

ÖZET

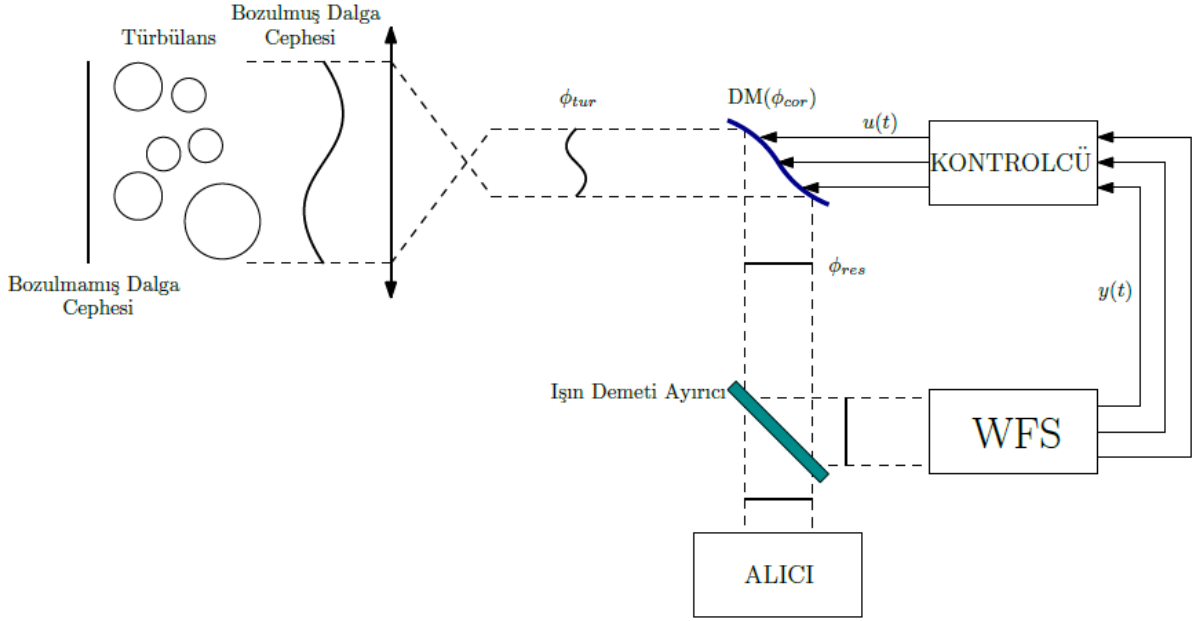
Deforme edilebilen aynalar, uyarlamalı optik sistemlerin ana bileşeni olup, optik fenomenlerden kaynaklı dalga cephesi bozulmalarını düzeltmede kullanılan etkili cihazlardır. Birçok uygulamada kullanılan uyarlamalı optik sistemlerin, performans analizleri ve model tabanlı kontrolleri için gerçek sisteme yüksek benzerlikteki modellerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, bu amaç doğrultusunda literatürde bu alanda geliştirilen sistem tanıma tekniklerinden olan Hadamard tahrik şablonu çeşitli Zernike optik bozulma modlarından oluşan şablonlarla genişletilerek, laboratuvar ortamında kurulan uyarlamalı optik Döngüde Donanım Simülasyonu (HIL) üzerinde test edilmiştir. Önerilen tekniğin başarısı kabul gören benzerlik metriği kullanılarak yine HIL üzerinde gösterilmiştir.

ABSTRACT

Deformable mirrors are the main component of adaptive optics systems and efficiently used to correct wavefront aberrations. The high-fidelity modelling of the deformable mirror should be obtained to analyze its performance and control it. In this study, the Hadamard pattern which provides fundamental inputs for system identification of adaptive optics systems, is augmented with the Zernike wavefront aberration modes and tested on adaptive optics test-bench in Hardware-in-the-loop testing (HIL). The success of the proposed pattern is shown on the experimental setup by comparing existing input patterns in the literature.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Uyarlamalı optik (AO) sistem teknolojisi; serbest uzay haberleşmesi, biyolojik görüntüleme, astronomi, lazer ışını odaklama, denizaltı yüzey haberleşmesi gibi birçok optik uygulamalarda kullanılan ve gerekliliği günden güne artan bir teknolojidir. Atmosferik türbülans, optik cihazlardaki üretim hataları, deniz suyunun kırıcı indeksi gibi fenomenlerden kaynaklı dalga cephesi bozulmaları, ilgili sistemlerin çalışma performansını etkilemektedir. Uyarlamalı optik sistemlerin bozulan dalga cephesinin düzeltilmesi ve sistem performansının iyileştirilmesindeki başarısı, araştırmacıların bu alana yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Şekil 1'de şematik gösterimi verilen uyarlamalı optik sistemlerin ana bileşenleri, deforme edilebilir ayna (DM), dalga cephesi algılayıcısı (WFS) ve bir kontrol ünitesidir. Deforme edilebilir ayna, uyarlamalı optik sistemin dalga cephesi düzeltme işleminin ana bileşenidir. Dalga cephesi algılayıcısı (WFS), bozulan dalga cephesi (ϕ_{tur}) ve ayna tarafından düzeltilen dalga cephesi (ϕ_{cor}) arasındaki hatayı ($\phi_{res} = \phi_{tur} - \phi_{cor}$) ölçmektedir. Bu ölçüme bağlı olarak kontrolör deforme edilebilir aynanın alması gereken şekli belirlemektedir.



Şekil 1. Uyarlamalı optik sistemlerin şematik gösterimi (Adaptive optic systems layout)

Dalga cephesi bozulmalarının modellenmesi, uyarlamalı optik sistemlerin kontrolünde önemli bir rol oynamaktadır. Bu alanda Kolmogorov'un çalışmasından başlayarak günümüze kadar uzanan birçok çalışma mevcuttur [1]. Günümüze kadar uzanan çalışmalar sonucunda, optik bozulmaları yansıtmadaki başarısı sebebiyle modellemeye Zernike polinomlarının kullanımı, bu alanda en çok görülen araçlardan biridir [2]. Özellikle atmosferik türbülans kaynaklı bozulmalarda ilk on beş Zernike polinomunun doğrusal kombinasyonu, türbülans kaynaklı bozulmaların %92'sini ifade etmektedir [3]. Dalga cephesi bozulmalarının tipleri, uyarlamalı optik sistemlerin kullanım sahasına göre değişiklik göstermektedirler. Lazer ışını odaklama gibi uygulamalarda atmosferik türbülans ve platform titreşimi kaynaklı bozulmalar nispeten daha düşük dereceden Zernike modlarıyla ifade edilirken, hassas biyolojik görüntüleme, oftalmoloji gibi uygulamalar ve bilhassa da astronomi uygulamalarında dalga cephesi bozulmaları için yüksek dereceli Zernike polinomlarına başvurulmaktadır [4-8].

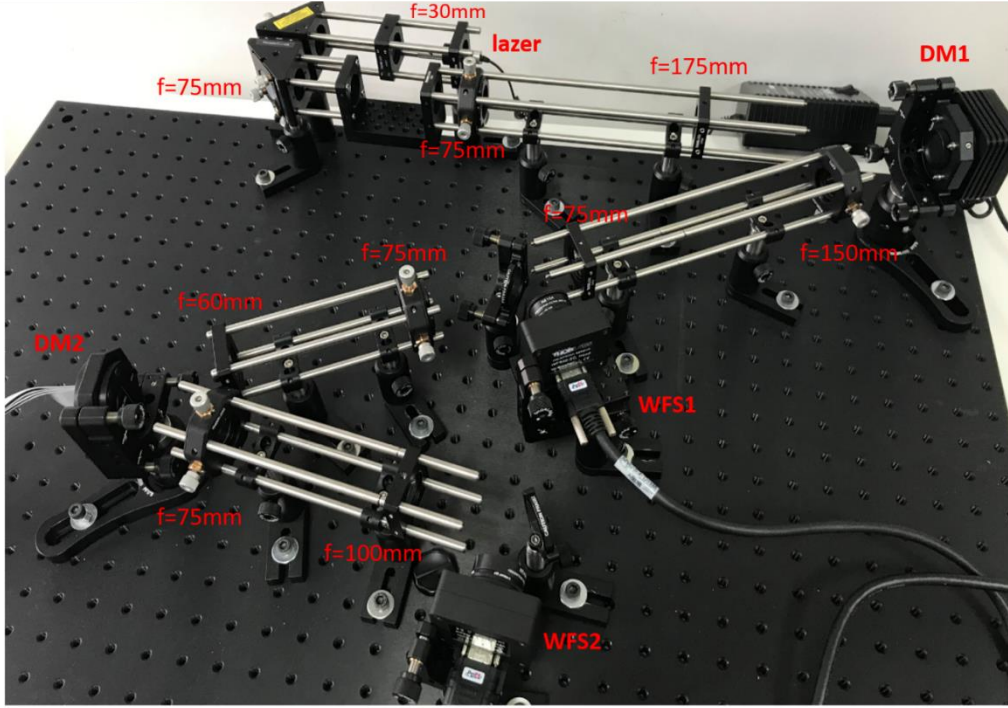
Sistem modelinin sistem tanıma teknikleriyle çıkarımı aşamasında sistemin hangi koşullarda çalışacağı, hedeflenen performans istekleri göz önünde bulundurulup, ilgili gereksinimleri sağlayacak giriş sinyallerinin bulunması önemli bir problemdir. Uyarlamalı optik sistemlerin sistem tanıma ile modellenmesiyle ilgili literatür incelendiğinde, bu alanda yapılmış ilk çalışmalarda atmosferik türbülans modlarının modellendiği Zernike polinomları ve Karhunen-Loeve modları kullanılmıştır [8]. Ancak bu yöntemler yüksek dereceli dalga cephesi bozulmalarında sorun yaratmaktadır. Üstelik Zernike polinomlarının zamana göre birbirine dik olmaması, eyleyici bağlaşımlarından ötürü nümerik olarak sistem tanıma problemini zorlaştırmaktadır. Bu problem, [9] numaralı çalışmada eyleyici doyum kısıtları altında hata kovaryans matrisinin minimize edilmesiyle elde edilen Hadamard tahrik şablonuyla çözülmüştür. Benzer yaklaşım, algılayıcıya ilişkin ölçüm doyumları göz önünde bulundurularak [10] çalışmasında ele alınmıştır. Yüksek sayıda eyleyicilere sahip deforme edilebilen aynalar için çok kanallı ve Hadamard tahrik şablonuna dayalı bir sistem tanıma yöntemi, eyleyici bağlaşım oranları göz önünde bulundurularak Guo vd. [11], çalışmasında incelenmiştir. [12]'de deforme edilebilen aynaya belirli şablonlarda girişler uygulanarak, elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak parametre optimizasyonuna bağlı bir sistem tanıma yöntemi önerilmiştir.

Uyarlamalı optik sistemlerin farklı uygulamalarda farklı modlarda dalga cephesi bozulmalarını düzeltmekte kullanılması, deforme edilebilen aynaların tasarımından kontrolüne birçok çalışmanın motivasyonunu oluşturmuştur. Bu çalışmadaki ana motivasyon, [9]'da geliştirilen Hadamard eyleyici paterninin, bazı Zernike optik bozulma modlarıyla genişletilip, sistem tanıma sonucu elde edilen modelin HIL sistemine olan sadakatinin artırılmasıdır. Bu amaç doğrultusunda, Hadamard tahrik şablonuna ek olarak, HIL sistemine uygulamada karşılaşılabilecek çeşitli optik bozulma modlarını oluşturacak girişler verilerek tahrik şablonlarının kümesi genişletilmiştir. Önerilen yeni yaklaşımın çalışma uzayını ne kadar örttüğü ve olası durumları ne kadar yüksek sadakat ile temsil ettiği literatürdeki Hadamard şablonu ve [12]'deki şablonlar ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın takip eden bölümlerinde; HIL sisteminin anlatılması Bölüm 2'de, sistem tanıma ile modelleme Bölüm 3'te yer alacaktır. Son iki bölümde ise uygulama sonuçları ve tartışmaya yer verilecektir.

2. AO SİSTEMİN DENEYSEL DÜZENEĞİ (AO SYSTEM EXPERIMENTAL SETUP)

Temel çalışma prensibi, algılama, hesaplama ve etkinleştirme biçiminde olan AO sistemler üç bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; optik dalga sapmalarını ölçen bir dalga cephesi algılayıcısı, bozulmuş bir optik dalga cephesini istenilen forma sokmak için kullanılan deforme edilebilir bir ayna ve dalga cephesi algılayıcısı tarafından toplanan bilgileri kullanarak bozulan dalga cephesinin düzeltilmesi için deforme edilebilen aynanın alması gereken şekli hesaplayan bir kontrol birimidir. Bu üç bileşen, optik dalga cephesindeki herhangi bir değişikliği otomatik olarak algılayıp telafi edecek şekilde kapalı döngü sistem olarak çalışır. Dalga cephesi algılayıcısı dalga formunun ayna yüzeyinden yansımından sonra geriye kalan bozulma fazını ölçer. Bozulmuş dalga cephesi üzerinden makul bir iyileştirme elde etmek adına kontrol birimi tarafından deforme edilebilir ayna uygun bir formda şekillendirilmektedir. DM'nin yapısında bulunan eyleyicilerin kontrolü için gerekli olan u sinyali, WFS'den alınan ölçümler, (y sinyali), ile kontrolcü yapısı içerisinde gerçek zamanlı olarak işlenerek oluşturulur. Bu bozulmaları bertaraf etmek adına ayna yüzeyi şekil değiştirir, böylece eyleyicilerin yönelimleriyle dalga cephesindeki bozulmalar kontrol edilir. Bu prosedürle AO sistem sayesinde görüntülenen ışığın dalga önündeki sapmalarının minimizasyonu sağlanarak görüntünün optik çözünürlüğü iyileştirilebilir. İstenilen düzeyde bir iyileştirme elde edilebilmesi için uygun bir kontrol metodunun kullanılması elzemdir.



Şekil 2. Laboratuvar ortamında kurulan AO sistemi ve bileşenleri (Experimental bench of AO system and its components)

Oluşturulan AO sistemin optik yol şematığı Şekil 2'de gösterilmektedir. Bu şekilde de görüldüğü gibi iki adet DM kullanılmıştır. Bunlardan birincisi daha düşük sayılı eyleyiciye sahip olup, dalga cephesindeki bozulmanın kontrollü biçimde yapılabilmesi için kullanılmaktadır. Optik yol üzerindeki diğer yüksek eyleyicili ayna ise, dalga cephesinin düzeltilmesinde kullanılmaktadır. Kontrollü biçimde dalga cephesi üzerinde oluşturulan optik bozulmalar, dalga cephesi algılayıcısı ile algılanarak, kontrol programına girdi olarak kullanılmaktadır. Bozulmuş dalga cephesi bilgisine sahip demet, optik yolu takip ederek, daha yüksek eyleyiciye sahip deforme edilebilir ayna ile düzeltilerek, ikinci bir dalga cephesi algılayıcısı ile kontrol edilmektedir.

Optik yolu oluşturmak için kullanılan lensler Şekil 2'de gösterilmiştir. İlk olarak 635 nm dalga boyuna sahip diyot lazerden 2,9 mm çap ile çıkan ışın, F-30 plano konveks lensten geçtikten sonra, optik yola 45° açı ile yerleştirilmiş aynadan yansıtılmıştır. F-75 plano konveks lensten geçen demet tekrar 45° açı ile yerleştirilmiş aynadan yansıtılarak, Thorlab firması tarafından üretilen 40 eyleyiciye sahip DM1 ile gösterilen deforme edilebilir aynanın optik eksenine yönlendirilmiştir. Devamında F-75 ve F-175 plano konveks lensleri ile kolimasyonu yapılarak yaklaşık 20 mm kolime demet haline getirilmiştir. Bu DM'nin etkin pupil çapı 10 mm dir, 20 mm kolime gelen demetin $1/e^2$ ye karşılık gelen kısmı bu ayna yardımı ile bir sonraki optik yola yönlendirilmektedir. Bunun nedeni lazer kaynağından gelen lazer demetinin, tam Gauss sınırı içindeki karakterize ışını kullanmasıdır. Bu sayede demet önü sensörü üzerindeki lazer güç dağılımını mümkün olduğunca stabil hale getirilmiştir.

40 eyleyiciye sahip deforme edilebilir aynadan 10 mm kolime biçimde gelen ve kontrollü dalga cephesi bozunum bilgisini taşıyan lazer demetinin, SH algılayıcısının çapına düşürülmesi gerekmektedir. Bunun için 10 mm çapa sahip lazer demeti F-150 ve F-75 plano konveks lenslerin uygun konumlandırılması ile lazer demeti 5 mm çapa

(Shack-Hartmann algılayıcısı aktif alan genişliği) getirilmiştir. 5 mm kolime biçimde gelen ve bozunum bilgisi taşıyan lazer demetinin, 140 eyleyiciye sahip deforme edilebilir ayna için yeniden kolimasyon edilmesi gereklidir. Bunun için F-75 ve F-60 plano konveks lensler kullanılarak demet çapı, 140 eyleyiciye sahip deforme edilebilir aynanın aktif alanı olan 4,4x4,4 mm kare alana sığacak şekilde düşürülmüştür. Deforme edilebilir aynadan optimum verim elde edilebilmesi için, gelen demet ile yansıyan demet arasında 35° derecelik bir açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu aynanın belirtilen açı değeriyle optimum konumlandırılması için Boston Micromachines Corporation (BMC) ve ThorLabs firmalarının sunmuş oldukları bilgi formundan yararlanılmıştır.

140 eyleyiciye sahip deforme edilebilir aynadan yansıyan lazer demetinin, ikinci SH sensörünün aktif algılayıcı birimine tam olarak düşürülmesi için, demetin açılması gereklidir. Bunun için deforme edilebilir ayna girişindeki kolimasyonun tam ters işlemi yapılmıştır. F-75 ve F-100 plano konveks lensleri uygun biçimde konumlandırılarak, deforme edilebilir aynadan yansıyan lazer demetini çapı 5 mm olacak biçimde açılmıştır.

3. AO SİSTEMİN SİSTEM TANIMA İLE MODELLENMESİ (IDENTIFICATION OF AO SYTEM MODEL)

Deforme edilebilen ayna dinamiklerinin çok hızlı değiştiği kabulü altında ayna modeli, giriş ve çıkış arasındaki ilişkiyi belirleyen statik bir etki matrisi olarak seçilebilir. Bu ilişki, matematiksel olarak,

$$C = DV + N \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. n deforme edilebilen aynanın eyleyici sayısı ve m dalga cephesi sensöründen alınan ölçüm sayısı olmak üzere, n adet tahrik paterninden oluşan $V \in R^{n \times n}$ giriş matrisi, her bir tahrik şablonuna karşılık ölçümleri barındıran $C \in R^{m \times n}$ ise çıkış matrisidir. $D \in R^{m \times n}$ etki matrisi, $N \in R^{m \times n}$ ise beyaz gürültü formundaki ölçüm gürültülerini ifade eden gürültü matrisidir.

Bir sisteme uygulanan giriş ve bunun sonucunda elde edilen çıkışlar kullanılarak, bu sistemin modeli sistem tanımlama teknikleri kullanılarak çıkarılabilir. Sistem modelini çıkarmada ilk ve en önemli aşama sisteme uygulanacak giriş sinyallerinin (V) belirlenmesidir. Burada amaç, uygulanacak girişler ile sistemin hedeflenen karakteristik özelliklerine ulaşması olmalıdır. Bu tekniklerin ana fikri; gerçek sistem ve model çıkışında elde edilen veriler arasındaki

farkı problem doğasına uygun bir metrikte minimize etmektir. Bu bağlamda, D etki matrisinin kestirimi olan $\hat{D} = CV^{-1}$ için kestirim hatası

$$E = D - \hat{D} = -NV^{-1} \quad (2)$$

olarak tanımlanabilir. Kestirim hata matrisinin kovaryans matrisi

$$\langle EE^T \rangle = \langle NV^{-1}V^{-1T}N^T \rangle \quad (3)$$

karesel bir form oluşturuyor olup, bir elips tanımlamaktadır. Elipsin yarı eksenleri, kovaryans matrisinin öz değerlerinin kare köküne eşit olduğundan, optimizasyon problemi elipsin eksenlerinin geometrik ortalamasının minimizasyonu olarak tanımlanabilir. Bir matrisin determinantının, öz değerlerinin çarpımı olduğu gerçeğinden faydalanılarak maliyet fonksiyonu

$$J(V) = (\det\langle EE^T \rangle)^{\frac{1}{2n}} \quad (4)$$

olarak tanımlanabilir. Eş. 3, Eş. 4'te yerine yazılırsa maliyet fonksiyonu

$$J(V) = (\det\langle NN^T \rangle)^{\frac{1}{2n}} (\det V)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

şeklini alır. Elde edilen bu eşitlik, Eş. 5'in sadece sistem girişlerine bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla optimizasyon probleminin maliyet fonksiyonu

$$\tilde{J}(V) = \det(V) \quad (6)$$

yukarıdaki denklemde gözüktüğü üzere giriş matrisi V 'nin determinantının maksimizasyonu halini alır.

Uygulamada karşılaşılabilecek eyleyici doyum limitleri de göz önünde bulundurulursa, sistem girişlerini oluşturan V matrisinin elemanları v_{ij} , $i, j = 1, \dots, n$ için bir üst sınır belirlemek gerekmektedir. v_m parametresi eyleyici doyum sınırı olarak tanımlanırsa, optimizasyon problemi

$$\begin{aligned} \max \tilde{J}(V) \\ \text{s.t. } |v_{ij}| \leq v_m \end{aligned} \quad (7)$$

halini alır. Verilen kısıtlar altında maksimum determinant problemini sağlayan çözüm Brenner vd. [13], çalışmasında Hadamard matrisi (H_n) olarak verilmiştir. Böylelikle Eş. 7 ve Eş. 8'de verilen optimizasyon probleminin çözümü $V = v_m H_n$ olarak bulunur [9].

Hadamard matrisi, 1 ve -1'lerden oluşan, satır ve sütunları birbirine dik bir matristir. Hadamard matrisinin var olabilmesi için matrisin boyutu ikinin kuvvetleri olmalıdır. Ancak birçok DM modelinin eyleyici sayıları bu şartı sağlamayabilir. Örneğin bu çalışmada kullanılan BMC140 model ayna 140 adet eyleyiciden oluşmaktadır. Bu durumda Hadamard matrisinin boyutu, bu sayıya en yakın ikinin kuvveti (\bar{n}) seçilerek oluşturulmaktadır. Bu kabul doğrultusunda sistem modeli Eş. 1'i oluşturan C , D ve N matrisleri

$$\bar{D} = [D \quad 0], \bar{C} = [C \quad C_2], \bar{N} = [N \quad N_2] \quad (8)$$

$0, N_2, C_2 \in \mathbb{R}^{m \times (\bar{n}-n)}$ olarak güncellenir. Dolayısıyla, sistem modelini çıkarmada kullanılacak olan tahrik paternleri $\bar{n} \times \bar{n}$ boyutlu Hadamard matrisinin kolonları olup, hata kovaryans matrisini minimum kılmaktadır.

4. DENEY SONUÇLARI (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bu bölümde Boston Micromachines firması tarafından üretilmiş 140 eyleyiciye sahip DM ile Shack-Hartmann WFS arasındaki matematiksel modelin kestirim sonuçları verilecektir. Elektrostatik eyleyicilerden oluşan bu deforme edilebilir ayna Şekil 2'de DM2 olarak gösterilmiştir. 140 eyleyiciye sahip DM2'nin aktif alanı $4.4 \times 4.4 \text{ mm}$ ve her bir eyleyici arasındaki mesafe $400 \text{ }\mu\text{m}$ dir. Sonuç olarak sistemin 140 girişi bulunmaktadır. Uygulanılan gerilime karşı deforme edilebilir aynaların tepkisi doğrudan ölçülememektedir. Bunun yanında dalga

vermektedir. $W(x, y)$ Kartezyen koordinatlarda tanımlı dalga cephesi şekli olsun, bu fonksiyonun x ve y göre kısmi türevleri WFS üzerindeki her bir spot üzerine düşen lazer ışın demetinin yer değiştirmesiyle elde edilmektedir,

$$\frac{\partial}{\partial x} W(x, y) = \frac{\delta x}{f_{ML}}, \frac{\partial}{\partial y} W(x, y) = \frac{\delta y}{f_{ML}} \quad (9)$$

burada δx ve δy spot üzerindeki değişimler, f_{ML} ise monolitik merceklerin odak uzaklığıdır. δx ve δy ölçümleri alındıktan sonra, çift katlı bir integrasyon kullanılarak dalga cephesi şekli elde edilir. Optik deney setinden WFS olarak Thorlab firmasından satın alınan WFS20-5C modeli tercih edilmiştir. Thorlab firmasından temin edilen bilgi formundan alınan Tablo 1'de de gösterildiği gibi bu WFS 3 farklı çözünürlük sunmakta ve bu çözünürlüklere göre de görüntü işleme frekansı ve spot sayısı değişmektedir. Bizim çalışmamızda, WFS 768x768 çözünürlüğe ayarlanmış, dolayısıyla maksimum spot $23 \times 23 = 529$ olmaktadır.

Tablo 1 WFS20-5C için Çözünürlük, Hız ve Spot Sayısı.

Çözünürlük	Spot Sayısı	Toplam Spot Sayısı	Görüntü Boyutu (mm)	Hız (fps)		
				Normal Mod	Normal Mode, (bin2)	Yüksek Hız Modu
1440x1080	47x35	1645	7.2x5.4	23	58	150
1080x1080	35x35	1225	5.4x5.4	29	69	166
768x768	23x23	529	3.84x3.84	50	144	350
512x512	15x15	225	2.56x2.56	79	320	710
360x360	11x11	121	1.80x1.80	116	630	880

Bu çalışmanın amacı DM2 ile WFS2 arasındaki ilişkinin çıkarılması üzerinedir. Sistem modelini çıkarmada ilk ve en önemli aşama sisteme uygulanacak giriş sinyallerinin belirlenmesidir. Burada amaç, uygulanacak girişler ile sistemin karakteristik özelliklerine ulaşmak olmalıdır. DM2 gibi büyük ölçekli ve hassas sistemlerde model çıkarmak için uygulanacak uygun giriş sinyali seçimi daha da önem arz etmektedir. Bu çalışmamızda giriş sinyali olarak literatürde deforme edilebilir aynaları modellemek için kullanılan Hadamard tahrik şablonlarından yararlanılmıştır. Bunun yanında giriş olarak Zernike modlarından da yararlanılmıştır. Birim yüzeyde tanımlanan Zernike polinomları atmosferik türbülansı modellemek için literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [12]. Fourier serilerine benzer şekilde sonsuz sayıda Zernike polinomunun belirli katsayılarla toplanması sonucu tüm atmosferik türbülans bozulmaları modellenebilir. Ancak Zernike polinomlarının derecesi arttıkça atmosfer içerisinde bulunma frekansları azalır. Bundan dolayı türbülans modellemede daha ağırlığı olan Defocus, birincil X-Astigmatism ve birincil Y-Astigmatism modlarına başvurulmuştur. Sistem modelini kestirmek için Hadamard ile beraber bu modlarla elde edilen girişler DM2'ye uygulanmıştır. Böylece iki farklı eğitim setiyle, iki farklı sistem modeli (Model1-Hadamard, Model2-Hadamard+Zernike) çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak [12] çalışmasında DM modellemek için başvuru tahrik şablonlarıyla üçüncü bir model çıkarılmıştır. [12] numaralı referansta kullanılan deneyler, Şekil 4'te gösterilen eyleyici dizilimine sahip DM2 deforme edilebilen aynaya aşağıdaki sırayla uygulanmıştır;

1. Tüm eyleyicilere 150 V ön gerilim verilmesi
2. Tüm eyleyicilere 150 V ön gerilim verilirken, (65) konumundaki eyleyiciye 75 V verilmesi
3. Tüm eyleyicilere 150 V ön gerilim verilirken, (65) konumundaki eyleyiciye 200 V verilmesi

4. Tüm eyleyicilere 150 V ön gerilim verilirken, (65) konumunu merkez alarak 3x3'lük eyleyici bloğuna 125 V verilmesi
5. Tüm eyleyicilere 150 V ön gerilim verilirken, (65) konumunu merkez alarak 3x3'lük eyleyici bloğuna 175 V verilmesi

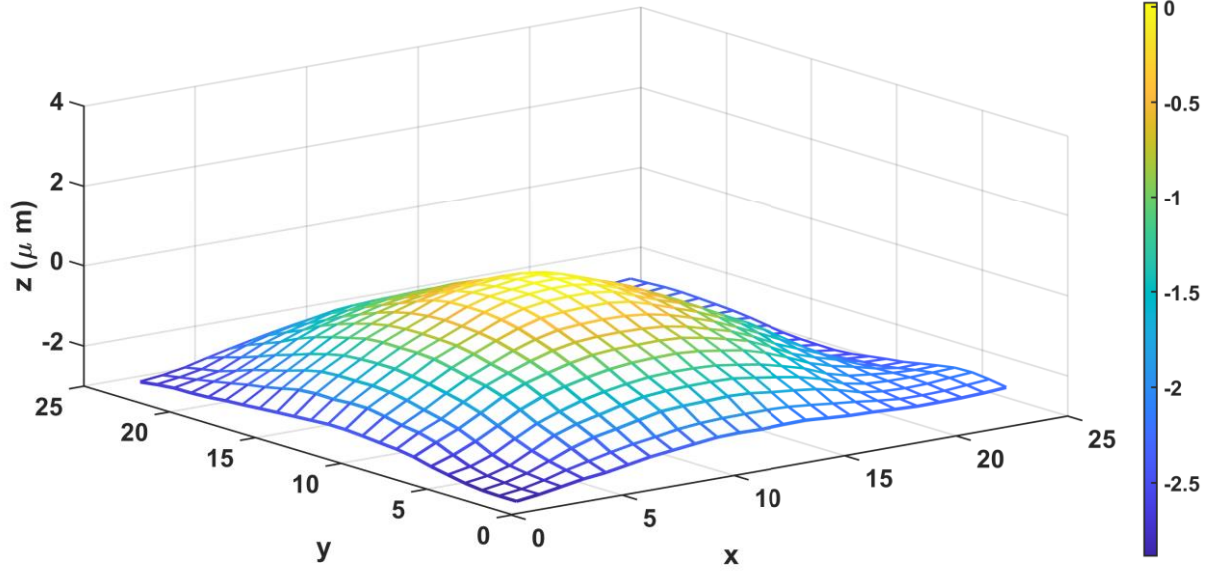
Bu üç modelin başarımları Tablo 2'de ve Şekil 9-16'da gösterilmiştir. Modeller arasında karşılaştırma yapmak için normalize edilmiş ortalama karesel hata fonksiyonundan yararlanılmıştır,

$$fit(i) = 100 \times \left(1 - \frac{\|x_{ref}(:,i) - x(:,i)\|^2}{\|x_{ref}(:,i) - \text{mean}(x_{ref}(:,i))\|^2} \right) \quad (10)$$

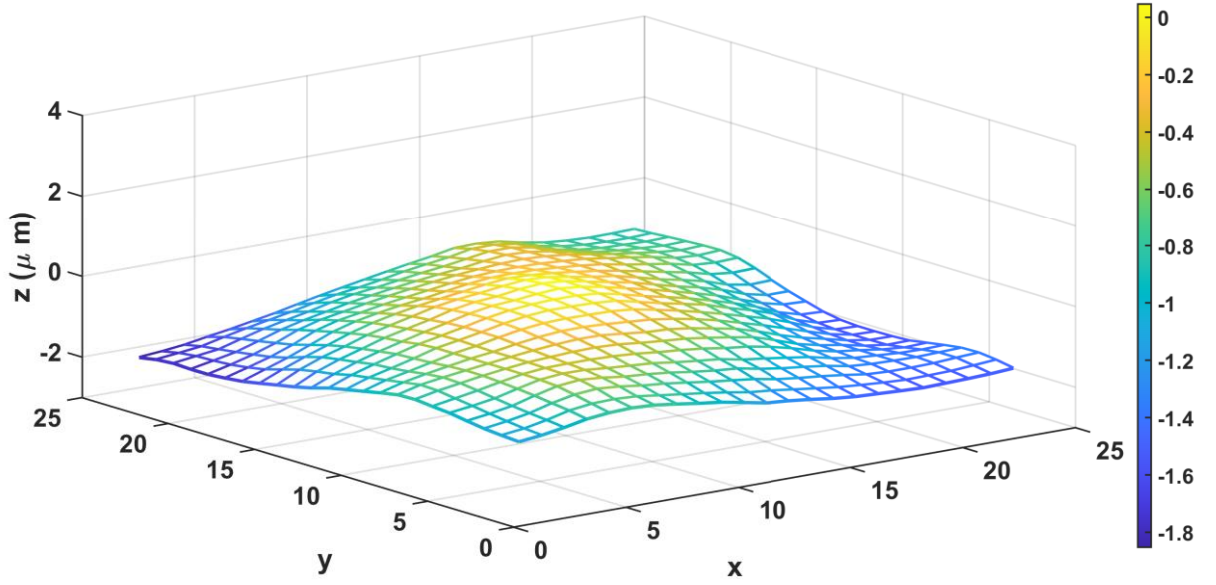
burada mean ortalama fonksiyonu, x_{ref} gerçek sistem üzerinden alınan referans verisini ve x ise kestirim sonucu elde edilen test verisini göstermektedir. Test verisi, gerçek sisteme uygulanan girişlerin, kestirilen modellere uygulanmasıyla elde edilmiştir. 140 eyleyiciye sahip DM ile Shack-Hartmann WFS arasındaki matematiksel modeli çıkarmak adına başvuru yöntemlerinin başarımları, bu hata fonksiyonu üzerinden irdelenmiştir. Buna ilişkin sonuçlar test fonksiyonuna yerleştirildiğinde, elde edilen başarımlar yüzdelik olarak Tablo 2'de verilmiştir.

Hatayı minimize etmek için, farklı zamanlarda gerçek sistemden veriler alınmıştır ve bu veriler kestirilen modellerde kullanılıp gerçek sistem çıkışları ile kestirilmiş çıkışlar karşılaştırılmıştır. Bu bağlamda tıpkı sistem tanıma için girişlerin belirlenmesi aşamasındaki gibi uygulamada karşılaşılabilecek optik bozulma modlarının kombinasyonları dikkate alınarak belirlenmiştir.

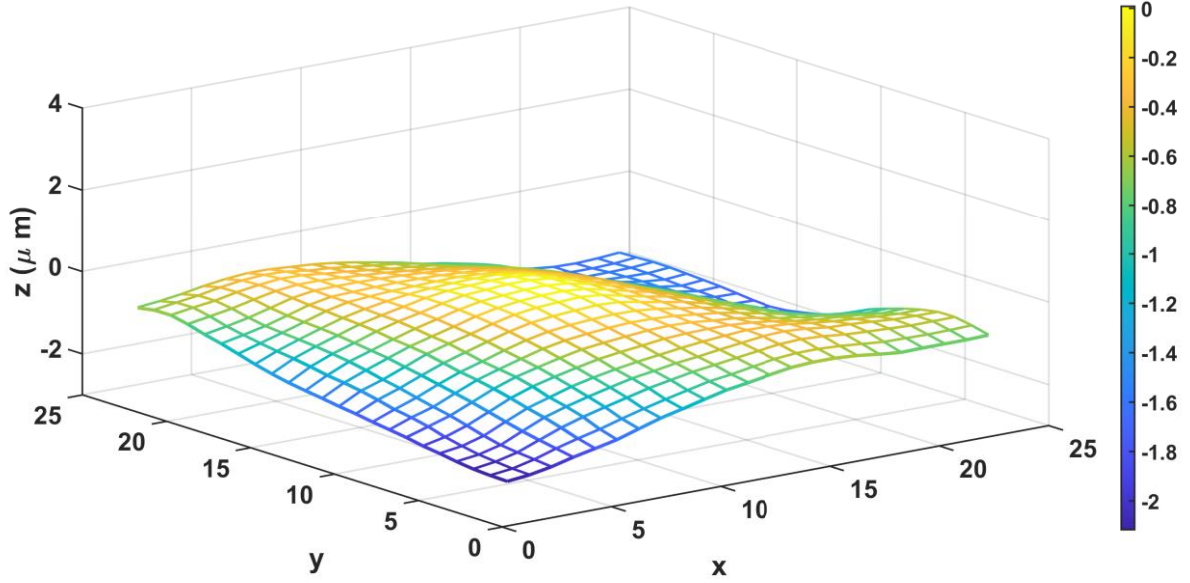
Model validasyonu dört fazlı bir deney sonucunda oluşturulmuştur. Faz 1, Faz 2 ve Faz 3'ü oluşturan deneyler, Birincil X-Astigmatizm, Birincil Y-Astigmatizm ve Defocus modlarının kombinasyonu ile ortaya çıkacak olan şekli oluşturmak için gerekli olan giriş şablonlarından oluşmaktadır. Faz 1, bu kombinasyon içinde defocus modunun ağırlıklı olduğu, Faz 2 ve Faz 3 deneyleri ise sırasıyla Birincil X-Astigmatizm ve Birincil Y-Astigmatizm modlarının ağırlıklı olduğu girişleri barındırmaktadır. Faz 4'te ise tüm bu kombinasyonlara ek olarak farklı modların da etkili olabileceği senaryoyu gerçeklemek için, Hadmard şablonu içerisinde rastgele seçilen 10 adet tahrik şablonunun kombinasyonu ile oluşturulan girişler yer almaktadır. Sonuç olarak çıkarılan modellerin etkinliğini karşılaştırmak adına, 140 eyleyicili DM2'ye farklı kombinasyonlarda formlar yüklenmiştir. Farklı zamanlarda gerçek sistemden veriler alınmış ve bu veriler kestirilen modellerde kullanılıp gerçek sistem çıkışları ile kestirilmiş çıkışlar karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda Faz1-Faz4 diye adlandırdığımız 4 fazlı bir deney oluşturulmuştur. Bu dört fazın DM2'ye uygulanması sonucu gerçek zamanlı olarak WFS'den alınan ölçümler Şekil 5-8'de verilmiştir. Bu çalışmada herhangi bir düzeltme söz konusu değildir. Sonuçların mikron seviyesinde olması, DM140 için elde edilen matematiksel modellerin, gerçek sistem cevapları ile zor koşullarda karşılaştırılması ve test edilmesi içindir.



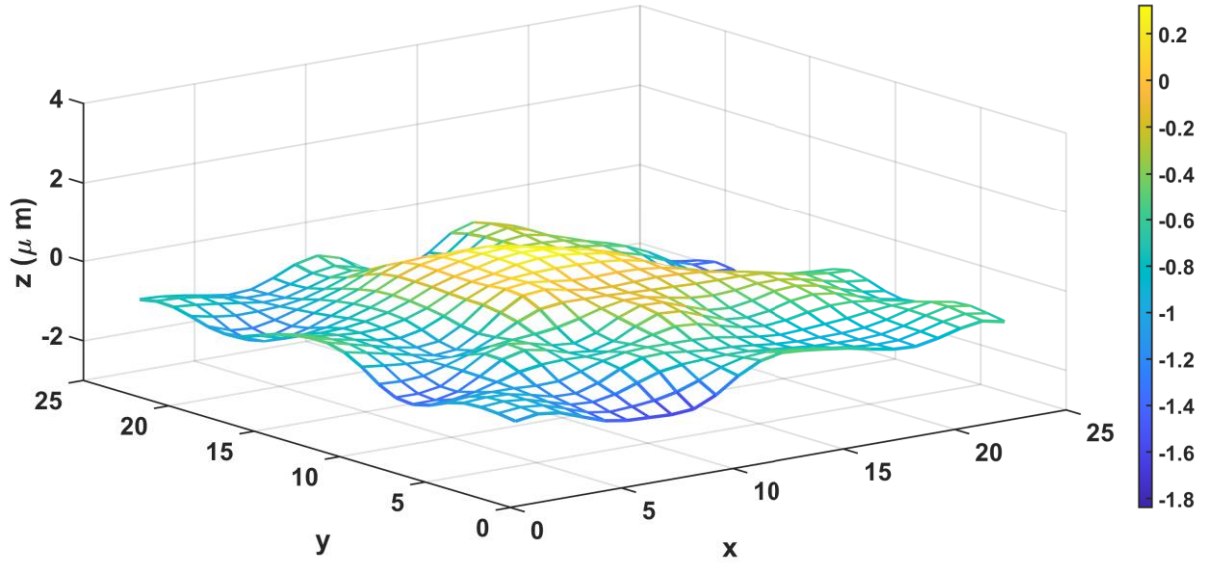
Şekil 5 Defocus modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında WFS'den elde edilen yüzey şekli (Wavefront surface measured via WFS under input signal weighted with Defocus mode)



Şekil 6 Birincil X-Astigmatizm modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında WFS'den elde edilen yüzey şekli (Wavefront surface measured via WFS under input signal weighted with primary X-Astigmatism mode)



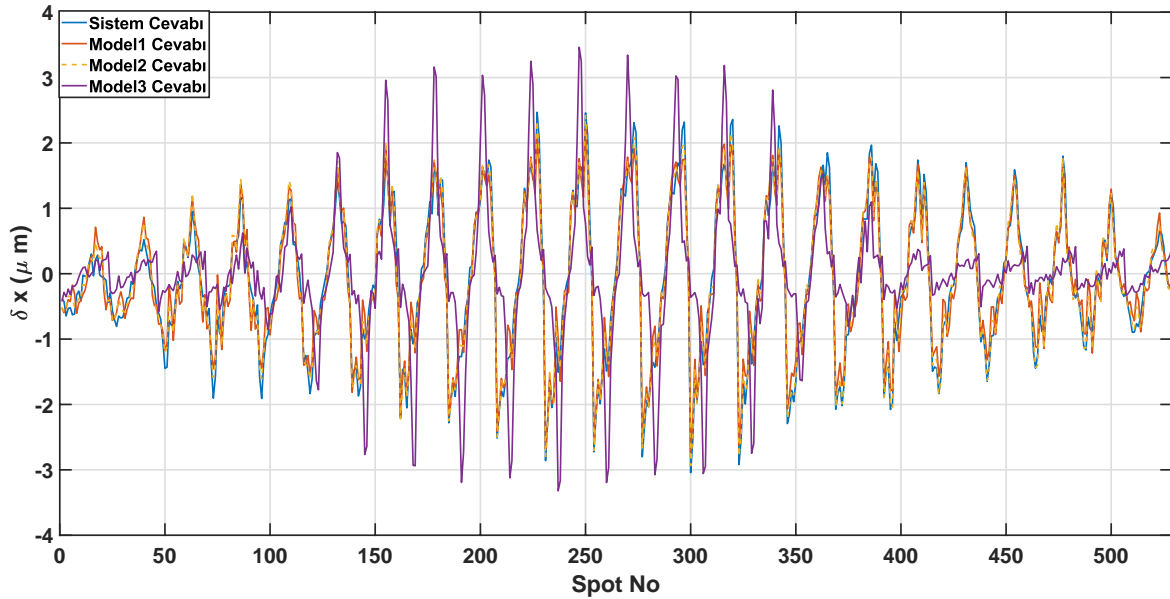
Şekil 7 Birincil Y-Astigmatizm modunun ağırlıklandırılmasına karşılık gelen giriş sinyali altında WFS'den elde edilen yüzey şekli. (Wavefront surface measured via WFS under input signal weighted with primary Y-Astigmatism mode.)



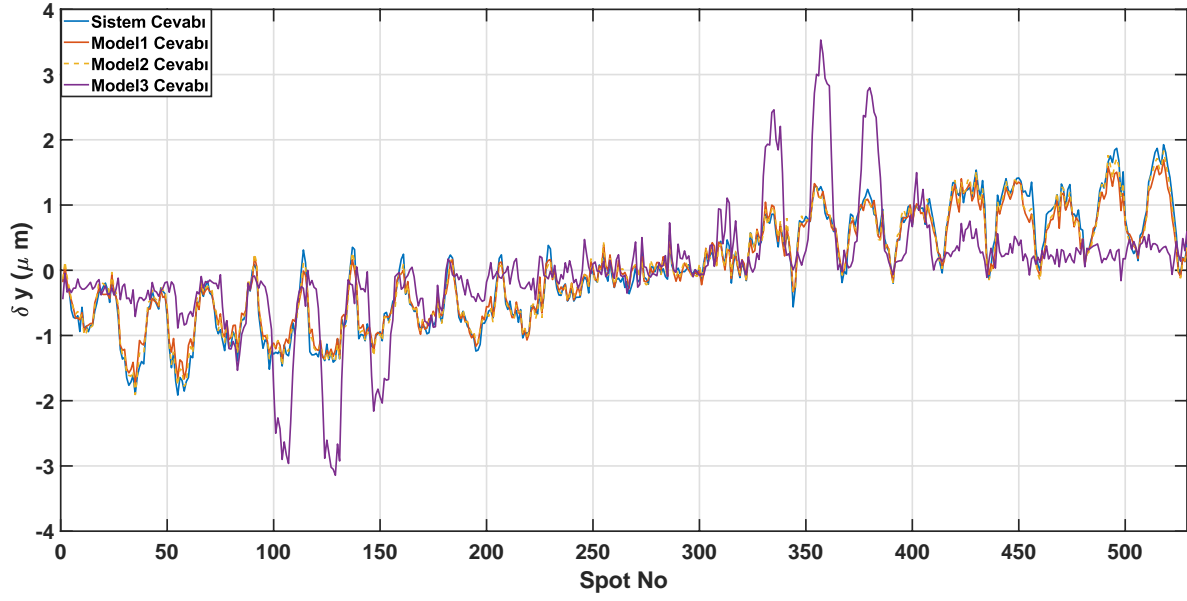
Şekil 8 Rastgele 10 adet Hadamard tahik şablonu kombinasyonuyla oluşturulan giriş sinyali altında WFS'den elde edilen yüzey şekli. (Wavefront surface measured via WFS under input signal weighted with summation of random 10 Hadamard modes.)

Her bir faz için kullanılan giriş sinyali, kestirilen etki matrisine uygulanmasıyla elde edilen çıkışlar ve WFS'den alınan çıkışlar arasındaki benzerlik ortalama karesel hata fonksiyonu (Eş. 10) anlamında incelenmiştir. Bu sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Benzerlik oranlarının yüzdeleri incelendiğinde, Hadamard şablonuyla oluşturulan Model1 ve Hadamard+Zernike şablonuyla oluşturulan Model2'nin, Model3'e göre başarısı açıkça görülmektedir. Bu durumun başlıca sebeplerinden bir tanesi, Model1 ve Model2'nin elde edilmesinde kullanılan tahrik şablonlarının [12] çalışmasındaki şablonlardan çok daha geniş bir giriş kümesine sahip olmasıdır. Bir diğer önemli sebep ise

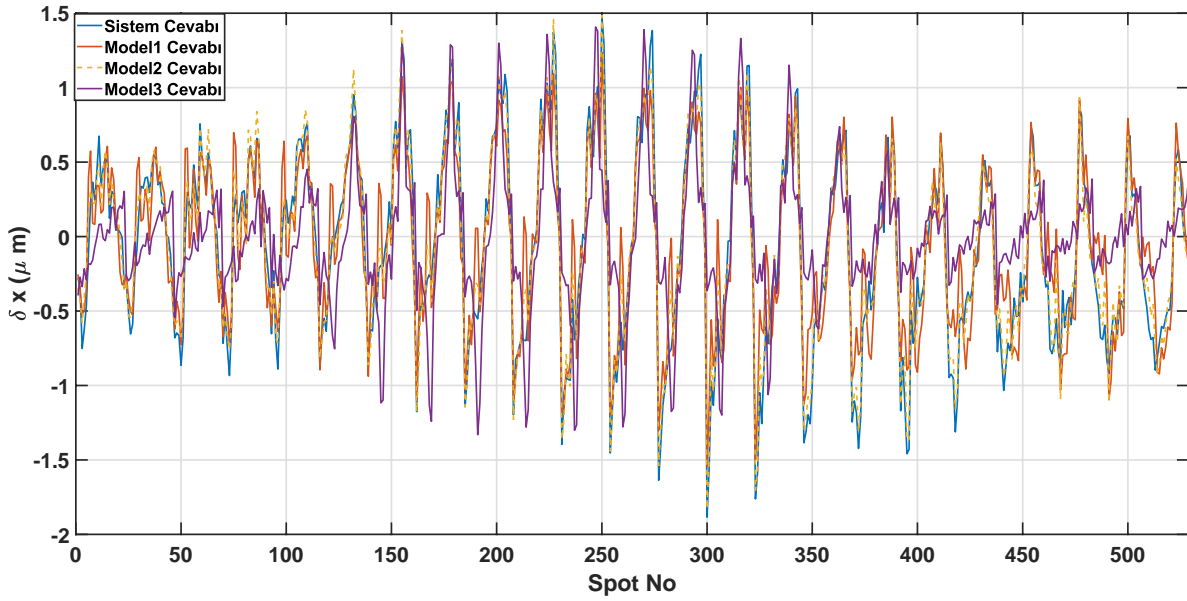
Hadamard şablonunun doğrusal bağımsız giriş vektörlerinden oluşmasıdır. Hadamard şablonunun sahip olduğu bu özellik, etki matrisinin kestirimi \hat{D} 'yi oluşturma sürecinde eyleyici bağlaşımlarından daha az etkilenip, nümerik anlamda çok daha etkili modeller elde edilmesine olanak tanımaktadır. Model1 ve Model2 arasındaki farklar incelendiğinde, ilgilenilen Zernike modlarıyla (Birincil X-Astigmatizm, Birincil Y-Astigmatizm ve Defocus) genişletilmiş Hadamard tahrik şablonunun özellikle Faz 1, Faz 2 ve Faz 3 deneylerinde kayda değer bir iyileştirme sağladığı Tablo 2'den net olarak görülmektedir. Faz 4 deney sonuçlarına bakıldığı zaman ise diğer deneylere nazaran daha ufak bir iyileştirme sağlandığı görülmektedir. Bu durumun sebebi, Faz 4'ü oluşturan deneyin, Model1 ve Model2'yi elde etmekte kullanılan tahrik şablonlarının kesişimi olan Hadamard şablonlarından seçilen girişlerden oluşmasıdır. Dolayısıyla, Model1 ve Model2'nin ortak çalışma uzayını örten girişlerle test edilmesi böyle bir sonucun doğmasını sağlamıştır. Çalışmamızda, WFS 768x768 çözünürlüğe ayarlanmış, dolayısıyla maksimum spot $23 \times 23 = 529$ olmaktadır. Her bir faz aşamasında WFS'ye ait spot üzerinde iki eksende δx ve δy için hesaplanan değişimler, Model1, Model2 ve Model3'le karşılaştırılması Şekil 9-16'da verilmiştir. Yine bu şekillerden de görülebileceği gibi Model1 ve Model2 başarısı net şekilde gözükmemektedir. Gerçek sistemden elde edilen sonuçların, kestirilen bu iki modelden elde edilenler ile kullanılan hata fonksiyonu babında %90'nın üzerinde örtüşmenin gerçekleşmesi, sistem için kabul edilebilir uygun modelin elde edildiğine işaret eder. Ayrıca bu Şekil 9-16'da elde edilen sonuçlar da bunu desteklemektedir.



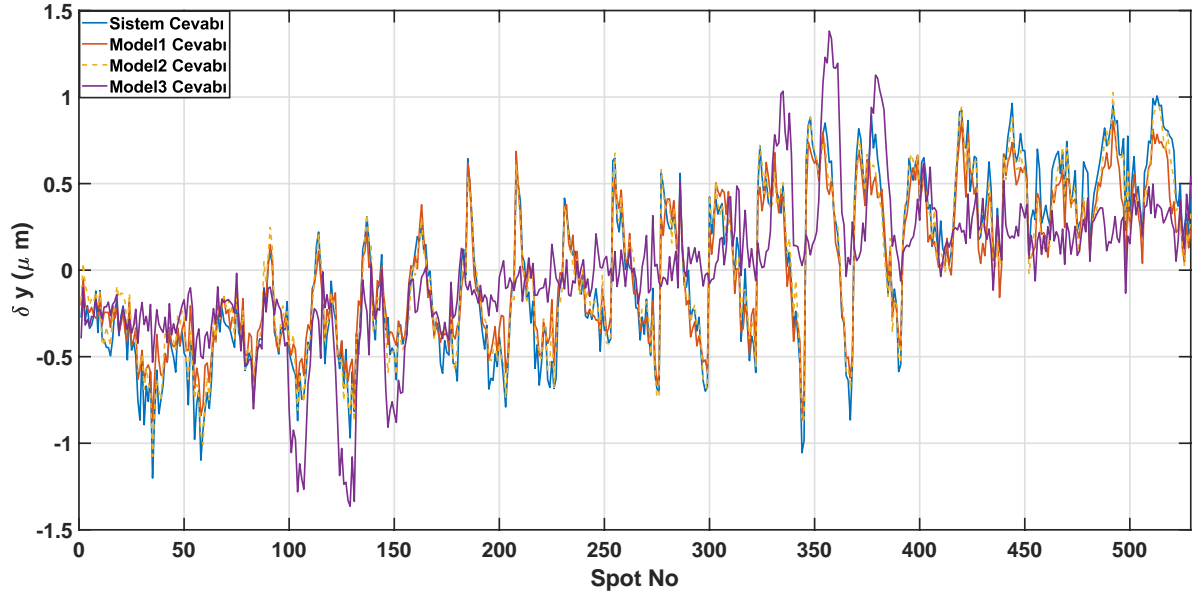
Şekil 9 Focus modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden x-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (x-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with Focus mode)



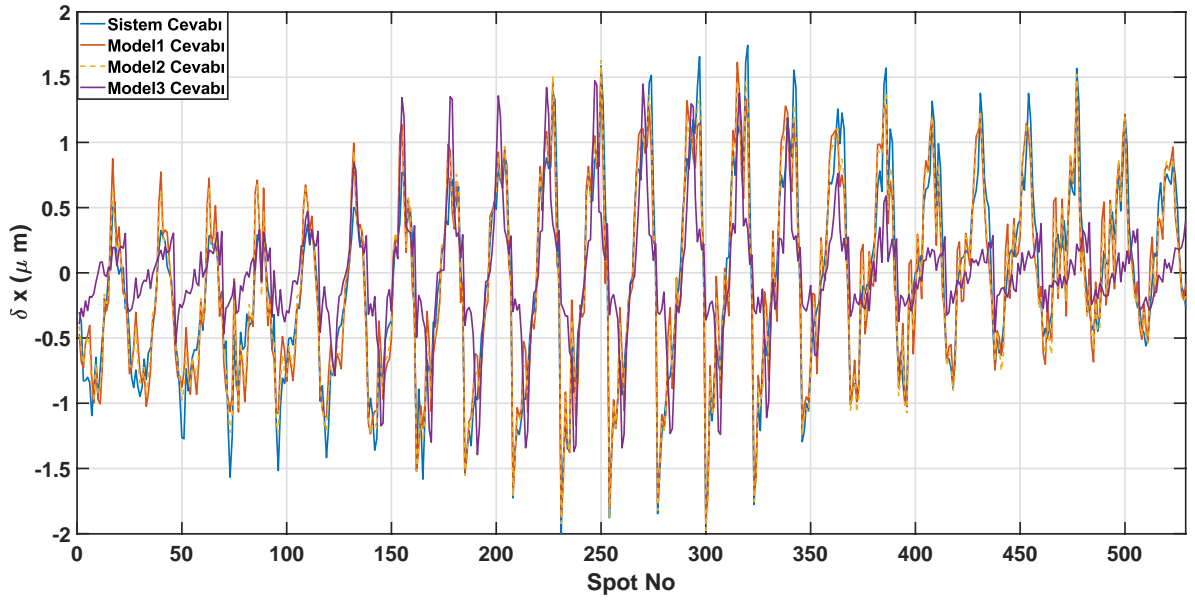
Şekil 10 Focus modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden y -eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (y -axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with Focus mode)



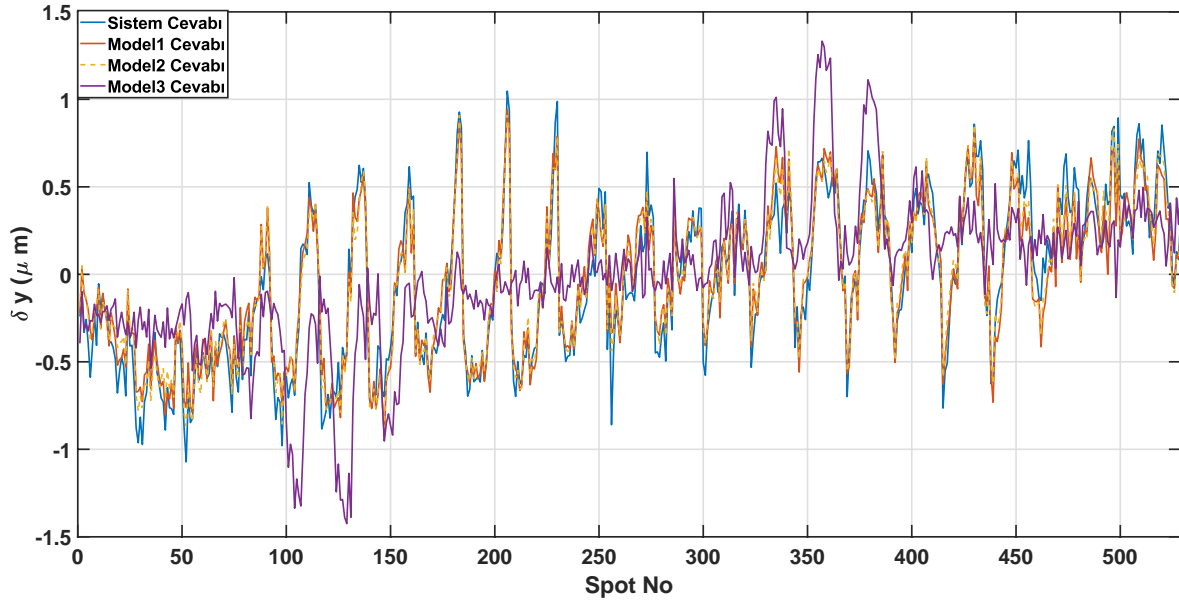
Şekil 11 Birincil X-Astigmatism modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden x -eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (x -axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with primary X-Astigmatism mode)



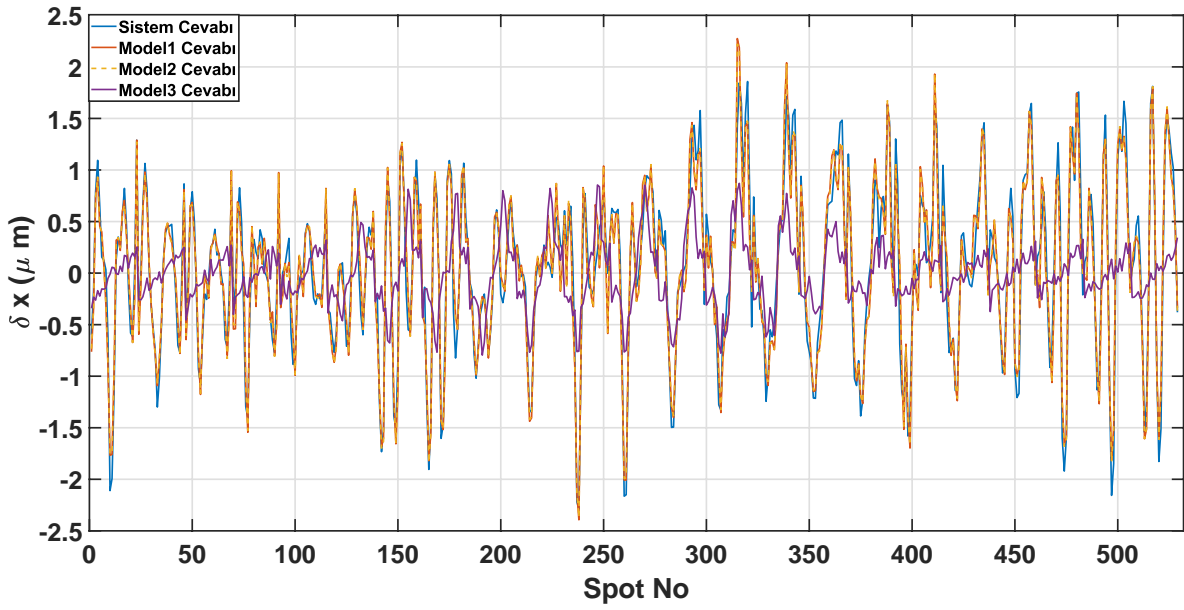
Şekil 12 Birincil X-Astigmatizm ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden y-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (y-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with primary X-Astigmatism mode)



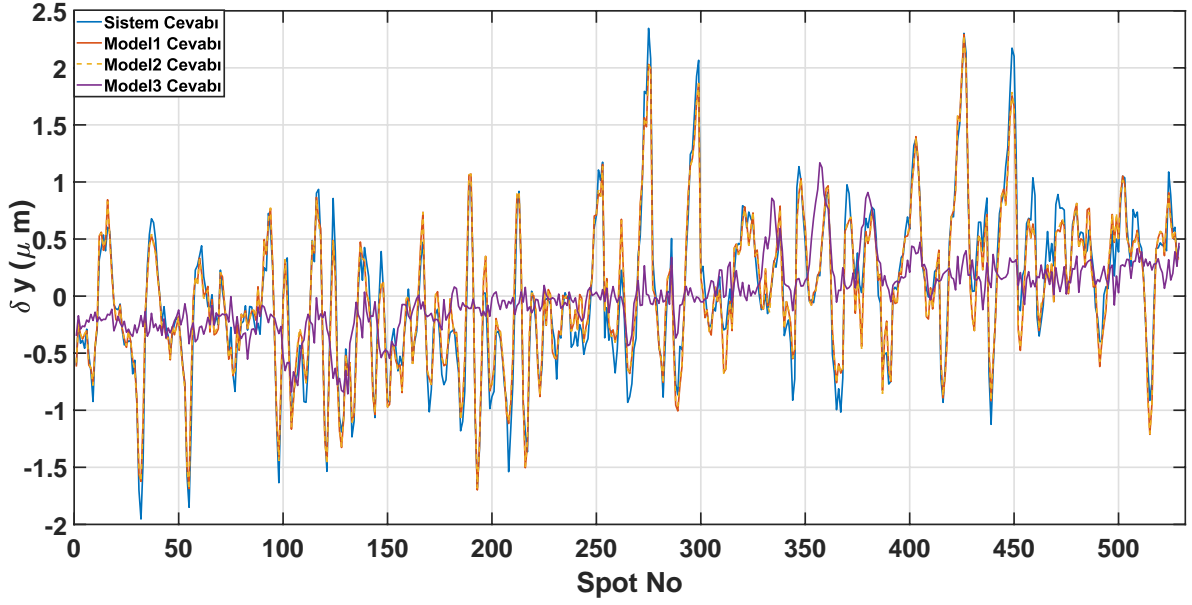
Şekil 13 Birincil Y-Astigmatizm ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden x-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim. (x-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with primary Y-Astigmatism mode)



Şekil 14 Birincil Y-Astigmatizm modunun ağırlıklandırmasına karşılık gelen giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden y-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (y-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with primary Y-Astigmatism mode)



Şekil 15 Rastgele 10 adet Hadamard tahik şablonu kombinasyonuyla oluşturulan giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden x-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim. (x-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with the summation of random 10 Hadamard modes)



Şekil 16 Rastgele 10 adet Hadamard tahik şablonu kombinasyonu ile oluşturulan giriş sinyali altında gerçek sistem ile kestirilen modellerden y-eksenindeki her bir spotta elde edilen değişim (y-axis deviation of the real system and the identified model under input signal weighted with the summation of random 10 Hadamard modes)

Tablo 2 Benzetim Sonuçları (Validation Results)

Eğitim Verisi	Faz 1		Faz 2		Faz 3		Faz 4	
	δx	δy	δx	δy	δx	δy	δx	δy
Model1	94,69	97,45	84,01	93,19	88,14	90,75	93,01	94,37
Model2	97,60	98,70	96,24	96,96	93,40	92,81	93,45	94,57
Model3	32,50	28,72	42,29	42,38	42,35	20,01	16,50	19,72

5. SONUÇLAR (CONCLUSION)

Bu çalışmada Şekil 2’de gösterilen laboratuvar ortamında kurulmuş uyarlamalı optik sistemindeki en önemli eleman olan Boston Micromachines tarafından geliştirilmiş 140 eyleyiciye sahip deforme edilebilen ayna için literatürdeki sistem tanıma tekniklerinde kullanılacak uygun giriş sinyalleri ve önerilen yaklaşımın diğerlerine göre temsil kabiliyetindeki üstünlüğü HIL sistemi ile gösterilmiştir. Deneysel sonuçları göstermiştir ki, uyarlamalı optik sistemlere sıklıkla ihtiyaç duyulduğu çalışma bölgesinde literatürdeki çalışmalara göre daha yüksek sadakatte

modeller elde edilebilmiştir. İleride elde edilen bu yüksek sadakatteki modeller kullanılarak model tabanlı kontrolcülerin performansları yine HIL sistemi üzerinde sınanacaktır.

Elde edilen bu başarılı sonuçların dışında, uyarlamalı optik sistemler için gerek modelleme gerek kontrol çalışmalarını etkileyen kalibrasyon hataları, ortamın nem oranı ve sıcaklığı, deney setinin üzerine kurulduğu platformun titreşimi gibi pek çok faktör vardır. Özellikle kalibrasyon süreci harfiyen yerine getirilse dahi mercekleme konumlandırılmasında ve deforme edilebilen aynaların açıldırılmasındaki mikro seviyedeki hatalar, lazer ışınının DM1, DM2 ve WFS üzerinde odaklama problemlerine yol açmaktadır. Tablo 2'de δx için olan benzerlik oranlarının, δy için elde edilen değerlerden daha düşük olması, x -ekseninde lazer ışınının bahsedilen mikro hatalardan ötürü DM2'nin merkezine odaklanamamasından kaynaklanmaktadır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 118E224 numaralı proje ile desteklenmiş olup, yazarlar bu destek için TÜBİTAK'a teşekkür eder.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Kolmogorov A. N., Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence, Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical and Physical Sciences, 434 (1890), 15–17, 1991.
- [2] Noll R. J., Zernike polynomials and atmospheric turbulence, JOsA, 66 (3), 207–211, 1976.
- [3] Baudouin L., Prieur C., Guignard F., Arzelier D., Control of adaptive optics system: an H_∞ approach., IFAC Proceedings Volumes, 41 (2), 13408–13413, 2008.
- [4] Subaşı, Ö., Erol, B., Altın, B., Turan, H., Bacı, N., H_∞ controller design for the mitigation of atmospheric effects on the laser beam pointing. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 43(8), 1786-1801, 2021.
- [5] Hu L., Hu S., Gong W., Si K., Learning-based shack-hartmann wavefront sensor for high-order aberration detection, Optics express, 27 (23), 33504–33517, 2019.
- [6] Akyol, E., Hagag, A. M., Sivaprasad, S., Lotery, A. J., Adaptive optics: principles and applications in ophthalmology. Eye, 35(1), 244-264, 2021.
- [7] Andersen, T., Owsen-Petersen, M., & Enmark, A. (2020). Image-based wavefront sensing for astronomy using neural networks. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 6(3), 034002-034002.
- [8] Kasper, M., Looze, D. P., Hippler, S., Herbst, T., Glindemann, A., Ott, T., Wirth, A., ALFA: adaptive optics for the calar alto observatory optics, control systems, and performance. Experimental Astronomy, 10(1), 49-73, 2000.
- [9] Kasper, M., Fedrigo, E., Looze, D. P., Bonnet, H., Ivanescu, L., Oberti, S., Fast calibration of high-order adaptive optics systems. JOSA A, 21(6), 1004-1008, 2004.
- [10] Meimon, S., Petit, C., Fusco, T., Optimized calibration strategy for high order adaptive optics systems in closed-loop: the slope-oriented Hadamard actuation. Optics express, 23(21), 27134-27144, 2015.
- [11] Guo, Y., Rao, C., Bao, H., Zhang, A., Zhang, X., Wei, K., Multichannel-Hadamard calibration of high-order adaptive optics systems. Optics express, 22(11), 13792-13803, 2014.

[12] Vogel, C., Tyler, G., Lu, Y., Bifano, T., Conan, R., Blain, C., Modeling and parameter estimation for point-actuated continuous-facesheet deformable mirrors. *JOSA A*, 27(11), A56-A63, 2010.

[13] Brenner, J., Cummings, L., The Hadamard maximum determinant problem. *The American Mathematical Monthly*, 79(6), 626-630, 1972.

[14] Kulcsár, C., Raynaud, H. F., Petit, C., Conan, J. M., Minimum variance prediction and control for adaptive optics. *Automatica*, 48(9), 1939-1954, 2012.

[15] Geary, J. M. (1995). *Introduction to wavefront sensors*, Spie Press, Washington, A.B.D., 1995.