

## MODEL TABANLI SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ METOTLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ VE ARCADIA METODUNUN MİNİ TURBOJET MOTOR GELİŞTİRİLMESİNE YÖNELİK UYGULAMASI

Sefa TAK<sup>1</sup>  
TRMotor Güç Sistemleri San. A.Ş., Ankara

Oğuzhan MEDET<sup>2</sup>  
TRMotor Güç Sistemleri San. A.Ş., Ankara

### ÖZET

*Bu çalışma Model Tabanlı Sistem Mühendisliği hakkında kısaca bilgi vermek, literatürde mevcut olan Model Tabanlı Sistem Mühendisliği metotlarını kısaca incelemek ve bu metotlar arasından seçilen ARCADIA metodunun test düzeneğinde kullanılacak bir mini turbojet motor için uygulamasını içermektedir. Bu kapsamda Model Tabanlı Sistem Mühendisliğini uygulamaya yönelik, SAE ARP 4754A rehber standardında önerilen sistem geliştirme adımlarına ve ARCADIA metoduna uygun olarak gereksinim listesi çıkarılmış, gereksinimlerden ürüne ve test düzeneğine yönelik fonksiyonlar oluşturulmuştur. Sonrasında açık kaynak Capella yazılımı ile bu fonksiyonları içeren, mini turbojet motorun fonksiyonel mimarisi oluşturularak gereksinim ve fonksiyonların kendi içlerinde ve birbirleri arasında olan ilişkileri modellenmiştir. Bu çalışma ile sistem mühendisliği yaşam döngüsünün önemli bir parçası olan, gereksinim-fonksiyon-mimari süreci Model Tabanlı Sistem Mühendisliği yaklaşımı ile uygulanmış olup, izlenebilirlik, tutarlılık ve uyarlanabilirlik gibi Model Tabanlı Sistem Mühendisliği yaklaşımının temel özellikleri gözlemlenmiştir.*

### GİRİŞ

Gelişen teknoloji, dijitalizasyon ve bunun paralelinde ürün ve sistemlerin daha karmaşık hale gelmesi, ticari kaygılar gibi sebepler Model Tabanlı Mühendislik uygulamasını son zamanlarda ön plana çıkarmıştır. Model Tabanlı Mühendisliğin alt bileşenlerinden olan Model Tabanlı Sistem Mühendisliği de bu kapsamda önemini eş zamanlı olarak artırmış ve hatta Uluslararası Sistem Mühendisliği Konseyi, INCOSE, tarafından 2035 yılına kadar sistem mühendisliğinin kaçınılmaz varış noktası olarak nitelendirilmiştir.

Model Tabanlı Sistem Mühendisliği, kavramsal tasarım aşamasında başlayan, geliştirme ve sonraki yaşam döngüsü süreçleri boyunca devam eden, sistem gereksinimleri, tasarım, analiz, doğrulama ve geçiş faaliyetlerini destekleyen modelleme yöntemidir [INCOSE, 2007]. Geleneksel, doküman tabanlı sistem mühendisliği yaklaşımından farklı olarak, modelleri sistem tasarımının merkezine koyarak gereksinim, fonksiyon, mimari, doğrulama, geçiş gibi sistem mühendisliği faaliyetlerini bu modeller ile destekler. Bu sayede sistem mühendisliği faaliyetleri arasındaki ilişkilerin, tutarlılıkların ve değişikliklerin izlenebilirliğini kolaylaştırır.

Bunlara ilaveten proje kapsamında, farklı çalışma ekipleri arasındaki iletişimi kuvvetlendirir, ürün kalitesini artırır, hata takibini ve giderilmesine yönelik çalışmaları kolaylaştırır.

<sup>1</sup> Sistem Mühendisi, E-posta: sefa.tak@trmotor.com.tr

<sup>2</sup> Sistem Mühendisliği Grup Lideri, E-posta: oguzhan.medet@trmotor.com.tr

## Model Tabanlı Sistem Mühendisliği Metotları

**IBM Harmony SE:** IBM Harmony SE, IBM tarafından oluşturulan Harmony yazılım geliştirme metodunun sistem mühendisliği kapsamında kullanılan kısmıdır, ve sistem mühendisliğinde kullanılan klasik “V-Model” baz alınarak oluşturulmuş bir metottur [Hoffman, 2011].

Bu metotta sistem mühendisliği çalışmalarını oluşturan üç ana unsur vardır. Bu unsurlar:

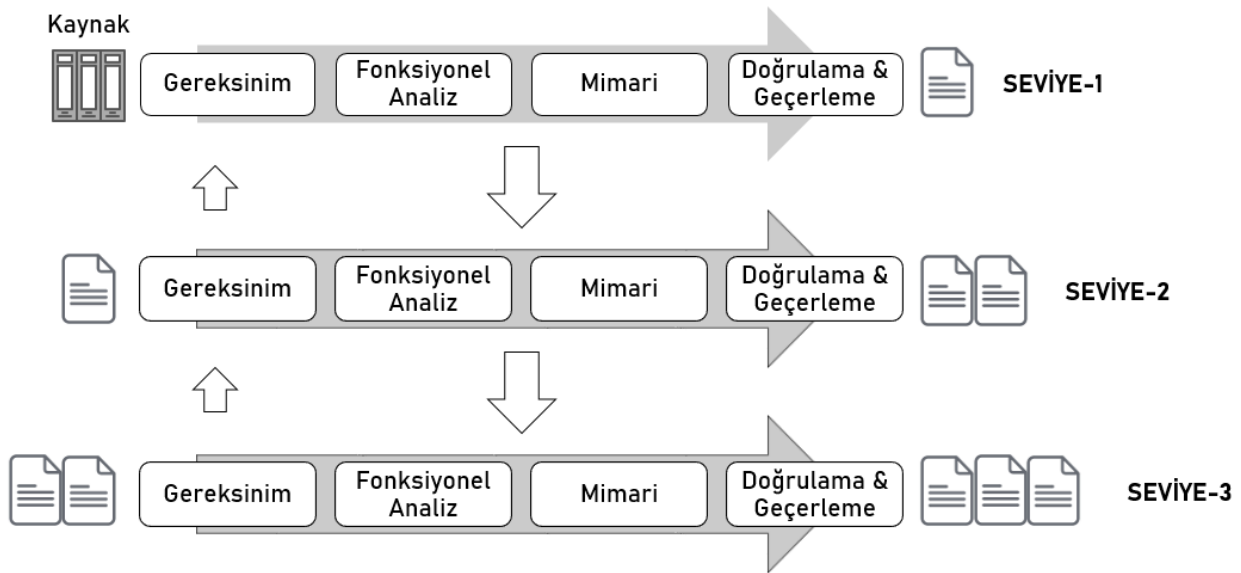
- Gereksinim Analizi,
- Fonksiyonel Analiz,
- Mimari Çalışmaları

şeklinde.

Gereksinim analizi kısmında, geliştirilecek sisteme dair, müşteriden gelen ve çeşitli standartlardan yakanalan gereksinimlerden oluşan gereksinim listesi hazırlanarak bu liste analiz edilir.

Fonksiyonel analiz kısmında, gereksinimleri karşılayacak fonksiyonlar oluşturulur ve son olarak mimari çalışmalarında sistem ve alt sistem mimarileri oluşturulur. Oluşturulan tüm gereksinim, fonksiyon ve mimariler model havuzlarında toplanır.

**Vitech (STRATA) Metodu:** Vitech şirketi tarafından geliştirilen, STRATA ismi ile de literatürde yer alan model tabanlı sistem mühendisliği metodu temel olarak “stratejik katman” ilkesine dayanmaktadır [Estefan, 2008].



Şekil 1: STRATA Katmanlı MBSE Prosesi

Şekil 1’de de gösterildiği üzere, bu yöntemde, sistem tasarım ve geliştirme çalışmaları en temel, yüzeysel ve gittikçe detaylanan katmanlardan oluşmaktadır. Her katmanda tamamlanması gereken dört ana unsur vardır ve bu unsurlar tamamlanmadan bir sonraki katmana geçilmez. İstenilen detaya kadar inildiğinde katman sonlandırılır. Her katmanda yürütülmesi gereken dört ana çalışma unsuru:

- Gereksinim Analizi,
- Fonksiyonel/Davranışsal Analiz,
- Sentez/Mimari Çalışmaları,
- Doğrulama ve Geçerleme Çalışmaları

şeklinde.

**INCOSE OOSEM Metodu:** Lockheed Martin firmasında çalışan sistem mühendisleri ile INCOSE’de bulunan sistem mühendislerinin işbirliği ile geliştirilen Obje Odaklı Sistem Mühendisliği Metodu

(ing. *Object-Oriented Systems Engineering Method, OOSEM*), model tabanlı sistem mühendisliğini geleneksel sistem mühendisliği metodu ile birleştiren bir yaklaşıma sahiptir [Shashank, 2019].

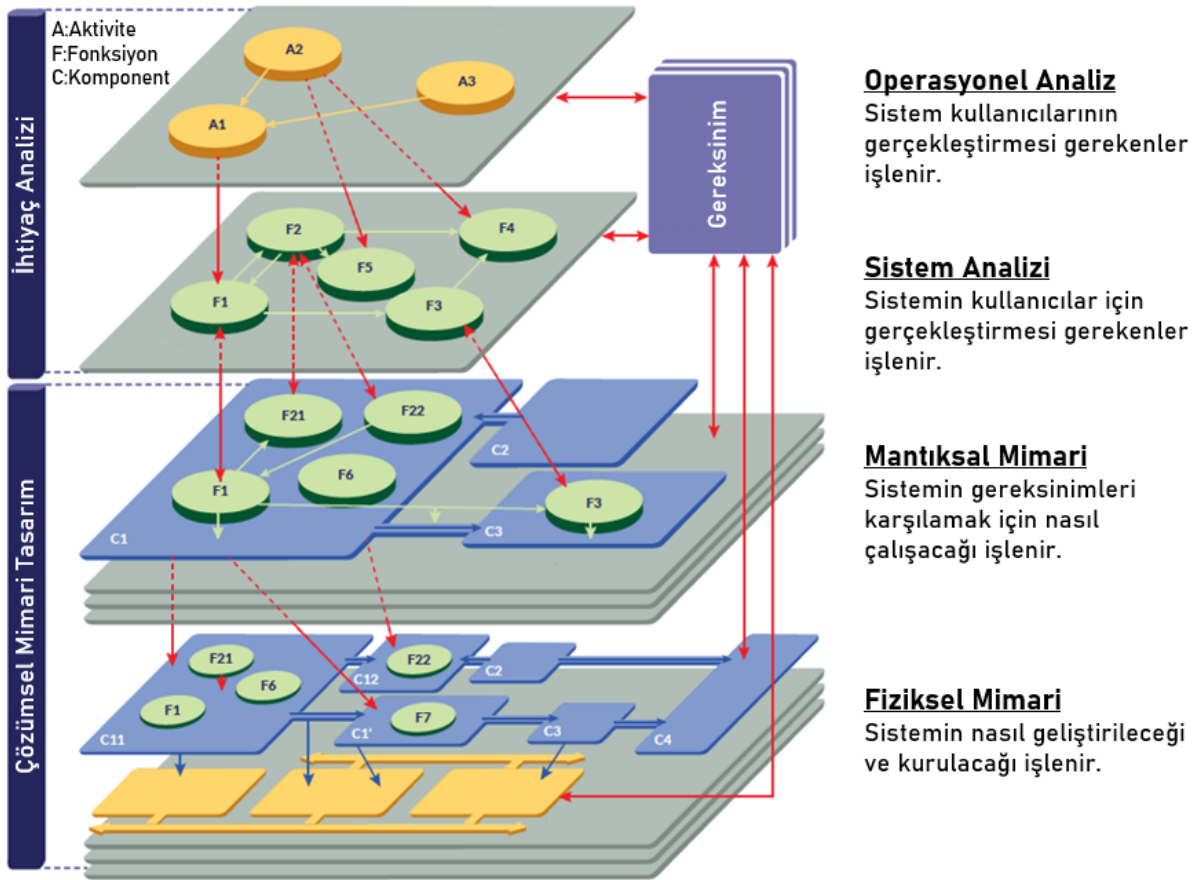
OOSEM metodu ile ilk olarak müşteri ve paydaşların ihtiyaçları belirlenir. Daha sonra bu ihtiyaçlardan sistemin sağlaması gereken kabiliyetler tanımlanır. Bu kabiliyetlere karşılık gelen sistem fonksiyonları geliştirilir ve fonksiyonel senaryolar oluşturulur. Bir sonraki adım olarak sistem gereksinimlerini karşılayacak olan fonksiyonların mantıksal elemanlara ataması yapılarak, birbirleriyle olan ilişkileri modellenir, sistem ve alt sistemlerin mantıksal mimarileri oluşturulur.

**ARCADIA Metodu:** ARCADIA, Fransız havacılık şirketi Thales tarafından geliştirilen ve diğer metotlarından farklı olarak, modelleme çalışmalarında SysML, UML gibi modelleme dillerine ihtiyaç duymayan model tabanlı sistem mühendisliği metodudur. Ek olarak, bu metot Capella modelleme yazılımına entegre olması bakımından diğer metotlardan ayrışır [Roques, 2016]. ARCADIA metodu, Şekil 2'de özetlendiği şekliyle, süreç boyunca ilerledikçe detayların arttığı, esnek ve iteratif bir dizi katmandan oluşur.

Bu katmanlar,

- Operasyonel Analiz,
- Sistem Analizi,
- Mantıksal Mimari,
- Fiziksel Mimari,
- Nihai Ürün Mimarisi

şeklinde.



Şekil 2: ARCADIA Mühendislik Seviyeleri

Operasyonel analiz aşamasında, temel müşteri ihtiyaçları belirlenir, gereksinim çalışmaları yürütülür ve üründen beklenen kabiliyetler belirlenir. Sistem analizi kısmında, belirlenen

gereksinimlerde çıkarılan fonksiyonların birbirleri arasındaki ilişkileri içeren fonksiyonel mimari oluşturulur ve ürüne ait arayüzler belirlenir. Devamında, mantıksal mimari aşamasında, ürünün belirlenen fonksiyonları nasıl yerine getireceği modellenerek mantıksal mimari oluşturulur. Fiziksel mimari aşamasında, fonksiyonları yerine getirecek fiziksel ekipmanların da dahil olduğu fiziksel mimari çalışmaları yürütülür. Son olarak nihai ürün mimarisi çalışmaları ise fiziksel mimaride kullanılan fiziksel ekipmanların spesifikasyonları üzerinde yapılan çalışmaları kapsar [Roques, 2018].

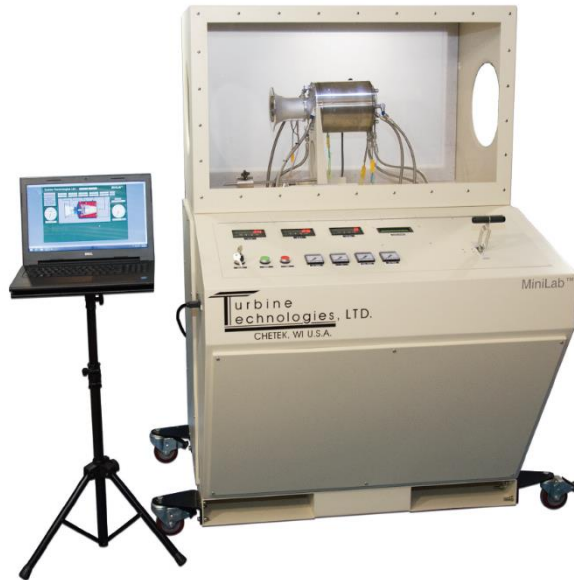
### YÖNTEM

Bu çalışmada Model Tabanlı Sistem Mühendisliği metotları arasından seçilen ARCADIA metodu ile bu metodu içerisinde entegre olarak barındıran, açık kaynak Capella yazılımı kullanılarak, bir test düzeneğinde kullanılacak mini turbojet motor geliştirmeye yönelik gereksinim-fonksiyon-mimari çalışmalarının yapılması hedeflenmiştir.

ARCADIA metodunun ilk adımı olan operasyonel analiz fazı, geliştirilecek ürünün ya da sistemin temel kabiliyetlerinin ve müşteri beklentilerinin tanımlanmasında kullanılır ve bu faz ARCADIA metodunda opsiyonel bir fazdır. Bu çalışmada incelenen mini turbojet motor ve test düzeneğinin temel kabiliyetlerinin ve müşteri beklentilerinin daha öncesinden bilindiği kabul edilerek opsiyonel olan bu faz atlanmıştır. İlk olarak müşteri taleplerini karşılamak üzere tasarım sınırlamalarını da göz önünde bulundurarak mini turbojet motor için gereksinim seti oluşturma çalışmaları yürütülmüştür. Daha sonrasında bu gereksinimlerden yola çıkarak, gereksinimleri karşılayacak mini turbojet motora ait fonksiyonlar oluşturulmuştur. Bu fonksiyonlar Capella'da sistem analizi kısmında fonksiyonel mimarinin oluşturulması çalışmalarında kullanılmıştır. Gereksinim-fonksiyon ve fonksiyon-fonksiyon bağıntıları bu mimari çalışmalarında kurulmuştur.

### UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Model Tabanlı Sistem Mühendisliğinin ilk uygulama adımı olarak, Şekil 3'te de bir örneğinin gösterildiği test düzeneği ve bu düzenekte kullanılacak mini turbojet motor için gereksinim seti oluşturulması gereklidir. Gereksinim listesi oluşturulurken, mevcut mini turbojet motor ve test düzeneği incelenmiş ve ilgili gereksinim seti Tablo 1'de gösterildiği gibi oluşturulmuştur.



Şekil 3: Mini Turbojet Motor ve Test Düzeneği [Turbine Technologies LTD.]

Daha sonrasında oluşturulan bu gereksinimler, ait oldukları sistem elemanlarına (motor, test düzeneği) atanmıştır. Devamında, bu gereksinimlerden yola çıkılarak ilgili elemanların yerine getirmesi gereken fonksiyonlar belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında fonksiyonel mimari modellemesi yapılacağından, fonksiyonel olmayan ya da tasarım çözümüne işaret eden gereksinimler "Geçerli Değil (GD)" olarak değerlendirilmiştir.

Gereksinim No.	Gereksinim Metni	Sistem	Fonksiyon
1	Motor, 200 N'luk itki üretme kapasitesine sahip olmalıdır.	Motor	İtki sağla
2	Motor, 120 mm çapında ve 350 mm uzunluğunda bir silindirik hacme sığabilmelidir.	Motor	GD
3	Motor kuru ağırlığı 4 kg altında olmalıdır.	Motor	GD
4	Motor hava girişi debisi 400 g/s olmalıdır.	Motor	Motora hava girişi sağla
5	Maksimum egzoz çıkış sıcaklığı 750°C olmalıdır.	Motor	GD
6	Motorun yakıt tüketimi 600 g/min değerinin altında olmalıdır.	Motor	GD
7	Motor aşağıdaki yakıt tipleri ile uyumlu şekilde çalışmalıdır: • Kerosen • Parafin • Jet A1 • JP4 • JP8	Motor	GD
8	Motor, AeroShell 500/Mobil Jet oil II yağ tipiyle uyumlu şekilde çalışmalıdır.	Motor	GD
9	Motor, üzerine entegre elektrikli başlatma motoru ile çalıştırılabilmelidir.	Motor	Motor başlatma sağla
10	Motor, tam otomatik elektronik kontrol ünitesi ile kontrol edilebilmelidir.	Motor	Motor kontrolü sağla
11	Data arayüzleri RS232 protokolü üzerinden yönetilmelidir.	Motor	GD
12	Motor, test düzeneği üzerindeki gaz kolu ile kontrol edilebilir olmalıdır.	Test Düzeneği	Gaz kolu ile motor itki kontrolü sağla
13	Motor elektronik kontrol ünitesi test düzeneği gösterge/kontrol paneline aşağıdaki verileri sağlamalıdır: • Egzoz gaz sıcaklığı • Motor devri • Gaz kolu pozisyonu • Hata mesajları	Motor	Egzoz sıcaklığı bilgisi sağla Motor devri bilgisi sağla Gaz kolu pozisyonu bilgisi sağla Hata mesajlarını bilgisi sağla
14	Motor Test Düzeneği aşağıdaki bilgileri görüntüleyebilmelidir: • Egzoz gaz sıcaklığı • Motor devri • Gaz kolu pozisyonu • Hata mesajları	Test Düzeneği	Egzoz sıcaklığı bilgisi göster Motor devri bilgisi göster Gaz kolu pozisyonu bilgisi göster Hata mesajları bilgisi göster
15	Ön ve arka rulmanlar yakıt ile yağlanmalı ve soğutulmalıdır. Aynı bir yağlama sistemi ve yağ tankı kullanılmamalıdır.	Motor	Yakıt ile yağlama sağla Yakıt ile soğutma sağla
16	Yağlama yakıt ile yapılacağı için test düzeneğinde bulunan yakıt deposuna 5% oranında AeroShell 500/Mobil Jet oil II karıştırılmalıdır.	Test Düzeneği	GD
17	Motor, tek kademe radyal kompresör bulundurulmalıdır.	Motor	Hava sıkıştırması sağla
18	Motor, düz akışlı dairesel yanma odası bulundurulmalıdır.	Motor	Yanma sağla
19	Motor, tek kademe eksenel türbin bulundurulmalıdır.	Motor	Yanmış gaz genişmesi sağla
20	Motor yanmış gazların tahliyesi için çıkış nozülü bulundurulmalıdır.	Motor	Yanmış gaz tahliyesi sağla
21	Motor, test düzeneği ile aşağıdaki arayüzlere sahip olmalıdır: • Motor askı noktaları (ön askı noktası, arka askı noktası) • Motor yakıt arayüzü • Motor veri arayüzü • Motor elektrik arayüzü	Motor Test Düzeneği	GD
22	Motor yakıt sistemi, partikülleri engellemek amacıyla yakıt filtresi bulundurulmalıdır.	Test Düzeneği	Yakıt filtrelemesi sağla
23	Motor, üzerine entegre ateşleme sistemine sahip olmalıdır.	Motor	Motor ateşlemesi sağla
24	Motor test düzeneği CO2 veya halon gazı ile doldurulmuş yangın söndürme sistemi içermelidir.	Test Düzeneği	Motor için yangın söndürme sağla
25	Test düzeneği, motor hava alığı içermelidir.	Test Düzeneği	Test düzeneğine hava girişi sağla
26	Test düzeneği, susturucu egzoz borusu içermelidir.	Test Düzeneği	Yanmış gazların test düzeneğinden tahliyesini
27	Test düzeneği kompresör ve türbin kısımlarında tutma halkası içermelidir.	Test Düzeneği	GD
28	Motor, elektrik ihtiyacı olan ekipmanları beslemek için kendi üzerinde şarj edilebilir bir batarya içermelidir.	Motor	GD
29	Motor, acil durumlarda tek tuşla kapatılabilir olmalıdır.	Test Düzeneği	Acil durum motor koruması sağla
30	Test düzeneği, motor ihtiyacını karşılamak üzere yakıt deposu bulundurulmalıdır.	Test Düzeneği	Motora yakıt sağla

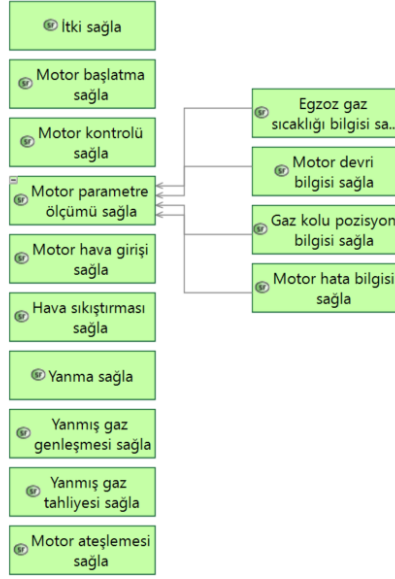
Tablo 1: Mini Turbojet Motor ve Test Düzeneği Gereksinim Listesi

Gereksinimlerden çıkarılan bu fonksiyonlardan bir kısmı ARCADIA metodunun farklı çalışma seviyelerinde oluşturulan fonksiyonel mimariye, bir kısmı mantıksal mimariye kalan kısmı ise fiziksel mimariye girdi oluşturmaktadır.

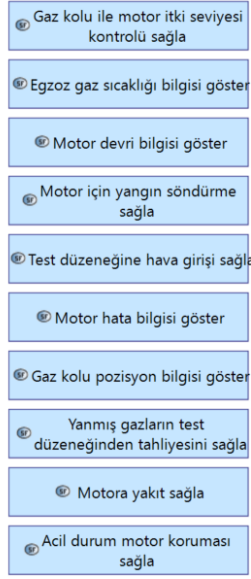
Fonksiyonel mimaride kullanılacak fonksiyonlar, ilgili aktör ve elemanlardan ürün ve sistem seviyesinde beklentileri içermektedir. Mantıksal mimariye girdi olacak fonksiyonlar ise bu ürün ve sistem seviyesi fonksiyonların yerine getirilmesi için gerekli olan alt sistem fonksiyonlarını içermektedir. Son olarak, fiziksel mimariye yönelik fonksiyonlar ise ekipman seviyesindeki fonksiyonlar olup, ilgili alt sistemlerin fonksiyonlarını yerine getirebilmesi için gerekli olan ekipmanları ve bu ekipmanlara ait detaylı tasarım kısıtlarını içerir.

Gereksinim setinden çıkarılan fonksiyonlar yukarıda bahsedilen filtreler uygulandığında fonksiyonel mimaride kullanılacak olan fonksiyonlar ARCADIA'nın sistem analizi seviyesinde modellenerek girdileri Şekil 4'te görüldüğü şekliyle yapılmıştır.

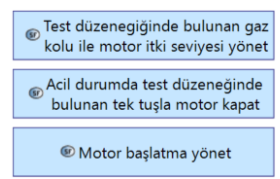
## MİNİ TURBOJET SİSTEM FONKSİYONLARI



## TEST DÜZENEGİ SİSTEM FONKSİYONLARI

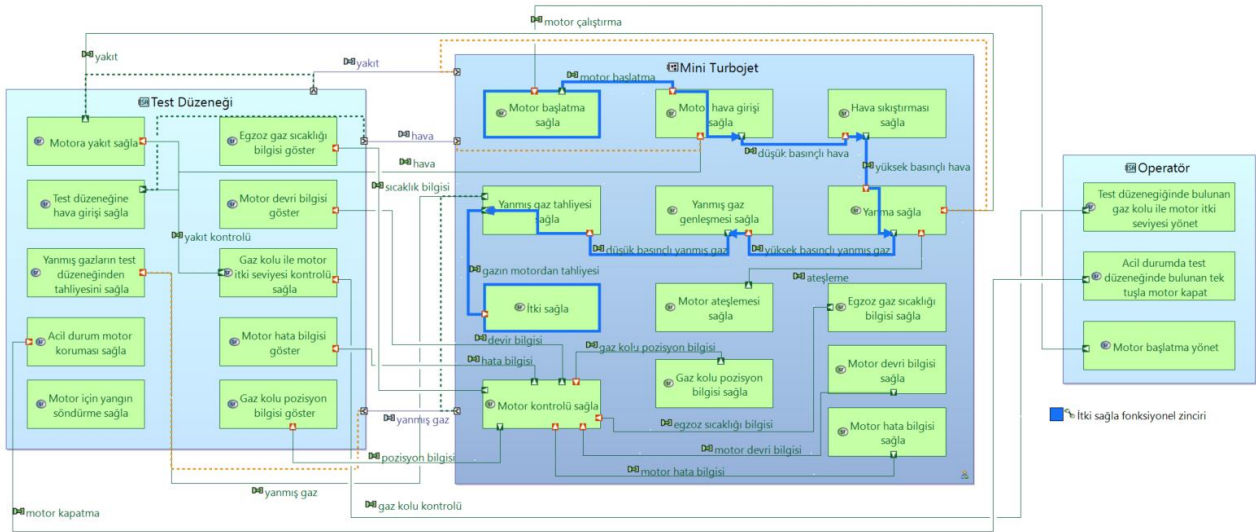


## OPERATÖR FONKSİYONLARI



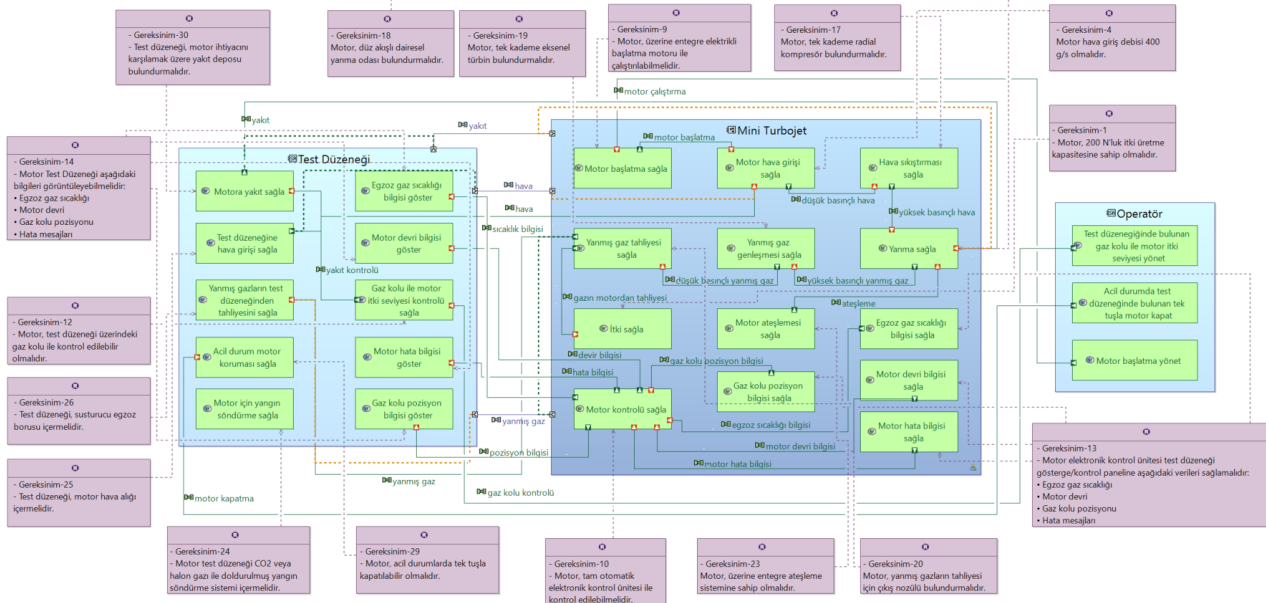
Şekil 4: Fonksiyonel Mimariye Kullanılacak Fonksiyonlar

Daha sonrasında ilgili fonksiyonlar ve aralarında ilişkiler ile fonksiyonel mimari oluşturularak Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5: Fonksiyonel Mimari

Şekil 6'da ise fonksiyonel mimari ile ilişkilendirilmiş gereksinimler gösterilmiştir.



Şekil 6: Örnek Gereksinimlerle İlişkilendirilmiş Fonksiyonel Mimari

## SONUÇ

Bu çalışmada Model Tabanlı Sistem Mühendisliği hakkında teknik bilgiler verilmiş olup daha sonrasında ARCADIA metodu ile Capella yazılımı üzerinde bir mini turbojet motorun sistem analizi yapılarak ihtiyaç uzayına ait diyagramlar oluşturulmuştur.

Böylece test düzeneğine entegre edilecek ve üzerinden veri kayıtları alınacak bir mini turbojet motorun temel olarak hangi gereksinimleri karşılaması gerektiği ve bu gereksinimleri yerine getirecek motor ve test düzeneği fonksiyonları Model Tabanlı Sistem Mühendisliği yaklaşımı ile ortaya çıkarılmıştır. Geleneksel sistem mühendisliği metotlarından farklı olarak baştan uca izlenebilirlik ve tutarlılık güvence altına alınmıştır.

Bu analizler tamamlandıktan sonra gelecek adımda ise, ihtiyaç uzayında belirlenen gereksinimlerin ve fonksiyonların işlevsel hale getirilmesi için mantıksal mimari analizi ve fiziksel mimari analizi aşamaları yapılarak tasarım çözümleri belirlenecektir. Oluşturulan temel gereksinimler Capella yazılımı üzerinde kayıt altına alınıp gereksinimler ile uygun tasarım çözümleri arasında bağlantılar kurulacaktır ve gereksinim ile tasarım çözümü arasındaki izlenebilirlik ve gereksinimlere uyum gösterimi güvence altına alınacaktır.

Öte yandan SAE ARP 4754A standardında entegre süreçler olarak geçen sistem emniyeti, sertifikasyon, güvenilirlik gibi çalışmalarla Capella üzerinde oluşturulmuş modeller arasında bir bağlantı kurulması planlanacaktır. Literatürde ve endüstriyel uygulamalarda özellikle sistem emniyeti ve gereksinim yönetimi çalışmalarının sistem mimarisi modelleri ile entegrasyonu ve eş zamanlı çalışması gibi konularda yenilikçi çalışmalar yürütülmekte olup, uygulama örnekleri ortaya çıkmaya başlamıştır.

Uzun vadede ise Model Tabanlı Sistem Mühendisliği merkezli bir Model Tabanlı Tasarım ortamı kurulması, bunun ticari bir Ürün Yaşam Döngüsü Yönetimi (*ing. Product Lifecycle Management*) yazılımı çerçevesi altında kurgusunun oluşturulması ve bu kurgunun pilot uygulamalarla işletilmesi planlanacaktır.

## Kaynaklar

Estefan, A.J., 2008. *Survey of Candidate Model Based Systems Engineering (MBSE) Methodologies*, INCOSE MBSE Initiative.

Hoffman, H., 2011. *Model-Based Systems Engineering with Rational Rhapsody and Rational Harmony for Systems Engineering*, IBM Software Group.

INCOSE, 2007. *Model Based Systems Engineering (MBSE) Initiative*, INCOSE 2007 Symposium, San Diego, 24-29 Haziran.

- Roques, P., 2016. *MBSE with the ARCADIA Method and the Capella Tool*, 8th European Congress on Embedded Real Time and Systems (ERTS 2016), Toulouse, France, Ocak 2016.
- Roques, P., 2018. *Systems Architecture Modeling with the Arcadia Method*, Elsevier, s.5-6
- Shashank, P.A., 2019, *Evaluating ARCADIA/Capella vs. OOSEM/SysML For System Architecture Development*, Purdue University, s.29
- Turbine Technologies LTD.