



**NODAL ABERASYON TEORİSİ İLE YÜKSEK HASSASİYETLİ İKİ VE ÜÇ
AYNALI TELESKOPLARIN HİZALANMASI**

Meltem YEŞİLTEPE

**DOKTORA TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2025

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Meltem YEŞİLTEPE

12/02/2025

NODAL ABERASYON TEORİSİ İLE YÜKSEK HASSASİYETLİ İKİ VE ÜÇ AYNALI TELESKOPLARIN HİZALANMASI

(Doktora Tezi)

Meltem YEŞİLTEPE

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2025

ÖZET

Bu çalışmada, iki ve üç aynalı eksenel simetriye sahip teleskopların tasarımı, aberasyon analizleri ve teleskop ikincil ayna hizalama hatalarının teleskopların görüntü düzlemindeki aberasyon davranışlarını nasıl etkilediği ele alınmıştır. Ayrıca teleskopların hassas şekilde hizalanabilmesi için Nodal Aberasyon Teorisi'ni (NAT) temel alan hizalama algoritmaları detaylandırılmıştır. İki aynalı teleskoplar için önerilen metot, yüksek hassasiyetli bir Cassegrain teleskop kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalarla doğrulanmıştır. Bu kapsamda öncelikle Cassegrain teleskop tanıtılmış, teleskobun hizalı ve hizalama kaçıklığına sahip durumları için aberasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, teleskobun görüntü düzleminde öngörülen nodal davranış deneysel olarak da doğrulanmıştır. Sunulan ilk deneysel çalışmada, teorik ve deneysel olarak hesaplanmış ikincil ayna sigma vektör katkıları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiş ve sonuçlar %1,6 hata oranı ile birbiriyle uyumlu bulunmuştur. İkinci çalışmada, teleskobun $\phi 0.5$ m çaplı birincil aynasının sebep olduğu astigmatik yüzey form hatası ve bu hatanın görüntü düzleminde, iki astigmatizm sıfır noktalı görünüme benzer karakteristiği incelenmiştir. Astigmatik yüzey form hatası kaynaklı nodal davranış, teleskobun hizalı ve hizalama kaçıklığına sahip olduğu durumlar için deneysel olarak araştırılmıştır. Son çalışmada ise NAT ve sigma vektörlere dayanan bir hizalama metodu önerilmiş ve Cassegrain teleskopta doğrulanmıştır. Teleskobun ikincil aynasının bilinmeyen hizalama hataları, önerilen metot ve geliştirilen NAT tabanlı bir algoritma kullanılarak hesaplanmış; hesaplanan hizalama hataları kompanse edilerek ikincil ayna yeniden konumlandırılmıştır. TMA tipi teleskoplar için önerilen yöntem, bir simülasyon çalışması ile desteklenmiştir. Teleskobun ikincil aynasına hizalama hataları uygulanmış ve tetiklenen sigma vektör katkıları hesaplanmıştır. Çalışmanın devamında, aynaya uygulanan hizalama kaçıklıkları, NAT tabanlı algoritma kullanılarak maksimum %7 hata payı ile başarıyla belirlenmiştir. Bu çalışma, NAT'nin pratik uygulamalarını hem teorik hem de deneysel boyutlarda detaylandırarak literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.

Bilim Kodu : 91440
Anahtar Kelimeler : Nodal aberasyon teorisi, teleskop hizalama, teleskop sistemleri
Sayfa Adedi : 162
Danışman : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN
İkinci Danışman : Dr. Özgür KARCI

ALIGNMENT OF HIGH PRECISION TWO- AND THREE-MIRROR TELESCOPES
USING NODAL ABERRATION THEORY

(Ph. D. Thesis)

Meltem YEŞİLTEPE

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2025

ABSTRACT

In this study, the design of two- and three-mirror on-axis telescopes, aberration analyses, and the impact of secondary mirror misalignments on aberration behavior in the image plane are investigated. Additionally, alignment algorithms based on Nodal Aberration Theory (NAT) are detailed for precise telescope alignment. The proposed method for two-mirror telescopes is validated through studies conducted using a high-precision Cassegrain telescope. In this context, the Cassegrain telescope is first introduced, followed by aberration analyses for both aligned and misaligned configurations. The predicted nodal behavior in the image plane of the telescope is also experimentally verified. In the first experimental study, theoretical and experimentally derived secondary mirror sigma vector contributions are compared, showing consistency with an error rate of 1.6%. In the second study, the astigmatic surface figure error of the telescope's primary mirror (diameter: 0.5 m) is analyzed, highlighting its similarity to binodal astigmatism in the image plane. The nodal behavior caused by this astigmatic surface figure error is investigated experimentally for both aligned and misaligned telescope configurations. In the final study, an alignment method based on NAT and sigma vectors is proposed and validated on a Cassegrain telescope. The unknown misalignments of the telescope's secondary mirror are calculated utilizing the proposed method. The calculated misalignments are then compensated for by repositioning the secondary mirror. A simulation study supports the proposed method for TMA-type telescopes, where misalignments are applied to the secondary mirror, and the induced sigma vector contributions are calculated. Furthermore, the applied misalignments are successfully determined using a NAT-based algorithm with a maximum error margin of 7%. This study makes a significant contribution to the literature by detailing the theoretical and experimental applications of NAT in telescope alignment.

Science Code : 91440
Key Words : Nodal aberration theory, telescope alignment, telescope systems.
Page Number : 162
Supervisor : Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN
Co-Supervisor : Dr. Özgür KARCI

TEŞEKKÜR

Tez sürecim boyunca karşılaştığım her türlü zorlukta yanımda olan, sorunların çözümüne yönelik sınırsız desteğiyle beni motive eden ve değerli geri bildirimleriyle çalışmalarına katkı sağlayan tez danışmanım Prof. Dr. Sefer Bora LİŞESİVDİN'e; bu çalışma alanında yer almamı sağlayan, bilgi ve deneyimiyle tezimin yapılandırılması ve sunulan çalışmaların planlanmasına yol gösteren ikinci tez danışmanım Dr. Özgür KARCI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam süresince sunduğum çalışmaları titizlikle değerlendiren değerli Tez İzleme Komitesi üyelerim Prof. Dr. Mehmet KASAP ve Prof. Dr. Abdullah YILDIZ'a geri bildirimleri ve yönlendirmeleri için teşekkür ederim. Ayrıca, değerli tavsiyeleri ve öğrenci odaklı yaklaşımıyla sağladığı destek dolayısıyla Fen Bilimleri Enstitüsü Müdür Yardımcısı Prof. Dr. Gürhan İÇÖZ'e teşekkür ederim.

İhtiyaç duyduğum her türlü teknik altyapı desteğini bana sunan, deneysel çalışmalarımın gerçekleştirilmesine olanak sağlayan TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'ne; çalışmalarına verdiği destekle beni motive eden Grup Liderim Mustafa EKİNCİ'ye; tezimin deneysel çalışmalarına yaptığı değerli katkılar ve tez sürecimde danıştığım her konuda sağladığı sınırsız destek için eski ekip arkadaşım Eray ARPA'ya; işlerimi kolaylaştırarak bana her zaman destek olan, başta junior'ım Bahadır SEVLER, Ercan KARACA, Dr. Zeynep Nilüfer ÖZTÜRK ve İsmail BAŞLAR olmak üzere tüm ekip arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Bu zorlu süreçte yanımda olduğunu hissettiğim sevgili arkadaşım Betül KONAKLI YAZGAN'a; zorlandığım her anda bana destek olan, sabırla dinleyen ve ışıyla beni her daim gülümseten Dr. Zeynep Nilüfer ÖZTÜRK'e ve kıymetli eşi Dr. İbrahim Murat ÖZTÜRK'e dostlukları için de ayrıca teşekkür ederim.

Yıllardır sağduyuları ve objektif bakış açılarıyla bana yol gösteren, zor zamanlarımda fikirlerine güvenerek danıştığım sevgili dostlarım Nazlı TURAN, Gülsüm GÜNDOĞDU, Seval DÖNERTAŞ ve Dilara RENDE'ye teşekkür ederim.

Bu zorlu süreci benim için kolaylaştıran, her zaman yanımda olan sevgili ablam Melis YEŞİLTEPE'ye ve varlığından güç aldığım, maddi ve manevi desteğini her an hissettiğim canım annem Fatma DEMİR'e teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK ARKA PLAN	19
2.1. Rotasyonel Simetrik Optik Sistemler için Aberasyon Teorisi	22
2.2. Seidel (3. Derece) Aberasyonları	24
2.2.1. Küresel aberasyon (W_{040})	24
2.2.2. Koma (W_{131})	25
2.2.3. Astigmatizm (W_{222})	26
2.2.4. Alan eğriliği (W_{220}).....	28
2.2.5. Distorsiyon (W_{311}).....	29
2.3. Eksenel Simetrik Teleskopların Tasarımı	30
2.3.1. İki aynalı eksenel simetrik teleskoplar	30
2.3.2. Üç aynalı eksenel simetrik teleskoplar	33
2.4. Hizalama Kaçıklığına Sahip Rotasyonel Simetrik Optik Sistemler için Aberasyon Teorisi.....	36
2.4.1. Alan aberasyon merkezlerindeki yer değiştirme	37
2.4.2. Nodal aberasyon teorisi	42

3. EKSENEL SİMETRİK TELESKOPLARDA ABERASYON ANALİZİ.....	69
3.1. İki Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Aberasyon Analizi	71
3.1.1. İki aynalı eksenel simetrik teleskopların yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması.....	71
3.1.2. İki aynalı eksenel simetrik teleskoplarda hizalama kaçıklığı analizi.....	76
3.2. Üç Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Aberasyon Analizi	80
3.2.1. Üç aynalı eksenel simetrik teleskopların yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması.....	80
3.2.2. Üç aynalı eksenel simetrik teleskoplarda hizalama kaçıklığı analizi	82
4. NODAL ABERASYON TEORİSİ TABANLI HİZALAMA YAKLAŞIMI.....	87
4.1. İki Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Hizalama Yaklaşımı.....	87
4.2. Üç Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Hizalama Yaklaşımı	96
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	101
5.1. Cassegrain Teleskop Sistemi.....	101
5.1.1. Cassegrain teleskop sistemi tasarımı	101
5.1.2. Cassegrain teleskop sisteminin aberasyon katsayılarının hesaplanması ..	104
5.1.3. Cassegrain teleskop sistemi deneysel test düzeneği	107
5.2. NAT Tabanlı Cassegrain Teleskop Sistemlerinin Hizalanmasına Yönelik Deneysel Çalışmalar	110
5.2.1. Sigma vektörlerin Cassegrain teleskop sistemi kullanılarak deneysel olarak doğrulanması	110
5.2.2. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası ve ikincil ayna hizalama kaçıklığı etkilerinin Nodal Aberasyon Teorisi kullanılarak ayrıştırılması	119
6. CASSEGRAIN TELESKOBUN NAT KULLANILARAK DENEYSEL OLARAK HİZALANMASI	127
6.1. Cassegrain Teleskop için NAT Tabanlı Hizalama Yaklaşımı	127

Sayfa

6.2. Cassegrain Teleskobun İkincil Aynasındaki Hizalama Kaçıklıklarının Hesaplanması.....	129
6.3. Cassegrain Teleskobu İkincil Aynasının Hizalanması.....	133
7. NODAL ABERASYON TEORİSİ TABANLI KORSCH TMA TELESKOP SİSTEMİNİN HİZALANMASINA YÖNELİK SİMÜLASYON ÇALIŞMASI.....	137
7.1. Korsch TMA Teleskop Sistemi.....	137
7.2. Hizalama Kaçıklığına Sahip Korsch TMA Teleskop için Sigma Vektör Katkılarının Hesaplaması	140
7.3. Korsch TMA Teleskobun İkincil Aynasının Hizalama Kaçıklıklarının Hesaplanması.....	144
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	147
KAYNAKLAR	153
EKLER.....	159
ÖZGEÇMİŞ	161

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. 3. derece aberasyonların H , ρ ve $\cos\phi$ bağımlılıkları ve isimlendirmeler	23
Çizelge 2.2. Yansıtıcı iki ve üç aynalı teleskopların özellikleri.....	31
Çizelge 3.1. Fringe Zernike polinomlarının tanımlanması (İlk 9 terim)	70
Çizelge 5.1. Cassegrain teleskobun optik tasarım lens data düzenleyici değerleri	102
Çizelge 5.2. Yüksek hassasiyetli Cassegrain tipi teleskobun teknik özellikleri.....	102
Çizelge 5.3. Cassegrain teleskop paraksiyal ışın izleme verileri	104
Çizelge 5.4. Cassegrain teleskop için hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları	105
Çizelge 5.5. Interferometrik ölçümlerin alındığı alan noktalarının görüntü düzlemindeki yerleşimleri (5x5)	109
Çizelge 5.6. Cassegrain teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri.....	111
Çizelge 5.7. Siferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Cassegrain teleskop).....	115
Çizelge 5.8. Asiferik sigma vektörlerini hesaplamak için gerekli parametreler ve hesaplama sonuçları (Cassegrain teleskop).....	115
Çizelge 5.9. Hizalama kaçıklığı senaryosu için hesaplanan aberasyon alan vektörleri .	118
Çizelge 5.10. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan aberasyon alan vektörlerinin karşılaştırmalı gösterimi	119
Çizelge 5.11. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan sigma vektörler katkılarının karşılaştırılmalı gösterimi	119
Çizelge 5.12. Cassegrain teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri.....	122
Çizelge 5.13. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası kaynaklı oluşan astigmatizm sıfır noktalarının koordinatları	124
Çizelge 5.14. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan astigmatizm nod konumlarının simülasyon ve deney için karşılaştırmalı gösterimi.....	126
Çizelge 6.1. Bilinmeyen bir hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan aberasyon alan vektörleri.....	132
Çizelge 6.2. Aberasyon alan vektörlerinin analizi sonucu elde edilen sigma vektör katkıları (Hizalama kaçıklığı mevcut durum)	132

Çizelge	Sayfa
Çizelge 6.3. İkincil ayna için hesaplanan hizalama kaçıklıkları (Hizalama kaçıklığı mevcut durum)	132
Çizelge 6.4. Hizalama işleminden sonra hesaplanan aberasyon alan vektörleri	133
Çizelge 6.5. Aberasyon alan vektörlerinin analizi sonucu elde edilen sigma vektör katkıları (Hizalama işleminden sonra)	134
Çizelge 6.6. Hizalama işlemi sonrası ikincil ayna için hesaplanan kalıntı hizalama kaçıklıkları.....	134
Çizelge 7.1. Korsch TMA teleskobun optik tasarım lens data düzenleyici değerleri	138
Çizelge 7.2. Korsch TMA teleskobunun teknik özellikleri.....	138
Çizelge 7.3. Korsch TMA teleskop paraksiyal ışın izleme verileri.....	139
Çizelge 7.4. Korsch TMA teleskop için hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları ..	139
Çizelge 7.5. Korsch TMA teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri.....	140
Çizelge 7.6. Siferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Korsch TMA teleskop).....	142
Çizelge 7.7. Asiferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Korsch TMA teleskop).....	142
Çizelge 7.8. Korsch TMA teleskop görüntü düzleminde indüklenmesi beklenen FZC terimlerinin hesaplanması	143
Çizelge 7.9. Korsch TMA teleskop açısal alan noktaları koordinatları	144
Çizelge 7.10. Korsch TMA teleskop için hesaplanan sigma vektör katkılarının karşılaştırmalı gösterimi.....	145
Çizelge 7.11. Korsch TMA teleskop ikinci aynasına tasarımda uygulanan ve FZC terimleri ile hesaplanan hizalama kaçıklıklarının karşılaştırmalı gösterimi.....	145

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. 90" RC Teleskop kullanılarak, yıldız alanlarının farklı odak noktaları için ardışık olarak alınan görüntülerini içeren yıldız plakası görüntüsü.....	6
Şekil 1.2. Bir Cassegrain teleskobunun ikincil aynasındaki hizalama bozukluğu ve aberasyonların alan içindeki dağılımı	7
Şekil 2.1. Enine ve uzunlamasına ışın aberasyonları ve dalga hatası gösterimi	20
Şekil 2.2. Optik açıklık, giriş ve çıkış açıklıkları, kenar ve ana ışınlarının bir optik sistem üzerinde şematik olarak gösterimi	21
Şekil 2.3. Optik açıklık ve görüntü düzlemleri için normalize koordinat sistemi.....	23
Şekil 2.4. Küresel aberasyonun şematik gösterimi	25
Şekil 2.5. Koma aberasyonunun şematik gösterimi	26
Şekil 2.6. Teğetsel ve Sagital düzlemler	27
Şekil 2.7. Astigmatizm aberasyonunun şematik gösterimi	28
Şekil 2.8. Petzval, Sagital ve Teğetsel görüntü düzlemleri.....	29
Şekil 2.9. a) Bozulmamış görüntü, b) içbükey distorsiyon (Cussion), c) dışbükey distorsiyon (Barrel)	30
Şekil 2.10. a) Cassegrain tipi teleskop, içbükey birincil ayna ve dışbükey ikincil ayna, b) Gregoryen tipi teleskop, içbükey birincil ve ikincil ayna	30
Şekil 2.11. Konik yüzey formları	31
Şekil 2.12. İki aynalı teleskop konfigürasyonu, M1: birinci ayna, M2: ikincil ayna.....	32
Şekil 2.13. Üç aynalı eksenel simetrik bir teleskop konfigürasyonu.	34
Şekil 2.14. Hizalama kaçıklığına sahip bir optik sistemde OAR'nin, nominal alan vektörünün ve optik eksen sapması gösterimi.	38
Şekil 2.15. Hizalama kaçıklığına sahip iki aynalı teleskop, optik açıklık (stop) birincil aynada konumlanmış	39
Şekil 2.16. ρ ve H vektörlerinin koordinat sistemi üzerinde gösterimi	43
Şekil 2.17. Etkin alan vektörünün gösterimi H_{Aj} 'nin görüntü düzlemi üzerinde gösterimi.....	44
Şekil 2.18. Cassegrain teleskop için 3. derece küresel aberasyon ile ilişkili TAAG'ler	46

Şekil	Sayfa
Şekil 2.19. 3. derece koma sıfır noktasının (nod) grafiksel gösterimi	48
Şekil 2.20. Cassegrain teleskop için 3. derece komal aberasyonu ile ilişkili TAAG'ler	48
Şekil 2.21. Ritchey-Chrétien teleskop için 3. derece koma aberasyonu TAAG'ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum	49
Şekil 2.22. 3. derece astigmatizm sıfır noktalarının grafiksel gösterimi	53
Şekil 2.23. Cassegrain teleskop için 3. derece astigmatizm aberasyonu ile ilişkili TAAG'ler	54
Şekil 2.24. TMA teleskop için 3. derece astigmatizm aberasyon ile ilişkili TAAG'ler	59
Şekil 2.25. İkincil ayna için koma sıfır dönme noktası (M1 optik açıklık yüzeyi olarak belirlenmiş)	62
Şekil 2.26. İkincil aynanın koma sıfır pivot noktasında, özel bir hizalama kaçıklığı durumunun yaratılması	63
Şekil 2.27. Cassegrain teleskop ikincil aynasının koma sıfır pivot noktasında döndürüldüğü durum için TAAG'ler	63
Şekil 2.28. Çıkış açıklığındaki koordinat tanımlanması	65
Şekil 2.29. Birincil ayna yüzey form hatasına bağlı olarak ortaya çıkan astigmatizm sıfır noktalarının	66
Şekil 2.30. Anastigmat olmayan bir optik sistemde astigmatizm nod konumları	68
Şekil 3.1. Zernike Polinomları için polar koordinatlar	69
Şekil 3.2. İkincil ayna hizalama kaçıklıkları yönlerinin şematik gösterimi	76
Şekil 4.1. a) Astigmatizm nodlarının hizalama kaçıklığı, hizalama kaçıklığı ve birincil ayna form hatasına bağlı oluşumu, b) koma nodunun hizalama kaçıklığına bağlı oluşumu	88
Şekil 4.2. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu için görüntü düzleminde a) Z7 ve b) Z8 FZC terimlerinin alan içinde dağılımı	89
Şekil 4.3. Görüntü düzleminde elde edilen Z7 terimlerinin X alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi	90
Şekil 4.4. Görüntü düzleminde elde edilen Z8 terimlerinin Y alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi	90
Şekil 4.5. Hizalama kaçıklığı durumunda anastigmat bir teleskobun görüntü düzleminde a) Z5 ve b) Z6 FZC terimlerinin alan içinde dağılımı	92

Şekil	Sayfa
Şekil 4.6. Görüntü düzleminden elde edilen Z5 terimlerinin X alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi	93
Şekil 4.7. Görüntü düzleminden elde edilen Z5 terimlerinin Y alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi	93
Şekil 4.8. Optik eksen sapmasının şematik gösterimi.....	95
Şekil 5.1. Cassegrain teleskop optik tasarım şematik diyagramı	102
Şekil 5.2. Cassegrain teleskop odak düzlemi RMS nokta diyagramı	103
Şekil 5.3. Cassegrain teleskop MTF grafiği.....	104
Şekil 5.4. Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece küresel aberasyon katkıları	105
Şekil 5.5. Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece koma aberasyonu katkıları	106
Şekil 5.6. Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece koma aberasyonu katkıları	106
Şekil 5.7. Cassegrain teleskobun hizalama test düzeneği şematik gösterimi.....	109
Şekil 5.8. Cassegrain teleskop için 3. derece koma TAAG'leri.....	111
Şekil 5.9. Cassegrain teleskop için 3. derece astigmatizm TAAG'leri.....	112
Şekil 5.10. Cassegrain teleskop alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$	113
Şekil 5.11. Cassegrain teleskop alan interferogramları, koma $Z_{7/8}$: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum	114
Şekil 5.12. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalama kaçıklığına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları .	116
Şekil 5.13. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu alan interferogramları, astigmatizm: $Z_{5/6}$	117
Şekil 5.14. Cassegrain teleskop birincil ve ikincil ayna için ayna yüzey form ölçüm şemaları (solda), yüzey form hataları (sağda) ($\lambda = 632,8$ nm).....	120
Şekil 5.15. Cassgerain teleskop 3. derece astigmatizm TAAG'leri	121
Şekil 5.16. Cassegrain teleskobun hizalı durumu için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları.....	122
Şekil 5.17. Cassegrain teleskop hizalı durum alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$	123

Şekil	Sayfa
Şekil 5.18. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalama kaçıklığına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları .	125
Şekil 5.19. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$: a) simülasyon verileri, b) deneysel veriler.....	125
Şekil 6.1. İki aynalı teleskop sistemlerinin NAT kullanılarak hizalanması için önerilen metodun adımlarının akış diyagramında gösterimi	128
Şekil 6.2. Alan $(-0,125^\circ, 0,250^\circ)$ noktasından elde edilen her bir Z_5, Z_6, Z_7, Z_8 ve RMS WFE değerinin ortalamadan sapma miktarlarının grafiksel gösterimi.	130
Şekil 6.3. Cassegrain teleskop ikincil aynası bilinmeyen hizalama kaçıklıklarına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları.....	130
Şekil 6.4. Cassegrain teleskop alan interferogramları.....	131
Şekil 6.5. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu için alan interferogramları: astigmatizm $Z_{5/6}$	133
Şekil 6.6. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalı olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları	134
Şekil 6.7. Cassegrain teleskop ikincil ayna hizalama sonrası durumu için alan interferogramları a) astigmatizm $Z_{5/6}$, b) koma $Z_{7/8}$	135
Şekil 6.8. Cassegrain teleskop hizalı durumu için alan interferogramları: astigmatizm $Z_{5/6}$	136
Şekil 7.1. Korsch TMA teleskop sisteminin optik tasarım şematik gösterimi.....	137
Şekil 7.2. Korsch TMA teleskop odak düzlemi RMS nokta diyagramı.....	138
Şekil 7.3. Korsch TMA teleskop MTF grafiği.....	139
Şekil 7.4. Korsch TMA teleskop için 3. derece koma TAAG'leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum.....	140
Şekil 7.5. Korsch TMA teleskop için 3. derece astigmatizm TAAG'leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum	141
Şekil 7.6. Hizalama kaçıklığına sahip Korsch TMA teleskop için optik tasarım programından alınan ve hesaplanan FZC terimleri.....	143

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 5.1. İnterferometrik çift-geçişli Cassegrain teleskop hizalama test düzeneği	108
Resim 5.2. İkincil ayna piezo kontrollü hareket mekanizması	110



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\pm \mathbf{ib}_{222}$	Normalize Alan Astigmatizm Vektörü
$\mathbf{A}$	Yüzeyin Asferiklik Sabiti
$\mathbf{a}_{131}$	Normalize Alan Koma Vektörü
$\mathbf{A}_{131}$	Normalize Olmayan Alan Koma Vektörü
$\mathbf{a}_{222}$	Normalize Alan Astigmatizm Vektörü
$\mathbf{A}_{222}$	Normalize Olmayan Alan Astigmatizm Vektörü
$\mathbf{ADE}$	X Eksen Etrafında Eğilme
$\mathbf{B}$	Arka Odak Uzunluğu
$\mathbf{B}^2_{222}$	Normalize Olmayan Alan Astigmatizm Vektörü
$\mathbf{BDE}$	Y Eksen Etrafında Eğilme
$\mathbf{C}_1$	M1 Yüzey Eğrilik Merkezi
$\mathbf{C}_2$	M2 Yüzey Eğrilik Merkezi
$\mathbf{C}_{5/6, \text{FIG}}$	M1 Astigmatizm Form Hatası
$\mathbf{d}$	M1 ve M2 arasındaki mesafe
$\mathbf{F}$	Odak Uzunluğu
$\mathbf{F}/\#$	F Sayısı
$\mathbf{H}$	Normalize Alan Vektörü
$\mathbf{H}_{Aj}$	Etkin Alan Vektörü
$\mathbf{H}_{AR}$	Optik Eksen Sapması Vektörü
$\mathbf{i}$	Kenar Işın Geliş açısı
$\bar{\mathbf{i}}$	Ana Işın Geliş Açısı
$\bar{\mathbf{i}}^*$	R_j ve S_j Arasındaki Aç
$\mathbf{j}$	Alt indis, Yüzey Numarası
$\mathbf{k}_1$	M1 Konik Katsayısı
$\mathbf{k}_2$	M2 Konik Katsayısı

Simgeler	Açıklamalar
k_3	M3 Konik Katsayısı
k	Yüzeyin Konik Sabiti
L	R_j Vektörü Yön Kosinüsü
l_{EP}	Yüzeyden Yerel Giriş Açıklığına Uzaklık
l_i	Yüzeyden Yerel Görüntüye Olan Uzaklık
L_{M2}^{cfpp}	M2 CFPP Noktasının M2 Tepe Noktasından Uzaklığı
l_o	Yüzeyden Yerel Objeye Olan Uzaklık
l_{xp}	Yüzeyden Yerel Çıkış Açıklığına Uzaklık
M	R_j vektörü Yön Kosinüsü
M	Alt İndis, Medyal
m	Büyütme
$M1$	Birincil Ayna
$M2$	İkincil Ayna
n	Kırıcılık İndisi
n'	Yüzeyden Sonraki Kırma İndisi
N	R_j Vektörü Yön Kosinüsü
N_j	Nominal Sistem Obje Birim Vektörü, Yüzey j
P	Alt İndis, Petzval
P_n	Hizalama Kaçıklıkları
r_1	M1 Eğrilik Yarıçapı
r_2	M2 Eğrilik Yarıçapı
r_3	M3 Eğrilik Yarıçapı
R_j	OAR ile Hizalanmış Birim Vektör, Yüzey j
R_{ref}	Referans Küresel Dalga Cephesi
S	Alt İndis, Sagital
S_j	Yüzey Normali ile Hizalanmış Birim Vektör, Yüzey j
SRL	S_j Vektörü Yön Kosinüsü
SRM	S_j Vektörü Yön Kosinüsü
SRN	S_j Vektörü Yön Kosinüsü
$Sl/asph$	Seidel Birincil Asiferik Katsayı

Simgeler	Açıklamalar
S_I/II_{sph}	Seidel Birincil/İkincil Siferik katsayı
T	Alt İndis, Teğetsel
T_i	Hedef Değerler
u	Kenar Işının Yüzeyden Önceki Açısı
u'	Kenar Işının Yüzeyden Sonraki Açısı
$\bar{u}$	Ana Işının Yüzeyden Önceki Açısı
$\bar{u}'$	Ana Işının Yüzeyden Sonraki Açısı
$\bar{u}^{#OAR}$	OAR'nin Yüzeydeki Eğim Açısı
V_i	Güncel Değerler
V_1	M1 Tepe Noktası
V_2	M2 Tepe Noktası
W	Referans ve Gerçek Dalga Cepheleri Farkı
W_i	Fonksiyonun Ağırlığı
W_{klm}	Dalga Aberasyon Katsayısı
XDE	X Eksen Yönünde Doğrusal Yer Değiştirme
x_p	Giriş Pupilinin X Eksenindeki Koordinatı
y	Yüzeydeki Kenar Işın Yüksekliği
$\bar{y}$	Yüzeydeki Ana Işın Yüksekliği
$y^{#OAR}$	OAR'nin Yüzey ile Kesiştiği Noktanın Yüksekliği
YDE	Y Eksen Yönünde Doğrusal Yer Değiştirme
y_p	Giriş Pupilinin Y Eksenindeki Koordinatı
Z_m	Zernike Terimi
$\beta^{#0}$	Küresel Yüzey Eşdeğer Eğim Parametresi
γ	Karartma
$\Delta s'$	Z Ekseninde Boyuna Aberasyon
δv^*	Asiferik Tepe Noktasının OAR'den Mesafesi
$\Delta x'$	X Ekseninde Enine Aberasyon
$\Delta y'$	Y Ekseninde Enine Aberasyon
λ	Dalga Boyu
$\xi_{5/6,FIG}$	M1 Astigmatik Form Hatası Terimleri Açısı

Simgeler**Açıklamalar**

$\mathcal{K}$	Lagrange Değişmezi
θ	Alan vektörünün dikey eksenle yaptığı açı
ρ	Normalize Pupil Vektörü
σ	Sigma Vektörü
ϕ	Pupil Vektörünün Dikey Eksenle Yaptığı Açı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

<i>asph</i>	Asferik
CA	Etkin Açıklık
CFPP	Koma Sıfır Pivot Noktası
EP	Girişi Açıklığı
EPD	Giriş Açıklığı Çapı
FFOV	Tüm Görüş Alanı
FIG	Alt İndis, Form Hatası
FOV	Görüş Alanı
FP	Odak Düzlemi
FZC	Fringe Zernike Terimi
HFOV	Yarı Görüş Alanı
JWST	James Webb Uzay Teleskobu
MA	Mekanik Eksen
MF	Merit Fonksiyonu
MIS	Alt İndis, Hizalama Kaçıklığı
MTF	Modülasyon Transfer Fonksiyonu
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi
NAT	Nodal Aberasyon Teorisi
OAR	Optik Eksen Işını
RC	Ritchey-Chrétien
RMS	Karekök Ortalama Kare
SFE	Yüzey Form Hatası

Kısaltmalar**Açıklamalar*****sph***

Siferik

STOP

Optik Açıklık

TAAG

Tüm Alan Aberasyon Gösterimleri

TMA

Üç Aynalı Anastigmat

WFE

Dalga Cephesi Hatası

XP

Çıkış Açıklığı



1. GİRİŞ

Aristo'nun Metafizik kitabı, “İnsan, doğası gereği bilmek ister” cümlesiyle başlar (Aristotle, 1933). İnsan, parçası olduğu evreni bilmek ister. Bu yüzdendir ki, 1990 yılında uzaya fırlatılmış olan Hubble Uzay Teleskobu için astronot J. M. Grunsfeld, “Hubble sadece bir uydu değildir; o, insanlığın bilgi arayışı ile ilgilidir” demiştir. Hubble Uzay Teleskobu, evrenin sırlarını çözmek üzere görevlendirilmiş ilk derin uzay teleskopudur.

Yansıtıcı teleskoplara tarihsel bakış

Teleskoplar, görme duyumuzu atalarımızın hayal gücünün ötesine taşıyarak, duyularımız ile algılanamayan nesneleri görünür hale getirir ve doğanın daha derin ve kusursuz şekilde algılanmasının yolunu açar. Bilinen ilk teleskop, 1608 yılında Hollanda’da geliştirilmiştir. Bu teleskop bir adet içbükey ve bir adet dışbükey olmak üzere iki adet lensin bir tüp içine yerleştirilmesi ile oluşturulmuştur. Daha sonra Galileo, Kepler ve Huygens kardeşlerin önemli katkılarıyla kırıcı teleskop sistemleri geliştirilmeye devam edilmiştir.

Yansıtıcı teleskop kavramı ise, ilk defa 17. yüzyılın başlarında, optik alanına çok önemli katkıları olan İtalyan astronom Zucchi tarafından ortaya atılmıştır. Yansıtıcı teleskoplar, lens gibi kırıcı optik bileşenler içermediğinden kromatik aberasyon üretmezler. Bu da onları kırıcı teleskoplara göre daha avantajlı hale getirir.

Yansıtıcı teleskop sistemlerindeki gelişmeler, aberasyon teorisi, üretim teknolojileri ve fotoğraf teknolojisinin gelişmesiyle yakından ilişkilidir (Wilson, 1997). Yansıtıcı teleskop sistemleri için aberasyon teorisi, René Descartes’in 1634 yılında hizalı optik sistemlerin eksenel görüntüleme (küresel aberasyon) için yapmış olduğu çalışmalar ile resmi olarak başlamıştır (Bhatia ve Ciani, 1998).

Bu teori, temel formdaki yansıtıcı teleskopları icat etmek için yeterli olmuş ve bu gelişmeden kısa süre sonra Newtonyen, Gregoryen ve Cassegrain tipi teleskoplar icat edilmiştir. Karl Schwarzschild’ın yansıtıcı teleskoplarda alan görüntülemesi için bütünsel bir teori inşa etmesi ancak 1905 yılında gerçekleşebilmiştir. Bu teorik gelişmenin yaklaşık 300 yıl sonra gerçekleşmesinin nedeni, o dönem için mümkün olan tek algılayıcının göz olmasıdır.

Aberasyon teorisin geliştirilmesi için gereken baskı, yansıtıcı teleskopların ihtiyaçlarından ziyade, kayda değer bir açısal alanda görüntüleme gerektiren fotoğrafın icat edilmesiyle ortaya çıkmıştır. William Rowan Hamilton, 1833'te eksenel simetrik sistemler için aberasyon tiplerini tanımlayan genel bir teori sunmuştur. Ancak, Hamilton'un teorisinde aberasyon tiplerinin yapısal parametreler kullanılarak pratik hesaplanabilmesi mümkün değildir.

Bu problem, Ludvig Von Seidel'in 1856'da yayınladığı çalışması ile çözülmüş ve küresel yüzeyler için beş en düşük dereceli (3. derece) aberasyonun hesaplanması mümkün olmuştur. Bu gelişme fotoğraflama amacıyla kullanılan objektiflerin geliştirilmesinde çok büyük öneme sahiptir.

Seidel'in küresel yüzeyler için hesaplanmasını mümkün kıldığı beş aberasyon şunlardır: küresel aberasyon, koma, astigmatizm, alan eğriliği ve distorsiyondur. Schwarzschild, Seidel'in aberasyon teorisini küresel olmayan yüzeyler (asferik) için genişletmiştir. Schwarzschild'ın ifadesinde, asferik yüzeyler, Schwarzschild (konik) katsayıları ile tanımlanmıştır (Wilson, 1997).

Schwarzschild teoremine göre, uygun mesafelere sahip iki asferik ayna, iki Seidel aberasyonunu düzeltebilir. Küresel aberasyon ve koma aberasyonunun düzeltilmesi ile iki aynalı aplanatik teleskoplar elde edilmiştir.

1922'de Henri Chrétien, Cassegrain geometrisini kullanarak tasarladığı pratik bir aplanatik teleskop formu olan, Ritchey-Chrétien (RC) teleskopu üzerine yaptığı çalışmasını yayınlamıştır. RC tipi teleskoplar, daha yüksek telefoto etkisi, daha küçük karartma oranı ve daha kompakt yapısı ile klasik Cassegrain teleskopu üzerinde üstünlük sağlamaktadır. Ancak, hiperbolik ayna üretimindeki zorluklar nedeniyle, RC teleskoplar, 1980'lere kadar yaygın olarak kullanılamamışlardır.

1990 yılında uzaya fırlatılan ve tarihi görevini hala başarı ile sürdüren Hubble Uzay Teleskopu da RC konfigürasyonunda tasarlanmış bir derin uzay teleskopudur.

Schwarzschild Teoremi, genelleştirilmiş Schwarzschild teoremine genişletilebilir; şöyle ki herhangi bir geometrideki N adet birbirine mesafeli asferik ayna, N adet Seidel

aberrasyonunu düzeltebilir. Distorsiyon aberrasyonu, yansıtıcı teleskoplarda genel olarak çok önemli olmadığı için (görüntü işleme ile sonradan düzeltilebilir), N sayısı, dört ve dörtten küçük olarak düşünülebilir. Bu, en kötü koşuldur. Özel durumda, aynalar daha elverişli geometrilerde yerleştirilirse N 'den daha fazla Seidel aberrasyonunun düzeltilmesi mümkündür.

Üç aynalı teleskop kavramı, ilk kez Maurice Paul tarafından 1935'de formülleştirilmiştir. Bu tasarım, üç kavisli ayna kullanılarak tasarlanan ilk iyi düzeltilmiş teleskoptur. Paul'ün tasarımı; parabolik bir içbükey birincil ayna, küresel bir dışbükey ikincil ayna ve küresel bir içbükey üçüncül aynayı içermektedir. İkincil ayna ve üçüncül aynanın eğrilik yarıçaplarının eşit büyüklük ve aksi yön şeklinde ayarlanmasıyla üç aynalı konfigürasyon, 3. derece küresel aberrasyon koma ve astigmatizm için düzeltilebilmekteydi. Ancak, görüntü düzleminin düz olması sağlanamamaktaydı.

1969'da James Baker, söz konusu aynaların eğrilik yarıçaplarını yeniden formüle ederek, ikincil aynanın küresel formunu eliptik forma dönüştürdü ve böylelikle düz bir alan elde etmeyi başardı (Wilson ve Delabre, 1995; Yuan, Su ve Cui, 2005). Bu konfigürasyon, Paul-Baker üç aynalı teleskop tasarımı olarak bilinmektedir. Paul ve Paul-Baker konfigürasyonlarında görüntü, ikincil ve üçüncül aynalar arasında meydana gelmekteydi ve bu da zorlu perdelemeyi dolaylı olarak önemli kaçak ışın problemine yol açmaktaydı.

Bu problemi çözmek için Dietrich Korsch, 1972'de başka bir üç aynalı teleskop varyantını ortaya atmıştır (Korsch, 1977). Korsch teleskop tasarımı tipik olarak; eliptik içbükey birincil ayna, hiperbolik dışbükey ikincil ayna ve eliptik içbükey üçüncül aynanın özel bir konfigürasyonla yerleştirilmesiyle, 3. derece küresel aberrasyon, koma, astigmatizm ve alan eğriliği için düzeltme sağlayabilen üç aynadan oluşur. Three Mirror Anastigmat (TMA) olarak adlandırılan bu tasarım, geniş görüş alanı ve odak düzleminde minimal kaçak ışın sağlama kabiliyetine sahiptir.

20. yüzyılın astronomik uygulamalarında iki aynalı teleskop sistemleri baskınken, 21. yüzyılın başlarında, üç aynalı teleskop sistemleri, üretim ve metrolojideki gelişmelere paralel olarak daha popüler olmaya başlamıştır. Üç aynalı sistemlerin uzay uygulamalarında kullanılmasına yönelik en önemli örnek, 2021 yılında Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) tarafından uzaya fırlatılmış olan ve uzayın gizemini çözmek üzere görevlendirilmiş

olan James Webb Uzay Teleskobu (JWST)'dur (Extance, 2024). Benzer şekilde, 2023 yılında uzaya fırlatılan EUCLID Teleskobu da üç aynalı anastigmat konfigürasyonu kullanılarak tasarlanmıştır (Mellier, Barraso ve Achúcarro, 2024).

Temelde, bir optik sistemde görüntüleme performansı, optik aberasyonlar gibi görüntü kalitesine olumsuz etki eden faktörlerin miktarı ile belirlenir. Yüksek kontrastlı görüntüler elde edebilmek için, sistemdeki optik aberasyonların düzeltilmesi, dengelenmesi ve/veya engellenmesi önem arz etmektedir (Sasián, 2013). Bir optik sistemin görüntü düzlemindeki net aberasyon miktarı, o sistemi oluşturan bileşenlerinin her birinden gelen aberasyon katkılarının toplamı ile belirlenir. Görüntü düzlemindeki toplam aberasyon miktarının minimize edilmesi, optik bileşenlerden gelen yüzey dalga aberasyon katkılarının dengelenmesi ile sağlanabilir.

Görüntü düzlemindeki aberasyonlar; optik sistemin yapısal parametreleri, optik bileşenlerin üretim ve entegrasyon süreçleri ve ışığın yayıldığı ortamın koşulları gibi pek çok farklı faktörün kombinasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Eksenel simetrik optik sistemler, optik eksenin, optik sistemde yer alan bütün optik bileşenlerin merkezinden geçecek şekilde konumlandığı sistemlerdir. Bu tür sistemler, özünde rotasyonel simetrik ve bu rotasyonel simetri, daha yüksek dereceli (enine aberasyonlar için dördüncü derece ve üstü) optik aberasyonların etkisini azaltır. Bu sebeple, rotasyonel simetrik sistemler için, görüntü kalitesinin bozulmasına birincil katkı sağlayan aberasyonlar 3. derece aberasyonlardır.

Tasarlanan optik sistem, 3. derece aberasyonlar için düzeltilmiş dahi olsa 3. derece aberasyonlar, optik bileşenlerin hizalama kaçıklıklarına karşı hassastır ve kolayca tetiklenebilirler. Bu yüzden, teleskopların doğru tasarım parametreleri kullanılarak inşa edilmesi sadece bir ilk adımdır. En az tasarım ve yapılandırma süreci kadar önemli olan bir başka süreç de teleskopların hizalanmasıdır (Bhatia ve Ciani, 1998).

Astronomik teleskop sistemlerinde hizalama yaklaşımı

Teleskopların görüntüleme performansları, seçilen yapısal parametreler ile belirlenen aberasyon düzeltme kapasitesine kuvvetlice bağlıdır. Bir optik sistemin tasarım aşaması tamamlandıktan sonra, sistemin, üretim ve/veya bütünleme esnasında oluşabilecek hatalara

karşı tepkisinin belirlenmesi gerekmektedir. Bahse konu hatalar; eğrilik yarıçapları, kırıcılık indisleri, kalınlıklar, mesafeler, optik eksen ve mekanik eksen farklılıkları, enine eksenlere göre eğilmeler ve merkezden kaymalardır. Bu hatalardan bazıları, optik bileşenlerin optik eksene göre eğilmiş veya kaymış olması durumu gibi optik sistemde rotasyonel simetrisinin bozulmasına yol açar (Thompson, 1986).

Astronomik teleskoplar için hizalama hatalarının en belirgin sonucu, görüntü düzleminin merkezinde koma ve astigmatizm aberasyonlarının ortaya çıkmasıdır. Koma aberasyonu, tipik olarak büyük giriş açıklığına sahip sistemlerde sınırlayıcı faktördür (Schmid, Thompson ve Rolland, 2008). Geleneksel hizalama yaklaşımında, aynalar birbirine göre kusursuz hizalanmış olmasa bile, görüntü düzleminin merkezindeki koma aberasyonunun sıfır olması durumu, teleskobun hizalanmış olarak kabul edilmesi anlamına geliyordu (Meinel ve Meinel, 1984). Koma aberasyonunun bu şekilde dengelenmesi iki şekilde mümkün olabilmektedir: bir aynadan kaynaklanan koma aberasyonu diğer aynadan kaynaklanan ters işaretli koma aberasyonu ile telafi edilerek dengelenebilir ya da bir aynanın merkezden kayması ile oluşan koma aberasyonu aynı aynanın eğilmesiyle ortaya çıkan zıt yönlü koma aberasyonu miktarı ile dengelenebilir.

Bu yaklaşım, yavaş odak oranlı (tipik olarak F/8 ya da daha yüksek) sahip ve tipik olarak küçük görüş alanına sahip (1° 'den küçük) Cassegrain tipi teleskoplar için, görüntü düzleminin merkezindeki koma aberasyonunun düzeltildiği durumda, astigmatizm etkisinden gelen etkiler ihmal edilebilir düzeyde olduğu için yeterli olabilir (McLeod, 1996). Ancak, Rajiv K. Bhatia'nın ve Roland V. Shack'ın atfı yapılan çalışmalarında belirtildiği gibi, koma aberasyonunun yukarıda belirtildiği şekilde dengelenerek elimine edilmesi, daha geniş görüş alanına sahip optik sistemlerde, astigmatizm aberasyonu görüntüyü bozan bir aberasyon halini aldığı için yeterli olamamaktadır (Bhatia, 1995; Shack ve Thompson, 1980).

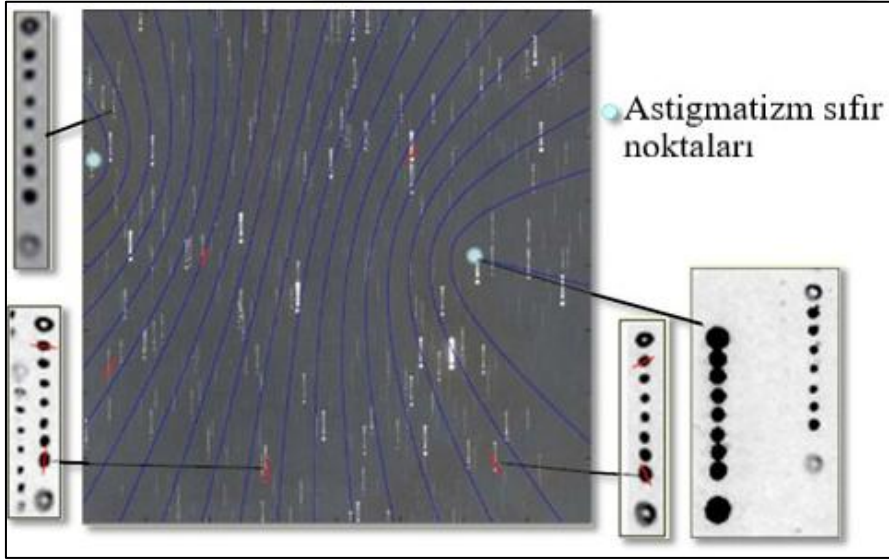
Geniş görüş alanına sahip optik sistemlerde, bir aplanatik teleskop olan RC (Ritchey-Chretien) gibi, görüntü düzlemi merkezinde koma ve astigmatizm aberasyonlarının bulunmaması, görüş alanı içerisinde ikincil bir astigmatizm sıfır noktasının olası varlığı dolayısıyla güvenilir değildir. Hizalama işlemi, sadece görüntü düzlemi merkezinden alınan astigmatizm ve koma aberasyonları temel alınarak tamamlanır ve astigmatizm sıfır noktalarından biri görüntü düzleminin merkezinde, ikincisi ise görüntü düzleminin uzak bir

noktasında yer alıyor ise, görüntü düzleminin merkezine uzak alan noktalarında hatırı sayılır miktarda astigmatizm aberasyonu içerir (Schmid ve diğerleri, 2008).

Astigmatizm aberasyonunun, hizalama bozukluklarına karşı gösterdiği bu özel iki astigmatizm sıfır noktası (nod) tepkisi, aberasyonların alan bağımlılığındaki hizalama bozukluğuna bağlı olarak gerçekleşen değişim dolayısıyladır.

Bu durum, ilk kez Kitt Peak Gözlemevi'nde, astronomların 90" optik açıklıklı bir RC teleskobun hizalama durumunu anlama sürecinin bir parçası olarak alınan yıldız alan görüntüsünün incelenmesi ile ortaya çıkmıştır. Elde edilen yıldız görüntüleri, yıldız plakasının belirli bir odak ayarında bir süre ışığa maruz bırakılması ve odak hafifçe değiştirilerek aynı plakanın tekrar pozlanması ile dokuz farklı odak noktası için tekrarlanması ile oluşturulmuştur (Thompson ve Rolland, 2014).

1977'de, Kitt Peak Gözlemevi'nde, 90" RC teleskop kullanılarak elde edilen bu yıldız plakası, Şekil 1.1'de gösterilmektedir (Rolland, Bauer ve Fuerschbach, 2020).



Şekil 1.1. 90" RC Teleskop kullanılarak, yıldız alanlarının farklı odak noktaları için ardışık olarak alınan görüntülerini içeren yıldız plakası görüntüsü

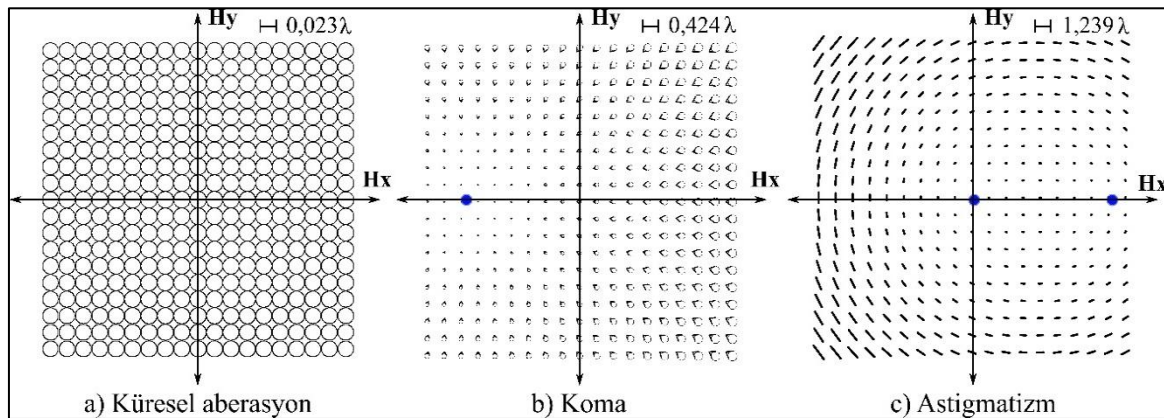
Şekil 1.1 incelendiğinde, görüntünün mavi ile işaretlenen iki noktasında (nod) astigmatizm aberasyonunun bulunmadığı gözlenmiştir. Üstelik bu iki nokta, görüntü düzleminin merkezinde değildir. Her iki nokta da görüntü içinde, merkezden uzak olarak konumlanmıştır. Astronomlar, yıldız plakasını, incelenmek üzere o sırada Arizona

Üniversitesi'nde Profesör olan R. V. Shack'a getirmişlerdir. Shack incelemelerini öncelikle Harold Horace Hopkins tarafından ortaya atılan skalar dalga aberasyon teorisini kullanarak gerçekleştirmiştir. Daha sonra, bu teoriyi ve Richard Alfred Buchroeder'ın, küresel yüzeylerde, hizalama kaçıklığına bağlı olarak yüzeylerin aberasyon rotasyon simetri merkezlerinde kayma olduğu yönündeki varsayımlarını kullanarak, vektör tabanlı Nodal Aberasyon Teorisi'ni (NAT) keşfetmiştir.

Nodal Aberasyon Teorisi, temel olarak optik bileşenlerinde kayma ve/veya eğilme (hizalama kaçıklığı) olan nominal olarak rotasyonel simetrik optik sistemlerin aberasyon davranışlarını açıklamaktadır. Teorinin matematiksel altyapısı, Shack ve Kevin Thompson tarafından geliştirilmiş olup Thompson ayrıca teoriyi 5. derece aberasyonlara kadar genişletmiştir (Thompson, 2005; Thompson, 1980; Thompson, 2009, 2010, 2011).

Thompson, optik bileşenlerin hizalama kaçıklığı miktarları ile görüntüdeki bozulmalar arasındaki ilişkiyi hızlıca değerlendirebilmek için optik modelleme programına entegre edilebilen analitik bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu yaklaşım, hizalama kaçıklığı etkisi altındaki aberasyon alanlarının özelliklerinin iki boyutlu grafiksel gösterimi ile gerçekleşmesi şeklinde ifade edilebilir ve Tüm Alan Aberasyon Gösterimleri (TAAG) olarak adlandırılır (Thompson, 1980). Bu gösterim, aberasyonların izole edilerek gösterimine olanak sağlamaktadır.

Thompson'ın bahse konu tüm alan aberasyon gösterimlerine, Şekil 1.2, örnek olarak gösterilebilir.



Şekil 1.2. Bir Cassegrain teleskobunun ikincil aynasındaki hizalama bozukluğu ve aberasyonların alan içindeki dağılımı: a) küresel aberasyon, b) koma ve c) astigmatizm büyüklükleri ve yönelimleri

Thompson'ın teoriye bir diğer önemli katkısı, gerçek ışın izleme verilerini temel alan, koordinat modelinden bağımsız, yüzey aberasyon merkezlerindeki kayma miktarlarını hesaplama yaklaşımıdır (Thompson, Schmid ve Cakmakci, 2009). Bu yenilikçi yaklaşım ile alan aberasyon merkezlerindeki hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen kayma miktarları, optik modelleme programları kullanılarak kolayca hesaplanabilmektedir. Thompson'ın bu yaklaşımı, teorinin optik çevrelerde daha yaygın olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Şekil 1.1'de gösterilen yıldız plakasındaki iki astigmatizm sıfır noktalı (nod) görünüm, teleskop aynalarının birbirlerine göre kusursuz şekilde hizalanmamış olduğunun göstergesidir. Ancak, görüntü düzleminin merkeze uzak noktalarında konumlanmış olan iki astigmatizm sıfır noktası sadece hizalama kaçıklığı ile açıklanamaz. Bu durum, hizalama kaçıklığı ve birincil aynanın astigmatik yüzey form hatasının kombinasyonunun bir sonucudur (Thompson ve Rolland, 2014).

Tobias Schmid'in yaptığı çalışmalar ile Şekil 1.1'de gösterilen yıldız plakasının durumunu tam anlamıyla karakterize etmeyi başarmış ve birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının etkisini teoriye entegre etmiştir (Schmid, 2010; Schmid ve diğerleri, 2010).

Bilgisayar destekli hizalama yöntemleri

Optik sistemlerin tasarım sürecinde, içerdiği optik bileşenlerin üretim, montaj ve entegrasyonundan kaynaklanabilecek aberasyonlara karşı, sisteme özgü olarak bir üretim ve hizalama toleransı belirlenir. Hizalama toleransı, astronomik teleskoplar ve uydu kameraları gibi kırınım limitli optik sistemler için oldukça sıkıdır. Bu yüzden, bir optik sistemde görüntüleme performansını maksimum seviyede tutabilmek için optik bileşenlerin hizalanması kritik öneme sahiptir.

Hassas optik hizalama aşaması hem karmaşık hem de çok vakit alan bir süreçtir. Optik hizalama süreçlerini daha pratik hale getirmek için zamanla pek çok bilgisayar destekli hizalama algoritmaları geliştirilmiştir. Bilgisayar destekli hizalama yöntemlerinin temel amacı, hizalama kaçıklığına sahip olan optik bileşenin, hizalama kaçıklıklarını büyüklük ve yön olarak hassas şekilde hesaplanmasını sağlamaktır.

Optik sistemlerin bilgisayar destekli olarak hizalanmasına yönelik ilk çalışma, 1985 yılında Ira M. Egdall tarafından yayımlanmıştır (Egdall, 1985). Bu çalışmada, sistemin hassas hizalanması için montaj hatalarını hesaplayabilen, özelleştirilmiş bir yazılım kullanılmıştır. Söz konusu yazılım, alan içerisinde seçilen beş noktanın dalga cephesi hatalarını bir interferometre yardımıyla ölçmüş ve ideal ölçüm sonuçları ile karşılaştırmıştır. İdeal ve ölçülen terimler arasındaki fark, ikincil aynanın X, Y ve Z eksenlerindeki hizalama kaçıklıkları miktarları ile ilişkilendirilmiş ve hizalama işlemi uygulanmıştır.

Hizalama işlemi sonunda, alanın merkezinden alınan ölçümler, ideal ölçümler ile %92 oranında örtüşürken, eksen dışı noktalardan alınan ölçüm sonuçları, %87 oranında örtüşmektedir. Yöntem temel olarak optik ışın izleme programından elde edilen hizalama hassasiyet verilerinden faydalanmaktadır.

Zamanla, optik sistemlerin nasıl daha hızlı ve hassas şekilde hizalanabileceğine yönelik yapılan çalışmaların sayısı artmıştır. Bilgisayar destekli hizalama yöntemi olarak kullanılan en yaygın yöntemler arasında Hassasiyet Matrisi (Wu ve diğerleri, 2020), Merit Fonksiyonu Regresyonu (Kim ve diğerleri, 2007; Wu ve diğerleri, 2019) ve Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme (Lee ve diğerleri, 2007b; Wu ve diğerleri, 2019) metotları yer almaktadır.

Hassasiyet Matrisi yöntemi, basitliğinden dolayı belirtilen yöntemler arasındaki en çok tercih edilen yöntemdir. Bu yöntem, temel olarak, optik bileşenlerin hizalama kaçıklıkları ile ölçülen Zernike terimleri arasındaki ilişkinin lineer olduğunu varsaymakta ve görece küçük hizalama kaçıklığı değerleri için doğru sonuçlar vermektedir (Ewijk, 2017). Zernike terimleri ile hizalama kaçıklıkları arasındaki ilişki Eş. 1.1 ile verilmektedir.

$$\Delta Z = A_s \Delta P \quad (1.1)$$

Eş. 1.1’de belirtilen ΔZ ifadesi, ölçülen Zernike katsayıları ile tasarımdan elde edilen Zernike katsayıları arasındaki farkı ifade etmektedir. A_s , sistemin hassasiyet matrisidir. ΔP , hizalama kaçıklığı miktarlarıdır. Eş. 1.2’de ΔZ ’nin açılımı verilmiştir.

$$\Delta Z = \begin{bmatrix} \Delta Z_1 \\ \vdots \\ \Delta Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 \\ \vdots \\ Z_m \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{0,1} \\ \vdots \\ Z_{0,m} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Eş. 1.2’de, m , Zernike katsayılarının derecesini ifade etmektedir. $Z_{0,1}$ terimi tasarımdan elde edilen bir sonuç iken, Z_1 hizalama kaçıklığı olan bir sistemden elde edilen ölçüm sonucunu ifade etmektedir. A_S , hassasiyet matrisinin genişletilmiş formu Eş. 1.3’te verilmiştir.

$$A_S = \begin{bmatrix} \frac{\delta Z_1}{\delta P_1} & \cdots & \frac{\delta Z_1}{\delta P_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\delta Z_m}{\delta P_n} & \cdots & \frac{\delta Z_m}{\delta P_n} \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

Eş. 1.3’de, n , serbestlik derecesini ifade etmektedir. ΔP ’nin genişletilmiş versiyonu, Eş. 1.4 ile verilmiştir.

$$\Delta P = \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} P_{0,1} \\ \vdots \\ P_{0,n} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

Eş. 1.4’deki hizalama kaçıklıkları, $P_1 = \Delta X$, $P_2 = \Delta Y$, optik bileşenlerin optik eksene göre X ve Y yönünde yer değiştirmeleri, $P_3 = \Delta Z$, Z yönünde yer değiştirme olarak ifade edilebilir. Benzer şekilde, $P_4 = \Delta \alpha_x$, $P_5 = \Delta \alpha_y$, $P_6 = \Delta \alpha_z$ terimleri sırasıyla, X, Y ve Z eksenlerine göre eğim miktarları olarak tanımlanabilir.

Bu yöntem, atıf yapılan çalışmada bir Cassegrain teleskop sisteminin ikincil aynasının hizalama kaçıklığı değerlerini tahmin etmek üzere kullanılmıştır (Zhang, Chen ve Wang, 2012). Bu çalışmada, birincil ayna astigmatik yüzey form hataları da hesaplamaya dahil edilmiş ve ikincil aynanın hizalama kaçıklıkları hesaplanmıştır. Bu çalışmada hizalama kaçıklıkları, Cassegrain teleskop sistemi kullanarak gerçekleştirilen simülasyonlar üzerinden hesaplanmıştır ve çalışmada deneysel doğrulama çalışmaları yer almamaktadır. Bu çalışmada, hizalama kaçıklıkları artırılarak oluşturulan üç farklı simülasyon mevcuttur. Hizalama kaçıklığı değerlerinin görece en küçük seçildiği birinci durum için hesaplanan sonuçlar, uygulanan hizalama kaçıklığı değerlerine çok yakın hesaplanabilirken, hizalama kaçıklığı değerleri büyüdükçe hesaplanan hizalama kaçıklığı değerlerinin uygulanan değerlerden oldukça farklı hesaplanabildiği görülmüştür. Wu, Shang ve Cao çalışmalarında, hassasiyet matrisi metodunu, üç aynalı bir teleskop sisteminde oluşturulan hizalama kaçıklığı senaryoları üzerinde doğrulamış ve iki tekrarlama sonucunca hizalama işlemini gerçekleştirmişlerdir (Wu, Shang ve Cao., 2020). Bu çalışma sadece simülasyon üzerinden

gerçekleştirilmiş, çalışmada deneysel doğrulama çalışmalarına yer verilmemiştir. Belirtildiği gibi hassasiyet matrisi yöntemi, Zernike katsayıları ile hizalama kaçıklığı değerleri arasındaki ilişkinin lineer olduğunu varsaymaktadır. Ancak, bu lineerlik, hizalama kaçıklığı değerleri büyüdükçe bozulur ve bu da hizalama kaçıklığı değerlerinin yüksek doğrulukta hesaplanamamasına ve hizalamanın yineleme gerektirmesine yol açar (Kim ve diğerleri, 2007; Wu ve diğerleri 2020). Bu sebeple, bu yöntem her ne kadar basit de olsa büyük hizalama kaçıklığı değerleri için güvenilir değildir.

Atıf yapılan çalışmada, Hassasiyet Matrisi ve Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemleri, Cassegrain tipi bir teleskopu hizalamak için kullanılmış ve her iki yöntemden elde edilen sonuçları karşılaştırmıştır (Kim ve diğerleri, 2007). Bu çalışmaya göre, Merit Fonksiyonu Regresyonu ile elde edilen hizalama kaçıklığı hesaplama sonuçları Hassasiyet Matrisi yöntemi kullanılarak elde edilen değerlere göre hata payı çok daha azdır. Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi, genellikle optik bir modelleme yazılımında kullanılır.

$$MF^2 = \frac{\sum W_i (V_i - T_i)^2}{\sum W_i} \quad (1.5)$$

Eşitlikte MF , Merit fonksiyonu; W_i ise ağırlık katsayısıdır. Ayrıca, V_i seçilen parametrelerin (genellikle optik modelleme programları ve metrolojide kullanılan Zernike Fringe terimleri ile ifade edilen dalga cephesi aberasyonları) güncel değerleri, T_i ise seçilen parametrelerin hedef değerlerdir (Wu ve diğerleri, 2019). Fonksiyonu minimize etmek için pek çok optik modelleme programı, sönümlü en küçük kareler tekniğini kullanır. Yöntem, temelde hizalama kaçıklığına sahip bir optik sistemden elde edilen hedef değerlerin, tasarımdaki güncel değerler kullanılarak optik modelleme programındaki gömülü MF , hizalama kaçıklığı parametreleri değiştirilerek minimize etmek üzere optimize edilmesi prensibi ile çalışır. İşlem sonucunda, MF eğer sınır değerinin altında ise, hesaplanan hizalama kaçıklığı değerleri sisteme uygulanır. Atıf yapılan çalışmada, Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi, Cassegrain teleskobu kullanılarak, ayna yüzey form hatalarının etkisinin göz ardı edildiği ve edilmediği simülasyonlar üzerinde doğrulanmıştır. Bu çalışmaya göre, ayna form hatalarının göz ardı edildiği durumlar için Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi, doğruluk oranının yüksek olan sonuçlar verirken, form hatalarının dahil edildiği durumlar için hesaplanan değerlerde hata oranının yükseldiği görülmüştür. Aynı çalışmada, Değiştirilmiş Merit Fonksiyonu Regresyonu yöntemi de doğrulanmış ve bu yöntemin, ayna form hatalarının

dahil edildiği durumlarda da hizalama kaçıklıklarını yüksek hassasiyet ile hesaplayabildiği görülmüştür (Wu ve diğerleri, 2019). Bu çalışmada da doğrulama faaliyetleri sadece simülasyonlar üzerinde gerçekleştirilmiş ve deneysel doğrulama çalışmaları sunulmamıştır.

Bir diğer çok bilinen hizalama metodu ise Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme metodudur. Atıf yapılan çalışmada, çok bileşenli bir optik sistem hizalanırken optik bileşenler arası bağlantı etkilerinin göz önüne alınması gerektiğini göstermiştir (Lee, Dalton ve Tosh, 2007a). Bu etkiler, bir optik bileşenin aberasyon hassasiyetinin diğer bileşenlerin de durumuna bağlı olmasına yol açar. Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme metodu kullanılarak bu etkilerin hizalama esnasında hesaba katılması sağlanabilir (Ewijk, 2017). Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme metodunun, matematiksel altyapısına, atıf yapılan çalışmalarda detaylıca yer verilmiştir (Lee ve diğerleri, 2007a; (Lee, Dalton ve Tosh, 2007b). Atıf yapılan çalışmada, Korsch tipi bir teleskopu hizalamak için Hassasiyet Matrisi, Merit Fonksiyonu Regresyonu ve Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme metodlarını kullanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır (Kim ve diğerleri, 2009). Bu çalışma kapsamında oluşturulan simülasyonda, teleskobun hem ikincil hem de üçüncül aynasına hizalama kaçıklıkları uygulanmıştır. Çalışmaya göre, Hassasiyet Matrisi yöntemi, iki aynası eş zamanlı olarak hizalama kaçıklığına sahip bu sistem için hizalama kaçıklıklarını doğru olarak hesaplayamamaktadır. Hizalama kaçıklıkları, Merit Fonksiyonu Regresyonu Yöntemi kullanılarak gerçekleştirildiğinde, hizalama kaçıklıkları doğru şekilde hesaplanabilmekte ancak hesaplama süresi çok uzamaktadır. Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen hesaplamada ise tek adımda hizalama kaçıklıklarını hesaplamak mümkün olmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmalarında, Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme yönteminin diğer yöntemler üzerindeki avantajı belirtilmiş ve bu yöntemin kullanıldığı bir deneysel çalışma sunulmuştur. Çalışmada belirtildiği üzere, Diferansiyel Dalga Cephesi Örnekleme metodu, simülasyon üzerinde yapılan doğrulama çalışmasında oldukça doğru sonuçlar vermiş ancak deneysel doğrulama çalışması esnasında, hizalama kaçıklıklarını doğru olarak hesaplayamamıştır. Bahse konu yöntemlerin tamamı, nümerik metotlara dayanmakta, yöntemlerin aberasyon teorisi ile direk bağlantıları bulunmamaktadır. Entegrasyonu tamamlanmış bir optik sistemin hassas hizalanması, ölçüm yapılan ortamın koşulları, cihazların ölçüm belirsizlikleri ve ayna yüzey form hatalarının ölçüm sonuçlarını etkilemesi gibi parametreler değerlendirildiğinde, teorik hesaplamalara göre daha karmaşıktır.

Tezin çalışmasının amacı

Bu tez çalışması, Nodal Aberasyon Teorisi'ni temel alan hizalama algoritmalarını geliştirmek üzere kaleme alınmıştır. Nodal Aberasyon Teorisi, aberasyon teorisi temelli olduğu için hizalama kaçıkları hesaplanırken, görüntü düzlemindeki aberasyon terimlerine katkısı olan her bir etkinin ayrı ayrı incelenebilmesi mümkün olmaktadır. Nodal Aberasyon Teorisi'nden, optik tasarımları ve sistemleri iyileştirmeye yönelik olarak, optik bileşenlerin daha az hassas şekilde tasarlanmasından, serbest biçimli optiklerin tasarlanması ve aberasyonlarının analiz edilmesine kadar pek çok alanda yararlanılır (Bauer Schiesser ve Rolland, 2018; Fuerschbach ve diğerleri, 2014; Rolland ve diğerleri, 2021; Wang ve diğerleri, 2025). Nodal Aberasyon Teorisi'nin optik sistemlerin hizalanmasını konu alan uygulamaları ile ilgili daha önce yapılan çalışmalardan bazıları referanslarda belirtilmiştir. Astronomi uygulamalarında kullanılan en büyük teleskop olan LSST (Legacy Survey of Space and Time) teleskobu için Nodal Aberasyon Teorisi temelli bir hizalama planı yayınlanmıştır (Sebag ve diğerleri, 2012). Birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının varlığında, iki aynalı teleskopların hizalanmasına yönelik sunulan başka bir çalışma, Monte Carlo simülasyonu ile desteklenmiştir (Gu ve diğerleri, 2018). Teleskop görüntü düzleminin merkez noktasından alınan ölçümler ile iki aynalı teleskopların hizalanmasına yönelik bir çalışmada, hizalama kaçıklığına sahip olan iki aynalı bir teleskobun tek bir alan noktasından hizalanabileceği gösterilmiştir. Bu çalışmanın uygulanabilmesi için teleskop öncelikle koma sıfır pivot noktası konseptine uygun bir hizalama kaçıklığına sahip olmalıdır. Bu koşulu sağlamak için gerekli ikincil ayna hareketlerinin de teleskop yapısal parametreleri kullanılarak nasıl hesaplanacağı, ilgili çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışma da Monte Carlo simülasyonları ile desteklenmiştir (Wu, ve diğerleri, 2021). Çalışmanın pratikteki uygulaması, ortamda türbülansın mevcut olduğu durumlarda, özellikle astigmatizm terimlerindeki türbülansa bağlı sapmalar nedeniyle sağlıklı olmayacaktır. Korsch TMA teleskopların hizalanmasına yönelik olarak sunulan başka bir çalışma da, yine Monte Carlo simülasyonları ile desteklenmektedir (Gu ve diğerleri, 2015). Nodal Aberasyon Teorisi'ni konu alan çalışmaların uygulamaları, genellikle optik tasarım programında yaratılan hizalama kaçıklığı senaryoları üzerinde gerçekleştirilmektedir. Konu ile ilgili gerçekleştirilmiş olan teorik çalışmalar, sistemlerin ideal performansları için öngörü sağlamaktadır. Ancak, deneysel koşullarda, çevresel faktörler (türbülans vb.), optik bileşenlerin mekanik entegrasyonları (montaj kusurları vb.), titreşimler ve kullanılan destek ekipmanlarının (referans düz ayna vb.) optik yüzey kusurları gibi çeşitli hata kaynakları

devreye girmektedir. Bu yüzden, örneklenen hata kaynaklarının etkilerinin dikkatlice incelenmesi ve gerçekleştirilen interferometrik ölçüm süreçlerinin, buna göre optimize edilmesi önemlidir. Deneysel koşullarda elde edilen verilerin, simülasyon sonucu elde edilen veriler ile uyumlu olabilmesi için deneysel verilerin detaylıca ve hassasiyetle analiz edilmesi gerekmektedir. Bu şekilde, deney ve simülasyon sonuçları arasındaki farklar minimize edilebilir ve optik sistemlerin yüksek hassasiyet ile hizalanması sağlanabilir. Bu sebeple, Nodal Aberasyon Teorisi'nin deneysel uygulamalarının hassasiyetle gerçekleştirilmesi önem arz etmektedir. Nodal Aberasyon Teorisi'nin deneysel uygulamalarını içeren bazı çalışmalar aşağıda belirtilmiştir. Hizalama kaçıklığına sahip bir RC teleskobunda, hizalama kaçıklığına bağlı olarak görüntü düzleminde gözlenen, alan-sabit koma aberasyonu, atıf yapılan çalışmada sunulmuştur (Zhao, Papa ve Fuerschbach, 2018). Cassegrain teleskop sisteminde hizalama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan iki astigmatizm sıfır noktalı astigmatizm görünümünün deneysel olarak incelenmesi, ilk kez atıf yapılan çalışmada sunulmuştur (Karcı ve diğerleri, 2021). Benzer şekilde, hizalama kaçıklığına sahip Cassegrain teleskop sisteminin görüntü düzlemindeki koma aberasyonunun durumu, Karcı'nın atıf yapılan çalışmasında sunulmuştur (Karcı, 2021). Birincil ayna astigmatik yüzey form hatalarının, astigmatizm sıfır noktası konumlarına etkisinin deneysel olarak gözlenmesi ve iki durumun etkilerinin ayrıştırılması, ilk kez atıf yapılan çalışmada sunulmuştur (Karcı ve diğerleri, 2022). Bu tezin bir parçası olarak araştırılan, Thompson'ın yüzey aberasyon rotasyon simetri merkezindeki kayma miktarını hesaplamak için kullandığı, gerçek ışın izleme temelli yöntemin hesaplama detayları ve hesaplamaların deneysel olarak doğrulanması, atıf yapılan çalışmada gerçekleştirilmiştir (Yeşiltepe Bauer ve Karcı., 2023). Daha sonra, sigma vektör katkılarının deneysel olarak hesaplanması, ikincil aynanın koma sıfır pivot noktası etrafında dönmesi ile oluşan özel hizalama kaçıklığı durumu için de atıf yapılan çalışmada gösterilmiştir (Yeşiltepe ve Lişesivdin, 2024). Nodal Aberasyon Teorisi, atıf yapılan çalışmada, astigmatizm aberasyonunun iki nodlu özel durumu ve astigmatizm alan yönelimleri kullanılarak iki aynalı RC tipi bir teleskobunu hizalamak için kullanılmıştır (Romer ve diğerleri, 2024). Görüldüğü üzere, Nodal Aberasyon Teorisi uygulamalarını konu alan deneysel doğrulama çalışmaları sınırlıdır ve geliştirilmeye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu tez çalışması, literatürdeki önemli bir boşluğu doldururken yüksek hassasiyetli teleskop sistemlerinin hızlı ve yüksek doğrulukta hizalanmasını hedeflemektedir.

Tez çalışmasının planı

Tez çalışması, aşağıda özetlendiği şekilde organize edilmiştir. Bölüm 2’de, tez çalışmasında yer alan başlıkların altyapısını oluşturan teorik bilgiler yer almaktadır. Bu bölümde, ilk olarak geleneksel aberasyon teorisi ve Seidel aberasyonları özetlenmiştir. Ardından, aberasyon teorisine göre eksen simetrisine sahip teleskopların nasıl tasarlanabileceği ve uygun şekilde tasarlanması ve üretilmesi halinde hangi aberasyonlar için düzeltme sağlayabileceği aktarılmıştır. Bu kısım, iki ve üç aynalı yansıtıcı teleskopların varyantlarını kapsayacak şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2’de, ek olarak optik bileşenlerin hizalama kaçıklığı sonucu, görüntü düzleminde indüklenen sigma vektör katkıları teorik olarak ele alınmıştır. Daha sonra sigma vektörler ve geleneksel aberasyon teorisinin kombinasyonu ile ortaya çıkan Nodal Aberasyon Teorisi’nin detayları ele alınmıştır. Nodal Aberasyon Teorisi’nin 3. derece koma ve astigmatizm gibi alan vektörüne bağımlı aberasyonlar için nasıl davrandığı da bu bölümün alt başlıklarında yer almaktadır. Bölüm 3’te, uygun şekilde tasarlanmış olan, eksen simetrisine sahip teleskopların yüzey dalga aberasyon katsayılarının ve hizalama kaçıklığı durumunda tetiklenen sigma vektör katkılarının nasıl hesaplanabileceği konusu detaylandırılmıştır. Bu kısımda verilen eşitlikler kullanılarak, bilinen bir hizalama kaçıklığı ile yer değiştirmiş olan bir optik bileşenin sigma vektör katkıları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu büyüklükler, yüzey dalga aberasyon katsayıları ile birlikte kullanılarak görüntü düzleminde oluşan karakteristik nodal görünüm analiz edilebilmekte ve görüntü düzleminde tetiklenen aberasyon alan vektörleri kolayca hesaplanabilmektedir.

Benzer şekilde, eğer çalışılan optik sistemin aberasyon davranışı dolayısıyla, hizalama kaçıklığı durumunda görüntü düzleminde nodal görünüm ortaya çıkmıyorsa, görüntü düzleminde tetiklenen Fringe Zernike terimleri (FZC) miktarı da görece küçük görüş alanına sahip sistemler için hesaplanabilmektedir. Görüntü düzleminde tetiklenmesi beklenen FZC terimlerinin yüksek doğrulukla hesaplanabilmesi, bu terimlerin hizalama kaçıklıklarının belirlenmesinde kullanıldığında önemli bir avantaj sunmaktadır. Nodal Aberasyon Teorisi’ni temel alan eksenel simetrik teleskopların hizalama yaklaşımı, Bölüm 4’te detaylandırılmıştır. Bu bölümde, görüntü düzleminde alınan interferogram ölçümlerinin, nasıl analiz edileceği ve aberasyon sıfır noktalarının hangi yöntemler kullanılarak hesaplanabileceği bilgisi yer almaktadır. Bölüm 5’te, Nodal Aberasyon Teoris’nin Cassegrain teleskop üzerinde gerçekleştirilen uygulamalarını ele almaktadır. Bu bölümde,

öncelikle üzerinde çalışılan, Cassegrain teleskop sistemi tanıtılmış ve ideal durumda sistemin aberasyon durumu incelenmiştir. Bu kapsamda, kırınım limitinde görüntüleme performansına sahip sistemin performans metriklerine göre durumu incelenmiş ve dalga yüzey aberasyon katsayıları hesaplanmıştır. Ayrıca, deneysel çalışmalarda kullanılacak deney test düzeneği tanıtılmış ve kullanılan ekipmanlar ile ilgili detaylı bilgi sunulmuştur. Cassegrain teleskop sistemi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar kapsamında, ilk olarak teleskopta, kasıtlı olarak hizalama kaçıklığı oluşturulmuş ve elde edilen deneysel verilerden tetiklenen sigma vektör katkıları hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları, tasarımda kasıtlı olarak yaratılan hizalama kaçıklığı simülasyonu üzerinden elde edilen sigma vektör hesaplama sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu kısım, hem simülasyon üzerinde gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen sigma vektör hesaplama yöntemi için hem de deneysel olarak sigma vektörlerin hesaplama yöntemi için uygulama içermektedir. Deneysel çalışmalar kapsamında sunulan ikinci çalışma, birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının yol açtığı nodal görünüm ile hizalama kaçıklığı kaynaklı oluşan nodal görünümün ayrı ayrı ve birlikte görülmesi durumunda, görüntü düzleminin aberasyon durumunun nasıl şekilleneceği ile ilgili bulgular içermektedir.

Bölüm 6’da, bilinmeyen hizalama kaçıklıklarına sahip Cassegrain teleskop ikincil aynasını hizalı duruma getirmek için Bölüm 4.1’de sunulan Nodal Aberasyon Teorisi tabanlı pratik bir uygulama sunulmaktadır. Bu kısımda, öncelikle teleskobun ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklığı miktarları, deneysel koşullar göz önüne alınarak sistematik olarak hesaplanmıştır. Daha sonra hesaplanan hizalama kaçıklığı değerleri ve yönleri dikkate alınarak teleskobun ikincil aynası yeniden konumlandırılmıştır. Hizalama işleminin başarısını doğrulamak amacıyla, hizalı durum için görüntü düzlemindeki aberasyonel durum yeniden incelenmiş ve aberasyon alan vektörleri, hizalı durum için hesaplanmıştır. Bu bölüm, Cassegrain teleskobun ikincil aynasının hizalı duruma getirilmesi için gerekli olan adımların detaylarını ayrıntılı bir şekilde ele almaktadır.

Bölüm 7’de, TMA tipi bir teleskop sisteminin ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklıklarını hesaplamak için bir simülasyon çalışması sunulmaktadır. Çalışmada, kullanılan teleskop sistemi, 3. derece aberasyonları düzeltebilecek şekilde tasarlanmıştır. İlk olarak üzerinde çalışılan tasarım tanıtılmış ve tasarımın aberasyon analizi sunulmuştur. Daha sonra, söz konusu teleskobun ikincil aynasında, hizalama kaçıklığı oluşturulmuş ve ikincil

ayna için bu hizalama kaçıklıklarına bağı olarak görüntü düzleminde tetiklenen sigma vektör katkıları, gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Bu çalışma, TMA teleskoplarda ikincil ayna hizalama kaçıklıklarına bağı olarak tetiklenen üçüncül ayna sigma vektör katkılarının hesaplanmasına da bir örnektir. Daha sonra, yaratılan simülasyon çalışması kullanılarak elde edilen FZC terimleri, ikincil ayna hizalama kaçıklıklarını hesaplamak için kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, hesaplanan ve uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.





2. TEORİK ARKA PLAN

İdeal optik sistemlerde, obje düzlemi üzerindeki bir noktadan çıkan ışınların tamamı, görüntü düzlemindeki ideal bir noktada kesişir. Küresel bir yansıtıcı veya kırıcı yüzey kullanılarak görüntü oluşumuna yönelik ilk türetilen formüller, yalnızca yaklaşık olarak doğrudur.

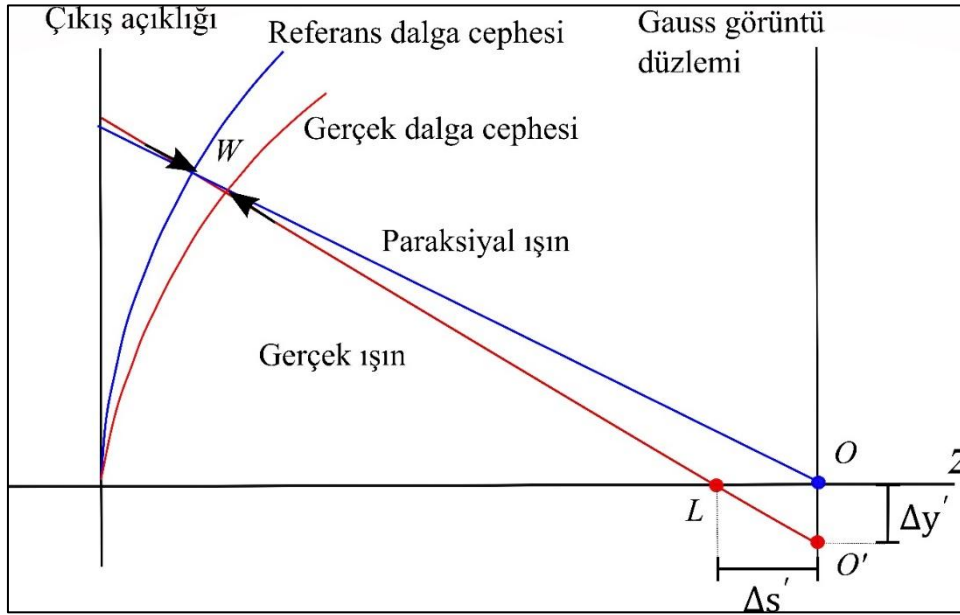
Bu formüller türetilirken paraksiyal ışınların optik eksen ile çok küçük açılar yaptığı varsayılmıştır (Pedrotti ve diğerleri, 2017). Matematiksel olarak, aşağıda açılımları verilen sinüs ve kosinüs fonksiyonları ilk terimlerine yaklaştırılmıştır.

$$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} + \dots \quad (2.1)$$

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} + \dots \quad (2.2)$$

Küçük açı ya da paraksiyal yaklaşım, genellikle Gauss optiği olarak bilinir. Gauss optiği sadece görüntünün yeri ve boyutu ile ilgilenir. Bahse konu görüntü oluşturma formülleri, daha yüksek dereceli terimler de dahil edilerek yapılırsa, kusursuz görüntüden sapmalar meydana gelmekte ve bu sapmalar ışınların optik eksenle yaptığı açı büyüdükçe de artmaktadır. Gerçek bir optik sistemde, optik sistemde yer alan her bir optik bileşen aberasyon ürettiği için kusursuz bir görüntü elde etmek mümkün değildir. Yani, paraksiyal yaklaşımın aksine, gerçek bir optik sistemde objenin bir noktasından çıkan ışınlar, Gauss görüntü düzleminin ideal noktasında birleşemez, bu noktadan bir miktar saparak konumlanırlar. Bu ideal noktadan sapmalar, aberasyon olarak adlandırılmaktadır. Yaklaşım, sinüs fonksiyonu açılımındaki bir sonraki terim olan x^3 'ü içerecek şekilde yapılırsa, sonuç, görüntü kalitesini en çok etkileyen 3. derece aberasyonları verecektir (Pedrotti ve diğerleri, 2017; Wilson, 1996). Bu yüzden teleskopların aberasyon teorisi, daha çok 3. derece aberasyonlar üzerine yoğunlaşmıştır. 3. derece aberasyonlar, ilk defa Alman fizikçi Ludwig von Seidel tarafından sistematik şekilde çalışılmış ve kategorize edilmiş olduğu için Seidel Aberasyonları olarak da adlandırılır (Pedrotti ve diğerleri, 2017). Yaklaşım, x^5 ve daha yüksek dereceli terimleri içerecek şekilde uygulandığında ise daha yüksek dereceli aberasyonlar da elde edilir. Bu tez kapsamında 3. derece aberasyonlar incelenecektir.

İdealden sapmalar, nicel olarak pek çok farklı şekilde ifade edilebilirler. İdeal noktadan görüntü düzlemi boyunca gerçekleşen sapmalar enine, optik eksen boyunca olan sapmalar uzunlamasına sapmalar olarak adlandırılır. Işıklar, her zaman, dalga cephesine dik olduğu için dalga cephesindeki deformasyon ile ışınların enine aberasyonları eşdeğerdir (Gross, 2005). Dalga cephesindeki deformasyon, dalga cephesi hatası olarak adlandırılır. Aberasyonların yukarıda belirtilen üç tanımlamasının birbiri ile olan ilişkisi, Şekil 2.1’de gösterilmiştir (Zhong, 2018).

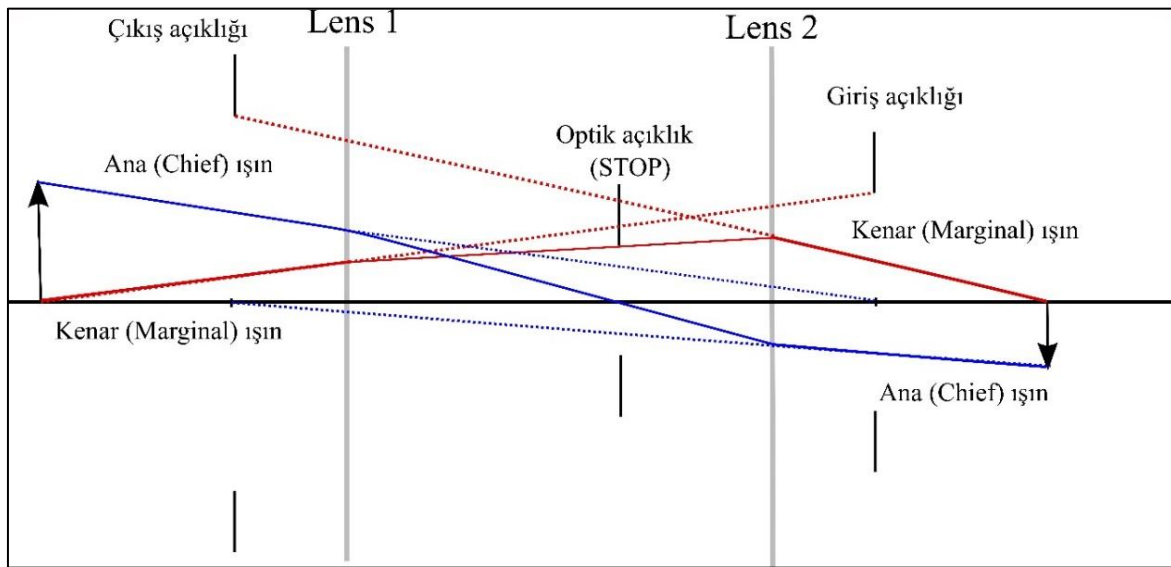


Şekil 2.1. Enine ve uzunlamasına ışın aberasyonları ve dalga hatası gösterimi

Şekil 2.1’de dalga aberasyonu, gerçek dalga cephesi ile çıkış açıklığındaki küresel referans dalga cephesi ile arasındaki farktır ve W ile gösterilir. Burada ideal görüntü, O noktasında oluşur, fakat deformasyondan dolayı görüntü gerçek ışın ile görüntü düzleminin kesişim noktası olan O' de oluşmuştur. Görüntü düzlemindeki O ’dan O' ’ne olan sapma enine aberasyondur ve $\Delta y'$ ile gösterilir. Ayrıca, gerçek ışın optik eksenini L noktasında keser, O noktasının L noktasına optik eksen boyunca olan uzaklığı $\Delta s'$, uzunlamasına aberasyon olarak ölçülür.

Geleneksel aberasyon teorisi, rotasyonel simetrik sistemler için geliştirilmiştir. Bu yüzden sistemdeki tüm paraksiyal ışın izlemeyi göstermek için kenar (marginal ray) ve ana ışınları (chief ray) adı verilen iki ışını kullanmak yeterlidir. Kenar ışın, objenin eksen üzerindeki noktasından doğan ve optik açıklığın (aperture stop) kenarından geçen ışıdır. Ana ışın ise,

obje boyunun maksimum olduğu yerden çıkan ve optik açıklığın merkez noktasından geçen ışındır. Bir optik sistemde optik açıklık, o sisteme giren ışın demetini sınırlayan fiziksel bir yüzeydir. Giriş açıklığı, bu optik açıklığın görüntü uzayından bakıldığındaki görüntüsüdür, çıkış açıklığı ise, optik açıklığın obje düzleminde bakıldığında görüntüsüdür. Normal olarak kenar ve ana ışınlar, sistemin Teğetsel (Tangential, Meridyen düzlemi) düzleminde seçilir. Teğetsel düzlem, hem ana ışını, hem de optik eksenini içine alan yüzey olarak tanımlanır. Sagittal (Sagittal) düzlem ise ana ışını içine alan ve teğetsel düzleme dik olan düzlem olarak tanımlanır. Kenar ve ana ışınlarının konumları Şekil 2.2’de gösterilmektedir.



Şekil 2.2. Optik açıklık, giriş ve çıkış açıklıkları, kenar ve ana ışınlarının bir optik sistem üzerinde şematik olarak gösterimi

Monokromatik (tek dalga boyu) ışın için, beş adet Seidel aberasyonu mevcuttur ve bu aberasyonlar; küresel aberasyon, koma, astigmatizm, alan eğriliği ve distorsiyondur (Pedrotti ve diğerleri, 2017). Bu aberasyonlar, dalga aberasyonu şeklinde ifade edildiğinde, dördüncü derece olarak sınıflandırılır. Ancak, enine aberasyonlar olarak ifade edildiğinde, enine aberasyonlar dalga aberasyonunun gradyanı alınarak elde edildiğinden bir derece küçük yani 3. derece aberasyonlar olarak ifade edilir. Enine aberasyonlar ve dalga aberasyonları arasındaki ilişki aşağıdaki denklemler ile verilmiştir (Bkz. Şekil 2.1).

$$\Delta x' = -\frac{R_{ref}}{n} \frac{\partial W(x_p, y_p)}{\partial W(x_p)} \quad (2.3)$$

$$\Delta y' = -\frac{R_{ref}}{n} \frac{\partial W(x_p, y_p)}{\partial W(y_p)} \quad (2.4)$$

$\Delta x'$ ve $\Delta y'$, görüntü düzleminde X ve Y eksenlerindeki enine aberasyonlara karşılık gelmektedir. R_{ref} , referans küresel dalga cephesinin eğrilik yarıçapıdır. x_p ve y_p , giriş açıklığının X ve Y eksenlerindeki koordinatlarıdır. n ise görüntü uzayındaki kırıcılık indisidir. Dalga cephesi hatasının, X ve Y'ye göre kısmi türevleri, enine aberasyon miktarını vermektedir.

2.1. Rotasyonel Simetrik Optik Sistemler için Aberasyon Teorisi

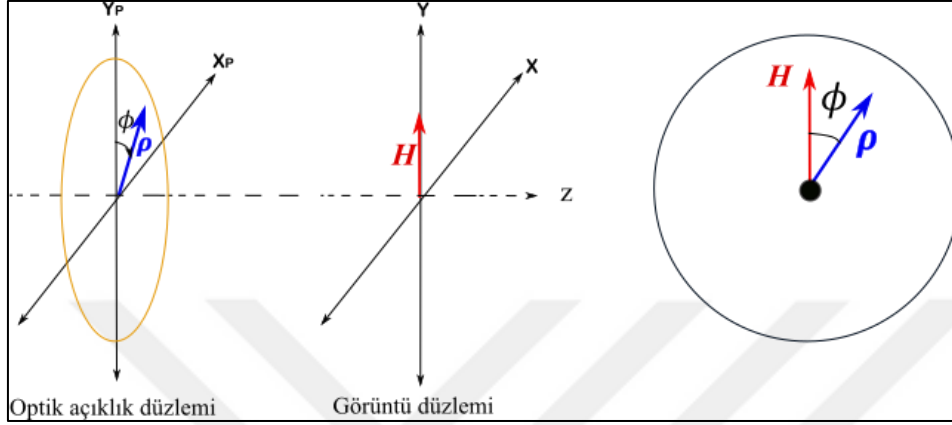
Önceki bölümde detaylandırıldığı üzere, dalga aberasyonu, gerçek bir dalga cephesinin ideal/kusursuz formdaki referans dalga cephesinden sapması olarak tanımlanabilir. 20. yüzyılın ortalarında H. H. Hopkins aberasyonların dalga teorisini Fourier yöntemini temel olarak geliştirmiş ve aberasyonları, öğrencisi R.V. Shack'ın da katkısıyla alan H ve optik açıklık ρ vektörlerinin bir fonksiyonu şeklinde ifade etmiştir (Krishna ve Sagar, 2017). Buna göre, rotasyonel simetriğe sahip bir optik sistemin, dalga cephesi hatası, optik sistemdeki her bir yüzeyden gelen aberasyon alanı katkılarının toplamı olarak hesaplanan bir polinom genişlemesi şeklinde ifade edilir (Hopkins, 1950).

Rotasyonel simetrik optik sistemler için Hopkins tarafından sunulan skaler formdaki dalga aberasyon fonksiyonu, Eş. 2.5 ile verilmiştir.

$$W(H, \theta = 0, \rho, \phi) = \sum_j \sum_{p=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} (W_{klm})_j H^k \rho^l \cos^m \phi \quad (2.5)$$

Eşitlik 2.5'te H normalize alan yüksekliği, ρ çıkış açıklığındaki yükseklik ve j yüzey sayısıdır. H ve ρ 'nun grafiksel gösterimi, Şekil 2.3'te verilmiştir. W_{klm} , dalga aberasyon katsayısı ve ϕ , optik açıklığın dikey ekseninden ölçülen azimut açısıdır. θ ise alanın dikey ekseninden saat yönünde ölçülen azimut açısıdır. Rotasyon simetrisinden dolayı θ açısı sıfırdır ve ilgili aberasyon fonksiyonu, üç rotasyon değişmezinin (H^2 , ρ^2 ve $H\rho \cos \phi$) bir veya daha fazlasını içeren terimleri için geçerlidir (Mahajan, 1998). j , p , m , ve n indisleri, pozitif tamsayılardır. $k = 2p + m$ ve $l = 2n + m$, rotasyon ve ayna değişmezlerinin sonuçları ve sırasıyla H and ρ 'nun kuvvetleridir (Gray ve diğerleri, 2012). $k + l = 4$ için

W_{klm} dalga aberasyon katsayıları, 3. derece aberasyonlardır (enine aberasyon sınıflandırmasına göre) ve paraksiyal ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Burada, sadece W_{klm} dalga aberasyon katsayılarının j 'nin bir fonksiyonu olduğuna dikkat edilmelidir.



Şekil 2.3. Optik açıklık ve görüntü düzlemleri için normalize koordinat sistemi

W fonksiyonunun 3. derece aberasyonlar için genişletilmiş formu, Eş. 2.6 ile şu şekilde verilmiştir.

$$W(H, \rho, \phi) = W_{040}\rho^4 + W_{131}H\rho^3 \cos \phi + W_{220s}H^2\rho^2 + W_{222}H^2\rho^2 \cos \phi^2 + W_{311}H^3\rho^3 \cos \phi \quad (2.6)$$

Eşitlikte, $W_{klm} = \sum_j W_{klmj}$ (örnek olarak $W_{040} = \sum_j W_{040j}$) optik sistemdeki bileşenlerden gelen yüzey katkılarının toplamı olarak verilmiştir. Burada, W_{040} , W_{131} , W_{220s} , W_{222} , ve W_{311} sırasıyla küresel aberasyon, koma, alan eğriliği, astigmatizm ve distorsiyon olarak adlandırılır. 3. derece dalga aberasyon katsayılarının, H , ρ , $\cos \phi$ bağımlılıkları, enine aberasyonlar ve dalga aberasyonlarına göre isimlendirmeleri Çizelge 2.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1. 3. derece aberasyonların H , ρ ve $\cos \phi$ bağımlılıkları ve isimlendirmeler

H^k	ρ^l	$\cos^m \phi$	Katsayı	Enine Aberasyon (Derece)	Dalga Aberasyonu (Derece)
0	4	0	W_{040}	3	4
1	3	1	W_{131}	3	4
2	2	0	W_{220s}	3	4
2	2	2	W_{222}	3	4
3	1	1	W_{311}	3	4

Özetle, Eş. 2.5 ve Eş. 2.6 rotasyonel simetrik optik sistemlerin görüntü düzlemindeki toplam dalga aberasyonunu ifade etmek için genelleştirilmiş formüllerdir ve geleneksel aberasyon teorisi olarak adlandırılır. Geleneksel aberasyon teorisine göre, görüntü düzlemindeki toplam dalga aberasyon miktarı, ilgili optik sistem içindeki her bir yüzeyin yüzey dalga aberasyon katkılarının toplamıdır (Thompson, 2005). Her bir yüzeyden gelen 3. derece aberasyon alanları, her yüzey için aynı olan optik eksen etrafında kendi alan bağımlılıklarına göre rotasyonel simetriktir.

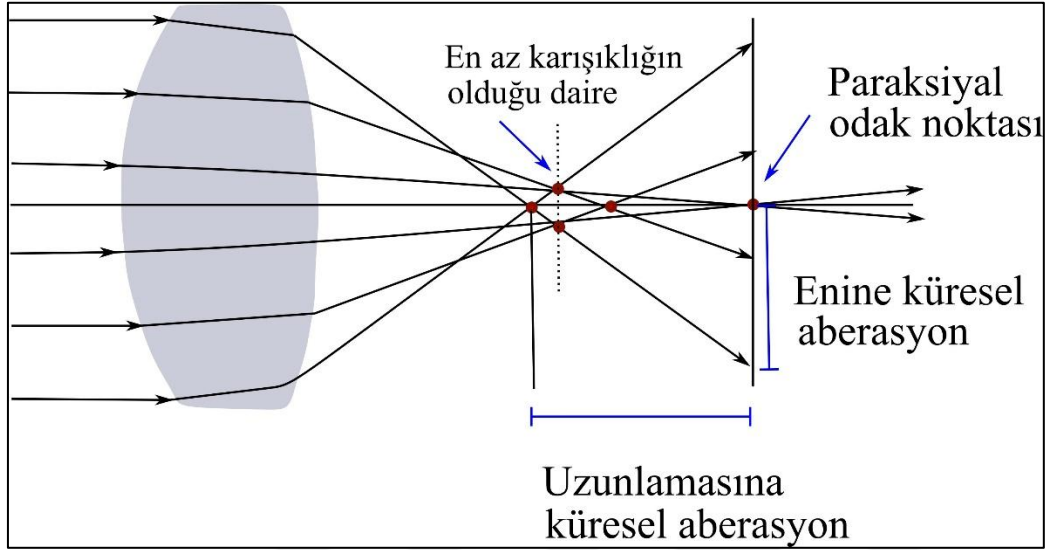
2.2. Seidel (3. Derece) Aberasyonları

Gauss optiğinin ideal koşullarından sapmalar, optik aberasyonlar olarak bilinir (Hecht, 2002). Aberasyonlar, temel olarak belirli bir dalga boyu aralığı (kromatik) ve tek dalga boyulu (monokromatik) olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Kromatik aberasyonlar, kırıcılık indisi n 'nin dalga boyunun bir fonksiyonu olmasından ileri gelirken, monokromatik aberasyonlar, ışığın enerjisi tek dalga boyuna ya da çok küçük bir dalga boyu aralığında sınırlandırılmış olsa dahi ortaya çıkar. Monokromatik aberasyonlar da kendi aralarında küresel aberasyon, koma, astigmatizm, alan eğriliği ve distorsiyon gibi alt gruplara ayrılır. Küresel aberasyon, koma ve astigmatizm aberasyonları, görüntüyü belirsiz, bulanık hale getirerek görüntüde bozulmalara yol açar. Alan eğriliği ve distorsiyon ise görüntünün biçiminde bozulmaya yol açar; ancak görüntüde bulanıklaşmaya yol açmaz. Yukarıdaki bölümde de anlatıldığı gibi, Snell kanunundaki $\sin \theta$ ifadesinin bu terimin matematiksel açılımındaki ilk iki terimine yaklaştırılması ile genişletilmesi 3. derece aberasyon teorisi olarak adlandırılır. Seidel ya da 3. derece aberasyonlar olarak bilinen aberasyonlar sonraki alt bölümlerde detaylı olarak tanıtılmaktadırlar.

2.2.1. Küresel aberasyon (W_{040})

Küresel aberasyon, odak noktasının optik açıklık yarıçapı ile değişmesi olarak tanımlanabilir (Kingslake, 2012). Objeden gelen kenar ışınlar ile paraksiyal ışınlar, optik eksenini farklı noktalarda keserler. Küresel aberasyon, 3. derece aberasyonlar arasında, alan yüksekliğinden bağımsız olan tek aberasyondur (Bentley ve Olson, 2012) ve bu tip aberasyonlar eksen üstü aberasyonlar olarak adlandırılır. Küresel aberasyon, Şekil 2.4'te şematik olarak gösterilmektedir (Hecht, 2002). Şekilde, lensin kenarına yakın geçen ışınlar, optik sistemi lense en yakın noktada kesmektedir. Bu noktadan paraksiyal odak noktasına olan uzaklık

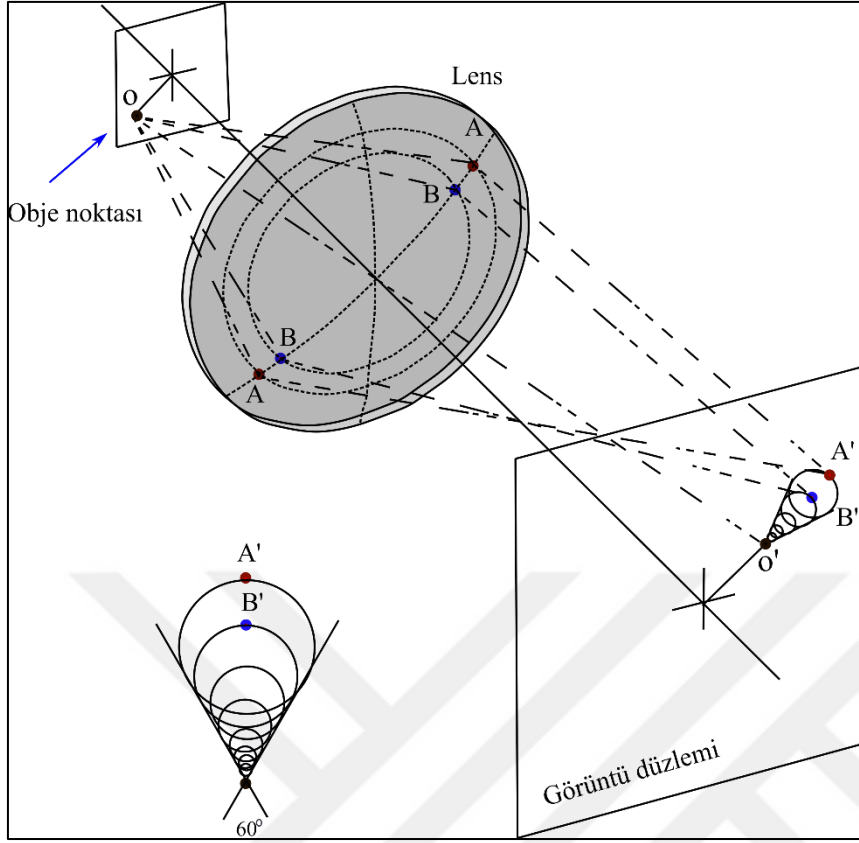
uzunlamasına küresel aberasyon olarak adlandırılır. Bu ışınların paraksiyal odaktan görüntü düzlemi boyunca ölçülen mesafeleri ise enine küresel aberasyon olarak adlandırılır. Karışıklığın en az olduğu bölge ise, görüntü düzlemindeki noktanın boyutunun ve dalga cephesi hatasının en az olduğu bölgedir.



Şekil 2.4. Küresel aberasyonun şematik gösterimi

2.2.2. Koma (W_{131})

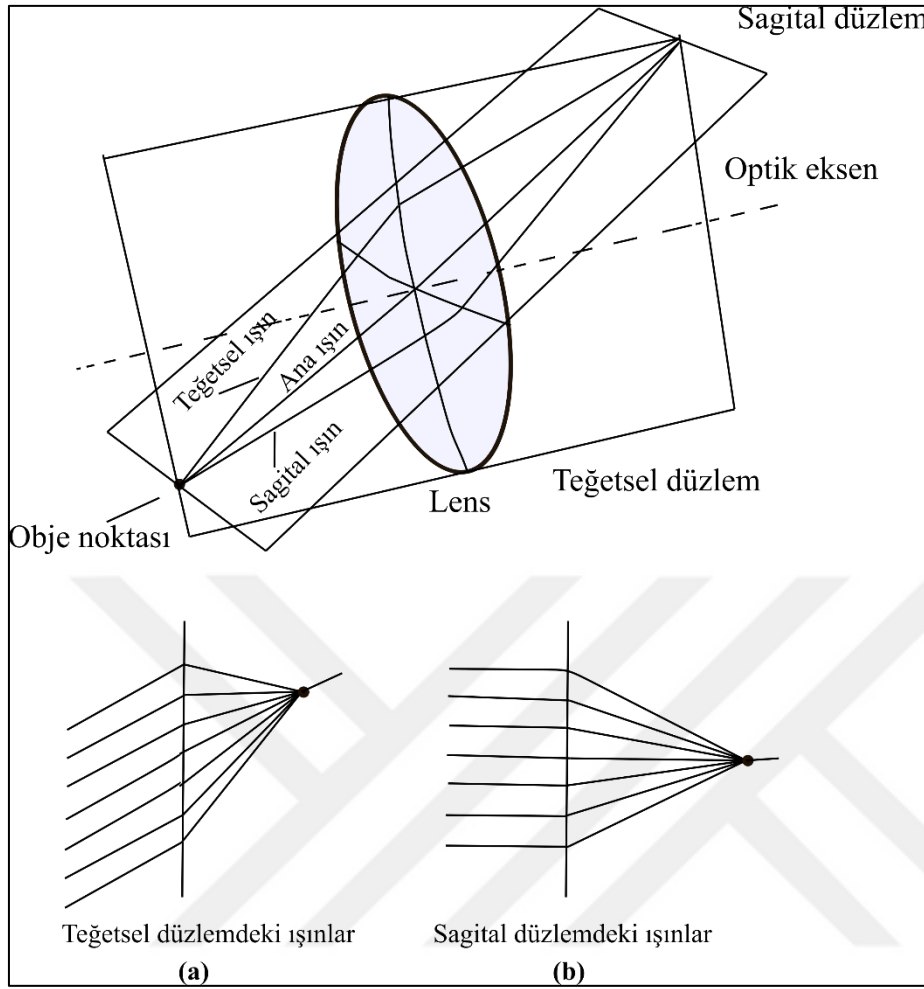
Koma aberasyonu, görüntü yeri ve boyutunun, optik açıklığın bölgesel yarıçapına bağlı olarak değişmesidir ve görüntü düzleminde kuyruklu yıldız benzeri bir bulanıklık ile sonuçlanır. Koma aberasyonunun büyüklüğü, alandaki yüksekliği belirten H parametresi ile orantılıdır. Rotasyonel simetrik optik bileşenler içeren hizalı optik sistemlerde koma aberasyonu, eksen dışı bir aberasyondur ve eksen üstü bir noktadan gelen ışınlar koma aberasyonuna sebep olmaz (Kingslake, 2012). Gauss görüntü düzlemi merkezinde koma aberasyonu, $H = 0$ durumu için sıfırdır ve alan yüksekliği arttıkça da lineer alan bağımlılığı ile ilişkili olarak sıfırdan farklı değerler alır. Şekil 2.5'te koma aberasyonunu şematik olarak gösterilmektedir (Hecht, 2002).



Şekil 2.5. Koma aberasyonunun şematik gösterimi

2.2.3. Astigmatizm (W_{222})

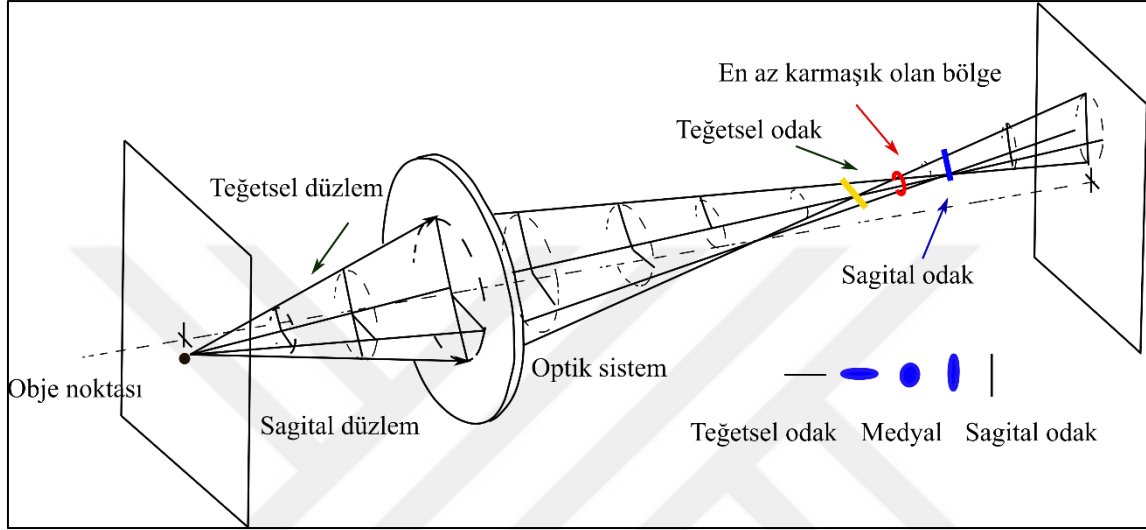
Eğer, obje noktası, optik eksenden oldukça uzak bir konumdaysa, koni şeklinde gelen ışınlar, lense asimetrik bir şekilde çarpacak ve astigmatizm aberasyonu ortaya çıkacaktır (Hecht, 2002). Eksen dışı bir objeden çıkan, Teğetsel düzlemden ve Sagital düzlemden gelen ışınlar, görüntü uzayında farklı noktalarda odaklanırlar (Hecht, 2002). Teğetsel ve Sagital düzlem üzerindeki ışınlar, Şekil 2.6'da şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Teğetsel ve Sagital düzlemler: a) Teğetsel ışınlar ve b) Sagital ışınların üstten görünümü

Şekil 2.6’da, Teğetsel düzlem üzerindeki ışınların lense göre sagital düzlem üzerindeki ışınlar göre bir miktar daha eğik olduğu ve Fermat prensibi gereği daha kısa odak uzunluğuna sahip oldukları görülmektedir. Işınlara açısı arttıkça, yani obje optik ekseninden uzaklaştıkça, astigmatizm aberasyonu quadratik olarak artar. Teğetsel odak, Teğetsel düzlem üzerinden gelen ışınların odaklandığı noktadır ve henüz odaklanmamış sagital düzlem ışınlarına ait çizgi şeklindeki görüntü bu noktada Teğetsel düzleme dik olacak şekilde oluşur. Bahse konu çizgi şeklindeki görüntü, birincil görüntü olarak adlandırılır. Sagital odak ise, sagital düzlemde gelen ışınların odaklandığı noktadır ve odaklandıktan sonra tekrar açılan Teğetsel düzlem ışınlarının ikincil görüntü olarak adlandırılan çizgi şeklindeki görüntüsü bu noktada, Teğetsel düzlem üzerinde oluşur (Greivenkamp, 2004). Bu iki odak arasında konumlanmış, görüntünün daireye en yakın formda olduğu bölge, medyal odak olarak adlandırılır. Bu odakların her biri, farklı kavisli bir görüntü düzlemi üzerinde yer alır. Astigmatizm aberasyonu da eksen dışı aberasyonlar kategorisindedir. Rotasyonel simetrik

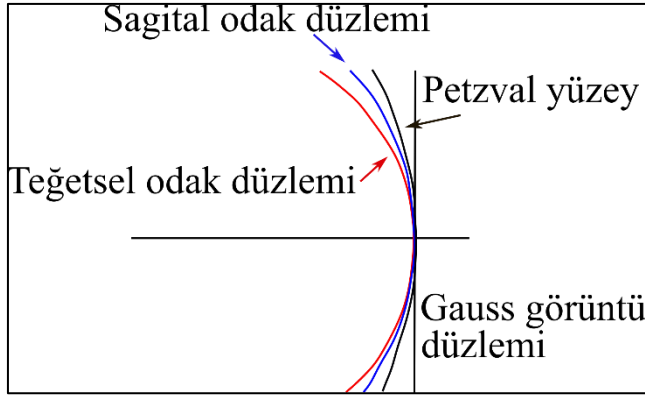
bir optik sistemde, objenin eksen-üstü noktasından gelen ışınlar optik bileşenlere simetrik olarak çarpacaktır ve eksen üstü nokta için Teğetsel ve Sagital düzlemlerden gelen ışınların odak noktası birbiriyle çakışacaktır (Şekil 2.7). Eksen üstünde yani $H = 0$ noktasında astigmatizm sıfır olacağı için eksen üstü noktada astigmatizm aberasyonunun görülmesi üretim hatalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.7. Astigmatizm aberasyonunun şematik gösterimi

2.2.4. Alan eğriliği (W_{220})

Alan eğriliği aberasyonu, optik sistemlerin doğal olarak kavisli görüntü düzlemine sahip olma eğilimlerini karakterize eder. Alan eğriliği, uzunlamasına bir odak kayması olarak tanımlanabilir ve alan yüksekliğinin karesi ile değişir. Astigmatizmin olmadığı durumda, görüntünün eğriliği, Petzval alan eğriliği olarak adlandırılır. Petzval, Teğetsel ve Sagital yüzeyler birbiriyle çakışır. Kavis, görüntüleme sistemine doğru kıvrılmış ise pozitifdir. Görüntü düzlemi, eğriliği Petzval eğriliğine eşit olacak biçimde kavisli hale getirilirse, bu aberasyon ortadan kalkacağı için alan eğriliği aberasyonu, görüntüyü bozan değil görüntünün biçimini bozan aberasyon olarak değerlendirilmektedir. Petzval, sagital ve Teğetsel görüntü düzlemleri Şekil 2.8’de gösterilmektedir (Hecht, 2002). En iyi görüntü, Sagital ve Teğetsel düzlemlere eşit mesafede, orta noktada bulunan medyal yüzeydir.



Şekil 2.8. Petzval, Sagittal ve Teğetsel görüntü düzlemleri

Petzval, Sagittal ve Teğetsel görüntü yüzeyleri arasındaki aberasyon katkıları dönüşümü, Hopkins tarafından türetilen aşağıdaki eşitlikler kullanılarak gerçekleştirilebilir.

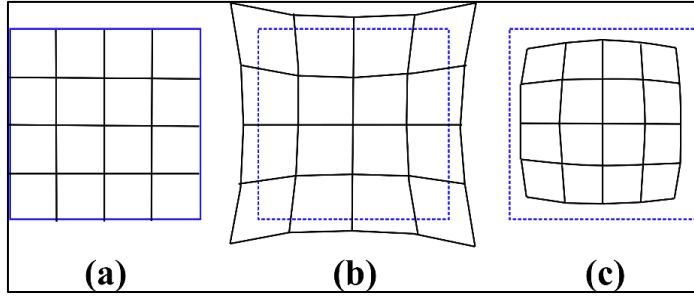
$$W_{220M} = W_{220S} + \frac{1}{2}W_{222} \quad (2.7)$$

$$W_{220S} = W_{220P} + \frac{1}{2}W_{222} \quad (2.8)$$

Yukarıdaki eşitliklerdeki, M , S ve P alt indisleri sırasıyla, Medyal, Sagittal ve Petzval yüzeyleri ifade etmektedir.

2.2.5. Distorsiyon (W_{311})

Distorsiyon, alan açısının 3. kuvveti ile değişen, alan yüksekliğine bağlı bir büyütme hatasıdır. Distorsiyonun varlığında dahi obje üzerindeki noktalar, görüntü düzleminde nokta şeklinde görüntülenir; yani, görüntüde bir bulanıklık yoktur. Ancak, düz çizgiler, düz çizgi şeklinde görüntülenmez ve görüntü biçiminde bozulma gözlenir. Distorsiyon, görüntü kalitesinde bulanıklığa yol açmadığı için MTF (Modulation Transfer Function) değeri gibi görüntü kalitesini belirleyen parametrelerde düşüş gözlenmez ve görüntü işleme araçları kullanılarak düzeltilebilir. İçbükey ve dışbükey distorsiyon aberasyonları, Şekil 2.9'da gösterilmiştir (Hecht, 2002).



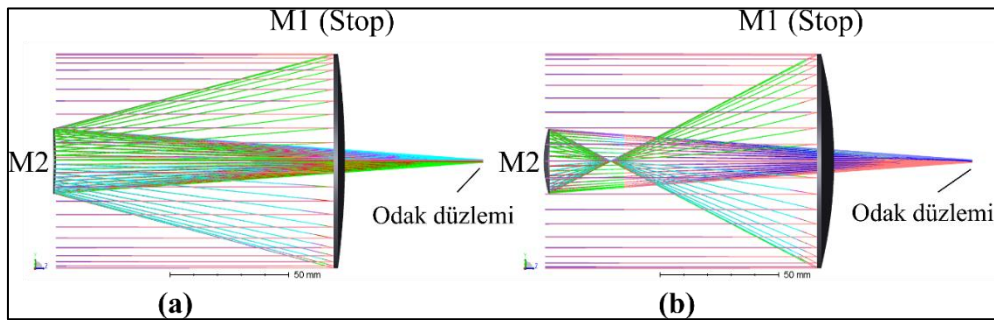
Şekil 2.9. a) Bozulmamış görüntü, b) içbükey distorsiyon (Cussion), c) dışbükey distorsiyon (Barrel)

2.3. Eksenel Simetrik Teleskopların Tasarımı

Teleskop tasarımı, Galileo ve Newton zamanlarından başlayan, her bir adımı teknolojiye gelişmeler ve bilim insanlarının çok önemli katkıları ile yapılandırılmış uzun ve ilgi çekici bir tarihe sahiptir (Bhatia ve Ciani, 1998). Bir teleskobun karakteristiği, teleskobun tasarımı esnasında seçilen parametreler ile belirlenir. Her ne kadar gerçekleştirilmiş bir teleskop sisteminin performansı, optik bileşenlerin üretimi, montajı ve hizalamansı gibi etkenlerden kaynaklanan hatalardan etkilense de başlangıç noktası olarak tasarım parametrelerinin doğru belirlenmesi hedeflenmelidir.

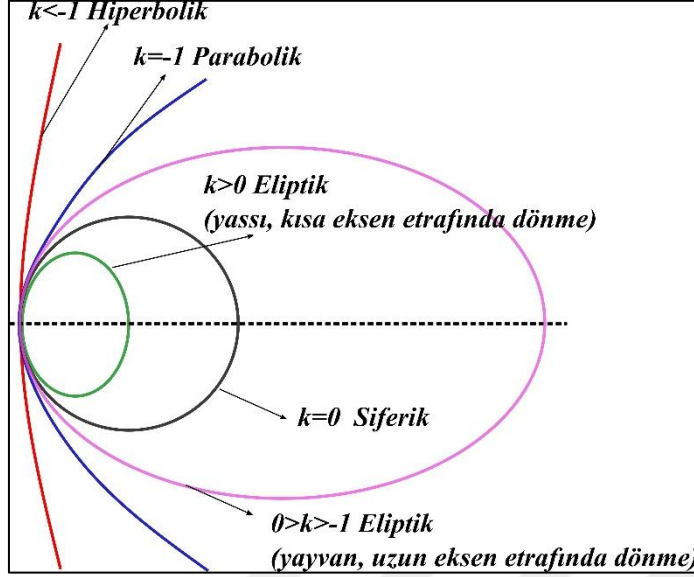
2.3.1. İki aynalı eksenel simetrik teleskoplar

İki aynalı yansıtıcı teleskoplar, temel olarak Cassegrain ve Gregoryen teleskoplar olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Cassegrain teleskoplar, içbükey birincil aynaya ve dışbükey ikincil aynaya sahipken, Gregoryen teleskoplar, içbükey birincil ve ikincil aynaya sahiptirler (Şekil 2.10). Aynalar aberasyon düzeltme kapasitesi yüksek olan asferik yüzey formlarında seçilmiştir.



Şekil 2.10. a) Cassegrain tipi teleskop, içbükey birincil ayna ve dışbükey ikincil ayna, b) Gregoryen tipi teleskop, içbükey birincil ve ikincil ayna

Asferik bir yüzey, temel küresel ve konik bir yüzeyin özelliklerinin kombinasyonu şeklinde ifade edilebilir. Asferik bir yüzey, yüzey eğrilik yarıçapı (r) ve yüzey konik sabiti (k) parametreleri ile tanımlanır. Konik yüzey formlarını ifade eden şematik gösterim, Şekil 2.11’de verilmiştir (Schuhmann, 2019).



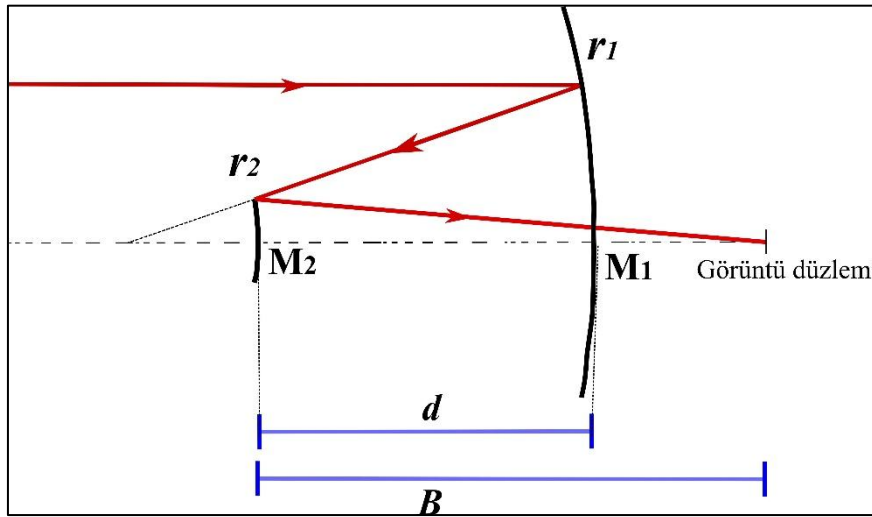
Şekil 2.11. Konik yüzey formları

Yansıtıcı teleskopların özelliklerini ve aberasyon düzeltme kapasiteleri, Çizelge 2.2 ile verilmiştir (Bhatia ve Ciani, 1998).

Çizelge 2.2. Yansıtıcı iki ve üç aynalı teleskopların özellikleri

Kategori	Versiyon	Aberasyon düzeltme kapasitesi					Konik sabitleri		
		W_{040}	W_{131}	W_{222}	W_{220}	W_{311}	k_1	k_2	k_3
Cassegrain	Klasik	-	+	+	+	+	Parabolik	Hiperbolik	-
	Ritchey-Chrétien	-	-	+	+	+	Hiperbolik	Hiperbolik	-
	Dall-Kirkham	-	+	+	+	+	Eliptik	Siferik	-
Gregoryen	Klasik	-	+	+	+	+	Parabolik	Eliptik	-
	Aplanatik	-	-	+	+	+	Eliptik	Eliptik	-
TMA	Paul	-	+	+	+	+	Parabolik	Hiperbolik	Eliptik
	Paul-Baker	-	-	+	+	+	Parabolik	Hiperbolik	Siferik/ Eliptik
	Korsch	-	-	-	-	+	Eliptik	Hiperbolik	Eliptik

Çizelge 2.2’de verilen "-" sembolü, söz konusu optik sistemin ilgili aberasyonu düzeltebildiği, "+" sembolü ise düzeltemediği yani sistemde söz konusu aberasyonun mevcut olduğu anlamındadır. Çizelge 2.2’de verildiği üzere, klasik Cassegrain, Dall-Kirkham ve klasik Gregoryen tipi teleskoplar küresel aberasyon için düzeltilmiştir. Klasik Cassegrain ve Gregoryen teleskoplarda birincil ayna olarak kullanılan parabolik aynada, parabolik şeklin doğası gereği toplam küresel aberasyon katkısı sıfırdır. İkincil ayna olarak ise klasik Cassegrain teleskoplarda hiperbolik ve klasik Gregoryen teleskoplarda ise eliptik aynalar kullanılır. Bu asferik aynalar için sferik ve asferik 3. derece küresel aberasyon katkıları üretilir ve bu katkılar birbiri ile aynı büyüklükte fakat ters işaretli olduğundan katkısı sıfırdır. Bunun sonucunda, görüntü düzlemindeki net 3. derece küresel aberasyonu miktarı sıfır olur. Dall-Kirkham tipi teleskoplarda ise ikincil ayna küresel formdadır ve bu ayna için asferik küresel aberasyon katkısı üretilmez. Küresel aberasyon düzeltme mekanizması, eliptik birincil aynanın toplam küresel aberasyon katkısının, ikincil aynanın küresel aberasyon katkısı ile dengelemesi ile sağlanır. İki aynalı teleskoplarda, etkin odak uzunluğu (f), ikincil ayna tepe noktasından sistem odağına mesafe (B) ve iki ayna tepe noktaları arasındaki mesafe (d) belirlenerek birincil ve ikincil ayna eğrilik yarıçapları sırasıyla r_1 ve r_2 belirlenebilir (Smith, 2008).



Şekil 2.12. İki aynalı teleskop konfigürasyonu, M1: birinci ayna, M2: ikincil ayna

$$r_1 = \frac{2df}{B - f} \quad (2.9)$$

$$r_2 = \frac{2dB}{B + d - f} \quad (2.10)$$

Teleskobun, 3. derece küresel aberasyon için düzeltme sağlayabilmesi için seçilen k_2 konik sabiti için k_1 değeri Eş. 2.9 verildiği şekilde ayarlanır.

$$k_1 = \left(\frac{B}{f}\right) \cdot \frac{(B + d - f)}{(B - f)^3} [(B + d - f)^2 k_2 + (f + d - B)^2] - 1 \quad (2.11)$$

İki aynanın da küresel aberasyonu birbirinden bağımsız olarak düzelttiği klasik Cassegrain ve Gregoryen teleskoplar için birincil ve ikincil ayna konik sabitleri Eş. 2.10 ve Eş. 2.11’de verildiği gibi ayarlanır.

$$k_1 = r_1^3 \frac{(f - B)^3}{8d^3 f^3} \quad (2.12)$$

$$k_2 = r_2^3 \frac{(f - d - B)(f + d - B)^2}{8d^3 B^3} \quad (2.13)$$

3. derece küresel aberasyonun yanı sıra 3. derece koma aberasyonu için de düzeltilmiş teleskop konfigürasyonlarını (RC ve aplanatik Gregoryen) elde etmek için ikincil ayna konik katsayısı, aşağıda eşitlik ile verilen spesifik değere ayarlanmalıdır.

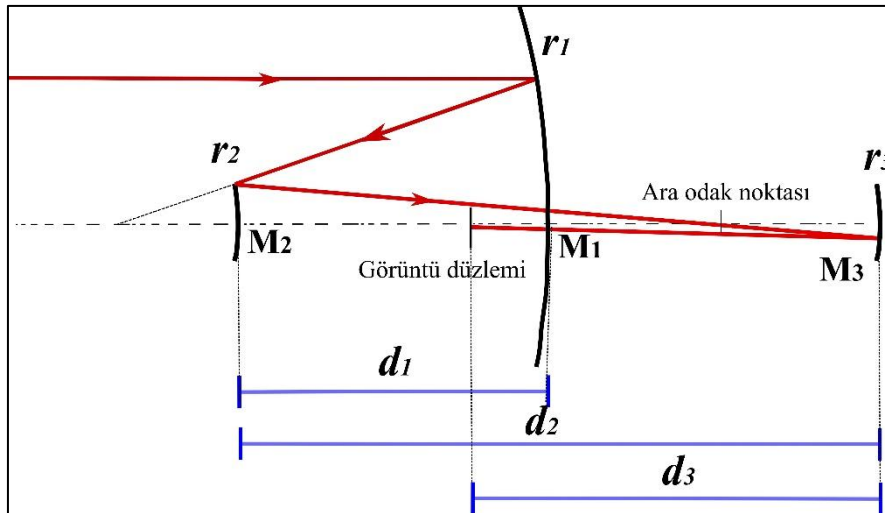
$$k_2 = r_2^3 \frac{[2f(B - f)^2 + (f - d - B)(f + d - B)(d - f - B)]}{8d^3 B^3} \quad (2.14)$$

2.3.2. Üç aynalı aksenal simetrik teleskoplar

Üç aynalı anastigmat (TMA) teleskoplar, görüntü düzlemindeki 3. derece aberasyonları düzeltebilen üç adet asferik ayna içerir. Paul, Paul-Baker ve Korsch gibi versiyonları mevcuttur. Paul tipi teleskoplar, küresel aberasyon için tam düzeltme sağlayabilirken diğer aberasyonlar için kısmi düzeltme sağlar. Paul-Baker tipi teleskoplar, küresel ve koma aberasyonları için tam düzeltme sağlayabilirken, diğer aberasyonlar için kısmi düzeltme sağlar. Paul-Baker tipi teleskoplar, ayrıca ikincil ve üçüncül ayna arasındaki mesafenin daha uzun seçilmesi ile Paul teleskobuna göre daha düz bir görüntü düzlemine olanak sağlamaktadırlar. Paul ve Paul Baker tipi teleskoplar, 3. derece aberasyonları, iki aynalı

sistemlere göre daha iyi minimize edebildiği için TMA teleskoplar kategorisinde yer almaktadırlar ancak bahse konu aberasyonlar için tam bir düzeltme sağlamazlar. Korsch tipi teleskoplar, 3. derece küresel aberasyon, koma, astigmatizm ve alan eğriliği aberasyonları için tam düzeltme sağlama kapasitesine sahiptir. Bu nedenle, düzeltilmiş geniş bir odak düzlemine sahiptirler. Korsch tipi teleskoplar, temelde içbükey eliptik bir birincil ayna, dışbükey hiperbolik bir ikincil ayna ve içbükey eliptik bir üçüncül aynadan oluşur. Işığı yönlendirmek için düz katlama aynaları kullanılabilir. Korsch tipi teleskoplar, geniş alanlarda mükemmel görüntü kalitesi sağlar, distorsiyonu minimize eder, kompakt yapıdadır ve kaçak ışını minimize edecek ara odak düzlemine sahiptirler.

TMA teleskoplar, ayna eğrilik yarıçapları, aynalar arasındaki mesafeler ve aynaların konik katsayıları olmak üzere toplamda dokuz adet tasarım parametresine sahiptir. Atıf yapılan çalışmada sunulan metot ile aynalar arasındaki mesafeler serbest tasarım parametreleri olarak kullanılmakta ve ayna eğrilik yarıçapları ve konik katsayıların çözülmesi gerekmektedir. Söz konusu çalışmada detaylı olarak açıklandığı gibi, üç aynalı anastigmat bir teleskobun ayna eğrilik yarıçapları ve konik katsayıları, verilen f , giriş açıklığı EPD ve aynalar arası mesafeler (d_1, d_2, d_3) ile aşağıda verildiği şekilde hesaplanmaktadır (Gu ve diğerleri, 2020). Üç aynalı teleskopların 3. derece aberasyonları düzeltme kapasitesi ve Çizelge 2.2’de verilmiştir. Bir TMA teleskobun şematik diyagramı Şekil 2.13’te verilmiştir.



Şekil 2.13. Üç aynalı eksenel simetrik bir teleskop konfigürasyonu.

Ayna eğrilik yarıçapları için ilk çözüm seti Eş. 2.15, Eş. 2.16 ve Eş. 2.17 ile verilmiştir.

$$r_1 = \frac{\left(\frac{d_1 f (d_2 - 2d_3 + 2f)}{-\sqrt{d_1 d_2 f (4d_3^3 + f(d_1(d_2 - 4d_3) + 4(d_2 - 2d_3)d_3 + 4d_3 f))}} \right)}{d_3^2 + f(d_2 - 2d_3 + f)} \quad (2.15)$$

$$r_2 = \frac{-d_1 d_2 f - \sqrt{d_1 d_2 f (d_1 d_2 f + 4d_3 (d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f)}}{(d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f} \quad (2.16)$$

$$r_3 = \frac{\left(\frac{d_1 d_2 f - 2d_2 d_3 (d_2 - d_3 + f)}{+\sqrt{d_1 d_2 f (d_1 d_2 f + 4d_3 ((d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f))}} \right)}{d_1 f - (d_2 - d_3 + f)^2} \quad (2.17)$$

Ayna eğrilik yarıçapları için ikinci çözüm seti ise Eş. 2.18, Eş. 2.19 ve Eş. 2.20 ile verilmiştir.

$$r_1 = \frac{\left(\frac{d_1 f (d_2 - 2d_3 + 2f)}{+\sqrt{d_1 d_2 f (4d_3^3 + f(d_1(d_2 - 4d_3) + 4(d_2 - 2d_3)d_3 + 4d_3 f))}} \right)}{d_3^2 + f(d_2 - 2d_3 + f)} \quad (2.18)$$

$$r_2 = \frac{-d_1 d_2 f + \sqrt{d_1 d_2 f (d_1 d_2 f + 4d_3 (d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f)}}{(d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f} \quad (2.19)$$

$$r_3 = \frac{\left(\frac{d_1 d_2 f - 2d_2 d_3 (d_2 - d_3 + f)}{-\sqrt{d_1 d_2 f (d_1 d_2 f + 4d_3 ((d_3 - f)^2 + (-d_1 + d_2) f))}} \right)}{d_1 f - (d_2 - d_3 + f)^2} \quad (2.20)$$

Küresel aberasyon, koma ve astigmatizm katsayıları sıfıra eşitlendiğinde, yukarıda verilen eğrilik yarıçapları kullanılarak konik katsayılar da aşağıda belirtilen şekilde hesaplanabilir.

$$k_1 = - \frac{\left(\begin{aligned} &r_3^2 (-r_2 (2d_1^2 (d_2 + 2r_1) - 4d_1 r_1 (d_2 + r_1) + r_1^2 (2d_2 + r_1))) \\ &+ r_2^2 (d_1 - d_2) (d_1 - d_2 - r_1) + d_2 r_1 (r_1 - 2d_1)^2 \\ &+ r_1 r_3 (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^2 \\ &+ d_2 r_1 (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^2 \end{aligned} \right)}{d_1 r_2 r_3^2 (d_1 (r_2 - 2d_2) - d_2 r_2)} \quad (2.21)$$

$$k_2 = \frac{\left(r_3^2(-r_2^2(4d_1^2 - 2d_1(d_2 + 2r_1) + r_1(2d_2 + r_1)) + r_2^3(-d_1 + d_2 + r_1)) \right. \\ \left. - r_2(d_1 - d_2)(r_1 - 2d_1)^2 + d_1d_2(r_1 - 2d_1)^2 \right. \\ \left. + r_3(2d_1 + r_2)(4d_1d_2 - 2d_1r_2 - 2d_2r_1 + 2d_2r_2 + r_1r_2)^2 \right. \\ \left. + (2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)(4d_1d_2 - 2d_1r_2 + 2d_2r_2 + r_1r_2)^2 \right)}{d_1d_2r_3^2(r_1 - 2d_1)^2} \quad (2.22)$$

$$k_3 = \frac{\left(-r_3(r_2r_3(-2d_1^2 + d_1(r_1 - r_2) + r_1r_2) \right. \\ \left. + (4d_1d_2 - d_1r_2 + 2d_2r_2)(4d_1d_2 - 2d_1r_2 - 2d_2r_1 + 2d_2r_2 + r_1r_2) \right. \\ \left. (2d_1(2d_2 - r_2 + r_3) + 2d_2(r_2 - r_1) + r_1r_2 - r_1r_3 + r_2r_3) \right)}{d_2(2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)(4d_1d_2 - 2d_1r_2 - 2d_2r_1 + 2d_2r_2 + r_1r_2)^2} - 1 \quad (2.23)$$

2.4. Hizalama Kaçıklığına Sahip Rotasyonel Simetrik Optik Sistemler için Aberasyon Teorisi

Bölüm 2.1’de hizalı durumdaki eksenel simetrik optik sistemlerin aberasyon davranışları incelenmiştir. Ancak, bu bölümde sunulan geleneksel aberasyon teorisi yaklaşımı, içerdiği optik bileşenlerin hizalama kaçıklığına sahip olması nedeniyle, eksenel simetrisi bozulan optik sistemlerdeki aberasyon davranışlarını, açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Optik bileşenlerdeki hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak oluşan aberasyon davranışlarını sistematik şekilde belirleme ihtiyacı, Kitt Peak Gözlemevi’ndeki 90" RC tipi Bok Teleskobu ile alınan yıldız görüntülerinde, geleneksel aberasyon teorisi ile açıklanamayan ikili astigmatizm sıfır noktalı (binodal) davranışın gözlemlenmesiyle ortaya çıkmıştır.

Shack, bu özel astigmatizm davranışının kaynağını araştırmak için Hopkins’in skaler dalga aberasyon denklemini ve Buchroeder’ın, tek bir küresel yüzeyin eğilme ve yer değiştirme etkileriyle oluşan alan aberasyon merkezlerinin kayma miktarlarını incelediği çalışmalarını temel alarak Nodal Aberasyon Teorisi’ni geliştirmiştir. Nodal Aberasyon Teorisi, rotasyonel simetrik optik bileşenlerden oluşan bir sistemde, bir veya daha fazla bileşenin hizalama kaçıklığına sahip olması durumunda ortaya çıkan aberasyon davranışlarını açıklamak için kullanılan vektörel bir yaklaşımdır.

Bu teoriye yönelik en önemli katkılardan biri, Thompson tarafından yapılmıştır. Thompson, teoriyi 5. dereceden aberasyonlara genişletmiş, optik bileşenlerin hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak görüntü düzlemindeki aberasyon dağılımını hızlı bir şekilde değerlendirmeye olanak sağlayan Tüm Alan Aberasyon Gösterimleri (TAAG) yöntemini geliştirmiştir. Ayrıca, Buchroeder’ın paraksiyal ışın izleme tabanlı sigma vektör hesaplama yöntemini,

gerçek ışın izleme yöntemiyle birleştirerek optik tasarım yazılımlarına kolayca entegre edilebilir bir forma dönüştürmüştür. T. Schmid ise birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının mevcut olduğu durumlarda teoriyi daha da ileri taşımış ve 90° birincil aynalı Bok Teleskobu ile alınan yıldız plakası görüntülerindeki problemi çözmüştür (Schmid, 2010).

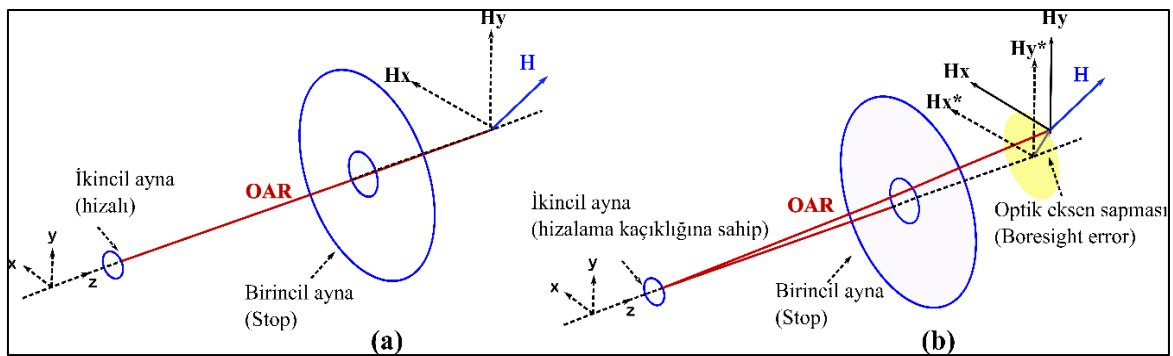
Günümüzde Nodal Aberasyon Teorisi, optik bileşenlerin yüksek hassasiyette tasarım, toleranslama ve hizalama süreçlerinde sistematik bir yaklaşım sunmaktadır. Teorinin en dikkat çekici kullanım alanlarından biri, serbest form optiklerin tasarımı ve aberasyon analizidir. Serbest form optikler, eksenal veya rotasyon simetrisine sahip olmayan yüzey formları olarak tanımlanır ve yüksek görüntüleme performansına sahip kompakt optik sistemlerin geliştirilmesini sağlar. Ancak, bu optiklerin simetriden uzak yapıları, tasarım ve aberasyon analiz süreçlerini klasik sistemlere göre daha karmaşık hale getirmektedir. Bu nedenle, serbest form optiklerin tasarımında ve analizinde analitik bir teoriye duyulan ihtiyaç, Nodal Aberasyon Teorisi'nin önemini artırmıştır. Bugün bu teori, serbest form optiklerin tasarımında ve aberasyon analizinde güçlü bir araç olarak kullanılmaktadır (Fuerschbach ve diğerleri, 2014, Bauer ve diğerleri, 2018, Rolland ve diğerleri, 2021).

Bu bölümde, Nodal Aberasyon Teorisi'nin temelini oluşturan sigma vektör konseptinin ve Nodal aberasyon Teorisi'nin matematiksel arka planları ele alınacaktır.

2.4.1. Alan aberasyon merkezlerindeki yer değiştirme

Bölüm 2.1'de açıklandığı üzere, rotasyonel simetrik optik bileşenler içeren merkezlenmiş (hizalı) optik sistemlerde, Gauss görüntü düzlemindeki toplam 3. derece aberasyon miktarı, sistemdeki her bir bileşenin bağımsız aberasyon katkılarının toplamına eşittir (Thompson ve diğerleri, 2009). Dahası, bu bağımsız aberasyon katkıları, sistem içindeki optik bileşenlerin her birinin rotasyon simetri merkezi ve Gauss görüntü düzlemi merkezi ile çakışık olan bir eksen etrafında kendi alan bağımlılıklarına göre rotasyonel olarak simetriktir. Sistem simetrisi, optik bileşenlerin hizalama kaçıklığına bağlı olarak bozulduğunda, optik sistemdeki hizalama kaçıklığına sahip optik bileşenin rotasyon simetri merkezi diğer bileşenlerin rotasyon simetri merkezine veya Gauss görüntü düzlemi merkezine göre bir miktar yer değiştirir. Benzer şekilde, simetrisi hizalama kaçıklığına bağlı olarak bozulmuş bir optik sistemde, görüntü düzlemindeki toplam aberasyon miktarı, optik bileşenlerden gelen yüzey aberasyon alanlarının toplamına eşittir. Ancak, yüzey dalga aberasyon

katkılarının toplamı alınırken, hizalama kaçıklığına sahip olan optik bileşenlerin rotasyon simetri merkezindeki yer değiştirmeleri de dikkate alınmalıdır. Bu aberasyon alanı merkezindeki yer değiştirme, Optik Eksen Işını (OAR) ile görüntü düzleminin kesişim noktasından vektör olarak ölçülür ve sigma vektörü olarak adlandırılır. Yüzey j için sigma vektörü, σ_j sembolü olarak gösterilmektedir. Söz konusu yüzeyden gelen aberasyon alanı, σ_j vektörünün bitiş noktası ile belirlenen nokta etrafında rotasyonel simetrik olmaya devam eder. Ancak bu σ_j vektörü ile belirlenen yeni simetri merkezi, diğer bileşenlerin simetri merkezi ve OAR ile görüntü düzleminin kesişim noktası olarak belirlenen rotasyon simetri merkezi ile artık çakışmamaktadır. Hizalama kaçıklığına sahip optik sistemlerde, OAR ışınının konumu önem arz etmekte ve tanımı değişmektedir. Simetrik, hizalı bir optik sistemde, OAR, obje, görüntü düzlemleri ile giriş ve çıkış açıklık merkezlerini birleştirmekte, aynı zamanda sistem içindeki sferik yüzeylerin merkezlerinden ve asferik yüzeylerin tepe noktalarından (verteks) geçmektedir. Ancak simetrisi bozulmuş bir sistemde OAR, obje merkezi (keyfi belirlenebilen) ve fiziksel dairesel optik açıklığın merkezinden geçen ışın olarak tanımlanmaktadır. Hizalama kaçıklığı durumunda Gauss görüntü düzlemi merkezi, görüntü düzlemi ile OAR ışınının kesişim noktası olarak belirlenir ve bu kesişim noktasının mekanik eksen (Mechanical Axis, MA) ile görüntü düzlemi kesişim noktasından mesafesi optik eksen sapması (boresight) olarak adlandırılır. Şekil 2.14’de, hizalı ve hizalama kaçıklığına sahip bir sistemde OAR’nin, optik eksen sapması ve alan vektörlerinin konumlandırılması şematik olarak gösterilmiştir.

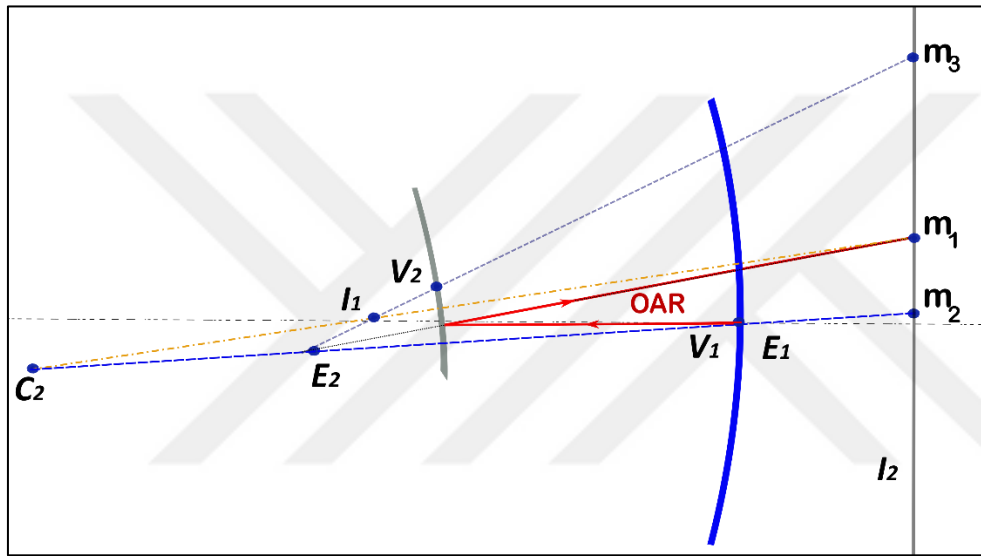


Şekil 2.14. Hizalama kaçıklığına sahip bir optik sistemde OAR’nin, nominal alan vektörünün ve optik eksen sapması gösterimi.

Asferik bir optik yüzey, sferik ve asferik iki yüzeyin üst üste bindirilmesi ile oluşturulmuş gibi düşünülebilir; bu yüzeyler kendi aberasyon alanlarını üretir. Bu alanlar, yüzeyin sferik ve asferik özelliklerinden kaynaklanan aberasyon alanlarıdır. Hizalı durumda, her

aberrasyon alanı kendi merkezi etrafında rotasyonel simetriktr. Ancak hizalama kaçıklığı oluştuğunda, bu iki aberrasyon alanının merkezleri görüntü düzleminde farklı noktalara kayar. Bu durumda, iki aberrasyon alanı kendi simetri eksenleri etrafında rotasyon simetrisini korurken, bu eksenler artık farklı noktalardan geçtiği için birbirinden ayrılır.

Optik açıklığı birincil ayna üzerinde konumlanmış ve ikincil aynası hizalama kaçıklığına sahip bir teleskop için aberrasyon alan merkezlerinin yeni simetri merkezleri, Şekil 2.15’de şematik olarak gösterilmiştir (Ren ve diğerleri, 2011).



Şekil 2.15. Hizalama kaçıklığına sahip iki aynalı teleskop, optik açıklık (stop) birincil aynada konumlanmış

Şekil 2.15’de görüldüğü üzere, teleskobun birincil aynanın siferik aberrasyon alanı merkezi, ikincil ayna yüzey eğrilik merkezi (C_2), birincil ayna görüntüsü (I_1) ve görüntü düzelemini (I_2) birleştiren bir eksen üzerindeki m_1 konumunda oluşur. m_1 konumu ayrıca OAR ışını ile görüntü düzleminin kesişim noktası yani görüntü düzleminin yeni merkezi olarak da tanımlanır. İkincil aynanın siferik aberrasyon alanının görüntü düzlemindeki simetri merkezi (m_2), C_2 ve giriş açıklığı merkezi (E_1) noktalarını birleştiren eksenin görüntü düzlemi (I_2) ile kesişim noktasıdır. İkincil aynanın çıkış açıklığı merkezi (E_2) de bu eksen üzerindedir. İkincil aynanın asiferik aberrasyon alanı simetri merkezi, E_2 noktası ile ikincil ayna asiferik tepe noktasını (I_2) birleştiren çizginin görüntü düzlemini kestiği noktada (m_3) konumlanmıştır (Shack ve Thompson, 1980, Ren ve diğerleri, 2011).

Siferik ve asiferik aberasyon alanlarının simetri merkezlerinin farklı olması, hizalama kaçıklığı durumunda asiferik bir yüzey için iki farklı sigma vektör katkısının indükleneyeceği anlamına gelmektedir. Bu siferik ve asiferik aberasyon alanlarındaki kayma, siferik ve asiferik aberasyon alan kaymaları olarak isimlendirilir. Hizalama kaçıklığına sahip asiferik bir j yüzeyi için, siferik aberasyon alanının rotasyon simetri merkezini gösteren vektör, siferik sigma vektör katkısı olarak adlandırılır ve σ_j^{sph} sembolü ile gösterilir. Benzer şekilde, söz konusu yüzeyin asiferik aberasyon katkısının merkezini gösteren vektör, asiferik sigma vektör katkısı olarak adlandırılır ve σ_j^{asph} sembolü ile gösterilir. Burada ve takip eden bölümlerde, "sph." ve "asph." üst simgeleri, hem aberasyon hem de sigma vektör katkılarını kategorize etmek için kullanılacaktır. Bu iki aberasyon alanındaki kayma miktarları yani yüzey sigma vektör katkıları ayrı ayrı hesaplanmalıdır. Bu çalışmada vektörel ifadeler kalın sembollerle ifade edilecektir.

Siferik yüzey sigma vektör katkısı, Buchroeder'in, yüzey hizalama kaçıklıkları da değerlendirmeye alınan paraksial ışın izleme verilerini temel alan yöntemi ya da K. Thompson'ın gerçek ışın izleme verilerine dayalı koordinat modelinden bağımsız yöntemi kullanılarak hesaplanabilir. Buchroeder, OAR'nin özelliklerini iki parametre kullanarak tanımlamıştır. Bunlardan ilki, $\bar{u}_{OAR}^{\#}$, OAR'nin yüzeydeki eğim açısıdır, ikincisi ise, $\bar{y}_{OAR}^{\#}$, OAR'nin yüzey ile kesiştiği noktanın yüksekliğidir (Thompson ve diğerleri, 2009). Bu parametreler, mekanik eksen referans alınarak ölçülür. Takip eden bölümlerde # üst simgesi, mekanik eksenden ölçülen parametrelerin işaretlenmesi için kullanılacaktır. $\beta_0^{\#}$, küresel yüzeyin eşdeğer eğim parametresidir. Diğer yandan, $\bar{i}^*$, OAR'den yüzey normaline doğru ölçülen, OAR'nin yüzeydeki geliş açısını ifade etmektedir. Bundan sonra, * üst simgesi, OAR'den ölçülen parametreleri işaretlemek için kullanılacaktır. $\bar{i}_j$ paraksial ana ışının, yerel geliş açısını ifade etmektedir. $\bar{u}$, $\bar{y}$, ve c , sırasıyla, ana ışının yüzeydeki geliş açısı, gelen ışının yüzeydeki yüksekliği ve yüzey eğriliğini ifade etmektedir. Buchroeder'ın yüzey küresel sigma vektör katkısını hesaplamak için kullandığı formül, Eş. 2.24 ile verilmiştir.

$$\sigma_j^{sph} = -\frac{\bar{i}^*}{\bar{i}_j} = -\frac{\bar{u}_{OAR}^{\#} + \bar{y}_{OAR}^{\#}c - \beta_0^{\#}}{\bar{u} + \bar{y}c} \quad (2.24)$$

1984'te Thompson, yüzeylerin aberasyon alan bileşenlerindeki yer değiştirmenin koordinat modelinden bağımsız, gerçek ışın izleme verilerine dayanan yeni bir yöntem ile

hesaplanabileceğini varsaymıştır. Bu spesifik varsayım şu şekilde ifade edilebilir; görüntü düzlemindeki bağımsız alan aberasyon katkılarının σ_j^{sph} vektörünün bitiş noktasında bulunan alan bağımlılıklarının rotasyon simetri merkezleri, OAR ve yüzeyin kesişim noktasındaki yüzey normaline hizalı vektör ve OAR'ye hizalı vektörün vektörel çarpımı kullanılarak hesaplanabilir. Buchroeder'ın yöntemine alternatif olan bu yöntem, Thompson tarafından aşağıdaki şekilde formüleleştirilmiştir.

$$\sigma_j^{sph} = -\frac{\bar{i}^*}{\bar{i}_j} = \frac{-N_j \times (R_j \times S_j)}{\bar{i}_j} \quad (2.25)$$

N_j , yerel obje/görüntü düzleminin yüzey normali yönündeki birim vektörü ve genellikle (0, 0, -1) yön kosinüsleri ile ifade edilir. N_j birim vektörünün yönü, j yüzeyi yerel görüntü pozisyonundan, yerel çıkış açıklığı konumuna doğrudur. Yüzey j 'de OAR doğrultusunda hizalanmış olan R_j birim vektörü, yön kösinüsleri (L, M, N) ile ifade edilir. Yüzey normali doğrultusunda hizalanmış S_j birim vektörü ise (SRL, SRM, SRN) yön kosinüsleri ile ifade edilir. Daha önce bahsedildiği üzere, OAR'nin yüzeydeki geliş açısı olarak ifade edilen $\bar{i}^*$, R_j ve S_j birim vektörleri arasındaki açıdır. $\bar{i}^*$, $\sin(\bar{i}^*)_{x-z}$ ve $\sin(\bar{i}^*)_{y-z}$ vektör komponentlerine sahip iki boyutlu bir vektördür. $(R_j \times S_j)$ vektörel çarpımı, X, Y ve Z eksenleri boyunca üç bileşene sahip ortogonal bir vektördür (Thompson ve diğerleri, 2009). Bahse konu vektör çarpımına ilişkin eşitlikler aşağıda verilmiştir.

$$(R_j \times S_j) = \begin{bmatrix} X & Y & Z \\ L & M & N \\ SRL & SRN & SRM \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

$$(R_j \times S_j) = (M.SRN - N.SRM)X + (N.SRL - L.SRN)Y + (L.SRM - M.SRL)Z \quad (2.27)$$

N_j (0 0 -1) birim vektörünün, $(R_j \times S_j)$ ile vektörel çarpımı, $\bar{i}^*$ 'nin Gauss görüntü düzlemindeki projeksiyonunu vermektedir.

$$\begin{aligned} \bar{i}^* &= N_j \times (R_j \times S_j) = (L.SRN - N.SRL)X + (N.SRM - M.SRN)Y \\ &= -\sin(\bar{i}^*)_{x-z} \hat{x} + \sin(\bar{i}^*)_{y-z} \hat{y} \end{aligned} \quad (2.28)$$

Yüzey j 'nin sferik sigma vektör bileşeni $\sigma_j^{sph.}$ 'i hesaplayabilmek için, $\bar{i}^*$, paraksiyal ana ışının yerel geliş açısı kullanılarak normalize edilir.

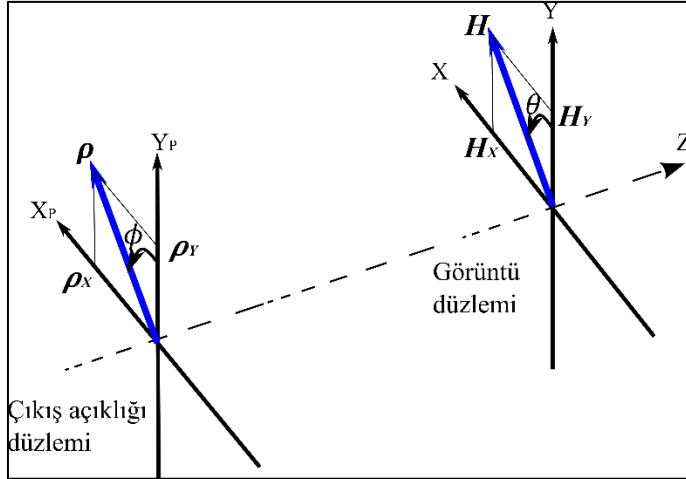
Yüzey j 'nin asferik sigma vektör bileşeni $\sigma_j^{asph.}$, $\bar{i}^*$ veya $\bar{u}_{OAR}^\#$ açlarına bağlı değilken, $\bar{y}_{OAR}^\#$ sferik ve asferik tepe noktalar (verteks) arasındaki mesafeye bağlıdır. Sferik tepe noktası, yüzey normali ile OAR'nin kesişim noktası olarak tanımlanır ve δv^* asferik tepe noktasının OAR'ye göre sapmasını ifade eder. $\sigma_j^{asph.}$, Eş. 2.29 kullanılarak ifade edilir (Thompson ve diğerleri, 2009).

$$\sigma_j^{asph.} = \frac{\delta v^*}{\bar{y}_j} \quad (2.29)$$

Eş. 2.29'de, $\bar{y}_j$, ana ışının yüzey j 'deki yüksekliğidir.

2.4.2. Nodal aberasyon teorisi

Nodal Aberasyon Teorisi, nominal olarak rotasyonel simetriktir ancak optik bileşenlerindeki kayma ve/veya eğilme dolayısıyla simetrisi bozulmuş sistemlerin aberasyon davranışını karakterize etmek ve nicel olarak tanımlamak üzere Shack tarafından geliştirilmiştir (Shack ve Thompson, 1980). Shack, ilk olarak, H ve ρ 'yu vektörel olarak ifade etmiş ve H normalize edilmiş alan vektörünün dikey eksen ile yaptığı açığı sıfırdan farklı bir değer ($\theta \neq 0$) olarak tanımlamıştır. Çünkü, hizalı bir optik sistem için H , meridyen düzlem (Y-ekseni) üzerindedir. Ancak hizalama kaçıklığına sahip bir optik sistemde alan noktaları görüntü düzleminin herhangi bir yerinde olabilir. H ve ρ vektörleri, X ve Y eksenlerinde bileşenleri sırasıyla H_x ve H_y ve ρ_x ve ρ_y 'nin konumları Şekil 2.16'da gösterilmektedir.



Şekil 2.16. ρ ve H vektörlerinin koordinat sistemi üzerinde gösterimi

ρ ve H vektörlerinin üzerinde bulunduğu, çıkış açıklığı ve görüntü düzlemi düzlemleri birbirine paraleldir. İki yüzeyin üst üste bindirilmesi $H \cdot \rho = H\rho \cos(\theta - \phi)$ denklemi ile verilir. Hopkins'ın Eş. 2.5 ile verilen skaler dalga aberasyon denklemi, vektörel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir (K. P. Thompson, 1980).

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j (H \cdot H)^p (\rho \cdot \rho)^n (H \cdot \rho)^m \quad (2.30)$$

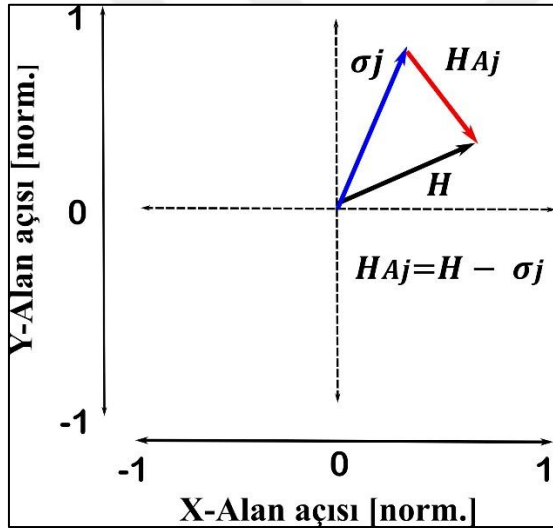
Eşitlik 2.30'un sadece 3. derece aberasyonları için genişletilmiş formu, Eş. 2.31 ile aşağıda gösterilmiştir.

$$W = W_{040}(\rho \cdot \rho)^2 + W_{131}(H \cdot \rho)(\rho \cdot \rho) + W_{222}(H \cdot \rho)^2 + W_{220S}(H \cdot H)(\rho \cdot \rho) + W_{331}(H \cdot H)(H \cdot \rho) \quad (2.31)$$

Rotasyonel simetrik bileşenler içeren, hizalı optik sistemler için, yalnızca $(W_{klm})_j$ yüzey dalga aberasyon alanı katkıları j 'nin bir fonksiyonudur. Bu yüzey dalga aberasyon alan katkıları, H vektörünün başlangıç noktası olarak alınan görüntü düzleminin merkezi etrafında rotasyonel simetriktir. Bu eksen simetrisi, optik bileşenlerin hizalama kaçıklığına bağlı olarak bozulduğunda, yüzey dalga aberasyon alanı katkıları hala eksenel olarak simetrik olan sistemdeki yüzey dalga aberasyon alan katkıları ile aynı formdadır. Ancak, bileşenlerin rotasyon simetri merkezlerinden ölçülen H_j optik bileşen alan vektörleri için rotasyon simetri merkezi her bileşen için ortak değildir (Shack ve Thompson, 1980). Bu tip bir sistemde, her bir yüzey ile ilişkilendirilen aberasyon alanları görüntü düzleminin farklı

noktalarında merkezlenir ve bu noktalar tipik olarak σ_j vektörünün bitiş noktalarıdır. σ_j vektörü, yüzey katkısı için H_{Aj} ile gösterilen etkin alan vektörünün ölçüldüğü noktayı gösterir. Görüntü düzleminde aberasyonların teorisini geliştirmek için ortak bir merkeze ihtiyaç vardır (Thompson, 1980). Bu merkez Gauss görüntü düzleminin merkezi (OAR ile belirlenen) olarak seçilir. Bu merkezden ölçülen alan noktası, geleneksel alan vektörü H olarak belirlenir. Hizalama kaçıklığına sahip olan yüzeyin rotasyon simetri merkezi, σ_j 'den H 'a ölçülen vektör ise etkin alan bağımlılığı olarak adlandırılır ve H_{Aj} ile gösterilir. Etkin alan bağımlılığının grafiksel gösterimi, Şekil 2.17 ile verilmiştir.

$$H_{Aj} = H - \sigma_j \quad (2.32)$$



Şekil 2.17. Etkin alan vektörünün gösterimi H_{Aj} 'nin görüntü düzlemi üzerinde gösterimi

Hizalama kaçıklığına sahip bir optik sistem için yazılmış alan aberasyon ifadesi Eş 2.33 ve Eş. 2.34 ile aşağıda verilmiştir.

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j (H_{Aj} \cdot H_{Aj})^p (\rho \cdot \rho)^n (H_{Aj} \cdot \rho)^m \quad (2.33)$$

$$W = \sum_j \sum_p \sum_n \sum_m (W_{klm})_j [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)]^p (\rho \cdot \rho)^n [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^m \quad (2.34)$$

Yukarıda verilen eşitlikler, nominal olarak rotasyonel simetrik optik sistemler içindeki hizalama kaçıklıklarının etkisini tümüyle hesaba katmaktadır. Eşitliklerde verilen W_{klm} dalga aberasyon katsayıları, optik sistemin paraksiyal olarak belirlenen parametrelerinin bir fonksiyonu olduklarından hizalama kaçıklıklarından etkilenmezler. Eş. 2.34'ün 3. derece aberasyonlar için yeniden yazılmış formu, Eş. 2.35'de verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 W = & \sum_j W_{040j} (\rho \cdot \rho)^2 + \sum_j W_{131j} [(H - \sigma_j) \cdot \rho](\rho \cdot \rho) + \sum_j W_{222j} [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^2 \\
 & + \sum_j W_{220sj} [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)](\rho \cdot \rho) \\
 & + \sum_j W_{311j} [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)][(H - \sigma_j) \cdot \rho]
 \end{aligned} \quad (2.35)$$

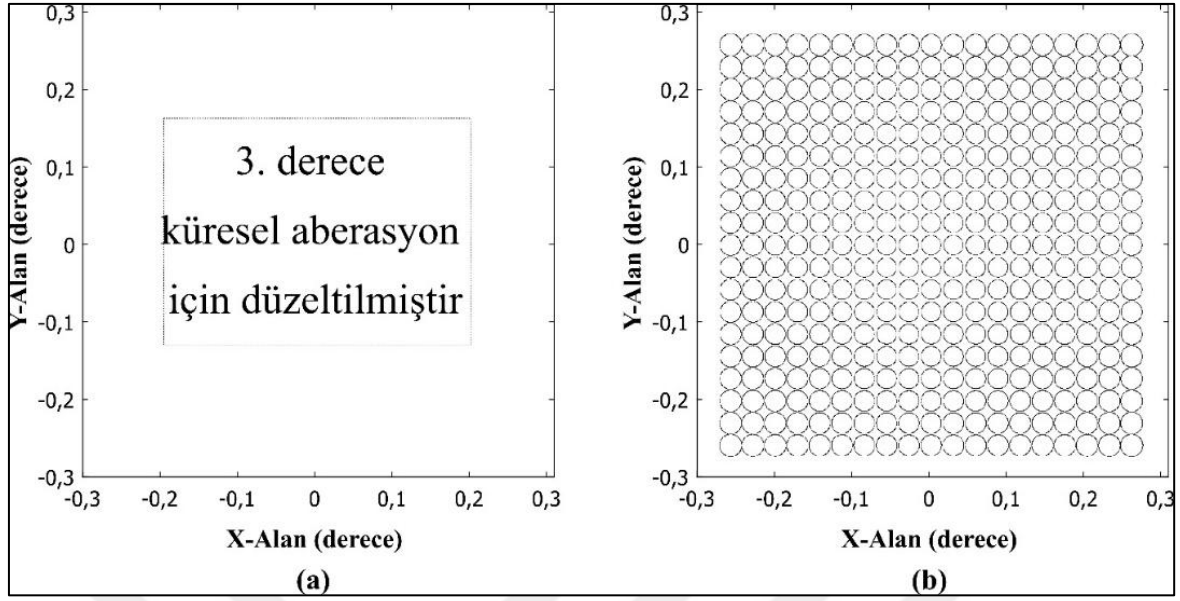
Eşitlik (2.35)'de alan eğriliği terimi ile birlikte verilen "S" alt simgesi, sagittal odak düzlemini ifade etmektedir. En iyi odak konumunda görüntü kalitesini en çok etkileyen 3. derece aberasyonlar, küresel aberasyon, koma ve astigmatizm aberasyonları olduğundan bu çalışma kapsamında, bu üç aberasyon ele alınacaktır.

3. derece küresel aberasyon

Eşitlik 2.35'deki ilk terim 3. derece küresel aberasyon terimidir. Bu terimin optik açıklık vektörüne bağımlılığı 4. derecedendir, alan vektörüne bağımlılığı ise yoktur (Eş. 2.36).

$$W_{SPH,3} = \sum_j W_{040j} (\rho \cdot \rho)^2 \quad (2.36)$$

Rotasyonel simetrik optik bileşenler içeren ancak simetrisi hizalama kaçıklığına bağlı olarak bozulmuş bir optik sistemde, küresel aberasyon, bileşenlerin enine (eksenel) olarak yer değiştirmiş olmasından etkilenmez, ancak optik bileşenin uzunlamasına (optik eksen yönünde) yer değiştirmesiyle, teleskoplar özelinde aynalar arası mesafenin değişmesiyle, önemli duruma gelir. Optik bileşenlerin uzunlamasına yer değiştirmesi sonucunda, görüntü düzleminde alandan bağımsız, sabit bir küresel aberasyon terimi tetiklenir. Küresel aberasyon için düzeltilmiş bir optik sistemin ikincil aynası uzunlamasına yer değiştirmedeği ve değiştirdiği durumlar için görüntü düzleminde tetiklenen küresel (siferik) aberasyon değişimi Şekil 2.18'de gösterilmektedir.



Şekil 2.18. Cassegrain teleskop için 3. derece küresel aberasyon ile ilişkili TAAG'ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

3. derece koma aberasyonu

Eşitlik 2.35'deki ikinci terim, 3. derece koma terimidir. Bu terimin optik açıklık vektörüne bağımlılığı 3. dereceden, alan vektörüne bağımlılığı ise lineer yani 1. derecedendir. Sistem seviyesinde koma aberasyonuna sahip olan, rotasyonel simetrik hizalı bir sistem (Cassegrain, Gregoryen teleskoplar gibi) için yüzeylerden gelen koma aberasyon alanlarının toplamı, sıfırdan farklıdır ($\sum_j W_{131j} \neq 0$). Hizalama kaçıklığına sahip bileşenler içeren bir optik sistemde, koma aberasyonunun lineer alan bağımlılığına eklenen sıfırdan farklı σ_j 'lerin etkisi görüntü düzleminde karakteristik nodal özelliğin görülmesi ile sonuçlanır.

Genel durum için Eş. 2.35'nin koma aberasyonu terimi, Eş. 2.37'da verildiği gibidir.

$$\begin{aligned}
 W_{KOMA,3} &= \sum_j W_{131j} [(H - \sigma_j) \cdot \rho] (\rho \cdot \rho) \\
 &= \left[\left(\sum_j W_{131j} H - \sum_j W_{131j} \sigma_j \right) \cdot \rho \right] (\rho \cdot \rho)
 \end{aligned} \tag{2.37}$$

Eşitlik 2.37'daki parantez içindeki ilk terim, $(\sum_j W_{131j} H)$, hizalı bir optik sistemin sahip olduğu koma aberasyonun alan bağımlılığı karakteristiğini verir. Bu ifadeye göre $H = 0$

noktasında koma aberasyonu sıfırdır ve H arttıkça, koma aberasyonu da H ile lineer olarak artarak, $H = 0$ noktası etrafında rotasyonel simetrik şekilde dağılım gösterir. Eş. 2.37’de verilen koma dalga aberasyon katsayıları ağırlıklı ilgili yüzey sigma vektörlerinin toplamına eşit olan, ikinci terim $(\sum_j W_{131j} \sigma_j)$, alandan bağımsız koma aberasyon terimidir ve hizalama kaçıklığına bağlı olarak indüklenir. Gösterimi basitleştirmek için Shack, toplam aberasyon terimi $\sum_j W_{131j}$ ’yi W_{131} olarak, yüzey koma dalga katsayıları ağırlıklı sigma vektörlerin toplamı, $\sum_j W_{131j} \sigma_j$ ’yi ise A_{131} olarak ifade etmiştir. A_{131} normalize olmayan koma aberasyon vektörüdür. Eşitliğin yeni hali Eş. 2.38’de gösterildiği gibidir.

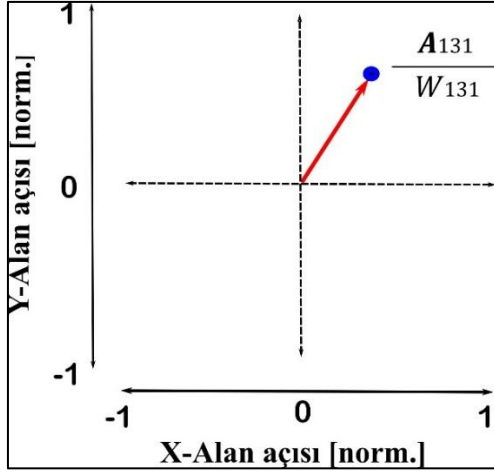
$$W_{KOMA,3} = [(W_{131}H - A_{131}) \cdot \rho](\rho \cdot \rho) \quad (2.38)$$

A_{131} , teriminin sisteme etkisiyle, $H = 0$ noktasında olması gereken koma aberasyon sıfır noktası, görüntü düzleminde başka bir noktaya doğru kayar. Bu koma sıfır noktasını bulmak için Eş. 2.38 ile verilen, denklemde parantez içinde yer alan $W_{131}H - A_{131}$ ifadesi, sıfıra eşitlenir ve elde edilen denklem Eş. 2.39 H için çözülür.

$$0 = (W_{131}H - A_{131}) \quad (2.39)$$

Koma aberasyonu sıfır noktası, koma aberasyonunun sıfır olduğu H noktasındadır. Normalize edilmiş alan koordinatlarında, koma sıfır noktasının konumu, Şekil 2.19’da verildiği gibidir (Fuerschbach, 2014; Thompson, 2005).

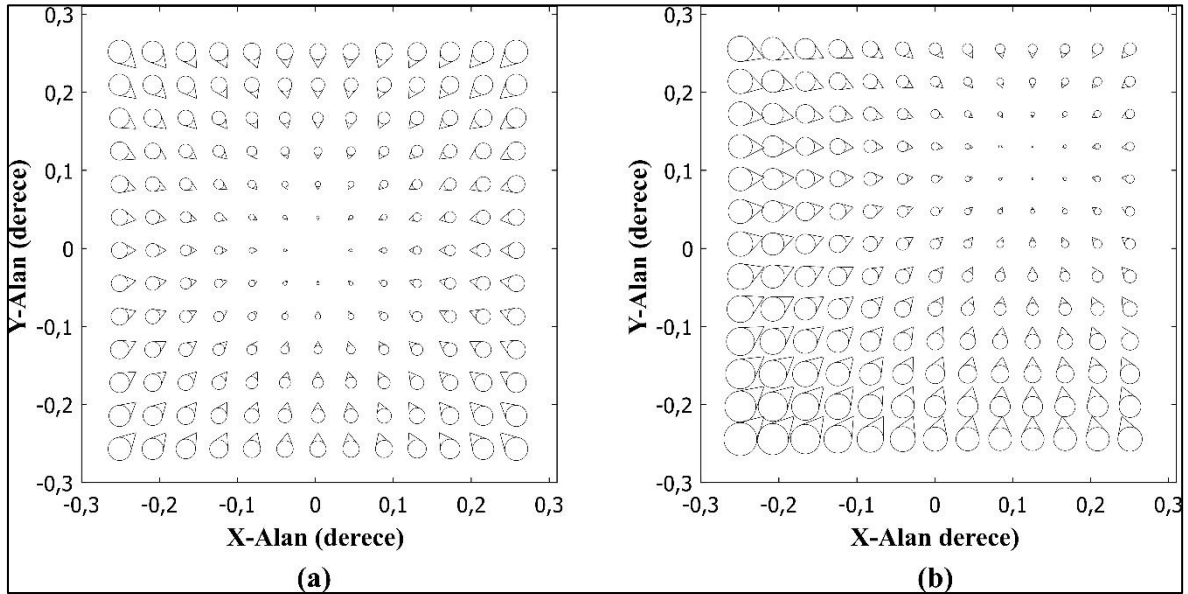
$$H \equiv \frac{A_{131}}{W_{131}} \quad (2.40)$$



Şekil 2.19. 3. derece koma sıfır noktasının (nod) grafiksel gösterimi

A_{131} vektörünün sistem seviyesindeki koma aberasyonu miktarı ile normalize edilmesi sonucu a_{131} normalize koma aberasyon alan vektörü elde edilir. Bu normalize koma aberasyon alan vektörü, koma aberasyonunun sıfır olduğu noktayı ifade eder. Koma dalga aberasyon katsayısı ve sigma vektörün sferik ve asferik bileşenleri de açık yazılacak şekilde eşitlik yeniden ifade edildiğinde, koma sıfır noktasının konumu Eş. 2.41 ile verilir.

$$a_{131} = \frac{1}{W_{131}} \sum_j (W_{131,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{131,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (2.41)$$

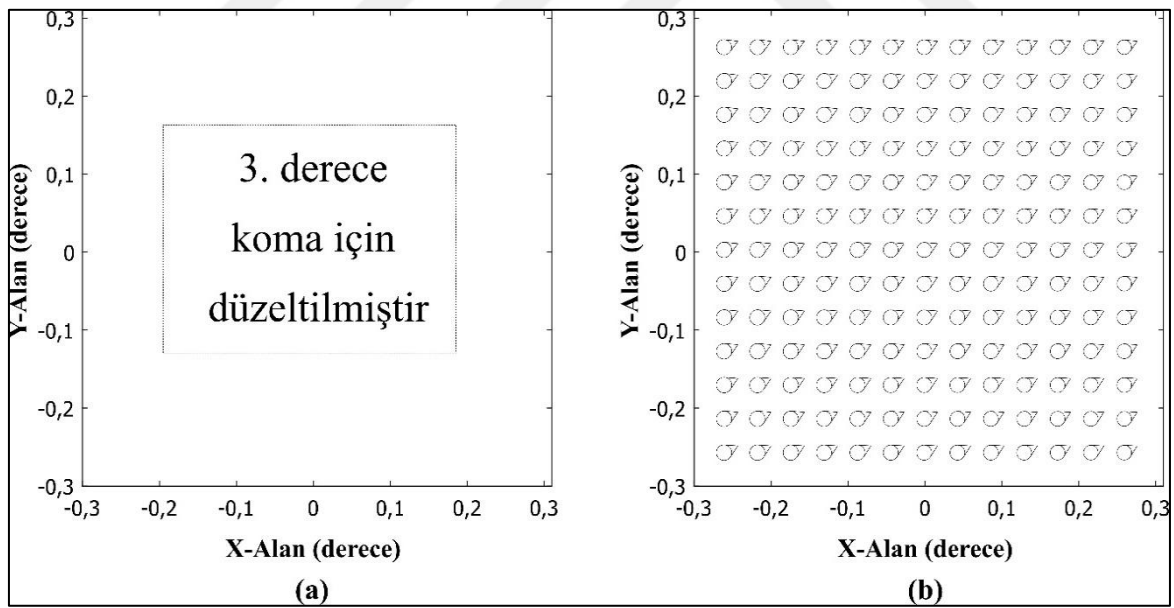


Şekil 2.20. Cassegrain teleskop için 3. derece koma aberasyonu ile ilişkili TAAG'ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Yukarıdaki bölümde sistem seviyesinde koma aberasyonu sahip bir optik sistemin bileşenlerindeki hizalama kaçıklığının etkisi, yani genel durum ele alınmıştır. Eğer, sistem seviyesinde koma aberasyonu düzeltebilen bir optik sistem (RC, TMA teleskop gibi) ele alınırsa, Eş. 2.37'deki W_{131} terimi sıfır olacak ve eşitlik sadece hizalama kaçıklığı ile tetiklenen alan sabit terimden oluşacaktır. Hizalama kaçıklığına sahip RC tipi bir teleskop için koma aberasyonu ifadesi Eş. 2.42 ile verildiği gibidir.

$$W_{KOMA,3} = [(-A_{131}) \cdot \rho](\rho \cdot \rho) \quad (2.42)$$

Burada, sistem seviyesi koma aberasyonu sıfır olduğu için, görüntü düzleminde nodal davranış gözlenmez. Hizalama kaçıklığına sahip optik bileşenlerden kaynaklanan sıfırdan farklı σ_j vektörleri, görüntü düzleminde “alan sabit koma” terimlerini indükler. İndüklenen komanın büyüklüğü ve yönü A_{131} ile belirlenir. Bu özel durum koma sıfır noktasını fiziksel olarak limitler ve $W_{131} \rightarrow 0$ durumunda a_{131} koma sıfır noktası da sonsuzda oluşur (Şekil 2.21).



Şekil 2.21. Ritchey-Chrétien teleskop için 3. derece koma aberasyonu TAAG'ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

3. derece astigmatizm aberasyonu

Eşitlik 2.35'deki üçüncü ve dördüncü terimler, sırasıyla 3. derece astigmatizm ve alan eğriliği terimleridir. Hopkins dalga aberasyon ifadesinde, alan eğriliği terimi, sagittal yüzey

referans alınarak yazılmıştır. Eş. 2.35'deki ifade de Hopkins'in ifadesinden türetildiği için alan eğriliği terimi, sagittal yüzey referans alınarak yazılmıştır. Nodal Aberasyon Teorisi geliştirilirken dalga cephesi hatası (Wavefront Error) bir görüntü kalitesi ölçme kriteri olarak belirlenmiş ve en iyi odak düzlemi "medyal yüzey" referans olarak alınmıştır (Thompson, 1980). Alan eğriliği ve astigmatizm terimini medyal yüzeye göre yeniden yazmak için vektör aberasyon teorisine sırasıyla ele alınan modifikasyonları uygulanmıştır (Thompson ve Rolland, 2014).

Astigmatizm ve alan eğriliği terimleri, Hopkins'in skaler dalga fonksiyonu ifadesinden izole edildiğinde aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$W = \Delta W_{020}\rho^2 + W_{220S}H^2\rho^2 + W_{222}H^2\rho^2 \cos \phi^2 \quad (2.54)$$

Aşağıda verilen trigonometrik dönüşüm kullanılarak astigmatizm teriminde bulunan, $\cos \phi^2$ ifadesi yeniden ifade edilmiş ve eşitlikte yerine yazılmıştır.

$$\cos \phi^2 = \frac{1}{2}(1 + \cos 2\phi) \quad (2.55)$$

Eşitlik 2.54'ün yeni formu, Eş. 2.56 ile aşağıda sunulmuştur (Thompson, 2005).

$$\begin{aligned} W = \Delta W_{020}\rho^2 + W_{220S}H^2\rho^2 + \frac{1}{2}W_{222}H^2\rho^2 + \frac{1}{2}W_{222}H^2\rho^2 \cos 2\phi = \Delta W_{020}\rho^2 \\ + \left(W_{220S} + \frac{1}{2}W_{222}\right)H^2\rho^2 + \frac{1}{2}W_{222}H^2\rho^2 \cos 2\phi \end{aligned} \quad (2.56)$$

Burada, parantez içinde verilen ifade yerine Hopkins'in sagittal ve medial yüzeyler arasındaki ilişkiyi ifade eden Eş. 2.57 yazılırsa, yukarıdaki eşitlik medyal yüzey referans alınarak tekrar ifade edilmiş olur.

$$W_{220M} = W_{220S} + \frac{1}{2}W_{222} \quad (2.57)$$

Medial yüzey referans alınarak oluşturulan terim şu şekilde verilmiştir:

$$W = \Delta W_{020}\rho^2 + W_{220M}H^2\rho^2 + \frac{1}{2}W_{222}H^2\rho^2 \cos 2\phi \quad (2.58)$$

Yukarıda Eş. 2.58 ile verilen ifadenin, vektör formu aşağıda Eş. 2.59 ile sunulmuştur. Görüntü düzleminin herhangi bir yerindeki H için, astigmatizm ifadesi, Shack'ın ikincil açı tanımlamasına uygun olarak şu şekilde verilmiştir:

$$\frac{1}{2} \sum_j W_{222j} (H^2 \rho^2) = \frac{1}{2} W_{222} H^2 \rho^2 \cos(2\theta - 2\phi) \quad (2.59)$$

Rotasyonel simetrik bileşenler içeren hizalı optik sistemler için astigmatizm ve alan eğriliği terimi, Eş. 2.60 ile ifade edildiği gibidir.

$$W = \Delta W_{020}(\rho, \rho) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} (H^2 \rho^2) + \sum_j W_{220M,j} (H^2 \rho^2) \quad (2.60)$$

Rotasyonel simetrik bileşenler içeren, simetrisi optik bileşenlerindeki hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak bozulmuş optik sistemler için astigmatizm ve alan eğriliği terimi şu şekilde ifade edilir:

$$W = \Delta W_{020}(\rho, \rho) + \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^2 + \sum_j W_{220M,j} [(H - \sigma_j) \cdot (H - \sigma_j)](\rho, \rho) \quad (2.61)$$

Bundan sonra astigmatizm ile ilgili türetilen tüm terimler, bu form kullanılarak yapılacaktır. Medial yüzey referans alınarak yazılan astigmatizm terimi, genişletildiğinde aşağıda verilen Eş. 2.62 ifadesi elde edilir.

$$\begin{aligned} W_{AST,3} &= \frac{1}{2} \sum_j W_{222j} [(H - \sigma_j) \cdot \rho]^2 \\ &= \frac{1}{2} \left[\sum_j W_{222j} H^2 - 2H \left(\sum_j W_{222j} \sigma_j \right) + \sum_j W_{222j} \sigma_j^2 \right] \cdot \rho^2 \end{aligned} \quad (2.62)$$

Burada, köşeli parantez içinde verilen ilk toplam terimi, yüzey astigmatizm aberasyon katkıları $\sum_j W_{222j} \neq 0$ olan bir optik sistemin (Cassegrain, Gregoryen teleskoplar gibi) hizalı durumundaki astigmatizm alan bağımlılığını verir. Bu durumda rotasyonel simetrik

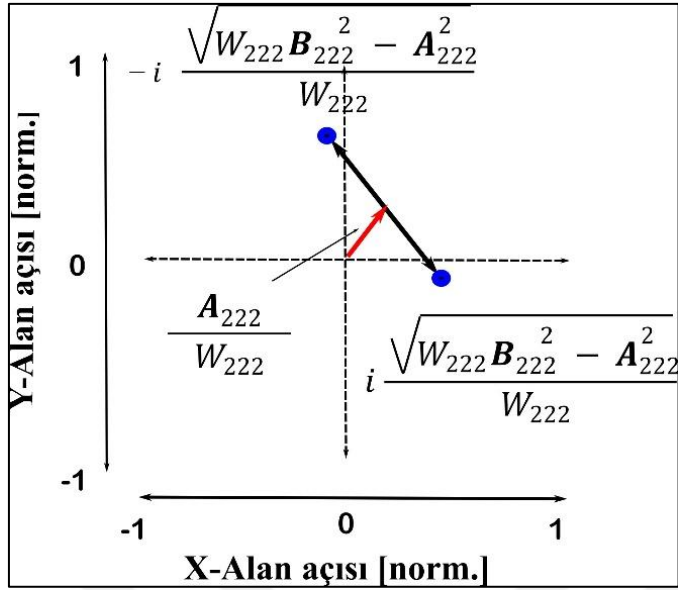
hızalı sistemler için astigmatizm, $H=0$ noktasında sıfırdır ve H arttıkça, rotasyon simetri merkezi, $H=0$ noktası etrafında H 'nin ikinci kuvvetiyle ilişkili olacak şekilde dağılım gösterir. Böyle bir sistemde hizalama kaçıklığına sahip optik bileşenler mevcut olduğunda bu bileşenlerin yeni rotasyon simetri merkezlerini gösteren sıfırdan farklı σ_j 'lerin etkisiyle ifadeye, alan vektörü ile lineer değişen bir terim ve alan vektöründen bağımsız sabit bir terim eklenir (Thompson, 2005). Bu “alan-lineer” ve “alan-sabit astigmatizm” katkıları, hizalama kaçıklığı durumunda görüntü düzleminde iki astigmatizm sıfır noktasının görülmesine neden olur.

Gösterimi basitleştirmek için Eş. 2.62 içindeki ifadeler bundan sonra $W_{222} = \sum_j W_{222j}$, $A_{222} \equiv \sum_j W_{222j} \sigma_j$ ve $B_{222}^2 \equiv \sum_j W_{222j} \sigma_j^2$ şeklinde ifade edilecektir. Burada, W_{222} yüzeylerden gelen toplam aberasyon miktarı, bir başka deyişle sistem seviyesindeki astigmatizmdir. A_{222} , astigmatizm dalga aberasyon katsayıları ağırlıklı ilgili yüzey sigma vektörlerinin toplamına eşit olan normalize astigmatizm alan yer değiştirme vektördür. B_{222}^2 ise, dalga aberasyon katkıları ağırlıklı ilgili yüzey sigma vektör katkılarının karelerinin toplamına eşit normalize olmayan yer değiştirme vektör karesidir. Bahse konu ifadeler, Eş. 2.62’de yerine koyulduğunda, Eş. 2.63 elde edilir.

$$W_{AST,3} = \frac{1}{2} [W_{222}H^2 - 2HA_{222} + B_{222}^2] \cdot \rho^2 \quad (2.63)$$

Görüntü düzleminde astigmatizm sıfır noktalarını belirleyebilmek için, Eş. 2.63’nin köşeli parantez içindeki ifadesi, sıfıra eşitlenir ve eşitlik H için çözülür. Burada dikkat edilmesi gereken vektörler arasındaki matematiksel operasyon, Shack Vektör Çarpımı olarak bilinen özel bir işlemdir (EK-1). Eş. 2.63 H için çözüldüğünde, Eş. (2.63) elde edilir (Fuerschbach, 2014). Astigmatizm nod pozisyonları grafiksel olarak Şekil 2.22’de gösterilmiştir.

$$H = \frac{A_{222} \pm i\sqrt{W_{222}B_{222}^2 - A_{222}^2}}{W_{222}} \quad (2.64)$$



Şekil 2.22. 3. derece astigmatizm sıfır noktalarının grafiksel gösterimi

Eşitlik 2.64, normalize edilmiş astigmatizm alan yer değiştirme vektörleri a_{222} ve b_{222}^2 kullanılarak ifade edildiğinde, Eş. 2.65 elde edilir.

$$H = a_{222} \pm ib_{222}^2 \quad (2.65)$$

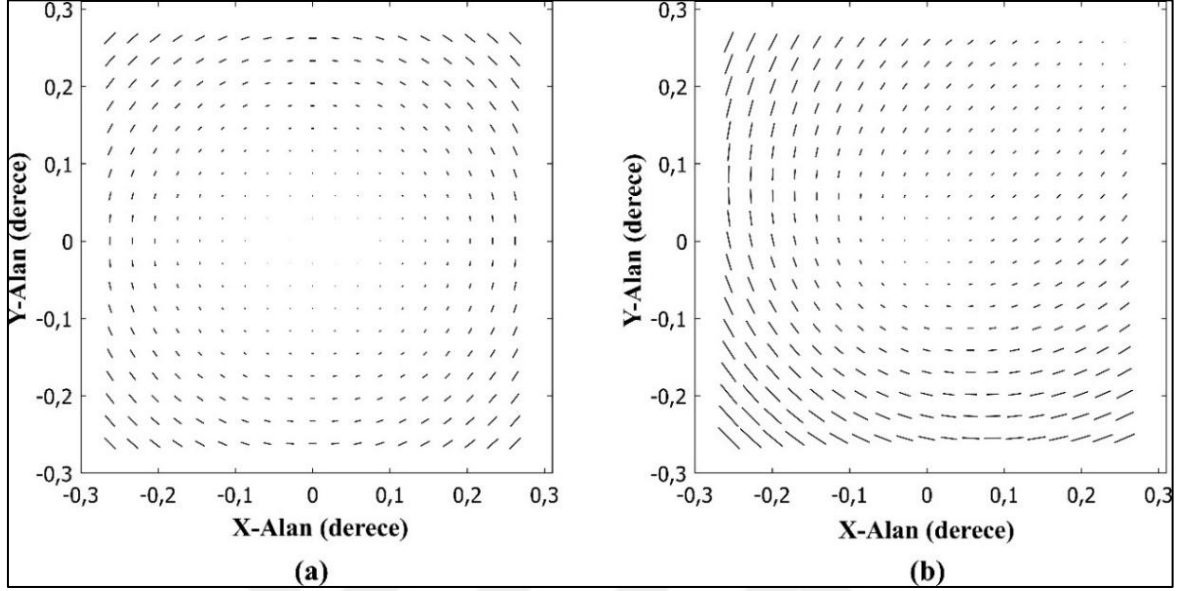
Eş. 2.65'deki normalize vektörler, Eş. 2.67 ve Eş. 2.68'de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$a_{222} \equiv \frac{A_{222}}{W_{222}} \quad (2.67)$$

$$b_{222}^2 \equiv \frac{B_{222}^2}{W_{222}} - a_{222}^2 \quad (2.68)$$

a_{222} vektörü, hizalama kaçıklığına sahip optik sistemler için alan merkezi olan OAR ile görüntü düzleminin kesişim noktasından başlar ve iki astigmatizm sıfır noktasının orta noktasında sonlanır. b_{222} vektörü ise a_{222} vektörünün bitiş noktasından başlar. $\pm ib_{222}$ vektörleri büyüklükte b_{222} vektörüne eşittirler. Ancak, yönleri b_{222} vektörünün $\pm 90^\circ$ dönmüş halidir. Astigmatizm sıfır noktaları, $a_{222} \pm ib_{222}$ vektörünün bitiş noktalarında konumlanır (Şekil 2.22). Sferik ve asferik olmayan dalga aberasyon katsayıları ve sigma vektör katkıları dikkate alındığında normalize vektörler Eş. 2.69 ve Eş. 2.70'deki gibi ifade

edilir. Cassegrain tipi bir teleskop için hizalı ve hizalama kaçıklığı durumlarına ait astigmatizm tüm alan gösterimleri Şekil 2.23’de verilmiştir.



Şekil 2.23. Cassegrain teleskop için 3. derece astigmatizm aberasyonu ile ilişkili TAAG’ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

$$a_{222} = \frac{1}{W_{222}} \sum_j (W_{222,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{222,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) \quad (2.69)$$

$$b_{222}^2 = \frac{1}{W_{222}} \sum_j (W_{222,j}^{sph} \sigma_j^{sph.2} + W_{222,j}^{asph} \sigma_j^{asph.2}) - a_{222}^2 \quad (2.70)$$

Astigmatizm sıfır noktaları, Eş. 2.65’de verilen sanal sayılar içeren ifadelerden bağımsız şekilde kartezyen koordinatlar referans alınarak da aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir. Başlangıç noktası olarak, Eş. 2.71 kullanılabilir.

$$0 = H - a_{222})^2 + b_{222}^2 \quad (2.71)$$

Eşitlik 2.65’de verilen ifadede yer alan H , a_{222} ve b_{222}^2 vektörleri, bileşenleri Eş. 2.72’de verildiği gibi tanımlayarak yeniden yazılarak yeni ifadeleri Eş. (2.72)’de yerine konulur.

$$\begin{aligned}
H &= \langle x_0, y_0 \rangle \\
a_{222} &= \langle a_x, a_y \rangle \\
b_{222}^2 &= \langle b_x, b_y \rangle
\end{aligned} \tag{2.72}$$

Eşitlik 2.72’de verilen vektör bileşenleri Eş. 2.71’de yerine koyulduğunda Eş. 2.73 ifade elde edilir.

$$0 = (\langle x_0, y_0 \rangle - \langle a_x, a_y \rangle)^2 + \langle b_x, b_y \rangle \tag{2.73}$$

Parantez içindeki ifadeleri hesaplamak için Shack Vektör Çarpımı olarak bilinen özel bir vektör çarpımı kullanılacaktır (Gray ve Rolland, 2015; Hestenes, 2003) (EK-1).

$$-\langle b_x, b_y \rangle = \langle 2(x_0 - a_x)(y_0 - a_y), (y_0 - a_y)^2 - (x_0 - a_x)^2 \rangle \tag{2.74}$$

Eşitlik 2.74’de verilen ilk terim b_x ’e ikinci terimi ise b_y ’ye eşitlendiğinde x_0 ve y_0 parametrelerini çözmek için gerekli olan iki adet denklem elde edilmiş olur.

$$-b_x = 2(x_0 - a_x)(y_0 - a_y) \tag{2.75}$$

$$-b_y = (y_0 - a_y)^2 - (x_0 - a_x)^2 \tag{2.76}$$

Eşitlik 2.75’in x_0 parametresi için çözülmesi sonucu Eş. 2.77 elde edilir.

$$x_0 = \frac{-b_x}{2(y_0 - a_y)} + a_x \tag{2.77}$$

Eşitlik 2.77 sonucu elde edilen x_0 ifadesi, Eş. 2.76’da yerine konulduğunda, Eş. 2.78 elde edilir.

$$-b_y = (y_0^2 - 2y_0a_y + a_y^2) - \left(\frac{-b_x}{2(y_0 - a_y)} \right)^2 \tag{2.78}$$

Eşitlik 2.78'in y_0 için çözülmesinin ardından dört tane çözüm elde edilir. Bu çözümlerden ikisi, $|b_y| \leq \sqrt{b_x^2 + b_y^2}$ durumundan dolayı b_y 'nin işaretinden bağımsız olarak her zaman sanal sayılar ile sonuçlanır. Astigmatizm sıfır noktaları ile ilişkili olan iki çözüm eşitliği, Eş. 2.79 ve Eş. 2.80 ile verilmiştir.

$$y_0 = a_y \pm \frac{\sqrt{-b_y + \sqrt{b_x^2 + b_y^2}}}{\sqrt{2}} \quad (2.79)$$

$$y_0 = a_y \pm \frac{\sqrt{-b_y - \sqrt{b_x^2 + b_y^2}}}{\sqrt{2}} \quad (2.80)$$

Sistem seviyesi astigmatizm aberasyonunun sıfır olduğu ($W_{222} = 0$) özel durum için, 3. derece astigmatizm için düzeltilmiş sistemlerde (TMA teleskop gibi) astigmatizm karakteristik alan bağımlılığını gösteren ifade, Eş. 2.81'de verilmiştir.

$$W_{AST,3} = \frac{1}{2}[-2HA_{222} + B_{222}^2] \cdot \rho^2 \quad (2.81)$$

Eşitlik 2.81'de görüldüğü gibi, $W_{222} = 0$ olduğundan nominal sistemin alan bağımlılığı ile ilişkili terim ($W_{222}H^2$) eşitlikte yer almamaktadır. Sadece hizalama kaçıklığına bağlı ortaya çıkan alan-lineer ve alan-sabit terimler eşitlikte mevcuttur. Bu sebeple, buradaki durum, 3. derece koma aberasyonu için düzeltilmiş optik sistemlerde hizalama kaçıklığına bağlı olarak indüklenen alan-sabit koma aberasyonundan daha karmaşıktır. Üç aynalı anastigmat teleskop sistemleri gibi, 3. derece astigmatizm için düzeltilmiş sistemlerde, baskın astigmatizm aberasyonu davranışı, alan-asimetrik ve alan-lineer astigmatizmdir. Buradaki alan-asimetrik astigmatizm davranışından ilk kez atıf yapılan tez çalışmasında bahsedilmiştir (Schmid, 2010). Alan-asimetrik astigmatizm terimi, sistem seviyesindeki astigmatizm aberasyonunun çok küçük olması dolayısıyla pratikte sıfır ($W_{222} = 0$) olarak düşünülmesinden ileri gelir. Eş. 2.81, bu kez astigmatizm çok küçük olacak şekilde yeniden yazılır ise, Eş. 2.82 ile verilen genel denklem elde edilir.

$$W_{AST,3} = \frac{1}{2} [W_{222} H^2 - 2HA_{222} + B_{222}^2] \cdot \rho^2 \quad (2.82)$$

Üç aynalı anastigmat bir teleskop için, hizalama kaçıklığına bağlı oluşan iki astigmatizm nodu konumu, Eş. 2.83 ile verilir.

$$H = \frac{A_{222}}{W_{222}} \pm \sqrt{\frac{A_{222}^2}{W_{222}^2} - \frac{B_{222}^2}{W_{222}}} \quad (2.83)$$

Eşitlik 2.83'de açıkça görülmektedir ki karekök içindeki ilk terim ikinci terimden önemli ölçüde daha büyüktür. Bunun iki sebebi vardır. İlki, A_{222}^2 teriminin B_{222}^2 teriminden büyük olmasıdır. Çünkü, A_{222}^2 terimi hem dalga aberasyon katsayılarının hem de sigma vektör katkılarının karesini içerir. B_{222}^2 , teriminde ise dalga aberasyon katsayılarının karesi alınmazken, sadece sigma vektör katkılarının karesi alınır. Bu önemlidir, çünkü gerçekçi hizalama kaçıklıklarında, yüzey sigma vektörleri çok küçük olma eğilimindedir. İkincisi, sistem seviyesindeki toplam astigmatizm aberasyonunun karesi, sistem seviyesindeki astigmatizm miktarından küçüktür. Dolayısıyla, şu yaklaşım sağlanır.

$$\frac{1}{W_{222}^2} \gg \frac{1}{W_{222}} \quad (2.84)$$

Bu sebeple, pek çok durum için Eşitlik 2.83'deki karekök içindeki ikinci terim ihmal edilir ve Eş. 2.83, Eş. 2.85'e yaklaştırılır.

$$H \approx \frac{A_{222}}{W_{222}} \pm \frac{A_{222}}{W_{222}} = \left(0, \frac{2A_{222}}{W_{222}}\right) \quad (2.85)$$

Eşitlik 2.85'e göre, görüntü düzlemindeki astigmatizm sıfır noktasının biri, alan merkezine çok yakın konumlanmışken, diğeri alanın çok dışında konumlanır. Kavramsal olarak ikinci astigmatizm sıfır noktasının sonsuzda olduğu düşünülebilir (Schmid, 2010). Burada önemli olan, alan içindeki astigmatizm aberasyonunun bu sonsuzdaki sıfır noktasından etkilendiği ve astigmatizm aberasyonunun yöneliminin bu sıfır noktasına göre belirlendiğidir (Şekil 2.24).

Bir üç aynalı anastigmat teleskop için, aynalarda astigmatizm yüzey form hatasının olmadığı durumda, astigmatizm sıfır noktalarından biri merkeze çok yakın olacaktır. Bu, alan merkezine çok yakın olan astigmatizm noktasının konumu Eş. 2.86'da verildiği gibidir.

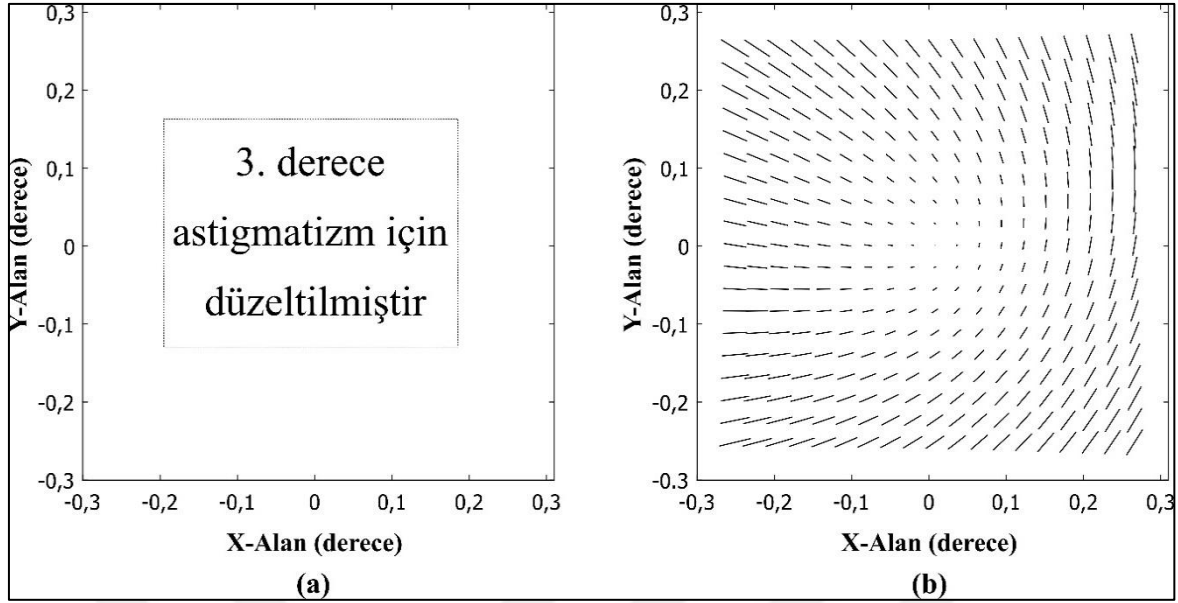
$$H = \frac{1}{2} \left(\frac{B_{222}^2}{A_{222}} \right) \quad (2.86)$$

Ek olarak, H 'nin X ve Y bileşenleri formunda Eş. 2.87 ve Eş. 2.88'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$H_x = -\frac{1}{2} \frac{A_{222,x}(B_{222}^2)_y - A_{222,y}(B_{222}^2)_x}{A_{222,x}^2 + A_{222,y}^2} \quad (2.87)$$

$$H_y = \frac{1}{2} \frac{A_{222,x}(B_{222}^2)_x + A_{222,y}(B_{222}^2)_y}{A_{222,x}^2 + A_{222,y}^2} \quad (2.88)$$

Eş. 2.81'de verilen astigmatizm için düzeltilmiş teleskopların astigmatizm davranışını ifade eden denklemde açıkça görüldüğü gibi B_{222}^2 teriminin alan bağımlılığı yoktur ve alan boyunca sabittir. Pek çok durum için optik bileşen hizalama kaçıklıklarından kaynaklanan B_{222}^2 terimi çok küçüktür. Ancak optik bileşenlerin sahip olduğu astigmatizm yüzey form hatası da sabit bir astigmatizm aberasyonu tetikler ve bu terimin ($B_{222}^2 \neq 0$) sıfırdan farklı olmasına yol açar. Bu durumda, alan merkezine çok yakın olması gereken astigmatizm sıfır noktasının alan içinde $H \neq 0$ olan bir noktaya doğru hareket eder.



Şekil 2.24. TMA teleskop için 3. derece astigmatizm aberasyon ile ilişkili TAAG'ler: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Koma sıfır pivot noktası

Yukarıda belirtildiği gibi optik eksen üzerinde, yani görüntü düzlemi merkezinde koma aberasyonunun var olması, optik sistemde bir hizalama kaçıklığının var olduğu anlamını taşır. Ancak, eksen üzerindeki koma aberasyonunun sıfır olması her zaman optik sistemin hizalı olduğu anlamına gelmemektedir. Optik yüzeylerin hizalama kaçıklıklarının bazı özel koşulları sağlaması durumunda, optik sistemin görüntü düzlemindeki koma aberasyon alanında değişiklik meydana gelmez. Koma aberasyonu sıfır noktası, hizalı durumda olduğu gibi görüntü düzlemi merkezinde konumlanır. Bu durum “koma sıfır pivot noktası” olarak ifade edilebilir ve bu kavram optik sistemlerin hizalanmasında oldukça önemlidir. Adından da anlaşıldığı gibi, koma sıfır pivot noktası etrafında bir yüzeyin dönmesi koma aberasyon alanını değiştirmez (Schmid, 2010). Örnek olarak, sistem seviyesi koma aberasyonuna sahip Cassegrain teleskoplarda, hizalama kaçıklığının mevcut olduğu durumda da hizalı sistemlerdeki koma sıfır noktası ile uyumlu olarak alanın merkezinde kalır. Eğer bahse konu sistem, RC gibi 3. derece koma aberasyonu için düzeltilmiş bir sistem ise yine hizalama kaçıklığı durumunda hizalı duruma benzer şekilde koma aberasyonu tüm alan boyunca sıfır olur. Temelde, koma sıfır pivot noktası, bir optik yüzeyin koma aberasyonunu etkilemeden etrafında döndüğü nokta, koma sıfır pivot noktası olarak tanımlanabilir (McLeod, 1996; Ren ve diğerleri, 2011; Schmid, 2010).

Bir optik sistemde koma sıfır pivot noktasının yerinin bulunabilmesi için aşağıda, N yüzeyli bir sistem için verilen şartın sağlanması gerekmektedir.

$$A_{131} = \sum_{j=1}^N (W_{131,j}^{sph} \sigma_j^{sph} + W_{131,j}^{asph} \sigma_j^{asph}) = 0 \quad (2.43)$$

İki aynalı teleskoplar için yukarıdaki verilen ifadeyi basitleştirmek mümkündür. İki aynalı teleskoplarda optik açıklık yüzeyi (stop), genel olarak birincil ayna olarak belirlenmiştir. İkincil aynanın koma sıfır pivot noktası, aşağıdaki adımlar takip edilerek hesaplanabilir. İki aynalı, optik açıklık yüzeyi birincil ayna olarak belirlenmiş bir teleskop için yukarıdaki ifade Eş. 2.44'de belirtildiği şekilde ifade edilebilir.

$$A_{131} = (W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2}^{asph}) = 0 \quad (2.44)$$

Yukarıda verilen eşitlikte $\sigma_{M2}^{sph} \neq 0$ ve $\sigma_{M2}^{asph} \neq 0$ koşulları sağlandığında, aşağıdaki koşul sağlanmaktadır.

$$\frac{\sigma_{M2,(x,y)}^{sph}}{\sigma_{M2,(x,y)}^{asph}} = -\frac{W_{131,M2}^{asph}}{W_{131,M2}^{sph}} \quad (2.45)$$

İkincil ayna, X ve Y sferik sigma vektör bileşenlerinin yapısal parametreler cinsinden ifadesi, aşağıda verilmiştir (Schmid, 2010):

$$\sigma_{M2,x}^{sph} = -\frac{XDE_{M2} - BDE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (2.46)$$

$$\sigma_{M2,y}^{sph} = -\frac{YDE_{M2} + ADE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (2.47)$$

Benzer şekilde, ikincil ayna X ve Y asferik sigma vektör bileşenlerinin yapısal parametreler cinsinden ifadesi, aşağıda verilmiştir;

$$\sigma_{M2,x}^{asph} = -\frac{XDE_{M2}}{d_1 \bar{u}_{M1}} \quad (2.48)$$

$$\sigma_{M2,y}^{asph} = -\frac{YDE_{M2}}{d_1 \bar{u}_{M1}} \quad (2.49)$$

İkincil aynanın Y yönündeki hizalama kaçıklıkları kullanılarak, ikincil ayna merkezinden koma sıfır pivot noktasına mesafeyi hesaplayabilmek için aşağıdaki adımlar takip edilir. Burada Y yönündeki hizalama kaçıklıkları örnek olarak verilmiş olup X yönü için de adımlar ilgili eşitlikleri kullanarak hesaplanabilir.

$$W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2,y}^{sph} + W_{131,M2,y}^{asph} \sigma_{M2,y}^{asph} = 0 \quad (2.50)$$

Yukarıda verilen ifadede, $\sigma_{M2,y}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,y}^{asph}$ yerine koyulursa Eş. 2.51 ifadesi elde edilir.

$$W_{131,M2}^{sph} \left(-\frac{YDE_{M2} + ADE_{M2} r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \right) + W_{131,M2,y}^{asph} \left(-\frac{YDE_{M2}}{d_1 \bar{u}_{M1}} \right) = 0 \quad (2.51)$$

Bu ifade YDE_{M2} terimi yalnız bırakılacak şekilde çözülrse Eş. 2.52 ifadesi elde edilir;

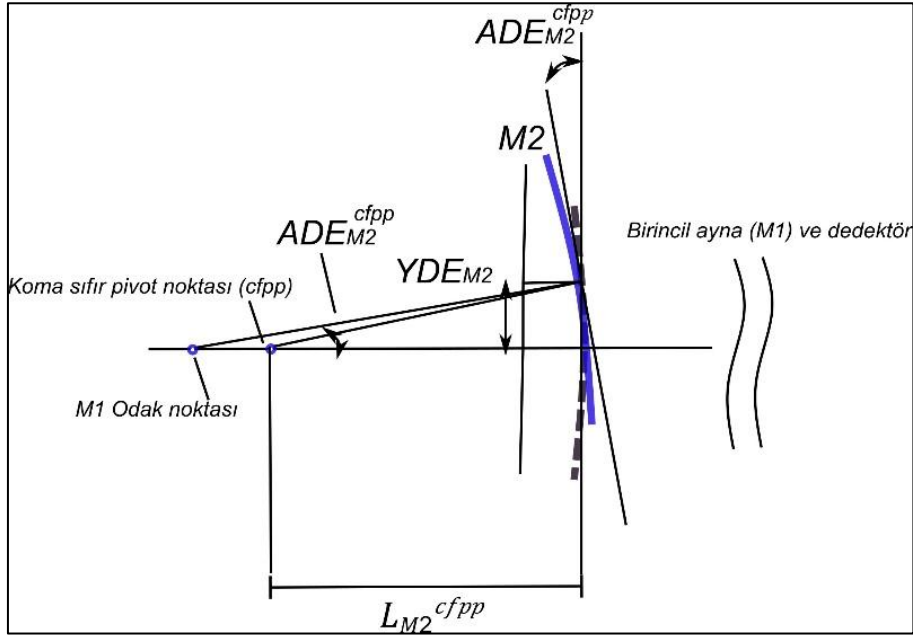
$$YDE_{M2} = -\frac{ADE_{M2} r_{M2} d_1 W_{131,M2}^{sph}}{W_{131,M2}^{asph} + W_{131,M2}^{asph} c_{M2} d_1 + c_{M2} d_1 W_{131,M2}^{sph}} \quad (2.52)$$

İkincil ayna merkezinden koma sıfır dönme noktasına mesafe, L_{M2}^{cfp} aşağıda verilen şekilde ifade edilir (Schmid, 2010).

$$L_{M2}^{cfp} = -\frac{YDE_{M2}}{ADE_{M2}} = \frac{d_1 W_{131,M2}^{sph}}{W_{131,M2}^{asph} + c_{M2} d_1 W_{131,M2}^{sph}} \quad (2.53)$$

Yukarıdaki eşitlikte $W_{131,M2} = W_{131,M2}^{sph} + W_{131,M2}^{asph}$ olarak alınmıştır. $W_{131,M2}$ ikincil aynanın toplam koma aberasyon katkısını ifade etmektedir. YDE_{M2} ikincil ayna optik eksenini merkezden kayması, ADE_{M2} ikincil ayna optik ekseninin merkeze göre eğimini (radyan cinsinden) ifade eder. $\bar{y}_{M2}$ ikincil aynadaki paraksiyal ana ışın yüksekliğidir. $\bar{l}_{M2}$ paraksiyal ana ışının ikincil aynadaki geliş açısıdır (radyan cinsinden). c_{M2} ise ikincil aynanın eğriligidir. L_{M2}^{cfp} nin konumu, optik sistemin aberasyon katsayılarına ve yapısal tasarım parametrelerine bağlıdır (Şekil 2.25).

İkincil aynanın koma sıfır pivot noktası etrafında dönüşü, ADE_{M2}^{cfp} olarak ifade edilir ve ikincil aynanın bu nokta etrafında dönmesi astigmatizm aberasyonunu ve medyal odak düzlemini etkiler. Fakat 3. derece koma aberasyonunu etkilemez. Optik sistemde koma aberasyonunun bu şekilde davranabileceği σ_{M2}^{sph} ve σ_{M2}^{asph} 'nin sonsuz kombinasyonu mevcuttur. Özetle, eksen üstü noktada koma aberasyonunun sıfır olması ve alanda koma aberasyonunun dönme simetrisine sahip şekilde dağılım göstermesi sistemin optik bileşenlerinde bir hizalama kaçıklığının var olmadığı anlamına gelmez. Optik sistemdeki koma ve astigmatizm aberasyonları birlikte analiz edilerek, sistem hizalı duruma getirilmelidir (Schmid, 2010).

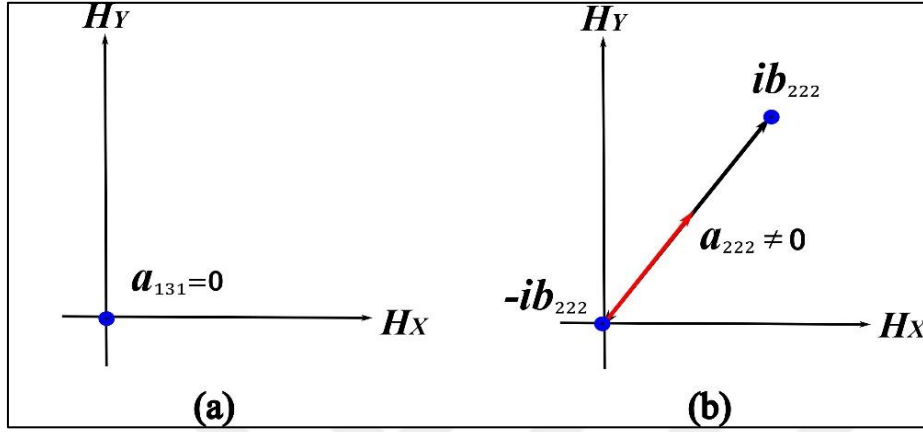


Şekil 2.25. İkincil ayna için koma sıfır dönme noktası (M1 optik açıklık yüzeyi olarak belirlenmiş)

Şekil 2.20, genel durum için koma sıfır pivot noktasının konumunu göstermektedir. Ancak, birincil aynası optik açıklık olarak konumlandırılmış bir Cassegrain teleskop özelinde ikincil ayna koma sıfır pivot noktası, birincil aynanın stigmatik görüntü oluşturduğu f_{M1} konumu ile çakışmaktadır. Bu tip bir teleskop için ikincil ayna koma pivot noktası Eş. 2.54 kullanılarak hesaplanır. L_{M2}^{cfpp} konumu, ikincil aynanın tepe noktasından ölçülür.

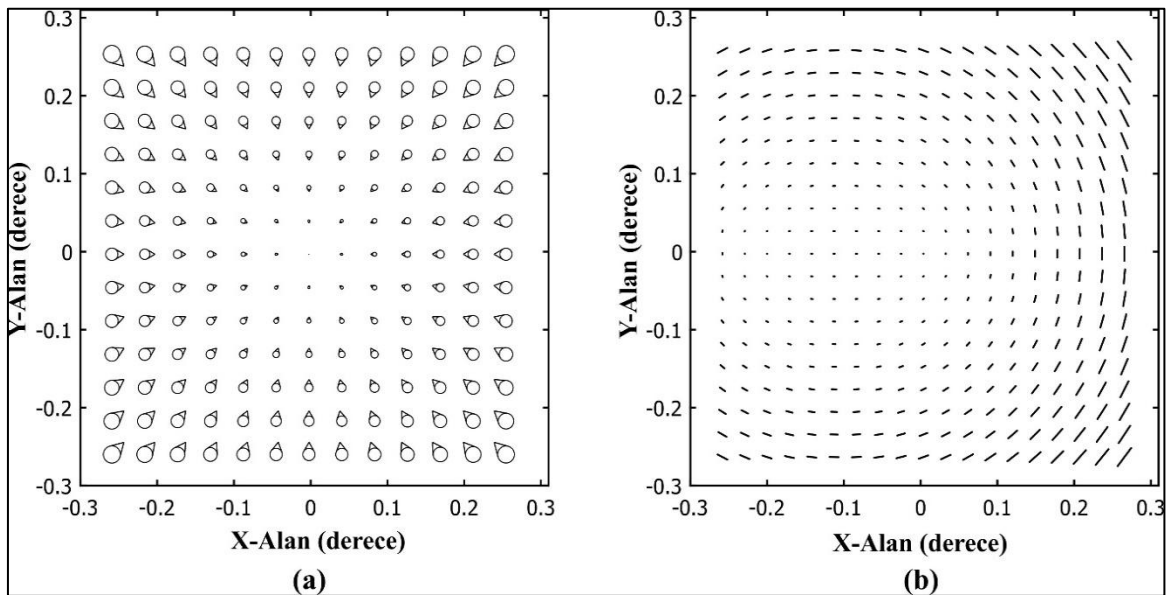
$$L_{M2}^{cfpp} = -\frac{(f)\gamma}{m} \quad (2.54)$$

Koma sıfır dönme noktası durumunda 3. derece koma ve astigmatizm sıfır noktalarının görüntü düzleminde nasıl konumlandığı Şekil 2.26 ile verilmiştir. Şekilde, daha sonraki bölümlerde detaylandırılacak olan birincil ayna astigmatizm yüzey form hatası etkisi dikkate alınmamıştır.



Şekil 2.26. İkincil aynanın koma sıfır pivot noktasında, özel bir hizalama kaçıklığı durumunun yaratılması a) 3. derece koma sıfır noktasının konumu, b) 3. derece astigmatizm sıfır noktalarının durumu

Cassegrain bir teleskobun ikincil aynasının koma sıfır pivot noktası etrafında dönmesi ile ortaya çıkan bu özel hizalama kaçıklığı durumunda, 3. derece koma ve astigmatizm ile ilişkili terimlerin büyüklüğünü ifade eden tüm alan gösterimleri Şekil 2.27’de sunulmuştur.



Şekil 2.27. Cassegrain teleskop ikincil aynasının koma sıfır pivot noktasında döndürüldüğü durum için TAAG’ler: a) astigmatizm ve b) koma

Şekil 2.27’de görüldüğü üzere, Cassegrain tipi bir teleskobun görüntü düzlemindeki koma aberasyonu ikincil ayna hizalama kaçıklıkları ile dengelendiği durumda görüntü düzlemindeki iki nodlu astigmatizm görünümü devam etmektedir.

Birincil ayna (M1) astigmatizm yüzey form hatasının etkisi

Bölüm 2.3.3’de, rotasyonel simetrik bileşenler içeren optik sistemlerin hizalama kaçıklığı dolayısıyla simetrisi bozulursa, genel durumda, görüntü düzleminde iki astigmatizm sıfır noktasının görüleceği ve astigmatizm sıfır noktasının birinin gerçekçi hizalama kaçıklıkları için sabit etki ($B_{222,MIS}^2 \approx 0$) sıfıra çok yakın olduğu için alan merkezine çok yakın, neredeyse alan merkezinde olduğu açıklanmıştır. Bu durum, aynaların kusursuz olarak düşünüldüğü ideal sistemler için geçerlidir. Ancak gerçek sistemlerde, özellikle görüntü kalitesini iyileştirmek için gündün güne çapı ve dolayısıyla kütlesi arttırılan birincil aynalar söz konusu olduğunda, birincil aynanın astigmatik yüzey form hataları, $B_{222,MIS}^2$ terimine ek $B_{222,FIG}^2$ sabit terimi indüklenir (Schmid ve diğerleri, 2010). Söz konusu sistemin görüntü düzlemindeki iki astigmatizm sıfır noktasının konumu, bu iki terimin etkisi ile belirlenir. Shack’ın incelediği RC teleskop sistemi ile çekilen yıldız plakası fotoğrafında (Şekil 1.1) bu iki katkının da etkisi mevcuttur. Bu fotoğrafın gizemlerinden biri olan birincil ayna astigmatizm yüzey form hatasının etkisi, Schmid’in atıf yapılan çalışmaları ile aydınlatılmış ve inceleme tamamlanmıştır (Schmid, 2010; Schmid ve diğerleri, 2010; Thompson ve diğerleri, 2010).

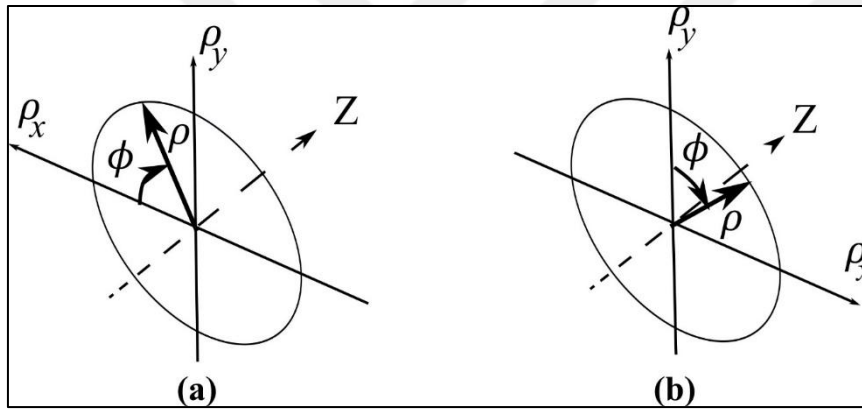
$B_{222,FIG}^2$ sabit terimi hizalama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan bir terim değildir, hizalı sistemler de birincil ayna yüzey form hatası etkisi altındadır. Başka bir deyişle, birincil ayna form hatasının etkisiyle, sistem bileşenlerinde herhangi bir hizalama kaçıklığı yoksa bile, görüntü düzleminde iki astigmatizm sıfır noktalı görünüm ortaya çıkar. Bu iki astigmatizm sıfır noktalı görünümün, hizalama kaçıklığı olduğu durumdan farkı ise, bu sıfır noktalarının görüntü düzlemi merkezine göre simetrik olarak konumlanmış olmasıdır.

Birincil ayna yüzey form hatası etkisi, birincil aynanın interferometrik dalga cephesi hatası ölçümü sonucunda elde edilen $C_{5,FIG}$ ve $C_{6,FIG}$ Fringe Zernike katsayıları kullanılarak nicel hale getirilebilir. Söz konusu, astigmatizm katsayılarının büyüklüğü Eş. 2.89 ile yönelimi ise Eş. 2.90 verilmiştir.

$$C_{5,6,FIG} = \sqrt{C_{5,FIG}^2 + C_{6,FIG}^2} \quad (2.89)$$

$$\xi_{5,6,FIG} = \frac{1}{2} \text{ArcTan} \left(\frac{-C_{6,FIG}}{C_{5,FIG}} \right) \quad (2.90)$$

Eşitlik 2.89 türetilirken, Fringe Zernike polinomlarının ifade edildiği koordinat sisteminden, ϕ açısının ρ_x çıkış açıklığı ekseninden ρ_y eksenine doğru seçildiği, Nodal Aberasyon Teorisinin referans aldığı koordinat sistemine, ϕ açısının ρ_y çıkış açıklığı ekseninden ρ_x eksenine doğru seçildiği, geçiş yapılmıştır (Schmid, 2010; Schmid ve diğerleri, 2010). Fringe Zernike terimlerinin tanımlandığı koordinat sistemi ve Nodal Aberasyon Teorisi'nin tanımlandığı koordinat sistemi, Şekil 2.28'de sunulmuştur (Schmid ve diğerleri, 2010).



Şekil 2.28. Çıkış açıklığındaki koordinat tanımlanması a) Fringe Zernike polinomları koordinat sistemin b) Nodal Aberasyon Teorisi'nde kullanılan koordinat sistemi

Birincil ayna yüzey form hatası etkisinin, hizalı sistemlerin astigmatizm aberasyon davranışını tanımlayan astigmatizm terimine eklenmesiyle Eş. 2.91 elde edilir.

$$W = \frac{1}{2} (W_{222} H^2 + B_{222,FIG}^2) \rho^2 \quad (2.91)$$

$$B_{222,FIG}^2 = 2(C_{5,6,FIG}) e^{j2\xi_{5,6,FIG}} \quad (2.92)$$

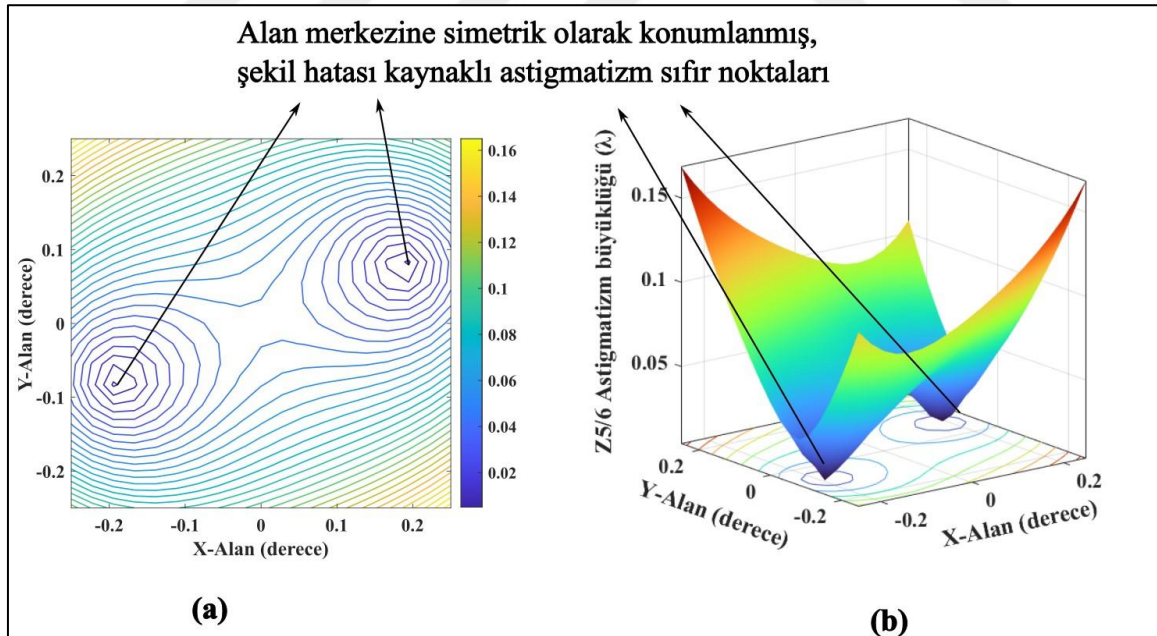
Astigmatizm yüzey form hatasına bağlı olarak görüntü düzleminde ortaya çıkan iki astigmatizm sıfır noktasının konumu, Eş. 2.91'de parantez içinde verilen ifadenin sıfıra eşitlenmesi ile mümkün olur.

$$H^2 = -\frac{B_{222,FIG}^2}{W_{222}} \quad (2.93)$$

Eşitlik 2.93'ün H için çözülmesiyle, astigmatizm yüzey form hatasından kaynaklanan astigmatizm sıfır noktalarının konumları, Eş. (2.94)'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$H = \pm i \frac{B_{222,FIG}}{\sqrt{W_{222}}} \quad (2.94)$$

Eşitlik (2.94)'den anlaşılaacağı üzere, hizalı sistemler için bu iki astigmatizm sıfır noktası, ters yönde ve alan merkezine göre simetrik konumdadır. Eğer, optik sistemdeki sistem seviyesi astigmatizm değeri $W_{222} > 0$ ise, astigmatizm sıfır noktaları, interferometrik dalga cephesi hatası sonuçları kullanılarak belirlenen $B_{222,FIG}$ vektörün $\pm 90^\circ$ döndürüldüğü konumlarda bulunurlar. Eğer, $W_{222} < 0$ ise, astigmatizm sıfır noktaları, $B_{222,FIG}$ vektörü boyunca ve bu vektörün tam tersi yönünde konumlanır. Her iki durumda da, astigmatizm sıfır noktaları alan merkezine göre simetriktir (Şekil 2.29).



Şekil 2.29. Birincil ayna yüzey form hatasına bağlı olarak ortaya çıkan astigmatizm sıfır noktalarının a) 2 boyutta, b) 3 boyutta gösterimi

Sistem simetrisinin hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak bozulduğu durumda, alan vektörüne lineer bağlı A_{222} terimi ve alan vektöründen bağımsız $B_{222,MIS}$ terimlerinin etkisiyle,

astigmatizm sıfır noktalarının konumları aşağıda açıklandığı üzere hesaplanmalıdır. Burada iki alan vektöründen bağımsız terim, $B_{222,MIS.}^2$ ve $B_{222,FIG.}^2$ birlikte değerlendirilecektir. B_{222}^2 terimi Eş. 2.95 ile verilmiştir.

$$B_{222}^2 = B_{222,MIS.}^2 + B_{222,FIG.}^2 \quad (2.95)$$

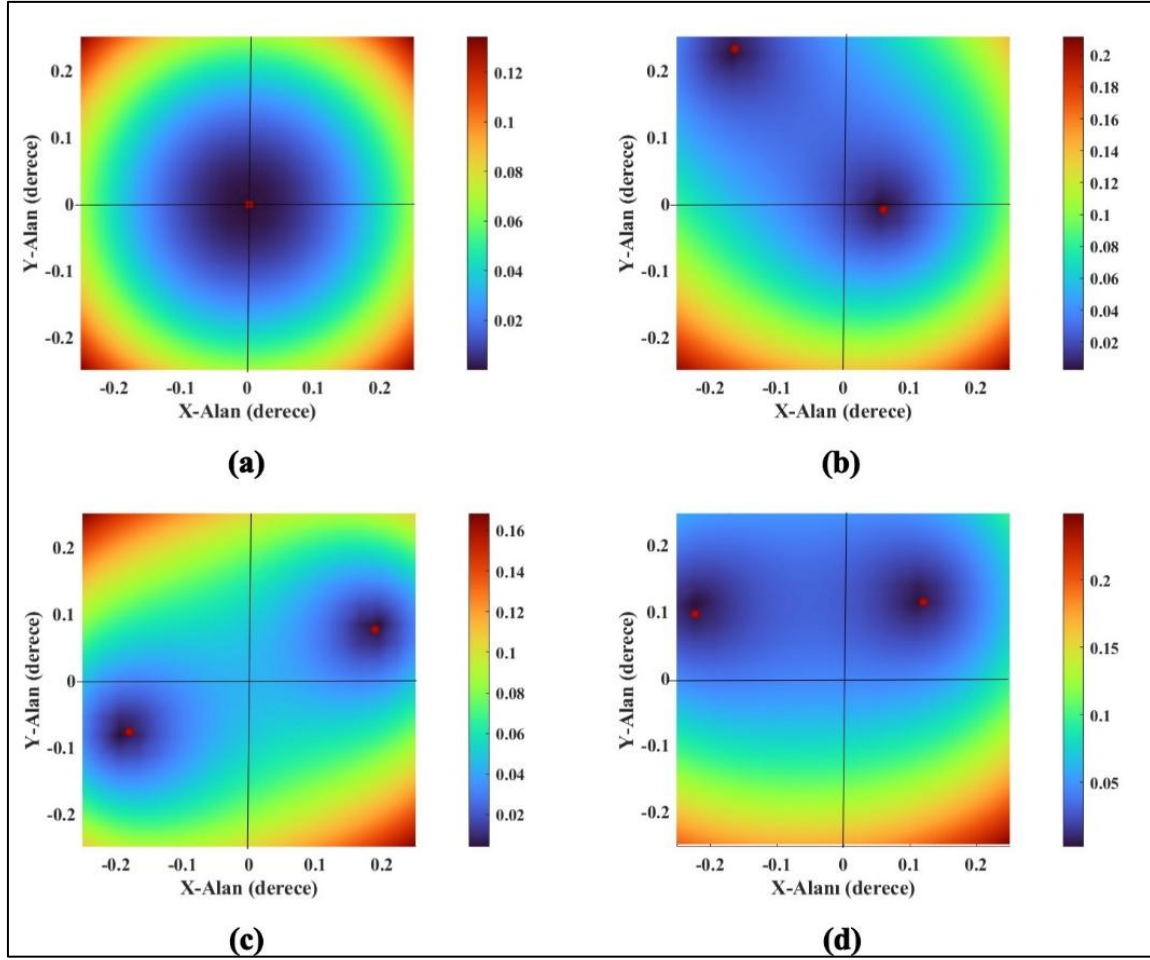
B_{222}^2 teriminin sistem seviyesi astigmatizm aberasyonu ile normalizasyonu ve a_{222}^2 teriminin ifadeden çıkarılması ile elde edilen b_{222}^2 vektörü Eş. 2.96 ile verilmiştir.

$$b_{222}^2 = \frac{B_{222}^2}{W_{222}} - a_{222}^2 \quad (2.96)$$

Nominal olarak rotasyonel simetrik bileşenler içeren ve bu bileşenlerin hizalama bozukluğu sebebiyle simetrisini kaybetmiş optik sistemlerde 3. derece astigmatizm aberasyonu davranışı, Eş. 2.97 ile verilmiştir. Astigmatizm sıfır noktaları eşitlikteki köşeli parantez içerisindeki ifadenin H için çözülmesi ile elde edilir.

$$W = \frac{1}{2} W_{222} [(H - a_{222})^2 + b_{222}^2] \rho^2 \quad (2.97)$$

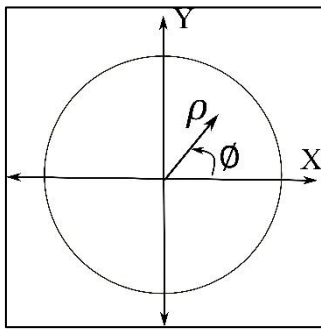
Bilindiği gibi yeni durumda, B_{222}^2 ifadesi, $B_{222,FIG.}^2$ teriminin $B_{222,MIS.}^2$ terimine eklenmesi ile elde edilmişti. Astigmatizm yüzey form hatasından kaynaklanan alan sabit terimin etkisi, sadece hizalama kaçıklığına bağlı olarak oluşan astigmatizm sıfır noktaları konumlarının eşit miktarda ötelenmesine yol açar. a_{222} vektörü, sadece hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak indüklendiğinden ayna form hatalarından bağımsızdır. Astigmatizm sıfır noktalarının, birincil ayna form hatası ve hizalama kaçıklığı durumlarındaki konumları Şekil 2.30'de gösterilmektedir.



Şekil 2.30. Anastigmat olmayan bir optik sistemde astigmatizm nod konumları: a) hizalı durum ve birincil ayna yüzey form hatası yok, b) hizalama kaçıklığı mevcut ancak birincil ayna yüzey form hatası yok, c) birincil ayna astigmatik form hatası mevcut, d) hizalama kaçıklığı mevcut ve aynı birincil aynasında astigmatizm yüzey form hataları mevcut

3. EKSENEL SİMETRİK TELESKOPLARDA ABERASYON ANALİZİ

İki ve üç aynalı eksenel simetrik teleskop sistemlerinin aberasyon düzeltme kapasiteleri Bölüm 2.3’de detaylandırılmıştır. Bu bölümde eksenel simetrik bir teleskobun aberasyon analizinin nasıl gerçekleştirileceği detaylandırılacaktır. Teleskopların 3. derece sistem seviyesi aberasyon miktarları, hizalama kaçıklığı durumundan bağımsız ancak teleskopların yapısal parametreleri ile ilişkilidir. Sistem seviyesi aberasyonlar, teleskobun yapısal parametreleri kullanılarak hesaplanabilir ve hizalama kaçıklığı durumunda bu nominal durum için hesaplanan aberasyonlar kullanılır. Burada bahsedilen aberasyonlar Seidel aberasyonlarıdır. Optik sistemlerin aberasyonlarını tanımlamakta kullanılan bir diğer yaklaşım ise dalga cephesi hatalarının astigmatizm, koma ve küresel aberasyon gibi aberasyonlara ayrıştırılmasında kullanılan Zernike polinomlarıdır. Zernike polinomları, bir çember üzerinde tanımlı fonksiyonları ifade etmek için kullanılan ortogonal polinomlardır (Şekil 3.1). Fritz Zernike tarafından 1934’de tanımlanan bu matematiksel polinomlar, interferometrik optik testin keşfedilmesinin ardından optik metrolojide kullanılmaya başlanmış olup tek bir alan noktasından alınan interferogram ile dalga cephesi hatasının karakterize edilmesine olanak sağlamıştır. Seidel aberasyonları, ilgili Zernike polinomları ile ilişkilendirilebilir (Conforti, 1983; Tyson, 1982). Zernike polinomları için farklı sıralamalar mevcuttur (Noll, 1976). Optik metrolojide en çok kullanılan sıralama, indisin 1’den 37’ye kadar olacak şekilde tanımlandığı, Fringe Zernike polinomlarıdır (FZC). Bu sıralamada, düşük indisli terimler düşük dereceli aberasyonlar ile ilgiliyken yüksek dereceli terimler yüksek dereceli aberasyonlar ile ilgilidir. 1. ve 3. derece aberasyonlar ile ilişkili FZC terimleri ve açıklamaları Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Zernike Polinomları için polar koordinatlar

Çizelge 3.1. Fringe Zernike polinomlarının tanımlanması (İlk 9 terim)

Sıralama	Polinom	Tanımlama
Z_1	1	Piston
Z_2	$\rho \cos \emptyset$	Tilt X
Z_3	$\rho \sin \emptyset$	Tilt Y
Z_4	$(2\rho^2 - 1)$	Defokus
Z_5	$\rho^2 \cos(2\emptyset)$	Astigmatizm $0^\circ/90^\circ$
Z_6	$\rho^2 \sin(2\emptyset)$	Astigmatizm $\pm 45^\circ$
Z_7	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos(\emptyset)$	Koma X
Z_8	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin(\emptyset)$	Koma Y
Z_9	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	Küresel aberasyon

Eksenel simetrik bir teleskop için teleskobun görüntü düzleminin herhangi bir noktasında indüklenen 3. derece aberasyon ile ilişkili FZC terimleri ve bu terimlerin alan boyunca dağılımı, FZC terimlerinin Seidel aberasyonları ile ilişkileri kullanılarak hesaplanabilir. Teleskop hizalı durumda ise FZC terimlerinin hesaplanması için teleskobun yapısal parametreleri kullanılarak hesaplanan Seidel aberasyonlarından faydalanılır. Görüntü düzleminde ölçülen FZC terimlerinin hesaplanması, birincil ayna astigmatizm form hatasının mevcut olduğu ve/veya optik bileşenlerde hizalama kaçıklıklarının mevcut olduğu durumlar için gerçekleştirilebilir. Eksenel simetrik bir teleskop sisteminde, görüntü düzleminde tetiklenen FZC terimleri miktarlarının ve aberasyon sıfır noktalarının bilinen bir hizalama kaçıklığı için belirlenmesi önemlidir. Bu süreç, aynı zamanda hizalama kaçıklarının hesaplanmasında tersine çevrilebilir şekilde kullanılabilir.

Bu bölümde, eksenel simetrik bir teleskop sisteminin her bir optik bileşeninin indüklediği sferik ve asferik yüzey dalga aberasyon katkılarının nasıl hesaplanacağı detaylandırılacaktır. Daha sonra optik bileşenlerin hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak ortaya çıkan sigma vektörlerin, gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak nasıl hesaplanacağı ele alınacaktır. Hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları ve hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen sigma vektörler, ilgili yüzeyin dalga aberasyonlarının alan bağımlılığının değişimine bağlı olarak ortaya çıkan nodal görünümün karakterize edilmesinde kullanılacaktır. Bölüm 2’de de aktarıldığı gibi optik sistemlerin hizalama kaçıklığına verdiği tepki, aberasyon düzelme kapasiteleri ile ilişkilidir ve her durumda nodal görünüm ortaya çıkmaz. Nodal görünümün mevcut olmadığı durumlar için görüntü düzleminde hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen FZC terimleri hesaplanarak teleskobun aberasyon durumu incelenecektir.

3.1. İki Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Aberasyon Analizi

Bu bölümde eksenel simetriye sahip iki aynalı teleskop sistemlerindeki aberasyon durumu ele alınacaktır. İki aynalı teleskopların farklı varyantları için gereken modifikasyonlar ise bölüm içerisinde açıklanacaktır.

3.1.1. İki aynalı eksenel simetrik teleskopların yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması

Bu çalışma kapsamında incelenecek iki aynalı teleskoplarda, birincil ayna optik açıklık (stop) olarak seçilmiş ve hizalama kaçıklıkları ikincil aynaya hareket verilerek uygulanmıştır. Bunun sebebi eksenel simetriye sahip teleskoplarda en hassas optik bileşenin genellikle ikincil ayna olarak belirlenmiş olması ve bu aynanın optik aberasyonların dengelenmesinde kompensatör görevi yapmasıdır. Aberasyon analizinin teleskobun özelliklerine uygun olarak gerçekleştirilebilmesi için ilk koşul, teleskobun Bölüm 2’de verilen kurallara uygun olarak tasarlanmalıdır. Bu çalışma kapsamında teleskop ikincil aynasının eksenel ve açısal hizalama kaçıklıkları ile ilgilendiğimiz için alan vektörüne bağlı ve FZC terimleri ile direkt ilişkilendirilebilen 3. derece astigmatizm ve koma sistem seviyesi aberasyonlarının hesaplanması yeterlidir. 3. derece koma yüzey dalga aberasyon katkıları hesaplamaları, Eş. 3.1, Eş. 3.2, Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 ile verildiği gibidir.

$$W_{131,M1,Stop}^{sph} = -\frac{EPD^3 m^2 \bar{u}_{M1}}{32(f)^2} \quad (3.1)$$

$$W_{131,M1,Stop}^{asph} = 0 \quad (3.2)$$

$$W_{131,M2}^{sph} = -\frac{EPD^3 (m^2 - 1)[1 - m - (m + 1)\gamma] \bar{u}_{M1}}{64(f)^2 m} \quad (3.3)$$

$$W_{131,M2}^{asph} = -\frac{k_{M2} EPD^3 (1 - m)^3 (\gamma - 1) \bar{u}_{M1}}{64(f)^2 m} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki eşitliklerde verilen parametreler sırasıyla, EPD (Entrance Pupil Diameter), giriş açıklığının çapı, m , büyütme, f , optik sistemin odak uzunluğu, γ , eksenel karartma oranı ve $\bar{u}_{M1}$ birincil aynadaki ana ışın geliş açısı, k_{M2} , ikincil ayna konik katsayısıdır. Benzer

şekilde, 3. derece astigmatizm yüzey dalga aberasyon katkıları hesaplamaları da Eş. 3.5, Eş. 3.6, Eş. 3.7 ve Eş. 3.8'de verildiği gibidir.

$$W_{222,M1,Stop}^{sph} = \frac{EPD^2 m \bar{u}_{M1}^2}{8(f)} \quad (3.5)$$

$$W_{222,M1,Stop}^{sph} = 0 \quad (3.6)$$

$$W_{222,M2}^{sph} = \frac{EPD^2 (1-m)[1-m-(m+1)\gamma] \bar{u}_{M1}^2}{64(f)^2 m} \quad (3.7)$$

$$W_{222,M2}^{asph} = -\frac{k_{M2} EPD^2 (1-m)^3 (\gamma-1)^2 \bar{u}_{M1}^2}{32(f)m^2 \gamma} \quad (3.8)$$

Teleskobun yapısal tasarım parametreleri kullanılarak 3. derece astigmatizm ve koma yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması mümkün olmaktadır. Bu hesaplamalar, enine hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak değişmezler. Bu yüzden teleskobun yapısal parametrelerinin değişmemesi koşuluyla farklı hizalama kaçıklığı durumlarında aynı yüzey dalga aberasyon katkıları ile işlem yapılabilir. Bu hesaplamalara alternatif olarak, yüzey dalga aberasyon katkıları, optik sistem paraksiyel ışın izleme verileri ve birincil derece optik nicelikleri (r , k gibi) kullanılarak da hesaplanabilir. İkinci yöntemin avantajı, optik açıklık konumundan ve yüzey sayısından bağımsız olarak rotasyonel simetrik herhangi bir sistem için uygulanabilir olmasıdır.

Yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması için öncelikle kenar ve ana ışın geliş açısı parametreleri, i ve $\bar{i}$ 'nin hesaplanması gerekmektedir. Bu kapsamda aşağıda verilen Eş. 3.9 ve Eş. 3.10 kullanılabilir.

$$i = u + \frac{y}{r} \quad (3.9)$$

$$\bar{i} = \bar{u} + \frac{\bar{y}}{r} \quad (3.10)$$

Eş 3.9'da verilen u , y ve r sırasıyla kenar ışın geliş açısı, kenar ışının yüzeydeki yüksekliği ve yüzeyin eğrilik yarıçapı olarak ifade edilir. Eş 3.10'da verilen $\bar{u}$ ve $\bar{y}$ sırasıyla, ana ışın

yüzeydeki geliş açısı ve ana ışının yüzeydeki yüksekliğidir. Yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması için, Eş. 3.11 ile verilen Lagrange değişmez ifadesi de kullanılacaktır.

$$\mathcal{K} = n\bar{u}y - nu\bar{y} \quad (3.11)$$

Eş. 3.11’de verilen n parametresi kırıcılık indisini ifade etmektedir. İlgili yüzeyden yerel objeye ve yerel görüntüye olan uzaklık surasıyla, Eş. 3.12 ve Eş. 3.13 eşitlikleri ile verilmektedir.

$$l_o = -\frac{y}{u} \quad (3.12)$$

$$l_i = -\frac{y}{u'} \quad (3.13)$$

Eş. 3.12 ve Eş. 3.13’de veriler o ve i alt indisleri, sırasıyla obje ve görüntü kavramlarını ifade etmektedir. Parametrelerin üzerindeki $'$ işareti yansıma sonrası anlamındadır. Yüzeyden yerel giriş açıklığına ve çıkış açıklığına olan uzaklık Eş. 3.14 ve Eş. 3.15 ile verilmektedir.

$$l_{EP} = -\frac{\bar{y}}{\bar{u}} \quad (3.14)$$

$$l_{XP} = -\frac{\bar{y}}{\bar{u}'} \quad (3.15)$$

Eş. 3.14 ve Eş. 3.15’de veriler EP ve XP alt indisleri, sırasıyla giriş açıklığı ve çıkış açıklığı kavramlarını ifade etmektedir. Bölüm 2.4.1’de verilen N vektörünün yönü, l_i ve l_{XP} konumları ile belirlenir. Bu yüzden hizalama kaçıklığına bağlı sigma vektörlerinin hesaplanması esnasında bu parametrelerden faydalanılacaktır.

Yukarıdaki parametreler ve eşitlikler kullanılarak yüzey dalga aberasyonlarının sferik ve asferik katkılarının hesaplanması mümkündür. 3. derece yüzey dalga aberasyon katkıları, Eş. 3.16 ve Eş. 3.17 ile verilen yüzeylerin sferik formu ile ilişkili birinci ve ikinci derece ifadeler kullanılarak elde edilecektir (Sasian, 1994).

$$S_{I,sph} = -\frac{1}{8} (ni)^2 \left(\frac{u'}{n'} - \frac{u}{n} \right) y \quad (3.16)$$

$$S_{II,sph} = -\frac{1}{4r} (\mathcal{K})^2 \left(\frac{1}{n'} - \frac{1}{n} \right) \quad (3.17)$$

Asferik bir yüzey için indüklenen, sferik temel eğriden sapma etkisi, $S_{I,asph}$ ise Eş. 3.18 ile verilmiştir.

$$S_{I,asph} = A(n' - n)y^4 + \frac{1}{8r^3} k(n' - n)y^4 \quad (3.18)$$

Eş. 3.18'de verilen A parametresi yüzey asferiklik katsayısını ifade etmektedir. Yüzey dalga aberasyon katkılarının sferik bileşenleri, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$W_{040}^{sph} = S_{I,sph} \quad (3.19)$$

$$W_{131}^{sph} = 4 \left(\frac{\bar{i}}{i} \right) S_{I,sph} \quad (3.20)$$

$$W_{222}^{sph} = 4 \left(\frac{\bar{i}}{i} \right)^2 S_{I,sph} \quad (3.21)$$

$$W_{220S}^{sph} = 2 \left(\frac{\bar{i}}{i} \right)^2 S_{I,sph} + S_{I,asph} \quad (3.22)$$

$$W_{311}^{sph} = 2 \left(\frac{\bar{i}}{i} \right)^3 S_{I,sph} + \left(\frac{\bar{i}}{i} \right) S_{I,asph} \quad (3.23)$$

Yüzey dalga aberasyon katkılarının asferik bileşenleri, aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanır.

$$W_{040}^{asph} = S_{I,asph} \quad (3.24)$$

$$W_{131}^{asph} = 4 \left(\frac{\bar{y}}{y} \right) S_{I,asph} \quad (3.25)$$

$$W_{222}^{asph} = 4 \left(\frac{\bar{y}}{y} \right)^2 S_{I,asph} \quad (3.26)$$

$$W_{220S}^{asph} = 2 \left(\frac{\bar{y}}{y} \right)^2 S_{I,asph} \quad (3.27)$$

$$W_{311}^{asph} = 4 \left(\frac{\bar{y}}{y} \right)^3 S_{I,asph} \quad (3.28)$$

Buraya kadar açıklanan kısımda, optik bileşenlere herhangi bir hizalama kaçıklığı uygulanmadığı için hizalama kaçıklığına bağlı oluşan σ_j^{sph} ve σ_j^{asph} sigma vektör katkıları mevcut değildir, dolayısıyla A_{131} , A_{222} , $B_{222,MIS}^2$ vektörlerinden de söz edilemez. Hizalı bir optik sistemin görüntü düzleminde indüklenen 3. derece koma aberasyonu ile ilişkili Z_7 (X-koma) ve Z_8 (Y-koma) terimleri, görüş alanı çok geniş olmayan sistemler için yaklaşık olarak Eş. 3.29 ve Eş. 3.30 kullanılarak farklı alan noktaları (H_x , H_y) için hesaplanabilir (Gu ve diğerleri, 2018; Schmid, 2010). Seidel aberasyonları ve ilgili FZC terimleri arasındaki tam ilişki genellikle sonsuz bir toplamdır. Ancak, çoğu iki ve üç aynalı sistemde, tipik görüş alanları için daha yüksek dereceli aberasyonlar ihmal edilebilir boyuttadır. Bu sebeple, bahsedilen ilişki aşağıda verilen basit formu almıştır. Geniş görüş alanına sahip sistemler için aşağıda verilen ifadeler, daha yüksek dereceli aberasyonları da kapsayacak şekilde revize edilmelidir (Schmid, 2010; Tyson, 1982).

$$3Z_7 = W_{131}H_x \quad (3.29)$$

$$3Z_8 = W_{131}H_y \quad (3.30)$$

Eğer tasarlanan sistem RC tipi bir teleskop ise sistem seviyesi 3. derece koma aberasyonu ($W_{131} = 0$) sıfır olduğu için Z_7 ve Z_8 terimleri de teleskobun hizalı durumu için alan boyunca sıfır olacaktır.

Benzer şekilde, 3. derece astigmatizm ile ilişkili FZC'ler, Z_5 (astigmatizm $0^\circ/90^\circ$) ve Z_6 (astigmatizm $\pm 45^\circ$) da farklı alan noktaları (H_x , H_y) için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

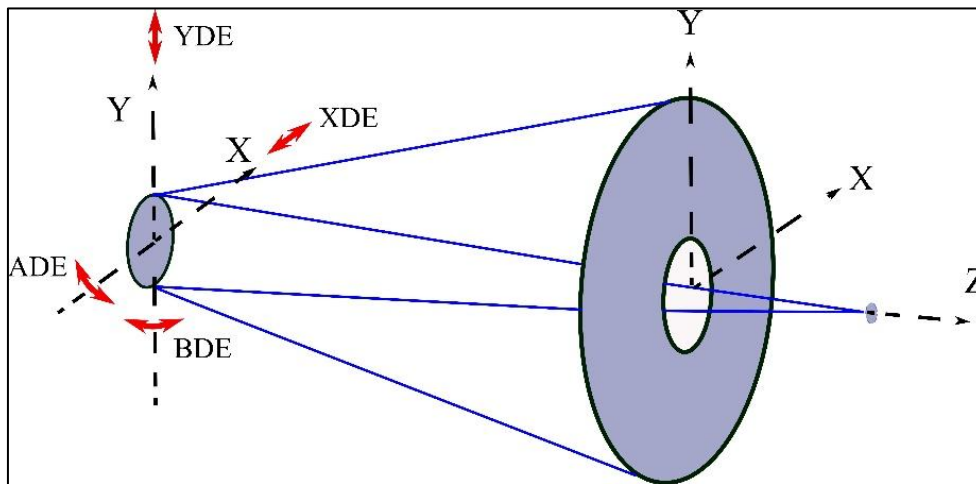
$$Z_5 = \frac{W_{222}}{2} (H_x^2 - H_y^2) + \frac{B_{222,FIG,x}^2}{2} \quad (3.31)$$

$$Z_6 = W_{222} H_x H_y + \frac{B_{222,FIG,y}^2}{2} \quad (3.32)$$

Burada, $B_{222,FIG}^2$ ifadesi, birincil ayna yüzey form hatasından kaynaklanan terimdir ve hizalama kaçıklığı etkisini içermemektedir. $B_{222,FIG}^2$ terimi, Eş. (2.94) ile verilen matematiksel ifade kullanılarak hesaplanabilir. Buraya kadar anlatılan kısımda iki aynalı teleskoplar özelinde hizalama kaçıklığından bağımsız olan yüzey dalga aberasyon katsayılarının hesaplanması ve hizalı durum için bu katkıların FZC terimleri ile ilişkisi detaylandırılmıştır.

3.1.2. İki aynalı eksenel simetrik teleskoplarda hizalama kaçıklığı analizi

Bu kısımda, iki aynalı bir teleskop sisteminin ikincil aynasına hizalama kaçıklıkları uygulandığı durumda, tetiklenen parametrelerin yol açtığı teleskobun aberasyon davranışındaki değişimler gözlenecektir. Hizalama kaçıklıklarının yönleri ve tiplerini tanımlamakta kullanılacak şematik gösterim (Şekil 3.2) ve açıklamaları aşağıda belirtilmiştir. Hizalama kaçıklıklarının işaretleri, sağ el koordinat sistemine göre belirlenmiştir.



Şekil 3.2. İkincil ayna hizalama kaçıklıkları yönlerinin şematik gösterimi

XDE_{M2} : X ekseninde doğrusal yer değiştirme

YDE_{M2} : Y ekseninde doğrusal yer değiştirme

ADE_{M2} : X ekseninde eğilme.

BDE_{M2} : Y ekseninde eğilme

Teleskobun ikincil aynasına uygulanan hizalama kaçıklıkları, bu ayna için aberasyon alan bağımlılığını, Bölüm 2’de detaylandırıldığı üzere değiştirecektir. Teleskop ikincil aynasının rotasyon simetri merkezinin görüntü düzlemindeki yer değiştirmesi $\sigma_{M2,x}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,x}^{asph}$ vektörleri ile tanımlanır. Sigma vektörleri, teleskobun yapısal parametreleri ve uygulanan hizalama kaçıklığı miktarlarının birlikte ile Eş.(3.33), Eş.(3.34), Eş.(3.35) ve Eş.(3.36)’de yerine koyulması ile hesaplanır.

$$\sigma_{M2,x}^{sph} = -\frac{XDE_{M2} - BDE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (3.33)$$

$$\sigma_{M2,y}^{sph} = -\frac{YDE_{M2} + ADE_{M2}r_{M2}}{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})} \quad (3.34)$$

$$\sigma_{M2,x}^{asph} = -\frac{XDE_{M2}}{d_1\bar{u}_{M1}} \quad (3.35)$$

$$\sigma_{M2,y}^{asph} = -\frac{YDE_{A2}}{d_1\bar{u}_{M1}} \quad (3.36)$$

Burada, d_1 , $\bar{u}_{M1}$ ve r_{M2} , teleskobun yapısal tasarım parametreleridir ve hali hazırda bilinmektedir. Teleskobun ikincil aynasına uygulanan hizalama kaçıklıkları kullanılarak $\sigma_{M2,x,y}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,x,y}^{asph}$ parametreleri, kolaylıkla hesaplanabilir. Yapısal parametreler ile hizalama kaçıklıkları arasındaki ilişki, teleskobun ikincil aynasının bilinmeyen bir hizalama kaçıklığına sahip olması durumunda, ifadelerin hizalama kaçıklığı parametreleri için çözülmesi ile hesaplanabilir. Sigma vektörlerini, optik tasarım programında yaratılan bir simülasyon üzerinden hesaplayabilmek için gerçek ışın izleme verileri kullanılabilir. Bu yöntemin uygulanışı, Bölüm 2.4.1’de detaylandırılmıştır. Bu yöntemde, izlenen ışın OAR ışınıdır ve bu ışın N , R ve S birim vektörleri kullanılarak tanımlanır. Hesaplama için gerekli parametreler verilen birim vektörlerin yön kosinüsleri ve ilgili yüzeyin asferik tepe noktasının OAR’dan ölçülen mesafesini ifade eden δv^* parametreleridir. Bu parametrelere

ek olarak, paraksial nicelikler de sigma vektörünü görüntü düzlemine normalize etmek için kullanılacaktır. N , R ve S birim vektörlerinin yön kosinüsleri sırasıyla (X, Y, Z) , (L, M, N) ve (SRN, SRN, SRM) ile ifade edilir ve bu değerler optik tasarım programının gerçek ışın izleme özelliği kullanılarak kolayca elde edilebilir. N vektörü, yön kosinüsleri genellikle $(0,0,-1)$ olarak alınmak ile birlikte 1'in işareti, l_i konumundan ve l_{XP} konumuna çizilen vektör konumu ile belirlenir. İki aynalı bir teleskop sisteminde, ikincil ayna sigma vektörlerinin hesaplanabilmesi için öncelikle gerçek ışın izleme verileri tasarımdan çıkarılır ve $-N_{M2} \times (R_{M2} \times S_{M2})$ değeri hesaplanır.

N_{M2} nominal sistem birim vektörü için yön kosinüslerinin, $(0, 0, -1)$ olduğu varsayıldığında, $-N_{M2} \times (R_{M2} \times S_{M2})$ ifadesi, aşağıda verilen şekilde hesaplanır (Eş. 3.37) ve $\overline{i_{M2}}$ paraksial parametresi yardımı ile normalize edilir (Bkz. Eş. 2.25). Böylelikle, ikincil aynanın sferik sigma vektör katkısı bileşenleri elde edilir.

$$-N_{M2} \times (R_{M2} \times S_{M2}) = -(L.SRN - N.SRL)X + (N.SRM - M.SRN)Y \quad (3.37)$$

İkincil ayna asferik sigma vektör katkısının elde edilebilmesi için ise gerçek ışın izleme verilerinden elde edilen δv_x^* ve δv_y^* değerleri kullanılır ve bu değerler, $\overline{y_{M2}}$ paraksial parametresi kullanılarak normalize edilir. Böylelikle, asferik sigma vektör katkısının vektör bileşenleri elde edilir (Eş. 3.38).

$$\sigma_{M2}^{asph} = \frac{\delta v_x^* + \delta v_y^*}{\overline{y_{M2}}} \quad (3.38)$$

Bu yöntem, optik açıklık yüzeyinin konumu ve optik sistemdeki yüzey sayısından bağımsızdır ve rotasyonel simetrik herhangi bir sistem için uygulanabilir.

Eşitlik 2.37 ve Eş. 2.63'de verildiği gibi, optik bileşenlerin hizalama kaçıklığı durumunda, tetiklenen sigma vektör katkılarına bağlı olarak nominal sistem aberasyon terimlerine ilave, yeni terimler eklenir. Bahse konu, A_{131} , A_{222} ve B_{222}^2 terimleri, hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları ve sigma vektör bileşenleri kullanılarak kolayca hesaplanabilir. Hizalama kaçıklığına sahip bir sistemde, genel durumda, alışlagelmemiş aberasyon sıfır noktaları gözlenir. 3. derece koma aberasyon sıfır noktası a_{131} vektörünün bitiş noktasında, 3. derece astigmatizm aberasyon sıfır noktaları ise $(a_{222} \pm ib_{222})$ vektörlerinin bitiş

noktalarında oluşur. Söz konusu aberasyon sıfır noktaları, Eş. (2.41) ve Eş. (2.69) kullanılarak kolayca hesaplanabilmektedir. $a_{131}, a_{222}, b_{222}^2$ normalize vektörlerinin yüzey dalga aberasyon katkıları ve sigma vektörler kullanılarak nasıl hesaplanacağı, sırasıyla Eş. 2.41, Eş. 2.69 ve Eş.2.70 ile verilmiştir. Aberasyon sıfır noktalarının belirlenmesi dışında, aberasyon alan vektörleri kullanılarak herhangi bir alan noktasında gözlenmesi beklenen 3. derece astigmatizm ve koma ile ilişkili Z_5, Z_6, Z_7 ve Z_8 terimleri de Eş. 3.39, Eş. 3.40, Eş. 3.41 ve Eş. 3.42 yardımıyla hesaplanabilir.

$$Z_5 = \frac{W_{222}}{2} (H_x^2 - H_y^2) - H_x A_{222,y} + H_y A_{222,x} + \frac{B_{222,x}^2}{2} \quad (3.39)$$

$$Z_6 = W_{222} H_x H_y - H_x A_{222,y} - H_y A_{222,x} + \frac{B_{222,y}^2}{2} \quad (3.40)$$

$$3Z_7 = W_{131} H_x - A_{131,x} \quad (3.41)$$

$$3Z_8 = W_{131} H_y - A_{131,y} \quad (3.42)$$

Hizalama kaçıklığına sahip teleskop sistemi, 3. derece koma aberasyonu için düzeltme sağlayan RC tipinde yapılandırılmışsa, Eş. 3.41 ve Eş. 3.42 ifadelerinde yer alan W_{131} ifadesi, sıfır olarak işleme alınır ve görüntü düzleminde indüklenen alan vektöründen bağımsız, alan boyunca sabit FZC olacak terimlerinin büyüklüğü ve yönü Eş. 3.41 ve Eş. 3.42 kullanılarak hesaplanır.

Burada, ikincil ayna hizalama kaçıklığı durumu incelendiği için $H_x \neq H_x^*$ ve $H_y \neq H_y^*$ olduğuna dikkat edilmelidir (Bkz. Şekil 2.14). İkincil ayna hizalama kaçıklığının sebep olduğu optik eksen sapması, normalize alan koordinatlarına göre Eş. 3.43 kullanılarak hesaplanabilir. Bu kısım, Bölüm 4.1’de detaylandırılacaktır.

$$H_{IMG}^{AR} = \frac{2L}{\bar{y}_{IMG}} \begin{pmatrix} -BDE_{M2} + c_{M2}XDE_{M2} \\ +ADE_{M2} + c_{M2}YDE_{M2} \end{pmatrix} \quad (3.43)$$

Eş. 3.43’te, L ikincil aynadan paraksiyal görüntü düzlemine uzaklık, $\bar{y}_{IMG}$ görüntü düzlemindeki paraksiyal ana ışın yüksekliği, c_{M2} ikincil ayna eğriliğidir.

Bu bölümde, tasarım parametreleri bilinen, iki aynalı bir teleskop sistemine belirli bir miktar hizalama kaçıklığı uygulandığında, oluşan aberasyon sıfır noktalarının konumlarının nasıl belirleneceği ve görüntü düzleminde indüklenen FZC terimlerinin nasıl hesaplanacağı detaylandırılmıştır. Teleskop ikincil aynasında bilinmeyen bir hizalama kaçıklığı konfigürasyonu mevcutsa, burada verilen akış tersinir olarak uygulanarak teleskop ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklıkları değerleri hesaplanabilir.

3.2. Üç Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Aberasyon Analizi

Bu bölümde eksenel simetriye sahip TMA tipi üç aynalı teleskop sistemlerindeki aberasyon durumu ele alınacaktır.

3.2.1. Üç aynalı eksenel simetrik teleskopların yüzey dalga aberasyon katkılarının hesaplanması

Bu çalışma kapsamında incelenecek üç aynalı teleskoplarda birincil ayna optik açıklık olarak seçilmiş ve hizalama kaçıklıkları ikincil aynaya hareket verilerek uygulanmıştır. TMA tipi bir teleskopta da aberasyon analizini doğru şekilde gerçekleştirebilmek için ilk koşul, teleskopların Bölüm 2’de verilen kurallara uygun olarak tasarlanmasıdır. Bu çalışma kapsamında, TMA tipi teleskopların ikincil aynasının enine (X ve Y eksenindeki yer değiştirmeler) hizalama kaçıklıkları ile ilgilendiğimiz için alan bağımlılığı olan ve FZC terimleri ile direk ilişkilendirilebilen 3. derece astigmatizm ve koma sistem seviyesi aberasyonlarının hesaplanması yeterlidir. Hizalama kaçıklıkları ikincil aynaya verilen hareketler ile sağlanacağı ve bu tip teleskoplar, 3. derece aberasyonlar için düzeltilmiş olduğu için, birincil ayna yüzey dalga aberasyon katkısının hesaplanmasına gerek yoktur. İkincil ve üçüncül ayna için 3. derece siferik ve asiferik koma yüzey dalga aberasyon katkıları, Eş. 3.44, Eş. 3.45, Eş. 3.46 ve Eş. 3.47 kullanılarak gerçekleştirilebilir.

$$W_{131,M2}^{sph} = \frac{\bar{u}_{M1} y_{M1}^3 (d_1 + r_2)(2d_1 - r_1)^2 (2d_1 - r_1 + 2r_2)}{r_1^3 r_2^3} \quad (3.44)$$

$$W_{131,M2}^{asph} = \frac{\bar{u}_{M1} y_{M1}^3 k_2 d_1 (2d_1 - r_1)^3}{r_1^3 r_2^3} \quad (3.45)$$

$$W_{131,M3}^{sph} = \frac{\bar{u}_{M1} y_{M1}^3 (2d_1 d_2 - d_1 r_2 + 2d_1 r_3 + d_2 r_2 + r_2 r_3) (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^2}{r_1^3 r_2^4 r_3^3} \quad (3.46)$$

$$W_{131,M3}^{asph} = \frac{\bar{u}_{M1} y_{M1}^3 k_3 (2d_1 d_2 - d_1 r_2 + 2d_1 r_3 + d_2 r_2 + r_2 r_3) (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^3}{r_1^3 r_2^4 r_3^3} \quad (3.47)$$

Benzer şekilde, ikincil ve üçüncül ayna için 3. derece astigmatizm yüzey dalga aberasyon katkıları, Eş. 3.48, Eş. 3.49, Eş. 3.50 ve Eş. 3.51 ile verilmiştir.

$$W_{222,M2}^{sph} = \frac{\bar{u}_{M1}^2 y_{M1}^2 (d_1 + r_2)^2 (2d_1 - r_1)^2}{r_1^2 r_2^3} \quad (3.48)$$

$$W_{222,M2}^{asph} = \frac{\bar{u}_{M1}^2 d_1^2 k_2 y_{M1} \left(\frac{1-2d_1}{r_1} \right)^2}{r_1^3 r_2^3} \quad (3.49)$$

$$W_{222,M3}^{sph} = - \frac{\bar{u}_{M1}^2 y_{M1}^2 (2d_1 d_2 - d_1 r_2 + 2d_1 r_3 + d_2 r_2 + r_2 r_3)^2 (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^2}{r_1^2 r_2^4 r_3^3} \quad (3.50)$$

$$W_{222,M3}^{asph} = - \frac{\bar{u}_{M1}^2 y_{M1}^2 k_3 (2d_1 d_2 - d_1 r_2 + d_2 r_2 + r_2 r_3)^2 (4d_1 d_2 - 2d_1 r_2 - 2d_2 r_1 + 2d_2 r_2 + r_1 r_2)^2}{r_1^3 r_2^4 r_3^3} \quad (3.51)$$

Alternatif olarak, Bölüm 3.1.1’de verilen paraksiyel ışın izleme verileri kullanılarak yüzey dalga aberasyon katsayılarının hesaplanması işlemi, burada da aynı şekilde uygulanabilir. Hızalı bir TMA teleskobun görüntü düzleminde indüklenen 3. derece koma aberasyonu ile ilişkili Z_7 (X koma) ve Z_8 (Y koma) terimleri, $W_{131} = 0$ durumundan dolayı sıfır olmalıdır. Benzer şekilde, 3. derece astigmatizm ile ilişkili Zernike Fringe terimleri Z_5 (astigmatizm $0^\circ/90^\circ$) ve Z_6 (astigmatizm $\pm 45^\circ$) terimleri de $W_{222} = 0$ durumu dolayısıyla sıfırdır. Birincil aynada astigmatizm yüzey form hatasının olması durumunda ise Z_5 ve Z_6 terimleri aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir (Schmid, 2010; Schmid ve diğerleri, 2010).

$$Z_5 = \frac{B_{222,FIG,x}^2}{2} \quad (3.52)$$

$$Z_6 = \frac{B_{222,FIG,y}^2}{2} \quad (3.53)$$

Bu kısımda, TMA teleskop sistemi özelinde hizalama kaçıklığından bağımsız olan yüzey dalga aberasyon katkılarının nasıl hesaplanacağı ve sadece birincil ayna astigmatik yüzey form hatası varlığında görüntü düzlemi merkezinde ölçülmesi beklenen astigmatizm terimlerinin nasıl hesaplanacağı hususu detaylandırılmıştır.

3.2.2. Üç aynalı aksenal simetrik teleskoplarda hizalama kaçıklığı analizi

Bu bölümde, TMA tipi bir teleskopa hizalama kaçıklıkları uygulanması durumunda indüklenen parametreler ile birlikte teleskobun aberasyon davranışındaki değişimler gözlenecektir. Hizalama kaçıklıklarının yön ve tipleri ile ilgili açıklama aşağıda verilmiştir.

İkincil ayna:

XDE_{M2} : İkincil ayna X eksen yönünde doğrusal yer değiştirme

YDE_{M2} : İkincil ayna Y eksen yönünde doğrusal yer değiştirme

ADE_{M2} : İkincil ayna X eksen etrafında eğilme.

BDE_{M2} : İkincil ayna Y eksen etrafında eğilme

Üçüncül ayna:

XDE_{M3} : Üçüncül ayna X eksen yönünde doğrusal yer değiştirme

YDE_{M3} : Üçüncül ayna Y eksen yönünde doğrusal yer değiştirme

ADE_{M3} : Üçüncül ayna X eksen etrafında eğilme.

BDE_{M3} : Üçüncül ayna Y eksen etrafında eğilme

Teleskobun ikincil ve üçüncül aynalarına hizalama kaçıklıkları uygulandığı durumda, ikincil ve üçüncül ayna için $\sigma_{M2/M3}^{sph}$ ve $\sigma_{M2/M3}^{asph}$ sigma vektör katkıları doğal olarak indüklenenecektir. Ancak, üçüncül ayna kusursuz şekilde hizalanmışsa bile ikinci ayna hizalama kaçıklığına bağlı indüklenen sigma vektörlerden dolayı üçüncül ayna sigma vektör

katkıları sıfırdan farklı olacaktır (Örn. $\sigma_{M3}^{sph(int.)} = \sigma_{M3}^{sph(int.)} + \sigma_{M3}^{sph(tran.)}$ gibi). Burada *int* ifadesi yüzeyin kendinden kaynaklanan, *tran* ifadesi ise önceki yüzeyden transfer edilen anlamındadır. İkincil ayna sistemdeki ilk hizalama kaçıklığına sahip yüzey olduğu için ikincil ayna sigma vektörünün toplamı $\sigma_{M2}^{(int.)}$ 'dir. Önceki yüzeyden transfer edilen bir kısım içermez. Üçüncül aynanın birincil aynaya göre ölçülen fabrikasyon ve montajdan kaynaklı hizalama kaçıklıkları, üçüncül aynanın yüzeyinden gelen sigma vektörüne eklenebilir (Schmid, 2010). Bu çalışma esnasında üçüncül aynaya hizalama kaçıklığı uygulanmamış olduğundan, üçüncül ayna sigma vektörlerinin sadece ikincil ayna hizalama kaçıklıklarından etkilenen kısmı yani $\sigma_{M3}^{sph(tran.)}$ kısmı indüklenecektir.

Teleskobun ikincil aynasına ait hizalama kaçıklığına bağlı sigma vektör katkılarının teleskobun yapısal tasarım parametreleri ve hizalama kaçıklıkları ile ilişkisi aşağıda ifade edilmektedir (Schmid, 2010).

$$\sigma_{M2,x}^{sph} = \frac{BDE_{M2} - \frac{XDE_{M2}}{r_2}}{\bar{u}_{M1} \left(1 + \frac{d_1}{r_2}\right)} \quad (3.54)$$

$$\sigma_{M2,y}^{sph} = -\frac{ADE_{M2} + \frac{YDE_{M2}}{r_2}}{\bar{u}_{M1} \left(1 + \frac{d_1}{r_2}\right)} \quad (3.55)$$

$$\sigma_{M2,x}^{asph} = -\frac{XDE_{M2}}{d_1 \bar{u}_{M1}} \quad (3.56)$$

$$\sigma_{M2,y}^{asph} = -\frac{YDE_{M2}}{d_1 \bar{u}_{M1}} \quad (3.57)$$

Teleskobun üçüncül aynasına ait hizalama kaçıklığına bağlı sigma vektör katkılarının teleskobun yapısal parametreleri ve hizalama kaçıklıkları ile ilişkisi aşağıda ifade edilmektedir (Schmid, 2010; Wang ve diğerleri, 2022).

$$\sigma_{M3,x}^{sph} = -\frac{2(d_2 + r_3)XDE_{M2} - r_2XDE_{M3} - 2r_2\left(\frac{d_2}{2} + r_3\right)BDE_{M3} + r_2r_3BDE_{M3}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + 2d_1r_3 + d_2r_2 + r_2r_3)} \quad (3.58)$$

$$\sigma_{M3,y}^{sph} = -\frac{2(d_2 + r_3)YDE_{M2} - r_2YDE_{M3} + 2r_2\left(\frac{d_2}{2} + r_3\right)ADE_{M2} - r_2r_3ADE_{M3}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + 2d_1r_3 + d_2r_2 + r_2r_3)} \quad (3.59)$$

$$\sigma_{M3,x}^{asph} = \frac{r_2XDE_{M3} - 2d_2XDE_{M2} + 2d_2r_2BDE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)} \quad (3.60)$$

$$\sigma_{M3,y}^{asph} = \frac{r_2YDE_{M3} - 2d_2YDE_{M2} - 2d_2r_2ADE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)} \quad (3.61)$$

Hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen A_{131} , A_{222} ve B_{222}^2 terimleri, bir önceki bölümde hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları ve yukarıda verilen sigma vektörleri kullanılarak aşağıda verildiği şekilde hesaplanabilir (Schmid, 2010).

$$A_{131,x} = W_{131,M2}^{sph}\sigma_{M2,x}^{sph} + W_{131,M2}^{asph}\sigma_{M2,x}^{asph} + W_{131,M3}^{sph}\sigma_{M3,x}^{sph} + W_{131,M3}^{asph}\sigma_{M3,x}^{asph} \quad (3.62)$$

$$A_{131,y} = W_{131,M2}^{sph}\sigma_{M2,y}^{sph} + W_{131,M2}^{asph}\sigma_{M2,y}^{asph} + W_{131,M3}^{sph}\sigma_{M3,y}^{sph} + W_{131,M3}^{asph}\sigma_{M3,y}^{asph} \quad (3.63)$$

$$A_{222,x} = W_{222,M2}^{sph}\sigma_{M2,x}^{sph} + W_{222,M2}^{asph}\sigma_{M2,x}^{asph} + W_{222,M3}^{sph}\sigma_{M3,x}^{sph} + W_{222,M3}^{asph}\sigma_{M3,x}^{asph} \quad (3.64)$$

$$A_{222,y} = W_{222,M2}^{sph}\sigma_{M2,y}^{sph} + W_{222,M2}^{asph}\sigma_{M2,y}^{asph} + W_{222,M3}^{sph}\sigma_{M3,y}^{sph} + W_{222,M3}^{asph}\sigma_{M3,y}^{asph} \quad (3.65)$$

$$B_{222,x}^2 = W_{222,M2}^{sph}\sigma_{M2,x}^{sph^2} + W_{222,M2}^{asph}\sigma_{M2,x}^{asph^2} + W_{222,M3}^{sph}\sigma_{M3,x}^{sph^2} + W_{222,M3}^{asph}\sigma_{M3,x}^{asph^2} \quad (3.66)$$

$$B_{222,y}^2 = W_{222,M2}^{sph}\sigma_{M2,y}^{sph^2} + W_{222,M2}^{asph}\sigma_{M2,y}^{asph^2} + W_{222,M3}^{sph}\sigma_{M3,y}^{sph^2} + W_{222,M3}^{asph}\sigma_{M3,y}^{asph^2} \quad (3.67)$$

Bir sonraki adım olarak, yukarıda hesaplanan A_{131} , $A_{222,x}$ ve B_{222}^2 vektörleri kullanılarak, Z_5 , Z_6 , Z_7 ve Z_8 terimleri aşağıda verilen şekilde hesaplanabilir.

$$3Z_7 = -A_{131,x} \quad (3.68)$$

$$3Z_8 = -A_{131,y} \quad (3.69)$$

$$Z_5 = (-H_x A_{222,x} + H_y A_{222,y}) + \frac{B_{222,x}^2}{2} \quad (3.70)$$

$$Z_6 = (-H_x A_{222,y} - H_y A_{222,x}) + \frac{B_{222,y}^2}{2} \quad (3.71)$$

TMA tipi teleskopların hizalama kaçıklığına tepkisi, 3. derece koma aberasyon sıfır noktasının merkeze göre yer değiştirmesi ya da görüntü düzleminde iki farklı astigmatizm sıfır noktasının ortaya çıkması şeklinde değildir. Hizama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan 3. derece koma aberasyonu için görüntü düzleminde sabit koma terimleri indüklenir. 3. derece astigmatizm için ise alan-sabit ve alan-lineer astigmatizm terimleri indüklenir. 3. derece astigmatizm aberasyonunun alan içinde dağılımı, ise alan-asimetrik olarak adlandırılan karakteristik bir dağılım göstermektedir. Bu özel durum, Bölüm 2’de detaylandırılmıştır.

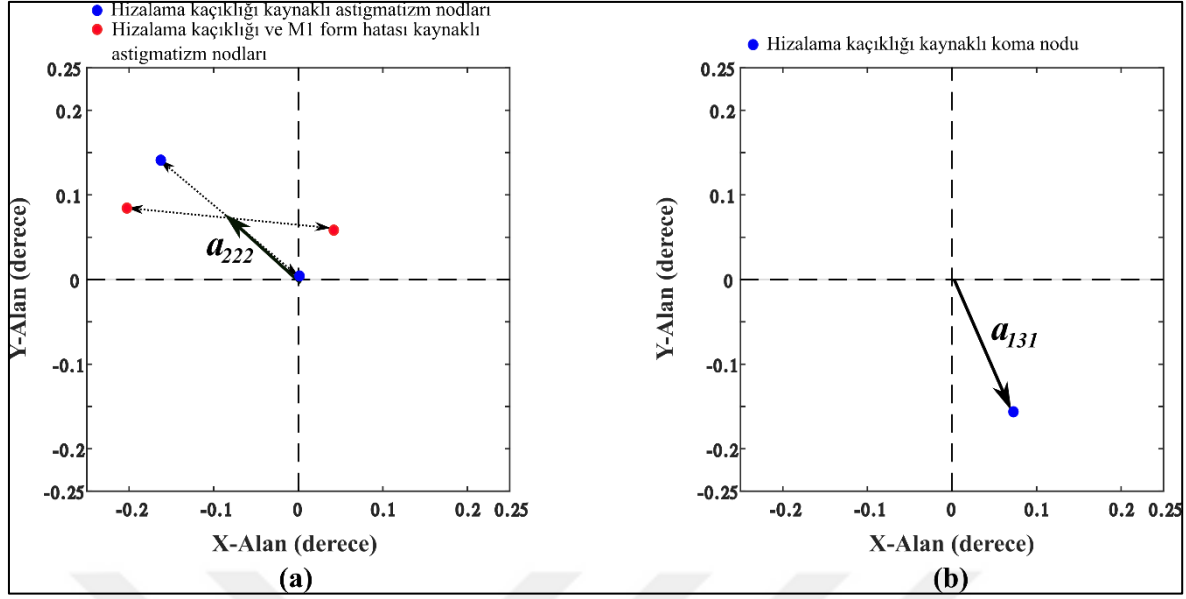


4. NODAL ABERASYON TEORİSİ TABANLI HIZALAMA YAKLAŞIMI

Bu bölümde, eksenel simetriye sahip iki veya üç aynalı bir teleskobun yapısal tasarım parametreleri ve interferometrik ölçüm sonuçları kullanılarak, söz konusu teleskobun ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklarının nasıl hesaplanabileceği detaylandırılacaktır. Temelde, eksenel simetriye sahip bir teleskobun bileşenlerindeki hizalama kaçıklığı miktarlarının belirlenebilmesi için ilk adım, teleskobun yapısal parametrelerinin doğru olarak bilinmesidir. Bu kapsamda aynalar arası mesafe hassas şekilde ölçülebilir ve aynalara ait eğrilik yarıçapı, konik katsayısı gibi değerler için de ayna üretimleri sonrası yapılan ölçüm sonuçları, hesaplamaların daha gerçekçi olması için kullanılabilir. Teleskop aynalarının yüzey dalga aberasyon katkıları, bu belirtilen parametreler kullanılarak hesaplanır. Hizalama kaçıklıklarının hesaplanabilmesi için kullanılacak ikinci girdi ise görüntü düzleminden alınan interferometrik ölçümler sonucu hesaplanan FZC terimlerinin doğru analiz edilmesidir.

4.1. İki Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Hizalama Yaklaşımı

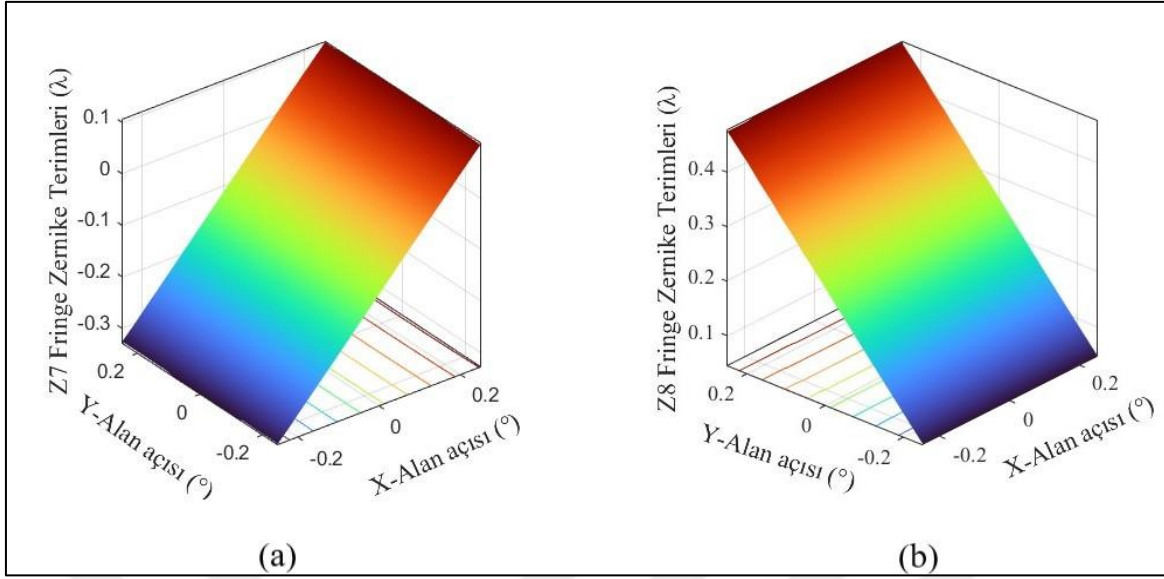
Bu bölümde yukarıda adımları genel hatlarıyla tarif edilen hizalama kaçıklığı hesaplama yaklaşımı, iki aynalı teleskoplar özelinde kapsamlı bir şekilde ele alınacaktır. İki aynalı teleskopların aberasyon düzeltme kapasitesi, Bölüm 2.3.1’de detaylandırılmıştır. İki aynalı teleskopların 3. derece küresel aberasyon ve/veya koma aberasyonunu düzeltebilen farklı varyantları mevcuttur. Ancak, iki asferik ayna kullanılarak üçüncü bir aberasyon olan 3. derece astigmatizm aberasyonu düzeltilemez. Genel durumda, yani sistem seviyesi 3. derece koma ve/veya astigmatizm aberasyonlarının kalıntı aberasyon olarak sistemde yer alması durumunda, hizalama işlemi daha karmaşık bir hal alır. Bu yüzden hizalama prosesinin, teleskobun nominal aberasyon özellikleri dikkate alınarak çalışılan sisteme özgü şekilde planlanması gerekmektedir. Örneğin, hizalama kaçıklığı durumunda, Cassegrain tipindeki bir teleskop sisteminde, görüntü düzleminde hizalama kaçıklığına bağlı olarak, yer değiştirmiş bir 3. derece koma sıfır noktası ve iki adet 3. derece astigmatizm sıfır noktası gözlenmektedir. Bahse konu nodal görünüm interferometrik alan ölçümü esnasında karakterize edilebilir. Aberasyon sıfır noktalarının alan içinde nasıl konumlanabildiği ile ilgili örnek gösterim Şekil 4.1’de sunulmuştur.



Şekil 4.1. a) Astigmatizm nodlarının hizalama kaçıklığı, hizalama kaçıklığı ve birincil ayna form hatasına bağlı oluşumu, b) koma nodunun hizalama kaçıklığına bağlı oluşumu

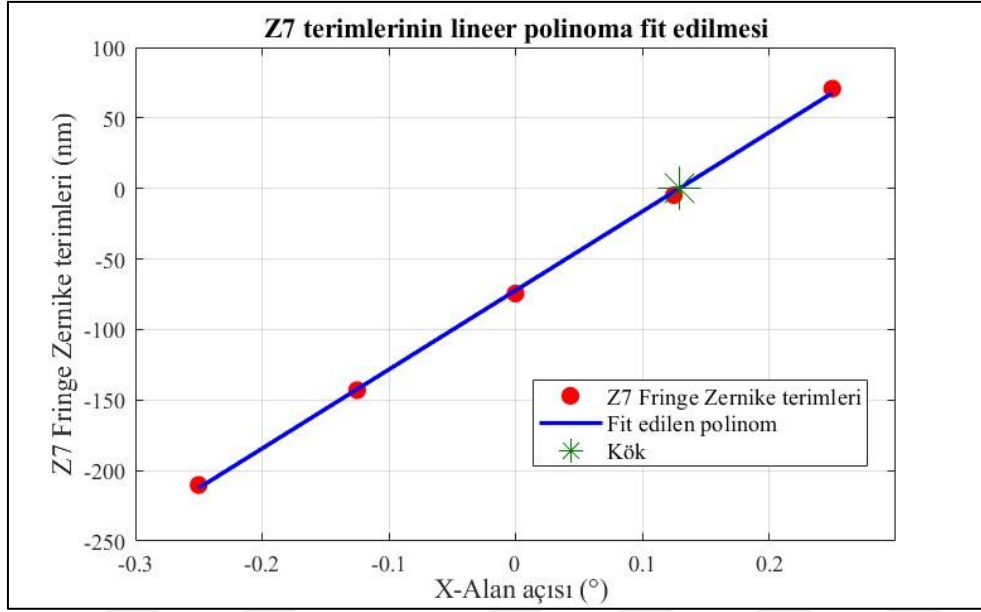
RC tipi teleskoplarda, hizalama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan 3. derece koma sıfır noktasındaki Şekil 4.1b’de gösterilen merkezden kayma durumu gözlenmez, ancak, 3. derece astigmatizm aberasyonu davranışı, Şekil 4.1a’da görüldüğü, iki astigmatizm sıfır noktası tetikleme eğilimindedir.

Genel durum ele alındığında, hizalama kaçıklıklarının hesaplanabilmesi için öncelikle 3. derece koma ve astigmatizm aberasyonları ile ilişkili aberasyon alan vektörlerinin X ve Y bileşenlerinin hesaplanması gerekir. Bu işlem, görüntü düzleminden interferometrik ölçümler sonucu elde edilen FZC terimlerinin analiz edilmesi ile mümkün olmaktadır. 3. derece koma aberasyonu ile ilişkili a_{131} vektörünün X ve Y bileşenlerinin hesaplanabilmesi için Z_7 ve Z_8 FZC terimleri lineer polinomlara fit edilir. Fit edilecek polinomun lineer olması, 3. derece koma aberasyonunun sırasıyla H_x ve H_y eksenlerine lineer olarak bağlı olması ($W_{131}H$) sebebiyledir. Hizalama kaçıklığı durumunda tetiklenen A_{131} alan sabit terimi, 3. derece koma aberasyonunun alan vektörüne lineer bağlı olma durumunu değiştirmez ancak alan içindeki bu dağılımın merkez noktasını değiştirir (Bkz. Eş. 2.38). Bu sebeple, merkez noktasındaki kayma miktarı, her iki eksen için ayrı ayrı yapılacak analizler ile belirlenebilir. Z_7 ve Z_8 terimlerin alan içerisindeki dağılımı üç boyutlu olarak Şekil 4.2’de verilmiştir.



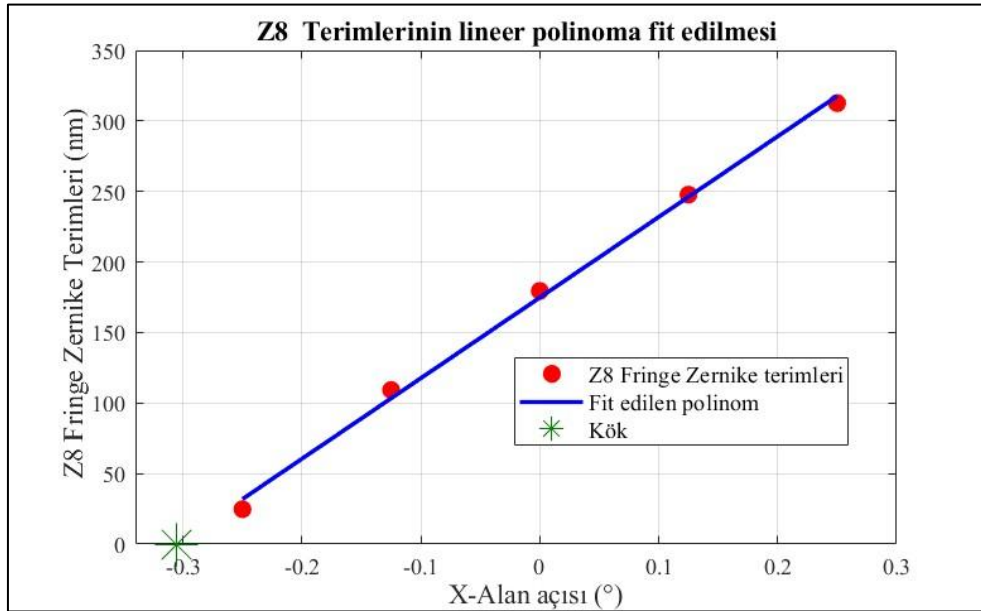
Şekil 4.2. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu için görüntü düzleminde a) Z_7 ve b) Z_8 FZC terimlerinin alan içinde dağılımı

Şekil 4.2’de verilen görüntü düzleminin tamamından alınan Z_7 terimleri her satır için H_x eksenini aynı noktada kesmektedir. Benzer şekilde Z_8 terimleri de her sütunu için H_y eksenini aynı noktada kesmektedir. Bu sebeple görüntü düzleminde satır ve sütun şeklinde alınan data serileri a_{131} vektörünün hesaplanmasında kullanılabilir. Bu şekilde, Z_7 terimlerinin H_x eksen koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi ile elde edilen, fit polinomunun kök değeri, a_{131} vektörünün X bileşenini vermektedir. Örnek gösterim, Şekil 4.3’de verilmiştir. Burada, beş adet alan noktasından alınan Z_7 terimlerinin H_x eksenine göre lineer olarak fit edilmesi ve fit işlemi sonucu bulunan kök değeri grafiksel olarak gösterilmektedir. Kök değerinin, görüntü düzlemi merkezinden X eksenine göre uzaklığı, a_{131} vektörünün X bileşenini verir. Burada dikkat edilmesi gereken husus, bulunan değer eğer burada örneklendiği gibi alan aç koordinatlarına göre hesaplanmış ise vektör bileşenlerinin normalize alan koordinatlarına göre yeniden boyutlandırılması gerekliliğidir.



Şekil 4.3. Görüntü düzleminden elde edilen Z_7 terimlerinin X alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi

Benzer şekilde, fit işlemi, Z_8 terimleri ve H_y eksen koordinatları dikkate alınarak tekrarlanırsa a_{131} vektörünün Y bileşeni elde edilir (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Görüntü düzleminden elde edilen Z_8 terimlerinin Y alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi

Yukarıda detayları verilen işlemin ardından elde edilen $a_{131,x}$ ve $a_{131,y}$ vektör bileşenleri, Eş. 2.41'de yerine koyulur ve söz konusu eşitliğin sadece sigma vektör değişkenlerine bağlı

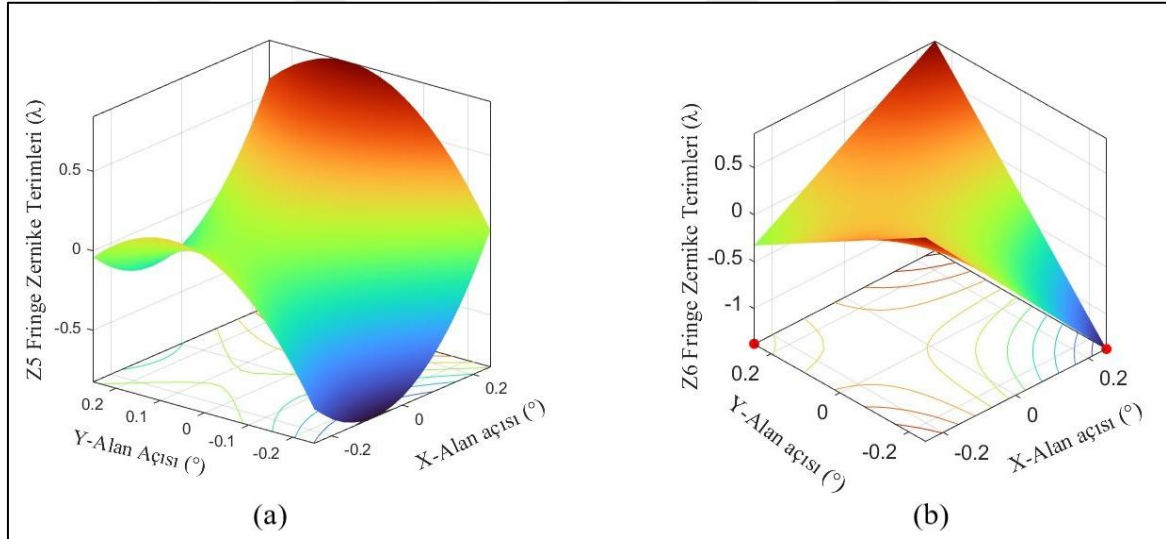
olan versiyonu elde edilir. Eş 2.41 aşağıda gösterildiği şekilde, $a_{131,x}$ ve $a_{131,y}$ vektör bileşenleri için ayrı ayrı elde edilir.

$$a_{131,x} = \frac{W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2,x}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2,x}^{asph}}{W_{131}} \quad (4.1)$$

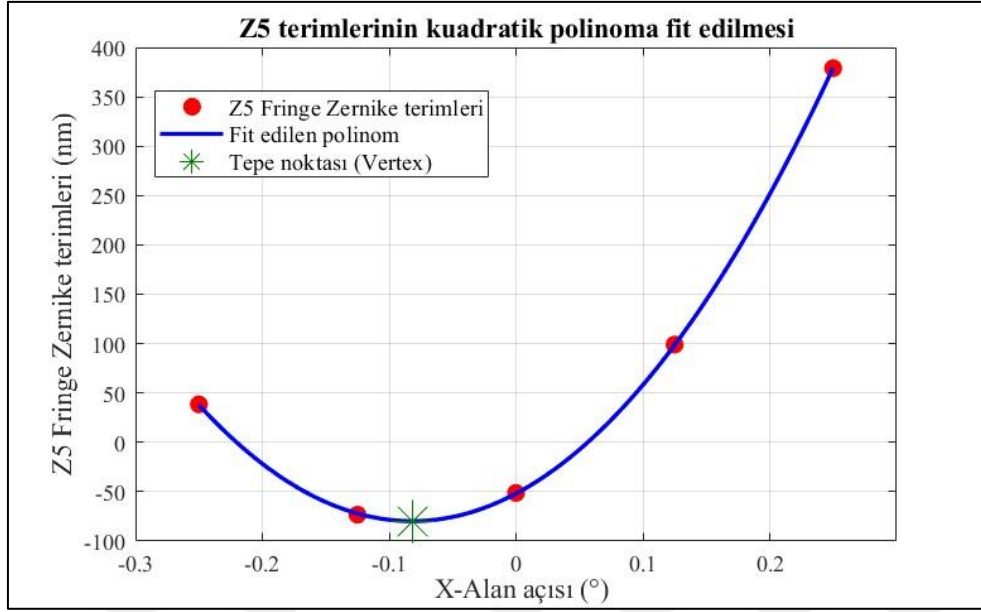
$$a_{131,y} = \frac{W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2,y}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2,y}^{asph}}{W_{131}} \quad (4.2)$$

Eş. 4.1 ve Eş. 4.2’de, $a_{131,x}$ vektör bileşeni, hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen $\sigma_{M2,x}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,x}^{asph}$ bilinmeyen değişkenlerine bağlı iken $a_{131,y}$ vektör bileşeni, $\sigma_{M2,y}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,y}^{asph}$ bilinmeyen değişkenlere bağlıdır. Bilinmeyen parametrelerin çözülmesi için görüntü düzlemindeki hizalama kaçıklığına bağlı astigmatizm aberasyon tepkisinin incelenmesi ve a_{222} vektör bileşenlerinin de hesaplanması gerekmektedir. a_{222} vektörü görüntü düzleminde bir astigmatizm sıfır noktası belirtmez. Ancak $a_{222} \pm ib_{222}$ ile verilen 3. derece astigmatizm sıfır noktalarının orta noktasında konumlandığı için bu iki sıfır noktasının orta noktası alınarak hesaplanabilir. Bu yöntem, deneysel dataların analiz edildiği durumlarda genellikle çok hassas sonuç vermez. a_{222} vektörünü direkt olarak hesaplamamanın başka bir yolu, Z_5 terimlerinin normalize alan koordinatlarına bağımlılığını kullanmaktır. Aynı işlem yine normalize alan koordinatlarına bağlı Z_6 terimlerinin alan içindeki dağılımı kullanılarak da yapılabilir, ancak uygulamada Z_5 terimlerini kullanmak daha pratiktir. Bu sebeple bu çalışma kapsamında, a_{222} vektörünün konumunun hesaplanması işlemi, Z_5 terimleri kullanılarak yapılacaktır. Z_5 terimlerinin alan içindeki dağılımı, eyer ($z = x^2 - y^2$ gibi) benzeri bir yapıya sahiptir. Yani bir ekseninde pozitif, diğer ekseninde ise negatif eğrilik gösterir (Şekil 4.5). Pratikte, ölçülen Z_5 terimlerinin X ve Y eksenlerindeki alan koordinatlarına bağlı olarak ikinci dereceden bir polinom fit edilebilmesi için, her iki eksen üzerinde de en az üç alan noktasından interferometrik ölçüm alınması gerekmektedir. Z_5 terimlerinin X eksenine göre ikinci dereceden bir polinoma fit edilmesiyle bu polinomun eksenini kestiği noktalar, yani polinomun kökleri bulunur (Şekil 4.6). Aynı işlem, Y eksenine için de tekrarlanır ve ilgili polinomun Y eksenini kestiği noktalar yani bu polinomun kökleri bulunur (Şekil 4.7). Bulunan iki kökün orta noktası polinomun tepe noktasını vermektedir. X eksenine ile yapılan işlem sonucunda elde edilen değer a_{222} vektörünün X bileşenini verirken, Y eksenine ile yapılan işlem a_{222} vektörünün Y bileşenini verir. Alan açığı koordinatlarında işlem yapılıyorsa, bulunan vektör bileşenleri normalize a_{222} vektörünün

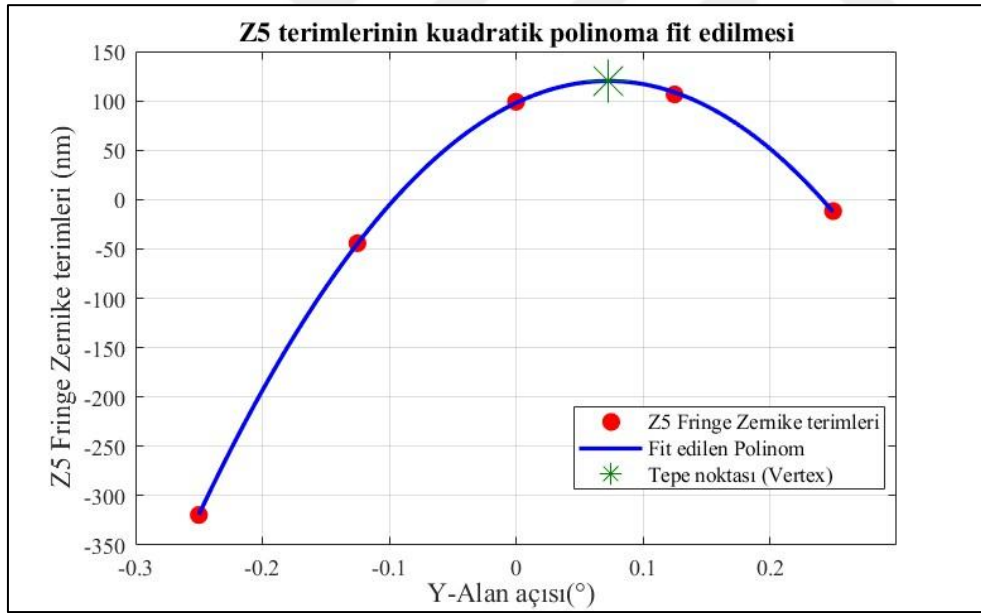
yarı görüş alanı ile ölçeklendirilmiş hali olarak bulunacaktır. Hizalama kaçıklığı miktarlarının hesaplanabilmesi için bütün vektör bileşenleri öncelikle normalize alan koordinatlarına adapte edilmiş olmalıdır. Sistemde hizalama kaçıklığı mevcut değilse, a_{222} vektörünün bileşenleri sıfır olarak hesaplanmalıdır. Hizalama kaçıklığı olmadığı durumda Z_5 terimlerinin bahsedilen çift eğrilikli dağılımının merkez noktası görüntü düzlemi merkezi ile çakışmaktadır. Hizalama kaçıklığı dolayısıyla indüklenen terim bu şeklin a_{222} vektörü kadar kaymasına sebep olur. Bu yöntemin avantajı, birincil ayna form hatasının varlığından etkilenmemesidir. Çünkü birincil ayna form hatasından kaynaklanan Z_5 terimi, dağılımı $\pm Z$ doğrultusunda kaydırır ancak şekli X ve Y eksenlerinde kaydırmaz. Z_5 terimini alan içerisindeki dağılımını ve a_{222} vektörünün konumunu gösteren grafik Şekil 4.5’de sunulmuştur.



Şekil 4.5. Hizalama kaçıklığı durumunda anastigmat bir teleskobun görüntü düzleminde a) Z_5 ve b) Z_6 FZC terimlerinin alan içinde dağılımı



Şekil 4.6. Görüntü düzleminden elde edilen Z_5 terimlerinin X alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi



Şekil 4.7. Görüntü düzleminden elde edilen Z_5 terimlerinin Y alan açısı koordinatlarına göre lineer bir polinoma fit edilmesi

Yukarıda detayları verilen işlemin ardından elde edilen bu vektör bileşenlerinin yüzey dalga aberasyon katkıları ve sigma vektör katkıları arasındaki ilişki Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 ile verilmiştir (Schmid, 2010).

$$a_{222,x} = \frac{W_{222,M2}^{sph} \sigma_{M2,x}^{sph} + W_{222,A2}^{asph} \sigma_{M2,x}^{asph}}{W_{222}} \quad (4.3)$$

$$a_{222,y} = \frac{W_{222,A2}^{sph} \sigma_{M2,y}^{sph} + W_{222,M2}^{asph} \sigma_{M2,y}^{asph}}{W_{222}} \quad (4.4)$$

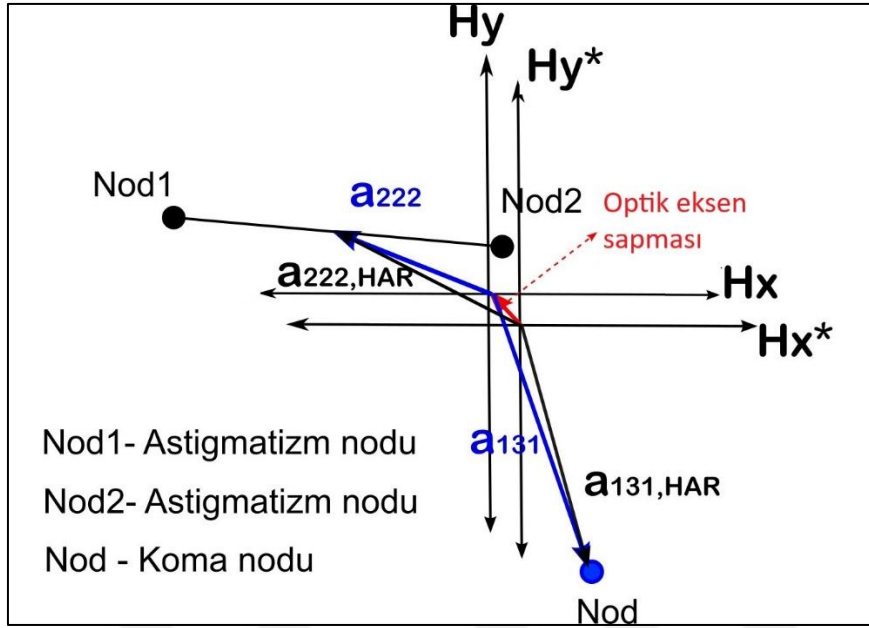
a_{222} vektör bileşenlerinin hesaplanması ile, $\sigma_{M2,x}^{sph}$ ve $\sigma_{M2,x}^{asph}$ bilinmeyen değişkenlere bağlı iki eşitlik elde edilmiş olur. Eş. 4.1, Eş. 4.2, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4'ün sigma vektör bileşenleri için çözülmesi ile sigma vektör katkıları elde edilir. Yukarıdaki anlatım, ölçümler $H=0$ (Bkz. Şekil 2.14) noktası, yani OAR ile görüntü düzlemi kesişim noktasının merkez alındığı koordinat sistemi referans alındığı durumlarda geçerlidir. Bu durumda, aberasyon alan vektörleri bu noktadan itibaren ölçülür. Başka bir deyişle, optik eksen sapmasının olmadığı bir senaryo varsayılmaktadır. Ancak, deneysel ölçümler genellikle mekanik eksen (Birincil ayna eksen) ve görüntü düzlemi kesişim noktası, $H^* = 0$ (Bkz. Şekil 2.14), referans alınarak gerçekleştirilir (Şekil 4.8). Bu durumda, FZC terimleri kullanılarak hesaplanan aberasyon alan vektörleri, optik eksen sapması etkisini de içerir ve hizalama kaçıklıkları hesaplanırken bu etkinin dikkate alınması gerekmektedir. Optik eksen sapması ifadesi, Eş. 4.5'de verilmiştir (Schmid, 2010).

$$H_{AR} = -2d_2 \left(\bar{u}_{M1} \left(1 + \frac{d_1}{r_{M2}} \right) \right) \frac{\sigma_{M2}^{sph}}{\bar{y}_{IMG}} \quad (4.5)$$

Optik eksen sapmasının varlığında, görüntü düzlemi merkezinden ($H^*=0$) ölçülen aberasyon alan vektörleri, Eş. 4.6 ve Eş. 4.7'de verildiği gibi ifade edilebilir (Schmid, 2010).

$$a_{222,HAR} = a_{222} + H_{AR} \quad (4.6)$$

$$a_{131,HAR} = a_{131} + H_{AR} \quad (4.7)$$



Şekil 4.8. Optik eksen sapmasının şematik gösterimi

Eş. 4.6, Eş. 4.7'nin sigma vektör bileşenleri için çözülmesi ile sigma vektör katkıları elde edilir. İkincil ayna asferik sigma vektör katkıları, sadece ikincil ayna doğrusal yer değiştirme miktarlarına bağlıdır. Bu sebeple, bir önceki adımda hesaplanan $\sigma_{M2,x}^{asph}$ ve $\sigma_{M2,y}^{asph}$ değerleri, sırasıyla XDE_{M2} ve YDE_{M2} hizalama kaçıklığı parametrelerinin hesaplanmasında kullanılacaktır (Schmid, 2010).

$$XDE_{M2} = -d_1 \bar{u}_{M1} \sigma_{M2,x}^{asph} \quad (4.8)$$

$$YDE_{M2} = -d_1 \bar{u}_{M1} \sigma_{M2,y}^{asph} \quad (4.9)$$

Yukarıda verilen Eş. 4.8 ve Eş. 4.9 kullanılarak elde edilen XDE_{M2} ve YDE_{M2} değerleri, aşağıda verilen Eş. 4.10 ve Eş. 4.11'de yerine koyulularak ve ADE_{M2} ve BDE_{M2} değerleri de elde edilecektir (Schmid, 2010).

$$BDE_{M2} = -\frac{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})\sigma_{M2,x}^{sph} + XDE_{M2}}{r_{M2}} \quad (4.10)$$

$$ADE_{M2} = \frac{\bar{u}_{M1}(d_1 + r_{M2})\sigma_{M2,x}^{sph} + YDE_{M2}}{r_{M2}} \quad (4.11)$$

Genel durumda, optik açıklığı birincil aynada konumlandırılmış, ikincil aynasında hizalama kaçıklıkları mevcut olan bir teleskop sistemi için hizalama kaçıklıklarının hesaplama işlemi yukarıda verilen adımlar tekrarlanarak gerçekleştirilebilir. RC tipi bir teleskopta, $W_{131} = 0$ olduğu için a_{131} vektör bileşenlerinin belirlenmesinden bahsedilemez. Bu durumda görüntü düzlemindeki 3. derece koma ile ilişkili Z_7 ve Z_8 değerleri görüş alanı boyunca sabit olacağı için, görüntü düzlemi merkezinden alınan Z_7 ve Z_8 değerleri kullanılarak A_{131} parametresi doğrudan hesaplanabilir (Schmid, 2010).

$$3Z_7 = -A_{131,x} \quad (4.12)$$

$$3Z_8 = -A_{131,y} \quad (4.13)$$

Hesaplanan A_{131} değeri ve yüzey dalga aberasyon katkıları, Eş. 4.14 ve Eş. 4.15’de yerine yazıldığında, genel durumdakine benzer, sadece sigma vektör değişkenlerine bağlı eşitlikler elde edilir (Schmid, 2010).

$$A_{131,x} = W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2,x}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2,x}^{asph} \quad (4.14)$$

$$A_{131,y} = W_{131,M2}^{sph} \sigma_{M2,y}^{sph} + W_{131,M2}^{asph} \sigma_{M2,y}^{asph} \quad (4.15)$$

Bu ifadelerin, Eş. 4.3 ve Eş. 4.4 ile birlikte sigma vektör bileşenleri için çözülmesinin ardından, sigma vektör bileşenleri elde edilir. RC teleskobun ikincil aynasında var olan hizalama kaçıklıkları analiz edilirken, astigmatizm aberasyon alan vektörü, $H^*=0$ noktası referans alınarak ölçülüyorsa, bu durumda da optik eksen sapmasının etkisi, dikkate alınmalıdır.

4.2. Üç Aynalı Eksenel Simetrik Teleskoplarda Hizalama Yaklaşımı

Bu bölümde, Nodal Aberasyon Teorisi tabanlı hizalama kaçıklığı hesaplama yaklaşımı, üç aynalı teleskoplar özelinde detaylı bir şekilde ele alınacaktır. Üç aynalı teleskopların aberasyon düzeltme özellikleri Bölüm 2.3.2’de detaylandırılmıştır. Bu çalışmada, teleskobun kompensatör görevi yapan ikincil aynasına uygulanan hizalama kaçıklıklarının nasıl hesaplanabileceği detaylandırılacaktır. TMA tipi teleskopların hizalanmasında da ilk girdi, yüzey dalga aberasyon katsayılarının doğru hesaplanabilmesi için teleskop yapısal

parametrelerinin hassas şekilde belirlenmiş olmasıdır. İkinci girdi ise, görüntü düzleminde seçilen noktalardan alınan interferometrik ölçümlerdir. İki aynalı teleskoplarda kullanılan hizalama yaklaşımına benzer olarak, temelde interferometrik ölçümler sonucu elde edilen Z_5 , Z_6 , Z_7 ve Z_8 terimleri analiz edilir. TMA tipi teleskoplar, nominal durumda 3. derece koma ve astigmatizm aberasyonu için düzeltilmiştir. Bu teleskoplarda hizalama kaçıklığına verilen tepki, 3. derece koma aberasyonu için görüntü düzleminde alın-sabit koma terimlerinin tetiklenmesi, 3. derece astigmatizm aberasyonu için ise görüntü düzleminde alan-sabit ve alan-lineer astigmatizm terimlerinin tetiklenmesidir. Ayrıca, görüntü düzleminde alan-asimetrik astigmatizm görünümü oluşur. Bu özel durum Bölüm 2’de detaylandırılmıştır.

Görüntü düzleminde ölçülen Z_7 ve Z_8 terimlerinin büyüklükleri ve yön bilgileri kullanılarak sırasıyla $A_{131,x}$ ve $A_{131,y}$ vektör bileşenleri elde edilir. Bu kısım, bir önceki bölümde verilen RC tipi teleskoplar için uygulanan işlem ile çok benzerdir. Tek fark, elde edilen A_{131} vektör bileşenleri’nin hem ikincil hem de üçüncül ayna sigma vektör katkılarına bağlı olmasıdır. Bu durum, Bölüm 3.2’de detaylandırılmıştır. 3. derece astigmatizm aberasyonu ile ilgili olarak A_{222} ve B_{222}^2 vektörlerinin sigma vektörler ile ilişkileri yine Bölüm 3.2’de detaylandırılmıştır. Gerçekçi hizalama kaçıklıkları için $B_{222,MIS}^2$ alan sabit kare vektörünün değeri ihmal edilebilir ölçüde küçüktür ve teleskop geometrisinin uygun olması durumunda, görüntü düzlemi merkezinden elde edilen Z_5 ve Z_6 değerleri kullanılarak hesaplanabilir. Bu noktadan ölçülen Z_5 ve Z_6 terimleri, hem hizalama kaçıklığı dolayısıyla indüklenen sabit terimleri hem de birincil ayna astigmatik yüzey form hatasından kaynaklanan sabit terimleri içerir. Aşağıda verilen B_{222}^2 terimi de bu iki etkiyi birden içermektedir (Schmid, 2010).

$$Z_5(H_x = 0, H_y = 0) = \frac{B_{222,x}^2}{2} \quad (4.16)$$

$$Z_6(H_x = 0, H_y = 0) = \frac{B_{222,y}^2}{2} \quad (4.17)$$

B_{222}^2 teriminin yukarıda verilen şekilde elde edilmesinin ardından, görüntü düzleminde herhangi bir başka (H_x, H_y) alan noktasından alınan $Z_5(H_x, H_y)$ ve $Z_6(H_x, H_y)$ değerleri için aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$Z_5 = -H_x A_{222,x} + H_y A_{222,y} + Z_5(H_x = 0, H_y = 0) \quad (4.18)$$

$$Z_6 = -H_x A_{222,y} - H_y A_{222,x} + Z_6(H_x = 0, H_y = 0) \quad (4.19)$$

Burada H_x , H_y , Z_5 , Z_6 , $Z_5(H_x = 0, H_y = 0)$ ve $Z_6(H_x = 0, H_y = 0)$ değerleri bilinmektedir ve A_{222} vektör bileşenlerine bağlı iki adet eşitlik elde edilmiştir. Bu iki eşitliğin kullanılması ile A_{222} vektör bileşenlerinin hesaplanması mümkündür. Fakat, Eş. 3.63 ve Eş. 3.64’de görüldüğü gibi, A_{222} vektör bileşenleri, hem ikincil aynanın hem de üçüncül aynanın sigma vektör bileşenlerine bağlıdır ve her bir vektör bileşeni dört bilinmeyenli bir eşitliği ifade etmektedir. Bu çalışmada olduğu gibi, sadece ikincil ayna hizalama kaçıklıklarının var olduğu durumda σ_{M3} sigma vektör katkıları sadece ikincil aynadan transfer edilen sigma vektör katkılarını içerecek, dolayısıyla eşitlikler aşağıdaki formu alacaktır. Dahası, bu katkılar, Eş. 3.61, Eş. 3.62, Eş. 3.63 ve Eş. 3.64’de yerine yazılırsa, dört adet hizalama kaçıklığı bilinmeyen değişkeni içeren dört adet denklem elde edilebilmektedir (Schmid, 2010).

$$\sigma_{M3,x}^{sph} = -\frac{2(d_2 + r_3)XDE_{M2} - 2r_2\left(\frac{d_2}{2} + r_3\right)BDE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + 2d_1r_3 + d_2r_2 + r_2r_3)} \quad (4.20)$$

$$\sigma_{M3,y}^{sph} = -\frac{2(d_2 + r_3)YDE_{M2} + 2r_2\left(\frac{d_2}{2} + r_3\right)ADE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + 2d_1r_3 + d_2r_2 + r_2r_3)} \quad (4.21)$$

$$\sigma_{M3,x}^{asph} = \frac{-2d_2XDE_{M2} + 2d_2r_2BDE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)} \quad (4.22)$$

$$\sigma_{M3,y}^{asph} = \frac{-2d_2YDE_{M2} - 2d_2r_2ADE_{M2}}{\bar{u}_{M1}(2d_1d_2 - d_1r_2 + d_2r_2)} \quad (4.23)$$

Yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak XDE_{M2} , YDE_{M2} , ADE_{M2} ve BDE_{M2} hizalama kaçıklıkları miktarları kolaylıkla hesaplanabilir. Bu işlem, görüntü düzleminin merkez noktası ve herhangi başka bir noktadan alınan birer ölçüm ile tamamlanabilir. Ancak alan eğilimli (Field-biased) olarak tasarlanmış TMA tipi teleskopların pek çoğunda, görüntü düzlemi merkezi, karartmaya maruz kaldığı için bu kısımdan ölçüm alınamamaktadır. İkincil aynanın gerçekçi hizalama kaçıklıkları durumunda, görüntü düzlemi merkezinde tetiklenen

astigmatizm ile ilişkili FZC terimleri ihmal edilebilir boyuttadır. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası değerleri biliniyor ise, sadece $C_{5,FIG}$ ve $C_{6,FIG}$ değerlerinin B_{222}^2 vektörüne katkısı hesaplanarak, ikincil ayna hizalama kaçıklıkları tek bir alan noktasından alınan interferometrik ölçüm ile yaklaşık olarak hesaplanabilir. B_{222}^2 terimine hizalama kaçıklığı etkisiyle eklenen kısım, hizalama kaçıklığı miktarı azaldıkça azalacaktır. Bu sebeple, uygulanan ardışık hesaplama ve düzeltme işlemi sonrası hizalama işlemi büyük oranda tamamlanabilir.

Pratik uygulamalarda, astigmatik yüzey form hatası sadece birincil aynadan kaynaklanmaz. Diğer aynalardan gelen form hataları da görüntü düzlemindeki interferometrik ölçümlere etki edecektir. Dahası, ayna form hataları, termal koşullar gibi ortam koşullarından etkilenir ve bu hatalar için her ölçümde sabit bir değer kullanmak sisteme bir miktar hata indükleyecektir. İnterferometrik testler her ne kadar kontrollü ortamlarda gerçekleştiriliyor olsa da, deneysel test düzeneği ve ortam koşulları aynı noktadan alınan ardışık ölçümlerde bile bir miktar sapmaya yol açacaktır.

Eş. 3.39, Eş. 3.40, Eş. 3.41 ve Eş. 3.42 ile verilen Seidel aberasyonları ve FZC terimleri arasındaki ilişkiler, yaklaşık olarak doğrudur. 3. derece koma terimleri, astigmatizm terimlerine göre hizalama kaçıklığından daha çok etkilenir ve kolayca tetiklenir. Bu yüzden, görece küçük hizalama kaçıklığı değerlerinde bile görüntü düzlemi merkezinde tetiklenen koma terimleri miktarları, astigmatizm terimleri miktarlarından daha yüksektir. Koma terimleri miktarları arttıkça, ölçülen ve Eş. 3.41 ve Eş. 3.42 ile hesaplanan değerler arasındaki sapma miktarı artmaktadır. Bu yüzden, öncelikle ölçülen koma değerlerinin ikincil ayna hareketleri ile bir miktar kompanse edilmesi ve hesaplamanın, teleskop bu hizalama kaçıklığı koşulundayken gerçekleştirilmesi daha doğru sonuç verecektir.



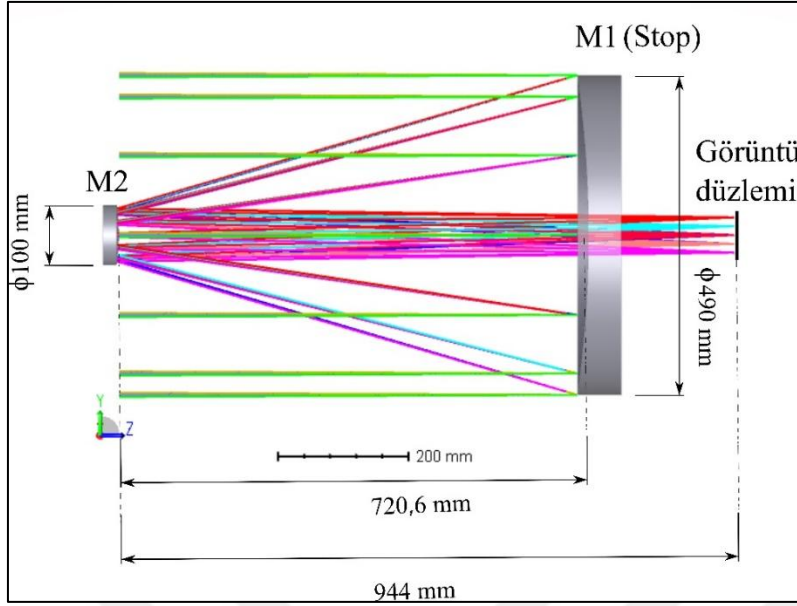
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Cassegrain Teleskop Sistemi

5.1.1. Cassegrain teleskop sistemi tasarımı

Yer gözlem uydularında kullanılacak teleskopların optik performans testlerinde, yüksek görüntüleme performansına sahip, kolime ışın demeti üretebilen, kolimatör teleskoplara ihtiyaç vardır. Söz konusu araçlar, test edilen optik sistemden daha yüksek kalitede ışın üretebilmeli ve üretilen kolime ışık demetinin çapı, test edilen optiğin optik açıklığından daha büyük olmalıdır. Bahse konu gereksinimler dolayısıyla, yüksek görüntüleme performansına sahip teleskop sistemleri, hassas opto-mekanik yapılar ve yüksek yüzey kalitesine (yüzey form hataları çok düşük) sahip aynalar içermektedir. Bu tez çalışması kapsamında, teleskop sistemi olarak Cassegrain teleskop tipinde yapılandırılmış bir kolimatör teleskop sistemi kullanılacaktır. Cassegrain teleskop sistemi, tipik olarak parabolik içbükey bir birincil ayna ve hiperbolik dışbükey bir ikincil aynadan oluşmaktadır. F/12,7 Cassegrain teleskop, $0,11^\circ$ 'lik bir görüş alanı içerisinde kırınım-limitinde görüntüleme performansı sağlayabilmektedir.

Kırınım limiti, gerçek bir optik sistem için ulaşılabilir olan maksimum kusursuzluk seviyesi olarak tanımlanabilir. Başka bir deyişle, ulaşılacak maksimum görüntüleme performansıdır. Cassegrain teleskop sisteminin şematik gösterimi Şekil 5.1'de verilmiştir (Karcı ve Ekinci, 2020).



Şekil 5.1. Cassegrain teleskop optik tasarım şematik diyagramı

Cassegrain teleskobun tasarım parametreleri, Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2 ile verilmektedir.

Çizelge 5.1. Cassegrain teleskobun optik tasarım lens data düzenleyici değerleri

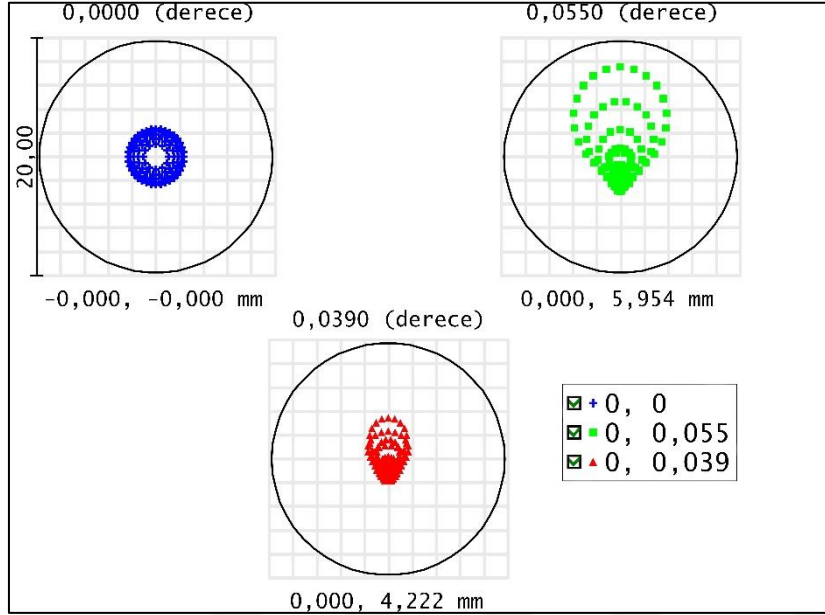
Yüzey#	Eğrilik yarıçapı (r)	Mesafe (d)	CA yarıçapı (mm)	Konik sabiti (k)
Obje	∞	∞	∞	0
1	∞	720,566	245,309	0
M1 (Stop)	-1700	-720,566	245,000	-1,000
M2	-300	720,566	41,942	-1,737
4	∞	223,312	40,000	0
Görüntü	∞	-	38,547	0

Çizelge 5.2. Yüksek hassasiyetli Cassegrain tipi teleskobun teknik özellikleri

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Tüm görüş alanı	FFOV	°	0,11
Etkin odak uzunluğu	EFFL	mm	6200
F sayısı	F#	-	12,7
Karartma oranı (eksenel)	γ	%	0,15
Büyütme	m	-	7,29
Toplam uzunluk	L	mm	956

Cassegrain teleskobun kırınım limitinde performans gösterdiği $0,11^\circ$ görüş alanı için optik tasarımdan elde edilen RMS nokta (spot) diyagramı ve MTF (Modulasyon Transfer Fonksiyonu) grafiği sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3’de sunulmuştur. RMS nokta diyagramı, optik sistemdeki ışınları izleyerek bu ışınların odaklandığı konumu ve odak noktasının boyutunu analiz eden, grafiksel bir araçtır ve bir optik sistemin görüntü kalitesini ölçmek

için yaygın olarak kullanılır. Benzer şekilde, bir optik sistemin MTF grafiği de söz konusu sistemin görüntüleme performansını değerlendiren bir ölçüttür. MTF, objeden gelen kontrast oranının, objenin farklı uzaysal frekanslarına göre görüntüye ne oranda aktarılabildiğinin bir ifadesidir.

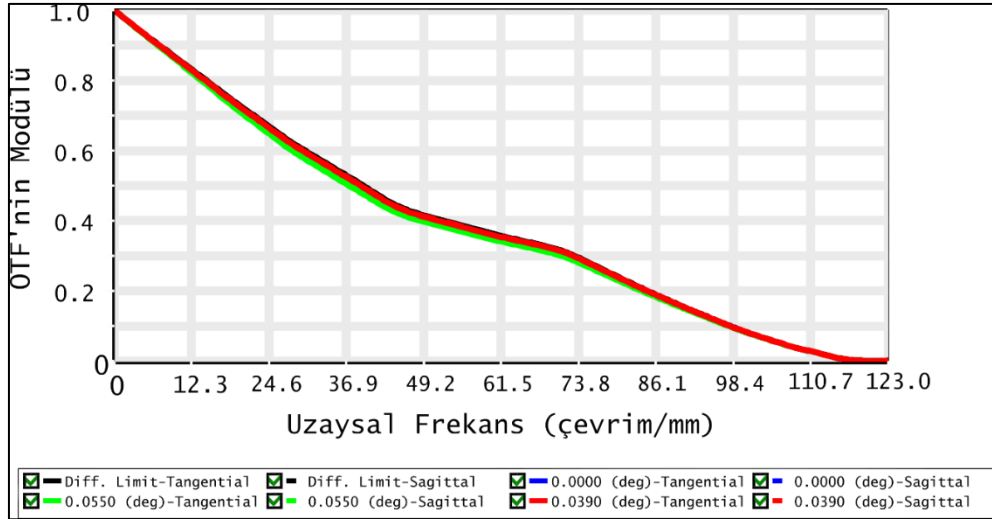


Şekil 5.2. Cassegrain teleskop odak düzlemi RMS nokta diyagramı

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, farklı alan noktalarından gelen ışınların odak düzleminde oluşturduğu noktasal odakların boyutları, Airy Disk çapından daha küçüktür. Airy Disk, sistem çözünürlüğünün limitini ifade eder ve sisteme özgü olarak belirlenir. Airy Disk çapının bağlı olduğu parametreler, Eş. 5.1'de verilmiştir.

$$\text{Airy Disk çapı} = 2,44 \cdot \lambda \cdot F\# \quad (5.1)$$

Şekil 5.2'de görüldüğü gibi, alan yüksekliği arttıkça, noktasal odak şekillerinin koma aberasyonuna özgü kuyruklu yıldız formunu aldığı görülmektedir. Cassegrain teleskobun alan yüksekliğini, koma aberasyonu limitlemektedir.



Şekil 5.3. Cassegrain teleskop MTF grafiği

Şekil 5.3’de görüldüğü gibi, farklı alan noktaları için çizdirilen MTF grafikleri, Cassegrain teleskobun sağlayabildiği maksimum görüntüleme performansı olan kırınım limiti eğrisi ile örtüşmektedir.

5.1.2. Cassegrain teleskop sisteminin aberasyon katsayılarının hesaplanması

Cassegrain teleskobun aberasyon düzeltme kapasitesi, Bölüm 2’de detaylandırılmıştır. Teleskobun her bir yüzeyinden gelen yüzey aberasyon katkıları, teleskobun yapısal parametreleri veya paraksiyal ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanabilir. Bu bölümde, yüzey aberasyon katkıları, paraksiyal ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Yüzey aberasyon katkıları, optik bileşenlerin hizalama kaçıklıklarından etkilenmediği için bu bölümde hesaplanan katkılar, hizalama kaçıklığına sahip sistemler üzerinde yapılan analizler esnasında, girdi olarak kullanılacaktır. Optik tasarım programından alınan paraksiyal ışın izleme verileri, Çizelge 5.3’te sunulmuştur. Paraksiyal ışın izleme verileri ve yüzey aberasyon katkıları, interferometrik ölçüm için referans aldığımız HFOV= $\pm 0,25^\circ$ ve dalga boyu $\lambda=632,8$ nm için hesaplanmıştır.

Çizelge 5.3. Cassegrain teleskop paraksiyal ışın izleme verileri

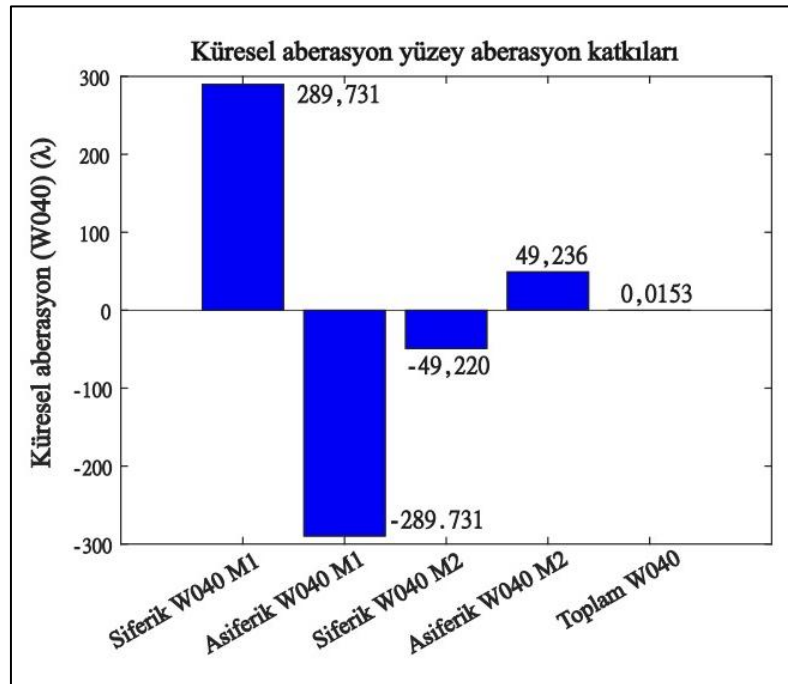
Yüzey#	y (mm)	u ($^\circ$)	$\bar{y}$ (mm)	$\bar{u}$ ($^\circ$)
Obje	0	0	∞	0,00436
Giriş açıklığı (EP)	245,00000	0	-3,70885	0,00436
M1 (Stop)	245,00000	0,28824	0	-0,00436
M2	37,30436	-0,03952	3,14412	0,02533
Görüntü	0,00635	-0,03952	27,04925	0,02533

Çizelge 5.3’de verilen y , u , $\bar{y}$ ve $\bar{u}$ parametreleri, sırasıyla yüzeydeki kenar ışın yüksekliği, açısı ve yüzeydeki ana ışın yüksekliği ve açısıdır. EP ise giriş açıklığıdır. Çizelge 5.3’de verilen parametreler ve teleskobun yapısal parametreleri kullanılarak hesaplanan 3. derece yüzey dalga aberasyon katkıları, Çizelge 5.4’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Cassegrain teleskop için hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları

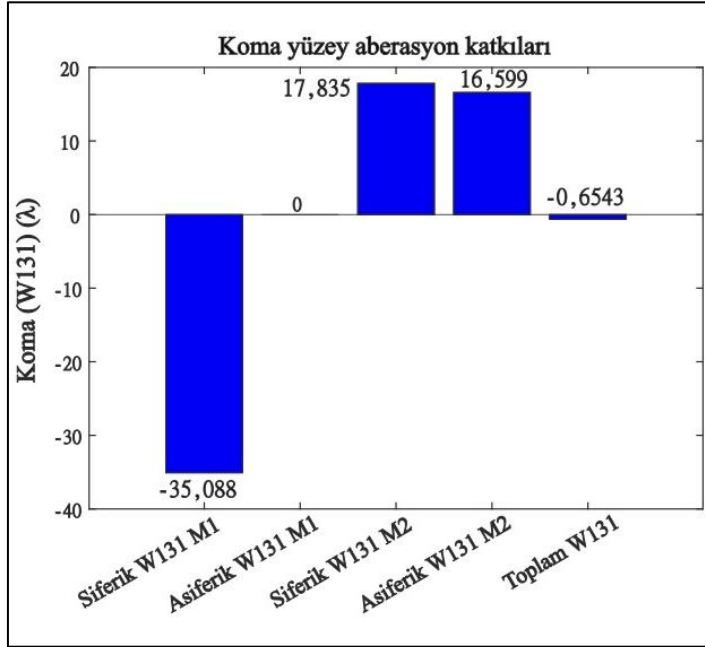
Yüzey #	$W_{040}^{sph}(\lambda)$	$W_{040}^{asph}(\lambda)$	$W_{131}^{sph}(\lambda)$	$W_{131}^{asph}(\lambda)$	$W_{222}^{sph}(\lambda)$	$W_{222}^{asph}(\lambda)$	$W_{220S}^{sph}(\lambda)$	$W_{220S}^{asph}(\lambda)$
M1 (Stop)	289,731	-289,731	-35,088	0	1,0623	0	1,062	0
M2	-49,220	49,236	17,835	16,599	-1,616	1,399	-3,818	0,700
Toplam	240,510	-240,495	-17,253	16,599	-0,553	1,399	-2,756	0,700
	0,0153		-0,6543		0,8458		-2,0562	

Optik bileşenlerin yüzeylerinden gelen aberasyon katkıları, grafiksel olarak Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmektedir. Çizelge 5.4 ve Şekil 5.4 ile verilen 3. derece küresel aberasyon katkıları incelendiğinde, birincil aynanın küresel aberasyon üretmediği, ikincil aynanın ise özel olarak seçilen konik katsayısı ile yine küresel aberasyonu kendi içinde dengelediği görülmektedir. Görüntü düzleminde net aberasyon olarak yer alan küresel aberasyon miktarı ihmal edilebilir düzeydedir.



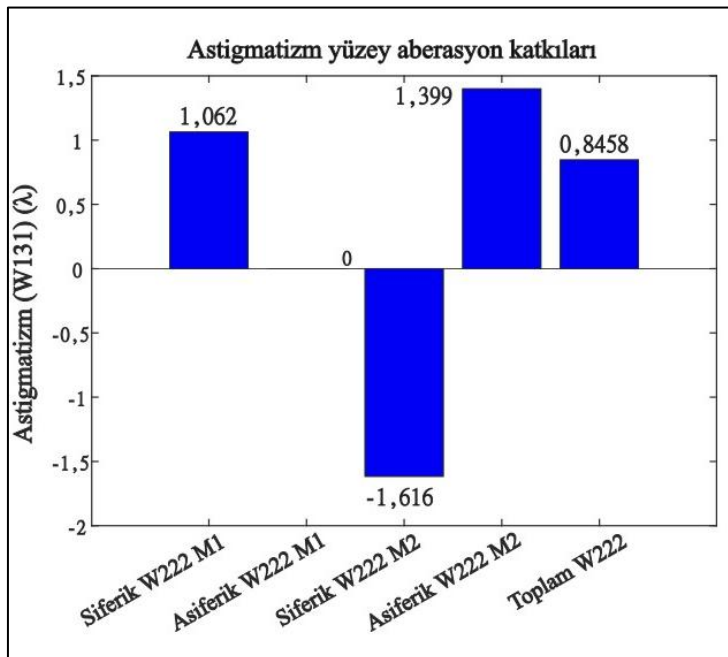
Şekil 5.4. Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece küresel aberasyon katkıları

Cassegrain teleskobun yüzeylerinden ileri gelen 3. derece koma aberasyon katkıları, grafiksel olarak Şekil 5.5’de gösterilmektedir.



Şekil 5.5.Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece koma aberasyonu katkıları

Benzer şekilde, Cassegrain teleskobun yüzeylerinden ileri gelen 3. derece astigmatizm aberasyon katkıları, grafiksel olarak Şekil 5.6’da gösterilmiştir.

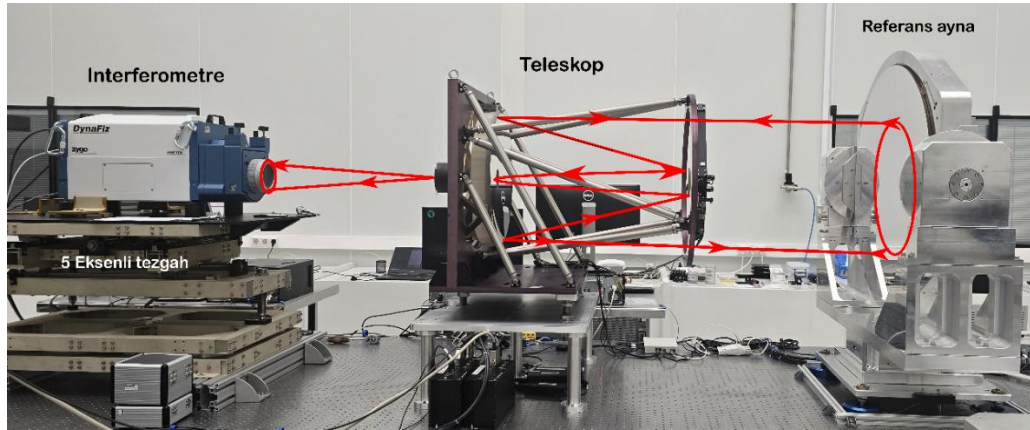


Şekil 5.6. Cassegrain teleskop yüzeylerinde üretilen 3. derece koma aberasyonu katkıları

5.1.3. Cassegrain teleskop sistemi deneysel test düzeneği

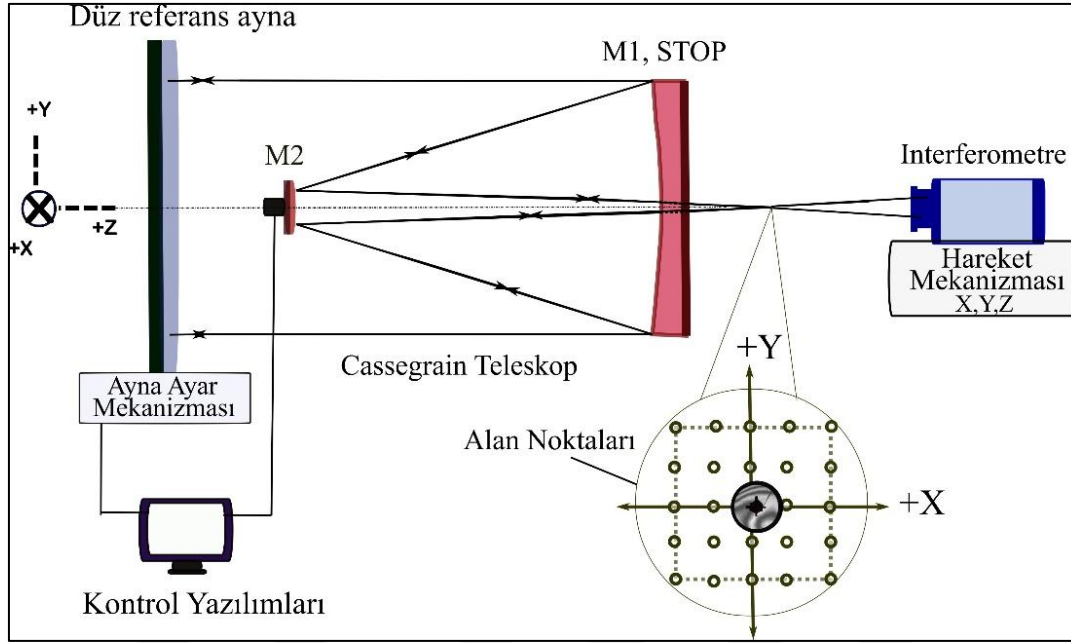
Teleskobun hizalanması için ihtiyaç duyulan deney düzeneği, temelde bir Fizeau faz kaydırmalı interferometre (DynaFiz, Zygo Corp., Middlefield, CT, USA), interferometreye monte edilen bir referans iletim küresi (F/7,1), bir referans düz ayna, interferometreye hareket sağlayan beş eksenli bir tezgah, yüksek çözünürlüklü Cassegrain teleskop ve teleskobun ikincil aynasına hareket sağlayan piezo tetikli nano konumlayıcılardan (PZA12 Actuators, Newport Corp., Irvine, CA) oluşmaktadır. Söz konusu ekipmanlar, 3,6 m x 1,5 m boyutlarında titreşim izolasyonlu bir optik masa (S2000A, Newport Corp., Irvine, CA) üzerinde Resim 5.1’de görüldüğü gibi konumlandırılmıştır. Fizeau interferometre, optik yüzeylerin formunun, ideal dalga cephesi formundan sapma miktarını, yüksek hassasiyetle belirleyebilen bir optik cihazdır. Çalışma prensibi, test optiğinin yüzeyinden ve referans yüzeyden yansıyan ışınların birleşerek girişim desenini oluşturması ve bu desenin analiz edilmesi esasına dayanır. Faz kaydırma özelliği, Fizeau interferometresinin ölçüm hassasiyetini artıran bir tekniktir. Bu özellik, referans ve test optiği arasındaki optik yol farkının dalgaboyunun alt katları ile uyumlu olarak değiştirilmesiyle farklı fazlardaki girişim desenlerinin elde edilmesine olanak tanır. Interferometre ile bağlantılı Zygo MX yazılımı, her bir pikseldeki ışık şiddetini farklı fazlarda alınan görüntüler için karşılaştırır ve kullandığı algoritmalar ile analiz eder. Böylelikle ideal dalga cephesi formundan sapma olarak tanımlanan dalga cephesi hataları, yüksek hassasiyet ile tespit edilebilir. Interferometre ile birlikte kullanılan iletim elemanları, interferometreden çıkan lazer ışığının %4’lük bir kısmını geri yansıtmak için kullanılmaktadır. Lazer ışığının bu geri yansıyan porsiyonu referans dalga cephesi olarak kullanılmaktadır. İletim elemanları, uygulamaya göre, düz veya küresel dalga cephesi oluşturacak şekilde ve farklı F sayılarında (F/#) seçilebilir. Interferometrede kullanılan He-Ne lazer ışını 632,8 nm dalga boyuna sahiptir. Interferometrenin üzerine yerleştirildiği hareket tablası, beş serbestlik derecesine sahip olup interferometre ile test optiği arasında hassas hizalama yapılmasına olanak tanır. Referans ayna ile ikincil aynanın piezo kontrollü hareket mekanizmaları, ilgili yazılımları aracılığıyla kontrol edilmektedir. Bu çalışmada referans ayna olarak kullanılan düz ayna (QED Optics, Rochester, NY, USA), yine büyük astronomik ve uydu teleskopların testlerinde, ışığı test edilecek optik sisteme yönlendirmekte kullanılmak üzere üretilmiştir ve yüksek yüzey form kalitesine sahiptir. Referans aynanın etkin optik açıklığı (clear aperture) 815 mm’dir ve bağlı olduğu tutucu sayesinde yatay ve dikey eksen etrafında $\pm 2^\circ$ dönme hareketi sağlayabilmektedir. Referans aynanın hareketi, manuel veya bilgisayar kontrollü olarak

sağlanabilmektedir. Referans ayna yüzey form hatası $0,011\lambda$ 'dır. Test düzeneği ekipmanlarının optik masa üzerindeki yerleşimleri, Resim 5.1'de gösterildiği gibidir. Optik yüzeylerin ölçüm sonuçları, termal faktörlerden etkilendiğinden, söz konusu deney düzeneğinin hayata geçirilebilmesi için özel olarak donatılmış temiz oda koşullarına ihtiyaç vardır. Deneysel çalışmaların yapıldığı temiz oda, ISO-7 kategorisinde olup temiz odanın sıcaklığı $20 \pm 1^\circ\text{C}$, nemi ise RH %40-50 aralığında kararlı tutulmaktadır.



Resim 5.1. İnterferometrik çift-geçişli Cassegrain teleskop hizalama test düzeneği

Resim 5.1. verilen deney düzeneğinde, interferometreye monteli iletim küresinin (F/7,1) odak noktası ile teleskobun odak noktası birbiri ile çakışmıştır. Böylece, interferometreden çıkan lazer ışını, teleskop yüzeylerinden ve referans ayna yüzeyinden yansyarak interferometreye geri döner. Bu lazer ışın demeti, ikincil ayna hizalama kaçıklıkları sonucu tetiklenen aberasyonları içerir ve yansıyan dalga cephesinin referans küresel dalga cephesine göre sapmaları analiz edilir. Test düzeneğinin şematik gösterimi, Şekil 5.7'de verilmiştir.



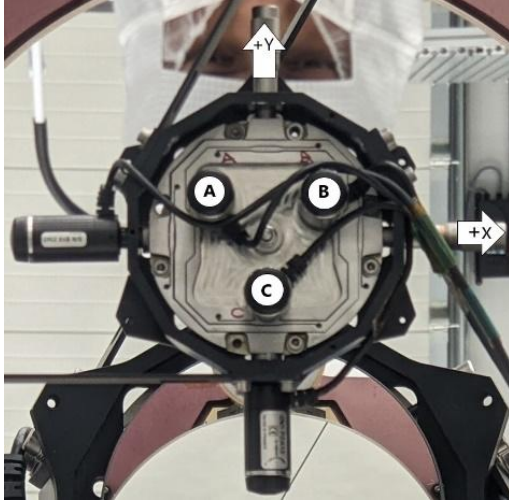
Şekil 5.7. Cassegrain teleskobun hizalama test düzeneği şematik gösterimi

Şekil 5.7’de ızgara şeklinde verilen alan noktalarının, alan koordinatlarındaki konumları Çizelge 5.5’de verilmiştir. Bu çalışmada, Cassegrain teleskobun görüntü düzleminin verilen noktalarından alınan interferogram ölçümleri kullanılarak analizler gerçekleştirilecektir.

Çizelge 5.5. Interferometrik ölçümlerin alındığı alan noktalarının görüntü düzlemindeki yerleşimleri (5x5)

$(-0,250^\circ, 0,250^\circ)$	$(-0,125^\circ, 0,250^\circ)$	$(0^\circ, 0,25^\circ)$	$(0,125^\circ, 0,250^\circ)$	$(0,250^\circ, 0,250^\circ)$
$(-0,250^\circ, 0,125^\circ)$	$(-0,125^\circ, 0,125^\circ)$	$(0^\circ, 0,125^\circ)$	$(0,125^\circ, 0,125^\circ)$	$(0,250^\circ, 0,125^\circ)$
$(-0,250^\circ, 0^\circ)$	$(-0,125^\circ, 0^\circ)$	$(0^\circ, 0^\circ)$	$(0,125^\circ, 0^\circ)$	$(0,250^\circ, 0^\circ)$
$(-0,250^\circ, -0,125^\circ)$	$(-0,125^\circ, -0,125^\circ)$	$(0^\circ, -0,125^\circ)$	$(0,125^\circ, -0,125^\circ)$	$(0,250^\circ, -0,125^\circ)$
$(-0,250^\circ, -0,250^\circ)$	$(-0,125^\circ, -0,250^\circ)$	$(0^\circ, -0,250^\circ)$	$(0,125^\circ, -0,250^\circ)$	$(0,250^\circ, -0,250^\circ)$

Teleskobun ikincil aynasına uygulanacak hizalama kaçıklıkları, ikincil aynanın entegre edildiği bir 5-eksen hareket mekanizması ile sağlanmaktadır (Resim 5.2.). Bu piezo tetikleyici hareket mekanizması, X ve Y piezo sürücülerini kullanarak yatay ve dikey eksenlerde yer değiştirme uygulayabilir. Ayrıca, aynı mekanizma, A, B ve C piezo sürücülerini kullanarak X ve Y eksenlerinde eğilme ve Z ekseninde de ileri ve geri hareket sağlayabilirler.



Resim 5.2. İkincil ayna piezo kontrollü hareket mekanizması

5.2. NAT Tabanlı Cassegrain Teleskop Sistemlerinin Hizalanmasına Yönelik Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, Nodal Aberasyon Teorisi'nin Bölüm 2'de detaylandırılan bulguları ile ilgili, Cassegrain teleskop üzerinde gerçekleştirilen deneysel uygulamalar sunulmuştur. Bölüm 5.2.1'de, Thompson'ın gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak sigma vektör katkıları önce bir simülasyon üzerinden hesaplanmıştır. Daha sonra aynı durum deneysel bir test düzeneği kullanılarak yaratılmış ve deneysel olarak hesaplanan sigma vektör katkıları, simülasyon sonucu elde edilen sigma vektör katkıları ile karşılaştırılmıştır. Bölüm 5.2.2'de, birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının “iki nodlu astigmatizm” davranışına benzer karakteristiği, Cassegrain teleskobunun hizalı ve hizalama kaçıklığı durumları için deneysel olarak incelenmiştir.

5.2.1. Sigma vektörlerin Cassegrain teleskop sistemi kullanılarak deneysel olarak doğrulanması

Çalışma, Bölüm 5.1.1'de verilen Cassegrain teleskop tasarımı ve Bölüm 5.1.4'de verilen deneysel test düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Simülasyon

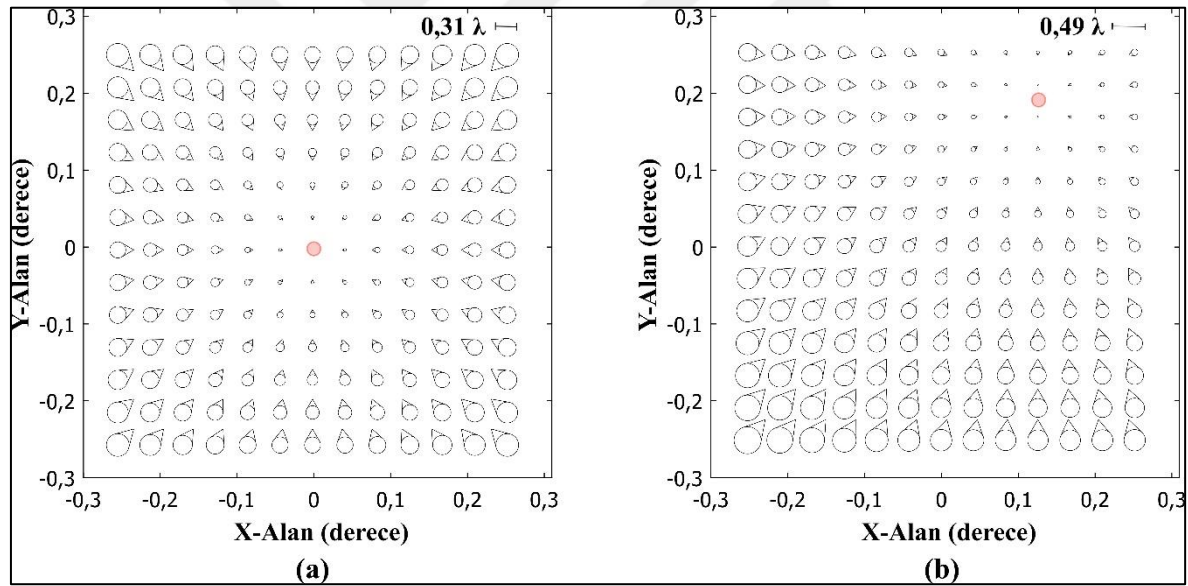
Simülasyon çalışması kapsamında, Cassegrain teleskobun ikincil aynasının konumu, tasarımı kasıtlı olarak bozulmuştur. Teleskobun ikincil aynasına uygulanan hizalama

kaçıklığı değerleri, Çizelge 5.6’da verilmiştir. Hizalama kaçıklığı değerleri, teleskobun ikincil aynasının konumu bozulduğunda, görüntü düzleminde sferik ve asferik sigma vektörlerinin her iki bileşeninin (X ve Y) oluşturulması sağlanacak şekilde, her bir yanal doğrultu ve açıda uygulanmıştır.

Çizelge 5.6. Cassegrain teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri

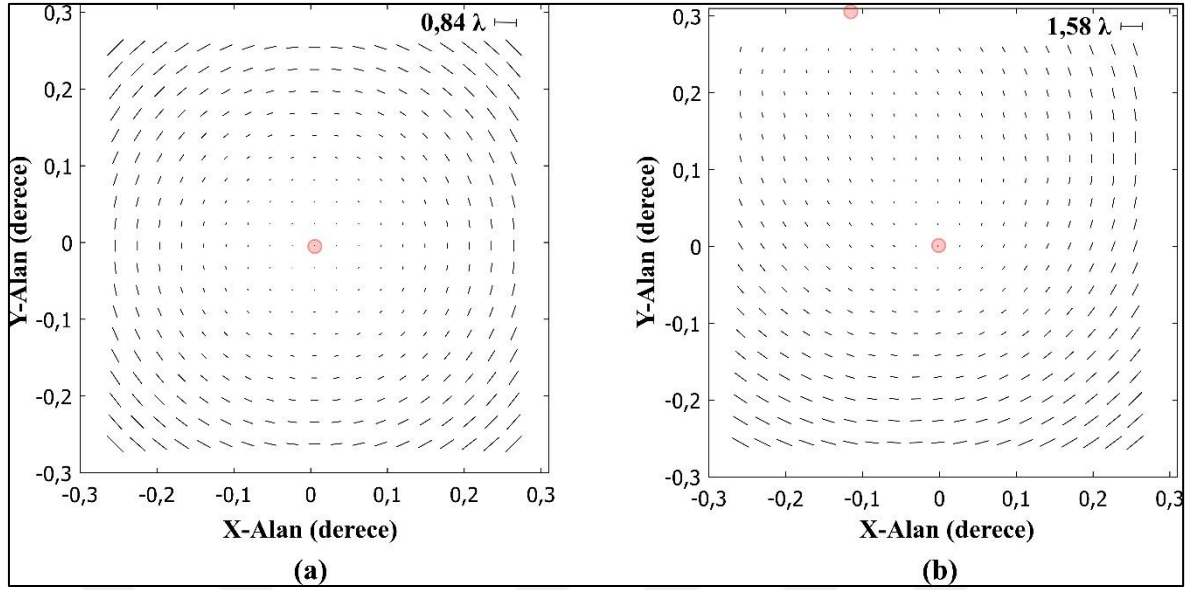
Hizalama kaçıkları	XDE_{M2} (mm)	YDE_{M2} (mm)	ADE_{M2} (°)	BDE_{M2} (°)
M2	-0,250	0,500	-0,245	-0,095

Çizelge 5.6’da verilen hizalama kaçıklığı değerlerinin, teleskobun görüntü düzleminde yol açtığı nodal davranış, 3. derece koma ve astigmatizm aberasyonları, için sırasıyla, Şekil 5.8 ve Şekil 5.9’de verilmiştir.



Şekil 5.8. Cassegrain teleskop için 3. derece koma TAAG’leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

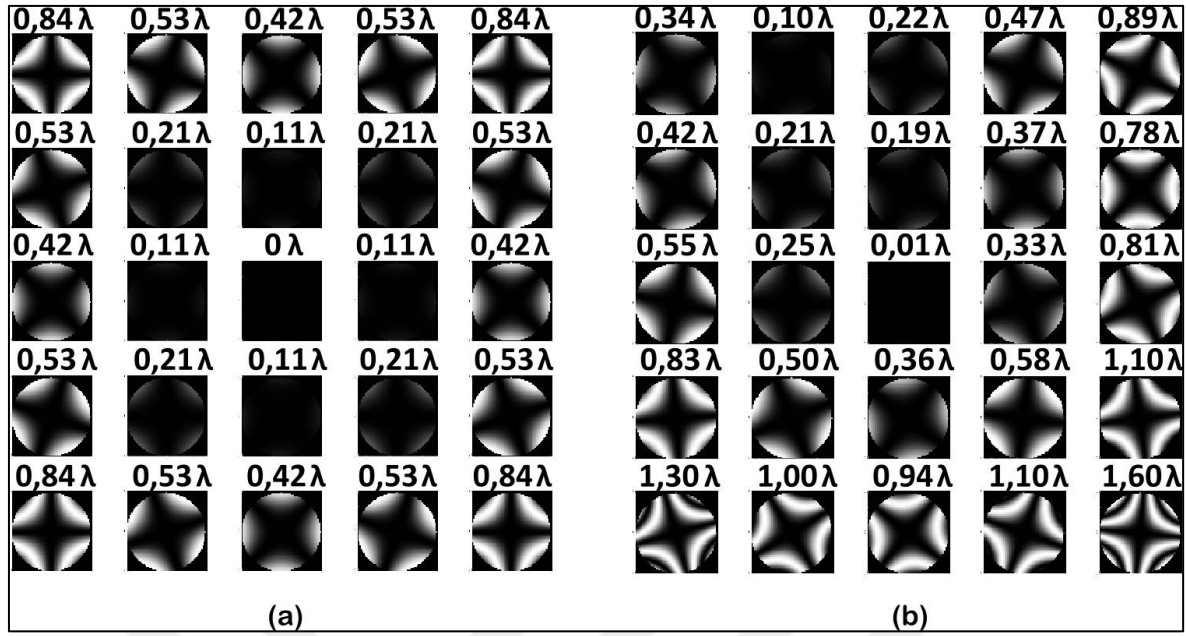
Şekil 5.8a, teleskop hizalı durumdayken, 3. derece koma aberasyonu ile ilişkili koma terimlerinin alan içindeki dağılımını göstermektedir. Şekil 5.8b, teleskobun ikincil aynasının hizalama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan aberasyon dağılımındaki değişimi, 3.derece koma aberasyonu özelinde göstermektedir. Şekil 5.8b’de açıkça görüldüğü üzere, hizalama kaçıklığı durumunda, Cassegrain teleskop sistemi görüntü düzleminde, 3. koma nodunun yer değiştirmesi ile oluşan nodal davranış gözlenmektedir. Yine görüldüğü üzere, koma terimleri, yeni nod etrafında rotasyonel simetriye uygun dağılım göstermektedir.



Şekil 5.9. Cassegrain teleskop için 3. derece astigmatizm TAAG'leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Benzer şekilde, Şekil 5.9a'da, teleskop hizalı durumdayken, 3. derece astigmatizm aberasyonu ile ilişkili astigmatizm terimleri, alan içinde rotasyonel simetrisiye uygun dağılım göstermektedir. Ancak, hizalama kaçıklığına sahip Cassegrain teleskobun görüntü düzlemindeki astigmatizm aberasyonu dağılımında, Nodal Aberasyon Teosi'nin öngördüğü, iki astigmatizm aberasyon sıfır noktası karakteristiğine uygun dağılım mevcuttur ve noktalardan birinin konumu görüntü düzlemi dışında konumlanmıştır.

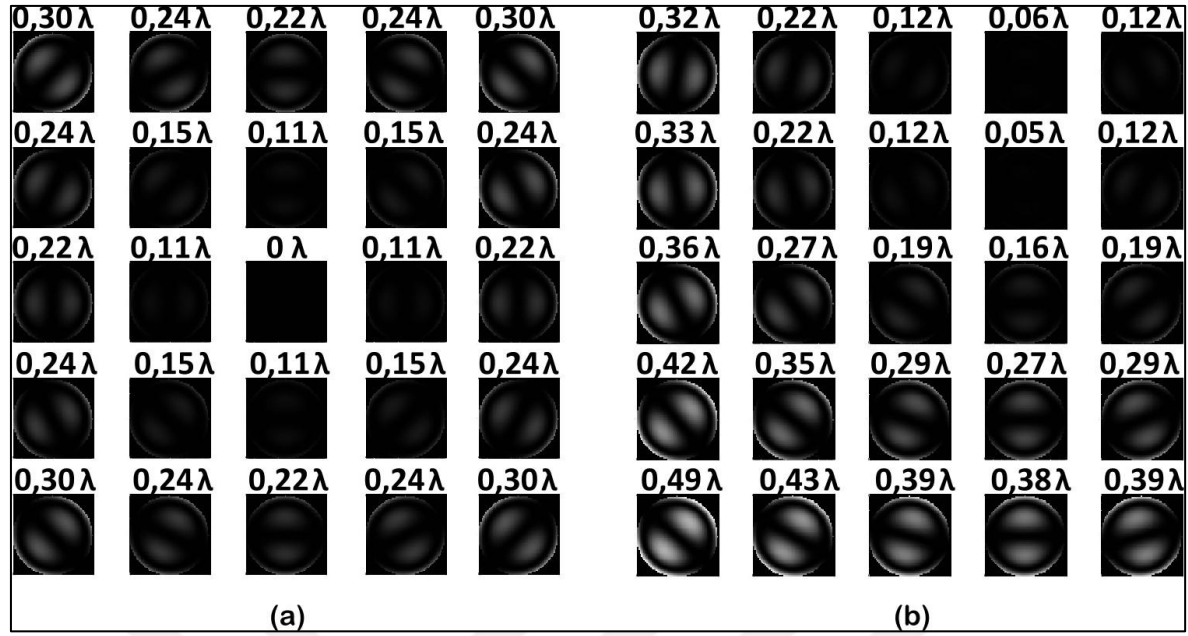
Cassegrain teleskobun görüntü düzleminde, hizalı ve hizalama hatasının varlığı durumları için alınan astigmatizm interferogramları Şekil 5.10'de, koma interferogramları Şekil 5.11'te sunulmuştur. Interfeogramlar, Çizelge 5.1'de verilen alan koordinatlarından alınan Z_5 ve Z_6 terimleri kullanılarak oluşturulmuştur. Alan koordinatları, deneysel uygulamalar ile uyumlu olacak şekilde seçilmiştir.



Şekil 5.10. Cassegrain teleskop alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Şekil 5.10’de gösterilen interferogramlar, Eş. 5.2 ile verilen matematiksel ifade kullanılarak hesaplanmıştır. İnterferogramlar, Z_5 ile Z_6 terimlerinin büyüklüğünü ($Z_{5/6}$) temsil etmektedir. İnterferogramlarda, $Z_{5/6}$ ifadesinin sıfıra yakın olduğu alan koordinatlarında girişim desenleri belirgin şekilde görülmezken, $Z_{5/6}$ ifadesinin görece daha yüksek olduğu alan koordinatlarında astigmatizm aberasyonuna özgü karakteristik desenler gözlemlenmektedir. $Z_{5/6}$ ifadesinin sıfıra yakın olduğu alan koordinatları, genellikle astigmatizm sıfır noktalarına yakın konumlanmıştır.

$$Z_{5/6} = \sqrt{Z_5^2 + Z_6^2} \quad (5.2)$$



Şekil 5.11. Cassegrain teleskop alan interferogramları, koma $Z_{7/8}$: a) hizalı durum, b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Şekil 5.11’te gösterilen interferogramlar, Eş. 5.3 ile verilen matematiksel ifade kullanılarak hesaplanmış olup, Z_7 ile Z_8 terimlerinin büyüklüğünü ($Z_{7/8}$) temsil etmektedir. Şekil 5.11’te gösterilen interferogramlarda, koma aberasyonuna özgü karakteristik desenlerin daha az belirgin olduğu alan koordinatları, koma aberasyon sıfır noktasına yakın konumlanmıştır.

$$Z_{7/8} = \sqrt{Z_7^2 + Z_8^2} \quad (5.3)$$

Cassegrain teleskobun hizalama kaçıklığı durumunda, görüntü düzleminde ortaya çıkan nodal görünüm, simüle edilen interfergramlarda ve Tüm Alan Aberasyon Gösterim (TAAG)’lerinde açıkça görülmektedir. Bu davranış, ikincil aynaya uygulanan hizalama kaçıklıklarının, ikincil ayna alan aberasyon merkezlerinin yer değiştirmesine sebep olmasının bir sonucudur. Bu çalışmada, görüntü düzleminde sigma vektörler ile ölçülen bu yer değiştirme miktarları, Thompson’ın gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bölüm 2.4.2’de detaylandırıldığı gibi, sigma vektörlerin sferik ve asferik bileşenleri, ayrı ayrı, optik tasarım programından elde edilen gerçek ışın izleme verileri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım programından elde edilen gerçek ışın izleme verileri, Çizelge 5.7’de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. Siferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Cassegrain teleskop)

Parametre	Birim	M1 (Stop)	M2
l_i	mm	$-\infty$	944,047693
l_{XP}	mm	0	-124,144736
X	-	0	0
Y	-	0	0
Z	-	1	-1
L	-	0	0,000009
M	-	0	0,000942
N	-	1	0,999999
SRL	-	0	-0,000833
SRM	-	0	0,001667
SRN	-	1	-0,999998
$\bar{l}$	-	0,0043634	0,014845
σ_x^{sph}	-	0	0,055551
σ_y^{sph}	-	0	-0,175777

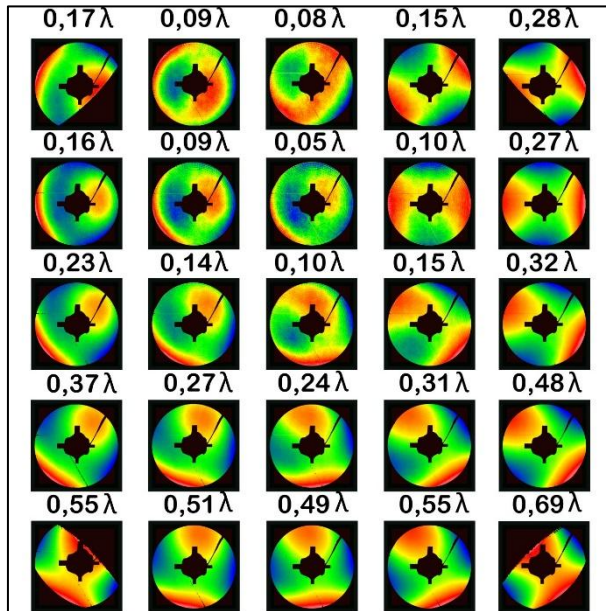
Çizelge 5.7’de yer alan l_i ve l_{XP} parametreleri sırasıyla, ilgili yüzeyden yerel görüntüye olan uzaklık ve ilgili yüzeyden yerel çıkış açıklığına olan uzaklıklardır. Hizalı sistemin obje vektörü olarak adlandırılan $N(X,Y,Z)$ vektörünün yönü, l_i ’den l_{XP} ’ye doğru olacak şekilde çizildiğinden, birincil ayna için obje vektörü yön kosinüsleri $N(0,0,1)$ olarak verilmiş, ikincil ayna için ise obje vektörü kosinüsleri $N(0,0,-1)$ olarak verilmiştir. Bölüm 2.4.1’de detaylandırıldığı üzere, Çizelge 5.7’de verilen L , M , N parametreleri, OAR’ye hizalı birim vektörünün yön kosinüslerini; SRL , SRM , SRN parametreleri ise yüzey normaline hizalı birim vektörün yön kosinüslerini ifade eder. Çizelge 5.8’de, gerçek ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanan birincil ve ikincil aynaya ait siferik sigma vektörlerinin σ_x^{sph} ve σ_y^{sph} vektör bileşenleri sunulmuştur. Hizalama kaçıklıkları, ikincil aynaya uygulandığı ve birincil ayna tasarımıda optik açıklık olarak seçildiği için, birincil ayna için siferik sigma vektör katkıları, sıfır olarak hesaplanmıştır. İkincil ayna hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak tetiklenen sigma vektör katkıları, yine gerçek ve paraksiyal ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar, Çizelge 5.8’de sunulmuştur. $\bar{y}$ paraksiyal parametresi, normalizasyon için kullanılmıştır.

Çizelge 5.8. Asiferik sigma vektörlerini hesaplamak için gerekli parametreler ve hesaplama sonuçları (Cassegrain teleskop)

Parametre	Birim	M1 (Stop)	M2
δv_x^*	mm	0	-0,249999
δv_y^*	mm	0	0,500004
$\bar{y}$	mm	0	3,144122
σ_x^{asph}	-	0	-0,079513
σ_y^{asph}	-	0	0,159028

Deneysel çalışma

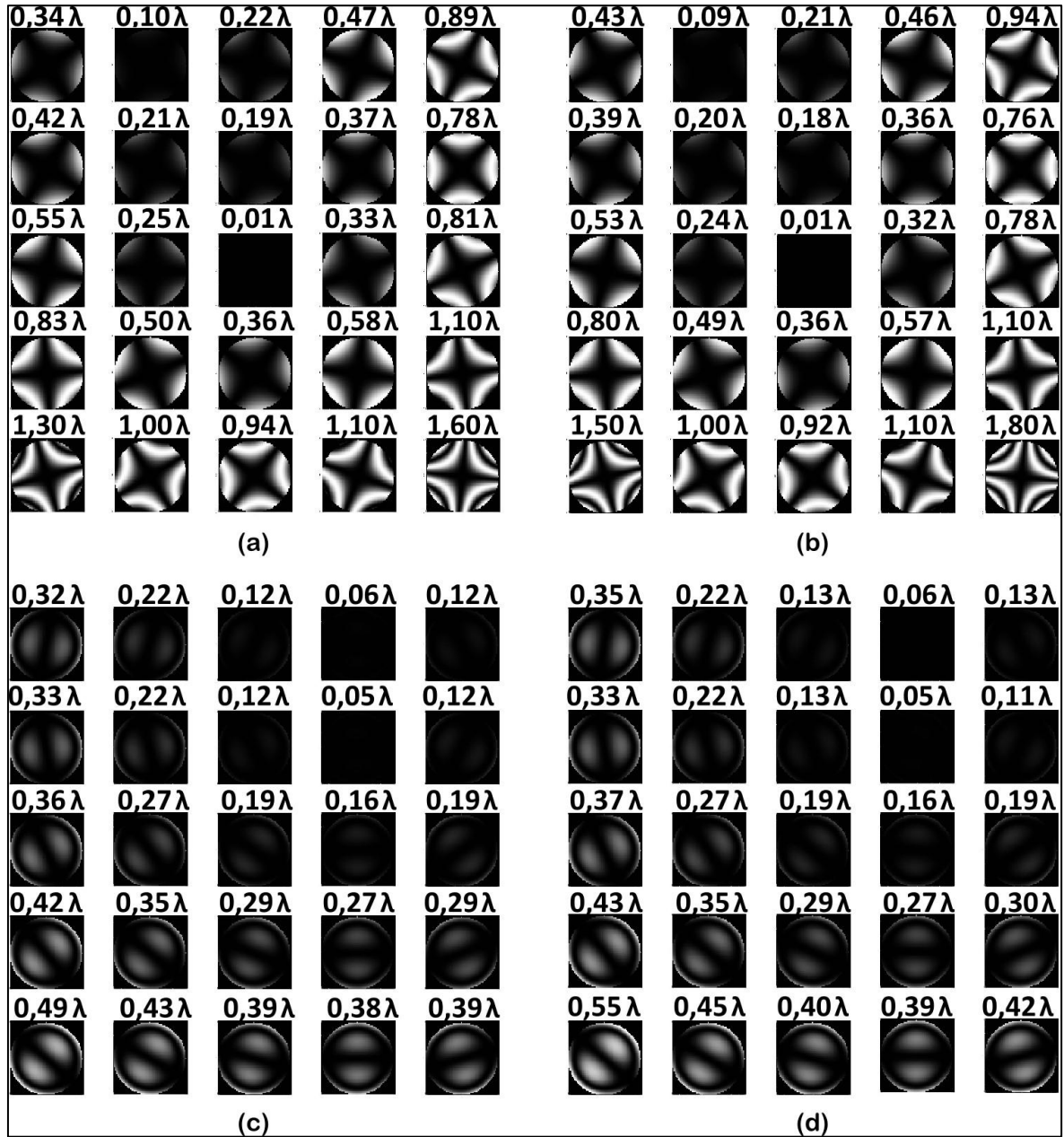
Çalışmanın yukarıda özetlenen teorik kısmında, Çizelge 5.8’de verilen hizalama kaçıklığı değerleri kullanılarak teleskobun ikincil aynasının konumu, tasarımda, kasıtlı olarak bozulmuş ve Cassegrain teleskobunun optik bileşenleri için sigma vektör katkıları, gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik olarak hesaplanan bu sigma vektör katkıların deneysel olarak doğrulanabilmesi için Cassegrain teleskobun ikincil aynası, tasarımda yaratılan senaryo ile uyumlu olacak şekilde kasıtlı olarak yanlış konumlandırılmıştır. Bu kapsamda, hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenecek olan optik eksen sapması da dikkate alınarak teleskobun ikincil aynasına $XDE=-0,216$ mm, $YDE=0,381$ mm, $ADE=-0,187^\circ$ ve $BDE=-0,077^\circ$ olarak uygulanmıştır. Bu durumda tetiklenmesi beklenen optik eksen sapması, X ve Y bileşenleri normalize alan koordinatlarına göre, sırasıyla, $-0,043$ ve $0,139$ olarak bulunmuştur. Teleskobun ikincil aynasına deneysel olarak uygulanan hizalama kaçıklığı sonrası görüntü düzleminde seçilen alan noktalarından dalga cephesi hatası ölçümleri alınmış olup sonuçlar Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Bu çalışmada, dalga cephesi hataları, RMS WFE (Wavefront Error) terimi kullanılarak adlandırılacaktır.



Şekil 5.12. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalama kaçıklığına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları

Şekil 5.12 ile verilen RMS WFE verileri, 3. derece aberasyonlar ile ilişkili Z_5 , Z_6 , Z_7 , Z_8 ve Z_9 terimlerini içermektedir. Z_9 terimi, 3. derece küresel aberasyon ile ilişkili terimdir ve bu

terim iki ayna arasındaki mesafeyi kontrol etmek için kullanılır. 3. derece astigmatizm ve koma aberasyonlarının nodal davranışını analiz etmek için, RMS WFE verileri bu aberasyonlarla ilişkili terimlere ayrıştırılır ve her terim, ilişkili olduğu aberasyonun alan bağımlılığına uygun olarak analiz edilir. Deneysel olarak elde edilen astigmatizm ve koma terimlerinin büyüklüklerini ($Z_{5/6}$ ve $Z_{7/8}$) ifade eden interferogramlar, simülasyon sonucu elde edilen interferogramlarla karşılaştırmalı olarak Şekil 5.13’de sunulmuştur.



Şekil 5.13. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu alan interferogramları, astigmatizm: $Z_{5/6}$ a) simülasyon verisi, b) deneysel veri, koma, $Z_{7/8}$: c) simülasyon verisi, d) deneysel veri

Şekil 5.13’de açıkça görüldüğü üzere, simülasyon sonucu elde edilen 3. derece astigmatizm ve koma interferogramları, deneysel olarak elde edilen interferogramlar ile genel olarak uyumludur. Cassegrain teleskobun ikincil aynasına uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri, öngörüldüğü gibi astigmatizm ve koma aberasyonları için görüntü düzleminde nodal görünüme yol açmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar arasındaki maksimum sapmanın, 5x5 matris şeklinde seçilen alan noktalarının köşe konumlarında yoğunlaştığı gözlemlenmektedir. Bu sapmanın temel nedeni, bu alan noktalarından alınan verilerin teleskobun ikincil aynasının yol açtığı karartma dolayısıyla kesintiye uğramasıdır. Deneysel interferogram sonuçlarını temel alan hesaplamalarda, bu alan noktaları hesaplamalara dahil edilmemektedir. 3. derece astigmatizm ve koma aberasyon alan vektörleri, Çizelge 5.9’da sunulmuştur.

Çizelge 5.9. Hizalama kaçıklığı senaryosu için hesaplanan aberasyon alan vektörleri

Aberasyon alan vektörleri	Birim	X bileşeni	Y bileşeni
$(a_{222} - ib_{222}) \times HFOV$	°	-0,1165	0,3030
$(a_{222} + ib_{222}) \times HFOV$	°	-0,0023	-0,0036
$a_{222} \times HFOV$	°	-0,0594	0,1497
$a_{131} \times HFOV$	°	0,1257	0,1891
a_{222}	-	-0,2376	0,5988
a_{131}	-	0,5028	0,7564

Çizelge 5.9’da verilen $a_{klm} \times HFOV$ vektörleri, alan açısı koordinatları referans alınarak hesaplanmış a_{klm} vektörleri ise normalize alan koordinatları referans alınarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar, ölçülen FZC terimlerinin alan içinde minimuma gittiği konumlar tespit edilerek gerçekleştirilmiş olup, alan astigmatizm aberasyon alan vektörünün (a_{222}) konumu, iki astigmatizm aberasyon sıfır noktasının orta noktası alınarak hesaplanmıştır.

Uygulamada, Cassegrain teleskobun görüntü düzlemindeki astigmatizm aberasyon davranışı, teleskobun birincil aynasının boyutu dolayısıyla birincil ayna astigmatik yüzey form hatası etkilerini de içerir. Ancak, bu çalışmada sunulan simülasyon kısmında, birincil ayna form hatası etkileri tasarımda birincil aynaya dahil edilmeyecek şekilde oluşturulduğundan, birincil ayna astigmatik yüzey form hatası etkisi deneysel sonuçlardan da çıkarılmıştır.

Deneysel olarak hesaplanan aberasyon alan vektörleri ile simülasyon sonucu elde edilen aberasyon alan vektörleri, karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.10'da verilmektedir. Aberasyon alan vektörleri, görüntü düzlemi merkezinden ölçülmüş olup, vektörlerin eksenel bileşenlerinden optik eksen sapması değeri çıkarılmamıştır.

Çizelge 5.10. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan aberasyon alan vektörlerinin karşılaştırmalı gösterimi

Aberasyon alan vektörleri	Birim	Deneysel		Simülasyon	
		X bileşeni	Y bileşeni	X bileşeni	Y bileşeni
$(a_{222} - ib_{222}) \times HFOV$	°	-0,1046	0,3021	-0,1165	0,3030
$(a_{222} + ib_{222}) \times HFOV$	°	-0,0141	-0,0039	-0,0023	-0,0036
$a_{222} \times HFOV$	°	-0,0594	0,1491	-0,0594	0,1497
$a_{131} \times HFOV$	°	0,1373	0,1811	0,1257	0,1891
a_{222}	-	-0,2374	0,5964	-0,2376	0,5988
a_{131}	-	0,5492	0,7244	0,5028	0,7564

Gerçek ışın izleme metodu ile hesaplanan sigma vektör katkıları ve deneysel interferogram ölçümü sonucu elde edilen aberasyon alan vektörleri ve aberasyon katsayıları kullanılarak hesaplanan sigma vektör katkıları, Çizelge 5.11'de karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

Çizelge 5.11. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan sigma vektörler katkılarının karşılaştırılmalı gösterimi

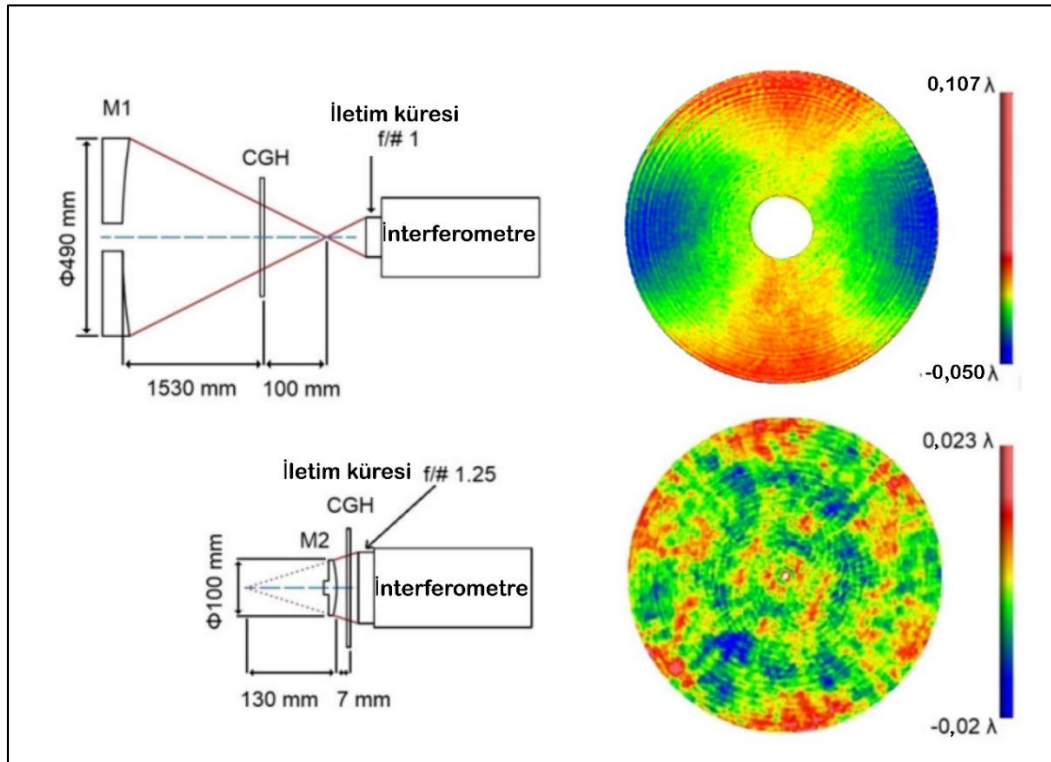
Sigma vektör katkıları	Birim	Deneysel		Simülasyon	
		X bileşeni	Y bileşeni	X bileşeni	Y bileşeni
σ_{M2}^{sph}	-	0,054662	-0,174550	0,055551	-0,175777
σ_{M2}^{asph}	-	-0,080401	0,158988	-0,079513	0,159028

Çizelge 5.11'de görüldüğü üzere, deney ve simülasyon sonucu elde edilen sigma vektör katkıları, birbiriyle maksimum %1,6 hata oranı ile uyumlu bulunmuştur. Deney ve simülasyon sonuçları arasındaki bu ihmal edilebilir farkın, alan noktalarının manuel olarak belirlenmesinden, ortam koşulları (türbülans, sıcaklık vb.) dolayısıyla alınan verilerde dalgalanmalar olmasından ve polinom fit hatalarından kaynaklandığı değerlendirilmiştir.

5.2.2. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası ve ikincil ayna hizalama kaçıklığı etkilerinin Nodal Aberasyon Teorisi kullanılarak ayrıştırılması

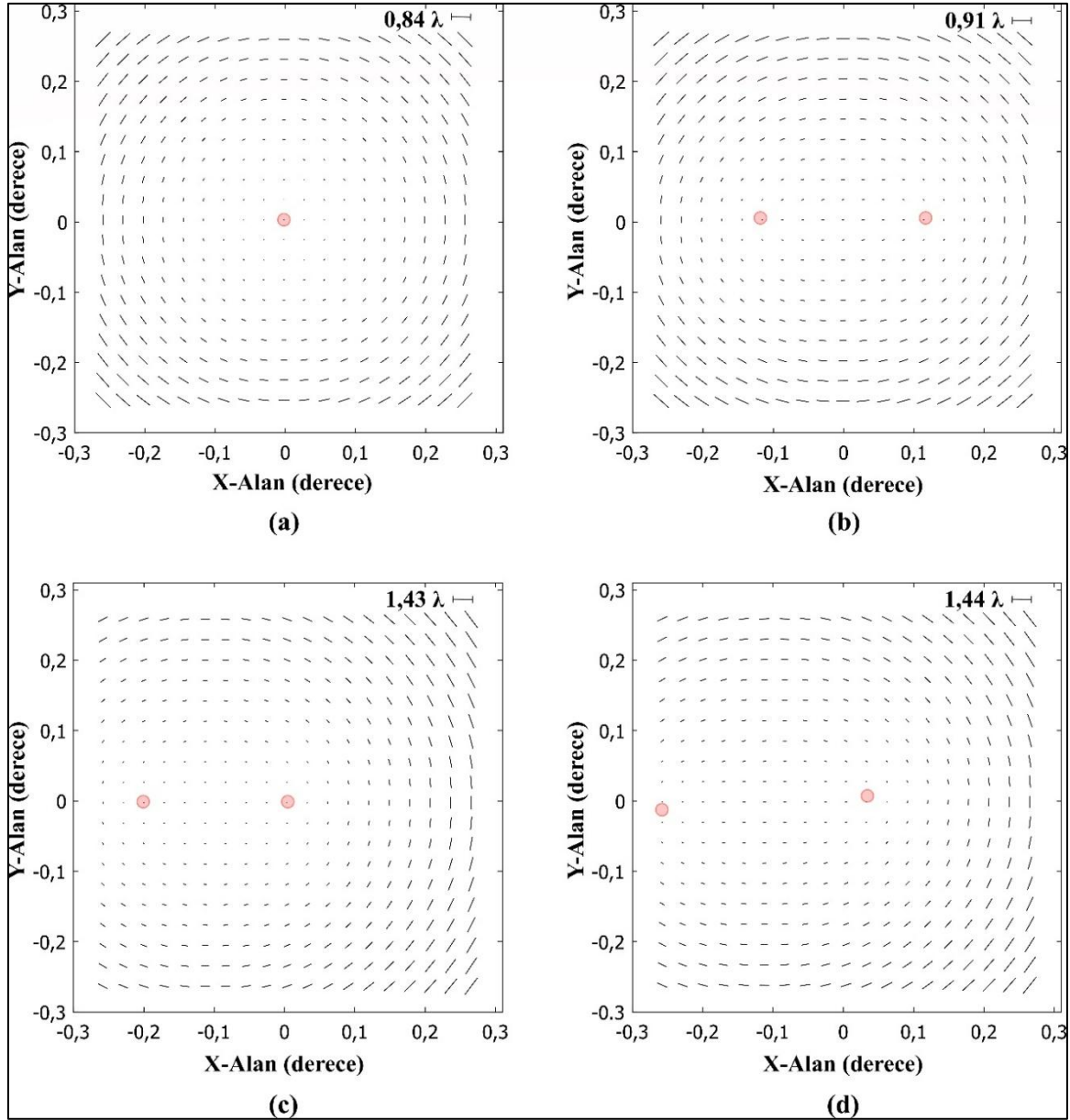
Bölüm 2'de ayrıntılı olarak açıklandığı üzere, birincil aynanın astigmatik yüzey form hatası, hizalama kaçıklığı durumunda görüntü düzleminde ortaya çıkan iki astigmatizm sıfır noktalı davranışına benzer bir karakteristiğe sahiptir. Cassegrain teleskop, yaklaşık 0,5 m çapındaki

birincil aynası nedeniyle astigmatik yüzey form hataları etkilerine duyarlıdır. Teleskop birincil aynası yüzey formu, aynanın montaj pozisyonu dikkate alınarak ölçülmüş ve ölçüm sonucunda ayna yüzey hatası değeri, yaklaşık $0,024\lambda$ (RMS SFE) olarak belirlenmiştir. Teleskobun ikincil aynasının yüzey hatası değeri ise $0,006\lambda$ olarak bulunmuştur. Teleskobun birincil ve ikincil aynasının null test düzenekleri ve yüzey form hatası ölçüm sonuçları, Şekil 5.14’da sunulmuştur. Birincil aynanın astigmatizm ile ilişkili terimleri, $C_{5,FIG}$ ve $C_{6,FIG}$, sırasıyla $-0,055\lambda$ (SFE) ve $-0,001\lambda$ (SFE) olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.14. Cassegrain teleskop birincil ve ikincil ayna için ayna yüzey form ölçüm şemaları (solda), yüzey form hataları (sağda) ($\lambda = 632,8$ nm)

Cassegrain teleskobun birincil aynasında mevcut olan astigmatik yüzey form hatası ve bu hatanın, hizalama kaçıklığı ile birlikte görüldüğü durumlarda ortaya çıkan aberasyon davranışları, Şekil 5.15’de gösterilmektedir.



Şekil 5.15. Cassgrain teleskop 3. derece astigmatizm TAAG'leri a) hizalı durum, b) hizalı ve birincil ayna astigmatik yüzey form hatası durumu, c) hizalama kaçıklığı durumu, d) hizalama kaçıklığı ve birincil ayna astigmatik yüzey form hatası durumu

Şekil 5.15a'da hizalı durumda astigmatizm sıfır noktasının görüntü düzlemi merkezinde yer aldığı açıkça görülmektedir. Şekil 5.15b'de, Cassegrain teleskop görüntü düzleminde, birincil ayna astigmatik yüzey form hatasına bağlı olarak iki astigmatizm sıfır noktasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu astigmatizm sıfır noktaları, görüntü düzlemi merkezine göre simetrik konumlanmıştır. Şekil 5.15c'de, sadece hizalama kaçıklığı durumunda oluşan iki astigmatizm sıfır noktası gözlenirken, astigmatizm sıfır noktalarından birinin görüntü düzlemi merkezine çok yakın konumlandığı görülmektedir. Şekil 5.15d'de ise hizalama

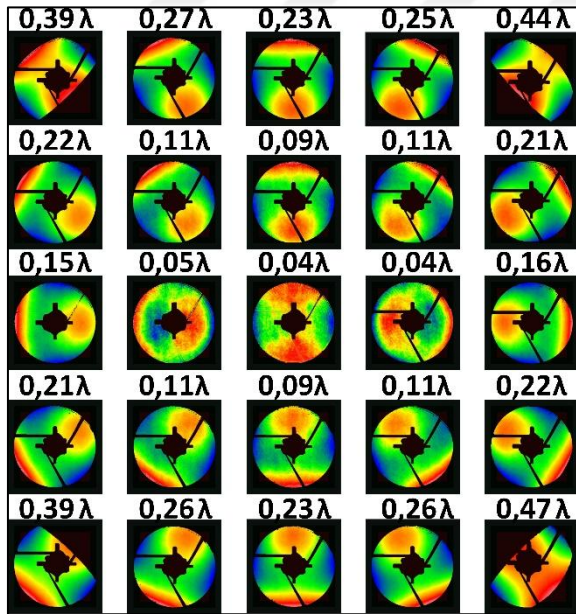
kaçıklığı ile birincil ayna astigmatik yüzey form hatası, görüntü düzlemindeki astigmatizm davranışına birlikte etki etmektedir ve astigmatizm sıfır noktası konumlarının görüntü düzlemi içerisinde yer değiştirmiş olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.15c ve Şekil 5.15d’de simüle edilen hizalama kaçıklığı değerleri, Çizelge 5.12’de verilmiştir.

Çizelge 5.12. Cassegrain teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri

Hizalama kaçıkları	XDE _{M2} (mm)	YDE _{M2} (mm)	ADE _{M2} (°)	BDE _{M2} (°)
M2	-0,375	0	0	-0,166

Hızalı durum (Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası varlığı)

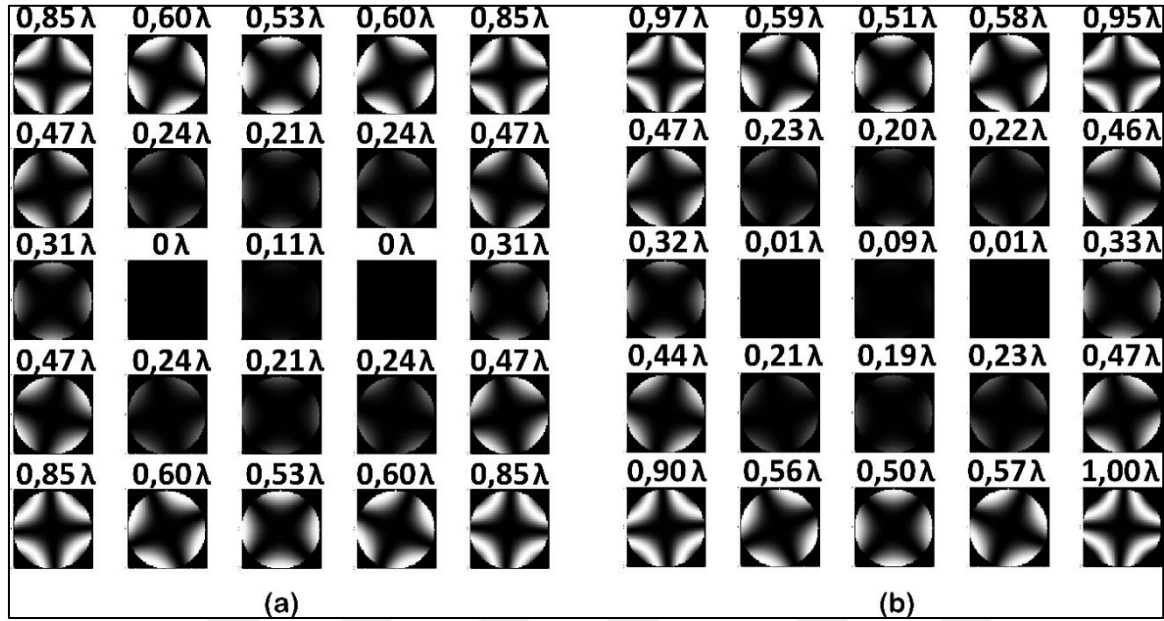
Cassegrain teleskobun birincil aynasındaki astigmatik yüzey form hatasının indüklediği astigmatizm sıfır noktalarının alan içindeki yerleşiminin deneysel olarak araştırılabilmesi için, öncelikle hizalı durumdaki teleskobun görüntü düzleminde seçilen alan noktalarından interferometrik ölçümler alınmış ve elde edilen RMS WFE sonuçları, Şekil 5.16’de sunulmuştur.



Şekil 5.16. Cassegrain teleskobun hizalı durumu için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları

Şekil 5.16’de görüldüğü üzere, Alan(-0,125°, 0°) ve Alan(0,125°, 0°) noktalarında koma aberasyonu baskın olarak gözlenmektedir. Bu durum, bu noktalara yakın konumda iki adet

astigmatizm aberasyonunun sıfır olduğu nokta olduğu anlamına gelmektedir. Ham RMS WFE verileri, ilgili FZC terimlerine ayrıştırıldıktan sonra hesaplanan 3. derece astigmatizm aberasyonu ile ilişkili terimlerin büyüklükleri ($Z_{5/6}$), hizalı durum simülasyonu sonucu elde edilen terimlerle karşılaştırmalı olarak Şekil 5.17’de sunulmuştur.



Şekil 5.17. Cassegrain teleskop hizalı durum alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$: a) simülasyon verileri, b) deneysel veriler

Hızlı durumda, aynalardan gelen yüzey form hatası mevcut değilse, astigmatizm aberasyonu eksen dışı bir aberasyon olduğu için, Alan ($0^\circ, 0^\circ$) noktasından alınan astigmatizm ölçüm sonuçları sıfır olmalıdır. Şekil 5.17a’da görüldüğü gibi, bu noktada ölçümden kaynaklanan belirsizlikler dışında astigmatizm terimlerinin görülmesi, başta birincil ayna yüzey form hatası olmak üzere, ayna yüzey form hataları ile ilgilidir. Şekil 5.17b ile gösterilen deneysel $Z_{5/6}$ değerleri de simülasyon sonuçları ile uyumludur. Deneysel olarak Alan ($0^\circ, 0^\circ$) noktasından ölçülen Z_5 ve Z_6 terimleri sırasıyla $-0,095\lambda$ ve $-0,006\lambda$ ’dır. Verilen terimler, dalga cephesi hatası cinsindendir ve ölçülen değerler yüzey form hatası cinsinden ifade edildiğinde, birincil ayna astigmatik yüzey form hatası sonuçları ile yaklaşık olarak uyumlu olduğu görülmektedir. Her iki durum için de birincil ayna astigmatik yüzey form hatası kaynaklı astigmatizm sıfır noktaları görüntü düzlemi merkezine göre simetrik olarak konumlanmıştır. Cassegrain teleskobun görüntü düzleminde oluşması beklenen astigmatizm sıfır noktalarının tam koordinatları, terimler ve yapısal tasarım parametreleri kullanılarak hesaplanabilir. Hızlı durum için astigmatizm sıfır noktalarının konumu, $C_{5,FIG}$

ve $C_{6,FIG}$ değerlerinin birincil ayna astigmatik yüzey form hatası olarak alındığı ve deneysel Z_5 ve Z_6 terimleri kullanılarak analiz edildiği durumları için karşılaştırmalı olarak Çizelge 5.13’de verilmiştir.

Çizelge 5.13. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası kaynaklı oluşan astigmatizm sıfır noktalarının koordinatları

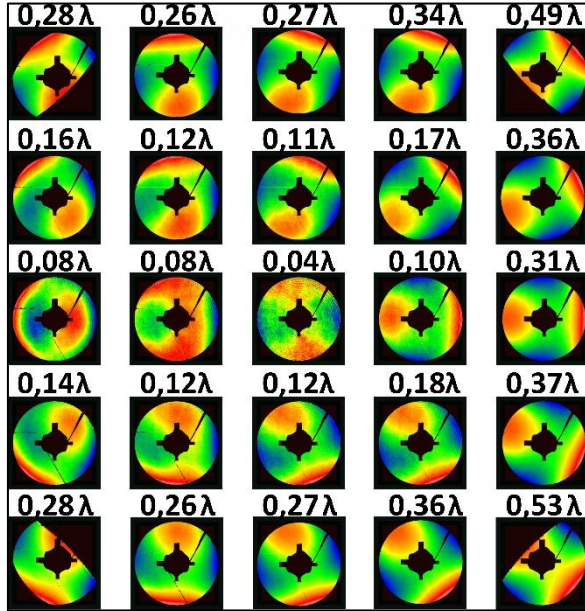
Astigmatizm sıfır noktaları	M1 ($C_{5,FIG}$ $C_{6,FIG}$)		Alan ($0^\circ, 0^\circ$) ölçümleri		Deneysel analiz	
	X ($^\circ$)	Y ($^\circ$)	X ($^\circ$)	Y ($^\circ$)	X ($^\circ$)	Y ($^\circ$)
Nod 1	-0,1264	0,0007	-0,1184	-0,0039	-0,1188	-0,0094
Nod 2	0,1264	-0,0007	0,1184	0,0039	0,1165	0,0015

Çizelge 5.13’te verilen ilk durumda, astigmatizm nodları birincil aynanın yüzey form hatasının ölçülmesi sonucu elde edilen $C_{5,FIG}$ ve $C_{6,FIG}$ terimleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İkinci durumda, görüntü düzlemi merkezinden ölçülen Z_5 ve Z_6 değerleri kullanılmıştır. Üçüncü durumda ise, astigmatizm nodları, görüntü düzleminde indüklenen FZC terimlerinin analiz edilmesi ve aberasyon sıfır noktalarının belirlenmesi yoluyla tespit edilmiştir. Çizelgede görüldüğü üzere, bu üç durum için astigmatizm sıfır noktalarının konumları birbiri ile uyumludur. Hesaplanan nod konumları arasındaki ihmal edilebilir farkın, ikincil aynadan gelen astigmatizm katkısı, deney düzeneğinden gelen belirsizlikler ve birincil aynanın form hatasının ortam koşullarına bağlı olarak değişmesi dolayısıyla olduğu değerlendirilmiştir.

Hizalama kaçıklığı durumu (birincil ayna astigmatik yüzey form hatası varlığı)

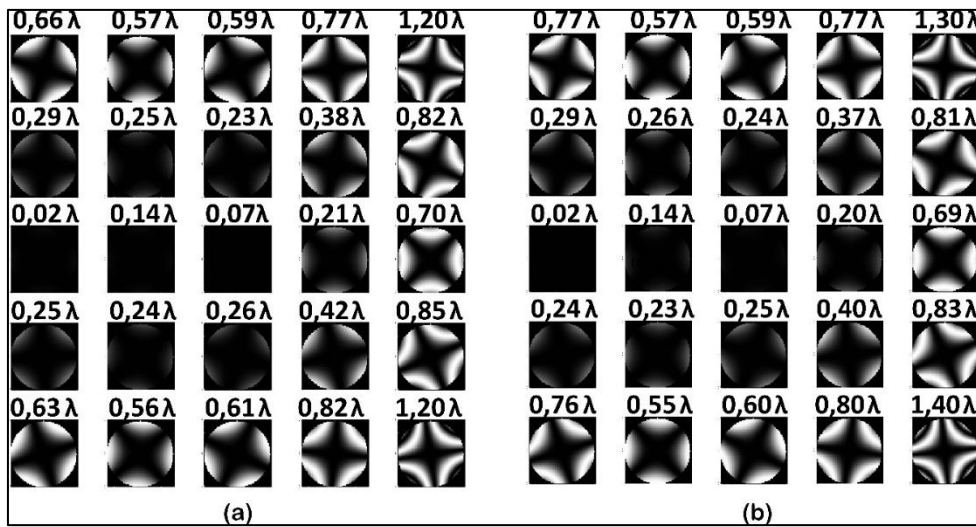
Hizalama kaçıklığı ve birincil ayna form hatasının birlikte görüldüğü durum için Çizelge 5.12’de verilen hizalama kaçıklığı görünümü deneysel olarak yaratılmıştır. Bu kapsamda, teleskobun ikincil aynasına $XDE=-0,300$ mm ve $BDE=-0,130^\circ$ hizalama kaçıklığı değerleri uygulanmıştır. Çizelgede verilen hizalama kaçıklığı değerleri ile uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri arasındaki fark, hizalama kaçıklığı durumunda oluşan optik eksen sapmasının varlığından kaynaklanmaktadır; optik tasarım programında yaratılan Tüm Alan Aberasyon Gösterim (TAAG) grafikleri optik eksen sapmasını içermez ancak deneysel ölçümlerde optik eksen sapması dikkate alınmalıdır. Verilen hizalama kaçıklığı değerleri için tetiklenen optik eksen sapması, X ve Y bileşenleri normalize alan koordinatları referans alınarak, sırasıyla -0,088 ve 0 olarak verilmiştir. Bu durumda, astigmatizm sıfır noktalarının görüntü düzlemindeki yerleşiminin deneysel olarak incelenebilmesi için öncelikle hizalama

kaçıklığına sahip teleskopun görüntü düzleminde belirlenen alan noktalarından interferometrik ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları Şekil 5.18’de sunulmaktadır.



Şekil 5.18. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalama kaçıklığına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları

İleri analiz için her bir alan noktasından alınan RMS WFE dalga cephesi hatası sonuçları, Z_5 , Z_6 , Z_7 ve Z_8 bileşenlerine ayrıştırılmış ve 3. derece astigmatizm terimlerinin büyüklüklerini içeren interferogramlar Şekil 5.19’de sunulmuştur.



Şekil 5.19. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu alan interferogramları, astigmatizm $Z_{5/6}$: a) simülasyon verileri, b) deneysel veriler

Şekil 5.19’de görüldüğü üzere, hizalama kaçıklığı ve birincil ayna form hatasının toplam etkisiyle astigmatizm sıfır noktaları, Alan $(-0,250^\circ, 0^\circ)$ ve Alan $(0^\circ, 0^\circ)$ noktalarına yakın konumlanacak şekilde oluşmuştur. Şekil 5.19a’da verilen simülasyon, deneysel olarak elde edilen hizalama kaçıklığı durumunun simülasyonudur. Yaratılan hizalama kaçıklığı durumu için astigmatizm sıfır noktalarının konumu hem simülasyon üzerinden hem de deneysel analiz sonucu ile hesaplanmış olup sonuçlar, Çizelge 5.14’de sunulmuştur.

Çizelge 5.14. Hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan astigmatizm nod konumlarının simülasyon ve deney için karşılaştırmalı gösterimi

Astigmatizm sıfır noktaları	Simülasyon		Deneysel analiz	
	X bileşeni ($^\circ$)	Y bileşeni ($^\circ$)	X bileşeni ($^\circ$)	Y bileşeni ($^\circ$)
Nod 1	-0,2476	-0,0112	-0,2479	-0,0073
Nod 2	0,0430	0,0112	0,0432	0,0057

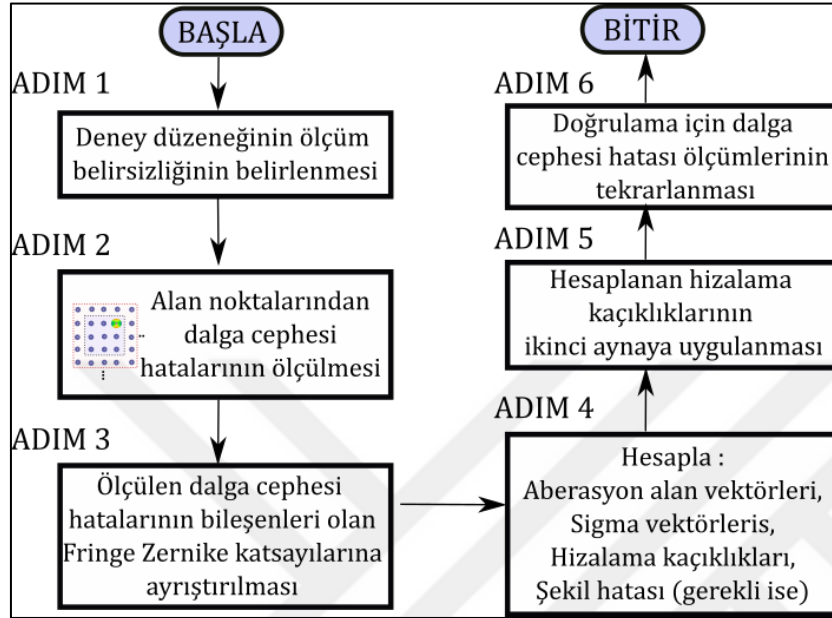
6. CASSEGRAIN TELESKOBUN NAT KULLANILARAK DENEYSEL OLARAK HIZALANMASI

Teleskop sistemlerinin tasarım aşamasında öngörülen görüntüleme performansında görüntüleme sağlayabilmeleri için teleskop optik bileşenlerin hassas şekilde hizalanması gerekmektedir. Teleskop hizalama süreci, karmaşık ve zaman alıcı olabilir. Bu yüzden, teleskopların hizalanmasına yönelik pratik hizalama yöntemlerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bölüm 1’de ele alındığı üzere, bu kapsamda kullanılan yöntemler genellikle aberasyon teorisini temel almayan sayısal yöntemlerdir ve aynaların yüzey hatası, aberasyonların kendilerine özgü alan bağımlılıkları gibi faktörleri dikkate almazlar. Hizalama kaçıklığına sahip optik sistemlerin aberasyon davranışı, Nodal Aberasyon Teorisi ile açıklanabilmektedir. İki aynalı teleskopların hizalanmasına yönelik Nodal Aberasyon Teorisi temelli yaklaşım, atıf yapılan çalışmada sunulmuştur ancak çalışma deneysel bir uygulama ile desteklenmemiştir (Schmid, 2010). Bölüm 2’de detaylandırıldığı üzere, hizalama kaçıklığı durumunda meydana gelen 3. derece astigmatizm ve koma gibi alan bağımlı aberasyonların alan bağımlılığındaki değişim, bu aberasyonların teleskop görüntü düzlemindeki dağılımlarında nodal görünüm oluşturmaya sebep olur. Nodal Aberasyon Teorisi temelli yaklaşımlar, genel olarak bu nodal görünümün analiz edilmesi ve ilgili aberasyon sıfır noktalarının konumunun hassasiyetle belirlenmesi prensibine dayanır. Bu durum, görüntü düzleminin genel görünümü ortaya çıkarmak için farklı alan noktalarından çok sayıda interferometrik ölçüm almayı gerektirir ancak çoğu zaman alınan interferometrik ölçümlerin çözünürlüğü, aberasyon sıfır noktalarının hassasiyet ile belirlenmesi için yeterli olmamaktadır. Bu bölümde, aberasyon alan vektörlerinin aberasyon sıfır noktalarının konumlarından bağımsız olarak hesaplanabileceği, detayları Bölüm 4.2’de sunulan yöntem için deneysel bir doğrulama çalışması sunulmuştur.

6.1. Cassegrain Teleskop için NAT Tabanlı Hizalama Yaklaşımı

Hizalama hatalarının doğru bir şekilde hesaplanabilmesi için ilk ve en önemli koşul, teleskobun birinci derece optik tasarım parametrelerinin eksiksiz ve doğru bir şekilde belirlenmesidir.

Teleskobun ikincil aynasında mevcut ancak miktarı bilinmeyen hizalama kaçıklıkları, Nodal Aberasyon Teorisi çerçevesinde ve aşağıdaki sıralamaya uygun olarak hesaplanabilir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. İki aynalı teleskop sistemlerinin NAT kullanılarak hizalanması için önerilen metodun adımlarının akış diyagramında gösterimi

Şekil 6.1’de verilen akış şemasının detayları aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Öncelikle deney düzeneğinden ve ortamdan kaynaklanan ölçüm belirsizliği belirlenmelidir. Daha sonra, görüntü düzlemi merkezinden ölçülen RMS WFE değeri ile teorik hedef RMS WFE değeri karşılaştırılmalı ve bu fark, hesaplanan belirsizlik değeri ile karşılaştırılmalıdır. Hesaplanan ölçüm belirsizliği, teorik değerden maksimum sapma miktarını ifade eder ve kabul limiti olarak değerlendirilir. Bu işlem, bir alan ölçüm noktasından alınan ardışık interferometrik ölçümlerin, ölçüm ortalamasından ne kadar saptığının belirlenmesi ile gerçekleştirilebilir. Ölçümler, 8 adet interferometrik ölçüm ve her bir ölçüm, 64 ortalama olacak şekilde uygulanmıştır.

Adım 2: Dalga cephesi hatası ölçümleri, alan içinde $m \times n$ şeklinde seçilen alan noktalarından alınması önem arz etmektedir. Böylece, interferometrik olarak ölçülen terimler her iki ekseninde uygun polinomlara fit edilebilmekte ve uygulanan fit işlemi sonucunda astigmatizm ve koma alan vektörleri hesaplanabilmektedir.

Adım 3: Her bir alan noktasından alınan interferometrik dalga cephesi hatası ölçümleri, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8 'i ve Z_9 Fringe Zernike terimlerine ayrıştırılır. Z_9 , 3. derece küresel aberasyon ile ilişkili FZC terimi olup, ikincil aynanın enine yer değiştirmelerinden etkilenmez ancak teleskobun ikincil aynasının Z eksenindeki hareketlerinden etkilenir. Bu terimin kontrol edilmesiyle, teleskobun birincil ve ikincil aynası arasındaki mesafe hassas şekilde ayarlanabilir. Bu sebeple, öncelikle Z_9 terimi, sıfır olacak ikincil ayna Z eksen konumu ayarlanmalıdır.

Adım 4: RMS WFE verilerinden izole edilen Z_5, Z_6, Z_7 ve Z_8 terimleri analiz edilerek, hizalama kaçıklığına bağlı olarak oluşan a_{222} ve a_{131} vektörleri deneysel olarak hesaplanır. Bu vektörlerin X ve Y bileşenleri kullanılarak σ_{M2}^{sph} ve σ_{M2}^{asph} vektörlerinin X ve Y bileşenleri hesaplanır. Daha sonra, sferik ve asferik sigma vektörlerinin hizalama kaçıklıkları ile ilişkisi kullanılarak ikincil aynanın hizalama kaçıklıkları hesaplanır.

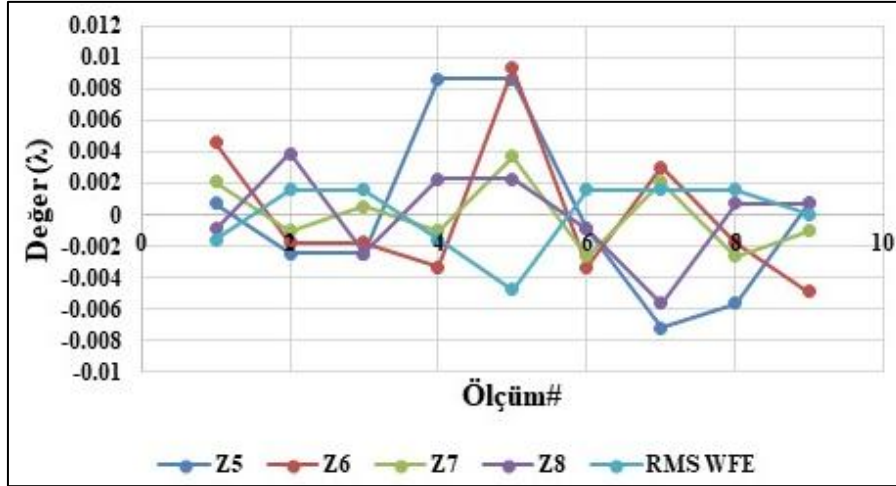
Adım 5: Hesaplanan hizalama kaçıklığı değerleri, teleskop ikincil aynasının mevcut hizalama kaçıklığı değerleridir ve hesaplanan değerlerin zıt işaretli hali, teleskobun ikincil aynasına uygulanarak hizalama işlemi gerçekleştirilir.

Adım 6: Son aşamada doğrulama için seçilen alan noktalarından yeniden ölçüm alınır ve bu veriler ile işlem doğrulanır. Teorik olarak, hizalı durumda, a_{222} ve a_{131} vektörlerinin ve dolayısıyla sigma vektör katkılarının sıfıra yakın olması beklenir. Bu koşul sağlandığında, hizalama işlemi tamamlanmış olur ve sonuçlandırılır. Gerekli görülmesi halinde, hizalama işlemi tekrarlanır.

6.2. Cassegrain Teleskobun İkincil Aynasındaki Hizalama Kaçıklıklarının Hesaplanması

Hizalama işlemine başlamadan önce, bir alan noktasından alınan ardışık RMS WFE ölçümleri ile türbülans, titreşim, gibi çevresel etkilerin belirsizliği tespit edilmiştir. İnterferometrik ölçümlerin her biri, 64 ortalama ile gerçekleştirilmiştir.

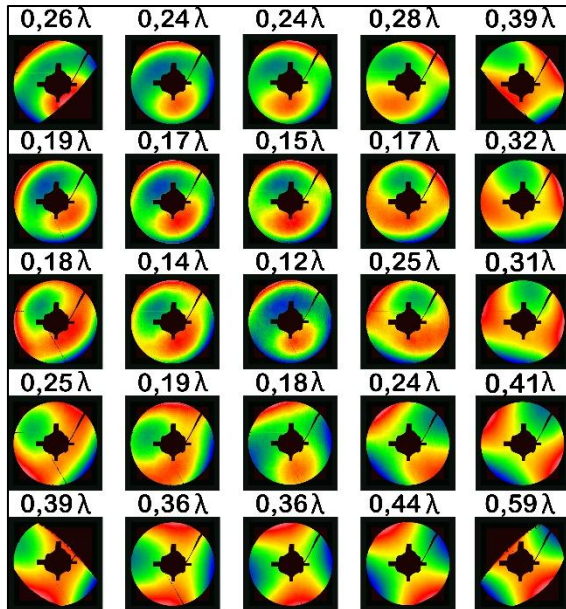
İstatiksel analiz kapsamında, Alan $(-0,125^\circ, 0,250^\circ)$ noktasından alınan ardışık ölçümler sonucu elde edilen her bir Z_5, Z_6, Z_7, Z_8 ve RMS WFE değerinin ortalamadan sapma miktarları, grafiksel olarak Şekil 6.2'de sunulmaktadır.



Şekil 6.2. Alan $(-0,125^\circ, 0,250^\circ)$ noktasından elde edilen her bir Z_5 , Z_6 , Z_7 , Z_8 ve RMS WFE değerinin ortalamadan sapma miktarlarının grafiksel gösterimi

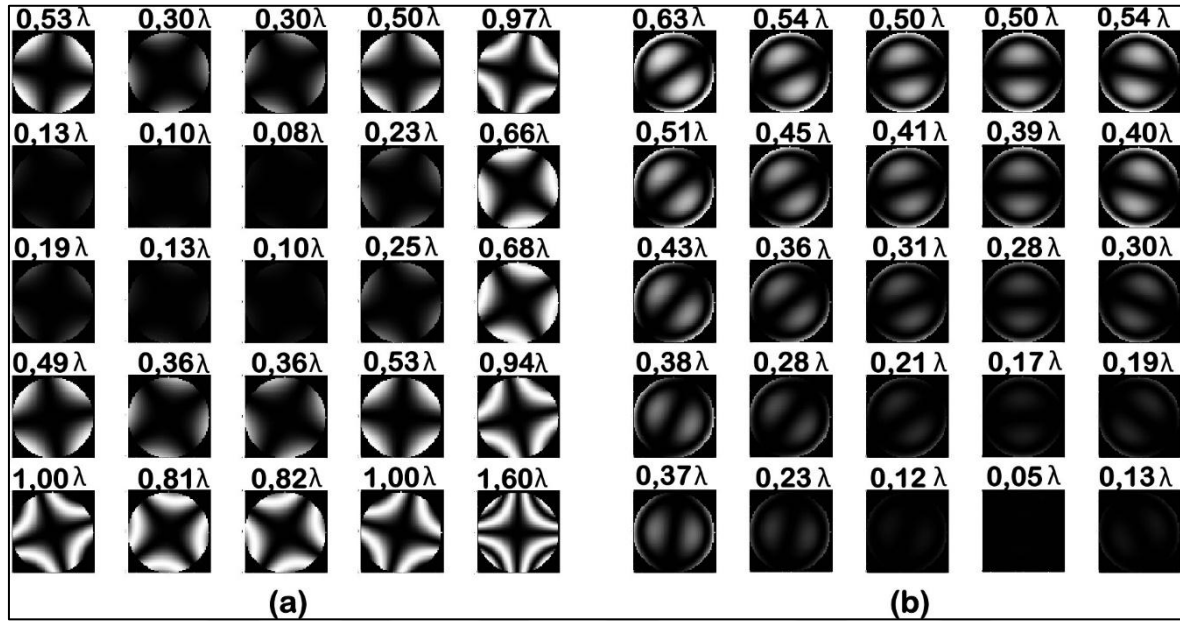
Verilen grafik ve çizelge incelendiğinde, ortalamadan maksimum sapma miktarının RMS WFE değeri için maksimum $\pm 0,005\lambda$ olduğu görülmüştür.

Hizalama kaçıklığına sahip Cassegrain teleskobun görüntü düzleminden alınan interferometrik RMS WFE ölçüm sonuçları aşağıda verilen Şekil 6.3’de sunulmuştur.



Şekil 6.3. Cassegrain teleskop ikincil aynası bilinmeyen hizalama kaçıklıklarına sahip olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları

Görüntü düzleminden alınan RMS WFE değerleri, 3. derece aberasyonlar ile ilişkili FZC terimlerine fit edilerek elde edilmiştir. Hizalama kaçıklığına bağlı olarak ortaya çıkan nodal görünümü astigmatizm ve koma aberasyonlarının büyüklükleri hesaplanarak aşağıda verilen Şekil 6.4’de görselleştirilmiştir.



Şekil 6.4. Cassegrain teleskop alan interferogramları: a) astigmatizm $Z_{5/6}$ (Birincil ayna form hatası dahil), b) koma $Z_{7/8}$

Görüntü düzleminde 5x5’lik matris oluşturacak şekilde seçilmiş noktalardan alınan interferogramlardan 3. derece astigmatizm ve koma sıfır noktalarının hangi alan noktasına yakın konumlanacağı kabaca anlaşılmaktadır. Bu yöntemde, temelde Z_5 , Z_7 ve Z_8 Fringe Zernike terimlerinin alandaki dağılımları kullanılır. Bu terimler, kendi alan bağımlılıklarına uygun polinomlara fit edilmiş, polinom kökleri analiz edilmiş ve söz konusu aberasyon alan vektörlerinin (a_{222} ve a_{131}) X ve Y bileşenleri hesaplanmıştır. Hesaplanan a_{222} ve a_{131} vektörleri deneysel datadan doğrudan hesaplanan vektörlerdir ve optik eksen sapması etkisini içerirler. Deneysel ölçüm sonuçlarından optik eksen sapması (H_{AR}) etkisinin ($H_x=-0,0633$ ve $H_y=0,0453$) çıkarılmış olduğu aberasyon alan vektörleri Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

Çizelge 6.1. Bilinmeyen bir hizalama kaçıklığı durumu için hesaplanan aberasyon alan vektörleri

Aberasyon alan vektörleri	Birim	Deneysel – Optik eksen sapması	
		X bileşeni	Y bileşeni
$a_{222} \times HFOV$	°	-0,06607	0,061372
$a_{131} \times HFOV$	°	0,14533	-0,31813
a_{222}	-	-0,26428	0,24549
a_{131}	-	0,58132	-1,27251

Çizelge 6.1’de verilen aberasyon alan vektörleri kullanılarak deneysel olarak hesaplanan sigma vektörleri, Çizelge 6.2’de, sigma vektörler kullanılarak hesaplanan ikincil ayna hizalama kaçıklığı değerleri, Çizelge 6.3’de sunulmuştur.

Çizelge 6.2. Aberasyon alan vektörlerinin analizi sonucu elde edilen sigma vektör katkıları (Hizalama kaçıklığı mevcut durum)

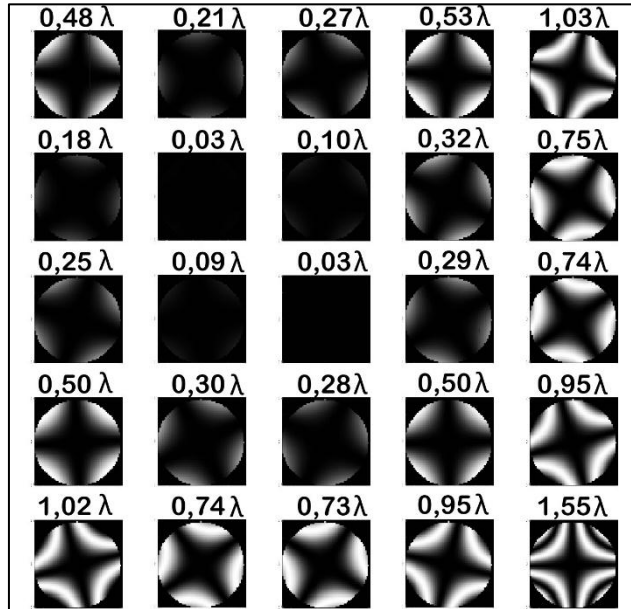
Sigma vektörleri	Birim	Deneysel	
		X bileşeni	Y bileşeni
σ_{M2}^{sph}	-	0,0613	-0,0439
σ_{M2}^{asph}	-	-0,0889	0,0977

Çizelge 6.3. İkincil ayna için hesaplanan hizalama kaçıklıkları (Hizalama kaçıklığı mevcut durum)

Hizalama kaçıklıkları	XDE _{M2} (mm)	YDE _{M2} (mm)	ADE _{M2} (°)	BDE _{M2} (°)
M2	-0,280	0,307	-0,096	-0,106

Hizalama kaçıklığına sahip Cassegrain teleskobun görüntü düzlemindeki 5x5 noktadan elde edilen astigmatizm terimlerinin büyüklüğünü ifade eden $Z_{5/6}$ interferogramlarının, birincil ayna form hatası içermeyen versiyonu, Şekil 6.5’te sunulmuştur. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının datadan çıkarılabilmesi için Alan (0°, 0°) noktasındaki (ölçüm koordinatlarına göre mekanik eksen) hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen Z_5 ve Z_6 terimleri hesaplanır. Bu kapsamda Eş. 3.39 ve Eş. 3.40 $H_x=0,0633$ ve $H_y=-0,0453$ değerleri için çözülür. Bu değerler, OAR ve görüntü düzleminin kesişim noktasından Alan (0°,0°) noktasına olan uzaklık olup optik eksen sapmasının konumuna göre belirlenir. Hesaplanan Z_5 ve Z_6 değerleri, hizalama kaçıklığına bağlı olarak Alan (0°,0°) noktasında tetiklenen Fringe Zernike terimlerini vermekte olup, hizalama kaçıklığına bağlı tetiklenen astigmatizm terimleri büyüklüğü $Z_{5/6}=0,033\lambda$ olarak hesaplanmıştır. Hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen Z_5 ve Z_6 değerlerinin Alan (0°,0°) noktasından ölçülen terimlerden ($Z_{5/6}=0,102\lambda$)

çıkarılmasıyla, birincil ayna astigmatik yüzey form hatası değeri $Z_{5/6} = 0,089\lambda$ olarak bulunmuş ve bu değer tüm datadan çıkarılmıştır.



Şekil 6.5. Cassegrain teleskop hizalama kaçıklığı durumu için alan interferogramları: astigmatizm $Z_{5/6}$ (Birincil ayna form hatası dahil değil)

6.3. Cassegrain Teleskobu İkincil Aynasının Hizalanması

Cassegrain teleskobun ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklıkları, yukarıda belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler, ikincil aynanın mevcut konumunu gösterdiğinden, hesaplanan değerlere ters yönlerde uygulanan hareketler ile ikincil ayna yeniden konumlanmıştır. Teleskobun hizalı durumunu doğrulamak için seçilen alan noktalarından tekrar RMS WFE ölçümü alınmış ve sonuçlar, yukarıda detaylandırıldığı şekilde analiz edilmiştir. Yapılan analiz sonucunda elde edilen aberasyon alan vektörlerinin hesaplama sonuçları, Çizelge 6.4’te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Hizalama işleminden sonra hesaplanan aberasyon alan vektörleri

Aberasyon alan vektörleri (Hizalı sistem)	Birim	Deneysel	
		X bileşeni	Y bileşeni
$a_{222} \times HFOV$	°	0,0008	0,00075
$a_{131} \times HFOV$	°	-0,0054	-0,0028
a_{222}	-	0,0032	0,0030
a_{131}	-	-0,0216	-0,0112

Bir sonraki adım olarak, bu değerler kullanılarak sigma vektör bileşenleri hesaplanmış ve bulunan değerler, Çizelge 6.5'te sunulmuştur.

Çizelge 6.5. Aberasyon alan vektörlerinin analizi sonucu elde edilen sigma vektör katkıları (Hizalama işleminden sonra)

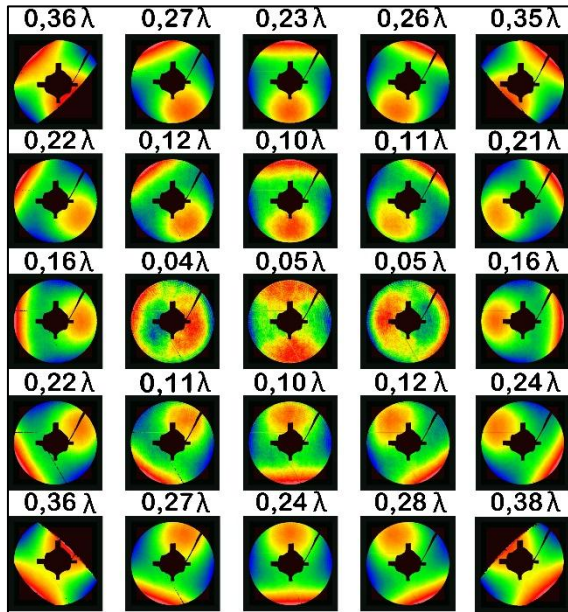
Sigma vektörleri (Hizalı sistem)	Birim	Deneysel	
		X bileşeni	Y bileşeni
σ_{M2}^{sph}	-	-0,0004	-0,0006
σ_{M2}^{asph}	-	0,0014	0,0011

Hesaplanan σ_{M2}^{sph} ve σ_{M2}^{asph} vektörleri ve ikincil ayna hizalama kaçıklıkları arasındaki ilişki kullanılarak, ikincil ayna kalıntı hizalama kaçıklıkları hesaplanmış ve hesaplama sonucunda bulunan ikincil ayna hizalama kaçıklıkları, Çizelge 6.6 ile verilmiştir.

Çizelge 6.6. Hizalama işlemi sonrası ikincil ayna için hesaplanan kalıntı hizalama kaçıklıkları

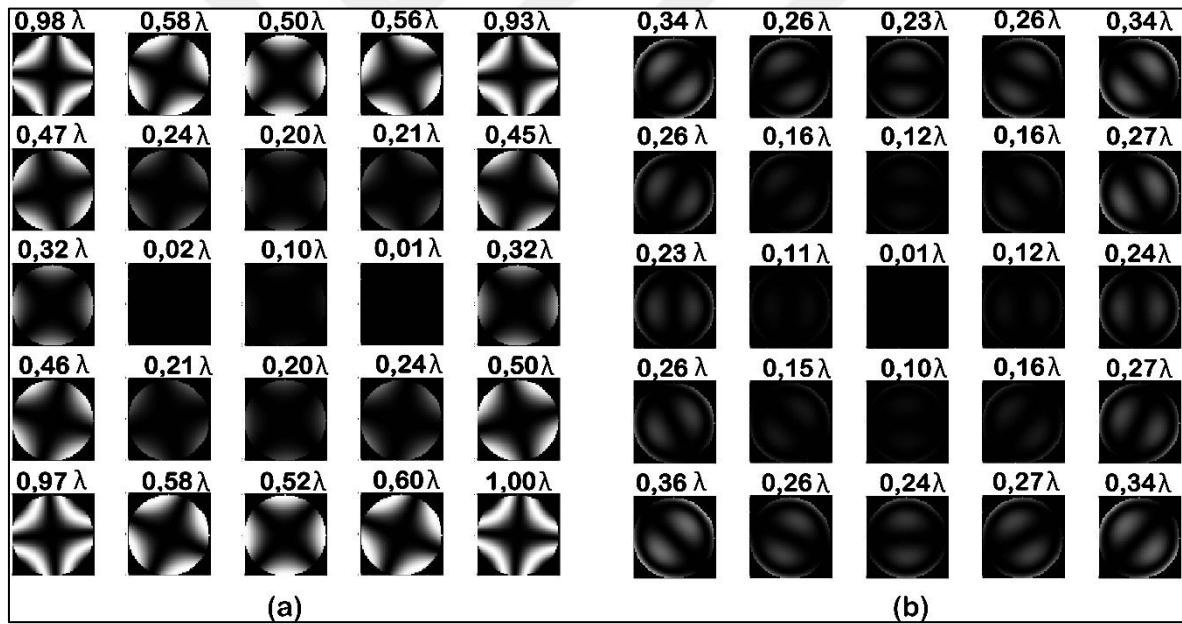
Hizalama kaçıklıkları	XDE _{M2} (mm)	YDE _{M2} (mm)	ADE _{M2} (°)	BDE _{M2} (°)
M2	0,004	0,003	-0,001	0,001

Cassegrain teleskop sistemin hizalı durumu için görüntü düzleminin seçilen noktalarından alınan dalga cephesi hatası ölçüm sonuçları, Şekil 6.6'da gösterilmektedir.



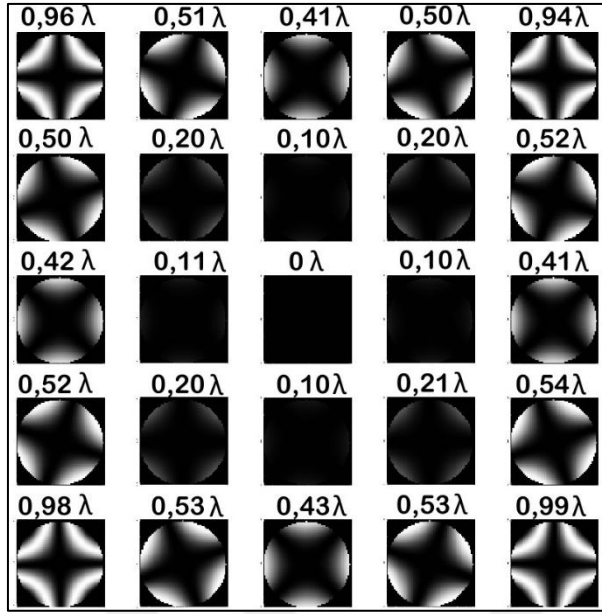
Şekil 6.6. Cassegrain teleskop ikincil aynasının hizalı olduğu durum için interferometrik ölçümlerden elde edilen RMS WFE sonuçları

Şekil 6.7’de görüldüğü gibi, Alan($-0,125^\circ$, 0°) ve Alan($0,125^\circ$, 0°) konumlarında civarında astigmatizm aberasyonunun baskın olmadığı ve dolayısıyla bu alan noktalarında koma aberasyon görüntüsünün mevcut olduğu görülmektedir. Bunun sebebi, temelde birincil ayna astigmatizm form hatasının varlığıdır. Birincil ayna form hatası neticesinde indüklenen astigmatizm sıfır noktaları ile hizalama kaçıklığı neticesinde indüklenen astigmatizm sıfır noktalarını ayıran en önemli fark, bu form hatası kaynaklı astigmatizm noktalarının, görüntü düzleminin merkezine göre simetrik olarak yerleşmiş olmasıdır. Bu simetri dolayısıyla, bu astigmatizm sıfır noktalarının orta noktasında konumlanmış olan a_{222} vektörü sıfıra yakın olarak ölçülmektedir. Birincil ayna form hatası kaynaklı Alan ($0^\circ, 0^\circ$) noktasında ölçülmesi beklenen RMS WFE değeri $0,0481\lambda$ ’dır. Hizalı durumda ölçülen değer ise $0,0458\lambda$ olarak ölçülmüştür. Ölçülen değer teorik değerden sapma miktarı $0,003\lambda$ olup, bu sapma kabul edilebilir limitler içerisinde.



Şekil 6.7. Cassegrain teleskop ikincil ayna hizalama sonrası durumu için alan interferogramları a) astigmatizm $Z_{5/6}$, b) koma $Z_{7/8}$

Şekil 6.7a’da verilen astigmatizm interferogramları, alan boyunca sabit olacak şekilde astigmatizm terimlerine eklenen astigmatizm form hatası terimlerini de içermektedir. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatası içermeyen alan noktaları astigmatizm büyüklük değerleri Şekil 6.8’de sunulmuştur.



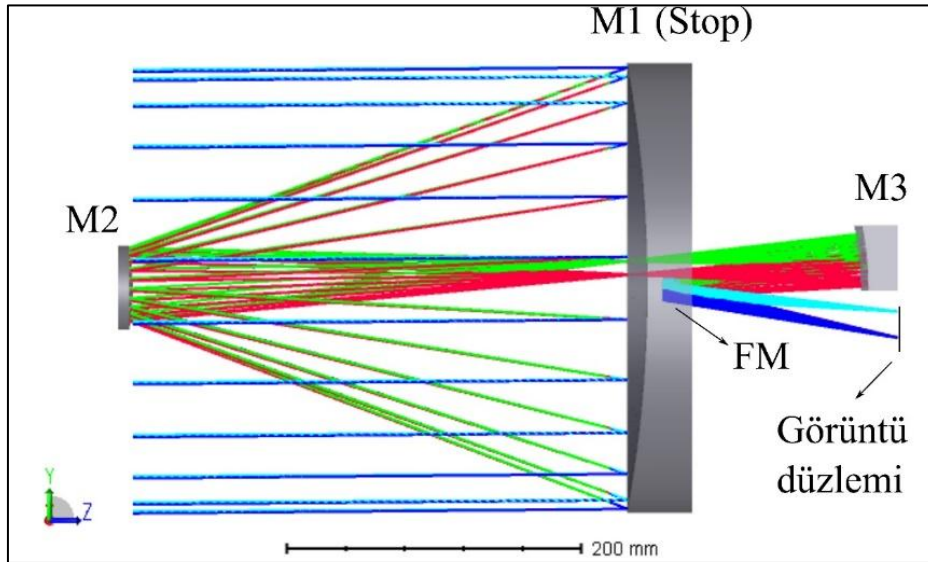
Şekil 6.8. Cassegrain teleskop hizalı durumu için alan interferogramları: astigmatizm $Z_{5/6}$
(Birincil ayna form hatası dahil değil)

7. NODAL ABERASYON TEORİSİ TABANLI KORSCH TMA TELESKOP SİSTEMİNİN HİZALANMASINA YÖNELİK SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde, Korsch TMA konfigürasyonunda tasarlanmış bir teleskop sisteminin aberasyon analizi ve ikincil ayna hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen sigma vektörlerinin hesaplanması ele alınacaktır.

7.1. Korsch TMA Teleskop Sistemi

Korsch TMA teleskop, geniş bir görüntü alanında yüksek kalitede görüntü elde etmek için tamamen yansıtıcı optik bileşenlerden oluşan, üç aynalı bir teleskop sistemidir. Üç asferik ayna kombinasyonu ile tasarlanan bir bu optik sistem, 3. derece küresel aberasyon, koma, astigmatizm ve alan eğriligi aberasyonları için düzeltme sağlar. Korsch teleskop genellikle alan eğilimli (Field-biased) olarak tasarlanır (Extance, 2024). Alan eğilimli bir teleskop sistemi, görüntü düzleminin spesifik bir alanında yüksek kalitede görüntü elde etmeyi hedefler. Bu çalışmada kullanılmak üzere tasarlanan Korsch TMA teleskobun optik tasarım yerleşimi Şekil 7.1’de sunulmuştur.



Şekil 7.1. Korsch TMA teleskop sisteminin optik tasarım şematik gösterimi

Şekil 7.1’de şematik diyagramı verilen, Korsch TMA teleskobun optik tasarım parametreleri, Çizelge 7.1 ve Çizelge 7.2 ile verilmektedir.

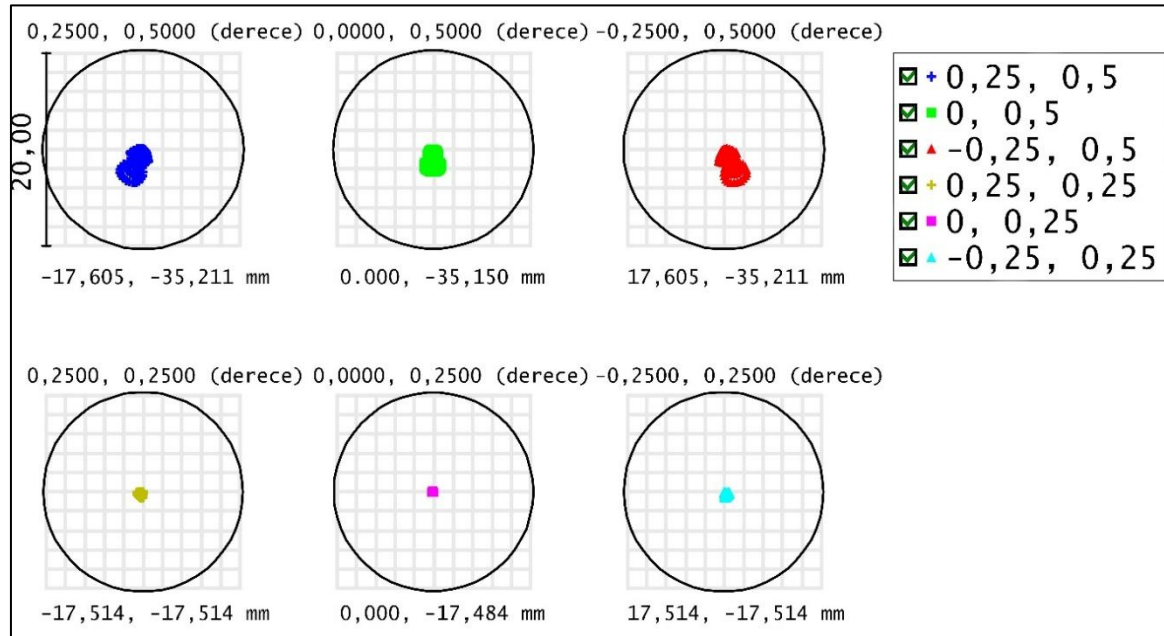
Çizelge 7.1. Korsch TMA teleskobun optik tasarım lens data düzenleyici değerleri

Yüzey#	Eğrilik yarıçapı (r)	Mesafe (d)	CA yarıçapı (mm)	Konik sabiti (k)
Obje	∞	∞	∞	0
1	∞	350	154,320	0
M1 (Stop)	-833,813	-350	150,000	-0,984
M2	-166,507	500	28,646	-2,041
M3	-208,054	-140	47,763	-0,604
FM	∞	160	9,926	0
Görüntü	∞	-	50,063	0

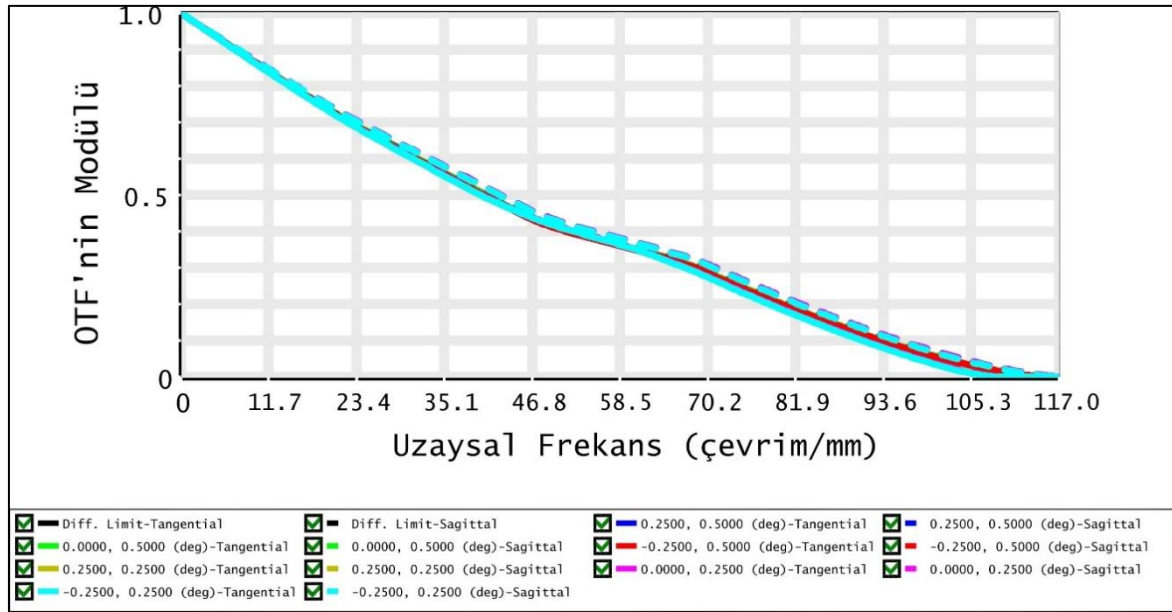
Çizelge 7.2. Korsch TMA teleskobunun teknik özellikleri

Parametre	Sembol	Birim	Değer
Optik açıklık çapı	EPD	mm	300
Odak uzunluğu	f	mm	4000
Karartma oranı (Eksenel)	γ	%	16
Tam görüş alanı	FFOV	°	$\pm 0,5$
Referans dalga boyu	λ	nm	632,8
F sayısı	F#	-	13,3

Korsch TMA teleskobun, kırınım-limitinde performans gösterdiği 1° görüş alanı için optik tasarımdan elde edilen nokta (spot) diyagramı ve MTF (Modulasyon Transfer Fonksiyonu) grafiği, sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3’de gösterilmektedir.



Şekil 7.2. Korsch TMA teleskop odak düzlemi RMS nokta diyagramı



Şekil 7.3. Korsch TMA teleskop MTF grafiği

Tasarlanan Korsch TMA teleskop için optik tasarım programından elde edilen paraksiyal ışın izleme verileri, Çizelge 7.3’de sunulmuştur. Bu parametreler ve teleskobun yapısal parametreleri kullanılarak, teleskobun her bir bileşeninden gelen yüzey dalga aberasyon katkıları hesaplanmış ve sonuçlar, Çizelge 7.4’te verilmiştir.

Çizelge 7.3. Korsch TMA teleskop paraksiyal ışın izleme verileri

Yüzey #	y (mm)	u (°)	$\bar{y}$ (mm)	$\bar{u}$ (°)
Obje	0	0	∞	0,00873
EP	150,00000	0	-3,054404	0,00873
M1(Stop)	150,00000	0,359793	0	-0,00873
M2	24,07254	-0,07065	3,054404	0,04541
M3	-11,25000	-0,037500	25,76184	0,20223
Görüntü	0	-0,037500	-34,90747	0,20223

Çizelge 7.4. Korsch TMA teleskop için hesaplanan yüzey dalga aberasyon katkıları

Yüzey #	$W_{040}^{sph}(\lambda)$	$W_{040}^{asph}(\lambda)$	$W_{131}^{sph}(\lambda)$	$W_{131}^{asph}(\lambda)$	$W_{222}^{sph}(\lambda)$	$W_{222}^{asph}(\lambda)$	$W_{220S}^{sph}(\lambda)$	$W_{220S}^{asph}(\lambda)$
M1	345,010	-339,615	-66,947	0	3,248	0	3,248	0
M2	-63,686	58,649	32,043	29,766	-4,030	3,777	-10,147	1,888
M3	0,066	-0,425	1,249	3,888	5,910	-8,904	9,463	-4,452
Toplam	281,390	-281,390	-33,655	33,655	5,127	-5,127	2,564	-2,564
	0		0		0		0	

Şekil 7.4’de görüldüğü üzere, Korsch TMA teleskop, 3. derece küresel aberasyon, koma, astigmatizm ve alan eğriliği aberasyonlarını düzeltmek için tasarlanmıştır. Ancak, daha geniş

görüş alanında yüksek kalitede görüntü elde etmek için tasarım, belirlenen alan bölgesi için ışın-izleme programı kullanılarak optimize edilebilir.

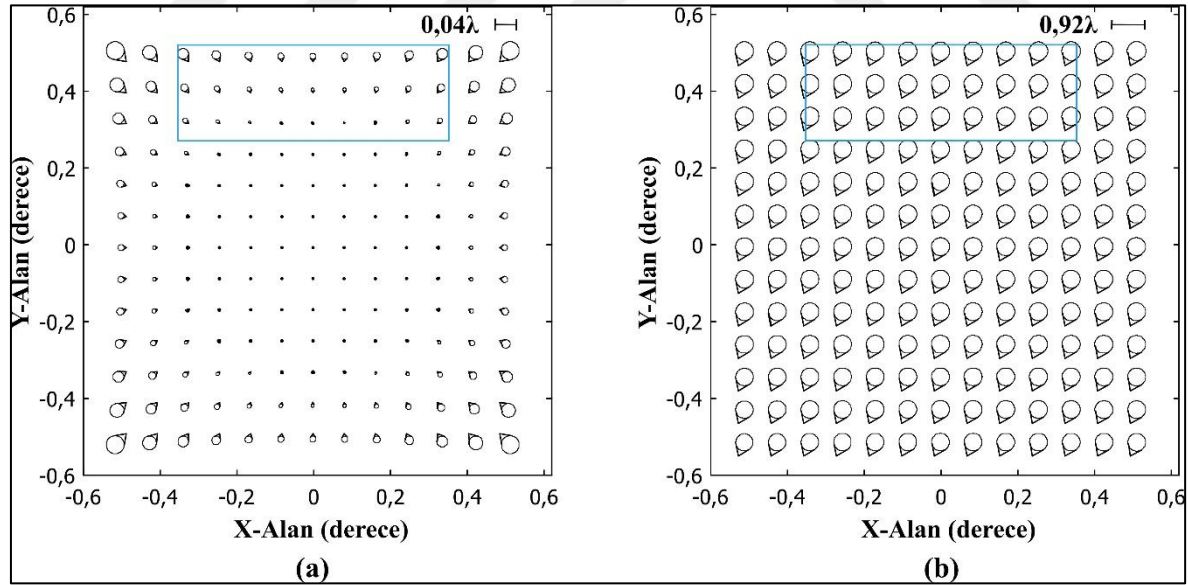
7.2. Hizalama Kaçıklığına Sahip Korsch TMA Teleskop için Sigma Vektör Katkılarının Hesaplaması

Tasarlanan teleskobun ikincil aynasına kasıtlı olarak hizalama kaçıklığı uygulanmış ve hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen sigma vektör bileşenleri hesaplanmıştır. Uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri, Çizelge 7.5'te sunulmuştur.

Çizelge 7.5. Korsch TMA teleskobu ikincil aynasına tasarımda uygulanan hizalama kaçıklığı değerleri

Hizalama kaçıklıkları	XDE_{M2} (mm)	YDE_{M2} (mm)	ADE_{M2} (°)	BDE_{M2} (°)
M2	0,1000	0,2000	-0,0500	0,0300

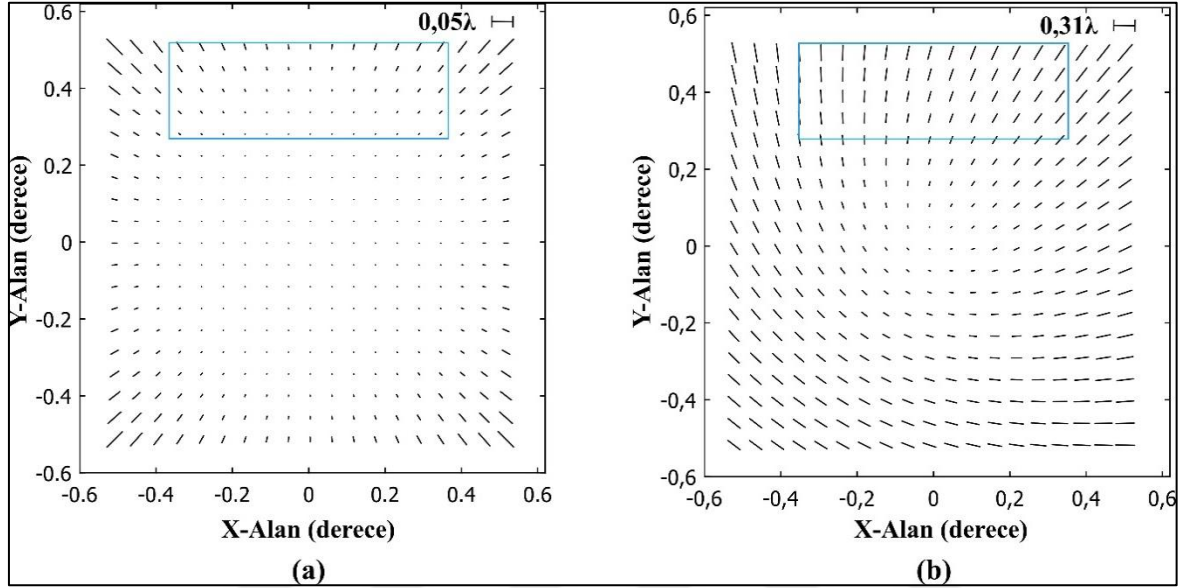
Hizalama kaçıklığına sahip Korsch TMA teleskobun, görüntü düzlemindeki 3. derece koma ve astigmatizm davranışları Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'de gösterildiği gibi değişmiştir.



Şekil 7.4. Korsch TMA teleskop için 3. derece koma TAAG'leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Şekil 7.4a'da görüldüğü üzere, hizalı durumdaki teleskobun görüntü düzleminde indüklenen koma aberasyonu, ihmal edilebilir seviyededir. Teleskobun hizalama kaçıklığına sahip durumu için ise görüntü düzleminde hizalama kaçıklığına bağlı alan-sabit, 3. derece koma

aberrasyonu ile ilişkili Zernike terimleri indüklenmiştir. Bu davranış, Bölüm 2’de detaylandırılan TMA tipi teleskobun karakteristik 3. derece koma aberrasyonu davranışı ile uyumludur. Tüm alan gösterimlerinde, çerçeve ile sınırları belirtilen alan, görüntüleme için seçilen spesifik alan bölgesidir.



Şekil 7.5. Korsch TMA teleskop için 3. derece astigmatizm TAAG’leri: a) hizalı durum b) hizalama kaçıklığı mevcut durum

Şekil 7.5a’da görüldüğü üzere, hizalı durumdaki teleskobun görüntü düzleminde indüklenen astigmatizm aberrasyonu, ihmal edilebilir seviyededir. Teleskobun hizalama kaçıklığına sahip durumu için ise görüntü düzleminde, hizalama kaçıklığına bağlı alan-lineer, alan-sabit ve alan-asimetrik karakteristik astigmatizm aberrasyon davranışı gözlenmektedir (Şekil 7.5b).

Korsch TMA teleskobun ikincil aynasındaki hizalama kaçıklıklarına balı olarak tetiklenen sigma vektör katkıları, optik tasarım programından elde edilen gerçek ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Teleskobun ikincil ve üçüncül aynası için indüklenen sferik sigma vektör bileşenlerinin hesaplama sonuçları, Çizelge 7.6’da sunulmuştur.

Çizelge 7.6. Siferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Korsch TMA teleskop)

Parametre	Birim	M1(Stop)	M2	M3
l_i	mm	$-\infty$	340,753242	-300,000000
l_{XP}	mm	0	-67,255569	-127,388175
X	-	0	0	0
Y	-	0	0	0
Z	-	1	-1	1
L	-	0	-0,000678	-0,003103
M	-	0	-0,001530	-0,006695
N	-	1	0,999999	0,999973
SRL	-	0	0,000601	0,001628
SRM	-	0	0,001201	0,003676
SRN	-	-1	-0,999999	-0,999992
$\bar{i}$	-	-0,008727	0,0270709	0,078408
σ_x^{sph}	-	0	0,002844	0,018804
σ_y^{sph}	-	0	0,012134	0,038505

Çizelge 7.6’da görüldüğü üzere, teleskobun ikincil ve üçüncül aynası için sigma vektör katkıları indüklenmiştir. Teleskobun ikincil aynası için indüklenen sigma vektör katkıları, yalnızca ikincil aynanın hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak indüklenmişken, teleskobun üçüncül aynası için indüklenen sigma vektör katkıları ikincil ayna hizalama kaçıklıkları kaynaklı olarak indüklenmiştir.

Teleskop ikincil aynasının hizalama kaçıklıklarına bağlı olarak ortaya çıkan asiferik sigma vektör bileşenleri ise Çizelge 7.7’de sunulmuştur.

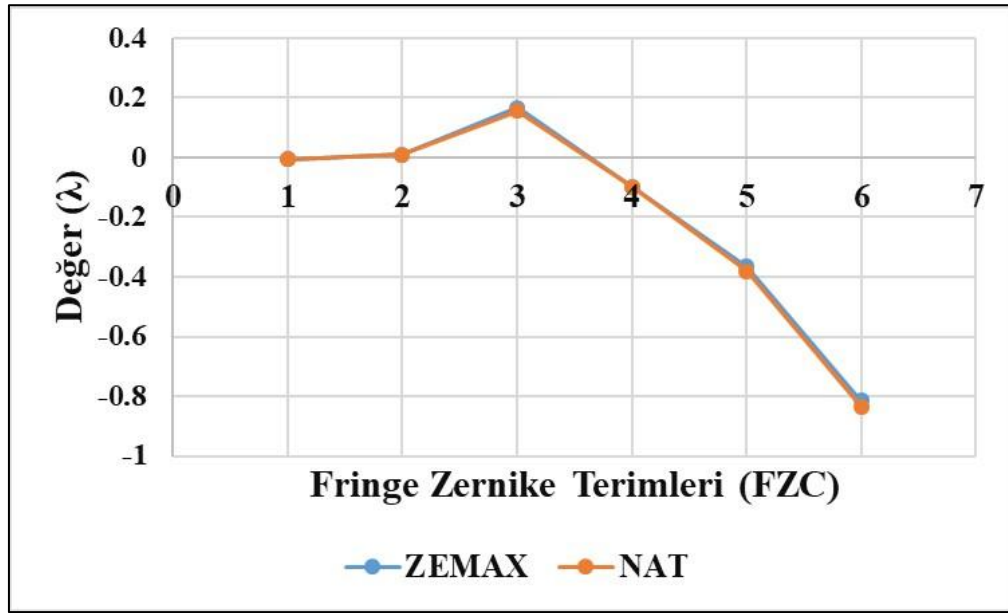
Çizelge 7.7. Asiferik sigma vektörlerini hesaplamak için kullanılan parametreler ve hesaplama sonuçları (Korsch TMA teleskop)

Parametre	Birim	M1 (Stop)	M2	M3
δv_x^*	mm	0	-0,100000	-0,338775
δv_y^*	mm	0	-0,200000	-0,764816
$\bar{y}$	mm	0	3,054404	25,761845
σ_x^{asph}	-	0	0,032740	0,013150
σ_y^{asph}	-	0	0,065479	0,029688

Hizalama kaçıklığına sahip Korsch TMA teleskobun görüntü düzleminde oluşan Fringe Zernike terimleri, iki alan noktası için hesaplanmış ve hesaplanan terimler, optik tasarım programından elde edilen terimler ile karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.8’de ve Şekil 7.6’da sunulmuştur. Çizelge 7.8’de verilen terimler, Şekil 7.6’da sunulan grafiğin yatay ekseninde çizelgede verilen sıralamayla sunulmuştur.

Çizelge 7.8. Korsch TMA teleskop görüntü düzleminde indüklenmesi beklenen FZC terimlerinin hesaplanması

FZC terimleri	Alan noktası	Değer (λ)	Hesaplanan (λ)	%Fark
Z_5	(0°,0°)	-0,005913	-0,005974	1,03
Z_6	(0°,0°)	0,008689	0,008760	0,82
Z_5	(0°,0,5°)	0,165899	0,155640	6,18
Z_6	(0°,0,5°)	-0,097474	-0,097467	0,01
Z_7	(0°,0,5°)	-0,365348	-0,380092	4,04
Z_8	(0°,0,5°)	-0,814662	-0,833811	2,35



Şekil 7.6. Hizalama kaçıklığına sahip Korsch TMA teleskop için optik tasarım programından alınan ve hesaplanan FZC terimleri

Şekil 7.6'da görüldüğü üzere, optik tasarım programından elde edilen ve Nodal Aberasyon Teorisi eşitlikleri kullanılarak hesaplanan FZC terimleri, maks. %6'lık bir hata oranı ile uyumludur. Teleskobun ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklıklarının hesaplanmasında, FZC terimlerinden faydalanacağı için FZC terimlerinin yüksek doğrulukla hesaplanabiliyor olması önem arz etmektedir. Çalışmanın deneysel durumlarda uygulanması durumunda, interferometrik olarak ölçülen FZC değerleri kullanılacaktır.

Teleskobun görüntü düzleminin çalışmada kullanılan bölgesi, Şekil 7.4'te sunulmuştur. Söz konusu bölgenin açısal koordinatları da Çizelge 7.9'da sunulmuştur.

Çizelge 7.9. Korsch TMA teleskop açısal alan noktaları koordinatları

Alan noktası#	Alan açısı koordinatları
1	$(-0,25^\circ, 0,50^\circ)$
2	$(0^\circ, 0,50^\circ)$
3	$(0,25^\circ, 0,50^\circ)$
4	$(-0,25^\circ, 0,25^\circ)$
5	$(0^\circ, 0,25^\circ)$
6	$(0,25^\circ, 0,25^\circ)$

7.3. Korsch TMA Teleskobun İkincil Aynasının Hizalama Kaçıklıklarının Hesaplanması

Bölüm 7.3'te Korsch TMA bir teleskobun ikincil aynasının konumu, Çizelge 7.4'de verilen hizalama kaçıklığı değerleri kullanılarak tasarımda kasıtlı olarak bozulmuş ve bu duruma bağlı olarak tetiklenen sigma vektör katkıları gerçek ışın izleme metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümde, teleskobun ikincil aynasındaki hizalama kaçıklıkları, Bölüm 4.2'de sunulan Nodal Aberasyon Teorisi tabanlı yöntem kullanılarak hesaplanacaktır. Bu yöntem girdi olarak tasarım programından alınan FZC terimlerini ve Bölüm 7.1'de hesaplanan yüzey aberasyon katkılarını kullanmaktadır. Dahası, gerçek ışın izleme verileri kullanılarak hesaplanan sigma vektör katkıları ve hesaplananan hizalama kaçıklıkları için indüklenen sigma vektör katkıları da karşılaştırılmalı olarak bölüm sonunda sunulmuştur.

Korsch TMA teleskobun ikincil aynasında yer alan hizalama kaçıklıklarının hesaplanması için Bölüm 4.2'de tariflendiği gibi iki adet alan noktasına ihtiyaç vardır. Bu alan noktalarından biri görüntü düzleminin merkezinde konumlanmış olan Alan($0^\circ, 0^\circ$) noktası, bir diğeri ise görüntü düzlemi içinde rastgele olarak seçilen bir alan noktasıdır. Bu çalışmada, Korsch TMA teleskobun görüntü düzleminin merkez noktası, katlama aynası dolayısıyla karartmaya uğradığı ve realitede bu noktadan ölçüm alınamayacağından, hesaplama işlemi rastgele olarak seçilen sadece üç numaralı alan noktasından gerçekleştirilecek ve hizalama kaçıklığı dolayısıyla indüklenen sabit astigmatizm aberasyonu katkısı ihmal edilecektir. Hizalama kaçıklıklarının hesaplanmasında kullanılacak alan noktası, Bölüm 6.2'de FZC değerleri verilen Alan ($0^\circ, 0,50^\circ$) noktası olarak seçilmiştir.

Tasarım programından alınan FZC'leri ile hesaplanan sigma vektör katkıları ve Bölüm 7.2'de gerçek ışın izleme yöntemi kullanılarak hesaplanan sigma vektör katkıları, karşılaştırmalı olarak Çizelge 7.10'da sunulmuştur.

Çizelge 7.10. Korsch TMA teleskop için hesaplanan sigma vektör katkılarının karşılaştırmalı gösterimi

Parametre	Birim	Gerçek ışın yöntemi		Zernike Terimleri		%Hata	
		M2	M3	M2	M3	M2	M3
σ_x^{sph}	-	0,002844	0,018804	0,003116	0,017897	-9,58	4,82
σ_y^{sph}	-	0,012134	0,038505	0,011196	0,037929	7,73	1,49
σ_x^{asph}	-	0,032740	0,013150	0,031059	0,012695	5,13	3,46
σ_y^{asph}	-	0,065479	0,029688	0,064687	0,028913	1,21	2,61

Alan(0° , $0,50^\circ$) noktasından alınan FZC terimleri kullanılarak hesaplanan hizalama kaçıklıkları, Çizelge 7.11’de sunulmuştur. Hesaplanan hizalama kaçıklığı değerleri için hata maksimum %6,6 olarak bulunmuştur. Bu çalışmada birincil aynada form hatası olmadığı varsayılmış olup hizalama kaçıklığı kaynaklı tetiklenen sabit $B_{222,MIS}^2$ terimi de sıfır (alan merkezinden ölçüm alınmadığı için) kabul edilmiştir.

Çizelge 7.11. Korsch TMA teleskop ikinci aynasına tasarımda uygulanan ve FZC terimleri ile hesaplanan hizalama kaçıklıklarının karşılaştırmalı gösterimi

Hizalama kaçıklıkları	XDE _{M2} (mm)	YDE _{M2} (mm)	ADE _{M2} (°)	BDE _{M2} (°)
M2 (Gerçek ışın)	0,100	0,200	-0,050	0,030
M2 (FZC terimleri)	0,095	0,198	-0,051	0,028
%Hata	5,0	1,0	2,0	6,6



8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışması toplam yedi ana başlıktan oluşmaktadır. Tezin bu bölümünde, çalışmanın ana başlıkları altında yer alan çalışmalar ve sonuçları, özet halinde sunulmuştur. Bölüm 1’de, eksen simetrisine sahip yansıtıcı teleskopların tarihsel gelişimi, astronomik teleskopların hizalanmasında kullanılan geleneksel hizalama yaklaşımı ve teleskopların hizalanmasında yaygın olarak kullanılan bilgisayar destekli hizalama yöntemleri, çalışmaya genel bir çerçeve oluşturmak üzere özetlenmiştir. Tez çalışmasının amacı ve tez çalışması için planlanan akış da bu bölümde kaleme alınmıştır.

Bölüm 2’de, tez çalışmasının teorik altyapısını oluşturan matematiksel arka plan, detaylı şekilde ele alınmıştır. Bölüm 2.1 ve Bölüm 2.2’de, sırasıyla geleneksel aberasyon teorisi ve 3. derece aberasyonlar tanıtılmıştır. Bölüm 2.3’de eksenel simetrik iki ve üç aynalı teleskoplar ve varyantlarının aberasyon düzeltme kabiliyetleri özetlenmiş ve teleskopların uygun şekilde tasarlanmasına yönelik formülasyon sunulmuştur. Bölüm 2.4 hizalama kaçıklığına sahip teleskopların aberasyon analizini gerçekleştirebilmek için elzem olan sigma vektör katkılarını ve Shack’ın kurucusu olduğu Nodal Aberasyon Teorisi’ni ele almaktadır. Bölüm 2.4.1’de Thompson’ın sigma vektör katkılarını hesaplamak için ortaya attığı gerçek ışın izleme yöntemi de detaylıca ele alınmıştır. Bölüm 2.4.2’de Nodal Aberasyon Teorisi, 3. derece küresel aberasyon, koma ve astigmatizm aberasyonları için incelenmiş ve Nodal Aberasyon Teorisi’nin öngürüleri, iki ve üç aynalı teleskoplar için yaratılan Tüm Alan Aberasyon Gösterim (TAAG)’leri ile örneklenmiştir. Ayrıca, Bölüm 2.4.2’de teleskopların hizalama sürecini daha kompleks hale getiren bir özel durum olan ve ikincil aynanın koma sıfır pivot noktasında döndürülmesi ile ortaya çıkan hizalama kaçıklığı durumu ve birincil ayna astigmatik yüzey form hatasından kaynaklanan ikili astigmatizm sıfır noktası karakteristiği ve bu durumun hizalama kaçıklığı ile birlikte görülmesi durumunda ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir.

Bölüm 3’te eksenel simetrik yansıtıcı teleskopların hizalı ve hizalama kaçıklığına sahip durumları için aberasyon analizleri gerçekleştirilmiştir. Bölüm 3.1’de, hizalı ve hizalama kaçıklığına sahip teleskopların aberasyon analizi, iki aynalı teleskoplar özelinde gerçekleştirirken, Bölüm 3.2’de aynı konu, üç aynalı teleskoplar özelinde ele alınmıştır. Hizalı teleskoplar için yüzey aberasyon katkılarının hesaplanması bu bölümde açıklanmıştır. Bölüm 3’te teleskopların ikincil aynasında hizalama kaçıklığı mevcutsa ve bu hizalama

kaçıklığı miktarları biliniyorsa, teleskobun görüntü düzleminde öngörülen aberasyon durumunun tahmin edilmesi hususu ele alınmıştır. Bu bölümde verilen akışın tersinir olarak uygulanması, teleskobun ikincil aynasında mevcut olan bilinmeyen hizalama kaçıklıklarını tespit etmekte kullanılabileceğinden, sürecin adım adım ele alınmasının faydalı olacağı değerlendirilmiştir.

Bölüm 4’de iki ve üç aynalı teleskoplar için Nodal Aberasyon Teorisi tabanlı hizalama yaklaşımı ele alınmıştır. Bu bölümde, öncelikle iki aynalı teleskoplar özelinde 3. derece astigmatizm ve koma aberasyon alan vektörlerinin nasıl hesaplanacağı hususu detaylandırılmıştır. Bilindiği gibi, astigmatizm aberasyon alan vektörü iki astigmatizm sıfır noktasının orta noktasında konumlanmıştır ve a_{222} vektörünün tam konumunun belirlenmesi için bu iki noktanın yüksek hassasiyetle belirlenmesi yaklaşımından faydalanılabilir. Ancak, görüş alanı içerisinden deneysel olarak çok fazla ölçüm almanın pratik olmaması, bir hatta iki astigmatizm noktasının (birincil ayna form hatası varlığı) ölçüm alınan bölgenin dışında konumlanmış olması gibi durumlar, a_{222} vektörünün bu yöntem kullanılarak hesaplanması işlemini zorlaştırır. a_{222} vektörünün astigmatizm sıfır noktalarından bağımsız olarak belirlenebilmesi için bu çalışmada sunulan alternatif yöntem kullanılabilir. Bölüm 4.1’de bahsedilen yöntemin detayları paylaşılmıştır. Bu yöntemin sınırlılığı, interferometrik ölçüm sonucu elde edilen FZC terimlerinin uygun polinomlara fit edilmesi sonucu karşılaşılabilecek polinom fit hataları ve geniş görüş alanları için Seidel aberasyonları ve FZC terimleri arasındaki bağıntının daha kompleks hale gelmesidir. Bu bölümde ayrıca hizalama kaçıklığına bağlı oluşan optik eksen sapması etkisinin hizalama kaçıklığı hesaplamalarına etkisi incelenmiş ve bu etkinin hesaplamalardan nasıl çıkarılabileceği tartışılmıştır. Bölüm 4.2’de, üç aynalı teleskopların hizalanmasına yönelik Nodal Aberasyon Teorisi tabanlı bir yöntem ele alınmıştır. Bu yöntem de, sadece 3. derece aberasyonlar dikkate alınarak oluşturulmuştur. Yöntem, temelde, iki alan noktasından alınan interferometrik ölçüm ile teleskobu hizalamayı amaçlamaktadır. Üç aynalı teleskopların 3. derece aberasyonlar için düzeltilmiş olması, sadece hizalama kaçıklığına bağlı olarak indüklenen terimlerin analiz edilmesine olanak sağlamaktadır. Bu yöntemin sınırlılığı, geniş görüş alanına sahip teleskop sistemlerinde, tez çalışmasında belirtilen FZC ve Seidel aberasyonları arasındaki ilişki ifadesinde yüksek dereceli aberasyonların ihmal edilemeyecek olması ve tipik üç aynalı teleskop sistemlerinde görüş alanı merkezinden interferometrik ölçümlerin alınamıyor olmasıdır. Hizalama kaçıklığına bağlı olarak tetiklenen sabit astigmatizm teriminin etkisi, hesaplanan hizalama kaçıklığı değerlerinin

teleskopa uygulanması, ardından ölçümlerin yenilenmesi ve bu verilerle hizalama ile hesaplama adımlarının tekrarlanması yoluyla azaltılabilir. Birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının mevcut olması durumunda, yüzey form hatası kaynaklı astigmatizm terimlerinin etkisi de hesaplama dahil edilebilir.

Bölüm 5'te, Cassegrain teleskop sistemi üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ele alınmıştır. Bu bölüm toplamda iki ana başlık ve altı alt başlıktan oluşmaktadır. Bölüm 5.1'de Cassegrain teleskop sistemi ve deneysel çalışmalarda kullanılacak deney test düzeneği tanıtılmıştır. Öncelikle teleskobun optik parametreleri sunulmuş ve ideal durum için teleskobun aberasyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde hesaplanan yüzey aberasyon katkıları, hizalama kaçıklığının mevcut olduğu durumlarda girdi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, Bölüm 5.1.4'te deneysel çalışmalarda kullanılan deney düzeneği ve kullanılan ekipmanların özellikleri detaylandırılmıştır. Bölüm 5.2'de, Bölüm 2'de verilen teorik öngörülerini doğrulamaya yönelik oluşturulmuş, iki adet deneysel durum sunulmuştur. Bölüm 5.2.1'de gerçek ışın izleme yöntemi ile hesaplanan sigma vektörler için deneysel doğrulama çalışması sunulmuş ve simülasyon ve deney sonucu elde edilen vektörler bölüm sonunda karşılaştırılmıştır. Bu iki yöntem ile elde edilen sigma vektör katkılarının, %1.6'lık hata oranı ile uyumlu olduğu görülmüştür. Bölüm 5.2.2'de, birincil ve ikincil aynanın yüzey form hatalarının ölçüm sonuçları paylaşılmış ve birincil ayna astigmatik yüzey form hatasının teleskobun aberasyon durumuna etkisi, hizalı ve hizalama kaçıklığı durumları için ayrı ayrı incelenmiştir. Bölüm 5.2.2'de verilen durum, ilk olarak ikincil aynası hizalı olan Cassegrain sisteminin görüntü düzlemindeki aberasyon durumunun incelenmesi sunulmuştur. Astigmatizm sıfır noktalarının konumları, birincil ayna astigmatik yüzey form hatası verileri ve deneysel FZC terimleri kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak astigmatizm sıfır noktalarının konumlarının birbiri ile uyumlu olduğu ve bu noktaların görüntü düzlemi merkezine göre simetrik olduğu görülmüştür. Bu inceleme, hizalı durumdaki astigmatizm sıfır noktalarının büyük oranda birincil ayna astigmatik yüzey form hatası kaynaklı olduğunu doğrulamaktadır. Bu bölümde, ikinci adım olarak teleskobun ikincil aynası yanlış hizalanmış ve birincil ayna form hatası ve hizalama kaçıklığı etkisinin bir arada olduğu durum için inceleme gerçekleştirilmiştir. Teleskobun ikincil aynasına uygulanan hizalama kaçıklığının ardından teleskobun aberasyon durumu incelenmiş ve oluşan astigmatizm sıfır noktalarının konumları, gerçekleştirilen simülasyon ve deney çalışmaları için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, her iki durum için hesaplanan astigmatizm sıfır noktalarının, birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Birincil ayna astigmatik yüzey

form hatası ve ikincil ayna hizalama kaçıklıklarının birlikte görüldüğü durumda hizalama kaçıklığına bağlı olarak oluşan astigmatizm sıfır noktalarının konumlarının a_{222} vektörü konumuna göre simetrik olarak ötelenmesi beklenmektedir. Bu sebeple, birincil ayna astigmatik yüzey form hatası, tetiklenen astigmatizm sıfır noktalarının konumlarını değiştirirken a_{222} vektörünün konumunu değiştirmemektedir.

Bölüm 6'da iki aynalı bir teleskop sisteminin ikincil aynasında mevcut olan hizalama kaçıklıklarının, Bölüm 4.1'de verilen yaklaşım kullanılarak nasıl hesaplanabileceği detaylandırılmıştır. Bu bölümde, Bölüm 5.1 ve Bölüm 5.2'de sunulan bulgular, Cassegrain teleskobun ikincil aynasındaki hizalama kaçıklıklarının hesaplanmasında kullanılmıştır. Çalışmanın girdileri, Bölüm 5.1.2'de hesaplanan yüzey aberasyon katkıları ve interferometrik ölçüm sonucu elde edilen FZC terimleridir. 3. derece koma ve astigmatizm aberasyonları ile ilişkili FZC terimleri, ilgili polinomlara fit edilmiş ve yapılan analiz sonucunda aberasyon alan vektörleri ve sigma vektörler, hesaplanmıştır. Daha sonra sigma vektörler ile hizalama kaçıklıkları arasındaki ilişki kullanılarak ikincil ayna hizalama kaçıklığı değerleri hesaplanmıştır. Bölüm 6.3'te hesaplanan hizalama kaçıklığı değerleri, teleskobun ikincil aynasının yeniden konumlandırılmasında kullanılmıştır. Hizalama işlemi sonucunda, hizalı durumdaki teleskobun görüntü düzleminden kontrol amaçlı interferometrik ölçümler alınmış ve teleskobun hizalı olma durumu yeniden incelenmiştir. Analiz sonucunda, hizalı durum için aberasyon alan vektörleri, sigma vektörler ve kalıntı hizalama kaçıklıkları hesaplanmış ve ikincil ayna kalıntı hizalama kaçıklığı miktarlarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, teleskop, uygulanan hizalama işlemi sonucu hizalı duruma getirilmiş ve hizalama işlemi tamamlanmıştır.

Bölüm 7'de, üç aynalı bir teleskop tasarımı üzerinde gerçekleştirilmiş olan bir simülasyon çalışması sunulmaktadır. Bu çalışmada, Korsch TMA konfigürasyonunda bir teleskop sistemi tercih edilmiştir. Teleskobun optik tasarım parametreleri, yüzeylerden gelen üçüncü derece aberasyon katkıları, görüntü düzleminde sıfır olacak şekilde rastgele belirlenmiştir. Bölüm 7.1'de, teleskobun optik tasarım parametreleri ve aberasyon analizi detaylı şekilde incelenmiştir. Bölüm 7.2'de teleskobun ikincil aynasına rastgele seçilen hizalama kaçıklığı değerleri uygulanmış ve bu hizalama kaçıklıklarının görüntü düzleminde tetiklediği ikincil ve üçüncül ayna sigma vektör katkıları hesaplanmıştır. Bölüm 7.3'te, teleskobun ikincil aynasının hizalama kaçıklığı miktarları, görüntü düzleminden alınan FZC terimleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu bölümde gerçekleştirilen hizalama kaçıklığı hesaplama

işlemi, teleskop konfigürasyonu görüntü düzlemi merkezinden ölçüm alınmasını mümkün kılmadığı için eksen dışındaki tek bir alan noktasından elde edilen FZC terimleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, uygulanan hizalama kaçıklıkları ve hesaplanan hizalama kaçıklıkları karşılaştırılmış ve maksimum hatanın %7 olduğu görülmüştür.

Tez çalışması, Nodal Aberasyon Teorisi'nin bulgularının Cassegrain bir teleskop üzerinde deneysel olarak doğrulanmasını ve yansıtıcı eksenel teleskoplar için bilgisayar ortamına aktarılabilir, pratik bir hizalama kaçıklığı hesaplama algoritmasını tanıtmayı hedeflemektedir. Nodal Aberasyon Teorisi'nin aberasyon teorisi bağlantısı, onu özellikle deneysel koşullarda ortaya çıkabilecek hata kaynaklarının doğru analiz edilebilmesi açısından avantajlı hale getirmektedir. Ayrıca astigmatizm alan vektörünün, astigmatizm sıfır noktalarından bağımsız olarak hesaplanmasına olanak sağlayan yöntem, bilindiği kadarıyla ilk kez bu çalışmada sunulmuştur. Bu yöntem, görüş alanı içerisinde çok fazla alan noktasından ölçüm almayı gerektirmez ve hizalama sürecini, önemli ölçüde kısaltır. Bu yöntem, gerekli görüldüğü durumlarda tekrarlanarak, teleskobun yüksek hassasiyetle hizalanması sağlanmaktadır. Tez çalışmasında, üç aynalı teleskop sistemi üzerinde uygulanan çalışmalar, optik tasarım programında yaratılan bir simülasyon kullanılarak doğrulanmıştır. Korsch TMA teleskop için sunulan yöntemin deneysel olarak doğrulanması, gelecek çalışma olarak planlanmaktadır. Korsch TMA teleskop için simülasyon üzerinde sunulan yöntem, pratik bir yöntem olduğu için ardışık iterasyonlar kullanılarak teleskopların hizalanması mümkün olmaktadır. Geniş görüş alanlarına sahip teleskop sistemlerinde yüksek dereceli (3.dereceden büyük) aberasyonlar genellikle ihmal edilebilir olmadığından, üç aynalı teleskop sistemlerinin hizalanmasına yönelik sunulan yaklaşımın geliştirilmesi öncesi, geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Nodal Aberasyon Teorisi hali hazırda, nominal olarak eksenel simetrik olmayan (off-axis) ve serbest form optiklerinin tasarımları ve aberasyon analizlerinin sistematik bir çerçevede yapılabilmesine olanak sağlamaktadır (Bauer ve diğerleri, 2018, Fuerschbach ve diğerleri, 2014). Fakat, hala geliştirilmeye açıktır ve deneysel çalışmalar ile desteklenmeye ihtiyaç duymaktadır. Bu yönü ile bu tez çalışması, literatüre önemli bir katkı sunmaktadır.



KAYNAKLAR

- Aristotle, A. (1933). *Metaphysics* (Vol. 1). New York: Harvard University Press, 38-42.
- Bauer, A., Schiesser, E. M., Rolland, J. P. (2018). Starting geometry creation and design method for freeform optics. *Nature Communications*, 9(1), 1-11.
- Bhatia, R. (1995). Telescope alignment: Is the zero-coma condition sufficient? (Vol. 2479). New York: SPIE, 12-22.
- Bhatia, R., Ciani, A. (1998). Telescopes: Their design and maintenance. *Bulletin of the Astronomical Society of India*, 26, 353-365.
- Conforti, G. (1983). Zernike aberration coefficients from Seidel and higher-order power-series coefficients. *Optics Letters*, 8(7), 407-408.
- Egdall, I. (1985). Manufacture of a three-mirror wide-field optical system. *Optical Engineering*, 24(2), 242285.
- Ewijk, C. v. (2017). *Alignment sensitivity of reflective optical elements and analysis of automated alignment methods*. Bachelor's Thesis, University of Groningen, Faculty of Science and Engineering, 22-35.
- Extance, A. (2024). *How the James Webb Space Telescope is revealing the weather and chemistry on planets around other stars*. New York: ACS Publications, 38-45.
- Fuerschbach, K. (2014). *Freeform, ϕ -polynomial optical surfaces: Optical design, fabrication, and assembly*. Doctoral Dissertation, University of Rochester, Institute of Optics, Rochester, 78-85.
- Fuerschbach, K., Rolland, J. P., Thompson, K. P. (2014). Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces. *Optics Express*, 22(22), 26585-26606.
- Gray, R. W., Dunn, C., Thompson, K. P., Rolland, J. P. (2012). An analytic expression for the field dependence of Zernike polynomials in rotationally symmetric optical systems. *Optics Express*, 20(15), 16436-16449.
- Gray, R. W., Rolland, J. P. (2015). Wavefront aberration function in terms of R. V. Shack's vector product and Zernike polynomial vectors. *Journal of the Optical Society of America A*, 32(10), 1836-1847.
- Greivenkamp, J. E. (2004). *Field guide to geometrical optics*. New York: SPIE Press, 45-65.
- Gross, H. (Ed.). (2005). *Handbook of optical systems: Vol. 1. Fundamentals of technical optics*. New York: Wiley-VCH, 85-102.
- Gu, Z., Wang, Y., Ju, G. and Yan, C. (2018). Computation of misalignment and primary mirror astigmatism figure error of two-mirror telescopes. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 4(1), 019002.

- Gu, Z., Wang, Y., Yan, C. (2020). Analytical design method of three-mirror anastigmatic telescope with mirror spacings as free design parameters. *Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems*, 6(4), 044007-044007.
- Gu, Z., Yan, C., Wang, Y. (2015). Alignment of a three-mirror anastigmatic telescope using nodal aberration theory. *Optics Express*, 23(19), 25182-25201.
- Hecht, E. (2002). *Optics*. (5th ed.). New York: Pearson Education India, 85-102.
- Hestenes, D. (2003). Oersted Medal Lecture 2002: Reforming the mathematical language of physics. *American Journal of Physics*, 71(2), 104-121.
- Hopkins, H. H. (1950). *Wave theory of aberrations*. New York: Clarendon Press, 102-105.
- Internet: Bentley, J., Olson, C. (2012). *Lens design*. Web:
<https://cir.nii.ac.jp/crid/1130282269353429248>, Son Erişim Tarihi: 26.08.2024.
- Karcı, Ö., (2021). A simulation and experimental validation of third-order coma in nodal aberration theory with a Cassegrain telescope. *Turkish Journal of Physics*, 45(6), 378–389.
- Karcı, Ö., Ekinci, M. (2020). Design of a high-precision, 0.5 m aperture Cassegrain collimator. *Applied Optics*, 59(27), 8434-8442.
- Karcı, Ö., Arpa, E., Ekinci, M. and Rolland, J. P. (2021). Experimental investigation of binodal astigmatism in nodal aberration theory (NAT) with a Cassegrain telescope system. *Optics Express*, 29(13), 19427–19427.
- Karcı, Ö., Yeşiltepe, M., Arpa, E., Wu, Y., Ekinci, M. and Rolland, J. P. (2022). Experimental investigation in nodal aberration theory (NAT): Separation of astigmatic figure error from misalignments in a Cassegrain telescope. *Optics Express*, 30(7), 11150–11150.
- Kim, S., Yang, H.-S., Lee, Y.-W. and Kim, S.-W. (2007). Merit function regression method for efficient alignment control of two-mirror optical systems. *Optics Express*, 15(8), 5059-5068.
- Kim, Y., Yang, H.-S., Kim, S.-W. and Lee, Y.-W. (2009). Alignment of off-axis optical system with multi mirrors using derivative of Zernike polynomial coefficient. In R. E. Parks & A. J. Davies (Eds.), *Optical system alignment, tolerancing, and verification III* (Proceedings of SPIE, Vol. 7433). New York: SPIE, 74330C.
- Kingslake, R. (2012). *Lens design fundamentals*. New York: Elsevier, 55-65.
- Korsch, D. (1977). Anastigmatic three-mirror telescope. *Applied Optics*, 16(8), 2074-2077.
- Krishna, P. R., Sagar, D. K. (2017). Aberrations in theories of optical aberrations. *IOSR Journal of Applied Physics*, 9(04), 37-43.
- Lee, H., Dalton, G. B., Tosh, I. A. J. and Kim, S.-W. (2007a). Computer-guided alignment I: Phase and amplitude modulation of alignment-influenced optical wavefront. *Optics Express*, 15(6), 3127-3139.

- Lee, H., Dalton, G. B., Tosh, I. A. J. and Kim, S.-W. (2007b). Computer-guided alignment II: Optical system alignment using differential wavefront sampling. *Optics Express*, 15(23), 15424-15437.
- Li, J., Ding, Y., Cai, Y., Yuan, G. and Zhang, M. (2022). Optimization method for low tilt sensitivity of secondary mirror based on the nodal aberration theory. *Applied Sciences*, 12(13), 6514.
- Mahajan, V. N. (1998). *Optical imaging and aberrations: Ray geometrical optics* (Vol. 45). New York: SPIE Press, 78-82.
- McLeod, B. A. (1996). Collimation of fast wide-field telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 108, 217.
- Meinel, A., Meinel, M. (1984). Zero-coma condition for decentered and tilted secondary mirror in Cassegrain/Nasmyth configuration. *Optical Engineering*, 23(6), 236801.
- Mellier, Y., Barroso, J., Achúcarro, A., Adamek, J., Adam, R., Addison, G. and Akrami, Y. (2024). Euclid. I. Overview of the Euclid mission. *arXiv preprint arXiv*, 2405.13491.
- Noll, R. J. (1976). Zernike polynomials and atmospheric turbulence. *Journal of the Optical Society of America*, 66(3), 207-211.
- Pedrotti, F. L., Pedrotti, L. M., Pedrotti, L. S. (2017). *Introduction to optics*. New York: Cambridge University Press, 45-65.
- Ren, B., Jin, G., Zhong, X. (2011). Third-order coma-free point in two-mirror telescopes by a vector approach. *Applied Optics*, 50(21), 3918-3923.
- Rolland, J. P., Davies, M. A., Suleski, T. J., Evans, C., Bauer, A., Lambropoulos, J. C. and Falaggis, K. (2021). Freeform optics for imaging. *Optica*, 8(2), 161–176.
- Rolland, J. P., Bauer, A., Fuerschbach, K., Schmid, T. and Thompson, K. P. (2020). Roland V. Shack's discovery of nodal aberration theory, the expansion into the aberrations of freeform optics, and impact in optical design. *SPIE*, 11479, 11479G.
- Romer, N., Zhao, N., Karci Ö. and Rolland, J. (2024). Alignment of a Ritchey-CHRÉTIEN telescope with primary mirror figure error guided by rapid measurement of binodal astigmatism. *Optics Express*, 3, 22-45.
- Sasián, J. (2013). *Introduction to aberrations in optical imaging systems*. New York: Cambridge University Press, 92-98.
- Sasián, J. M. (1994). How to approach the design of a bilateral symmetric optical system. *Optical Engineering*, 33(6), 2045-2061.
- Schmid, T. (2010). *Misalignment induced nodal aberration fields and their use in the alignment of astronomical telescopes*. Doctoral Dissertation, University of Central Florida, College of Optics and Photonics, 102-108.

- Schmid, T., Rolland, J. P., Rakich, A. and Thompson, K. P. (2010). Separation of the effects of astigmatic figure error from misalignments using Nodal Aberration Theory (NAT). *Optics Express*, 18(16), 17433-17447.
- Schmid, T., Thompson, K., Rolland, J. (2008). *Alignment of two mirror astronomical telescopes (the astigmatic component)* (Vol. 7017). New York: SPIE, 65-78.
- Schuhmann, R. (2019). Description of aspheric surfaces. *Advanced Optical Technologies*, 8(3-4), 267-278.
- Sebag, J., Gressler, W., Schmid, T., Rolland, J., Thompson, K. (2012). LSST telescope alignment plan based on nodal aberration theory. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 124(914), 380.
- Shack, R. V., Thompson, K. (1980). Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field. 251, 146-153.
- Smith, W. J. (2008). *Modern optical engineering: the design of optical systems*. New York: McGraw-Hill Education, 122-145.
- Thompson, K. (1980). *A graphic approach to the analysis of perturbed optical systems* (Vol. 0237). New York: SPIE, 66-88.
- Thompson, K. (1986). *Beyond optical design interaction between the lens designer and the real world* (Vol. 0554). New York: SPIE, 122-135.
- Thompson, K. (2005). Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry. *Journal of the Optical Society of America A*, 22(7), 1389-1401.
- Thompson, K., Rolland, J. (2014). A page from "the drawer": How Roland Shack opened the door to the aberration theory of freeform optics. *Proc. SPIE 9186, Fifty Years of Optical Sciences at The University of Arizona*, 91860A.
- Thompson, K., Schmid, T., Rolland, J. (2010). *Recent discoveries from nodal aberration theory* (Vol. 7652). New York: SPIE, 32-38.
- Thompson, K. P. (1980). *Aberration fields in tilted and decentered optical systems*. Doctoral Dissertation, University of Arizona, Optical Sciences Center, Tucson, 32-38.
- Thompson, K. P. (2009). Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: spherical aberration. *JOSA A*, 26(5), 1090-1100.
- Thompson, K. P. (2010). Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the comatic aberrations. *JOSA A*, 27(6), 1490-1504.
- Thompson, K. P. (2011). Multinodal fifth-order optical aberrations of optical systems without rotational symmetry: the astigmatic aberrations. *JOSA A*, 28(5), 821-836.

- Thompson, K. P., Schmid, T., Cakmakci, O. and Rolland, J. P. (2009). Real-ray-based method for locating individual surface aberration field centers in imaging optical systems without rotational symmetry. *Journal of the Optical Society of America A*, 26(6), 1503-1517.
- Tyson, R. K. (1982). Conversion of Zernike aberration coefficients to Seidel and higher-order power-series aberration coefficients. *Optics Letters*, 7(6), 262-264.
- Wang, Y., Chang, R., Gu, Z., Yang, B. and Zhang, L. (2025). Desensitization design method of an off-axis three-mirror anastigmatic optical system based on the nodal aberration theory. *Optics Communications*, 575, 131228.
- Wang, Y., Li, Y., Gu, Z. and Fu, Y. (2022). Optical design method of a three-mirror anastigmatic telescope with low misalignment sensitivity based on the nodal aberration theory. *Applied Optics*, 61(22), 6483-6491.
- Wilson, R., Delabre, B. (1995). New optical solutions for very large telescopes using a spherical primary. *Astronomy and Astrophysics*, 294, 322-338.
- Wilson, R. N. (1996). Aberration theory of telescopes. In *Reflecting Telescope Optics I: Basic Design Theory and its Historical Development*. New York: Springer, 55-313.
- Wilson, R. N. (1997). History of optical theory of reflecting telescopes and implications for future projects. In A. L. Ardeberg (Ed.), *Optical telescopes of today and tomorrow* (Proceedings of SPIE, Vol. 2871). New York: SPIE, 784-794.
- Wu, W., Deng, Z., Li, X., Luo, Z. and Shang, J. (2021). Efficient misalignment calculation for two-mirror optical systems based on wavefront aberrations in a single field of view. *Optical Engineering*, 60(12), 125104.
- Wu, W., Shang, J., Cao, Y., Chen, C. and Zhou, J. (2020). Research on applicability of sensitivity table method in optical system alignment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 3, 38-45.
- Wu, W., Shang, J., Luo, Z., Fang, D. and Deng, Z. (2019). Misalignments computation of a two-mirror optical system based on modified merit function regression method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 8, 122-135.
- Yeşiltepe, M., Bauer, A., Karcı, Ö. and Rolland, J. P. (2023). Sigma vector calculations in nodal aberration theory and experimental validation using a Cassegrain telescope. *Optics Express*, 31(25), 42373-42387.
- Yeşiltepe, M., Lişesivdin, S. B. (2024). Experimental investigations of sigma vectors in nodal aberration theory for coma-free pivot misalignment state of a cassegrain telescope. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(4), 1145-1154.
- Yuan, X.-Y., Su, D.-Q., Cui, X.-Q. and Liu, G.-R. (2005). A study on the Paul-Baker system as an instrument for multi-object spectrum observation. *Chinese Journal of Astronomy and Astrophysics*, 5(5), 546.

- Zhang, X., Chen, H., Wang, J. and Qi, B. (2012). *Computer-aided alignment for a Cassegrain telescope*. 6th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, Suzhou, 78-95.
- Zhao, N., Papa, J. C., Fuerschbach, K., Qiao, Y., Thompson, K. P. and Rolland, J. P. (2018). Experimental investigation in nodal aberration theory (NAT) with a customized Ritchey-Chrétien system: third-order coma. *Optics Express*, 26(7), 8729-8743.
- Zhong, Y. (2018). *Optical design methods of non-rotationally symmetric optical systems with freeform surfaces*. Doctoral Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Physikalisch-Astronomische Fakultät, 85-93.

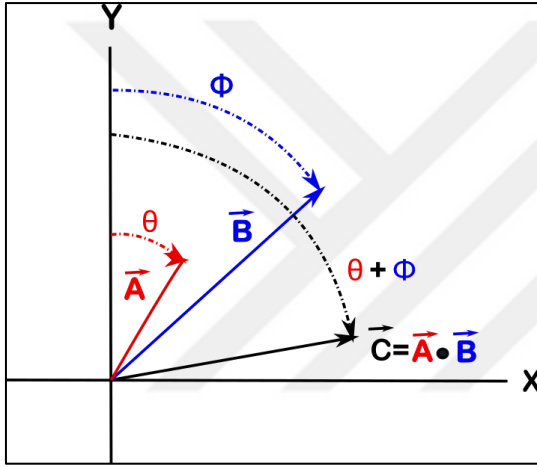




EKLER

EK-1. Shack Vektör Çarpımı (SVP)

R. V. Shack, daha önce Geometrik Cebir’de bahsedilmiş olduğundan habersiz bir vektör çarpım operasyonu geliştirmiştir. Shack Vektör Çarpımı olarak bilinen bu yöntemde, büyüklüğü bahse konu iki vektörün çarpımına, açısı, yine bu iki vektörün açılarının toplamına eşit olan bir başka vektör elde edilmektedir. Bahsedilen vektör çarpım yöntemi çapraz veya nokta çarpımı değildir. Shack Vektör Çarpımının genel tanımlaması aşağıdaki denklemler ile verilmiş olup vektörler arasındaki ilişki aşağıda verilen şekil ile grafiksel olarak sunulmuştur (Gray ve Rolland, 2015).



Şekil 1.1. Shack vektör çarpımı

$$A = \langle a_x, a_y \rangle$$

$$B = \langle b_x, b_y \rangle$$

$$AB = \langle (a_y b_x + a_x b_y), (a_y b_y + a_x b_x) \rangle$$



Gazili olmak ayrıcalıktır...