

## Atmosfer Türbülansına Karşı Bükülgen Ayna Analizleri

Furkan Çaycı<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Gebze Teknik Üniversitesi,  
Elektronik Mühendisliği Bölümü,  
Gebze, Kocaeli  
[furkancayci@gtu.edu.tr](mailto:furkancayci@gtu.edu.tr)

<sup>2</sup>Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)  
Bilişim ve Bilgi Güvenliği İleri Araştırma Merkezi,  
Gebze, Kocaeli

**Özet:** *Altlarında ayrı ayrı itilebilen/çekilebilen veya bükülebilen birçok hareketlendiricinin bulunduğu bir yansıtıcı ön yüzeyden oluşan bükülgen aynalar, adaptif optik sistemlerde genellikle dalga cephesi bozulmalarını düzeltmek için kullanılır. İstenilen bir dalga cephesi profili, bu hareketlendiricileri mümkün olan en uygun şekilde düzenleyerek gösterilebilir ve bu profil ile ayna yüzeyi arasındaki farka yerleştirme hatası denir. Bu çalışmanın amacı sentetik olarak oluşturulan farklı atmosfer türbülans durumlarını gidermek için kullanılan iki farklı bükülgen ayna üzerinde oluşan yerleştirme hatalarını analiz etmek ve bu aynaların performanslarını karşılaştırmaktır.*

**Abstract:** *Deformable Mirrors are used in Adaptive Optics applications mainly for correcting wavefront aberrations. They consist of a reflective and deformable faceplate with many actuators underneath that can individually be pushed/pulled or bent. A given wavefront can be represented or fitted on the deformable mirror by carefully arranging these actuators with some amount of difference called the fitting error. The aim of this study is to simulate, analyze and compare the fitting error on two different continuous faceplate deformable mirror in respect to various atmospheric turbulence profiles.*

### 1. Giriş

Uzak mesafe optik görüntüleme ve haberleşme uygulamalarındaki en büyük problemlerden biri rüzgar, nem ve sıcaklık gibi etmenlerle dinamik olarak değişen atmosfer türbülansının içinden geçen ışınları farklı lens etkilerine maruz bırakarak görüntüde bozulmalara sebep olmasıdır. Bu etkileri en aza indirmek için Adaptif Optik sistemlerde, farklı yöntemlerle algılanan dalga cephesi bilgisini kullanarak belirli geometrilere düzenlenmiş birçok küçük hareketlendiriciden (actuator) oluşan *bükülgen aynalar (deformable mirrors)* (BA) kullanılmaktadır. Her bir hareketlendiriciye farklı gerilim değerleri uygulanması sonucunda birim uzunluk başına yer değiştirme sağlayarak dalga cephesine müdahale edilebilir. Hareketlendiricilerle oluşturulan bükülgen ayna yüzeyinin gerçek şekli, kalınlık, elastikiyet modülü ve Poisson oranı gibi ayna ön yüz plakası parametrelerinin bir fonksiyonu olan *etki fonksiyonu* ile ifade edilmektedir [1]. Sürekli bir membran BA'de, tek bir hareketlendiricinin sapması, çevreleyen hareketlendiricilerin kuplağı ile aldığı voltajın bir birleşimidir.

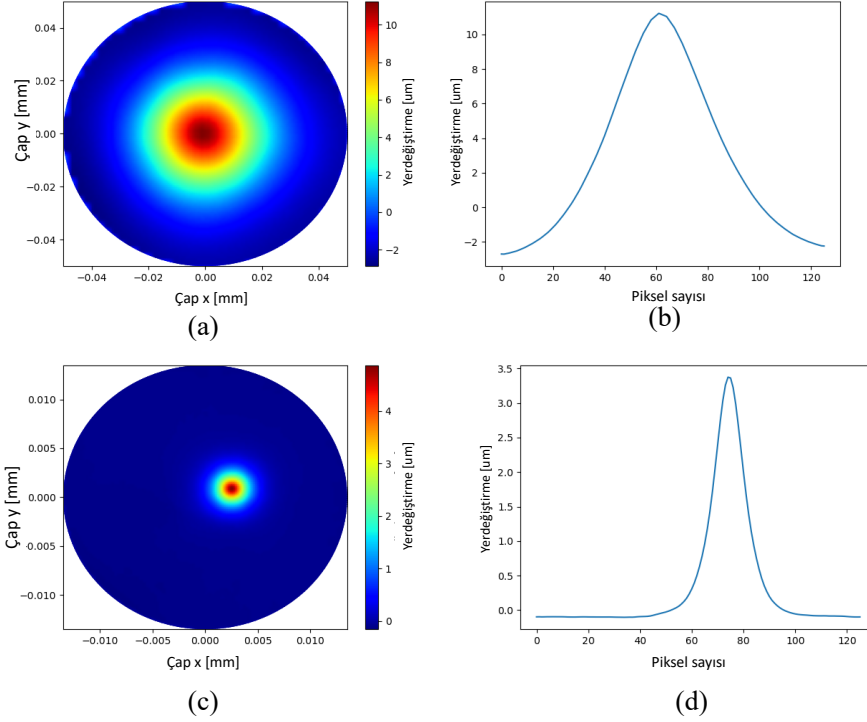
Gün içerisindeki şartlara bağlı dinamik olarak değişen atmosfer türbülansı etkilerini azaltmak için seçilen bükülgen ayna özellikle güncelleme hızı ve yerleştirme hatası açısından büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada iki bükülgen aynanın farklı atmosfer türbülansı profilleri karşısındaki ön yüzleri sayısal yöntemlerle hesaplanacak ve yerleştirme hataları karşılaştırılarak performansları değerlendirilecektir.

### 2. Yöntem

Alpao DMX37 BA altıgen şeklinde yerleştirilen 37 hareketlendiriciden oluşur ve Alpao DM292 BA kare şeklinde yerleştirilen 292 hareketlendiriciden oluşur. Bu aynaların Şekil 1'de örnek olarak tek hareketlendirici etki fonksiyonları verilmiştir. Atmosfer türbülansı özelliklerinde pozitif ve negatif etkilerin istatistiksel olarak birbirine yakın olması durumu dahilinde, hareketlendiricilerin birbirlerinden bağımsız olduğu ve birbirleri arasındaki etkileşimin en az olduğunu varsayıldığında [2], Denklem 1'de verildiği gibi etki fonksiyonlarının ağırlıklı lineer toplamları verilen hareketlendirici katsayılarına göre oluşturulan ayna yüzeyini verecektir.

$$S(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i E_i(x, y) \quad (1)$$

Burada  $S(x, y)$  ayna yüzeyini,  $N$  hareketlendirici sayısını,  $a_i$   $i$ 'nci hareketlendiriciye gönderilen normalleştirilmiş hareketlendirici yer değiştirmelerini ve  $E_i(x, y)$  de  $i$ 'nci hareketlendiricinin etki fonksiyonunu temsil etmektedir.



Şekil 1. (a) DMX37 için 19. Hareketlendirici etki fonksiyonu (b) 19. hareketlendiricinin DMX37 orta kesit görünümü (c) DM292 BA 135. Hareketlendirici etki fonksiyonu (d) DM292 orta kesit görünümü

İstenilen bir dalga cephesini,  $\varphi(x, y)$ , elde etmek için bu yöntemi kullandığımız zaman, Denklem 2'de verildiği gibi sınırlı sayıda hareketlendiriciden oluşan bir yerleştirme hatası,  $\varepsilon(x, y)$ , bulunacaktır.

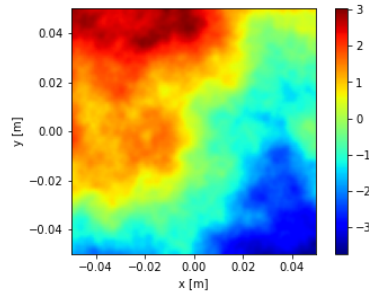
$$\varphi(x, y) = S(x, y) + \varepsilon(x, y) = \sum_{i=1}^N a_i E_i(x, y) + \varepsilon(x, y) \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen denklemin tersini alıp, tekil değerlerine ayrıştırarak (SVD) elde edilen matris yardımıyla istenilen dalga cephesi için gerekli olan katsayıları bulunacaktır. [3] Daha sonra istenilen dalga cephesi ve sınırlı sayıda hareketlendirici dolayısıyla elde edilen ayna yüzeyi arasındaki farkı bularak RMS değeri hesaplanabilir.

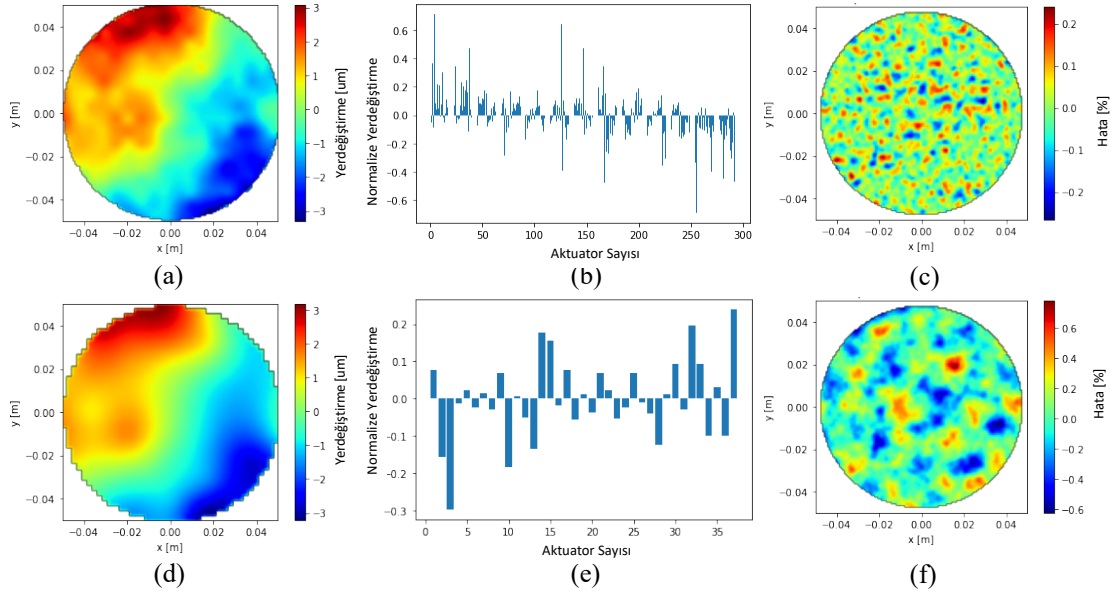
### 3. Analiz

Bükülgen aynaların temsil performansını karşılaştırmak için modifiye edilmiş von Karman kırılma indisi güç spektral yoğunluk modeline göre oluşturulan örnek bir faz ekranı Şekil 2'de verilmektedir [4]. Bu ekranı oluşturmak için kullanılan parametreler, atmosfer bağdaşım çapı  $r_0 = 5cm$ , küçük ölçekli türbülans anaforu  $l_0 = 3mm$ , ve büyük ölçekli türbülans anaforu  $L_0 = 50m$ , olarak seçilmiştir.

Şekil 3'te verilen örnek bükülgen ayna analizlerinde, Şekil 2'de verilen faz ekranının DM292 bükülgen ayna üzerinde gösterilmesi sonucunda rms hata oranı 66.1 nm, DMX37 üzerinde gösterilmesi sonucunda ise rms hata oranı 195 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2. Modifiye von Karman modeline göre rastgele oluşturulmuş faz ekranı



Şekil 3. İki bükülgen ayna üzerinde etki fonksiyonlarına göre verilen faz ekranının uyarlanması ve yerleştirme hatası: DM292 için (a). ayna yüzeyi, (b). normalize edilmiş hareketlendirici yer değiştirmeleri ve (c). yerleştirme hatası; DMX37 için (d). ayna yüzeyi, (e). normalize edilmiş hareketlendirici yer değiştirmeleri ve (f). yerleştirme hatası

#### 4. Sonuç ve Gelecek İşler

Bu çalışmada, öncelikle bükülgen aynaları modelleme, türbülans modelleme, hata analizleri gibi farklı yöntemleri barındıran ve gerekli kontrolcü tasarımına ve simülasyonlarına müsait bir adaptif optik yazılım çerçevesi oluşturulmuştur. Sonrasında iki farklı bükülgen aynanın değişen türbülans seviyelerine karşı dalga cephesi temsil yetenekleri incelenmiş ve yerleştirme hataları karşılaştırılmıştır. Alpao DM292, Alpao DMX37'ye göre rastgele oluşturulan orta değerinde bir türbülans seviyesinde ( $r_0 = 5cm$ ) %66 daha az hata ile, 1mm ve 30cm aralığında rastgele oluşturulan  $r_0$  değerlerine göre ise ortalama olarak %52 daha az hata ile temsil ettiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla DM292, hareketlendirici sayısı ile birlikte dinamik olarak değişen atmosfer türbülansı koşulları için daha uygun olduğu gösterilmiştir. Hareketlendirici sayısındaki artış nümerik hesaplardaki performansı düşürüp dinamik kontrol hızını sınırlayacağından dolayı daha verimli temsil yöntemleri ve kontrol için özel tasarlanmış donanımlar bundan sonraki çalışmaların konusu olacaktır.

#### Kaynaklar

- [1]. Menikoff A., "Actuator influence functions of active mirrors," Appl. Opt., cilt. 30, no. 7, s. 833, Mart 1991
- [2]. Hiddleston H. R., Lyman D. D., ve Schafer E. L., "Comparisons of deformable-mirror models and influence functions," San Diego, CA, Aralık. 1991, ss. 20–33
- [3]. Plimmer B., Dayton D., Spencer M., ve Hassall A., "Influence functions of a deformable mirror: least-squares wave-front fitting," Unconventional and Indirect Imaging, Image Reconstruction, and Wavefront Sensing 2018, Eylül 2018, cilt. 10772, s. 1077205
- [4]. Schmidt J., "Numerical simulation of optical wave propagation with examples in MATLAB. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers," 2010