

Shack-Hartmann Dalga Cephesi Sensör Tabanlı Adaptif Optik Sistemi ve Laboratuvar Sonuçları

Seda Baştürk^{1,2}  , Ebru Uzunçam¹ , Derya Öztürk Çetni^{1,3} , Gizay Yolalan^{1,4} 
Kemal Rüzgar⁵  Cahit Yeşilyaprak^{1,6} 

¹ Türkiye Ulusal Gözlemevleri, ATASAM-DAG, 25050 Erzurum, Türkiye

² Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Optik ve Fotonik Anabilim Dalı, 25050 Erzurum, Türkiye

³ Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Astronomi ve Astrofizik Anabilim Dalı, 25050 Erzurum, Türkiye

⁴ Akdeniz Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uzun Bilimleri ve Teknolojisi Anabilim Dalı, 07070 Antalya, Türkiye

⁵ Optonium Technologies LLC., 929010 Lefkoşa, Kuzey Kıbrıs

⁶ Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzun Bilimleri Bölümü, 25050 Erzurum, Türkiye

Accepted: February 26, 2025. Revised: February 26, 2025. Received: December 5, 2024.

Özet

Bu çalışmada, Türkiye Ulusal Gözlemevleri bünyesindeki Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) optik laboratuvarında kurulan Shack-Hartmann adaptif optik (SH-AO) sisteminin düzeltme performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın giriş bölümünde, adaptif optik konseptine ve astronomik uygulamalardaki önemine genel bir bakış sunulmuş, ardından farklı türdeki dalga cephesi algılama tekniklerine değinilmiştir. Shack-Hartmann dalga cephesi sensörünün çalışma prensibi ve performans parametreleri detaylandırılmıştır. Materyal ve yöntem bölümünde, deneysel düzenek ve sistem bileşenleri hakkında bilgi verilmiş; mekanik kurulum ve hassas optik hizalama süreçleri ele alınmıştır. Optik yolda faz farkı oluşturabilecek statik ve dinamik aberasyon kaynaklarının sisteme entegrasyonu açıklanmıştır. Sonuçlar bölümünde, sistemin dalga cephesi düzeltme performansı değerlendirilmiştir. Elde edilen metrikler ve sonuçlar, sistem performansını analiz etmek amacıyla kullanılmıştır. Kalibrasyon sırasında kullanılan dalga cephesinin sahip olduğu, statik dalga cephesi hatası her iki durumda da ortak olarak bulunduğu, bozulmuş ve düzeltilmiş dalga cephesine ait tepe çukur hata ölçümleri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, SH-AO sisteminin hata düzeltme yüzdesi %63.43 olarak hesaplanmıştır.

Abstract

This study experimentally investigates the wavefront correction performance of a Shack-Hartmann adaptive optics (SH-AO) system, established in the optics laboratory of the Eastern Anatolia Observatory (DAG), part of the Türkiye National Observatories. The introduction provides a comprehensive overview of the adaptive optics concept and its significance in astronomical applications. It is followed by a discussion of various wavefront sensing techniques. The operating principle and performance parameters of the Shack-Hartmann wavefront sensor are presented in detail. The materials and methods section describes the experimental setup and system components, including the mechanical assembly and precise optical alignment procedures. The integration of static and dynamic aberration sources, which introduce phase differences in the optical path, is explained. In the results section, the wavefront correction performance of the system is evaluated. The obtained metrics and results are utilized for the analysis of system performance. Given that the static wavefront error of the calibration wavefront was common to both cases, the SH-AO system's error correction percentage was calculated to be 63.43% based on the peak-to-valley error measurements of the distorted and corrected wavefronts.

Anahtar Kelimeler: instrumentation: adaptive optics – turbulence – atmospheric effects

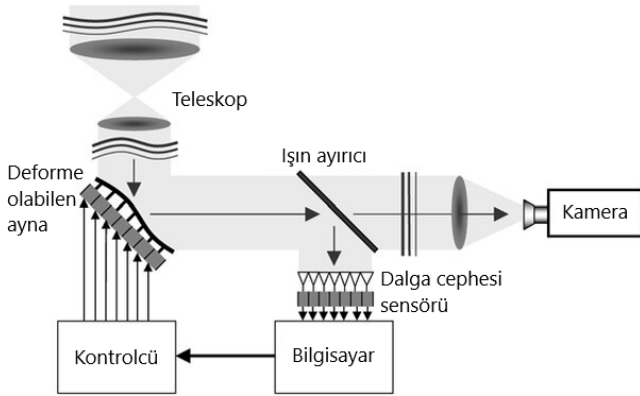
1 Giriş

1953 yılında adaptif optik (AO) konseptin ortaya atılmasıyla (Babcock 1953), dalga cephesi sensörleri (WFS), AO sistemlerinin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Kapalı döngü kontrol sistemi ile geri besleme mekanizması olarak işlev gören algoritmalar sayesinde, WFS ile algılanan dalga cephesi bozulmaları, gerçek zamanlı olarak deforme olabilen aynanın (DM) aktüatörlerine iletilen kontrol sinyallerine dönüştürülmektedir. Bu sayede statik ve dinamik olabilen optik sistemdeki bozulmaların düzeltilmesi sağlanır.

Statik kaynaklar arasında, ayna veya merceklerin üretim ve kaplama süreçlerinden geriye kalan yüzey düzensizlikleri veya hizalama hataları yer alırken, dinamik kaynaklara atmosferik türbülans gibi çevresel etkiler örnek gösterilebilir. Şekil 1'de adaptif optik sistemlerinin temel bileşenleri ile ve kapalı döngü kontrol sisteminin genel yapısı sunulmaktadır.

Shack-Hartmann dalga cephesi sensörü, günümüzde en iyi bilinen ve yaygın olarak kullanılan zonal dalga cephesi sensörlerinden biridir. İlk olarak 1971 yılında, atmosferin neden olduğu bozulmalardan etkilenmiş Dünya'dan alınan uydu görsellerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Bu yöntem, Hartmann plakası metodunun geliştirilmesi ile ortaya çıkmıştır

* sedab@trgozlemevleri.gov.tr



Şekil 1. Adaptif optik sisteminin çalışma prensibi ve kapalı döngü kontrol sistemi (Zhu, Guchuan, ve diğ. 2006).

ve astronomi gibi düşük ışık koşullarında daha verimli çalışacak biçimde optimize edilmiştir.

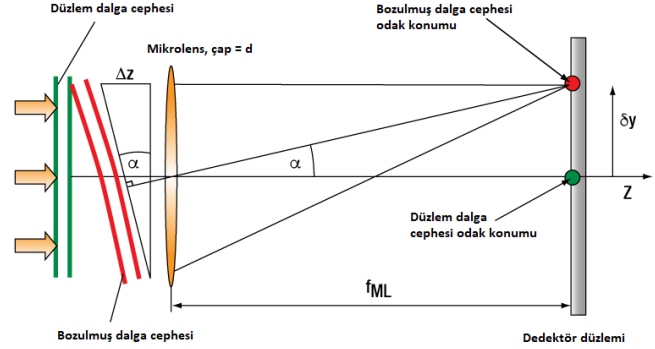
1982 yılında ortaya atılan faz çeşitliliği, bir fazı geri getirme algoritması olup, modal dalga cephesi algılama yöntemleri arasında yer almaktadır. Zaman içerisinde Gerchberg-Saxton gibi birçok faz çeşitliliği algoritmaları geliştirilmiştir. Ancak bu algoritmalar, yüksek hesaplama yükü gerektirdikleri ve çok sayıda iterasyon barındırdığı için özel bilgisayar istasyonlarına ihtiyaç duymakta, dolayısıyla oldukça maliyetli olmaktadır. Ayrıca hesaplama süresi görece uzun olduğundan, gerçek zamanlı adaptif optik uygulamaları için yeterince hızlı değildir.

Faz çeşitliliği yönteminin türevi ve özelleşmiş bir versiyonu olan eğrilik sensörü, 1988 yılında ortaya atılmıştır ve klasik PD algoritmalarına kıyasla daha az hesaplama gücü gerektiren bir modal sensör çeşididir. Daha sonra 1996 yılında, astronomi uygulamalarında Shack-Hartmann ve eğrilik sensörüne alternatif olması amacıyla piramit dalga cephesi sensörü geliştirilmiştir.

Şimdiye kadar sıralanan, sensör tabanlı yöntemlere ek olarak, dalga cephesindeki aberasyonları doğrudan bilimsel görüntüler üzerinden algılamak üzere eğitilen yapay sinir ağları gibi algoritmik yaklaşımlar, dolaylı dalga cephesi algılama yöntemleri arasında yer almaktadır. Bir diğer algoritmik yaklaşım ise, bilimsel kamera görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen görüntü keskinleştirme yöntemleridir. Günümüzde bilgisayarların hesaplama gücündeki ilerlemeler göz önüne alındığında, gelecekte bu tür yöntemlerin gerçek zamanlı teleskop uygulamalarında kullanılabileceği öngörülmektedir (Campbell & Greenaway 2006).

1.1 Shack-Hartmann Dalga Cephesi Sensörü

Shack-Hartmann dalga cephesi sensörü, mikrolens dizisi (MLA) sayesinde, sensöre gelen dalga cephesini zonal bölümlere ayırarak çalışır. Mikrolensler, dalga cephesinin her bir bölgesini, MLA arkasında yer alan mikrolens odak uzaklığı kadar olan mesafeye yerleştirilmiş dedektör düzleminde odaklar. Her bir mikrolens bölgesi alt açıklık olarak görev yapar ve mikrolens sayısı, sensörün örneklem parametresine karşılık gelir. Mikrolenslerin odakladığı noktaların konumu ile düz bir dalga cephesinin teorik olarak odaklanması beklenen nokta arasındaki fark üzerinden yerel gradyan hesaplanır. Böylece dalga cephesinin yerel fazı, yani bölgesel olarak optik yol farkı



Şekil 2. Tek bir mikrolens için, odak konumundan yerel dalga cephesi fazına geçişi gösteren diyagram. Kaynak: "Shack-Hartmann Wavefront Sensor", Thorlabs

belirlenir. Bu yerel optik yol farkları bir araya getirilerek, kapalı döngü algoritması ile dalga cephesi yeniden oluşturulur. Ölçülen dalga cephesi bilgisi, deforme olabilen aynanın aktüatörlerine gönderilmek üzere sinyallere dönüştürülür. Ayna yüzeyi, ölçülen dalga cephesi ile aynı olacak şekilde forma bürünür. Bu geri bildirim mekanizması kapalı döngüde sürekli devam eder.

Şekil 2'de MLA'da yer alan tek bir mikrolensin çalışma prensibi iki boyutlu olarak gösterilmektedir. İdeal durumda, mikrolense gelen düzlem dalga cephesi, lensin yüzey normali yani optik eksen boyunca ilerleyerek referans odak noktasında (yeşil nokta) odaklanır. Bozuk bir dalga cephesi ise mikrolensin yüzey normaline dik değildir ve referans noktasından saparak daha farklı bir konumda (kırmızı nokta) odaklanır. Referans ve sapma noktaları arasındaki yanal fark hesaplanarak dalga cephesinin yerel eğimi belirlenir. Düzlem geometrisi kullanılarak yer değiştirme açısı α hesaplanır. Böylece dalga cephesinin yerel gradyanı bulunmuş olur.

İdeal durumda mikrolens dizisi ile oluşturulan noktaların yeri, mikrolenslerin optik eksenleri ile çakışır. Bu noktalar dalga cephesi hata hesaplamasında kullanılacak referans konumlardır ve referans nokta alanını oluştururlar. Bozuk dalga cephesi ile oluşan odak noktaları, referans konumlardan sapmalar göstermektedir. Bu sapmalar kullanılarak yapılan hesaplamalarla, dalga cephesi yeniden oluşturulur. Her bir mikrolens bölgesine düşen dalga cephesi bölümü, yaklaşık olarak düzlem dalga kabul edilir. Işın demetinin ilgili bölümünün ilerleme açısı, bozuk dalga cephesinin yerel gradyanı ile ilgilidir. Eğer dalga cephesinin ilgili bölümü bozuk değil ise, mikrolens tarafından toplanan ışık, mikrolenslerin optik eksenleri boyunca ilerler, odak ise direk olarak referans konum üzerinde oluşur.

Shack-Hartmann dalga cephesi sensörünün performansını etkileyen başlıca dört parametre şunlardır:

- Mikrolens sayısı ve odak uzunlukları
- Ölçüm hassasiyeti
- Dinamik aralık
- Ölçüm doğruluğu

1.1.1 Mikrolens sayısı

Mikrolens sayısı, yeniden oluşturma algoritmasının güvenilir bir şekilde hesaplayabileceği maksimum Zernike modlarının sayısını sınırlar. Ölçülen bir dalga cephesinin Zernike polinomları cinsinden temsil edilebilmesi için gereken minimum Shack-Hartmann alt açıklık sayısı katı bir biçimde Zernike modlarının sayısına bağlanamasa da, genellikle ölçülebilecek modların sayısı

alt açıklık sayısı ile eşit kabul edilmektedir. Mod sayısı, alt açıklık sayısının iki katı olduğunda buna kritik örneklem denir (Navarro ve diğ. 2011).

1.1.2 Ölçüm hassasiyeti

Ölçüm hassasiyeti, sensör tarafından ölçülebilen minimum yer değiştirme açısıdır ($\alpha_{\min}$). Bir başka deyişle, sensör tarafından ölçülebilen minimum tespit edilebilir dalga cephesi eğimidir. Minimum yer değiştirme açısı, odaklanmış noktanın tespit edilebilir minimum yer değiştirmesinin ($\delta y_{\min}$) bir fonksiyonudur. Noktanın minimum tespit edilebilir yer değiştirmesi $\delta y_{\min}$, dedektörün piksel büyüklüğüne ve her bir alt açıklığa düşen piksel sayısına, algoritmanın doğruluğuna ve sensörün sinyal gürültü oranına (SNR) bağlıdır. f_{ML} , mikrolensin odak uzunluğu olmak üzere, küçük açı yaklaşımı kullanılarak, ölçüm hassasiyeti denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\alpha_{\min} = \frac{\delta y_{\min}}{f_{ML}} \quad (1)$$

1.1.3 Dinamik aralık

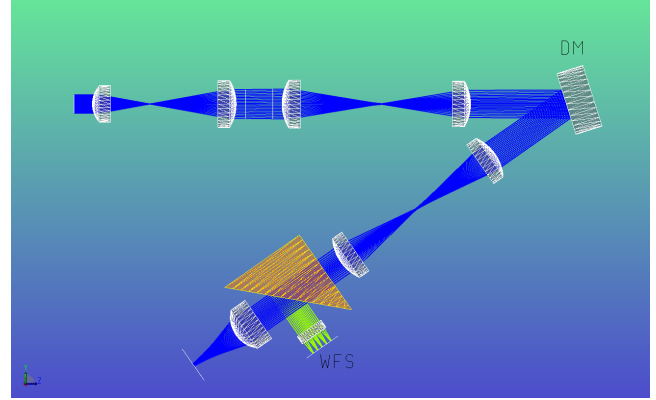
Dinamik aralık, sensörün ölçebileceği maksimum yer değiştirme açısını ($\alpha_{\max}$) ifade eder. Bir başka deyişle ölçülebilen maksimum faz boyutunun ölçüsüdür. Odak noktasının maksimum yer değiştirmesi $\delta y_{\max}$, bir mikrolensin yarıçapına karşılık gelir. D mikrolensin çapı olmak üzere, küçük açı yaklaşımı kullanılarak, dinamik aralık denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\alpha_{\max} = \frac{\delta y_{\max}}{f_{ML}} = \frac{(D/2)}{f_{ML}} \quad (2)$$

Dinamik aralık, daha büyük çapa sahip mikrolensler ya da daha küçük odak uzunluğuna sahip mikrolensler kullanılarak artırılabilir. Dinamik aralığı artırmak için daha büyük çapa sahip mikrolensler kullanıldığında, dalga cephesini temsil eden Zernike katsayıları azalır. Çünkü dalga cephesi daha az alt bölüme ayrılacak ve örneklem sayısı azalacaktır. Ancak, dinamik aralığı artırmak için, daha kısa odak uzunluğuna sahip mikrolensler kullanıldığında, sensörün ölçüm hassasiyeti azalır. İdeal durumda, sensörün kullanım alanına uygun olarak hem dinamik aralık hem de ölçüm hassasiyeti gereksinimlerini karşılayan odak uzunluğuna sahip mikrolens dizisi seçilmelidir.

1.1.4 Ölçüm doğruluğu

Sensörün ölçüm doğruluğunu etkileyen birtakım faktörler bulunmaktadır. Bunlardan biri, güvenilir bir şekilde ölçülebilen minimum dalga cephesi eğimidir ve odaklanmış noktanın referans noktaya göre olan mesafesinin hassas ölçüm yeteneğine bağlıdır. MLA dizisinin mikrolens büyüklüğü, sensörün piksel büyüklüğü ve sayısı, ışın demetinin çapı, kameranın aktif alanı ölçüm doğruluğunu doğrudan etkileyen parametrelerdir. Mikrolens sayısındaki artış, ışın demeti üzerinde daha fazla ölçüm noktası sağlayarak uzaysal çözünürlüğü artırır. Kamera sensörünün aktif alanı, yazılım üzerinden tanımlanır. Daha küçük bir aktif alan seçimi kare hızını artırabilir; ancak bu durumda ışın demetinin tamamı kapsanamaz ise dalga cephesi bilgisi kaybedilebilir. İdeal olarak, ışın çapı MLA'nın tamamını doldurmayacak şekilde seçilmeli, bu sayede kenar etkileri azaltılarak aktif alan seçiminde esneklik sağlanmalıdır. Ölçüm doğruluğunu artırmanın bir diğer yolu, tek bir görüntü yerine birden fazla görüntünün ortalamasının alınmasıdır.



Şekil 3. Zemax'ta modellenen SH-AO optik dizilimi.

Kaçak ışınların azaltılması ve ortam ışığının etkilerinin ortadan kaldırılması, lens tüpleri ve yazılım ayarlarıyla sağlanabilir. Ayrıca, daha fazla odak noktası analizi, dalga cephesindeki ince detayların daha doğru bir şekilde temsil edilmesine olanak tanır.

2 Materyal ve Yöntem

Laboratuvarda bulunan SH-AO sisteminin bileşenleri ana olarak 9 kısımdan oluşur (Şekil 3). Bunlar sırasıyla lazer kaynağı, ışın genişletici, faz plakası, birinci rölle lens grubu, DM, ikinci rölle lens grubu, ışın ayırıcı, kamera ve WFS'dir. WFS ölçümleri kapalı döngü kontrol yazılımında analiz edilerek, dalga cephesi yeniden oluşturulur. Böylece DM'in aktüatörlerine ne kadar voltaj uygulanacağı hesaplanır. Atmosferi simüle eden faz plakasının oluşturduğu aberasyonu, diğer deyişle optik yol farkını telafi etmek için, DM aktüatörleri ile ya da geri hareket ederek, dalga cephesinin yeniden düzlem dalga olarak bilimsel kameraya ulaşmasını sağlar.

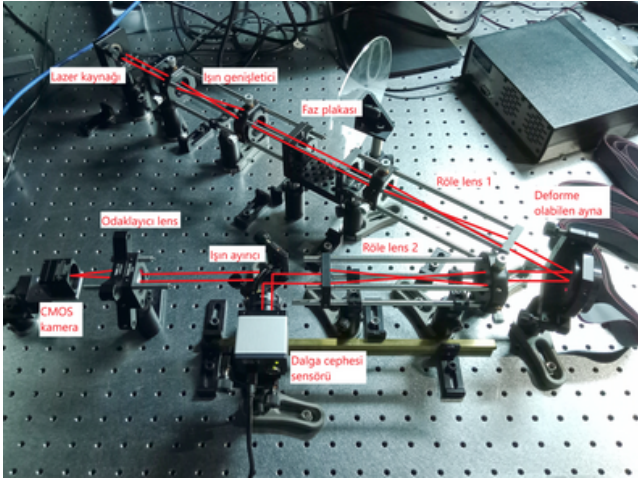
2.1 Materyal

Kullanılan ışık kaynağı, PL202 kodlu Thorlabs tarafından üretilmiş 635 nm dalgaboyuna sahip, 0.9 mW çıkış gücünde, $\varnothing = 3$ mm çapında yuvarlak ışın profiline sahip, paralel ışın demeti üreten kompakt lazer modülüdür.

Işın genişletici mercek grubu, 1' mekanik çapa sahip, odak uzunlukları $f=50$ mm ve $f=75$ mm olmak üzere iki adet plano-konveks mercekten oluşur. Lazerden çıkan 3 mm olan ışın çapı, ışın genişletici olarak görev yapan iki lensten geçtikten sonra yaklaşık 4.5 mm'ye ulaşmaktadır. Dalga cephesinin genişletilmesindeki sebep, sistemin örneklem parametresini artırarak DM ve WFS'nin aktif alanını doyurmaktır, etkili bir dalga cephesi düzeltmesi yapılabilmesi için gereklidir.

Atmosferi simüle edecek olan faz plakası, ışın demetinin paralel ilerlediği optik yola yerleştirilmiştir. Bu plaka, atmosferin edici hücrelerini temsil edecek farklı kırıcılık indislerine sahip yerel bölgelerden oluşur. Plaka döndürüldüğü zaman, ışın demeti sürekli olarak farklı kırıcılık indislerine sahip dinamik atmosfer katmanı gibi davranan plakadan geçerek optik yolda ilerler. Plaka döndürülmediğinde, statik aberasyon kaynağı olarak davranır.

Optik yoldaki birinci rölle mercek grubu ise, ışın çapını değiştirmeden, ışını deforme olabilen aynaya taşımakla görevlidir. İkinci rölle mercek grubu ise, birinci ile özdeşleştir ve deforme olabilen aynadan yansıyan ışın demetini, demet



Şekil 4. SH-AO düzeneği.

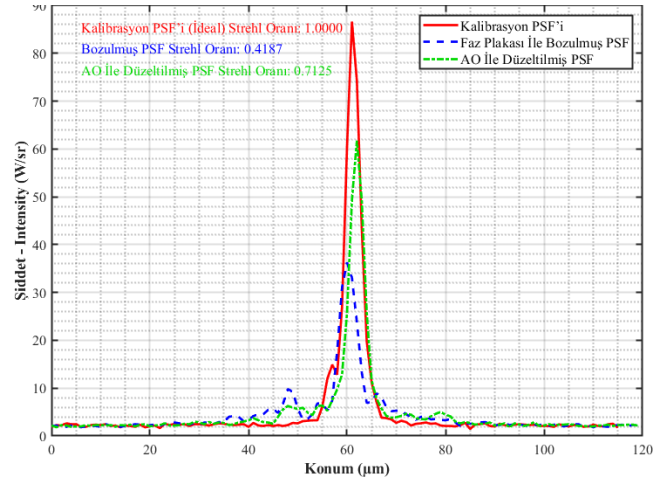
bölücüye taşımakta görevlidir. Mercek grubu $f=75$ mm olacak şekilde 2 özdeş plano-konveks mercekten oluşur.

Sistemde yer alan deformable ayna DM140A-35-UP01 kodlu, Boston Micromachines Cooperation (BMC) firması tarafından, mikro-elektro-mekanik sistemler teknolojisi (MEMS) ile üretilmiştir. Ayna yüzeyi açısından sürekli yapıda olan bir DM çeşididir. Ayna metal kaplaması alüminyumdur, korucuyu penceresi 400-1100 nm için yansıtmasız (AR) kaplamaya sahiptir. Toplam aktüatör sayısı 140 olmakla birlikte bu aktüatörler 12×12 boyutlarında bir matris oluşturacak şekilde dizilmiştir. Aktüatör büyüklüğü 400 mikron, aktüatör piston büyüklüğü maksimum 3.6 mikron 217 V'dir. Aktüatör coupling ve hysteresis parametreleri sırasıyla %13 ve %0'dır. DM'in aktif alanı 4.4×4.4 mm'dir. 4.5 mm olan ışın çapı DM aktif alanından daha büyük olduğundan, ışın genişletici sonrası optik yola iris yerleştirilerek ışın çapı küçültülmüştür.

Düzenekte kullanılan dalga cephesi sensörü, Thorlabs firmasına ait WFS10-5C kodlu, hızlı dalga cephesi sensörü kategorisinde yer alır. Mikrolens dizisi ve arkasında CMOS dedektöre sahip bir Shack-Hartmann dalga cephesi sensörüdür. Mikrolens büyüklüğü 150 mikron, mikrolens efektif odak uzunluğu 3.7 mm, dalga cephesi ölçüm doğruluğu 633 nm dalgaboyunda $\lambda/10$ rms'dir, ölçüm hassasiyeti 633 nm dalgaboyunda $\lambda/30$ rms'dir, dinamik aralık parametresi 633 nm'de $>100 \lambda$ 'dır. CMOS kameranın piksel büyüklüğü 9.9 mikron, kamera çözünürlüğü 640×480 pikseldir. Mikrolens - aktüatör oranı 2.7:1 olmaktadır, etkili bir şekilde WF düzeltmesi yapılabilmesi için bu oranın 1'den büyük olması önerilmektedir (Dubra & Alfredo 2007).

Demet bölücü ışığı %92 oranında geçirirken, %8 oranında da yansıtıp WFS'ye gönderir. Adaptif optik sistemlerinde bilimsel kameraya ulaşacak ışık şiddetinde minimum kayıp meydana gelmesi amaçlanır. Bu nedenle bazı adaptif optik sistemlerinde dikroik demet bölücü de kullanılabilir.

Sistemde, dalga cephesi düzeltmesini, nokta dağılım fonksiyonu (PSF) üzerinden kontrol edebilmek için, demet bölücüden paralel bir şekilde ilerleyen ışın demeti $f=60$ mm plano-konveks lens ile yakınsak hale getirilmiş ve odak düzlemine de, Ximea firmasına ait MQ013MG-E2 kodlu CMOS monokrom kamera yerleştirilmiştir. Böylelikle gerçek zamanlı olarak, SH-AO sisteminin düzeltme performansı izlenebilecek



Şekil 5. Çizgi profili verilerinden elde edilen PSF grafikleri.

ve PSF verileri düzeltme performansını nicelendirebilmek üzere kaydedilebilecektir.

Şekil 4'te, laboratuvarında mekanik kurulumu ve optik hizalanması yapılmış olan SH-AO sistemi görülmektedir, tüm bileşenler etiketlenerek gösterilmiştir.

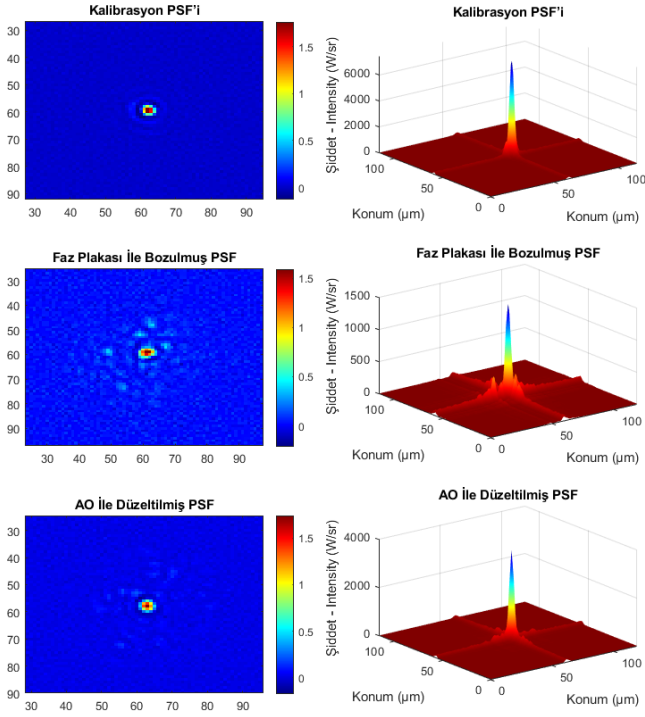
2.2 Yöntem

Sistemin mekanik kurulumu, optomekanik bileşenlerin montajını takiben, bu bileşenlerin birbirine entegre edilmesi ve kumpas gibi hassas ölçüm aletleri kullanılarak mekanik hizalamasının yapılmasıyla gerçekleştirilmiştir. Işık kaynağının yatay ve dikey eksenlerdeki eğim hizalaması yapıldıktan sonra, optik elemanlar sırasıyla yerleştirilmiş ve ışığın paralel olarak ilerlemesi gereken bölgelerde kamera ile kontrol sağlanarak, mercekler arasındaki mesafe ayarlanmıştır. Böylece optik hizalama hataları piksel ölçeğine indirgenmiştir. Işık her bir optik elemanın merkezinden geçerek homojen bir biçimde ilerlemesi, mikrometre hassasiyetine sahip optomekanik aygıtlar kullanılarak sağlanmıştır.

Hassas optik hizalama sonrasında, hizalamadan kaynaklı optik yoldaki toplam hata miktarının tepe çukur değeri (PV) 0.406 mikron olarak ölçülmüştür. Bu değer sistem hizalaması açısından iyi bir seviyeyi temsil etmektedir. Sistem bu hata seviyesi ile kalibre edilmiş ve optik yola faz plakası eklenmesi için hazır hale getirilmiştir. Faz plakası eklendikten sonra PV değeri 1.054 mikrona ulaşmıştır. Daha sonra, DM düzeltmesi başlatılmış ve nokta yayılım fonksiyonunda (PSF) meydana gelen düzeltme performansı kamera aracılığı ve WFS ölçümleri ile izlenmiştir. DM düzeltmesi sonrası PV değerinin 0.643 mikron düştüğü kaydedilmiştir. Her bir adımda, PSF çizgi profili verileri, sonuçlar bölümünde anlatılan nicel analiz için kaydedilmiştir. Şekil 5'te belirtilen aşamalara ait PSF çizgi profili grafikleri yer almaktadır.

3 Sonuçlar ve Değerlendirme

Sistem kalibrasyonunda kullanılan PSF, ideal olarak kabul edilirse, bu durumda Strehl oranı 1'e eşit olacaktır. Bazı olarak kabul edilen kalibrasyon PSF'ine göre, bozulmuş PSF'in Strehl oranı 0.42 iken, DM ile düzeltilmiş PSF'in Strehl oranının 0.71 olduğu hesaplanmıştır. Şekil 6'da, SH-AO sisteminin,



Şekil 6. Kalibrasyon, faz plakası ile bozulmuş ve AO ile düzeltilmiş PSF görüntüleri ve 3B grafikleri.

çevrelenmiş enerjinin büyük bir kısmını merkeze toplamayı başardığı, orijinal PSF'e yaklaştırdığı görülmektedir.

SH-AO sistemi ile yapılan düzeltme sonrası dalga cephesinde kalan hata miktarının, bozulmuş dalga cephesindeki hataya kıyasla ne kadar iyileştirildiğini şu şekilde hesaplayabiliriz:

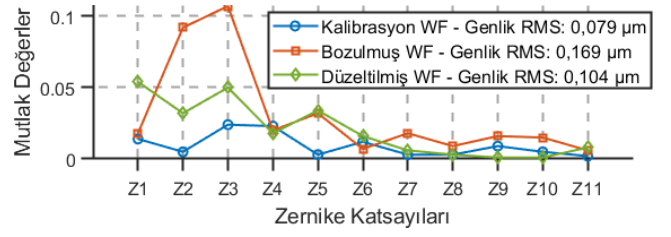
$$\begin{aligned} \%Düzeltilme &= \left(\frac{PV_{bozuk} - PV_{düzeltilmiş}}{PV_{düzeltilmiş}} \right) \times 100 \quad (3) \\ &= \left(\frac{1.054 - 0.643}{0.643} \right) \times 100 = \%63,43 \end{aligned}$$

Sistemin sahip olduğu statik dalga cephesi hatası her iki durumda da mevcut olduğundan, bozuk ve düzeltilmiş hata değerleri kullanılarak yapılan hesaplama sonucunda, sistemin hata düzeltme yüzdesi %63,43 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 7'de görüldüğü gibi, SH dalga cephesi sensörünün ölçtüğü Zernike katsayıları incelendiğinde, ANSI Z80 standardına göre Y eksenindeki eğime karşılık gelen Z1 Zernike katsayısının düzeltme sonrası bir miktar arttığı tespit edilmiştir. Buna karşın, X eksenindeki eğim (Z2) ve astigmatizmin (Z3) belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. Ayrıca coma, trefoil, quadrafoil aberasyonlarının da azaldığı belirlenmiştir.

Kaynaklar

- Campbell, H.I., & A.H. Greenaway, "Wavefront sensing: From historical roots to the state-of-the-art." EAS Publications Series, vol. 22, 2006, pp. 165–185, doi.org/10.1051/eas:2006131
- Dubra, A., "Wavefront sensor and wavefront corrector matching in adaptive optics", Optics Express 15.6 (2007): 2762-2769.
- Babcock, Horace W., "The possibility of compensating astronomical seeing", PASP, 65.386 (1953):229-236.
- Navarro, R., Justo A., and Ricardo, R., "Wavefront sensing with



Şekil 7. 3 farklı durum için Zernike katsayılarının karşılaştırılması.

critical sampling", Optics letters 36.4 (2011): 433-435.

Zhu, Guchuan, et al., "Flatness-based control of electrostatically actuated MEMS with application to adaptive optics: a simulation study", Journal of Microelectromechanical Systems 15.5 (2006): 1165-1174.

Access:

M25-0340: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.