

Model Tabanlı Sistem Mühendisliği Yaklaşımı ile DAG Aktif Optik Dalga Cephesi Sensör (aOWFS) Sistemi Konsept Çalışması

Mehmet Kuruçolak^{1,2}  , Derya Öztürk Çetni^{1,3} , Kemal Rüzgar⁴ ,
Elif Yağmur^{1,5} , Cahit Yeşilyaprak^{1,3} ,

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

² Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

³ Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

⁴ Optonium Technologies LLC., 929010 Lefkosa, Kuzey Kıbrıs

⁵ Atatürk Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, Yönetim Bilişim Sistemleri Bölümü, 25050, Erzurum, Türkiye

Accepted: March 21, 2025. Revised: March 21, 2025. Received: December 8, 2024.

Özet

Bu çalışma, Doğu Anadolu Gözlemevi (DAG) 4 metre teleskobunun Kırınım-Sınırlı Nasmyth Platformunda (KSNP) yer alacak son teknoloji enstürmanlarından biri olan Aktif Optik Dalga Cephesi Sensörünün (aOWFS) erken dönem konsept çalışmalarına odaklanmaktadır. Hali hazırda KSNP’de konumlandırılmış Adaptif Optik Kontrol Sistemi (TROIA), Koronagraf (PLACID), Yakın Kızılötesi Kamera (DIRAC), Rotasyon Düzeltici (Derotator) ve Optik Simülatör (DAGOS) sistemlerinden gelen kısıtlamalar, aOWFS’nin karmaşıklığını arttırmakla beraber potansiyel risklerin öngörülmesini de zorlaştırmaktadır. Bu erken geliştirme aşamasında, olası riskleri belirlemek ve bunları proaktif bir şekilde ele alarak aOWFS’nin KSNP ekosistemine sorunsuz bir şekilde entegre edilmesini sağlamak için Model Tabanlı Sistem Mühendisliği (MBSE) yaklaşımını referans alan bütünsel bir yaklaşım benimsenmiştir.

Abstract

This study focuses on the early conceptual development of the Active Optics Wavefront Sensor (aOWFS), one of the state-of-the-art instruments to be integrated into the diffraction-limited Nasmyth platform of the 4-meter telescope at the Eastern Anatolia Observatory (DAG). Currently, the DLNP houses several critical systems, including the Adaptive Optics (TROIA), Coronagraph (PLACID), Near-Infrared Camera (DIRAC), Derotator, and Optical Simulator (DAGOS). These existing systems impose various constraints that not only increase the complexity of the aOWFS but also make the anticipation of potential risks significantly challenging. In this early development phase, a holistic approach leveraging Model-Based Systems Engineering (MBSE) has been adopted to provide a structured framework for identifying potential risks and proactively addressing them to ensure the seamless integration of the aOWFS within the DLNP ecosystem.

Anahtar Kelimeler: Model Based Systems Engineering (MBSE) – SysML – DAG Telescope – Wavefront Sensor – Astronomical Instruments

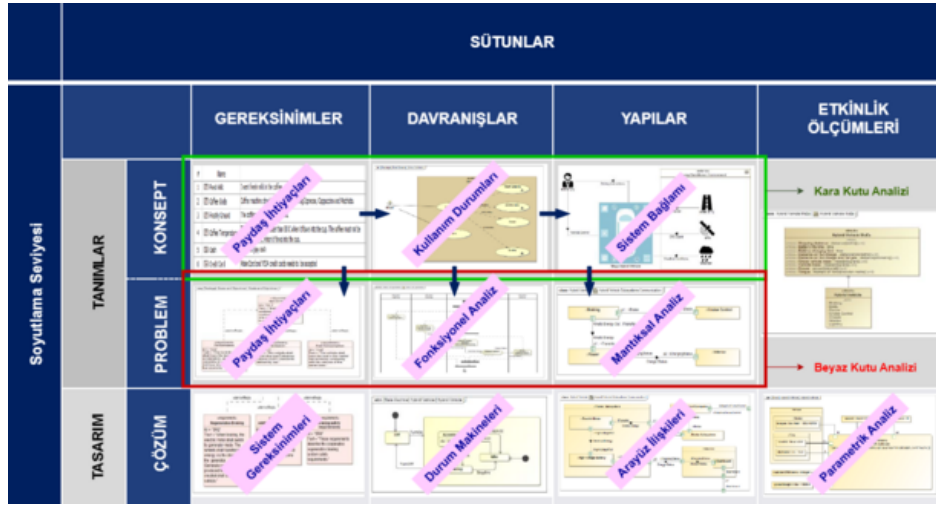
1 Giriş

DAG 4 metre teleskobunun birincil aynası (M1) 4000 mm dış çap, 820 mm iç çap ve 14 cm kalınlığa sahip, 4300 kg ağırlığında zerodur malzemeden üretilmiştir. Astronomik gözlemler sırasında, M1, M2 ve M3 aynaları rüzgar, sıcaklık değişimi ve yerçekimi kaynaklı çevresel etkilere maruz kalmaktadır. Rüzgar yükleri ve sıcaklık değişiminden kaynaklı bozulmalara ek olarak teleskobun yükseklik açısındaki değişim, optik bileşenler üzerine değişken yerçekimi kuvvetlerinin etki etmesine neden olmaktadır. Bu durum, M1 yüzeyinde yerel şekil bozukluklarına, M2 ve M3 aynalarında ise hizalama hatalarına yol açmaktadır. M1’in şekil bozulmalarını ve M2 ile M3’ten kaynaklanan konumsal hataları telafi etmek için Aktif Optik Kontrol Sistemi (aOCS) tasarımı önerilmiştir. aOCS 4 fonksiyona sahiptir:

- Eksenel fonksiyonlar birincil aynanın şeklini kontrol eden 66 pnömatik aktüatör ve aynanın esnemezliğini sağlayan 9 hidrolik aktüatörden oluşmaktadır.
- Yatay destek fonksiyonları, aynanın yanal bozulmalarını telafi etmek için 27 pnömatik aktüatör ve yanal esnemezliği sağlamak için 3 hidrolik aktüatör kullanılmaktadır.
- M2 aynası, beş serbestlik derecesine sahip 6 eksenli platform üzerine monte edilmiştir. Buradaki amaç, ısı genleşme ve yerçekimi etkileri nedeniyle oluşan deformasyonları düzeltmek için M1’e bağlı hizalama işlemi gerçekleştirmektir.
- M3 aynası, M2 ile benzer şekilde 6 eksenli platform üzerine monte edilmiştir. Konum hatalarını düzeltmenin yanı sıra, ışığı iki Nasmyth Platformuna yönlendirmek için bir döndürme mekanizması da içermektedir.

aOCS’in verilen 4 fonksiyonu, düşük dereceli dalga cephesi hatası (WFE) gereksinimleri doğrultusunda belirlenmiştir ve aOCS’in düzeltme performansı, sistemin WFE algılama

* mkurucolak@gmail.com



Şekil 1. Modelleme Ağı (MagicGrid) Çerçevesi.

yeteneğine büyük ölçüde bağlıdır. aOCS, açık-döngü ve kapalı-döngü olmak üzere 2 farklı dalga cephesi hata tespit stratejisini entegre olarak kullanmaktadır (Lousberg ve diğ. 2016).

Açık-döngü stratejisi, özellikle 6 eksenli M2 ve M3 platformlarının hareketlerini kontrol etmek ve dikey konum açısına bağlı öngürülebilir dalga cephesi hatalarını telafi etmek için kullanılır. Açık-döngü, önceden belirlenmiş modellere, mekanik ölçümlere ve sonlu elemanlar simülasyonlarına dayanır. Bu yaklaşım teleskobun genel performansını optimize etmede önemli bir başlangıç noktası olsa da gerçek zamanlı doğrulama eksikliği, aOCS'nin tam performansına ulaşmak için kapalı döngü stratejisine ihtiyacın kaçınılmaz olduğunu göstermektedir.

aOWFS projesinin konsept çalışmaları, aOCS tarafından ortaya konulan kapalı döngü dalga cephesi hatası ölçüm ihtiyacı doğrultusunda şekillendirilmiştir. Bu gereksinimlerin karşılanması ve Kırınım-Sınırlı Nasmyth Platformunda (KSNP) bulunan diğer sistemlerle uyumlu bir şekilde çalışabilmesi için aOWFS sisteminin konsept çalışmalarında sistem mühendisliği paradigması çerçevesinde Model Tabanlı Sistem Mühendisliği (MBSE) yaklaşımı benimsenmiştir.

Sistem Mühendisliği (SM), sistemlerin yaşam döngüsünü yönetmek için çeşitli süreçleri ve metodolojileri içeren sistematik bir yaklaşım olarak tanımlanır (Blanchard & Fabrycky 1990). SM uygulamaları, genellikle farklı disiplinlerden mühendisler ve pratisyenler arasında etkili iletişimi sağlamak ve hedeflenen sisteme net ve detaylı bir yaklaşımla ulaşmak amacıyla geliştirilmiştir (Cederbladh ve diğ. 2024). SM, çok paydaşlı ve çok disiplinli alt sistemlere sahip projelerde genellikle bir bütünleyicilik rolü üstlenir. Bu bağlamda, DAG 4 metre teleskobunun alt sistemlerinin çoklu paydaşlar tarafından yönetilmesi, aOWFS sisteminin etki alanının sınırları hakkında da önemli bilgiler sunmaktadır. Bu nedenle, konsept aşamasında, aOCS'den gelen ihtiyaçlarla birlikte diğer alt sistem paydaşları tarafından belirlenen kısıtlamaların karşılanması ve yeterli güvenin sağlanması durumunda sistemin inşasına başlanmalıdır.

Geleneksel SM uygulamalarında, sistemle ilgili bilgiler genellikle raporlar, şartnameler, kontrol belgeleri ya da benzer ürün şeklinde üretilir. Ancak, bu yaklaşımla bilgilerin senkronizasyonunu sağlamak ve gereksinim değişikliklerini

yönetmek önemli zorluklar yaratmaktadır. 2000'li yılların başında, Uluslararası Sistem Mühendisliği Konseyi, sistem ve yazılım mühendisliği disiplinleri için entegre bir tasarım ve şartname süreci geliştirmek amacıyla Nesne Yönetim Grubu ile iş birliği yapmıştır. Bu iş birliği, Birleşik Modelleme Dili standardını genişletmiş ve Sistem Modelleme Dili (SysML) adı verilen tek bir modelleme paradigmasını oluşturmuştur (Gao ve diğ. 2019). Bunun sonucunda SysML, uygun metodolojiler ve araçlarla birlikte, MBSE ile karmaşık sistemleri modellemek için resmi, eksiksiz ve detaylı bir endüstri standardı haline gelmiştir (Warden ve diğ. 2015).

MBSE, bilginin standart yöntemlerle yakalanmasını sağlayarak projelerin daha sade ve anlaşılır olmasına katkıda bulunmuştur. Bu yaklaşım, müşteriler, kullanıcılar, mühendisler ve proje yöneticileri gibi paydaşlar arasında geliştirilmiş bir iletişim ortamı sunarken, aynı zamanda MBSE'nin simülasyon araçları, bilginin doğrulanmasını ve yeniden kullanılabilirliğini desteklemektedir (Warden ve diğ. 2015).

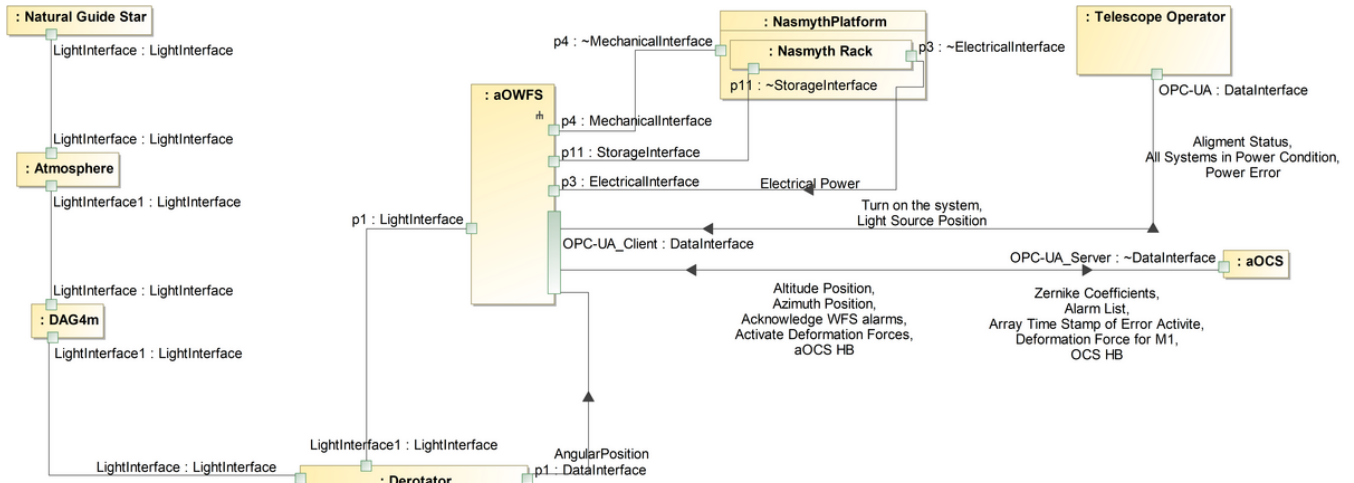
Bu çalışmada, aOWFS projesinin konsept çalışmalarında kullanılan ve bir MBSE çerçevesi olan Modelleme Ağı (MagicGrid) yaklaşımı açıklanmıştır. §3, aOWFS projesine yönelik kara kutu analizine, §4 ise bu analizin detaylandırılarak beyaz kutu analizine odaklanmaktadır. Son olarak, §5 çalışma sonuçlarını özetlemekte ve gelecekte yapılması planlanan çalışmalara ilişkin öneriler sunmaktadır.

2 Modelleme Ağı (MagicGrid) Çerçevesi

MagicGrid Çerçevesi, "Nesne Tabanlı Sistem Mühendisliği Metodolojisi" temel alınarak geliştirilmiş SysML ile tam uyumlu ve araç bağımsız bir SM çerçevesidir. Bunun yanı sıra, modelleme sürecini sade ve anlaşılır bir şekilde tanımlaması, yalnızca modelleyicilere değil, diğer paydaşlara da süreçleri daha net anlama imkanı sunar ve paydaşlar arasındaki iletişim kalitesini artırır (Aleksandravičienė & Morkevičius 2021).

MagicGrid, Şekil 1'de gösterildiği gibi bir matris yapısında temsil edilmektedir. Matrisin sütunları, model hiyerarşisinde aynı türden elementleri temsil eden gereksinimler, davranışlar, yapılar ve performans ölçümlerini içerirken satırlar ise projenin soyutlama seviyelerine ilişkin bir bakış açısı sunmaktadır.

Konsept ve problem seviyelerinde tanımlanan bilgiler, sisteme "ne" sorusu sorulduğunda alınan yanıtları ifade



Şekil 4. aOWFS İlgili Sistemi (Sol) Arayüz Diyagramı.

ortaya konmuştur. Mevcut teknolojiler, Zernike modlarının elde edilmesi için yüksek hassasiyetli bir dalga cephesi sensörüne ve uygun bir ışık kaynağına ihtiyaç duyulduğunu net bir şekilde göstermektedir. Bu çerçevede, operasyonel bağlamın dışında kalan teknik olmayan kısıtlamalar ve sistemin çalışma koşulları dikkate alınarak, aOWFS'in NGS kullanması uygun bir çözüm alternatifi olarak değerlendirilmiştir.

Işık M1-M2-M3 optik zincirinden sonra ve derotator öncesinde yakalanması, sistemin entegrasyon ve bakım süreçlerinde erişim zorlukları yaratmasının yanı sıra, M1 üzerinde optik karartma etkisi gibi operasyonel sorunlara yol açabileceği öngörülmüştür. Bu öngörüler doğrultusunda, ışık derotator sisteminden sonra yakalanmasının, sistem yaşam döngüsü boyunca daha az risk taşıdığı değerlendirilmiştir. Ancak, derotator'un dinamik bir sistem olması, aOWFS'in fonksiyonları üzerinde yeni sınırlamalar ortaya çıkarmıştır.

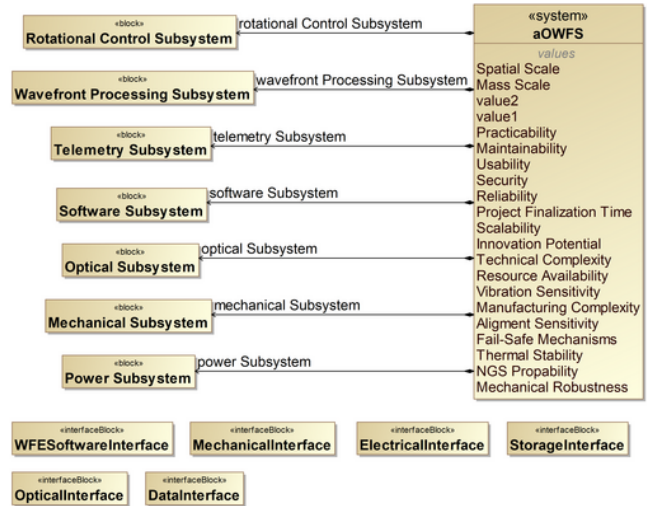
Mekanik arayüz, aOWFS'nin KSNP entegrasyonu ve harici sistemlerle fiziksel etkileşimlerini içermektedir. Optik masanın yoğun alt sistem yerleşimi ve teleskop flanşına olan yakınlığı, ışık kaynağını yakalayacak mekanik bileşenlerin yerleşiminde önemli zorluklar doğurmuştur. Bu kısıtlamalar, sistemin fiziksel entegrasyonunu ve gelecekteki operasyonel sürdürülebilirliğini etkileyebilecek karmaşık bir problem alanı yaratmıştır.

Tüm arayüzlerin kara kutu analizi yaklaşımıyla ele alınması, sistemin teknik ve operasyonel zorluklarının kapsamlı bir şekilde tanımlanmasını sağlamıştır. Bu yaklaşım, yalnızca sistemin işlevselliğine odaklanmakla kalmayıp, zorlukların sistem performansı üzerindeki etkilerinin erken aşamalarda değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Örneğin, derotatorun dinamik yapısının optik verilerin işlenmesine etkileri ve mekanik bileşenlerin yerleşiminden kaynaklanan entegrasyon sorunları, yaşam döngüsünün erken safhalarında analiz edilmiştir. Bu analizler, söz konusu problemlerin ileride yaratabileceği olumsuz etkileri öngörme ve bu doğrultuda önlemler geliştirme imkanı sunmuştur.

Bu yaklaşımla birlikte, sistemin teknik ve operasyonel gereksinimlerinin tutarlı bir şekilde ele alınması, problemleri daha net bir şekilde tanımlamayı sağlamış ve ilerleyen süreçler için sağlam bir çerçeve oluşturmıştır.

Fonksiyonel olmayan paydaş gereksinimleri, Sistem İlgili

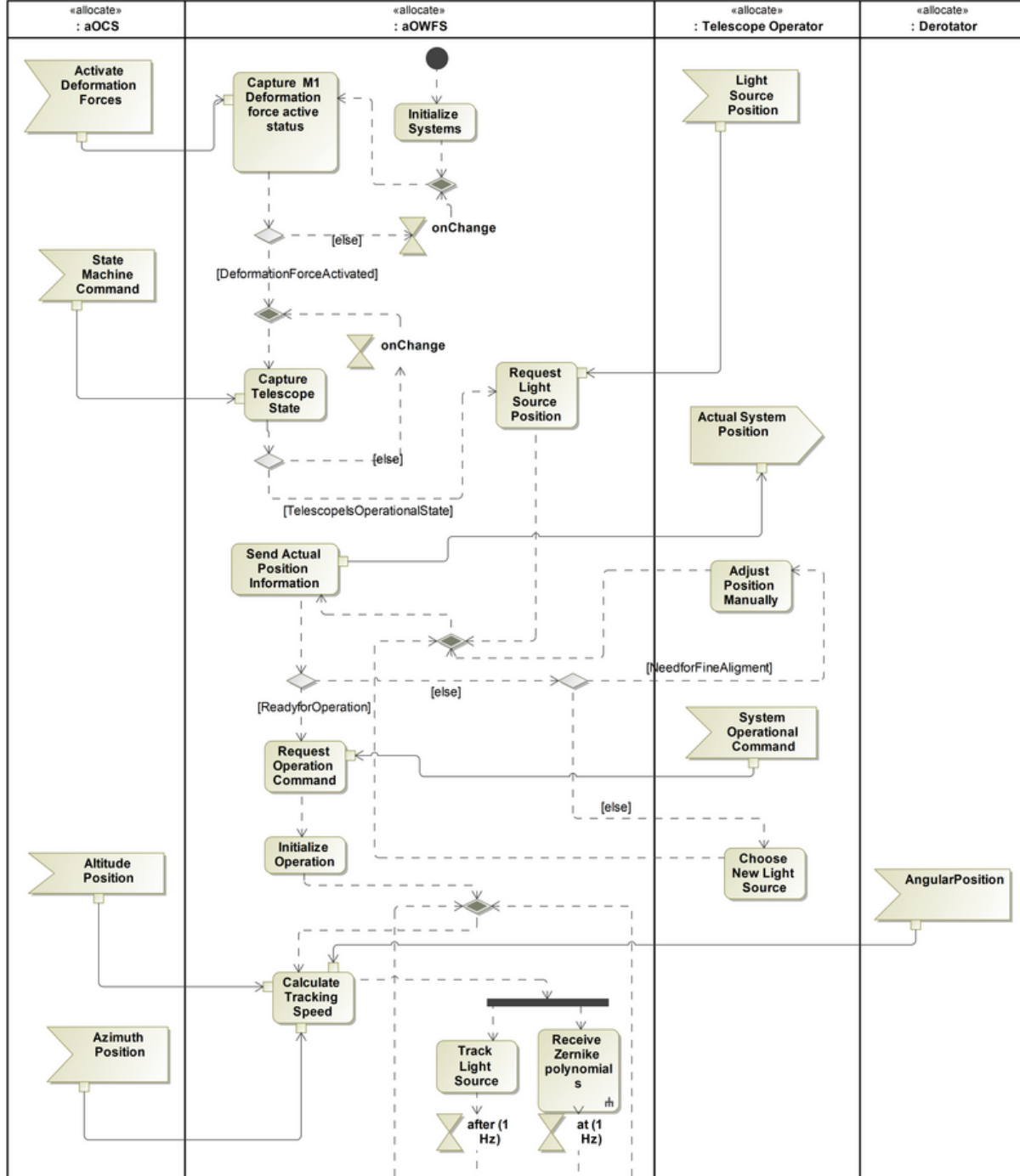


Şekil 5. aOWFS Etkinlik Ölçütlerinin Gösterimi.

Alanı'nın (Sol) ölçülebilir niteliklerini sayısal terimlerle ifade eden Etkinlik Ölçütleri (MoE) aracılığıyla detaylandırılmaktadır. SM bağlamında MoE'ler, bir sistemin belirli bir görev veya işlevi, tanımlanan operasyonel bağlamda ne kadar etkin ve verimli gerçekleştirdiğini değerlendirmek için kritik bir araçtır.

aOWFS bağlamında, MoE'ler sistemin performans, güvenilirlik, erişilebilirlik ve entegrasyon kabiliyetlerini ölçülebilir metriklerle değerlendirmeye olanak tanımaktadır. Bu yaklaşım, paydaş beklentilerinin sistem seviyesine indirgenmesinde tutarlı bir çerçeve sunarak, karmaşık gereksinimlerin yönetimini kolaylaştırmaktadır. Şekil 5, aOWFS için tanımlanmış yüksek seviyeli MoE'leri sistematik bir şekilde sunarak, bu ölçütlerin sistem yaşam döngüsünün erken aşamalarında nasıl değerlendirildiğini ve izlendiğini göstermektedir.

Bu yapılandırılmış yaklaşım, MBSE metodolojisinin, paydaş gereksinimlerini nicel bir şekilde analiz etme ve sistem bağlamında net bir şekilde ifade etme kabiliyetini vurgulamaktadır. MoE'lerin bu şekilde modellenmesi,



Şekil 6. aOWFS Operasyonel Aktivite Diyagramı.

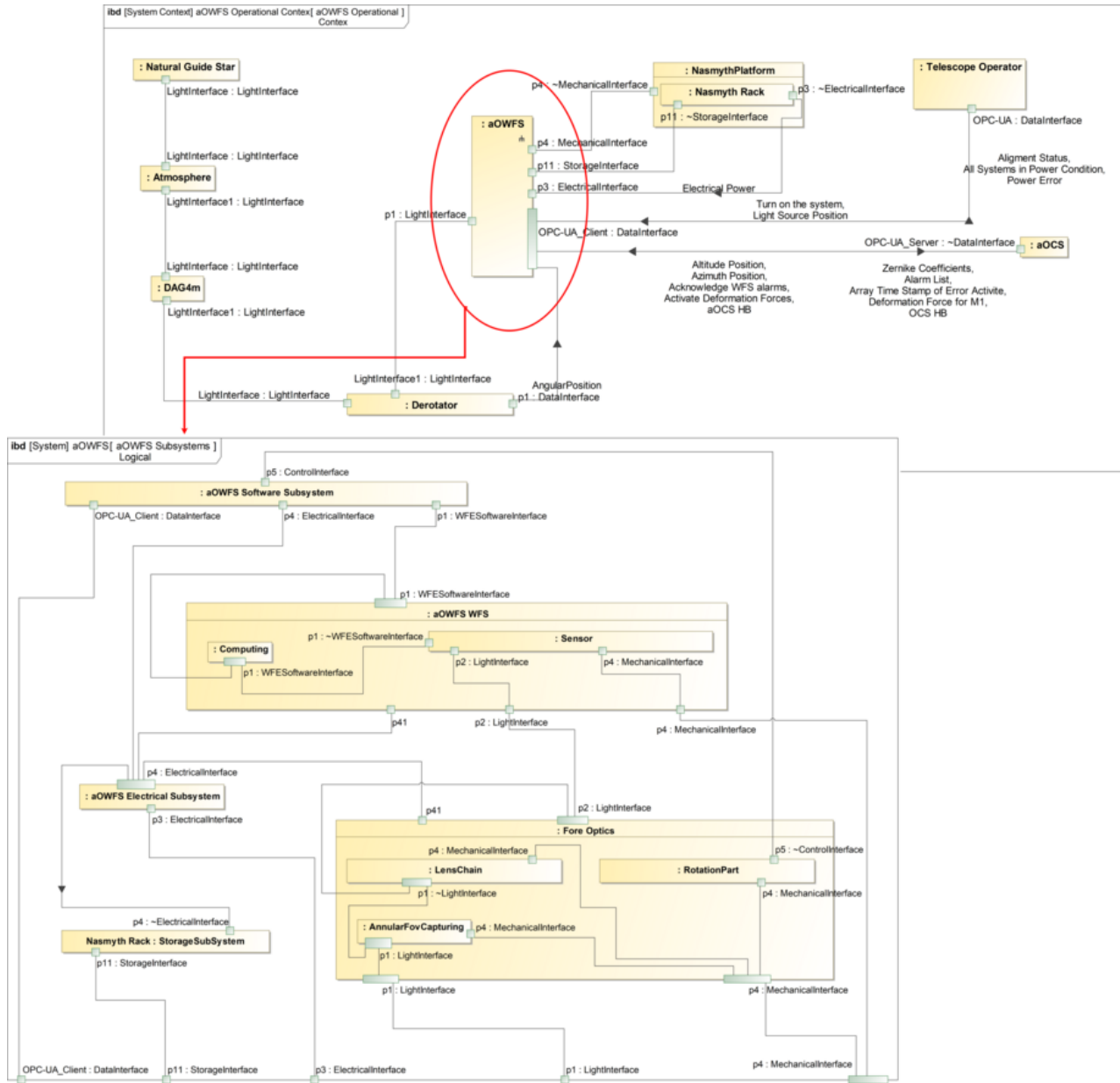
sistemin etkinliğini artıracak karar destek mekanizmalarının oluşturulmasında önemli bir rol oynamaktadır.

4 aOWFS Beyaz Kutu Analizi

Sol, kara kutu perspektifinden incelendikten sonra, paydaş ihtiyaçlarını derinlemesine anlamak amacıyla beyaz kutu perspektifinden daha kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sistem işlevlerinin detaylı analizi, ilgili çerçevede fonksiyonel analiz olarak adlandırılmaktadır. Bu süreç aracılığıyla, başlangıçta bir kullanım durumu veya aktivite olarak

tanımlanan yüksek seviyeli bir fonksiyonel paydaş ihtiyacı, çeşitli alt sistemler tarafından yerine getirilmesi gereken birden fazla aktiviteye ayrıştırılmıştır. Bu yaklaşım, her bir alt sistemin genel gereksinimlerin karşılanmasına nasıl katkı sağladığını daha ayrıntılı ve kesin bir şekilde anlamaya olanak tanımaktadır.

Şekil 6'da gösterildiği gibi, başlatma prosedürü sırasında WFS'de bir sorun olduğunda sistem, aOCS'ye bir WFS Alarımını Kabul Et mesajı gönderir. Bu süreç, teleskobun aOCS döngülerini buna göre uyarlamasını sağlar ve WFS kaynaklı bir hatanın tüm gözlem sürecini etkileyen bir hata



Şekil 7. aOWFS Kavramsal Alt Sistemler Diyagramı.

noktasına dönüşmesini önler. Bu analiz, güçlü alt sistem iletişiminin sistem güvenilirliği üzerindeki etkisini net bir şekilde ortaya koymaktadır.

Ayrıca, sistemin manuel müdahalelere olan bağımlılığını azaltmak ve otonomi düzeyini artırmak için alt sistem işlevleri titizlikle tanımlanmıştır. Örneğin, eksen dışı doğal kılavuz yıldız (NGS) ile çalışabilmesi ve derotator modlarına uyum sağlayabilmesi için sistemin döner hareketleri telafi edebilecek mekanizmalar geliştirilmiştir.

Eksen dışı NGS kullanımı, sistemin bilim yıldızına göre görüş alanı sınırlarının tanımlanmasını gerektirir. Bu nedenle, aOWFS'nin NGS tarama ve bulma işlemlerini teleskop operasyonel duruma geçtikten sonra gerçekleştirmesi hedeflenmiştir. Kullanıcıdan alınan ışık kaynağı konumu sistem tarafından işlenir ve mevcut konum geri bildirilir. Eğer hizalama problemi varsa, sistem manuel ince ayar yapılmasına olanak

tanır. Bu tür işlemler, MBSE'nin erken aşamada konsept belirleme ve gereksinim türetme süreçlerine sağladığı netlik ile sistem tasarımının başarısına katkıda bulunur.

Fonksiyonel analiz aşamasında, aOWFS'nin sistem seviyesindeki davranışları ayrıştırılmış ve detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu kapsamda, kavramsal alt sistemler oluşturulmuş ve ayrıştırılan aktiviteler ilgili kavramsal alt sistemlere atanmıştır. Şekil 7, aOWFS'nin kavramsal alt sistemlerini ve bu alt sistemlerin birbirleriyle olan ilişkilerini göstermektedir.

Paydaş ihtiyaçları ve kısıtlamaları doğrultusunda, aOWFS'nin yalnızca sistem ve alt sistem seviyelerinde değil, aynı zamanda optik eleman seviyesinde de ayrıştırılması gerekmiştir. Bu doğrultuda, ön optikler alt sistemi altında "Lens Dizisi", "Döner Parça" ve "Halka Görüş Alanı Yakalama" gibi kavramsal elemanlar tanımlanmıştır.

Özellikle, “Halka Görüş Alanı Yakalama” elemanı, eksen dışı kılavuz yıldızlarla çalışma zorunluluğu nedeniyle geliştirilmiştir. Bu eleman, farklı konseptlerin tanımlanmasını ve bileşen düzeyinde karşılaştırılmasını sağlamıştır. Örneğin, 2 inç ayna ve halka ayna konseptleri, “Halka Görüş Alanı Yakalama” kavramsal elemanından türetilmiş ve detaylı olarak analiz edilmiştir.

Sonuç olarak, derotator çıkışındaki ışık kaynağı “Halka Görüş Alanı Yakalama” kavramsal elemanı tarafından yakalanacaktır. Seçilen WFS stratejisine bağlı olarak, ışık kaynağı “Lens Dizisi” üzerinden toplanacak ve “WFS dedektörüne” iletilecektir.

Optik arayüzün ardından, sistem tasarımında öncelikli bir diğer bileşen veri arayüzüdür. Bu arayüz, aOWFS sistemi ile diğer bileşenler arasında veri iletişimini sağlamak ve operasyonel süreçlerde gerekli bilgileri aktarmak için kritik bir rol oynamaktadır. Derotator’un neden olduğu rotasyon hareketlerinin telafisi ve teleskop operatöründen gelen gereksinimler, sistemin veri akışını optimize edecek yeni veri arayüzlerinin tanımlanmasını gerekli kılmıştır.

Bu kapsamda, yazılım kavramsal alt sistemi içinde bir Grafik Kullanıcı Arayüzü (GUI) kavramsal bileşeni tasarlanmıştır. Bu bileşen, kullanıcının sistemle etkileşim kurmasını sağlayarak veri giriş ve çıkış süreçlerini kolaylaştırır. Aynı zamanda, yazılım alt sistemi; ön optikler alt sisteminde yer alan döner parça kavramsal elemanı ve WFS alt sistemindeki hesaplama birimi ile entegre çalışarak, sistemin veri akışı ve işlevselliğini bir bütün olarak desteklemektedir. Bu yaklaşım, veri arayüzlerinin sistem genelinde etkili bir şekilde çalışmasını ve paydaş ihtiyaçlarını karşılamasını sağlamaktadır.

Beyaz kutu analizi, aOWFS’nin sistem ve kavramsal alt sistem düzeyindeki detaylarını ayırıştırarak, paydaş gereksinimlerini karşılamaya yönelik etkin bir tasarım yaklaşımı sunmaktadır. Işık arayüzü bağlamında, eksen dışı kılavuz yıldızlardan gelen ışığın atmosfer, teleskop ve derotatordan geçerek ön optikler ve WFS kavramsal alt sistemleriyle etkileşimi tanımlanmaktadır. Bu süreçte, “Halka Görüş Alanı Yakalama”, “Lens Dizisi” ve “Döner Parça” gibi elemanlar, optik performansı optimize eden temel bileşenler olarak öne çıkmaktadır.

Veri arayüzü, sistem içi ve dışı iletişimi sağlamakta olup, yazılım ve optik bileşenler arasındaki veri akışını koordine etmektedir. Bu bağlamda, GUI bileşeni, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamak ve operasyonel gereksinimlere uygun veri alışverişini desteklemek üzere yazılım alt sistemi altında tanımlanmaktadır.

5 Sonuçlar

Bu çalışmada, DAG 4 metre teleskobu için aOWFS erken geliştirme aşamasında MBSE metodolojisi uygulanarak kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Sistem gereksinimlerini anlamak ve bu gereksinimlere yanıt verecek bir yapı oluşturmak için kara kutu ve beyaz kutu analizleri uygulanmıştır.

Kara kutu analizi, aOWFS’nin çevresel bağlamını netleştirerek, paydaş ihtiyaçlarının açık bir şekilde modellenmesine olanak sağlamıştır. Optik, mekanik, veri ve elektrik arayüzleri tanımlanarak, aOWFS’nin dış etkileşimleri sistematik bir şekilde ele alınmıştır. Bu süreç, derotator gibi kritik bileşenlerle etkileşimden kaynaklanan zorlukları öngörmemizi sağlamış ve sistem sınırlarının net bir şekilde belirlenmesine katkıda bulunmuştur.

Beyaz kutu analizi, sistemin işlevsel yönlerini detaylandırarak alt sistemlerin ve bu alt sistemlere bağlı

aktivitelerin açıkça ayrıştırılmasını sağlamıştır. Örneğin, “Halka Görüş Alanı Yakalama”, “Lens Zinciri” ve “Döner Parça” gibi kavramsal elemanlar tanımlanmış, bu elemanların optik performansı optimize etme ve eksen dışı NGS ile çalışma kabiliyetlerini desteklediği gösterilmiştir.

MBSE’nin bu çalışmadaki en önemli katkılarından biri, tekrarlanabilir bir model sunarak gelecekteki enstrümanların geliştirilmesine temel oluşturmaktır. Oluşturulan model elementleri, hem gereksinim analizinde hem de konsept belirlemede yeniden kullanılabilir bir yapı sunmuş, böylece geliştirme süreçlerini önemli ölçüde kısaltmıştır. Ayrıca, açık bir modelleme yaklaşımı sayesinde tüm paydaşların proje konsepti üzerinde fikir birliği sağlaması kolaylaşmış, bu da iletişim süreçlerini güçlendirmiştir.

Ancak, model okuma ve yorumlama süreçlerinin ileri düzeyde teknik bilgi gerektirmesi, özellikle MBSE’de kullanılan SysML’nin anlaşılması için bir eğitim gerekliliğini ortaya koymaktadır. SysML’nin yapısal, davranışsal ve gereksinim temelli modelleme elemanlarının karmaşıklığı, modeli yorumlamak ve doğru bir şekilde uygulamak için kullanıcıların bu dile özgü bir yetkinliğe sahip olmasını zorunlu kılmaktadır. Bu durum, projede görev alan bireylerin farklı seviyelerdeki modelleme bilgi birikimi nedeniyle ek eğitim ve rehberlik süreçlerine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bunun yanı sıra, MBSE’nin henüz geniş bir kullanıcı tabanı tarafından benimsenmemiş olması, metodolojinin uygulanmasında sınırlayıcı bir faktör olarak öne çıkmıştır. Bu zorluklara rağmen, elde edilen sonuçlar MBSE’nin uzun vadede sağladığı avantajların, metodolojinin başlangıç aşamasındaki maliyet ve karmaşıklıkları aştığını göstermektedir.

Gelecek çalışmalar, mevcut aOWFS modelinin SysML v2’ye entegrasyonu üzerine odaklanmayı hedeflemektedir. Bu entegrasyonun, sistemin tüm yaşam döngüsü fazlarında (konsept geliştirme, tasarım, üretim, entegrasyon, doğrulama, operasyon ve bakım) daha etkin bir yönetim ve uygulama süreci sağlayabileceği düşünülmektedir. SysML v2’nin genişletilmiş modelleme olanaklarının, özellikle model elemanlarının yeniden kullanılabilirliği, güçlü semantik yapılandırılmalar ve artırılmış izlenebilirlik gibi avantajlar sunarak, aOWFS modelinin her yaşam döngüsü fazında daha tutarlı ve uyumlu bir yapı sunması beklenmektedir.

Ayrıca, SysML v2’nin açık meta-model yapısının, DAG teleskobu ekosistemindeki diğer enstrümanlarla olan entegrasyonda güçlü bir temel sağlayacağı tahmin edilmektedir. Bu geçişin, yalnızca aOWFS modelinin yaşam döngüsü boyunca yönetimini iyileştirmekle kalmayıp, aynı zamanda gelecekteki DAG enstrümanları için tekrarlanabilir ve genişletilebilir bir referans modeli oluşturacağı düşünülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmanın yürütülmesi ve tamamlanması sürecinde sağladıkları destek ve sundukları imkanlar için Türkiye Ulusal Gözlemevleri’ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- Lousberg, G.P., Mudry, E., Bastin, C., Schacher, J.M., Gabriel, E., Pirnay, O., Flebus, C.: Active optics system for the 4m telescope of the Eastern Anatolia Observatory (DAG). In: Advances in Optical and Mechanical Technologies for Telescopes and Instrumentation II, vol. 9912 (2016)
- Blanchard B.S., Fabrycky, W.J.: Systems Engineering and Analysis, 4th ed. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ (1990)

- Cederbladh, J., Cicchetti, A., Suryadevara, J.: Early Validation and Verification of System Behaviour in Model-based Systems Engineering: A Systematic Literature Review. *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.* 33 (2024)
- Gao, S., Cao, W., Fan, L., Liu, J.: MBSE for Satellite Communication System Architecting. *IEEE Access*, 7 (2019), 164051–164067
- Walden, D., Roedler, G., Forsberg, K., Hamelin, R., Shortell, T.: *INCOSE Systems Engineering Handbook: A Guide for System Life Cycle Processes and Activities*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA (2015), 189-197
- Aleksandravičienė, A., Morkevičius, A.: *A Practical Guide to Systems Modeling using MagicGrid from Dassault Systèmes*. Magic Grid Book of Knowledge. (2021)

Access:

M25-0356: *Turkish J.A&A* — Vol.6, Issue 3.