







DAG Teleskobu için Potansiyel Görüntüleme Aygıtı Ön Optik Tasarımı

Görkem Varol¹  , Tarık Sipahi¹ , Sinan Kaan Yerli¹ , Tenay Saguner Rambaldi¹ , Ege Tunç¹ 

¹ Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, Astronomi Optiği Laboratuvarı (AOL), 06800 Ankara, Türkiye

Accepted: January 9, 2023. Revised: December 11, 2022. Received: November 13, 2022.

Özet

Bu çalışmada OpticStudio/ZEMAX kataloglarındaki Kullanıma Hazır Ticari (COTS – Commercial Off-the-shelf) merceklerle DAG için potansiyel bir görüntüleme sistemi tasarlanmıştır. Önce paraaksiyel tasarım tanıtılmış uygun mercek düzeni seçilip kalın mercek tasarımı yapılmıştır. Ardından gerçek mercek tasarımı için sistem optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Daha sonra en yüksek görüntüleme performansı elde etmek için COTS ve ZEMAX'ın Stock Mercek Eşleştirme (Stock Lens Matching) aracı kullanılmıştır. Kullanılan iki çift mercek DAG teleskobunun optik özelliklerinin yanısıra MTF, en iyi spot diyagramı ve seçilen dedektörün özelliklerine uygun çevrelenmiş enerji değeri göz önüne alınarak seçilmiştir.

Abstract

In this study, a potential imaging system for DAG is designed with Commercial Off-the-shelf (COTS) lenses using lens catalog library inside OpticStudio/ZEMAX. First, the paraxial design was introduced, the appropriate lens assembly was selected, and the thick lens design was made. Then, system optimization was carried out for real lens design. After finding the best imaging system, ZEMAX's Stock Lens Matching tool was used to achieve the highest imaging performance using COTS. Two doublet lenses are chosen according to optical specifications of DAG telescope and best spot diagram, MTF, proper encircled energy for detector pixel diameter.

Anahtar Kelimeler: telescopes, instrumentation: miscellaneous, software: simulations

1 Giriş

DAG Teleskobu 4 metre çaplı, iki Nasmyth odaklı, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerde çalışan, Cassegrain odaklı bir Ritchey-Chretien (RC) teleskoptur (Jolissaint ve diğ. 2016). RC bir teleskopta birincil ve ikincil aynalar hiperboliktir (Abdulkadyrov ve diğ. 2018). Çift hiperbolik ayna üçüncü dereceden komatik ve küresel sapmaları gidermekte başarılıdır (Keskin ve diğ. 2014). Böylece DAG teleskop daha geniş görüş alanına sahip olmaktadır.

Işık tüm aynaları içeren teleskop optiğinden geçip "Odak Düzlemi Aygıt(lar)ına" (ODA) ulaşmadan önce bir tür düzeltmeden geçmek durumundadır. Bu düzeltme görüntü kalitesini artırıp teleskop aynalarından doğan sapmaları (astigmatizma, alan eğriliği v.b.) gidermek ve odak düzleminin sonundaki dedektörün niteliklerine uygun olmalıdır. Bu amaç için de ODA içine ya da öncesine ek optik düzeneğe ve/veya optik sistemler tasarlanmaktadır.

Bu çalışma, bu amaç doğrultusunda, DAG teleskop optiğine uyan potansiyel bir görüntüleme aygıtı ön tasarımını içermektedir. Optik tasarım için görünür ışık ve yakın-kızılötesi bantları hedeflendiğinden tasarımda 0.4–1.1 μm dalgaboyu aralığı kullanılmıştır. Atmosfer geçirgenliği 1.1 μm dalgaboyunun üzerinde hızla azalmaktadır (Gates 1960).

2 Optik Tasarım

Optik tasarıma görüntü uzayında istenen dalgaboyu aralığında duyarlılığı yüksek uygun bir dedektör seçerek başlamak gerekmektedir. Seçilecek dedektörün özelliklerinden bağımsız tasarım yapılamayacağı için de optik tasarım süreci başlamadan önce dedektör seçilmelidir. Işığı teleskoptan dedektörün çipine kadar yönlendirmek için bir dizi optik eleman veya yüzey kullanılmalıdır. Optik tasarımını sınırlandıran etmenlerden birisi kırınımıdır. Kırınım-sınırlı Airy disk çapını dedektör piksel boyu kadar tanımlarsak optik sistem doğru biçimde "kırınım-sınırlı" olarak çalışacaktır (Bentley & Olson 2012). Airy disk boyu şu şekilde tanımlanmaktadır (Holst 2007):

$$D_{\text{airy disk}} = 2.44 \lambda f/\# \quad (1)$$

Burada λ dalgaboyunu, $f/\#$ odak oranını belirtmektedir.

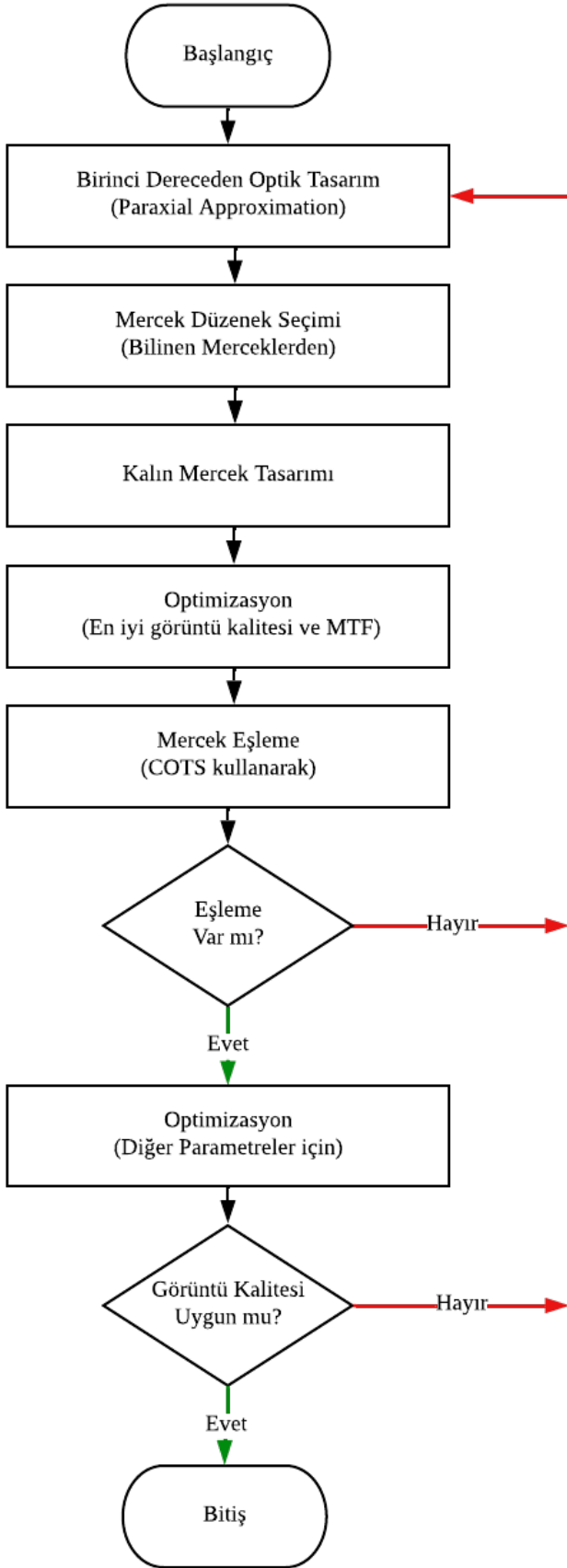
Bu çalışmada dedektör için ANDOR, iKon-M 934 modeli seçilmiştir. Dedektör görünür ve yakın-kızılötesi dalgaboylarında çalışmaktadır. Görünür dalgaboyundaki kuantum verimliliği %90 civarında olup yakın-kızılötesinde ise 1.0 μm 'de %50'ye kadar düşmektedir.

Çalışma kapsamında üretilen ön optik tasarım için izlenen algoritma Şekil 1'de verilmiş ve izlenen aşamalar aşağıda alt bölümlerde açıklanmıştır.

2.1 Paraaksiyel Tasarım

Optik tasarımın ilk aşaması paraaksiyel yaklaşımlar kullanarak geometrik parametrelerin hesaplanmasıdır. En uygun mercek

* gorkemvarol2@gmail.com



Şekil 1. Optik tasarım için kullanılan algoritma.

Çizelge 1. Birinci derece paraksiyel tasarım özellikleri.

Merceklerin Odak Uzaklığı	50 mm
Kırınım-Sınırlı Nokta Yarıçapı (RMS)	10.41 μm
CCD Kamera	ANDOR iKon-M 934
CCD Yonga Boyutu	13.3×13.3 mm
CCD Görüntü Boyutu	1024×1024
Piksel Boyutu	13 μm
Görüş Alanı (FoV)	10'
Odak Oranı (f/#)	f/7
Dalgaboyu Aralığı	VIS-NIR (0.4–1.1 μm)
Merkezi Dalgaboyu	0.8 μm

kombinasyonlarını hesaplamak için MATLAB kullanılmıştır. Uygun nihai kamera sistemi için odak düzlemine M4 düz aynası eklenmiştir.

Ara durağın (stop) birinci merceğin arka odak düzleminde ve ikinci merceğin ön odak düzleminde olduğundan bu ilk tasarım tele-merkezli olmuştur. Tele-merkezli merceklerde giriş ya da çıkış açıklığından en az biri sonsuzda yer almalıdır.

Mercekler hangi açıklığın sonsuzda yer aldığına göre “görüntü uzayı tele-merkezli” ve “nesne uzayı tele-merkezli” olarak adlandırılır. İki aralık da sonsuzda ise çift-merkezli mercek olarak adlandırılır. Bu çalışmada, birinci merceğin arka odak düzlemini ikinci merceğin ön odak düzlemine tam olarak ara durakta (stop) keşitirerek birinci derece optik tasarımın “çift tele-merkezli” olması sağlanmıştır. Böylece dedektör mesafesindeki değişime bağlı bozulmalar en aza indirilir. Görüntü uzayı ve nesne uzayı sonsuza gittiği için Lambert kosinüs yasasına uymaz ve tekdüze bir aydınlatma gerçekleşir, optik bozulmalar azalır ve sabit açısal büyütme gözlenir (Pate 1998).

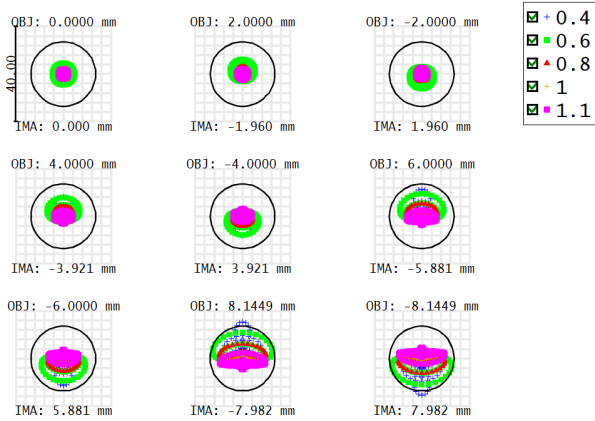
Bu şekilde hazırlanan optik tasarımda Görüş Alanı'nın tüm noktalarında benzer açısal büyütme olacaktır. İlk hesaplama sonuçları Çizelge 1'de verilmiştir.

2.2 Mercek Düzenek Seçimi

Optik sistem için farklı mercek düzenekleri denenerek tüm düzeneğin performansına göre seçim yapılmıştır (bkz. §2.5). Cooke Üçlüsü (Cooke Triplet), Çift-Gauss (Double-Gauss) ve Petzval gibi mercek düzenekleri bu yöntemle denenmiştir. Bu denemeler sonucunda Petzval mercek düzeneklerinin daha verimli olacağına karar verilmiştir.

Petzval mercek tasarımı temelde iki akromatik çift mercekten ve çiftler arasındaki ışık açıklığından oluşur. Arka çift, negatif komatik sapma yaratırken ön çift positif komatik sapmaya sebep olarak toplam sapmayı sönmüler. Küresel sapmalar ise iki çiftte özgün olarak düzeltilir. Işık açıklığının konumu astigmatizmayı gidermeye ve alanı düzleştirmeye yarar.

Optik tasarımın performansı için Spot Diyagramı Şekil 2'de ve Görüş Alanı nokta değerleri Çizelge 2'de verilmiştir. Kuantum verimliliğinin altında kalan parlaklık değerlerinde dedektörde ve görüntüde gürültü gözlenir. Yeterince parlak ışık toplanabilirse bu gürültü de azalacaktır (Beenakker & Schönberger 2003). Bunun yanında odak oranını değiştirilerek dedektörde 3 kata kadar daha fazla aydınlanma sağlanabilmektedir (Courtès 1988). Bu nedenle tasarımda odak oranını f/12.2'den f/7'e düşürdük.



Şekil 2. Tasarlanan sistemin “Spot Diyagramı”. Diyagram, kırınım-sınırlı Airy Diskin içine giren farklı Görüş Alanı (FoV) noktalarındaki, farklı bozunumları 5 farklı dalgaboyuna göre gösterir. 9 farklı noktanın yarıçapları Çizelge 2’de verilmiştir.

2.3 Kalın mercek tasarımı

Mercek çapı, f-stop, ön ve arka odak uzaklığı gibi tasarım gereksinimlerini sabitledikten sonra Mercekçi Denkleminden (2) yararlanarak ve BK7 cam kullanarak ilk gerçek optik tasarım oluşturuldu. Uygun cam seçildikten sonra mercek kalınlığı ve eğrilikleri hesaplanarak kalın mercek uygulamasına geçilmiştir.

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n - 1) \times d}{n \times R_1 \times R_2} \right] \quad (2)$$

Burada f odak uzunluğunu, n kırılma indisini, R yüzey eğrilik yarıçapını (her bir optik eleman için bir indis) ve d mercek kalınlığını vermektedir.

2.4 Optimizasyon

En iyi görüntü kalitesi ve en düşük sapmaları optimize etmek için Zemax/OpticStudio (bundan sonra **ZEMAX** olarak anılacak) kullanılmıştır. ZEMAX, yüksek görüntü kalitesi, düşük yüksek sıralı sapma, kırınım-sınırlı nokta, en yüksek çevrelenmiş enerji oranı v.b. gibi hesaplamalar için birçok optimizasyon tekniği sunar. Optimizasyon yapılırken düşük mertebeli sapmaların yanı sıra astigmatizm, komatik sapmalar ve küresel sapmalar gibi yüksek mertebeli sapmalar da göz önüne alınmıştır.

Bu tasarım sürecinin ana amacı en iyi görüntü kalitesini elde etmektir. DAG teleskobunun odak düzleminde, görünür ve yakın-kızılötesi bölgelerde görüntüleme aygıtı tasarlayabilmek için iki çift camlı mercek seçilmiştir. Mercek seçimi için ZEMAX yazılımının **Stock Lens Matching** aracı kullanıldı. En iyi mercek kombinasyonu Çizelge 3’de verilmiştir. Tasarımın toplam boyutu 85 mm olarak hesaplanmıştır. Optik tasarım VIS-NIR (0.4–1.1 μm) dalgaboyu bölgesinde çalışmaktadır.

Bu aşamalar sonrasında oluşturulan birinci derece optik ön tasarım Şekil 3’de ve kalın mercek tasarımını içeren optik düzenek Şekil 4’de verilmiştir.

2.5 Tasarımda “COTS” Kullanımı

Sürecin en zorlu kısmı kullanıma hazır ticari mercek kataloglarından (COTS) mercek kombinasyonu bulmaktır.

Çizelge 2. Şekil 2’de verilen Spot Diyagramı için Görüş Alanı (FoV) noktalarının değerleri.

Görüş Alanı noktası	RMS Spot Yarıçapı (μm)
1	2.095
2	2.261
3	2.261
4	2.822
5	2.822
6	3.854
7	3.854
8	5.473
9	5.473

Çizelge 3. ZEMAX’ta yapılan COTS araması sonuçları. Bu aramada EFL ve EFD toleransları %25, en düşük kriter değeri de 0.011697 olarak seçilerek tüm yüzeyler ve tedarikçiler arasında arama yapılmıştır.

Bileşen	Yüzey	Marka	Model	MF	
				Değer	Değişim
1	1-3	ROSS OPTICAL	L-AOC085	1.561862	1.550165
2	5-7	THORLABS	AC127-050-C	1.668607	1.656909
Kombinasyon:				3.698161	3.686464

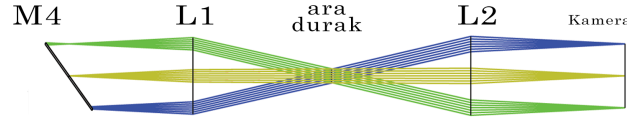
Optik sistemlerin üretim ve montaj maliyetini düşürüp proje süresini azaltabilmek için *ticari kullanıma hazır mercekler* (Commercial Off-the-Shelf Lenses - COTS) kullanmak optik tasarımda rağbet gören bir yöntemdir (**Prentice ve diğ. 2021**). Bu süreçteki önemli zorluklardan birisi bilinen firmalardan *uygun* mercek bulup tedarik sürecini hızlandırmaktır. Dolayısıyla, önce Edmund Optics ya da Thorlabs gibi üreticilerin merceklerinin uygunluğu kontrol edilir. Mercek seçimini bu yolla kolaylaştırmak için ZEMAX, COTS mercek performanslarını karşılaştıran ve performans farklarını artık fonksiyonu (*merit function*) ile ölçen bir araç geliştirdi.

Bu çalışmada, ZEMAX’ın adı geçen aracı kullanılarak bir görüntüleme sisteminin hızlı biçimde nasıl tasarlanabileceği gösterilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır. COTS kullanılarak oluşturulan Petzval düzeneğinde başarılı bir optik performans gösterirken artık fonksiyonunun değerinin de istenilen düzeye düştüğü gözlemlendi.

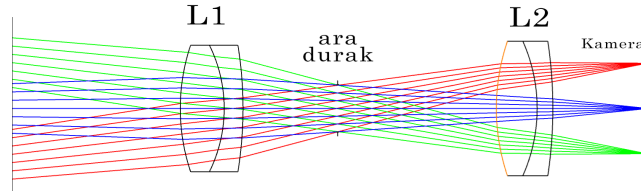
2.6 Diğer Analizler

Modülasyon transfer fonksiyonu (MTF) görüntüleme sistemlerinin temel değerlendirme aracıdır. MTF, uzamsal çözünürlüğün bir fonksiyonudur (**Zhang ve diğ. 2012**). MTF analizinde uzamsal frekans ve normalizasyon faktörününün değişimine bakılır ve MTF verisi optik kontrastı iletme becerisini belirler. Siyah beyaz çizgilerden oluşan bir görüntüye bakarken belirli bir sıklıktan (uzamsal frekans) sonra çizgiler birbirine girerek netlik kaybolur. Dolayısıyla kontrast kayıplarını en aza indirerek görüntüyü tekrar üretmek gerekir. Optik sistemlerde görüntü ayırt edilemediğinde kontrast sıfıra doğru azalır ve bu değer gerçekleştiği özel uzamsal frekansa *kesme frekansı* denir (**Tan ve diğ. 2021**).

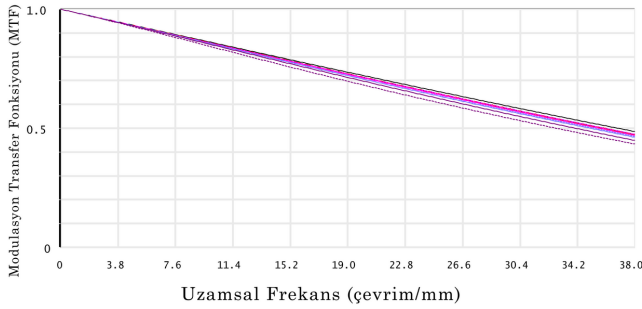
Nyquist frekansı piksel boyutunun iki katının tersine eşittir. Bir optik sistemin iyi bir görüntüleme performansı sağlaması için Nyquist frekansının MTF değerinin $\sim 50\%$ si kadar olması gerekmektedir (**Fischer & Tadic 2000**). Azalan



Şekil 3. Birinci derece optik ön tasarımı. M4: DAG teleskop optiğinin odak düzlemine yönlendiren düz ayna, L1 ve L2: tasarımın iki mercek bileşeni, ara durak: L1 ve L2'nin odaklarının paylaştığı yüzey, kamera: odak düzlemi aygıtı.



Şekil 4. COTS mercekleri kullanılarak oluşturulan optik düzenek. Sistemin eksen uzunluğu 85 mm'dir.



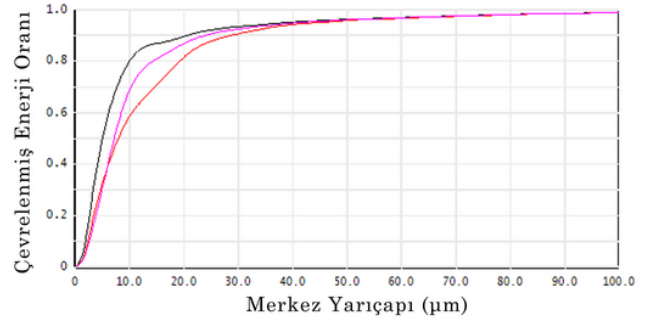
Şekil 5. Modülasyon Transfer Fonksiyonu (MTF). Beklenen performans Nyquist frekansında görülür ve kırınım-sınırlı MTF değerlerine yakınsar (siyah çizgi). Diğer alan noktalarındaki MTF'ler renkli çizgilerle gösterilmiştir.

piksel boyutu uzamsal örneklem frekansını düşürür ve sistemin MTF değerlerini yükseltme potansiyeline sahiptir. Nyquist frekansının üzerindeki görüntü değerleri sensor tarafından doğru bir şekilde üretilemez ve ayırt edilemez. MTF grafiği, sistemin Nyquist frekansı üzerinde kalan uzamsal frekans değerlerindeki yapıları ne kadar keskin bir şekilde ilettiğini gösterir (Chen ve diğ. 2000). Bu çalışma sonucu Nyquist frekansı için 38 çevrim/mm değeri bulunmuş ve oluşturulan MTF grafiği Şekil 5'te verilmiştir.

Kırınım sonucu eşmerkezli parlak ve sönük dairelerin merkezdeki parlak noktayı çevrelediği (Airy diski) kırınım modeli gözlenir. Airy diski toplam ışığın ~%84'ünü içerir (Rivera-Ortega & Pico-Gonzalez 2016). Çözünürlüğün ancak gerçekleşebilmesi için iki Airy diskinin merkezi en az Airy diskinin yarıçapı kadar ayırık durumda olmalıdır; yoksa disklerin merkezleri birbirine çok yakınlaşacağı için fark edilemez. Uygun çözünürlüğün sağlanması için bir Airy diskinin merkezi yanındaki Airy diskinin en yakın birinci karanlık noktasına denk gelmelidir.

2.7 Optik Tasarım Sonuçları

COTS yardımıyla yapılan bu tasarımda ulaşılan nihai düzenek 85 mm eksen uzunluğuna sahiptir (bkz. Şekil 4). Tasarımın Nyquist frekansında ulaştığı MTF değeri ~%50 olduğu gözlenmiştir (bkz. Şekil 5). Şekil 6'de bir piksel çapta



Şekil 6. Farklı Görüş Alanı noktaları için çevrelenmiş enerji analizi.

toplam enerjinin ~%80'nin çevrelenmiş olduğu görülmektedir. Kullanılacak merceklerin kaçak ışık analizinde uygun değerler vermesi adına merceklerin kullanılacağı dalgaboyu aralığına uygun kaplamaya sahip olmaları gerekmektedir.

3 Sonuç

Ön optik tasarımında yüksek dereceli sapmaları gidermek için Petzval tasarımı kullanıldı. Bunun yanında görüntü düzleminde odak oranını f/12.2'den f/7'ye düşürdük. Odak oranındaki küçülmenin görüntü düzeltici etkisi astronomi için çok önemlidir. Odak uzunluğunun kısalmasıyla ışık dedektöre daha hızlı düşeceği için kısa pozlama ve daha iyi görüntüleme yapılabilmektedir. Petzval mercekleriyle küresel ve komatik sapmalar düzeldiği ışık açıklığının konumu astigmatizmde azalmaya sebep olur.

Görüş Alanı (FoV) noktaları odak düzleminde 10' görüşü kapsayacak biçimde eklenmiştir. Daha fazla alan noktası eklemek optimizasyon sonuçlarını iyileştirmiş ve optik eksen etrafında simetrik bir tasarım sergilemiştir (bkz. Şekil 4). Alan noktalarındaki Spot Diyagramı yarı kırınım-sınırlı performans sergiler (bkz. Şekil 2).

MTF, merkezi dalgaboyunda kırınım sınırlamasına yakındır. Çevrelenmiş enerji analizi (bkz. Şekil 6) dedektör özelliklerine yakındır.

COTS ile elde ettiğimiz görüntü kalitesi yüksek olmasına rağmen hem görüntü sensör boyutunun tamamını

kaplamamakta hem de optimizasyon sonucunda tasarım telesentrikten uzaklaşmaktadır. Hedeflediğimiz paraksiyele yakınlaşmak için özgün tasarım yapılmalıdır (bkz. Çizelge 1).

Kaynaklar

- Abdulkadyrov M. A., ve diğ., 2018, in Navarro R., Geyl R., eds, Vol. 10706, *Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation III*. SPIE, p. 1070631, doi:10.1117/12.2311637
- Beenakker C., Schönerberger C., 2003, *Physics Today*, 56, 37
- Bentley J., Olson C., 2012, *Field Guide to Lens Design*. Field Guides, SPIE
- Chen T., Catrysse P. B., Gamal A. E., Wandell B. A., 2000, in Sampat N., Yeh T., Blouke M. M., Sampat N., Jr. G. M. W., Yeh T., eds, Vol. 3965, *Sensors and Camera Systems for Scientific, Industrial, and Digital Photography Applications*. SPIE, pp 451–459, doi:10.1117/12.385463
- Courtès G., 1988, in *Very Large Telescopes and their Instrumentation*, Vol. 2. p. 1141
- Fischer R., Tadic B., 2000, *Optical System Design*. McGraw-Hill's accessEngineering, McGraw-Hill Education
- Gates D. M., 1960, *J. Opt. Soc. Am.*, 50, 1299
- Holst G. C., 2007, in Holst G. C., ed., Vol. 6543, *Infrared Imaging Systems: Design, Analysis, Modeling, and Testing XVIII*. SPIE, p. 65430A, doi:10.1117/12.724481
- Jolissaint L., Keskin O., Zago L., Yerli S. K., Yesilyaprak C., Mudry E., Lousberg G., 2016, in Hall H. J., Gilmozzi R., Marshall H. K., eds, Vol. 9906, *Ground-based and Airborne Telescopes VI*. SPIE, p. 99063J, doi:10.1117/12.2233297
- Keskin O., Yesilyaprak C., Yerli S. K., Zago L., Jolissaint L., 2014, in Stepp L. M., Gilmozzi R., Hall H. J., eds, Vol. 9145, *Ground-based and Airborne Telescopes V*. SPIE, p. 914547, doi:10.1117/12.2067599
- Pate M. A., 1998, in Gardner L. R., Thompson K. P., eds, Vol. 3482, *International Optical Design Conference 1998*. SPIE, pp 877–886, doi:10.1117/12.322029
- Prentice E. F., Grøtte M. E., Sigernes F., Johansen T. A., 2021, in Cugny B., Sodnik Z., Karafolas N., eds, Vol. 11852, *International Conference on Space Optics — ICSO 2020*. SPIE, p. 1185258, doi:10.1117/12.2599937
- Rivera-Ortega U., Pico-Gonzalez B., 2016, *Physics Education*, 51, 015012
- Tan N. D., Bui T. T. Q., Pham T.-M., Thai H. T. B., Nguyen G. L., Nguyen T. N., 2021, *J. Real Time Image Process.*, 18, 1697
- Zhang X., Kashti T., Kella D., Frank T., Shaked D., Ulichney R., Fischer M., Allebach J. P., 2012, in Gaykema F., Burns P. D., eds, Vol. 8293, *Image Quality and System Performance IX*. SPIE, p. 829307, doi:10.1117/12.912989

Access:

M23-0351: *Turkish J.A&A* — Vol.4, Issue 3.