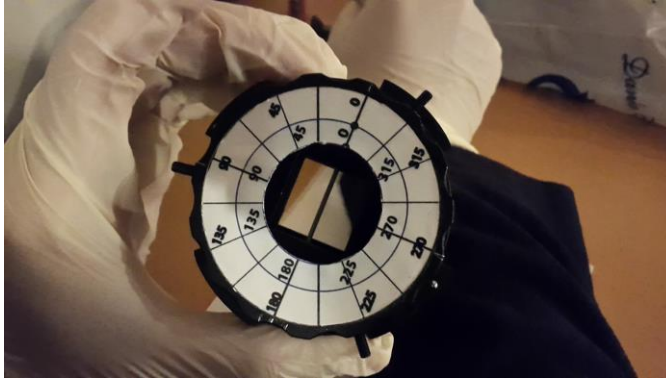
Şekil 3.21. Tasarımın simülasyon sonuçları

3.3. Mekanik Tasarımlar

Tasarlanan WeDoWo'nun TFOSC filtre tekerleğinde sabit kalabilmesi, döndürülebilmesi ve CCD üzerinde alınan görüntülerin çakışmaması için bir dizi ek mekanik cihaz üretilmiştir.

3.3.1. Tutucu (Holder) üretimi

WeDoWo'nun boyutları 2x2 cm olduğundan, filtre tekerleğine monte edilmesi için prizmayı tutan bir parça gerekmektedir (Şekil 3.22). TFOSC sistemiyle uyumlu olan ve kullanılmayan yedek bir tutucu, TUG teknisyenleri tarafından WeDoWo'ya uyarlanmıştır.



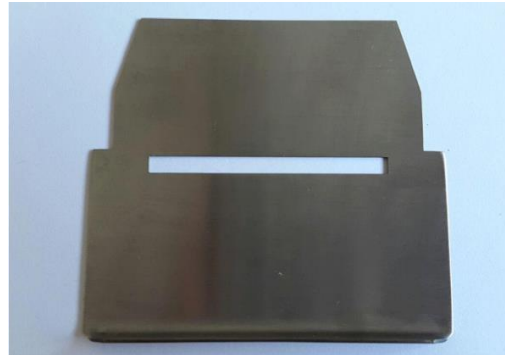
Şekil 3.22. WeDoWo, tutucusu ile gösterilmekte

3.3.2. Yatay ve dikey yarık tasarım ve temini

CCD üzerine sadece ilgili gök cisiminden gelen akının kaydedilebilmesi için ve gökyüzünün istenmeyen etkilerinden sakınmak için 1 yay-dakikalık (60 yay-sn) yarıklar (yatay ve dikey) tasarlanmıştır. Dikey yarık Şekil 3.23'te ve yatay yarık Şekil 3.24'te görülmektedir. Yarık boyutu fiziksel olarak 3,37mmx50mm'dir. CCD (Charge Coupled Device) üzerinde alınan görüntülerde yarığın gördüğü yatay açılma genişliği 60 yay-sn ($2300 \mu\text{m}$)'dir. Yarıklar, yansıma olmaması için mat-siyah bir renge boyanmıştır.



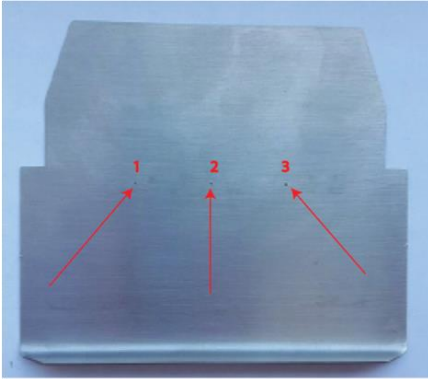
Şekil 3.23. Dikey yarık



Şekil 3.24. Yatay yarık

3.3.3. İğne deliği (pinhole) tasarım ve temini

Optiğin iletim parametresini ve cihazsal kutuplanma oranını belirlemek için iğne deliği (pinhole) tasarlanmıştır. Pinhole'un delik çapları 0,45 mm, malzemenin kalınlığı 3,27 mm ve malzemenin boyu 50 mm'dir. Malzemenin eğilip bükülmemesi, sıcak ve soğukta genleşme, büzülme gibi değişikliklere uğramaması gerektiğinden alüminyum olmasına karar verilmiştir. Şekil 3.25'te gösterildiği üzere RTT150-TFOOSC'taki odak düzleminin merkezine (Şekil 3.26), mevcut olan dikey/yatay yarık çıkarılarak iğne deliği (pinhole) monte edilmiştir. Çizelge 3.2'de üretilen (dikey/yatay yarık ve pinhole) yarıkların fiziksel boyutları verilmiştir.



Şekil 3.25. İğne deliği (Pinhole)



Şekil 3.26. Yarık ve pinhole'un takıldığı odak düzlemi

Çizelge 3.2. Yarık bilgileri

Malzeme Türü	Alüminyum
Malzeme Kalınlığı (mm)	0,4
Yarık Genişliği (mm)	3,37
Yarık Boyu (mm)	50
Pinhole Delik çapı (mm)	0,45

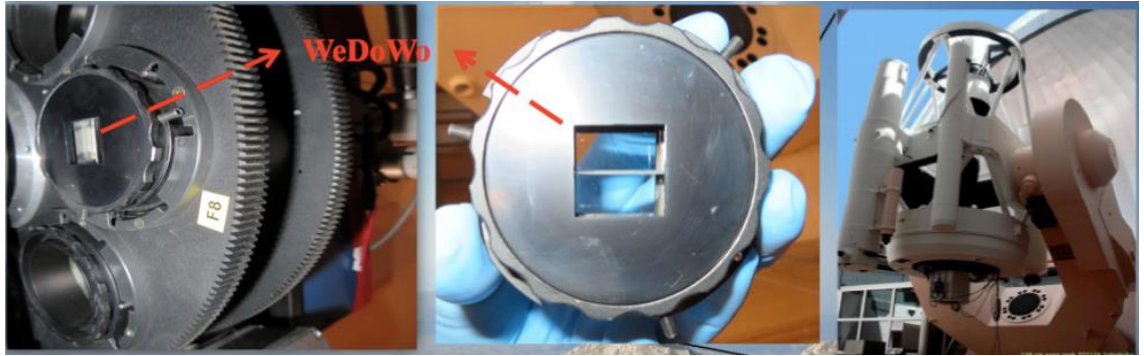
3.4 Tasarımın Uygulanma Aşaması

WeDoWo optik tasarımı, TFOSC'taki kolimator ile kamera arasındaki filtre tekerleğine yerleştirilmiştir (Şekil 3.27).

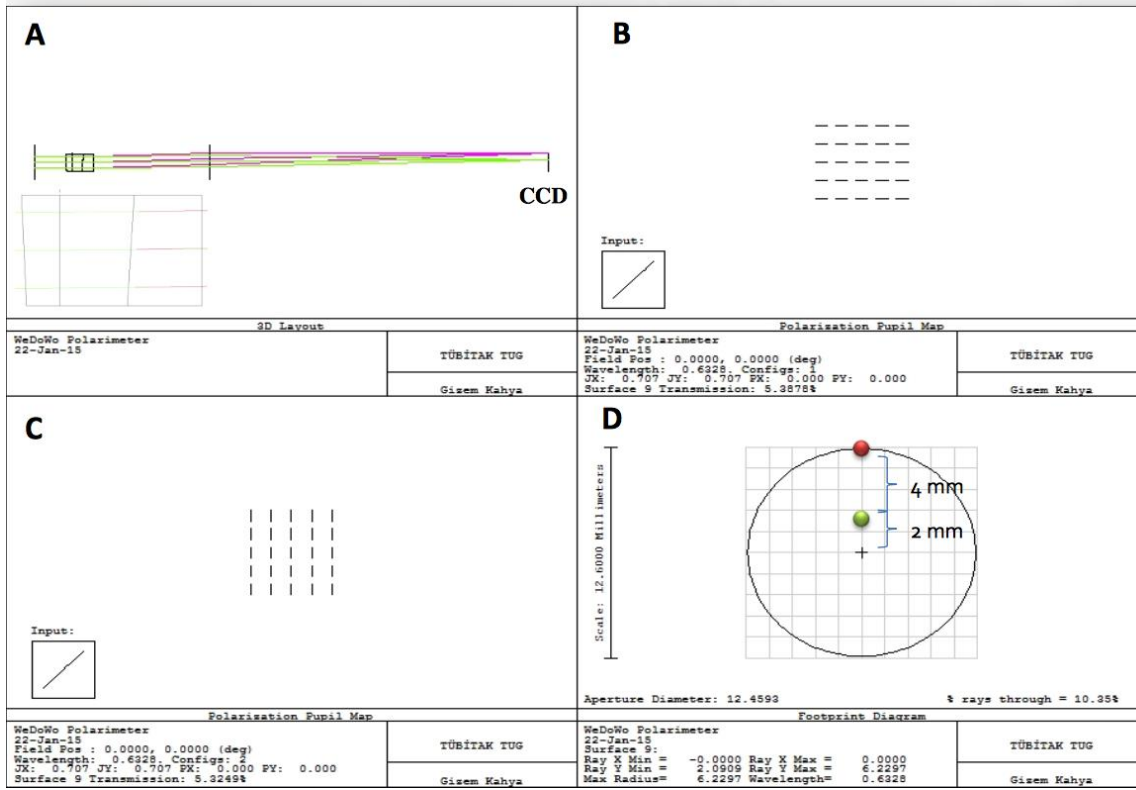


Şekil 3.27. WeDoWo'nun filtre tekerine eklenmiş hali

Tasarımda elde edilen dört görüntünün çakışmasını önlemek ve prizma arayüzündeki ışınların optik eksenin altına ve üstüne yayılması için 60" (yay-saniye) genişliğinde tasarlanan bir yarık kullanılmıştır (Helhel vd 2014). Şekil 3.28'de genel olarak WeDoWo'nun takılı bulunduğu sistem gösterilmektedir. Şekil 3.28'de soldan sırasıyla monte edilmiş halinin resmi, ortada WeDoWo tutucu ile en sağda TFOSC'ta WeDoWo'nun takılı bulunduğu RTT150 teleskobu görülmektedir.

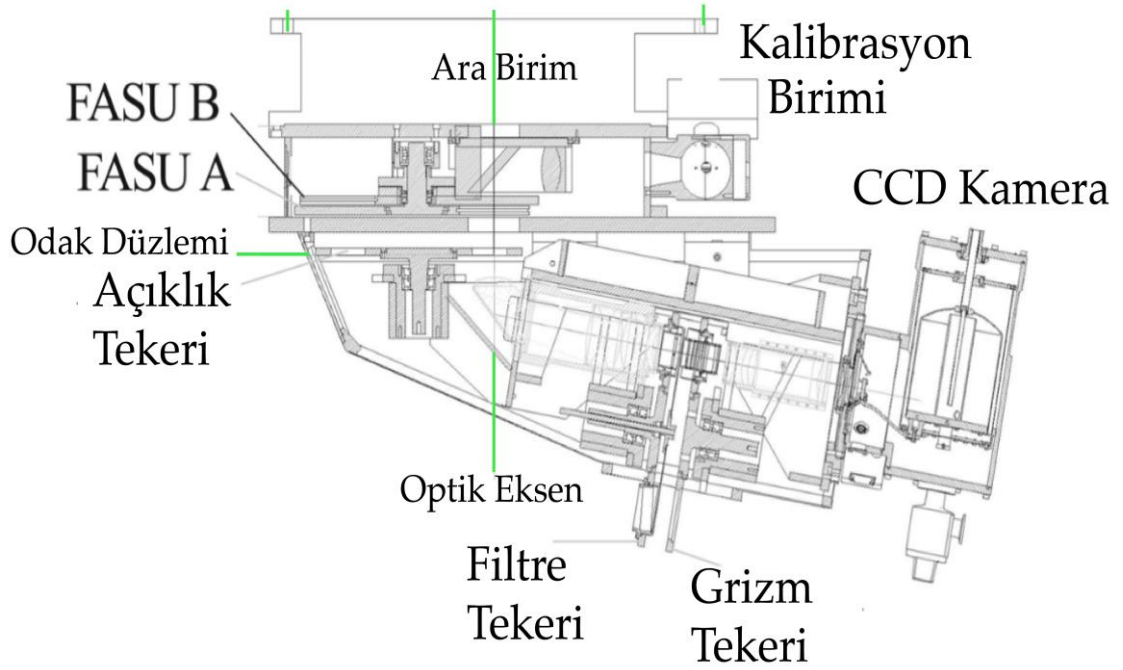


Şekil 3.28. WeDoWo'nun takılı bulunduğu sistem



Şekil 3.29. WeDoWo polarimetresinin ZEMAX'ta optik tasarım sonuçları

Oluşan görüntüler optik eksenin ± 2 mm ve ± 6 mm yukarısında/aşağısında oluşur. Oluşan bu dört ışının kutuplanma oranları optik eksenin üzerinde (0° , 90°) ve optik eksenin altında (45° , 135°)'dir. Şekil 3.29.A'da WeDoWo polarimetresinin optik tasarımında ışınların izlediği yol, B'de yatay kutuplanmanın analizi C'de dikey kutuplanmanın analizi ve D'de ise CCD üzerinde oluşacak görüntülerin konumları görülmektedir. Sanal testler başarılı olarak tamamlanmıştır ve istenen sonuçlar elde edilmiştir.

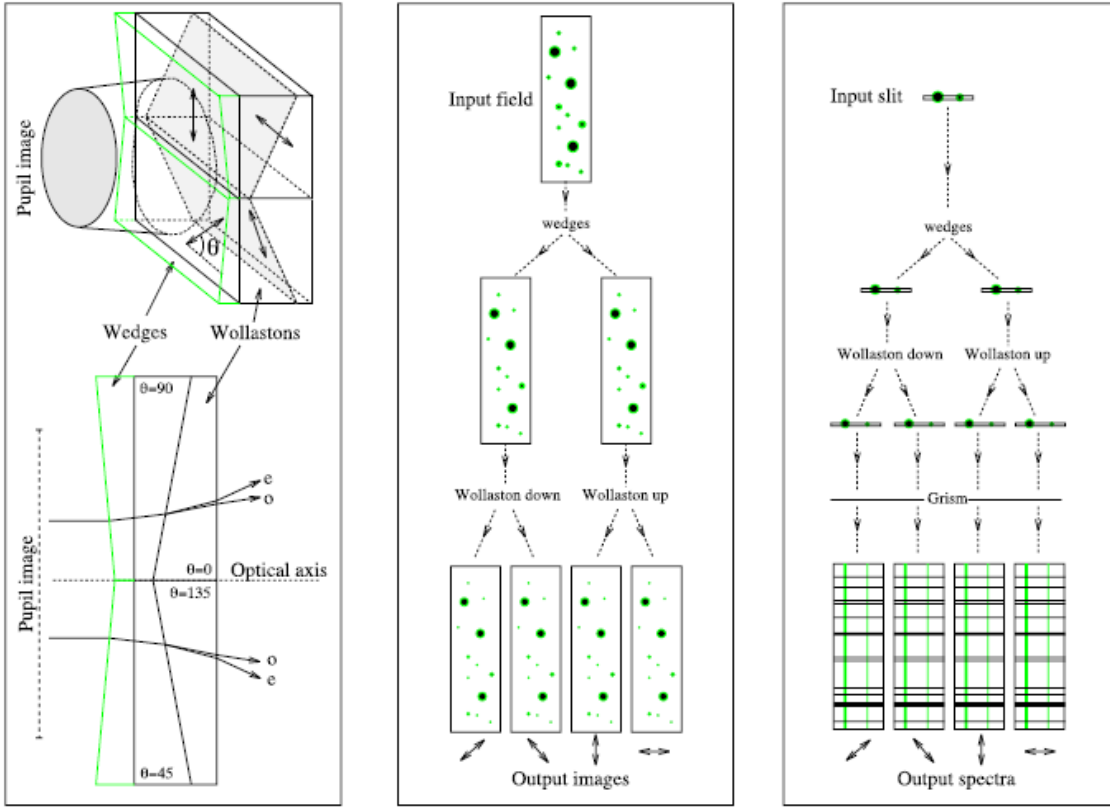


Şekil 3.30. TFOSC sisteminin optik şeması

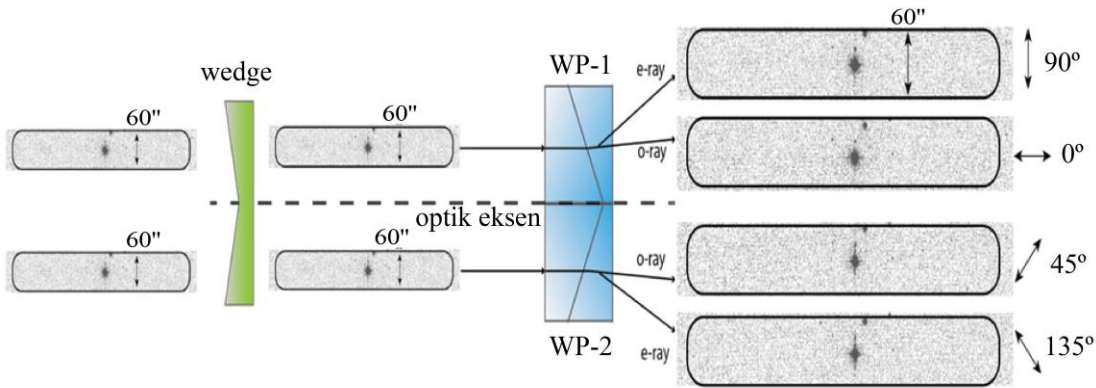
Şekil 3.30'da TFOSC sisteminin optik şeması görülmektedir. Sistemde teleskop odak düzleminde önce, FASU A ve FASU B olarak adlandırılan iki adet filtre tekeri ve kalibrasyon birimi bulunmaktadır. Odak düzleminde ise açıklık tekeri bulunmaktadır. Kolimator, filtre ve grizm tekerleri, CCD kamera TFOSC sisteminde bulunan diğer elemanlardır. CCD'nin kullandığı piksel formatı 2048x2048 piksel ve görüntü açısı oranı piksel başına 0,39 yay-sn'dir.

WeDoWo prizmasına giren ve çıkan ışınların izlediği optik yol şematik olarak solda gösterilmiştir (Şekil 3.31). Elde edilen dört görüntünün çakışmasını önlemek için ve prizma arayüzündeki tüm ışınların optik eksenin altında/üstünde yayılması için uygun takoz (wedge) açısı hesaplanır (Oliva 1996). Şekil 3.31'de merkezde, WeDoWo'nun bir gökyüzü alanında nasıl dört görüntü (0° , 90°) ve (45° , 135°)'lerde oluşturduğu tanıtılmaktadır. Şekil 3.31'in en sağında, WeDoWo'dan iki yıldızın polarize olmuş (0° , 90°) ve (45° , 135°)'lerde dört adet tayfı gösterilmektedir.

Stokes vektörünün ilk üç elemanı, eş zamanlı alınan verilerden herhangi bir $\lambda/2$ dönen parçaya ya da diğer hareketli parçalara gerek olmadan belirlenebilir (Oliva 1997). Tasarımın amacına uygun WeDoWo'nun çalışma prensibi Şekil 3.32'de gösterilmektedir.



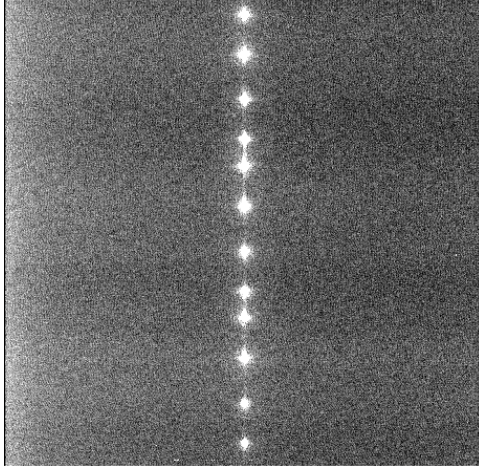
Şekil 3.31. WeDoWo sisteminin optik şeması



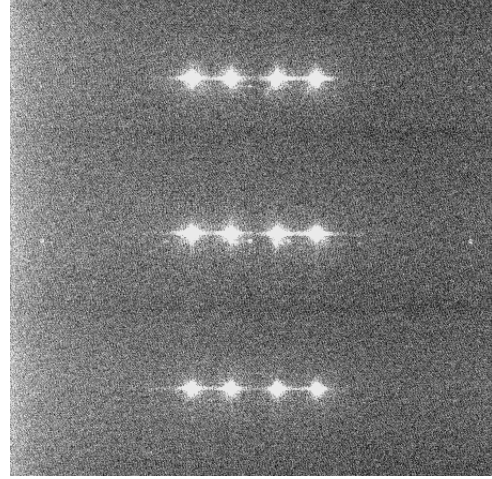
Şekil 3.32. TFOSC-WP sisteminin optik şeması

Kolimatörden gelen paralel gelen ışınlar takoz tarafından WP (Wollaston Prizması)-1 ve WP-2 prizmalarına uygun açılarda iletilir (Şekil 3.32). Wollaston prizmaları (WP'ler) ışık ışınlarını çift kırılma özelliğinden dolayı ikiye ayırır. Burada ışınlar, optik eksenin iki adet altında ve iki adet üstünde olmak üzere toplamda dört ışına ayrılır. Wollaston prizmalarının optik eksenleri birbirine 45° fark vardır. Şekil 3.32'de verildiği üzere TFOSC-WP (tasarlanan ürün) ile alınmış polarize olmayan BD+32d3739 isimli standart yıldızın V bandında 7 sn poz süresinde 23 Ağustos 2014 tarihinde alınmış görüntüsü görülmektedir.

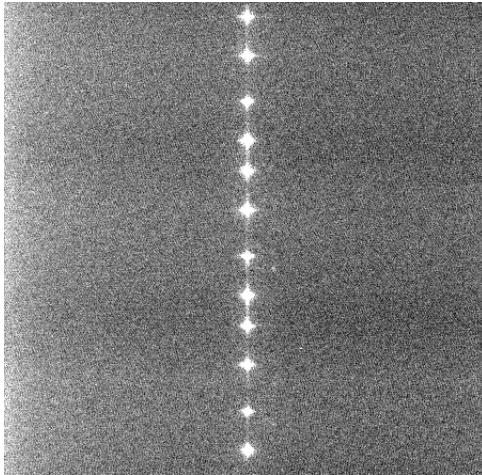
TFOSC-WP'nin kalibrasyonu amacıyla, sadece yıldız ışığını alabilmek için pinhole (iğne deliği) kullanılmıştır. WeDoWo ile kalibrasyon için alınan test görüntüleri Şekil 3.33, Şekil 3.34, Şekil 3.35, Şekil 3.36'da görülmektedir. Wollaston prizması 0° , 90° , 180° , 270° derecelerde döndürülerek BVRI bantlarında test görüntüleri alınmıştır. Bu şekilde optiğin iletim parametresi Bölüm 4.4.1'de verilen formülasyonlar kullanılarak hesaplanmıştır.



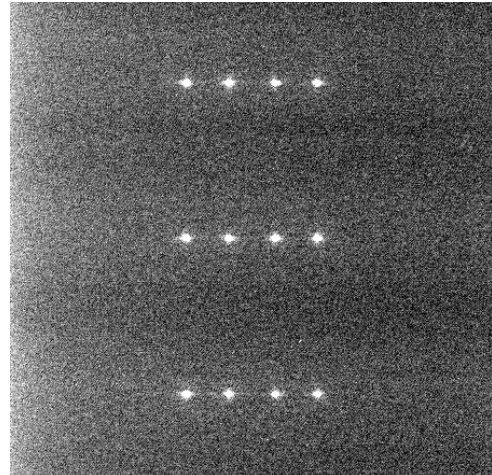
Şekil 3.33. 0° 'de pinhole ile alınmış test görüntüsü



Şekil 3.34. 90° 'de pinhole ile alınmış test görüntüsü



Şekil 3.35. 180° 'de pinhole ile alınmış test görüntüsü



Şekil 3.36. 270° 'de pinhole ile alınmış test görüntüsü

4. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde tasarlanan TFOSC-WP'nin takılı bulunduğu cihazlar hakkında genel bilgi verilmiştir. Mevcut sistemlerin optik ve mekanik limitlerinden kalibrasyon ve hata analizi konularından bahsedilmiştir.

4.1. Ölçme Düzeneği

Astronomik aynalı 150cm açıklıklı teleskop AZT-22, Kazan Devlet Üniversitesinin (KSU) siparişi üzere Leningrad Optik-Mekanik Birliğinde (LOMO) AZT-22 serisinin ikincisi olarak üretilmiştir. Birinci teleskop Moskova Devlet Üniversitesinin siparişi üzerine LOMO'da yapılmış ve 1990'lı yılların başında Özbekistan'da Yüksekdağlı Maidanak Gözleminde kurulmuştur. 1995 yılında KSU, Rus Bilimler Akademisi Uzay Araştırma Enstitüsü (İKİ) ve TÜBİTAK arasında 1,5m AZT-22 teleskobunun 20 yıllık ortak kullanımı hakkındaki anlaşma müzakere edilmiş ve imzalanmıştır. Gözlem zamanı, TÜBİTAK %55, KFU %35, İKİ %10 olmak üzere uluslararası projenin üyeleri arasında bölünmüştür. 1998 yılında teleskop, anlaşma çerçevesinde TÜBİTAK Ulusal Gözleminde (TUG) kurulmuştur. 2001 yılında adı AZT-22 iken ilk ışık alınmış ve aynı yıl Rus-Türk 1.5m teleskobu (RTT150) resmi adını almıştır. Ortak projenin tüm katılımcılarının çabalarıyla kurulan ve mevcut duruma getirilen RTT150'nin ekipmanlarıyla, astronomi ve astrofiziğin geniş çaplı sorularının çözümü için yüksek çözünürlüklü konumsal, fotometrik ve tayfsal gözlemlerin yapılması sağlanmaktadır (Khamitov vd 2012).



Şekil 4.1. Bakırlitepe TUG yerleşkesi ve RTT150 kubbe içi genel görünüm

4.1.1. RTT150

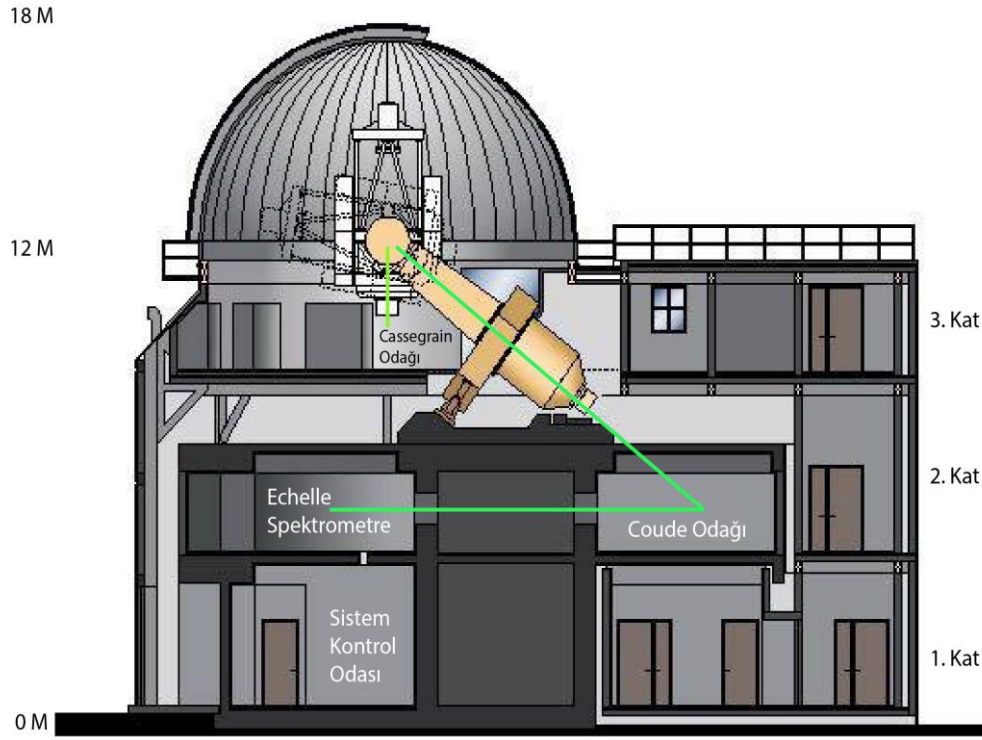
RTT150, Antalya şehrinin 50km kuzey-batısında bulunan Bakırlıtepe'deki TÜBİTAK Ulusal Gözleminde 2538,6 metre yükseklik ve $30^{\circ}19'59,9''E$ ve $36^{\circ}49'31,0''N$ koordinatında konumlandırılmıştır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2. TUG Bakırlıtepe yerleşkesinde bulunan bazı teleskoplar

TUG'un MPC (Minor Planet Center) veri tabanındaki kodu A84'tür. Teleskop binası üç katlı ve termos benzeri iki duvarlı bir yapıdadır (Şekil 4.2). Böylece dış duvar, teleskop temelinin gözlem zamanında rüzgâr yükünden ve gündüz aşırı ısınmadan korumaktadır. Ayrıca binanın içine konulan ekipmanlar için termostabil koşullar da sağlanmaktadır. Görüş kalitesini (Seeing) etkileyen yeryüzündeki türbülans etkisini azaltmak amacıyla teleskop temeli yerden 12m yüksekliğe çıkarılmıştır.

RTT150 teleskobu Ritchey-Chrétien optik sistemine sahiptir. Bilimsel ekipman için farklı çözünürlüklü Cassegrain odağı ($f/8$, $f/16$) ve Coude odağı ($f/48$) mevcut olup, Coude odağı kubbe odasının alt katındaki izole odaya indirilmiştir. Şekil 4.3'de teleskop binasının şeması görülmektedir. Şekil 4.4'te her iki odak için şematik ışın yolları gösterilmektedir. RTT150'de sıklıkla odak oranı $f/8$ ve $f/48$ olan odaklar kullanılmaktadır. Teleskop'un temel boyut özellikleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

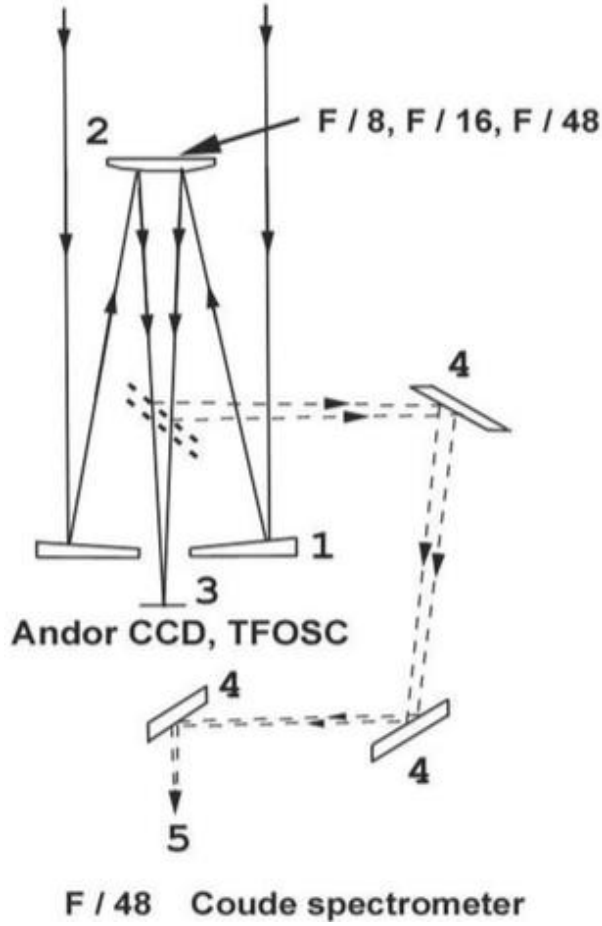
Şekil 4.3. RTT150 Teleskop binasının şeması⁹

Çizelge 4.1. RTT150 teleskobunun temel boyut ve özellikleri

Kurgu Türü:	Çatal Sistem (Equatorial)
Tüp Uzunluğu:	4970 mm
Ağırlığı:	37 ton
Ayna Çapı:	1500 mm
Ayna Merkezi Delik Çapı:	580 mm
Ayna Odak Oranı:	f/1,3
Ayna Ağırlığı:	970 kg
Ayna Kalınlığı:	24 cm
Ayna Taşıyıcı Ağırlığı:	2460 kg
Ayna Kaplaması:	Al +SiO ₂
Kubbe:	Observa-DOME
Çap:	10,5 m (Dış)
Yarıçap:	3,35 m

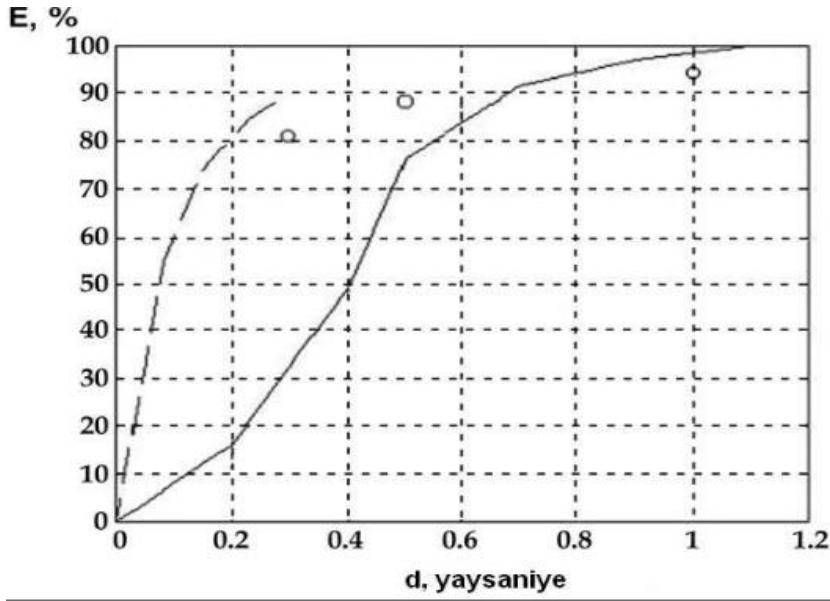
⁹ <http://www.gunarda.com.tr/Resimler/referanslar/150kesit.jpg>

Ana ayna ve ikincil aynaların karşılıklı optik ayarı Hartmann yöntemiyle yapılmıştır. İşlem sonucunda optik ayarın doğruluğu daire içindeki ışık demetinin enerji konsantrasyonu %50 seviyesinde 0,4 yay-sn'ye kadar getirilmiştir (Aslan vd, 2001). f/8 sisteminin enerji konsantrasyon fonksiyonu Şekil 4.5'te gösterilmektedir. Kesiksiz çizgi optik ayar sonucunda Hartmann yöntemiyle hesaplanan, daireler fabrikada yapılan denemelerden sonra elde edilen, kesikli çizgiler ise ideal optik sistem için teorik olarak hesaplanan sonuçlardır.



Şekil 4.4. Cassegrain ve Coude odaklarının optik ışın yolu

0,55''(yay-sn) çaplı dairede %80 enerji içerildiği Şekil 4.5'te görülmektedir. Bu parametreye göre RTT150 teleskobunun iyi sınıf teleskoplar arasında olduğu sonucuna varılır. Bakırlıtepedeki astronomik koşulların araştırılması sonucu görüş kalitesi için 1,2''(yay-sn) medyan değeri bulunmuştur. Ancak daha sonra DIMM (Differential Image Motion Monitor) aleti ile yapılan hassas araştırmalar parametrenin 0,8''(yay-sn) medyan değerinde olduğunu göstermiştir. Böylece teleskopta optikten kaynaklanan etki, nokta kaynağın görüntüsünün dağılımına sadece küçük bir miktar olarak eklenmektedir.



Şekil 4.5. f/8 sisteminin enerji konsantrasyon fonksiyonu grafiği

Çizelge 4.2. RTT150 teleskobunun optik özellikleri

Odak	Odak oranı	Odak uzaklığı (mm)	Odak ölçeği ("/mm)	Açısal görüş alanı (°)	Doğrusal görüş alanı (mm)
Cassegrain	f/7,7	11611	17,8	26,7	90
Coude	f/48	72257	2,9	3,83	80
Fotoelektrik Takip Teleskopu	f/10	3590	57	76	80
Görsel Takip Teleskopu	f/10	3590	57	76	80
Arayıcı (2 adet)	f/4,2	504	409	240	-

Çizelge 4.2’de RTT150’nin optik özellikleri ve Çizelge 4.3’te RTT150’nin sahip olduğu odak düzlemi aletleri verilmiştir.

Çizelge 4.3. RTT150 teleskobunun sahip olduğu odak düzlemi aletleri

Odak Düzlemi Aleti	CCD	Çözünürlük	Piksel Ölçeği (" / piksel)	Piksel boyutu (μ m)	Görüş Alanı	Görüntüleme	Tayf
TFOSC	Fairchild 447	2048x2048	0,39	15x15	13,3'x13,3'	Var	Var
COUDE	ANDOR DW 436	2048x2048	0,24	13,5x13,5	3,83'x3,83'	Yok	Var
Hızlı ANDOR	ANDOR iXon+	1024x1024	0,23	13x13	3,9'x3,9'	Var	Yok
DEFPOS	ANDOR iKON-L	2048x2048	2,9(" / mm)	13,5x13,5	3,83'x3,83'	Yok	Var

4.1.2. TFOSC (TUG Sönük Nesne Tayfçeker ve Kamerası)

TFOSC, 20 Nisan 2001'de imzalanan sözleşme çerçevesinde, Kopenhag Üniversitesi Gözlemevi (CUO) tarafından TUG için yapılmış ve Kasım 2004 'de teslim edilmiştir. Ancak RTT150'de TUG zamanının kısıtlı olması ve kış hava koşulları nedeniyle deneme gözlemleri ancak 8 Nisan 2005 tarihinde başlamıştır. TFOSC'un ilk ışık gecesinde ayrıca bir gama ışını patlamasının optik karşılığı gözlenmiş ve aynı gece bir "circular" yayınlanmıştır (GCN 3198). TFOSC, CUO tarafından üretilen FOSC (Faint Object Spectrograph and Camera) serisinin onuncusudur.

TFOSC, görüntüleme ve çeşitli çözünürlükte tayf alabilme özelliklerine sahiptir. Sistemin temel parçaları; kalibrasyon birimi, tayfölçer ve kamera olarak özetlenebilir. Tasarım olarak "Odak indirgeme Çarpanlı" olan sistem, RTT150 teleskobu için f/7,7 oranına göre tasarlanmıştır. İndirgeme oranı 0,58 olduğundan etkin görüntü alanı genişliği 13,6 yay-dakikasıdır.

1.5-2m sınıfı teleskoplar için ideal olan sistemin optik tasarımı FISBA, İsviçre; optik ağırları Richardson Grating Lab., ABD tarafından yapılmıştır. Çok amaçlı olan sistemle geniş alanda, çeşitli filtreler kullanılarak görüntü alınabilir. Gerek tek nesne gerekse görüntü alanındaki bir çok nesnenin tayfi aynı anda (Çok Nesneli Tayf) olmak üzere, değişik dalgaboyu ayırma gücü kullanarak tayf çalışılabilir. Tayfölçer düzeninde odak düzlemine yerleştirilmiş olan açıklık tekerleri yardımıyla 0,8-20 yay saniyesi genişlikte, giriş açıklığı o anki görüş durumu ve yapılması düşünülen gözlem çeşitine göre seçilir. İstenilen ayırma gücü ve bakılması düşünülen dalga boyu aralığı yine optik yol üzerinde olan iki adet tekerlek üzerinde yer alan çeşitli optik ağırlar (grizm) yardımıyla seçilerek poz süresi ayarlanır ve tayf CCD kamera üzerine kaydedilir. Görüntü çalışması düzeninde ise bu tekerleklerin açık olan konumları kullanılır. Her iki çalışma durumunda çalışılacak dalga boyu bölgesi filtre tekerlekleri üzerine yerleştirilmiş olan filtrelerle seçilebilir.

TFOSC temelde düşük ve orta dalga boyu ayırma gücü olan bir sistem olarak adlandırılabilir. Çeşitli ayırma güçleri için değişik optik ağırlar (grizm) kullanılmaktadır.

TFOSC tayföçer, iki adeti "Echelle" olmak üzere, dokuz grizmle mavi dalga boylarından kırmızıya kadar çeşitli ayırma güçlerinde çalışma imkanı sağlar. Ölçülen dalga boylarının sağlıklı ve doğru kalibrasyonu için dört adet tayf lambası ("hollow" katot, Fe/Ar ya da Cu/Ar, iki Osram tayf lambası (He ve Ne) ve bir halojen lamba) ile toplayıcı ve optik grubundan oluşan kalibrasyon birimi ikinci önemli birimdir.

TFOSC'un hem tayföçer tarafından kullanılan hem de görüntüleme düzeninin son önemli parçası CCD kameradır. Kamera, optik algılayıcı, gerekli kontrol elektroniği ve termos sisteminden oluşmaktadır. En önemli olan parça optik algılayıcı, 15x15 mikrometre ölçülerinde, 2048x2048 piksel formatında ve ön aydınlatmalı CCD yongadan oluşmaktadır. Astronomik amaçlarla kullanılan tipik algılayıcılarda olduğu gibi, en hassas olduğu dalga boylarında %95 dolayında kuantum etkinliğe sahiptir. Yani üzerine düşen 100 fotondan 95 tanesini yakalama özelliğindedir. Elektronik gürültünün azaltılabilmesi için termos içinde sıvı azotla soğutulmuş (-110°C, daha düşük sıcaklıklarda Silisyum yonga fonksiyon kaybına uğrar.) kullanılması gereklidir. 3x3 cm boyutlarındaki yonganın kalınlığıysa 18 μm 'dir. Yansımalara engel olmak ve optik etkinliğini artırmak için yapılmış olan kaplama (hafnium oksit) ise, mavi dalga boylarında daha etkin olarak tasarlanmıştır. Aletin bütün çalışması, filtre tekerleklerinin hareketi, optik ağırların seçimi ve kontrolü, tayf lambalarının kontrolü ve CCD elektroniğinin çalışmasıyla veri alınması uzaktan kontrollü olarak yapılabilmektedir¹⁰.

TFOSC Temel Özellikleri

RTT150 Cassegrain tayföçeri olan TFOSC'un kendisi ile süzgeç ve kalibrasyon birimi (KAB) olmak üzere iki parçadan oluşmaktadır. TFOSC'un indirgeme çarpanı 0,68'dir ve optiği Hindistan için yapılan en son alet HFOSC'un optiğine benzerdir. Bu tayföçerin iki çeşit işlevi vardır. Bunlar doğrudan görüntüleme ve Düşük/Orta çözünürlüklü tayf ölçümüdür. TFOSC'un bazı özellikleri ve parçaları aşağıda sıralanmıştır:

Dalgaboyu aralığı: 330 - 1200 nm

Odak indirgeme oranı: 0,68

Görüş alanı: 13,3' x 13,3'

Tayfsal çözünürlük: $R \sim 200 - 5000$ (normal ve "echelle" grismelerle)

TFOSC "odak indirgeme çarpanlı" bir alettir. Bu demektir ki (teleskopla aynı odak oranlı) kolimatör ve bir kamera kullanarak teleskobun etkin odak uzunluğu kısaltılabilir. Bunun iki temel üstünlüğü vardır:

- 1- Verilen bir alıcı ile daha geniş bir alan kapsanabilir.
- 2- Kolimatör ile kamera arasına yayıcı elementler yerleştirilebilir. Böylece alet hem doğrudan görüntüleyici, hem de tayföçer olarak kullanılabilir. Bir tekerleği çevirip paralel demet önüne bir grism getirerek, bir durumdan diğerine 20-30 saniye içinde geçilebilir. Tayföçümde "normal" grismelerle 200 ile 2500 arasında, "echelle" grismelerle 4500 yöresinde çözünürlük elde edilebilir.

¹⁰ <http://tug.tubitak.gov.tr/teleskoplar/tfosc>, 17.11.2015.

Optik: Bu aletler temel olarak iki çeşittir. Birinde TFOSC'ta olduğu gibi odakta hemen sonra ışık demeti 100° bükülür, diğerinde ise optik yol doğru çizgidedir. FOSC serisinin yalnız ikisinin optik yolu doğru çizgidedir.

Mekanik: Üzerinde kolimatör ve kameranın bağlandığı bir optik tezgah var. Bu masaya ayrıca üç tekerlek bağlıdır. Bunlar, odak düzleminde, kolimatörün önünde açıklık tekerleği, kolimatör ile kamera arasında paralel ışın demeti önünde bir süzgeç tekerleği bir de grism tekerleğidir. Bu son iki tekerlek arasında dönen bir kapak (shutter) var. Kamera, aletin son bağlantı flanşı etrafında döndürülebilir. Üç tekerleğin dış çemberleri dişli, bir step motor tarafından daha küçük dişli aracılığı ile çevrilmektedir. Ayrıca tekerleklere bir "ön yük" verilmiştir. Bu sayede tekerleğin ışın demetinde olan kısmını 5 mikron kadar bir duyarlılıkla ayarlamak olasıdır.

Elektronik: Üç tekerleğin döndürülmesi, kapak ve kameranın hareketi ayrı step motorları ile yönetilir. Her fonksiyon farklı ve özdeş elektronik kartlar tarafından kontrol edilir, birbirine bağlantılıdır ve standart seri port (RS232) üzerinden bir PC ile yönetilmektedir.

Kolimatör ve CCD kameranın yerleştirildiği optik bölüm: Bu bölümde FASUA ve FASUB adında, ışınların paralel gelmediği iki adet beşer yuvalı filtre tekerleği, sekiz yuvalı açıklık tekerleği, paralel ışınların geldiği sekiz yuvalı süzgeç tekerleği, sekiz yuvalı grism tekerleği, altı adet uzun yarı, (39, 44, 54, 67, 100 ve 134 mikron) bulunmaktadır.

KAB - Süzgeç ve Kalibrasyon Birimi: TFOSC içindeki bu birim (KAB) iki bölümden oluşmaktadır. İlki, FASUA ve FASUB adlarında beşer yuvalı süzgeç tekerlekleridir. Bu tekerleklere 51-60 mm arasında dairesel veya 50x50 mm'lik kare süzgeçler takılabilir. Teleskoptan gelerek bu süzgeçlerden geçen ışınlar paralel değildir. Diğer bölüm, tayf kalibrasyonu için kullanılan altı adet lamba (Halogen, Ne, He ve Fe-Ar ve Th/Ar) ve aktarma optikleridir. Çizelge 4.4'te FOSC serisine ait standart listeden alınan özellikler yer almaktadır.

Çizelge 4.4. TFOSC'da kullanılacak optik ağılar

Grism (optik ağı)	Order	Yayıma Sayısı	Çözünürlük	Dalgaboyu Aralığı (Å)	Delta Lambda	Bölge
7	1	107	1331	4300-6250	4,1	Görsel
8	1	88	2189	6200-7850	3,0	Kırmızı
9	6-18	25	5099	3350-9400	1,2	Echelle
10	1	456	228	3300-6400	17,0	Mavi
11	1	341	392	4000-7600	13,0	Görsel
12	1	913	205	5300-10200	37,0	Kırmızı
14	2	94	1337	3270-6120	5,4	Mavi
15	2	211	749	3230-9120	12,0	Mavi-Görsel
17	2	93	2659	6500-12000	3,5	Kırmızı

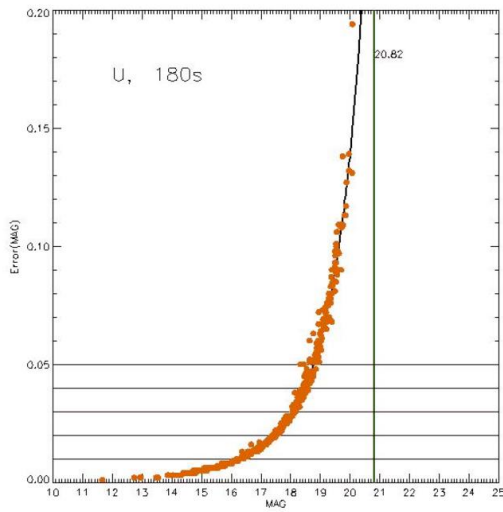
Süzgeçler: TFOSC'ta 60mm çaplı yuvarlak veya 50x50mm kare süzgeçler kullanılabilir.

CCD Kamera: TFOSC'ta kullanılan CCD arkadan aydınlatmalı Fairchild 447 yongasına sahiptir. CCD kamera sıvı azot ile soğutulmaktadır. Genel özellikler Çizelge 4.5'te verilmiştir.

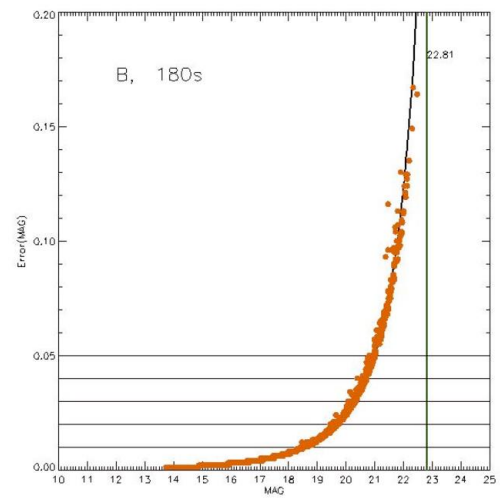
Çizelge 4.5. TFOSC’da kullanılan CCD kameranın özellikleri

Piksel formatı	: 2048 x 2048 piksel	
Piksel boyutu	: 15 x 15 μm	
Piksel ölçeği	: 0,39 "/piksel	
Görüş alanı	: 13,3' x 13,3'	
Kazanç	: 1,34 e^-/ADU (High, Amp. A)	5,02 e^-/ADU (Low, Amp. A)
	: 1,35 e^-/ADU (High, Amp. B)	5,06 e^-/ADU (Low, Amp. B)
Okuma gürültüsü	: 5,1 e^- (High gain, Amp. A)	7,6 e^- (Low gain, Amp. A)
	: 5,3 e^- (High gain, Amp. B)	7,8 e^- (Low gain, Amp. B)

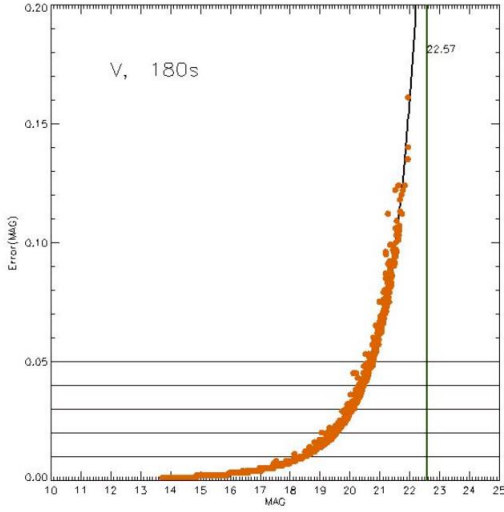
Parlaklık Limitleri, Poz Süreleri: Yapılan test gözlemlerinin değerlendirilmesi sonrasında UBVR süzgeçlerinde ulaşılan parlaklıklar, poz süresi ve hata limitleri aşağıda verilmiştir. 180 sn poz süresinde ulaşılan "Parlaklık-Hata" grafikleri sırasıyla U, B, V, R için Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8 ile verilmiştir.



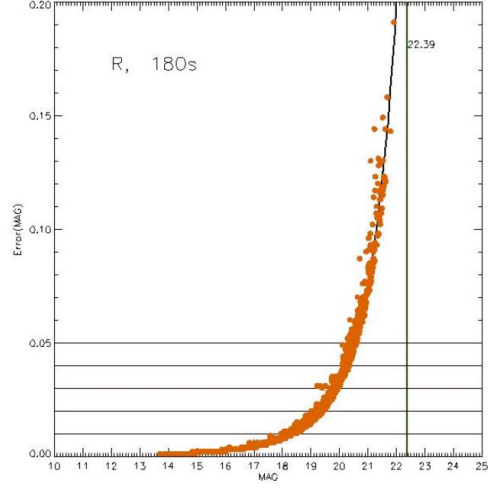
Şekil 4.6. U bandı



Şekil 4.7. B bandı

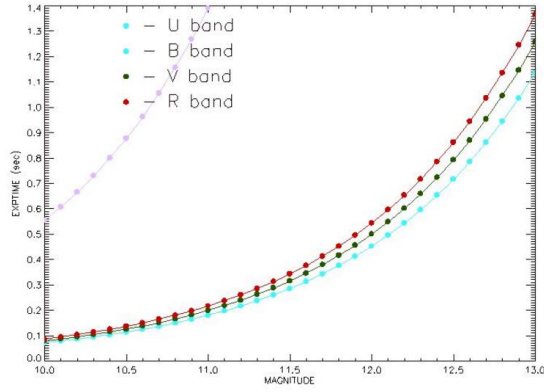


Şekil 4.8. V bandı

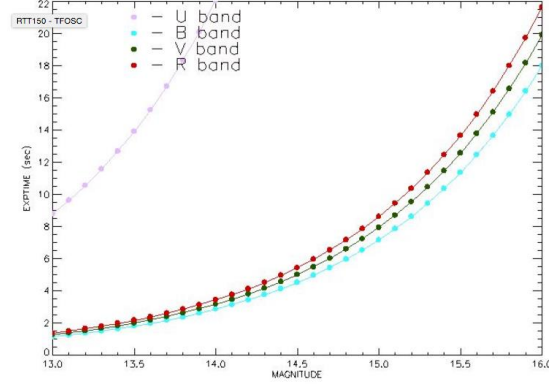


Şekil 4.9. R bandı

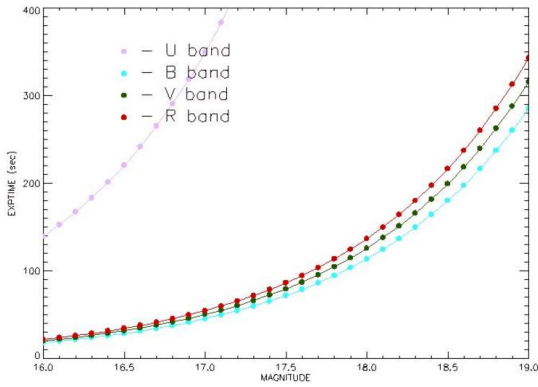
Poz Süresi – Parlaklık grafikleri Şekil 4.10, Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 ile sırasıyla (0-14 sn), (0-22sn), (0-400sn) olarak verilmiştir.



Şekil 4.10. 0 - 14 sn



Şekil 4.11. 0 - 22 sn



Şekil 4.12. 0 - 400 sn

Tayf Lambaları: Çizelge 4.6'da RTT150'de mevcut olan tayf lambaları ve özellikleri listelenmiştir. Halojen: Düz alan için, He: Dalgaboyu kalibrasyonu için, Ne: Dalgaboyu kalibrasyonu için, Fe-Ar: Dalgaboyu kalibrasyonu için, Th-Ar: Dalgaboyu kalibrasyonu için kullanılır. Wollaston prizmasının optik testleri sırasında Halojen lamba kullanılmıştır.

Çizelge 4.6. TFOSC'da kullanılan kalibrasyon tayf lambları ve özellikleri

Lamba Tipi	Üretici Firma	Lamba Kodu	Merkezi Dalgaboyu
Halogen	OSRAM	Halostar-64415 (12 V, 10 W)	-
He	OSRAM	He/10 (60 V, 55 W)	-
Ne	OSRAM	Ne/10 (30 V, 30 W)	-
Fe-Ar	Säntis Analytical	SAP826	248,3 nm
Th-Ar	Säntis Analytical	SAP858	371,9 nm

Görüntüleme ve Tayfçeker birimi: Açıklık, filtre ve grizm tekerlekleri yardımı ile istenen kombinasyonda gözlem yapılabilir. Tekerleklerin konumları ve odaklama uzaktan kontrol edilmektedir.

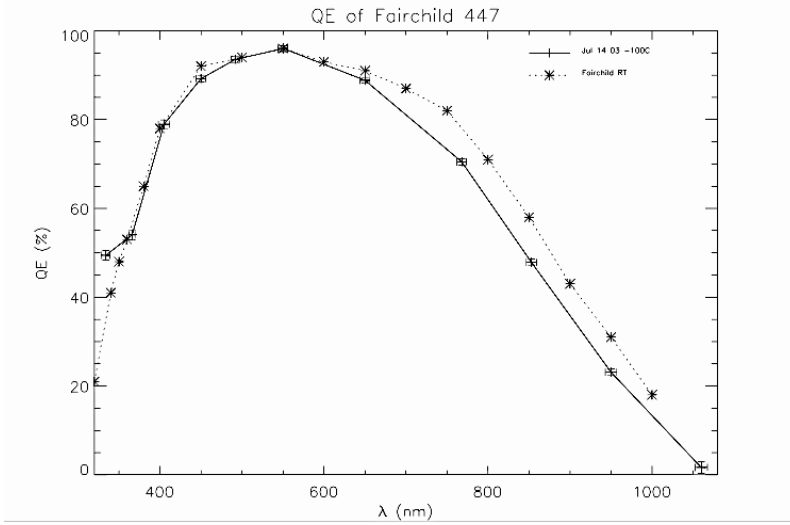
Kalibrasyon Birimi: Teleskop ve TFOSC arasına konumlanmış olan bu birimde beş konumlu iki filtre tekerleği; Fe/Ar, He, Ne ve halojen lambalardan oluşan tayf lambaları, toplayıcı küre ve gerekli güç kaynakları vardır. Bütün fonksiyonlar bilgisayar kontrollü olarak çalışmaktadır.

4.1.3. CCD Kamera

Kuantum verimliliği (QE): Pratik olarak CCD aktif alanındaki bir piksel üzerine düşen fotonların kaç tanesinin elektrona dönüştüğüdür. Her aktif pikselin dalga boyu duyarlılığı farklı olduğundan $QE(\lambda)$ cinsinden ifade edilmelidir.

TFOSC'da kullanılan Fairchild 447 marka CCD'nin kuantum etkinliği Şekil 4.13'te verilmiştir¹¹. Grafiğe göre CCD'nin maksimum kuantum etkinliği 550 nm'de %95 civarındadır. Buna göre CCD üzerindeki bir piksele birim zamanda 100 foton düşerse, CCD bunun 95'ini algılayabilecek kapasitededir.

¹¹ http://www.tug.tubitak.gov.tr/images/rtt150/tfosc/fair447_e7256w4d5.pdf, 28.06.2015.



Şekil 4.13. -100° C'de dalgaboyuna karşı kuantum etkinliğinin grafiği

Okuma gürültüsü: Yükselteç devrelerinin sahip olduğu hatadır.

Kazanç: CCD'nin verimliliğinin ölçüsüdür. Herbir piksel elementi elektron toplar. Bu elektronlar daha sonra yayılır ve analog-dijital çevirme işlemi yoluyla sayısal değere çevirilir. Sayımın en ufak birimi ADU (Analogtan Digitale Birim) olarak adlandırılır. Kazanç, her ADU'daki elektron sayısının miktarıdır. Genel olarak, düşük kazanç, daha iyi sistem demektir. CCD'nin verimliliği, sistemin toplam kuyu derinliğine bağlıdır. Sistemin kuyu derinliği, pikselin tamamen dolmadan önceki kaldırabileceği toplam elektron miktarıdır. Şayet kuyu derinliği A'dan D'ye olan çevrim kazancından daha büyükse, mikrodevrenin kullanılabilir duyarlılığında kayıp olur.

Sinyal/Gürültü Oranı: Bir CCD pikseli için sinyal/gürültü oranıdır. Denklem 4.1'deki gibi hesaplanabilir.

$$S/G = \frac{qI}{\sqrt{qI + R}} \quad (4.1)$$

Burada q ilgili dalga boyunda QE , I poz süresi içinde piksel üzerine düşen toplam fotonlar (Intensity), R ise okuma gürültüsüdür (rms). Normal olarak toplam fotonların istatistiğinin "Poisson" olarak düşünüldüğünde I için belirsizlik karekök kadar olur ve kuvvetli kaynaklar için R ihmal edilebilir.

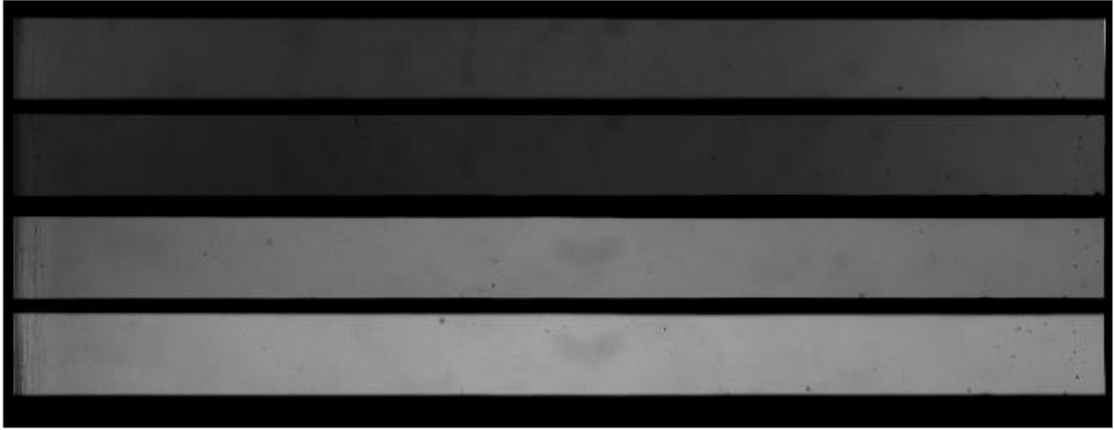
Bias: Elektronik gürültünün anlaşılması için sıfır saniye poz süreli okumadır. Bir CCD dedektörü üzerine hiçbir ışık düşmese dahi elektron üretir. Bu elektronların bir kısmı poz süresi boyunca poz süresi boyunca üretilirken bir kısmı ise sürekli olarak her pikselde yer alır.

Dark: CCD ile görüntü alınırken verilen poz süresi boyunca sistemin sıcaklığından dolayı bazı elektronlar termal olarak uyartılır. Bu elektronlar kara akım adı verilen ve

görüntülerde istenmeyen bir gürültünün kaynağıdır. Kara akım sistemin sıcaklığına oldukça duyarlıdır. Bu nedenle astronomi amaçlı kullanılan CCD'ler çok iyi soğutulur.

Flat: Bütün CCD dedektörlerde her piksel, üzerine düşen fotona farklı cevap verir. Yani bir CCD dedektörün üzerine düşen ışığa verdiği cevap dedektör yüzeyi boyunca aynı olmaz. CCD dedektörün yüzüğü boyunca bir pikselden diğerine küçük sapmalar olduğu gibi, CCD'nin bir bölgesinden diğerine daha büyük sapmalarla genellikle karşılaşılır.

Şekil 4.14'te TFOSC-WP ile alınmış örnek polarimetrik flat görüntüsü görülmektedir. Görüntü 23.04.2015 tarihinde alınmıştır.



Şekil 4.14. TFOSC CCD'si ile alınmış örnek polarimetrik flat görüntüsü

4.2 Mevcut Sistemin Yetenekleri ve Sınırlamaları

4.2.1 RTT150'nin Limitleri ve Hassasiyeti

Mekanik Sınırlar: Antalya'nın enlemi yaklaşık 37° 'dir. Bulunulan enlem sebebiyle gökyüzünün bir kısmını göremediğimiz için deklinasyonu $-35^\circ \leq DEC \leq 90^\circ$ arasındaki koordinattaki gök cisimlerinin gözlemi yapılmaktadır.

Limit seviyede yapılan sönük kaynakların fotometrik ve spektroskopik gözlemlerinde görüş en önemli parametrelerden biridir. S/G oranı bu parametreyle ters orantılıdır. Hali hazırda uzun poz sürelerinde ışık kaynağını yarıktan tutmak amacıyla veya direkt görüntüleme derin alanları elde etmek için teleskopta odak düzlemindeki ofsetli izleyici kullanılmaktadır. Teleskop konumunun düzeltilmesi 10 saniyede bir kez teleskobun mekanik yapısının döndürülmesi yoluyla yapılmaktadır. Daha sık düzeltmeler teleskop kurgu yapısının özelliği dolayısıyla mümkün değildir. Yapının salınım öz frekansı yaklaşık 1Hz'dir. İzleyicinin CCD'den sinyali okuma süresi 0,4 saniye civarındadır. Böylece, TFOSC izleyici sistemine adaptif düz-paralel plakasının (tip-tilt plate) eklenmesi takip yıldızının yüksek frekanslı sapmalarını 1 Hz kadar düzeltme imkânı vermektedir. İzleyicinin mevcut CCD'sinin daha hızlı bir CCD ile

değiştirilmesi ise atmosferden kaynaklanan daha yüksek frekanslı sapmaların düzelmesini sağlar. Ayrıca, adaptif plakanın kullanması teleskobun hedefine gelme zamanını etkin biçimde kısaltır. Mekanik yönlendirmenin hataları iki koordinatta da 30'' (yay-sn) kadardır. Birinci yönlendirmeden ve alanı tanımlamadan sonra basitçe plakaya eğim verilerek bu hataları düzeltmek mümkündür.

2011 yılında 1.5m RTT150 teleskobun gözlem düzeneğine verilen bir yörüngeyi takip etme özelliği eklenmiştir. Bu, öz hareketi yüksek olan gök cisimlerini minimum sinyal kaybı ile uzun poz sürelerinde izleme imkanı vermektedir ve özellikle Dünya'ya yaklaşan asteroidlerin takibi bakımından önemlidir. Şuana kadar en hızlı kaynağın öz hareketi için 200''/saat hızında verilen yönde takip (VYT) yapılmıştır.

Meteorolojik sınırlar: 2500m yükseklikteki Bakırlıtepe yerleşkesinde bulunan teleskopların olası kötü hava koşullarından korunmalarını sağlamak amacıyla meteorolojik gözlem limitleri vardır. Gözlem yapabilmesi için nem değerinin %85'ten ve rüzgar hızının 40km/saat'ten az olması gerekmektedir.

Optik sınırlar: Teleskobun günümüzdeki aletleri konumsal, fotometrik ve tayfsal gözlemlerde aşağıdaki limitlere ve hassasiyetlere ulaşılmasını sağlamaktadır (Khamitov vd 2015).

Astrometri (ANDOR, TFOSC): 0,05 – 0,10 yay-saniye hassasiyet.

Fotometri (TFOSC, ANDOR): 1 saat poz süresinde R bandında 23-24^m'e inebilme.

Spektroskopi:

- TFOSC uzun yarıklı; 1 saat poz süresinde 18^m'e kadar gök adaların kırmızıya kaymasının belirlenmesi.
- 16 Kadir'e kadar asteroid taksonomisi elde edilmesi.

CCD sınırları: TFOSC'ta kullanılan CCD, arkadan aydınlatmalı FairChild 447 yongasına sahiptir. CCD kamera sıvı azot ile soğutulmaktadır. RTT150-TFOSC'ta kullanılan dedektör: Marconi, 4042 arkadan aydınlatmalı, 2048x2048 çözünürlükte ve piksel boyutu 13,5x13,5 μ 'dur. TFOSC sisteminin CCD kamerasının okuma gürültüsü 5,3e⁻⁶'ye ulaşabilmektedir. Spektroskopide kullanılan holografik ızgaraların kuantum etkinliği, TFOSC'ta kullanılan prizmaların parametresini birkaç kere aşmaktadır. CCD kamerasının değiştirilmesi ve yayıcı ünite olarak holografik ızgarasının kullanılması spektroskopide kaynakların limit değerlerinin 2^m kadar iyileştirilmesini sağlamaktadır.

4.3. Ölçme Yöntemi

Polarimetrik gözlemler ve geliştirilen cihazın kalibrasyonu için standart yıldız listesi ve uygun gözlem kaynaklarının listesi literatür taranarak hazırlanmıştır. TUG'dan bu tez için 2014B ve 2015A dönemlerinde gözlem zamanı istenmiştir. Çalışma 14BRTT150-665 numarası ile, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG) akademik kurulunca onaylanmıştır. TUG Bakırlitepe yerleşkesine tahsis edilen gözlem zamanlarında çıkmıştır. Gözlem sorumlularının ve teknik personelin de desteği ile TFOSC-WP polarimetresinin test gözlemleri ve TFOSC-WP ile standart yıldız, asteroit gözlemleri sorunsuz bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

4.3.1. Gözleme Hazırlık Aşaması

Polarimetrik gözlemler için RTT150 ve TFOSC, Güneş batmadan önce, gözlem sorumlusu ve teknik personel tarafından gözleme hazır hale getirilir. Misafir gözlemci ve gözlem sorumlusu, o geceki gözlem programına göre gözlemlenecek kaynakların bir listesi çıkarır ve bir gözlem programı oluşturur. Gözlemlere temel düzey (bias) ve düz alan (flat) alınarak başlanır. Gözlemler sırasında teleskobun zarar görmemesi için bazı limitler vardır. Rüzgar için bu limit değeri 40 km/saat iken, nem değerinde limit %85'tir. Güneş battıktan sonra teleskop, akşam flat'ının alınması için doğu yönüne çevrilir. Gece boyunca alınacak bilimsel görüntüler üzerindeki düz alan hatalarının giderilmesi için bir dizi flat görüntüsü alınır. Alınan bu görüntüler daha sonra medyan veya aritmetik ortalama gibi filtreler ile birleştirilir ve master_flat görüntüsü oluşturulur. Düz alan düzeltilmesi dalga boyunun bir fonksiyonu olduğu için düz alan görüntüleri gözlem yapılan her filtrede, CCD tam doyuma ulaşmayacak bir sayım değerinde alınır. Düz alan görüntülerinin alınması bittikten sonra bir dizi bias görüntüsü alınır. Akşam Tanının bitmesi ile birlikte gözleme başlanır. Polarimetrik gözlemler için bir gözlem kılavuzu bu çalışmaya ek olarak hazırlanmıştır. Bu kılavuz Ek-2'de verilmektedir. Temelde yıldız ile asteroit gözlemleri aynıdır. Tek fark, asteroitler Güneş sisteminin bir üyesi olduğundan günlük harekete ek farklı hızlarda hareket etmeleridir. RTT150 teleskobunun bu tür cisimleri takip edebilme yeteneği mevcuttur. Bu özellik kullanılarak günlük harekete ($\sim 15,04''/\text{sn}$) ek $\pm 200''/\text{saat}$ varan hızlarda asteroit gözlemleri gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de sırasıyla V-bandında gözlenebilecek güçlü polarize ve polarize olmayan standart yıldızların listesi, TUG'da gözlenebilecek limitlerde olanlar seçilerek verilmiştir (Turnshek vd 1990). Çizelgelerde, RA: yıldızın sağ açıklık değeri, DEC: yıldızın deklinasyon (dik açıklık) değeri, Mag: yıldızın parlaklığı, Sp: yıldızın spektral sınıf, Pol: yıldızın kutuplanma değerini, PA: yıldızın kutuplanma açısını ifade etmektedir. BVRI filtrelerinde yapılan gözlemlerdeki poz süreleri de Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Standart yıldızları seçerken dikkat edilen parametreler; parlaklık, deklinasyon ($\text{DEC}=\delta$), sağ açıklık ($\text{RA}=\alpha$) ve yıldızların polarizasyon değerleridir. Teleskobun optik limitleri dikkate alınarak parlaklığı 8^m ile 17^m 'ye kadar olan yıldızlar; teleskobun coğrafi enlem değerine göre deklinasyon ve gözlemi yapılacak güne göre de sağ açıklık değerleri dikkate alınarak standart yıldızlar belirlenmiştir (Şekil 4.10). Sağ açıklık değeri $0 \leq \alpha \leq 24$ ve deklinasyon değeri $-35^0 \leq \delta \leq 90^0$ olmalıdır.

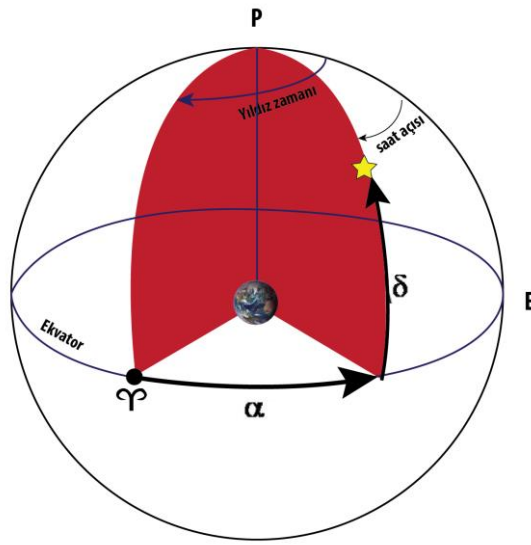
Çizelge 4.7. V-banında gözlenebilecek güçlü polarize standart yıldızlar

Yıldız	RA	DEC	Mag	Sp	Pol. (%)	PA (derece)	B	V	R	I
BD+64d106	00 57 36.7	+64 51 27	10,3	B1V	5,69±0,04	96,6±0,2	60	20	15	10
HD 236633	01 09 12.34	+60 37 40.92	9,18		5,485±0,016	93,76±0,08				
BD+59d389	02 02 42.1	+60 15 27	9,1	F0Ib	6,70±0,2	98,1±0,1				
HD236954	02 13 37.34	+59 10 14.80	9,42		5,790±0,099	111,20±0,49				
HD19820	03 14 05.4	+59 33 48	7,1	O9IV	4,82±0,03	115,4±0,3				
HD25443	04 06 08.1	+62 06 07	6,8	B0III	5,15±0,03	135,1±0,2				
BD+25d727	04 44 24.90	+25 31 42.7	9,5	A2III	4,258±0,012	33,8				
HD245310	05 36 23.01	+21 11 11.45	8,96		3,495±0,056	147,61±0,46				
HD251204	06 05 05.7	+23 23 38.9	10,2	B0IV	4,04±0,066	147				
HD43384	06 16 58.7	+23 44 27	6,3	B3Ib	2,94±0,04	169,8±0,7				
<i>o</i> Sco	16 20 38.20	-24 10 10.3	4,57	A5II	4,162±0,008	32,9				
HD154445	17 05 32.2	-00 53 32	5,6	B1V	3,67±0,05	88,6±0,7				
HD155197	17 10 15.6	-04.50 03	9,2	A0	4,38±0,03	103,2	20	10	5	5
HD155528	17 12 19.94	-04 24 09.26	9,62		4,986±0,064	92,61±0,37	30	15	15	10
HD 161056	17 43 47.0	-07 04 46	6,32	B1 5V	4,00±0,01	66,3±0,3	1	0,5	0,4	0,5
HD 183143	19 27 26.56	+18 17 45.19	6,92		4,951±0,068	178,51±0,39	2	0,5	0,4	0,3
Hiltner 960	20 23 28.4	+39 20 56	10,6	B0V	5,66±0,02	54,8±0,1	40	20	8	5
VI Cyg #12	20 32 40.9	+41 14 26	11,5	B5Ia	8,95±0,09	115,0±0,3	-	60	7	1
HD 204827	21 28 57.7	+58 44 24	7,93	B0V	5,34±0,02	58,7±0,4	5	2	1	0,5

Çizelge 4.8. Polarize olmayan standart yıldızlar

Yıldız	RA	DEC	Mag	Sp	Pol. (%)	PA (derece)	B	V	R	I
HD 12021	01 57 56.1	-02 05 58	8,9	B7	0,08±0,02	160,1	10	5	5	5
HD 14069	02 16 45.2	+07 41 11	9	A0	0,02±0,02	156,6	6	5	3	3
G191B2B	05 05 30.6	+52 49 54	11,8	DA1	0,06±0,04	147,7		30	30	
HD64299	07 52 25.55	-23 17 45.9	10,1	A2V	0,151±0,032					
HD 94851	10 56 44.2	-20 39 52	9,2	B9	0,06±0,02	--				
GD 319	12 50 04.5	+55 06 03	12,3	DA	0,09±0,09	140,2	20	30	30	30
Gamma boo	14 32 04.7	+38 18 30	3	A7III	0,07±0,02	21,3				
BD+33 2642	15 51 59.89	+32 56 54.32	10,8		0,231±0,031	12,67				
HD 154892	17 07 41.4	+15 12 38	8	F8V	0,05±0,03	--	4	1,5	1,5	1,5
BD+32d3739	20 12 02.1	+32 47 44	9,3	A6V	0,03±0,02	35,8	10	7	7	7
BD +28d4211	21 51 11.1	+28 51 52	10,5	Op	0,05±0,03	54,2	25	20	20	20
HD 212311	22 21 58.6	+56 31 53	8,1	A0V	0,03±0,02	51,0	4	2	2	2

Yıldız zamanı (Sidereal Time): Yıldızların görünen hareketleri esas alınarak ölçülen zamandır. Ortak zaman, yerel meridyene bağlı olarak Güneş'in konumuna göre belirlenir. Güneş yerel meridyene döndüğü zaman bir gün geçer. Dünya, Güneş çevresinde döner. Fakat meridyen üzerindeki Güneş sistemine ait olmayan uzak cisimler, yıldızlar, galaksiler vb. gibi gök cisimlerinin tekrar meridyene dönmesi bir günden az sürmektedir. Dünya gerçekte bir turunu yirmi dört saatte tamamlamaz. Dönme süresi yaklaşık 23 saat 56 dk 4sn'dir. Bu zamana uyan bir saat yapmak zor olduğu için ortalama Güneş zamanı kullanılmaktadır (24 saat). Bir yıldız zamanı 23 saat 56 dk 4 sn'dir. Şekil 4.15'te kutup noktası 'P', ekvator düzlemi 'E', sağ açıklık ' α ', deklinasyon ' δ ' ve koç noktasını 'Y' ile gösterilmektedir.



α : Sağ açıklık E : Ekvator düzlemi
 δ : Dik açıklık P : Kutup noktası
 φ : Koç noktası

Şekil 4.15. Ekvatoryal koordinat sistemi ve yıldız zamanının gösterimi

Koordinat Sistemleri: En yaygın kullanılan koordinat sistemleri aşağıdaki Çizelge 4.9'da verilmektedir.

Çizelge 4.9. Astronomide yaygın kullanılan koordinat sistemleri

Sistem	Referans Düzlemi	Referans Doğrultusu	Enlem koordinatı	Boylam koordinatı
Ufuk	Ufuk düzlemi	Kuzey	Yükseklik (h)	Azimut (A)
Ekvatorial	Gök ekvatoru	İlkbahar Ekinoksu	Deklinaşyon (δ ya da DEC)	Sağ açıklık (α ya da RA)
Ekliptik (Tutulum)	Dünya yörüngesi	İlkbahar Ekinoksu	Ekliptik enlem (β)	Ekliptik boylam (λ)
Galaktik	Galaksi düzlemi	Galaksi merkezi	Galaktik enlem (b_{II})	Galaktik boylam (l_{II})

Çizelge 4.10'da toplamda on dört günlük gözlem zamanlarında, hava durumu, gözlemlere kimlerin katıldığı ve gözlem yapılıp yapılmadığı Evet/Hayır kelimelerinin baş harfleri ile E/H ile belirtilmiştir.

Çizelge 4.10. Toplam 14 gözlem gününün özet tablosu

Tarih	Kişiler	Hava	Notlar	E / H
08/09.07.2014	O.Okuyan, G.Kahya	Açık, rüzgarlı	Polarimetrik gözlemlerde kullanılacak yarık, TFOSC'un yarık tekerleğine takıldı ve test görüntüleri alındı.	H
16/17.07.2014	S.Kaynar, K.Uluç, G.Kahya	Açık, nemli	Teknik zamanda, filtre tekerinde 6 no'lu delikteki yarık çıkarılarak, polarimetre gözlemlerinde kullanılacak 1 yarık takıldı. Takılan yarık ile deneme görüntüleri alındı.	E
13/14.08.2014	S.Kaynar, G.Kahya	Açık	Polarimetrenin montajı gerçekleştirildi. Deneme görüntüleri alındı.	E
22/23.08.2014	İ.Hamitoğlu, S.Kaynar, G.Kahya	Açık	Polarimetre ile standart yıldız ve asteroit gözlemleri yapıldı.	E
23/24.08.2014	İ.Hamitoğlu, S.Kaynar, G.Kahya	Açık	Polarimetre ile standart yıldız ve asteroit gözlemleri yapıldı.	E
24/25.08.2014	İ.Hamitoğlu, S.Kaynar, G.Kahya	Açık	Polarimetre ile standart yıldız ve asteroit gözlemleri yapıldı.	E
30/01.09.2014	İ.Hamitoğlu, G.Kahya	Açık	Kısa pozlu polarize standart yıldızlar gözlemlendi.	E
01/02.10.2014	İ.Hamitoğlu, G.Kahya	Açık	Kısa pozlu polarize standart yıldızlar gözlemlendi.	E
18/19.10.2014	O.Okuyan, S.Kaynar, G.Kahya	Nemli, rüzgarlı	Yıldırım tehlikesi nedeniyle gözlem yapılamadı.	H
23/24.12.2014	O.Okuyan, G.Kahya	Açık, rüzgarlı	Darbeli esen rüzgar sebebiyle zaman zaman gözleme ara verildi. Sabah polarimetre gözlemleri için kuzey ve güney taraftan düz-alan görüntüleri alındı.	E
11/12.03.2015	K.Uluç, İ.Hamitoğlu, G.Kahya	Bulutlu	Gece başı az da olsa polarimetrik gözlem yapıldı, gece yarısına doğru gözleme nem ve bulutlanma sebebiyle son verildi.	E
12/13.03.2015	K.Uluç, İ.Hamitoğlu, G.Kahya	Bulutlu	Bulutlanma ve yüksek nem sebebiyle gözlem yapılamadı.	H
22/23.04.2015	İ.Hamitoğlu, S.Kaynar, G.Kahya	Açık, nemli	Gündüz polarimetre teknik çalışması yapıldı. Gece başı etkili olan yoğun bulut geçişleri ve yüksek nem nedeniyle gözleme gecenin ikinci yarısı başlanabildi.	E
23/24-04-2015	İ.Hamitoğlu, S.Kaynar, G.Kahya	Bulutlu	Yoğun bulut geçişi, şiddetli rüzgar ve yüksek nem nedeniyle gözlem yapılamadı.	H

4.3.2. Asteroit gözlemleri ve gözlem tekniği

Kalibrasyon amacıyla yeteri kadar polarize ve polarize olmayan standart yıldız gözlemi yapıldıktan sonra asteroit gözlemleri yapılmaya başlanır. Ek-2'deki kılavuzda asteroit gözlem tekniği VYT anlatılmıştır. Örneğin; mp26 (minor planet) asteroidi için, NASA'nın web sayfasından¹² UT (Evrensel Zaman) zamanına göre o anki koordinatları, teleskop kontrol sisteminde (MaxIm CCD) alfa ve delta değerleri ilgili yerlere yazılır. Sonrasında, asteroit hızı hesaplanır ve kontrol penceresindeki DRA (Differential Right Ascension) alanına yazılır. DDE (Differential Declination) değeri yukarıdaki linkten bulunarak yerine yazılır. Şekil 4.16'da mp423 asteroidi için 24 Ağustos 2014, saat 00.00-00.30 arasındaki örnek jpl.nasa verisi görülmektedir. Örnek bir hız hesabı yapacak olursak; "DRA × Cos (D)" değerleri kırımızı içine alınmıştır. Cos(D) değerini elde etmek için Şekil 4.16'dan alınan "DEC" değeri Denklem 4.2 yerine yazılır.

$$DRA = \frac{DRA \times \text{Cos}(D)}{\text{Cos}(D)} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'de gerekli değerler yerine yazılırsa Denklem 4.3'teki sonuç elde edilir.

$$DRA = \frac{9,142573}{\text{Cos}(5^\circ 20' 39,2'')} = \frac{9,142573}{\text{Cos}(5^\circ.3442)} = 9,1825 \quad (4.3)$$

Date (UT) HR:MN	R.A. (ICRF/J2000.0)	DEC	dRA*cosD	d(DEC)/dt	Azi (a-appr)	Elev	a-mass	APmag
2014-Aug-24 00:00	02 42 39.41 +05 20 39.2	9.142573	-0.11565	122.4539	42.9687	1.465	12.71	
2014-Aug-24 00:02	02 42 39.43 +05 20 39.2	9.137690	-0.11641	122.9575	43.3064	1.456	12.71	
2014-Aug-24 00:04	02 42 39.45 +05 20 39.2	9.132851	-0.11717	123.4664	43.6421	1.447	12.71	
2014-Aug-24 00:06	02 42 39.47 +05 20 39.2	9.128054	-0.11793	123.9805	43.9758	1.438	12.71	
2014-Aug-24 00:08	02 42 39.49 +05 20 39.2	9.123300	-0.11870	124.5001	44.3075	1.429	12.71	
2014-Aug-24 00:10	02 42 39.51 +05 20 39.2	9.118591	-0.11947	125.0252	44.6372	1.421	12.71	
2014-Aug-24 00:12	02 42 39.54 +05 20 39.2	9.113925	-0.12024	125.5559	44.9647	1.413	12.71	
2014-Aug-24 00:14	02 42 39.56 +05 20 39.2	9.109304	-0.12102	126.0922	45.2901	1.405	12.71	
2014-Aug-24 00:16	02 42 39.58 +05 20 39.2	9.104727	-0.12179	126.6344	45.6132	1.397	12.71	
2014-Aug-24 00:18	02 42 39.60 +05 20 39.2	9.100195	-0.12257	127.1824	45.9340	1.390	12.71	
2014-Aug-24 00:20	02 42 39.62 +05 20 39.2	9.095708	-0.12336	127.7364	46.2526	1.382	12.71	
2014-Aug-24 00:22	02 42 39.64 +05 20 39.2	9.091267	-0.12415	128.2965	46.5687	1.375	12.71	
2014-Aug-24 00:24	02 42 39.66 +05 20 39.2	9.086871	-0.12494	128.8627	46.8824	1.368	12.71	
2014-Aug-24 00:26	02 42 39.68 +05 20 39.2	9.082521	-0.12573	129.4352	47.1935	1.361	12.71	
2014-Aug-24 00:28	02 42 39.70 +05 20 39.2	9.078217	-0.12652	130.0140	47.5022	1.355	12.71	
2014-Aug-24 00:30	02 42 39.72 +05 20 39.2	9.073959	-0.12732	130.5993	47.8082	1.348	12.71	

Şekil 4.16. mp423 asteroidi için örnek jpl Horizon sorgusu

Asteroit gözlemi bitince, hemen ona en yakın olan standart polarize yıldızın ya da standart polarize olmayan yıldızın gözlemleri uygun foton sayılarındaki BVRI filtrelerinde üçer set alınarak yapılır. Ardından başka bir asteroide geçilir.

DYA'ların Dünya'ya yaklaşma döneminde görünen uzanım açıları (Güneş-Asteroit-Dünya arasındaki açı) yüksek dereceldedir (>40 derece). DYA'ların kutuplanma derecesi oranı ve fotometri değişimleri uzanım açısına bağlı olan deneysel denklemler kullanılarak belirlenebilir. Polarimetrik ve fotometrik faza bağlı eğrilerden asteroitlerin aşağıdaki gibi bazı fiziksel paramereleri elde edilir:

¹² <http://ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi#results>, 24.08.2014

1. Asteroid taksonomi sınıfı belirlenir.
2. Polarimetrik eğrinin eğim parametresi (h) hesaplanınca geometrik albedo (p) belirlenir. Tek ölçümde beklenen hassasiyeti %5-%10.
3. Parlaklık-faz eğrisinden HG sistemine uyumlu asteroid mutlak parlaklık (H) ve fotometrik eğim (G) belirlenir. Tek ölçümde beklenen hassasiyet %10-%20.
4. Mutlak parlaklık ve geometrik albedodan asteroidin çapı hesaplanır.

Kaynaklar sönük olduğu için (~17 kadir) en az 100 sinyal/gürültü oranına ulaşmak amacıyla bir kaç dakika poz süresi verilmiştir. Dünya'ya en yakın geçiş sırasında bu asteroitler yüksek öz harekete sahiptirler. Polarimetrik ve fotometrik gözlemlerde asteroitin açısal hızını takip etmek için Ek-2'de bahsedilen teleskop özelliği kullanılarak bu tür nesnelerin takibi yapılmıştır. Günlük hareketle takip yapılmadığı ve uzun poz sürelerinde görüntü alındığı için asteroid çevresindeki yıldızlar çizgi şeklinde bir iz bırakırlar. Bu durum akı hesaplarken gürültüyü artırmaktadır. Yıldız izi etkisini görüntüler üzerinden kaldırmak için en az beş adet görüntü alınıp, bu görüntülere ortanca (medyan) filtre uygulanmıştır. Ortanca filtre uygulanmış görüntülerde yıldız etkileri, tek görüntüye göre daha bağımsızdır. Ayrıca bu yöntem sinyal/gürültü oranını artırmış olur.

Polarimetrik asteroit görüntüleri V-filtrede TFOSC-WP (Wollaston Prizma) ile elde edilmiştir. Polarimetrik kalibrasyon için polarize olan ve polarize olmayan bir kaç tane standart yıldız gözlenmiştir. Fotometrik kalibrasyon için, Landolt standartlarında, TFOSC sistemi ile polarimetreden önce ve sonra beş set olarak Bessel V-filtrede, fotometrik asteroit görüntüleri alınmıştır. Okuma zamanını azaltmak amacıyla CCD üzerinden yarıgın bulunduğu bölgenin görüntüsü *binning* 2 (kare olacak şekilde, 4 piksel 1 piksel sayılarak) uygulanarak alınmıştır. Her asteroitte tek polarimetrik ve fotometrik ölçüm için yaklaşık 30 dk gözlem yapılmıştır.

Bu çalışmanın ana amacı; Dünya'ya yaklaşan küçük gezegenlerin çizgisel kutuplanma oranını hesaplamaktır. Bu yöntem, 10 dk gibi kısa bir zamanda, asteroitlerin minerolojisi (hangi malzemeden yapıldığını, silisyum, karbon vb.) hakkında bilgi vermektedir. Farklı polarizasyon oranı farklı asteroit sınıfını göstermektedir. Polarize olmayan standart yıldızlar gözlemlenerek hatalar çıkartılmıştır. İlk üç Stokes parametresi elde edilerek cihazın lineer kutuplanma oranı hata limiti %0,2 ve pozisyon açısı limiti 1,9 derece olarak hesaplanmıştır. Gözlemlenecek cismin parlaklık limiti, 10 dk'lık poz süreleri için, 17^m olarak hesaplanmıştır.

4.3.3. Gözlemsel Verilerin Bilimsel Analizi

Astronomik olarak alınan her görüntüde gürültü vardır. CCD kameranın verebileceği en küçük poz süresinde eğer mümkünse 0 sn ya da 0,1 sn poz süreli n adet temel düzey (Bias) görüntüsüne ortanca filtre uygulanarak temel düzey belirlenir (Şekil 4.17). Ortanca filtre uygulanarak elde edilen bu görüntüye master_bias denir. Şekil 4.18’de IRAF imstat komutu ile ham bias ve master bias görüntüsünün istatistikleri görülmektedir.

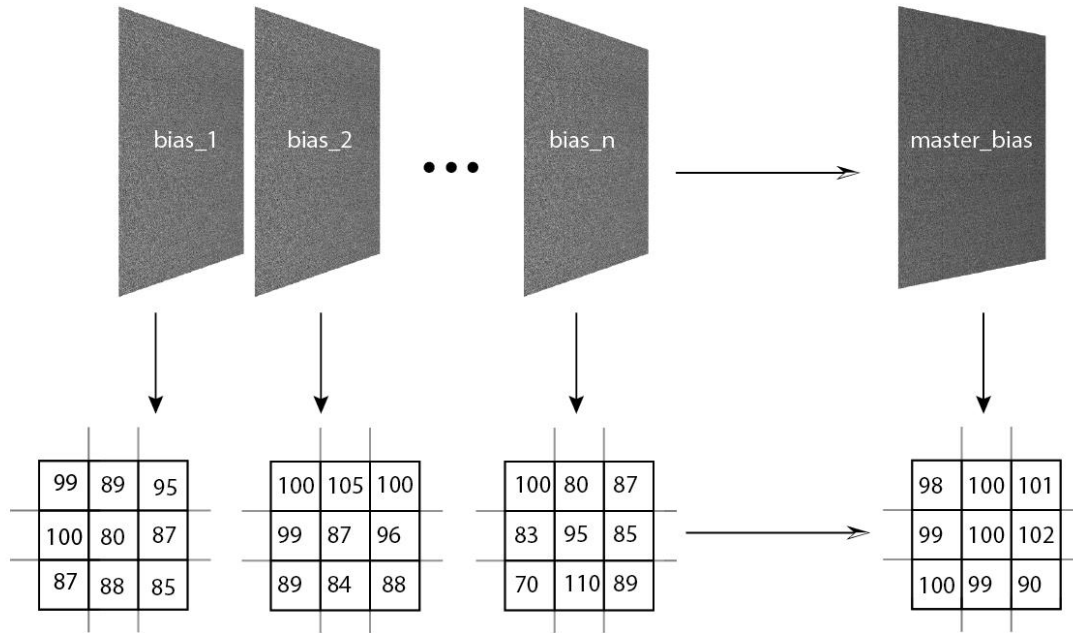
CCD elektronik bir cihaz olduğu için ısı ve ısı farklarından etkilenirler. Bu etkiler sonucu kopan elektronlar astronomik görüntüler üzerine gürültü şeklinde etki eder. Bu etkiye kara akım (Dark) gürültüsü denir. Örneğin 120 sn boyunca alınan bir astronomik görüntüde aynı zamanda kara akım gürültüsünde mevcuttur. Bu etkiyi gidermek için bilimsel görüntülerle aynı poz süresinde, CCD’ye ışık düşmeden bir dizi görüntü alınır. Alınan bu görüntülere bias örneğinde olduğu gibi ortanca filtre uygulanarak istatistiksel olarak hatası azaltılmış master_dark görüntüsü elde edilmiş olur. Elde edilen bu master_dark görüntüsünün, aynı poz süreli bilimsel görüntülerden çıkarılması gerekir. RTT150 teleskobundaki CCD, bilimsel amaçlı gelişmiş bir CCD olduğu ve sıvı azotla soğutulduğu için kara akım gürültüsü yok denecek kadar azdır. Bu tez kapsamında bu tür görüntüler analizlerde kullanılmamıştır.

Flat (düz alan) görüntüleri, filtreye ve renge bağlıdır. CCD eşit şekilde aydınlatılmış olsa bile CCD üzerindeki pikseller eşit düzeyde tepki vermezler. Sayımlar arası farklar görülür. Bu değerlerin normalize edilmesi gerekmektedir. Her flat görüntüsünden, Master_bias çıkarılması gerekmektedir. Elde edilen düz alan görüntüleri filtrelere göre gruplanır. Örneğin B filtresi ile alınmış Flat_B1, Flat_B2 ... Flat_Bn gibi ve V- filtresi ile alınmış Flat_V1, Flat_V2 gibi görüntülere kendi aralarında ortanca filtre işlemi yapılır. Elde edilen bu flat görüntüsünün modu alınıp, kendisine bölünerek normalize bir flat görüntüsü elde edilir.

Denklem 4.4’te ve Denklem 4.5’te bilimsel görüntünün elde edilmesi verilmiştir.

$$Flat_{B,V,R,I} = \frac{Flat}{mode(flat)} \quad (4.4)$$

$$Bilimsel Görüntü_{B,V,R,I} = \frac{Ham görüntü - master_bias}{Flat_{B,V,R,I}} \quad (4.5)$$



Şekil 4.17. Bias (Temel düzey) görüntülerinden master bias görüntüsünün elde edilmesi

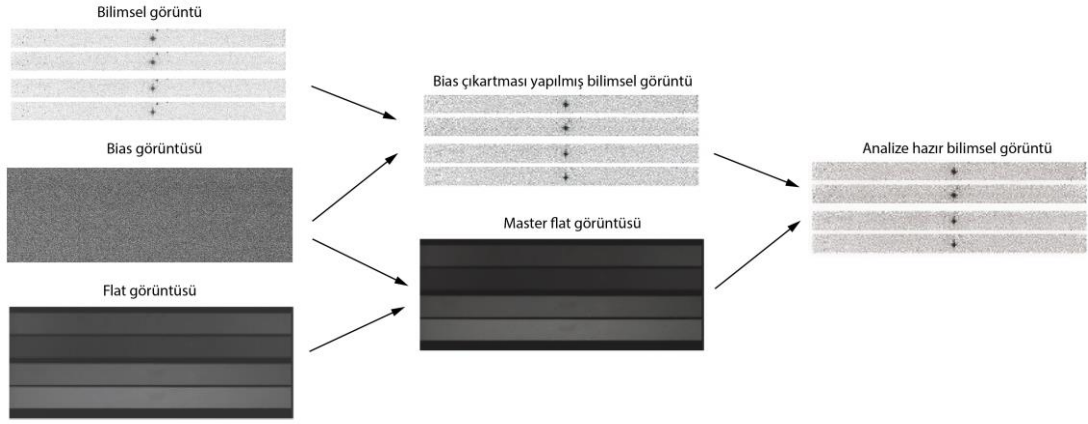
```

ccdred> imstat bias*.fits.Zero.fits
#      IMAGE      NPIX      MEAN      STDDEV      MIN      MAX
bias0001.fits  4259840    389.6    10.87      0.    1752.
bias0002.fits  4259840    388.4    11.31      0.    6498.
bias0003.fits  4259840     393.    11.01      0.    2295.
bias0004.fits  4259840    390.9    10.83      0.    2366.
bias0005.fits  4259840    389.3    10.72      0.    1029.
bias0006.fits  4259840    389.2    10.83      0.    1944.
bias0007.fits  4259840    389.2    10.96      0.    3748.
bias0008.fits  4259840    390.2    10.66      0.    1494.
bias0009.fits  4259840    391.6     38.4      0.   65535.
bias0010.fits  4259840    392.1    10.77      0.    2459.
Zero.fits     4259840    389.8     9.857      0.     411.
ccdred>

```

Şekil 4.18. IRAF, imstat komutu ile ham ve master bias görüntülerinin istatistikleri

IRAF içinde noao->imred->ccdred içinde zerocombine komutu kullanarak bias görüntülerinden master_bias görüntüsü elde edilmiştir. Düzeltme için "ccdred>zerocombine input=bias*.fits output = Zero.fits combine = median ccdtype = " komutu kullanılmıştır. Şekil 4.19'da kara akım görüntülerini ihmal ederek gerçekleştirilen kalibrasyonun adımları şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.19. CCD kalibrasyon şematığı

4.3.4. Ortanca (Median) Filtre

Ortanca filtrede amaç, elde edilen veriler içinde hatalı ölçüm, cihazsal hatalardan kaynaklı aşırı büyük veya küçük değerlerden etkilenmemektir. Örneğin, bir ölçüm sonucunda elde edilen değerler aşağıdaki şekilde olsun,

$$\text{Veriler} = \{2, 4, 1, 97, 6, 3, 5\}$$

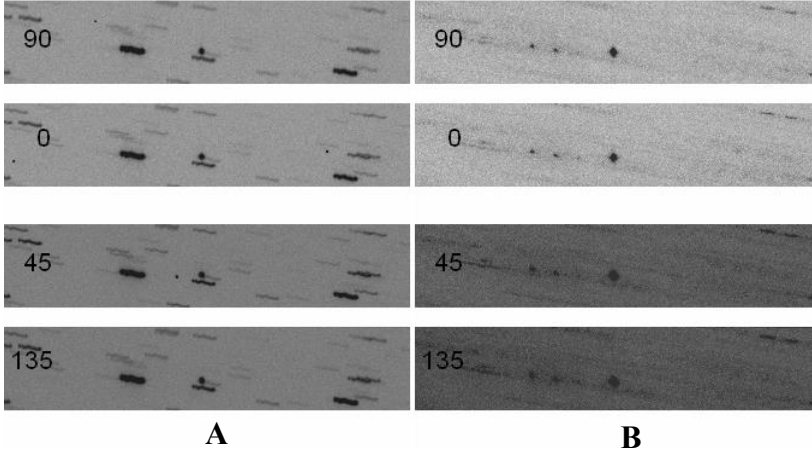
Alınan bu verilere dikkatli bakıldığında, 97 olarak ölçülen değer büyük ihtimal ile hatalı veridir. Bu veri setinin aritmetik ortalamasını alacak olsaydık, 97 değeri aritmetik ortalamayı arttıracaktır ve dolayısıyla yanlış bir sonuca varılacaktır. Bu nedenle ortanca filtre kullanmak bu örnekte olduğu gibi uç değerleri elimine etmemizi sağlar.

Ortanca filtre almak için öncelikle eldeki veri adetinin tek sayıda olması gerekir. Sonraki adım elde edilen veriler küçükten büyüğe doğru sıralanır. Bu sıralama sonucunda listede ortada kalan değer, o verinin ortancasıdır. Verilen örnek veri seti içinde ortanca değer "4" değeridir.

$$\text{Sıralı Veriler} = \{1, 2, 3, \mathbf{4}, 5, 6, 97\}$$

Teleskobun bir gök cismini takip edebilmesi için Dünya'nın dönüş hızının ters yönünde aynı hızda hareket etmesi gerekir. Günlük hayatta kullandığımız saatlerde bir gün 24 saattir. Fakat gerçekte Dünya, kendi eksenini etrafında bir turunu yaklaşık 23 saat 56 dakika 4 saniye de atmaktadır. Buna göre teleskopun saat açısı ekseninin 1 sn'de yaklaşık 15,04 yay saniyesi dönmesi gerekir. Bu tür bir hızda takip, Güneş sistemi dışındaki yıldızlar, galaksiler vb. gök cisimleri için uygundur. Bilindiği gibi asteroitler Güneş sisteminin birer üyesidir. Dünya'ya uzaklıkları, yıldızlara göre çok daha yakın olmaları ve Güneş sistemi içindeki hareketleri nedeniyle yukarıda bahsedilen günlük harekete tam olarak katılmazlar. Bu tür gök cisimlerinin teleskop ile takibinin yapılabilmesi için uygun miktarda düzeltme hızı, günlük takip hızına eklenmesi/çıkarılması gerekmektedir.

Şekil 4.20'den görüldüğü gibi, TFOSC-WP ile RTT150 teleskobunda buna benzer bir yöntem kullanarak asteroidlerin takibi yapılmıştır. Şekil 4.20'de TFOSC-WP ile alınmış DYA 276049 numaralı asteroidin V bandında ve birbirinden 60 yay-sn ile ayrılmış (0°, 90°) ve (45°, 135°)'lerde dört adet polarize olmuş görüntüsü görülmektedir. Şekil 4.20.A'daki görüntüde 120sn poz süreli bir görüntüdür ve bu görüntüde yıldız takibi yapılmadığı için yıldızlar birer çizgi şeklinde uzarken, asteroid bir nokta şeklinde kalmıştır. Şekil 4.20.B'de bu şekilde alınan beş adet görüntüye ortanca filtre uygulanarak temiz, yıldızdan arınmış bir görüntü elde edilmiştir.



Şekil 4.20. TFOSC - WP ile asteroid takibi

4.4. Kalibrasyon ve Hata Analizi

4.4.1. İdeal olmayan Wollaston prizmasının etkilerinin düzeltilmesi

Wollaston prizmasına gelen ışık sıradan-ışın (o-ray) ve sıradışı-ışın (e-ray) olmak üzere ikiye bölünür. Gelen ışık polarize değilse, ideal durumda bölünen ışınların akı değerleri eşit olur. Gerçekte, optiğin iletiminden dolayı bir fark oluşur. Optiğin bu davranışını hesaba katarak optiğin iletim katsayısı “t parametresi” belirlenmelidir (Patat ve Romaniello 2006). Denklem 4.6’da ve Denklem 4.7’de \square_1 ve \square_2 sırasıyla WP-1 ve WP-2’nin iletim katsayılarıdır. Farklı kanallarda kaydedilen akı değerleri aracılığı ile ideal olmayan Wollaston’un etkileri doğrulanabilir.

$$I'_{0^\circ} = \frac{I_{0^\circ}}{2t_1}, \quad I'_{90^\circ} = \frac{I_{90^\circ}}{2(1-t_1)} \quad (4.6)$$

$$I'_{45^\circ} = \frac{I_{45^\circ}}{2t_2}, \quad I'_{135^\circ} = \frac{I_{135^\circ}}{2(1-t_2)} \quad (4.7)$$

Bilindiği üzere bir veriyi doğru yorumlamak için hem fiziksel hem de aletsel araçların neden olduğu bozucu etkileri içeren bir modele gerek vardır. Öz kaynağın hakkındaki bilgi aletsel araçların karakteristik davranışları nedeniyle sınırlıdır. İşte bu sınırları belirlemek adına polarize olmayan standart yıldız gözlemleri yapılarak literatür ile karşılaştırılmıştır. Polarize olmayan yıldızların doğrudan gözlemleri, cihazsal kutuplanmanın varlığından dolayı t-parametresinin değerini vermediğinden, t-parametresini hesaplamak için, ilk olarak kaynağın konumuna bağlı olan cihazsal kutuplanmanın, zaman ile önemli derecede değişmediği gerçeği ile yola çıkılmıştır. Bu yüzden, sistemin t-parametresini hesaplamak için, lineer polarizör 90 derecelik adımlarla döndürülerek (0, 90, 180 ve 270 derecelerde), iki farklı konumda dört adet kutuplanma kanalında sabit ışık kaynağından gelen akı ölçümleri yapılmıştır. Bu durumda, o-ray ve e-ray birbiriyle değiş-tokuş yapacağından, Denklem 4.8 kolaylıkla yazılabilir.

$$\frac{I_{o,90^\circ}}{tF_{90^\circ}} = \frac{I_{e,0^\circ}}{(1-t)F_{0^\circ}} \quad (4.8)$$

F_{0° ve F_{90° , sırasıyla 0 ve 90 derecelerdeki akı değerleridir. Bu değerler t-parametresi kullanılarak Denklem 4.9 ve 4.10'dan elde edilebilir.

$$F_{0^\circ} = \frac{I_{o,0^\circ}}{t} + \frac{I_{e,0^\circ}}{1-t} \quad (4.9)$$

$$F_{90^\circ} = \frac{I_{o,90^\circ}}{t} + \frac{I_{e,90^\circ}}{1-t} \quad (4.10)$$

İkinci dereceden denklemin sadeleştirilmiş hali t-parametresini verir (Denklem 4.11).

$$\left(\frac{I_{o,0^\circ}I_{e,90^\circ}}{I_{o,90^\circ}I_{e,0^\circ}} - 1 \right) t^2 + 2t - 1 = 0 \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'in çözümü, gerekli t-parametresini verir. İkinci dereceden terim sıfıra gider ve $t = 0,5$ bulunur. Bu bir ideal durumdur.

Teleskop optiği, cihazsal kutuplanma simetrik olmasından dolayı etki yapmamaktadır. Polarizörden önce dönebilen bir mekanizma kullanılması mümkün olmadığından polarizör mekanik olarak tutucunun içinde bulunan WP, 90 derece adımlarla döndürülerek cihazsal polarizasyon etkisi ölçülmüştür. Polarize olmayan yıldızlar, polarizörün 0, 90, 45, 135 derecelerdeki dört konumunda, 60x60 yay-sn'lik CCD merkezindeki bir alanda gözlemlenmiştir. Bu bölgede cihazsal kutuplanmanın önemli derecede değişmediği hesaba katılarak, (0, 90) ve (180, 270) derecelerde polarizör konumlarının iki seti için t-parametresinin değeri hesaplanmıştır. Hassasiyeti artırmak için sonuçların ortalaması alınmıştır. Dört farklı açıda alınan görüntüler cihazsal kutuplanma derecesini ve kutuplanma açısını belirlemek için kullanılmıştır.

Çizelge 4.11’de Wollaston prizmalarının, kutuplanma derecesinin ve merkez bölgedeki kutuplanma açısının iletim parametresinin farklı optik bantlardaki değerleri verilmiştir. Daha detaylı analizlere geçmeden önce, elde edilmiş tüm akı değerleri t-parametresi kullanılarak düzeltilmiş ve hatadan arındırılmıştır.

Çizelge 4.11. İletim katsayısı, cihazsal kutuplanma derecesi ve ilgili açılar

Optik	B	V	R	I
WP-1	0,502	0,502	0,501	0,501
WP-2	0,502	0,503	0,504	0,500
P(%)	0,63	0,78	0,74	0,16
PA(°)	22,4	28,2	39,9	5,2

4.4.2. Cihazsal kutuplanmanın düzeltilmesi

Optiğin cihazsal kutuplanması, kutuplanma derecesinin $p(x,y)$ ve kutuplanma açısının $\varphi(x,y)$ konum bağımlılığına sahip olduğundan, gelen işareti bozmaktadır. Bu durum, dairesel kutuplanma ihmal edilerek, $\vec{S}_i(I_i, Q_i, U_i)$ giriş Stokes parametrelerini çıkış Stokes parametrelerine $\vec{S}_0(I_0, Q_0, U_0)$, Mueller matrisi $\|\vec{M}_i\|$ aracılığıyla dönüştüren Denklem 4.12 ile tanımlanabilir (Patat ve Romaniello 2006).

$$\vec{S}_i = \|\vec{M}_i\| \cdot \vec{S}_0 \quad (4.12)$$

Burada Mueller matrisi Denklem 4.13’deki gibi tanımlanır.

$$\|\vec{M}_i\| = \frac{1}{1+p} \begin{pmatrix} 1 & p \cos 2\varphi & p \sin 2\varphi \\ p \cos 2\varphi & 1 - p \sin^2 2\varphi & p \sin 2\varphi \cos 2\varphi \\ p \sin 2\varphi & p \cos 2\varphi \sin 2\varphi & 1 - p \cos^2 2\varphi \end{pmatrix} \quad (4.13)$$

Ardından matris çözümü yapılarak, giriş Stokes parametrelerinden çıkış Stokes parametreleri Denklem 4.14’deki gibi elde edilir.

$$\vec{S}_0 = \|\vec{M}_i\|^{-1} \cdot \vec{S}_i \quad (4.14)$$

Buradaki gibi iki adet Wollaston prizması kullanılması durumunda, cihazsal kutuplanma $p(x,y)$ ve kutuplanma açısı $\varphi(x,y)$, çerçeve (frame) üzerindeki polarize olmayan bir yıldızın konum bağımlılığı ile cihazsal Stokes parametreleri ayrık uyumlandırma (separate fitting) yapılarak belirlenir. Çerçevenin merkez bölgesinde (800 piksel $< x < 1600$ piksel) Q_i ve U_i parametreleri lineer olarak değiştiğinden birinci dereceden bir polinom ile Denklem 4.15 ve Denklem 4.16 aracılığı ile belirlenebilir ve türetilir.

$$Q_i = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix} \cdot (a_0 \quad a_1 \quad a_2) \quad (4.15)$$

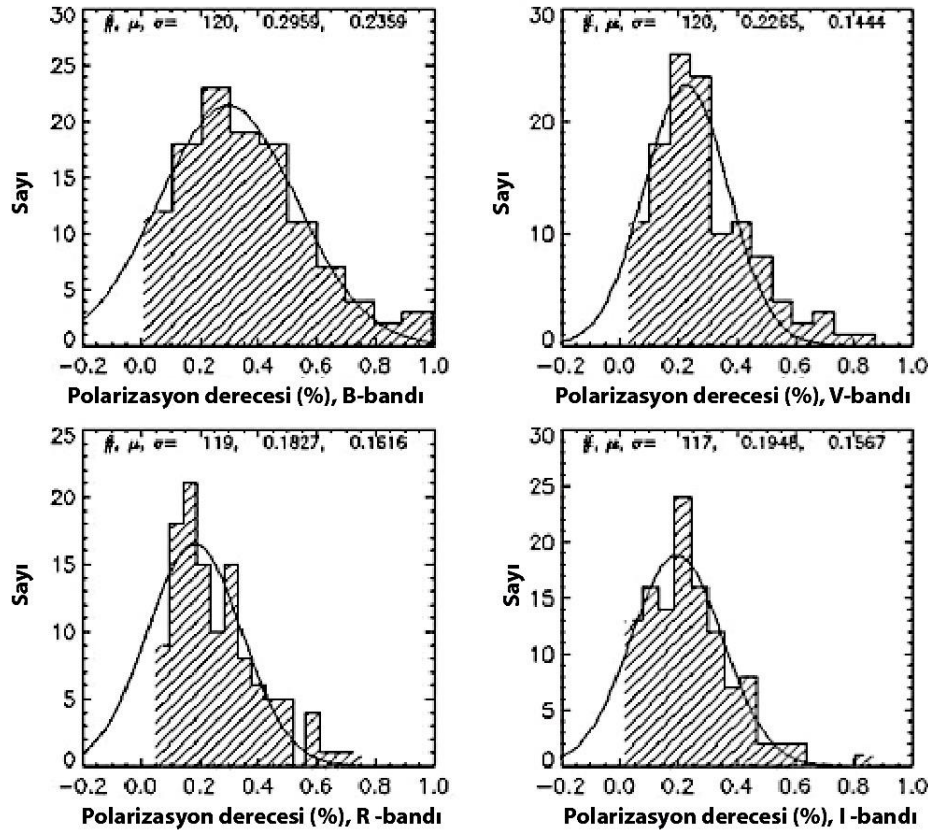
$$U_i = \begin{pmatrix} 1 \\ x \\ y \end{pmatrix} \cdot (b_0 \quad b_1 \quad b_2) \quad (4.16)$$

Astronomik kaynakların polarimetrik gözlemleri için tanımlanan çalışma alanı 1x5 yay-dakika'dır. Kalibrasyon vektörleri ($a_0 \ a_1 \ a_2$) ve ($b_0 \ b_1 \ b_2$) daha önce tanımlanan/bahsedilen çalışma alanından elde edilen verilerin akı değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Sıfır derece polarizasyona yaklaşan yıldızların kutuplanma derecelerinin dağılımı BVRI bantlarında gözlemlenmiştir (Şekil 4.21). Tüm bantlar için sistematik hatalar kutuplanma derecesinin yaklaşık %0,2'sidir. Polarize olmayan kaynakların kutuplanma derecesinin % 0,2 – 0,3 aralığındaki eşik değerleri sistematik hata ile aynı seviyede belirlenmiş olup bu değerlerin dağılımı, ölçülen Q_0 ve U_0 Stokes parametrelerinin normal dağılımı ile uyumludur. Kutuplanma derecesinin sistematik hatasını ve mutlak kalibrasyon katsayılarını belirlemek için iyi bilinen güçlü polarize standart yıldızlar gözlemlenerek, Denklem 4.17 aracılığı ile TFOSC - WP için cihazsal Stokes vektörü hesabı yapılmıştır.

$$\vec{S}_1((I_{45^\circ} + I_{135^\circ}), (I_{0^\circ} - I_{90^\circ})R, (I_{45^\circ} - I_{135^\circ})) \quad (4.17)$$

İki Wollaston prizmasının (WP-1 ve WP-2) iletim katsayılarının oranı (R) Denklem 4.18 aracılığıyla hesaplanmıştır.

$$R = \frac{I_{45^\circ} + I_{135^\circ}}{I_{0^\circ} + I_{90^\circ}} \quad (4.18)$$



Şekil 4.21. BVRI bantlarında TFOSC - WP ile alınmış polarize olmayan standart yıldızların lineer kutuplanma derecelerinin dağılımı

BVRI bantlarında TFOSC - WP ile alınmış polarize olmayan standart yıldızların lineer kutuplanma derecelerinin dağılımı Şekil 4.21’de verilmektedir. Cihazsal sistematik hatalar, kutuplanma derecesi için % 0,2 ve kutuplanma açısı için 1,9 derece olarak hesaplanmıştır.

V-bandındaki güçlü polarize yıldızların gözlenen kutuplanmanın ($P_{\text{gözlenen}}$) ve kutuplanma açısının ($PA_{\text{tablolanan}}$) değerleri Çizelge 4.12’de verilmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürdeki değerleri (Dolan ve Tapia 1986) doğruladığı görülmektedir.

Çizelge 4.12. V-bandında güçlü polarize yıldızların gözlem sonuçları

İsim	P _{gözlenen} (%)	P _{tablolanan} (%)	PA _{gözlenen} (°)	PA _{tablolanan} (°)
BD+59d389	6,53±0,2	6,70±0,20	98,45±1,0	98,10±0,1
BD+64d106	5,63±0,2	5,69±0,04	96,98±1,4	96,60±0,2
HD236633	5,52±0,1	5,49±0,02	94,20±0,7	93,76±0,1
Hiltner960	4,86±0,2	5,66±0,02	60,70±2,2	54,80±0,1

4.5 Asteroitlerin Fizik Parametrelerinin Hesaplanması

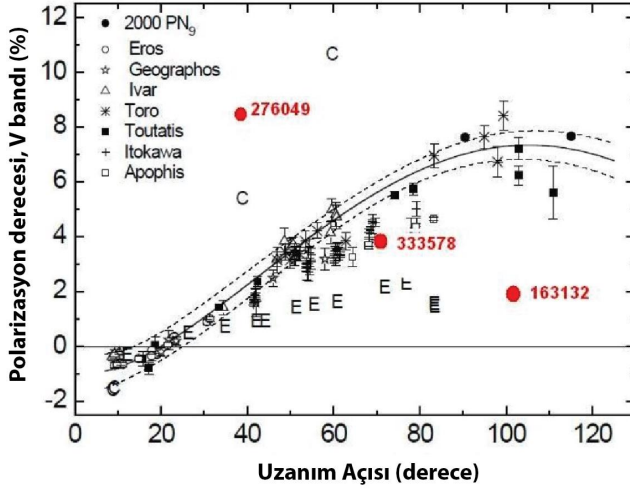
Albedonun (p_v) değeri Denklem 4.19'dan ve albedo'nun hatası (δp_v) da Denklem 4.20'den hesaplanabilir. Burada, p_v – geometrik albedo ve h – polarimetrik eğim parametreleridir. A ve B sabit değerlerdir. A = -1,731 ve B = -0,983 değerleri hesaplamalarda kullanılmıştır (Lupishko ve Mohamed 1996).

$$\log(p_v) = A + B * \log(h) \quad (4.19)$$

$$\frac{\delta p_v}{p_v} = |B| * \frac{\delta h}{h} \quad (4.20)$$

Şekil 4.22'de gösterildiği gibi farklı asteroit sınıfında farklı eğimler var olup, polarimetrik eğim hesabında üç adet parametre bulunmaktadır. Bu üç parametre ampirik olarak albedoya bağlıdır. Denklem 4.21, Denklem 4.22 ve Denklem 4.23'ten görüleceği gibi albedo hesabında; 163132 asteroiti, 100° uzanım açısında maksimuma ulaştığından bu kutuplanma değeri maksimum olarak kabul edilmiştir ve (90-110 derece arasında maksimuma ulaştığından dolayı) burada kutuplanmanın maksimum değeri (P_{\max}) kullanılmıştır. 276049 numaralı asteroitin kutuplanma derecesi maksimuma ulaşmadığı için bu asteroitin albedo hesabında eğim parametresi (h) kullanılmıştır. 333578 numaralı asteroit için ise kutuplanmanın minimum değeri (P_{\min}) kullanılmıştır (Şekil 4.23).

- 1- Sıfır noktasındaki eğim parametresi (h);
- 2- Kutuplanma derecesinin minimuma ulaştığı açı değeri (P_{\min})
- 3- Kutuplanma derecesinin maksimuma ulaştığı açı değeri (P_{\max})

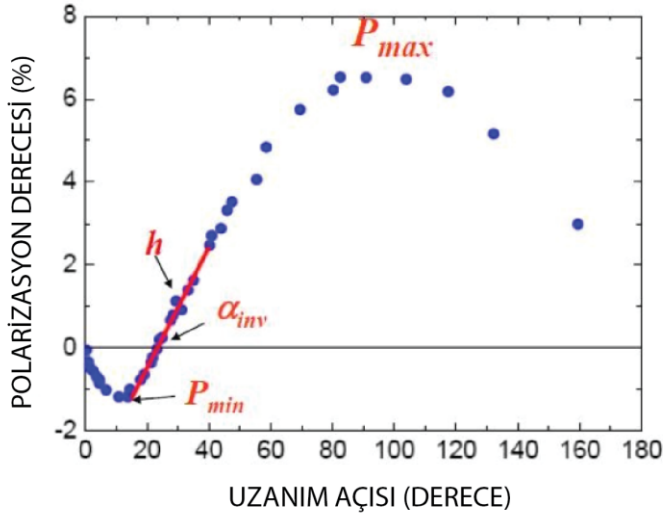


Şekil 4.22. Uzanım açısına karşı kutuplanma derecesinin grafiği

$$\log(\rho_v) = A_1 * \log(P_{max}) + B_1 \quad (4.21)$$

$$\log(\rho_v) = A_2 * \log(P_{min}) + B_2 \quad (4.22)$$

$$\log(\rho_v) = A_3 * \log(P_h) + B_3 \quad (4.23)$$



Şekil 4.23. P_{min} , P_{max} , h ve a_{inv} grafik üzerindeki gösterimi

V - bandındaki çap (D_{eff}) hesabı Denklem 4.24 ve hatası (δ) ise Denklem 4.25 kullanılarak hesaplanmıştır (Fowler ve Chillemi 1992). ρ_v , V-bandında albedo değeri ve H mutlak parlaklıktır.

$$D_{eff} = \frac{1329}{\sqrt{p_v}} \cdot 10^{(-0.2H)}, (km) \quad (4.24)$$

$$\frac{\delta D_{eff}}{D_{eff}} = 0.5 * \sqrt{\left(\frac{\delta p_v}{p_v}\right)^2 + (\delta H)^2} \quad (4.25)$$

Mutlak Parlaklık (H): HG Sisteminde mutlak parlaklık değerleri düşük, orta, yüksek albedo değerine sahip asteroidlerin spektral sınıflarına göre (polarimetrik eğimin ortalama değerine göre) uyarlanmıştır (Lagerkvist ve Magnusson 1990). Çizelge 4.13'te asteroid sınıfına göre ortalama G değerleri verilmiştir.

Çizelge 4.13. Ortalama G değerleri

Spektral tipi/ asteroid sınıfı	$\langle G \rangle$	$\sqrt{\frac{\sum (G - \langle G \rangle)^2}{N - 1}}$	N
C, G, B, F, P, T (Düşük Albedo)	0,09 ± 0,01	0,07	28
S, M (Orta Albedo)	0,22 ± 0,02	0,10	37
E, V, R (Yüksek Albedo)	0,41 ± 0,02	0,06	4

5. BULGULAR

Çalışmada optik iletim katsayısının ideal ($t = 0,5$) olarak ve kutuplanma oranı hassasiyeti %0,2 ve kutuplanma açısının hassasiyeti 1,9 derece olarak belirlenmiştir. Bu değerler literatür ile uyumlu ve kabul edilebilir değerlerdir.

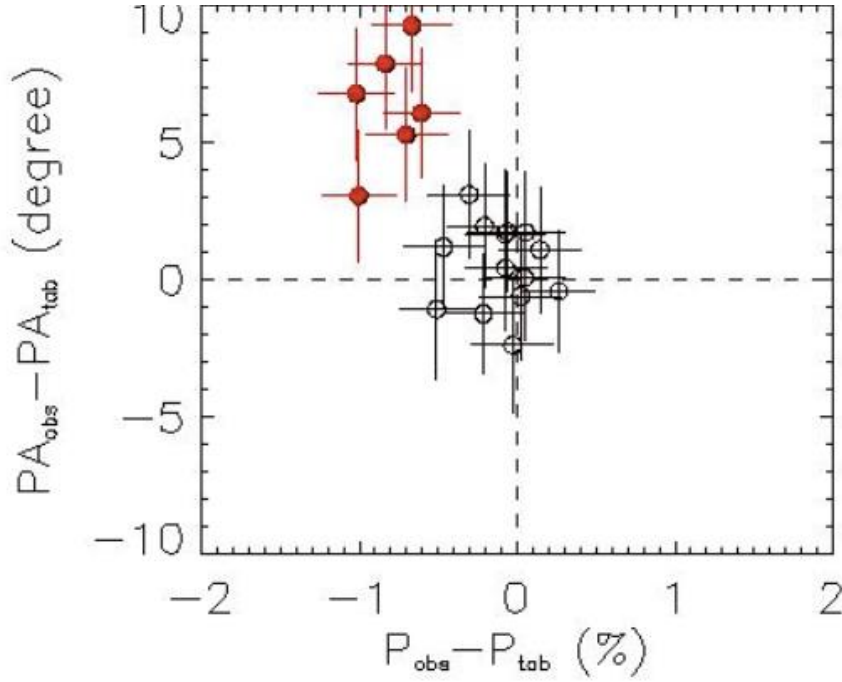
5.1. Test ve Kalibrasyon İçin Seçilen Standart Yıldızların Polarimetrik Gözlemlerinin Sonuçları

Güçlü polarize standart yıldızların polarimetrik gözlemlerinin V-bandında elde edilen sonuçları Çizelge 5.1'de verilmektedir. Çizelge 5.1'den de görüleceği gibi, tablolanmış değerler ile gözlemler arasındaki fark, 3σ seviyesinden fazla olarak ölçülmüştür

Çizelge 5.1. V-bandında bazı standart yıldızların fizik parametrelerinin sonuçları

Ad	P _{gözlenen}	P _{tablolanan}	PA _{gözlenen} (derece)	PA _{tablolanan}
BD+59d389	6,53 ± 0,2	6,70 ± 0,20	98,45 ± 1,2	98,10 ± 0,1
BD+64d106	5,63 ± 0,2	5,69 ± 0,04	96,98 ± 1,4	96,60 ± 0,2
HD236633	5,52 ± 0,1	5,49 ± 0,02	94,20 ± 0,7	93,76 ± 0,1
Hiltner960	4,86 ± 0,2	5,66 ± 0,02	60,70 ± 2,0	54,80 ± 0,1

Şekil 5.1'de, P: kutuplanma derecesi ve PA: kutuplanma açısı olmak üzere, Hiltner 960 (kırmızı renkli içi dolu daireler) için kaydedilen polarimetrik parametreler, tablolanmış değerlerden farklıdır ve bu kayma/değişim 3σ 'dan fazladır. Literatürden elde edilen verilere göre bu durum onun polarimetrik olarak değişen bir yıldız olabileceğini göstermektedir (Schmidt vd 1992).



Şekil 5.1. Gözlenen ve tablolanmış değerlerin kutuplanma derecesi ve kutuplanma oranı arasındaki farklar

5.2. DYA'ların Polarimetrik Gözlemlerinin Sonuçları

TFOSC-WP polarimetresi ile Dünya'ya yaklaşma döneminde olan üç adet DYA seçilmiştir. Bu DYA'ların V bandında hem polarimetrik hem de fotometrik gözlemleri yapılmıştır. Polarimetrik gözlemlerde elde edilen ilk sonuçlar Çizelge 5.2'de görülmektedir. Gözlemlenecek cismin parlaklık limitinin, 10dk lık poz süreleri için, 17 kadir ile sınırlı olacağı hesaplanmıştır.

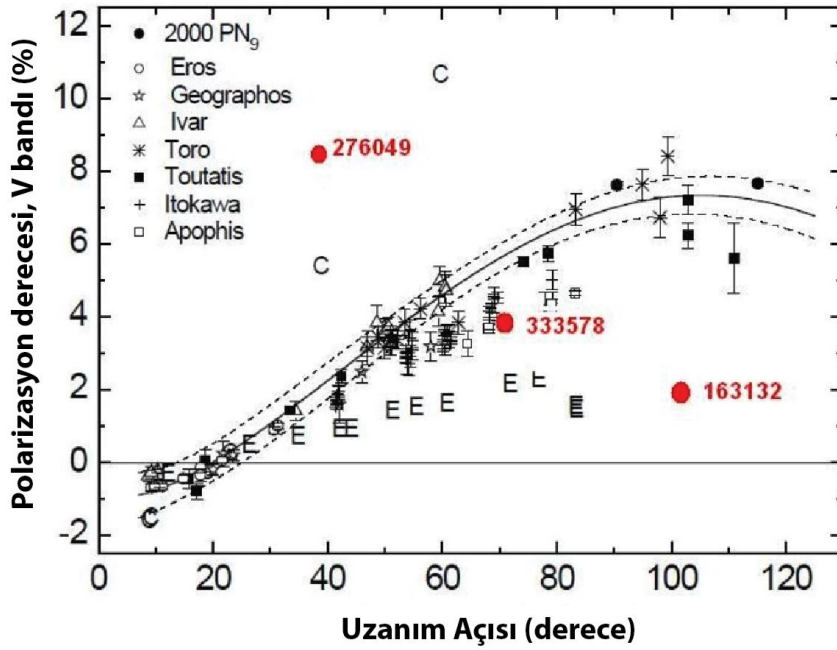
163132 asteroidi E-tipinde metal bolluğu olan, yüksek albedolu sahip bir asteroittir. Çapı yaklaşık 306 m'dir. 276049 asteroidi, C-tipinde karbon bolluğu olan, düşük albedolu bir asteroittir. Çapı yaklaşık olarak 3,1 km olarak hesaplanmıştır. 333578 asteroidi S-tipinde silisyum bolluğu olan, orta albedolu bir asteroittir. Çapı yaklaşık olarak 0,221 km hesaplanmıştır.

Böylece, 163132, 276049 ve 333578 numaralı asteroitler için Türkiye'de ilk defa polarimetrik yöntemle spektral sınıf (taksonomi), albedo ve çap belirlenmiştir. Çizelge 5.2'de adı geçen asteroitlerin hesaplanan bazı fizik parametreleri verilmektedir.

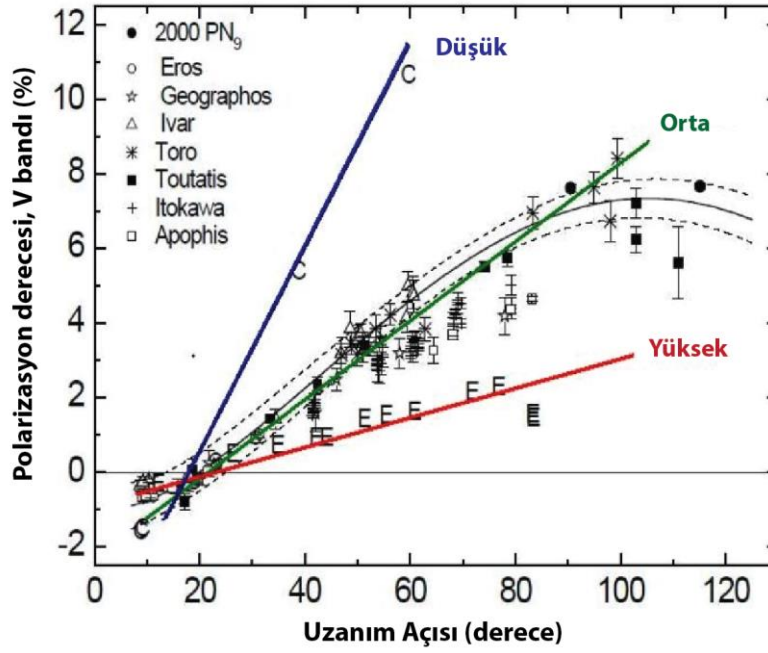
Çizelge 5.2. Gözlemlenen üç DYA'nın albedo, spektral tür ve çapları

Asteroit	Spektral tipi	p_v (albedo)	D (km)
163132	E – tipi (yüksek p_v)	$0,5 \pm 0,19$	$0,306 \pm 0,08$
276049	C – tipi (düşük p_v)	$0,043 \pm 0,005$	$3,106 \pm 0,29$
333578	S – tipi (orta p_v)	$0,25 \pm 0,023$	$0,221 \pm 0,03$

Gözlenen asteroidlerin elde edilen sonuçları Şekil 5.2'de kırmızı renkle gösterilmektedir. Şekil 5.3'de düşük, orta ve yüksek albedo özelliklerine ait asteroidler için kutuplanma derecesi-uzanım açısı grafiği görülmektedir (Belskaya vd 2009).



Şekil 5.2. S-sınıfı asteroidler için polarizasyon derecesi-uzanım açısı



Şekil 5.3. Düşük, orta ve yüksek albedo özelliğine sahip asteroidler

RTT150 teleskobunun fotometrik ve spektroskopik gözlem yetenekleri, geliştirilen polarimetrenin eklenmesi ile genişletilmiştir. TFOSC-WP'nin eklenmesi ile ESA (European Space Agency)'nın astrofizik amaçlı uzay görevi GAIA (Global Astrometric Interferometer For Astrophysics)'ya ve RTT150 teleskobunun gelecek hedeflerinden biri olan Spectrum-X Gamma uydusuna, yer tabanlı optik destek vermesiyle RTT150'nin gözlem yeteneklerini artırmıştır.

Cihazın kendi/içsel polarizasyonun lineer davranışı ekvatoryal koordinat sisteminde 1x5 yay-dk'lık uygun bir çalışma alanında astrofizik amaçlı yöntemlerle belirlenmiştir. Cihazsal sistemik hatalar, kutuplanma derecesi için %0,2 ve kutuplanma açısı için 1,9 derece olarak hesaplanmıştır.

İdeal olmayan Wollaston prizmasının kendi/içsel iletim katsayısından dolayı, Wollaston prizmaları arasındaki tüm iletim katsayılarının oranı sabit olarak hesaplanmıştır. Bu parametreler sabit olmasına rağmen, cihaz kalibrasyonu için bilimsel olarak ilgilenilen kaynakların polarimetrik araştırmalarının yapıldığı her gözlem gecesinde onların kontrolü gerekecektir. Polarimetre için gerekli kalibrasyonların not edilmesi enstitü programlarının bilimsel hedeflerine bağlıdır ve kalibrasyon işlemleri standart yıldızlar için gereklidir (örneğin, iyi bilinen kutuplanma derecesine ve iyi bilinen kutuplanma açısına sahip astronomik kaynaklar).

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mühendislik Fakültesi, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda gerçekleştirilen, ülkemizde yeni bir araştırma alanı olarak asteroitlerin bazı fiziksel parametrelerinin polarimetrik yolla incelenmesi için, TFOSC uyumlu optik polarimetre tasarımı yapılmış ve TUG ile Akdeniz Üniversitesi işbirliği ile Türkiye’de ilk kez polarimetrik gözlemler başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada, V-bandında TUG’da gözlenebilecek limitlerde olan güçlü polarize ve polarize olmayan standart yıldızların listesi literatürden taranarak oluşturulmuştur (Hsu ve Berger 1982; Schmidt vd 1992; Dolan ve Tapia 1986; Clemens ve Tapia 1990; Turnshek vd 1990). Bu liste sırasıyla Ağustos 2014, Eylül 2014 ve Nisan 2015’te TFOSC-WP kullanılarak hazırlanmıştır (Bkz. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8).

Çalışmanın bir sonraki hedefi dairesel kutuplanmayı ölçmek için bir polarizör tasarlamaktır. Dairesel polarimetri uzun yıllardır Zeeman etkisi üzerinde çalışmak için ve dolayısıyla manyetik alanın gücünü ölçmek için kullanılmıştır. Güneş’in manyetik alanı ile ilgili çalışan astronomlar özellikle manyetik alan teşhisinde Zeeman ve Hanle etkilerine dayalı teknikler geliştirmiştir. Örneğin, Donati (2005), yüksek spektral çözünürlüklü dairesel spektropolarimetre kullanarak FU Orionis’deki parlak yıldız oluşum bölgesinde bulunan yığılma diskinin çekirdeğindeki 1 kG kadar manyetik alanın gücünü göstermiştir. Bu gözlemler manyetik alanın yığılma diskleri ve onlarla ilişkili rüzgarlar ve jetlerde oynadığı rolün önemini belirlemede çok önemlidir (Hough 2015).

7. KAYNAKLAR

AFANASIEV, V.L. and AMIRKHANYAN, V.R. 2012. Technique of polarimetric observations of faint objects at the 6-m BTA Telescope. *Astrophysical Bulletin*, 67 (4): 438-452.

ARORA, A. 2014. Exploring Non-Sequential Mode in OpticStudio.
<http://www.zemax.com/support/resource-center/knowledgebase/exploring-non-sequential-mode-in-zemax>. [Son erişim tarihi: 11.11.2015]

ARAGO, D. F. J. 1855a. Polarisation of the Moon's light. *Popular Astronomy* 2, Longman Brown, Green and Longmans, 289s, London.

ARAGO, D.F.J., 1855b, The Comets, *Popular Astronomy* 1, Longman, Brown, Green and Longmans, 629s, London.

ASLAN, Z., BIKMAEV, I. F., VITRICHENKO, É. A., GUMEROV, R. I., DEMBO, L. A., KAMUS, S. F., KESKIN, V., KIZILOGLU, U., PAVLINSKY, M. N., PANTELEEV, L. N., SAKHIBULLIN, N. A., SELAM, S. O., SUNYAEV, R. A., KHAMITOV, I. and YASKOVICH, A. L. 2001. Preliminary Results of the Alignment and Hartmann Tests of the AZT-22 Telescope. *Astronomy Letters*, 27: 398-403.

BALANIS, C.A. 1989. *Advanced Engineering Electromagnetics*. Arizona University. John Wiley&Sons, Inc. 156-163.

BESSELL, M.S. 2005. Standard Photometric Systems, *Annual Review of A&A*, 43 (1): 293-336

BINZEL, R.P., LUPISHKO, D., DI MARTINO, M., WHITELEY, R. J. and HAHN, G.J. 2002. Physical Properties of Near-Earth Objects, *Asteroids III*, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, 255-271.

BIRLAN, M., COLAS, F., NEDELCO, A., VERNAZZA, P. and KRYSZCZYNSKA, A. 2006. Spectroscopy of Binary Asteroid 809 Lunda, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 38: 593.

BRUTON, D. 2008. Conversion of Absolute Magnitude to Diameter for Minor Planets. Department of Physics & Astronomy (Stephen F. Austin State University).
<http://www.physics.sfasu.edu/astro/asteroids/sizemagnitude.html> [Son erişim tarihi: 11.11.2015]

- BINZEL, R.P., RIVKIN, A.S., STUART, J.S., HARRIS, A.W., BUS, S.J. and BURBINE, T.H., 2004. Observed spectral properties of near-Earth objects: results for population distribution, source regions, and space weathering processes, *Icarus*, 170 (2): 259-294.
- CAÑADA-ASSANDRI, M., GIL-HUTTON, R. and BENAVIDEZ, P. 2012. Polarimetric survey of main-belt asteroids*. III. Results for 33 X-type objects, *A&A*, 542: 5.
- CELLINO, A. 2013. Asteroid Polarimetry: State of the Art and Perspectives, COST Meeting, Osservatorio Astrofisico di Torino, pp. 18.
- CHANDRASEKHAR, S. 1946. On the Radiative Equilibrium of a Stellar Atmosphere. XI., *Astrophysical Journal*, 104: 110.
- CLARKE, D. 2010. Stellar Polarimetry. Wiley-VCH Verlag GmbH&Co. KGaA, Weinheim. 3-15s, 104-105s.
- CLEMENS, D.P. and Tapia, S. 1990. Toward selection of intermediate-magnitude polarization standarts. *Astron. Soc. Pac.*, 102: 179-182.
- DELBO, M. and LIGORI, S. 2007. First Interferometric Observations of Asteroids with the VLTI*, American Astronomical Society, DPS meeting #39, #30.04; *Bulletin of the American Astronomical Society*, 39: 469.
- DOLAN, J.F. and TAPIA, S. 1986. Wavelength dependence of position angle in polarization standarts. *Pub. Astron. Soc. Pac.* 98: 792-802.
- EDMUND Optics. 2015. Optics and Optical Instruments Annual Catalog (E159B). 158-164 s.
- FORNASIER, S., BELSKAYA, I. N., SHKURATOV, Y. G., PERNECHELE, C.; BARBIERI, C., GIRO, E. and NAVASARDYAN, H. 2006. Polarimetric survey of asteroids with the Asiago telescope, *Astronomy and Astrophysics*, 455 (1): 371-377.
- FREEMAN, M.H. and HULL, C.C. 2003. Optics. Butterworth-Heinemann, 396-397 s.
- GIL-HUTTON, R. 2007. Polarimetry of M-type asteroids, *A&A*, 464 (3): 1127-1132.
- GIL-HUTTON, R. and CAÑADA-ASSANDRI, M. 2012. Polarimetric survey of main-belt asteroids. II. Results for 58 B- and C-type objects, *A&A*, 539:4.
- GOROSABEL, J., GARCÍA M., A, SÁNCHEZ-LAVEGA, A.; HUESO, R. and PÉREZ H. 2014. S. Optical linear polarimetric observations of Solar System bodies using a Wedged Double Wollaston. EPSC Abstracts, EPSC2014, 9: 300.

- GÖĞÜSDERE, Ş. 2006. Uzay-Polarizasyon Çeşitlemeli Akıllı Anten Sistemlerinin Rayleigh Sönümlü Kanallardaki Başarımı. Doktora tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, 36-41s.
- HECHT, E. 2002. Optics. Addison Wesley. Adelphi University. San Francisco. 330-344, 373-379 s.
- HELHEL, S., KAHYA, G., KHAMITOV, I. and BAYAR, C. 2014. Design of TFOSC Compatible Polarimeter for Polarimetric Observations, Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Guangzhou, China, Aug. ss. 1591-1594.
- HELHEL, S., KHAMITOV, I., KAHYA, G., BAYAR, C., KAYNAR, S. and GUMEROV, R. 2015. Double Wedged Wollaston Type Polarimeter Design and Integration to RTT150-TFOSC; Initial Tests, Calibration and Characteristics, *Experimental Astronomy*, 39 (3): 595-604.
- HSU, J.-Ch. and BERGER, M. 1982. On standard polarized stars. *Astrophys. J*, 262: 732.
- HOUGH, J. 2006. Polarimetry: a powerful diagnostic tool in astronomy, *A&G*, 47 (3): 3.31-3.35.
- KAWABATA, K. S. et al. 2003. Properties of FOCAS optical components. Instrument Design and Performance for Optical/Infrared Ground-based Telescopes. Edited by Iye, Masanori; Moorwood, Alan F. M. Proceedings of the *SPIE*, 4841: 1219-1228.
- KHAMITOV, I., BIKMAEV, I. and BURENIN, R. 2012. Rus-Türk Teleskopu RTT150. Türkiye'deki Teleskoplarla Bilim Sempozyumu, ss. 97-104, 14-15 Mayıs, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
- KHAMITOV, I., GUMEROV R., BIKMAEV I., ASLAN Z., HELHEL S., G. KAHYA, PINIGIN G. 2015. Investigations of the Solar System Objects at RTT150. The 6th Moscow Solar System Symposium (6M-S3), Abstract booklet, ab-275, 5-9 Ekim, IKI, Moscow.
- LAGERKVIST, C.-I. and MAGNUSSON, P. 1990. Analysis of asteroid lightcurves. II - Phase curves in a generalized HG-system, *Astronomy and Astrophysics Supplement Series* (ISSN 0365-0138), 86 (2): 119-165.
- LEROY, J.-L. 2000. Polarization of Light and Astronomical Observation. Gordon and breach science publishers, *A&A*, 4: 5-17, 89-92, Netherlands.
- LUPISHKO, D.F. and BELSKAIA, I.N. 1983. Surface, shape and rotation of the M-type asteroid 16 Psyche from UBV photometry in 1978 and 1979, IN: Asteroids, comets, meteors; Proceedings of the Meeting, (A85-26851 11-89). pp. 55-61, June 20-22, Astronomiska Observatoriet, Sweden.

- LUPISHKO, D.F. and MOHAMED, R.A. 1996. A New Calibration of the Polarimetric Albedo Scale of Asteroids, *Icarus*, 119 (1): 209-213.
- LUPISHKO, D.F. and DI MARTINO, M. 1998. Physical properties of near-Earth asteroids, *Planetary and Space Science*, 46(1): 47, 55-53,74.
- LUPISHKO, D.F., MARTINO, M.D. and BINZEL, R.P. 2007. Near-Earth objects as principal impactors of the Earth: Physical properties and sources of origin, *Near Earth Objects, our Celestial Neighbors: Opportunity and Risk*, Proceedings of IAU Symposium 236. Cambridge University Press. 251-260 s.
- LUPISHKO, D.F. and VASILYEV, S.V. 2012. Asteroid Polarimetric Database V7.0, NASA Planetary Data System, EAR-A-3-RDR-APD-POLARIMETRY-V7.0, *Astron. J.*, 749(2): 6.
- MUINONEN, K., PIIRONEN, J., SHKURATOV, YU. G., OVCHARENKO, A. and CLARK, B.E. 2002. Asteroid Photometric and Polarimetric Phase Effects, *Asteroids III*, W.F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, and R.P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, pp.123-138.
- OLIVA, E. 1997. Wedged double Wollaston, a device for single shot polarimetric measurements, *A&A*, 123:589-592.
- OZANSOY, A. 2008. Kutuplanma (Polarizasyon). Ankara Üniversitesi, Fizik Bölümü, <http://80.251.40.59/science.ankara.edu.tr/aozansoy/kutuplanma.pdf> [Son erişim tarihi 11.11.2015]
- PATAT, F. and ROMANIELLO, M. 2006. Error Analysis for Dual-Beam Optical Linear Polarimetry. *Pub. Astron. Soc. Pac.*, 118: 146-161.
- PENTTILÄ, A., LUMME, K., HADAMCIK, E. and LEVASSEUR-REGOURD, A.-C. 2005. Statistical analysis of asteroidal and cometary polarization phase curves, *Astronomy and Astrophysics*, 432(3): 1081-1090.
- PERNECHELE, C., GIRO, E. and FANTINEL, D. 2003. Device for optical linear polarization measurements with a single exposure, *Polarimetry in Astronomy*. Edited by Silvano Fineschi. *SPIE*, 4843: 156-163.
- PERNECHELE, C., ABE, L., BENDJOYA, P., RIVET, J. P., CELLINO, A., MASSONE, G. and TANGA, P. 2012. A single-shot optical linear polarimeter for asteroid studies. *Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*. *SPIE*, 8446: 6.
- SCHMIDT, G.D., ELSTON, R. and LUPIE, O.L. 1992. The Hubble Space Telescope Northern-Hemisphere grid of stellar polarimetric standards, *Astron. J.*, 104 (4): 1563-1567.

SHAKHOVSKOY, N.M. and EFIMOV, Y.S. 1972. Polarization observations of nonstable stars and extragalactic object. I: Equipment, method of observation and reduction. *Izv. Krymskoi Astrofiz. Obs.*, Tom., 45: 90-110.

SNIK, F. 2009. Astronomical Polarimetry new concepts, new instruments, new measurements & observations, Ph.D. Thesis, University Utrecht, The Netherlands, 5-7s.

SNIK, F., KARALIDI, T. and KELLER, C.U. 2009. Spectral modulation for full linear polarimetry, *Applied Optics*, 48 (7): 1337-1346.

STOKES, G.C. 1852. On the composition and resolution of streams of polarized light from different sources, *Trans. Cambridge Philos. Soc.*, 9: 399–416

TAURI, T. 2010. Stars Optical lucky imaging Polarimetry of HL and XZ Tau, Master of science Thesis in Astrophysics, Stockholm University, Magus Persson, pp:12-13.

SERWAY, R. A. and BEICHNER R.J. 2007. Fen ve Mühendislik için Fizik, Cilt 2, Palme Yayıncılık, pp. 1233-1234, Ankara.

SØRENSEN, A.N. 2004. Evaluation of the CCD camera for TFOSC, equipped with Fairchild CCD 447BI Device ID E7256W4D5, Copenhagen University Observatory, http://www.tug.tubitak.gov.tr/images/rtt150/tfosc/fair447_e7256w4d5.pdf [Son erişim tarihi 11.11.2015].

TINBERGEN, J. 1996. Astronomical Polarimetry. Cambridge University Press, pp. 14-17, 43-97.

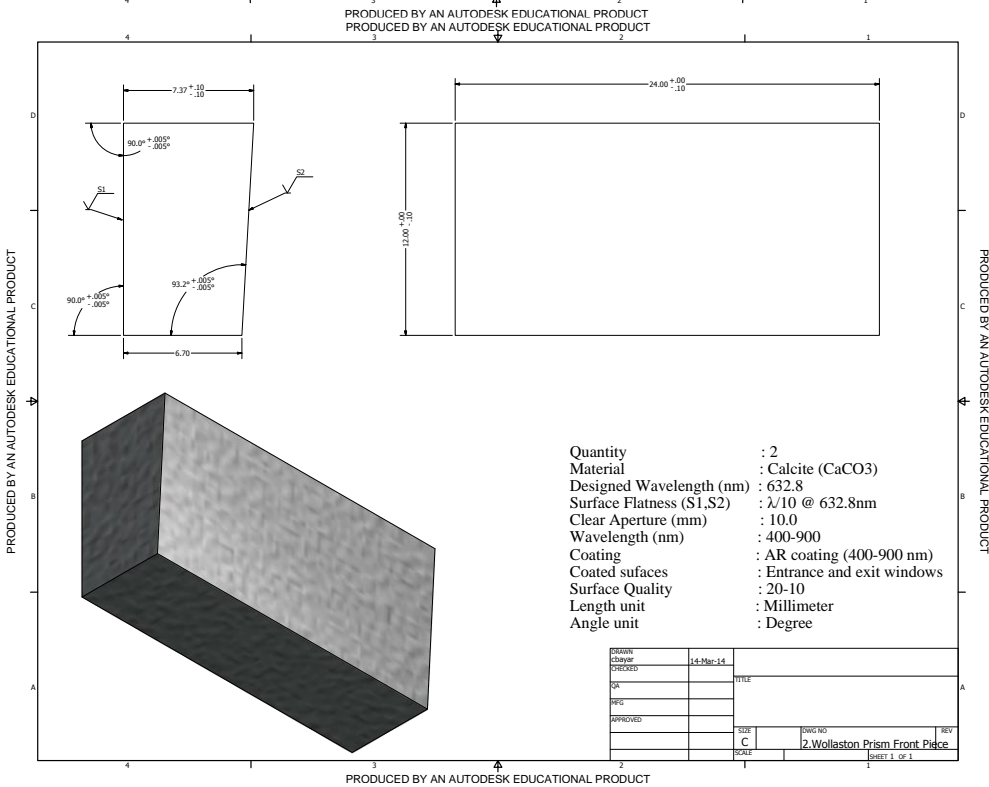
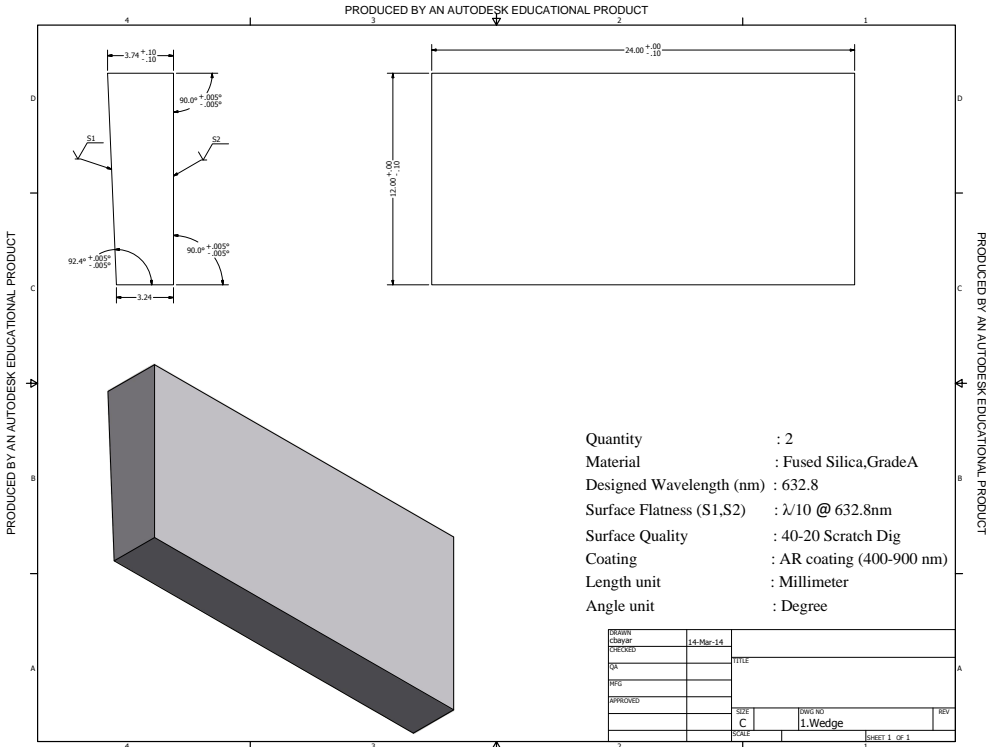
TRIPPE, S. 2013. Polarization And Polarimetry: A Review, Department of Physics and Astronomy, Seoul National University, pp.151-742, Seoul.

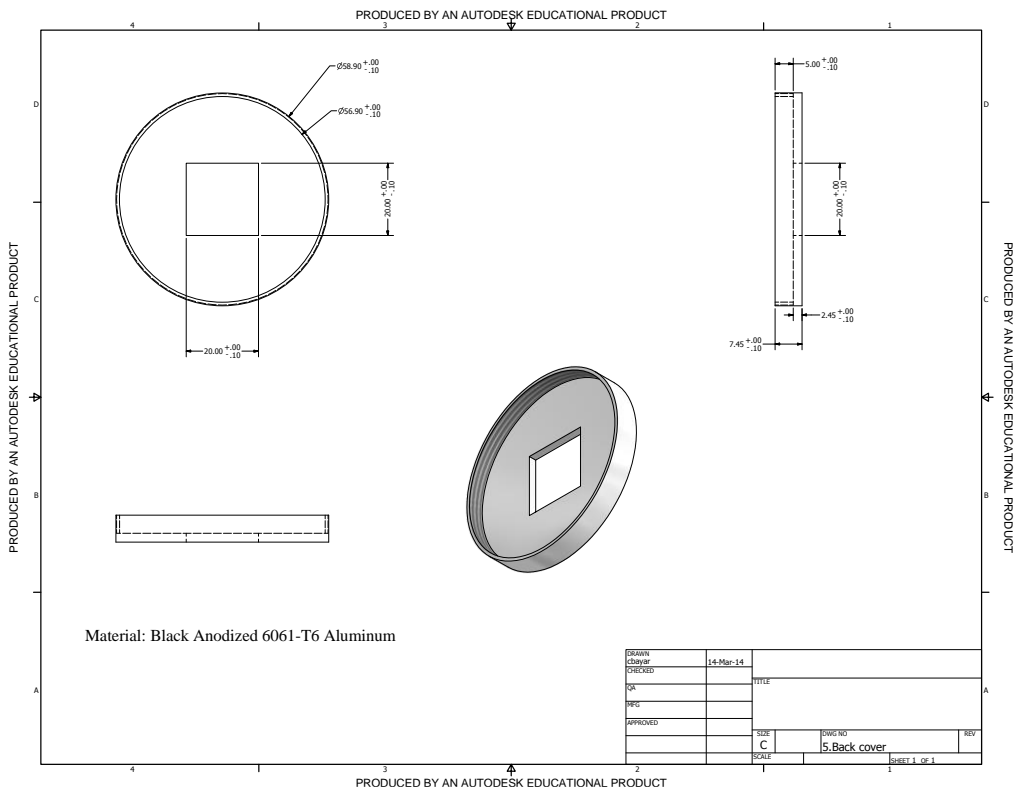
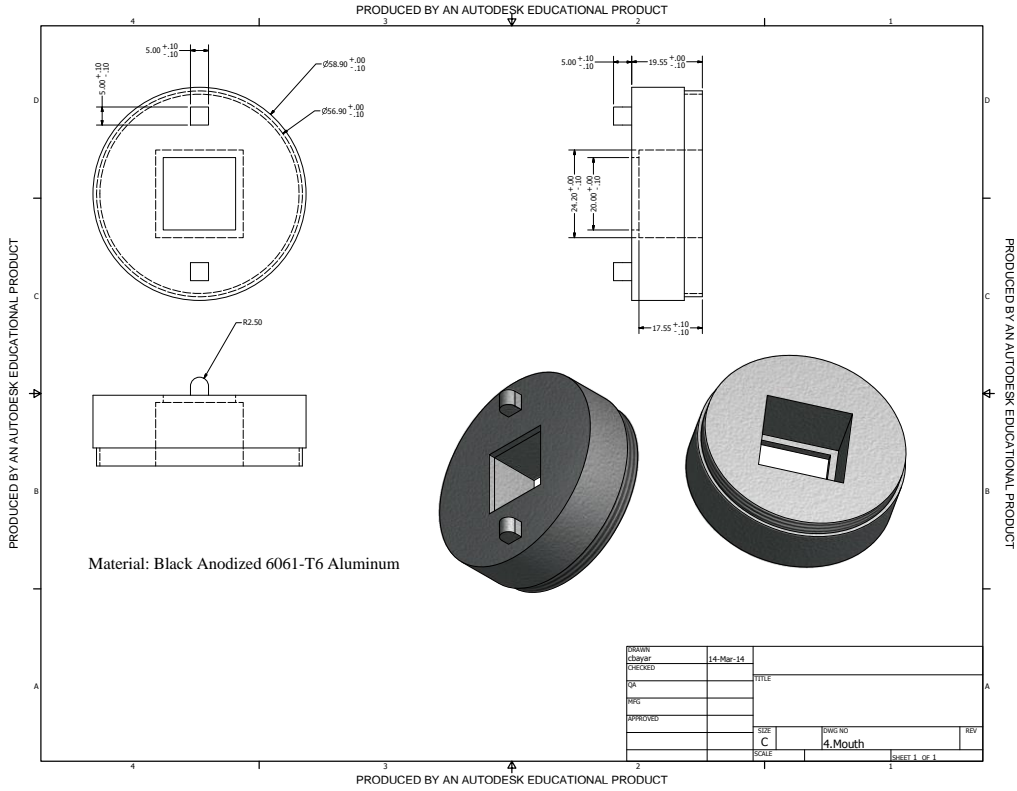
URNSHEK, D.A., BOHLIN, R.C., WILLIAMSON, R.L., II, LUPIE, O.L., KOORNNEEF, J. and MORGAN, D.H. 1990. An atlas of Hubble Space Telescope photometric, spectroscopic, and polarimetric calibration objects. *Astron. J.* 99: 1243.

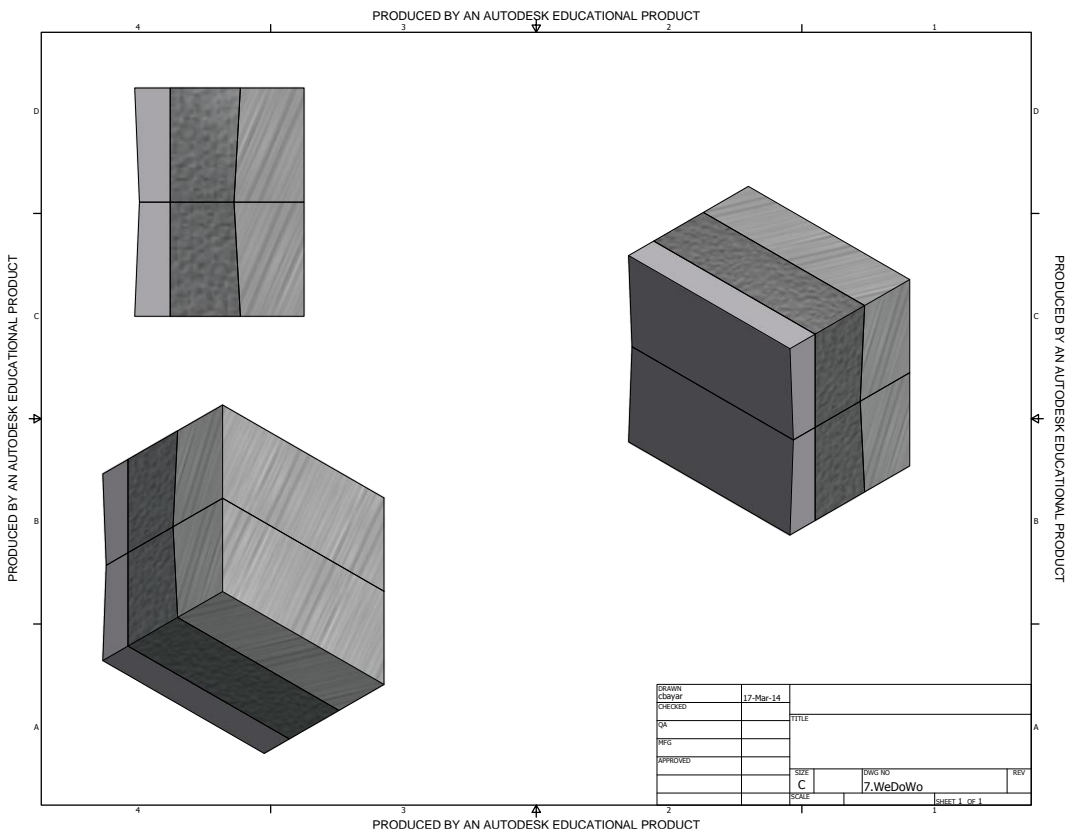
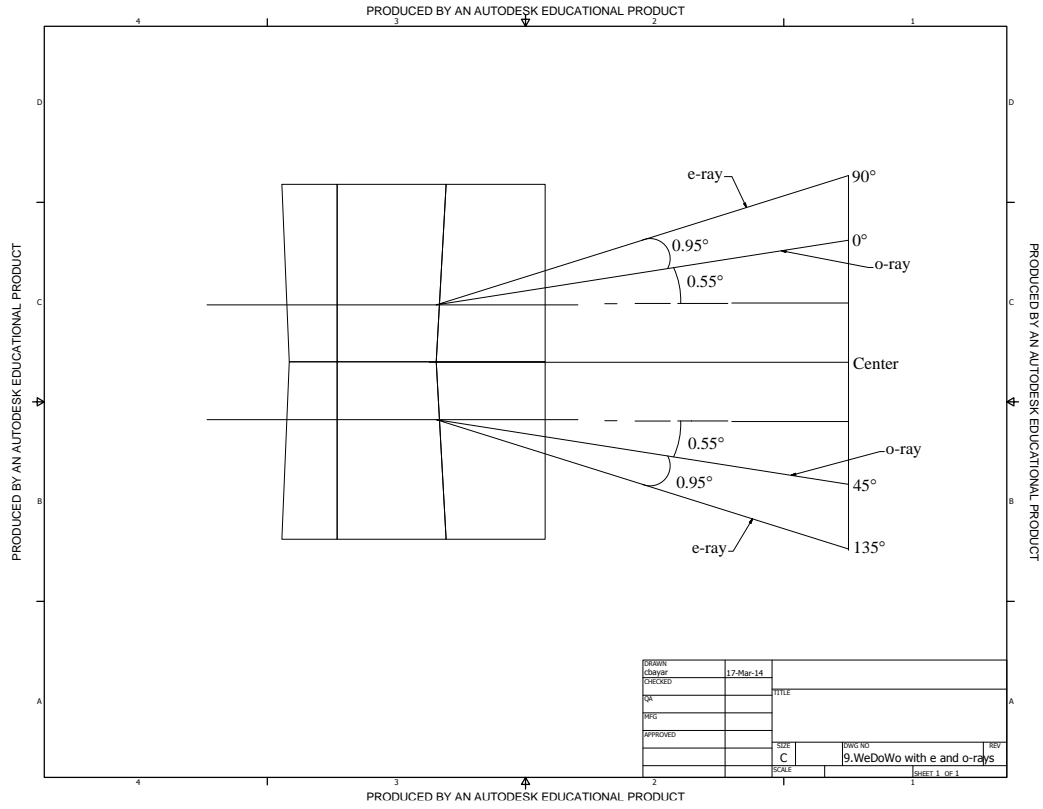
ZEMAX User's Guide 2013.

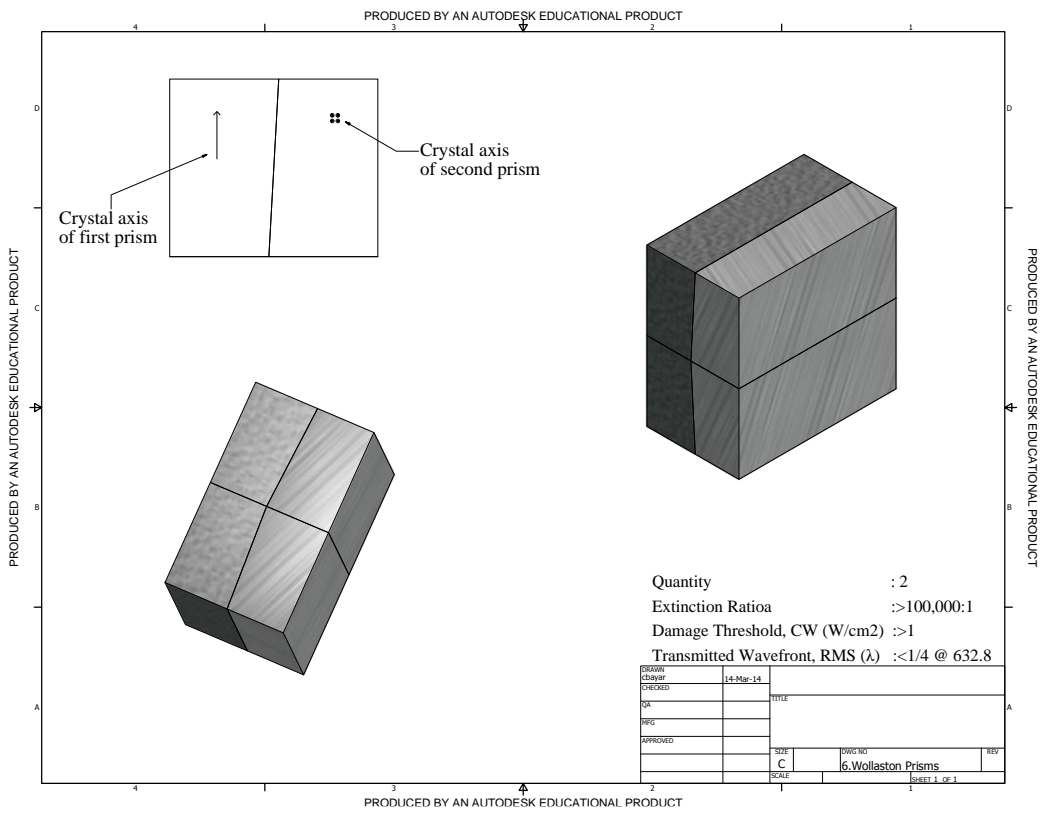
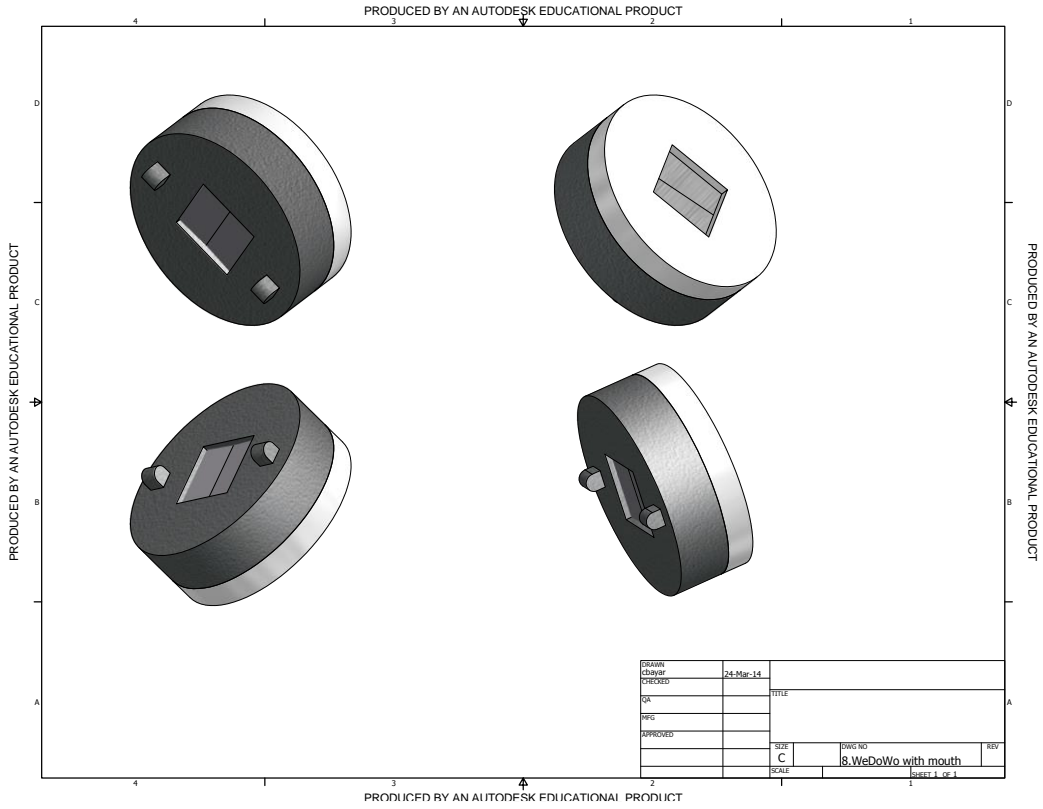
8. EKLER

EK-1 ZEMAX AutoCAD Çizimleri









EK-2 RTT150, TFOSC-WP Gözlem Kılavuzu

Gözlem adımları:

- Bias
- Flat
- Asteroit ve standart yıldız gözlemlerinden oluşmaktadır.

Gözleme Başlama Ve Standart Yıldız Gözlemleri

Flat alma aşaması;

Imaging için her zaman full frame alınmalıdır.

- Teleskop Güneş'in konumunun zıt yönüne doğru konumlandırılmalıdır. (Akşam doğu, sabah batı)
- Akşamüzeri BVRI, sabah RIVB sırasını takip etmek daha etkili bir yöntemdir.
- İlk görüntü alındığında sayımlar kontrol edilmeli, 10000'den fazla olduğundan emin olunmalıdır.
- Doğru kalibrasyon yapmak için flat görüntülerinde aynı filtre için her bir görüntüden sonra teleskobu bir miktar hareket ettirmek gereklidir. (shift + delete vb.)
- Her bir filtre için beş görüntü tavsiye edilmektedir, zaman kısıtlı ise en az üç görüntü alınmalıdır.

Polarimetre için uygun flatlar:

Polarimetrik görüntü için sub-frame (ybeg 700, ysize 800)

- Optik yolda: mask + polarimetre + filtre (asteroit/standart yıldız gözlemi ile aynı) olmalı.
- Gökyüzü polarize bir kaynaktır. Bunun için iki set iki yerden flatlerin alınması gerekmektedir. İki bölgelerin yönü arasında 90 derece fark olmalıdır. Önerilen bölge:

1. Meridyen

(HA_1=0^h, DEC_1=80°), (HA_2=0^h, DEC=-10°).

Kubbe Güneyde.

Birinci bölgede 3'er adet flat alıp hemen ikinci bölgeden de 3'er adet flat aynı filtrede alınmalıdır.

1. Batı-Doğu

(Azimut_1=90°, Yükseklik_1=45°)

(Azimut_2=270°, Yükseklik_2=45°)

Kubbe Batı veya Doğu tarafa açık.

Akşam ve sabah flatları Doğudan başlayıp Batıda bitirmelidir.

Gözleme başlama aşaması; öncelikle teleskop tam doğuya çevrilir ve Bessel filtrelerinin her birinden (B, V, R, I) 'dan 3'er adet alınarak başlanır. Alınan flatlerdeki değerler 10000 den fazla olmalıdır. Ardından binning değeri 2 olarak ayarlanıp 'bin2' komutu ile, her bir Bessel filtresinde tekrar görüntüler alınır.

Full frame alma aşaması; mask, grism empty yapılarak FASU A'dan, B-filtresi seçilerek, bin1 komutu ile her bir filtreden birer tane daha görüntü alınır. Sonrasında bias alma aşamasına geçilir. HA seçilerek; H: (Alfa) 00 00 00, (Delta): 36 49 27 değerleri girilir.

Bias alırken; BIAS hem bin 1, hem bin 2 her zaman full frame olarak alınmaktadır. Binning seçimi şu şekilde yapılır: 17^m'den daha sönük kaynaklar için Binning 2 alınır. Diğer kaynaklar için ise Binning 1 kullanılır.

Gözleme flat zamanından önce, flat almak için zaman yetecek şekilde bias alınarak başlanır:

1. bin1
mdark 0 10 (multiple dark sıfır saniye poz süresi 10 tane görüntü)
2. bin 2
mdark 0 10

```
> filename bias0001
> object bias
> imtype bias
> bin1
> mdark 0 10
```

Komutları verilir. Ardından binning 2 için aynı işlem tekrarlanır.

```
> filename bias0001
> object bias
> imtype bias
> bin2
> mdark 0 10
Bu işlemde bitince;
> Bin1
> ybeg 700
> ysize 800
make_polarimetry_images sa.prog
```

komutları verilir ve dome track aktif edilir. Ardından aşağıdaki komutu verilir.

```
>telescope_set_dfocus -0.02
```

Standart yıldız gözlemleri alınarak esas gözlemlere başlanır. UT (Universal Time) dikkate alınarak, polarize olmayan ve polarize olan standart yıldızların gözlemleri yapılır.

Standart Yıldız Gözlem Tekniği

Standart yıldız gözlemleri, aşağıdaki standart yıldız tablosuna göre uygun yıldız seçilerek yapılır.

- Alanı tanıyabilmek için mask ve polarimetre optik yoldan çekilerek sadece filtre kalacak şekilde ayarlanır.
- Aladin vb. kataloglardan yararlanarak yıldız tespit edilir.
- Yıldızın yeri yarığın ortasına gelecek şekilde ayarlanır.
- Yıldızın odağı yapılır.
- Yarık ve WP optik yola alınır.
- SNR=100 olmasına dikkat edilir, maksimum 40000 ADU olmalıdır.
- WP'nin çalışma bölgesi $800 \text{ piksel} < X < 1600 \text{ piksel}$ 'dir.

Bunun için farklı Y koordinatı (kenardan 20-30 piksel uzaklıkta ve bölgenin merkezinde), $600 \text{ piksel} < X < 1800 \text{ piksel}$ alanda aynı standart yıldızın görüntüleri alınmaktadır.

DYA Asteroit Gözlemi:

- WP'ye uygun bölge ayarlanır: ybeg 700, ysize 800.
- Alanı tanıyabilmek için yarık ve polarimetre optik yoldan çekilerek sadece filtre kalacak şekilde ayarlanır.
- NASA Horizon veya MPC yardımı ile asteroitin güncel koordinatları elde edilir.
- Aladin vb. kataloglardan yararlanarak asteroitin yeri tespit edilir.
- NASA Horizontan asteroitin alfa ve delta eksenlerindeki hareketi ayrı ayrı hesaplanır.
- Verilen yönde takip (VYT) hesaplanan değerlere göre ayarlanır ve aktif edilir. (VYT kullanımı aşağıda anlatılmıştır). Hassasiyet, 2000 ms olmalıdır.
- Görüntü alındığında asteroit nokta şeklinde yıldızlar ise iz yapmış olmalıdır.
- VYT devrede iken ince düzeltme yapılabilir. *Corr* alanın işareti kaldırılır ve *coord* komutunun X-Y-G tuşlarıyla kaynak gerekli yere getirilir. Sonra hemen *REFRESH* düğmesine basıp *Corr* alanı işaretlenir – teleskop VYT devreye girer.

Asteroit $1000 < X < 1200$, $490 < Y < 510$ bölgesine getirilmeye çalışılmalıdır.

- DYA asteroitlerin polarimetre gözlemlerinde V filtrede *Bin 2*'de 120 sn poz süresinde beş tane görüntü alınır (parlaklık $16^m - 17^m$).
- DYA asteroitlerin fotometre gözlemleri BVRI filtrelerde *Bin 2*'de 5 tane seri B120, V90, R60, I60. Beş tane aynı filtrede değil tam BVRI sırada yapılmalıdır. Asteroit dönüyorsa ve doğru renk çıkartılmak isteniyorsa BVRI sırasına uyulmalıdır.
- VYT devrede iken kesinlikle teleskop yeni bir kaynağa yöneltmemelidir.

- Gözlem bitince VYT devreden çıkartılır, sonrasında teleskop yeni bir kaynağa yöneltilir.

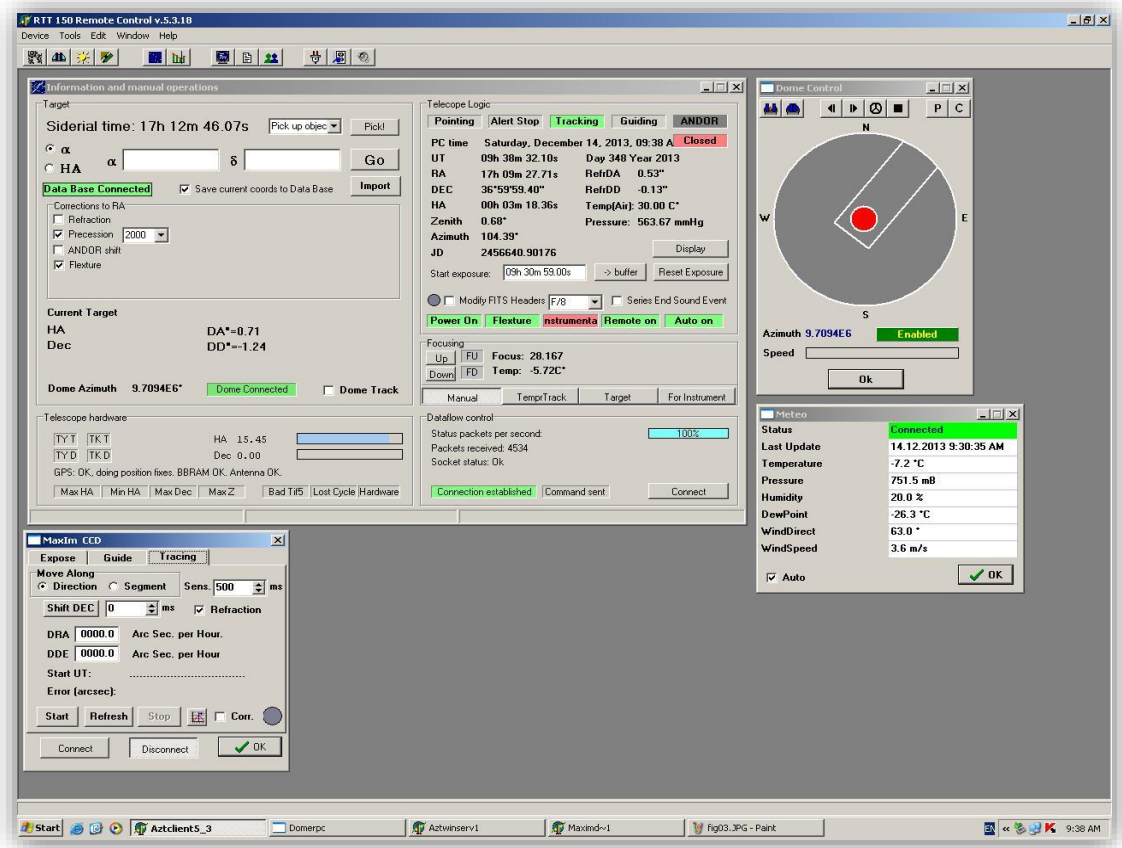
Fotometri yapıyorsa gözlemden önce ve sonra Landolt standardında aynı hava kütlesinde BVRI görüntüler alınmalıdır (SNR>100 olmalıdır).

Aynı durumlar TFOSC-WP polarimetre gözlemleri için de geçerlidir. Yıldızlar asteroidlerin gözlenen CCD bölgesinde olmalıdır.

Verilen Yönde Teleskop Takibi (VYT)

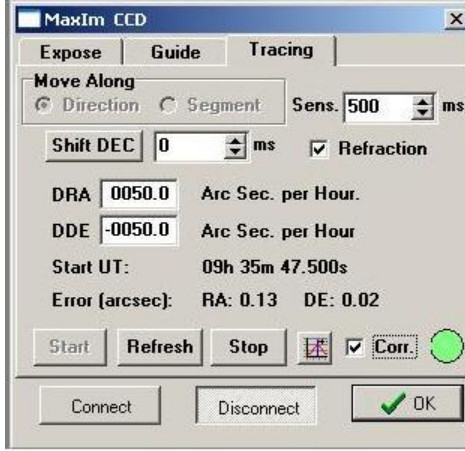
Şekil 1'den görüldüğü gibi VYT kontrol penceresi; Teleskop Kontrol Sistemin (TKS) ana panosundan:

- *Device -> MaxIm -> Enter*, seçilince MaxIm CCD adlı kontrol penceresi açılır ve buradan Tracing sekmesine tıklayarak VYT kontrol penceresine ulaşılır.
- Telescop Logic penceresinde Refraction (yeşil) üzerine çiftle tıklayarak yerine Instrumental (kırmızı) moduna geçirilir.



Şekil 1. VYT kontrol penceresi

MaxIm CCD/Tracing penceresi:



Şekil 2. MaxIm CCD/Tracing penceresi

Şekil 2’de MaxIm CCD penceresi görülmektedir. MaxIm CCD ana panosundaki bilgi giriş alanları aşağıda açıklanmıştır.

- Sens: Verilen yönden teleskobun mevcut pozisyonun farkı (tolerans). Birimi milli yay saniyedir. Tolerans, Sens değerinden fazlaysa motorlara komut gönderilir ve fark sıfıra indirilir.
- DRA: Hareket eden cismin sağ açıklığının hızı ($\alpha \cdot \cos \delta$) bir saatte yay saniye birimindedir. İlk pozisyon işaret için +/- (hız pozitif ise + işaret yazılmayabilir).
- DDE: Hareket eden cismin dik açıklığının hızı (δ) bir saatte yay saniye birimindedir. İlk pozisyon işaret için +/- (hız pozitif ise + işaret yazılmayabilir).
- Error (arcsec): RA-tolerans sağ açıklık ekseninde, DE-tolerans deklinasyon (dik açıklık) ekseninde. Birimi yay saniyedir.

DÜĞMELER

- Start: Sens, DRA, DDE değerlerine göre takibi başlatmak.
- Stop: Sens, DRA, DDE değerlerine göre takibi durdurmak.
- Refresh: RA, DE toleransları sıfırlamak.
- Shift DEC: Verilen yönde takip çalıştığında dik açıklık ekseninde teleskobu kaydırma yapar. Mili yay-saniye birimindedir.
- Seçme kutusu Corr: Seçilirse TKS sistemin motorlara komutları göndermeye başlar ve VYT devreye girer.

VYT çalışma prensibi

Bu sistem sadece teleskobun *RA*, *DEC* eksenlerinin göstergelerine göre çalışmaktadır. Gökyüzünden herhangi bir geri dönüşümlü sinyal (Autoguider gibi) kullanmaz. VYT’nin devreye girme süresi bir kaç dakika olabilir (en çok 3 dakika, genelde bir kaç saniye). Sens, DRA, DDE değerleri girilince, Start düğmesine basılır ve VYT devreye girmeye başlar. Bu arada RA toleransı hızlı şekilde değişir. VYT devreye girerse RA toleransı DRA hızına uyarak değişmeye başlar. Refresh düğmesine basarak

Corr kutusunu seçildikten sonra VYT sinyallerini TKS sistemine göndermeye başlar ve teleskop hareket eden cismi takip eder.

TFOSC yarığına cismi getirme işlemleri (Tayf almak için): *Corr* bayrağını kaldırıp ve *Shift DEC* değerini belirtip *Shift DEC* düğmesine basılır. Teleskop pozisyonu değiştirince *Refresh* düğmesine basıldıktan sonra *Corr* bayrağını seçilir. Cismin pozisyonu tekrar kontrol edilir.

VYT'nin Devreden Çıkartılması: VYT durdurmak için *Stop* düğmesine basılır.

RTT150 TFOSC Sistemi İçin ÖNEMLİ UYARILAR:

- Autoguider kapalı olmalıdır.
- Teleskobun yeni kaynağa yönlendirilmesi veya ince ayar yapılması VYT durdurulduktan sonra yapılır.

NOT: Şu ana kadar en hızlı kaynağın öz hareketi 200"/saat VYT yapılmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Gizem KAHYA, 10.02.1989 tarihinde Antalya’da doğmuştur. Eğitim hayatına Antalya ilinde bulunan Akev Koleji’nde başlamıştır. Ardından, Fatma Gül Özpınar İlköğretim Okulu’nda devam etmiştir. Lise öğrenimini Antalya’daki Aldemir-Atilla Konuk Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2008 yılında girdiği Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünden 2012 yılının Haziran ayında mezun olmuştur. 2013 yılının Şubat ayında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında yüksek lisans eğitimine başlamıştır. 2013 yılının Mayıs ayında Teleskop Uzmanı Yetiştirme (TUY) projesi kapsamında TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi (TUG)’nde göreve başlamıştır ve halen çalışmaya devam etmektedir.

Yayınlar:

SCI Tarafından Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler ve Bildiriler:

1. S. HELHEL, İ. KHAMİTOV (HAMİTOĞLU), **G.KAHYA**, C. BAYAR, S. KAYNAR, R.GUMEROV. 2015.Double Wedged Wollaston Type Polarimeter Design and Integration to RTT150-TFOSC; Initial Tests, Calibration and Characteristics, Experimental Astronomy, DOI 10.1007/s10686-015-9468-8, 39(3): 595-604.
2. S. HELHEL, **G. KAHYA**, İ. KHAMİTOV, C. BAYAR: 2014, Design of TFOSC Compatible Polarimeter for Polarimetric Observations, '35. PIERS', 25-28.08.2014, Guangzhou (Canton), CHINA., p.1591-1594.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler:

1. İ. KHAMİTOV, S. HELHEL, **G. KAHYA**, S. KAYNAR, C. BAYAR, R. GUMEROV. 2014, Polarimetric observations of NEAs at RTT150. First results. 'GAIA-FUN-SSO 3rd Workshop', 24-26.11.2014, Paris Observatory, France, p.107-110.

Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan posterler:

1. İ. KHAMİTOV, R. GUMEROV, S. HELHEL, **G. KAHYA**, S. KAYNAR: 2014, Investigation of physical characteristics of NEAs on RTT150 in frame of GAIA-FUN-SSO, (HEA-2014) 'High Energy Astrophysics, Today and Tomorrow' 22-25 December 2014, IKI Moscow, Russia, p.68-69.
2. İ. KHAMİTOV, R. GUMEROV, I. BIKMAEV, Z. ASLAN, S. HELHEL, **G. KAHYA**, G. Pinigin: 2015, Investigations of the Solar System Objects at RTT150, The 6th Moscow Solar System Symposium (6M-S3) IKI, Moscow, Abstract booklet, ab-275, 5-9 October

Ulusal Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler:

1. **G. KAHYA**, İ. HAMİTOĞLU, S. HELHEL, S. KAYNAR, C. BAYAR, R. GUMEROV, O. OKUYAN: 2015, RTT150 TFOSC Uyumlu Optik Polarimetre Tasarımı, 'UAK-2015', 2-6 Şubat ODTÜ, ANKARA.

Kataloglar & Kitapçıklar & Dergiler

1. **G. KAHYA**, İ. KHAMİTOV, S. HELHEL: 2015, "Gözlem Kılavuzu" ve "Gözlenebilecek Polarize ve Polarize Olmayan Standart Yıldız Listesi", TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi
2. **G. KAHYA**, İ. KHAMİTOV, S. HELHEL: 2015, "TFOSC-WP POLARİMETRE KULLANIM KILAVUZU" el kitabı, TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi, <http://tug.tubitak.gov.tr/tr/duyuru/rtt150-tfosc-uyumlu-tasarlanan-polarimetre-kilavuzu-yayinlandi>, 24.08.2015.
3. **G. KAHYA**, İ. KHAMİTOV, S. HELHEL: 2015, "RTT150 TELESKOPUNA POLARİMETRE GELİŞTİRME", Anahtar dergisi Aralık 2015, 34-35s.