

BİR TURBOŞAFT MOTOR GELİŞTİRME SÜRECİNİN TİP SERTİFİKASYONU AÇISINDAN İNCELENMESİ

İBRAHİM ATACAN KILIÇ¹ ve EZGİ TATAR²
TUSAŞ Motor Sanayi A.Ş., Eskişehir

ÖZET

Çalışma kapsamında INCOSE Sistem Mühendisliği El Kitabı ve SAE ARP 4754 dokümanlarında detaylandırılan ürün tasarım ve geliştirme süreçlerinin, sistem gereksinimleri, kavramsal tasarım ve ön tasarım aşamaları için tip sertifikasyonu açısından incelenerek, tip sertifikalı motor geliştirme sürecinde gereksinim bazlı kritik girdilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. CS-E ve CS-29 temel alınarak gereksinim oluşturması sırasında temel alınan kabullerden bahsedilecek ve örnek uygulamalar gerçekleştirilecektir. SHT-21 Alt bölüm B'de detaylandırılan tip sertifikasyon süreci hem motor hem de hava aracı-motor entegrasyonu açısından incelenerek Hava aracı ve motor sağlayıcılarının birbirinden kredi alabileceği ya da üzerinde anlaşma sağlayabileceği sertifikasyon gereklilikler listelenmiştir. Sertifikasyonun projelerinde geliştirme uzayındaki değişikliklerin ürün geliştirme süreçleri yüzdesine bağlı olarak bağlanan kaynak miktarlarına göre incelenmiştir. SAE ARP 4754'te bahsi geçen emniyet değerlendirmelerinden bahsedilerek hiyerarşik yapıda ürünler açısından değerlendirmelerde bulunulmuştur. Çalışmanın devamı olarak bir motor sertifikasyon projesinin tüm aşamalarının rehber dokümanlara uygun olarak incelenmesi planlanmaktadır.

¹ Mühendis, E-posta: ibrahimatacan.kilic@tei.com.tr

² Teknik Lider, E-posta: ezgi.tatar@tei.com.tr

GİRİŞ

Tip Sertifikasyonu, tasarım organizasyonunun bir ürünün uçuşa elverişlilik gerekliliklerine uyum göstermesi sonrası sertifikasyon otoritesi tarafından belgelenmiş bir kararla sonuçlanan sistematik süreçtir. Avrupa Birliği üye ülkeleri motor tip sertifikasyonu sürecinde Avrupa Havacılık Emniyeti Ajansı (EASA) tarafından oluşturulmuş motorlar için sertifikasyon şartnamesi (CS-E) kullanmaktadır.

Ülkemizde Sivil Havacılık Genel Müdürlüğü (SHGM) sivil havacılık ile ilgili yetkili kurum olarak faaliyet göstermektedir. SHGM'nin havacılık ürünlerinin tasarımını ve üretimini gerçekleştirecek organizasyonlara yönelik talimatlarını içeren Sivil Havacılık Talimatı 21'de (SHT-21) belirtildiği üzere, ürün tasarımı gerçekleştirecek organizasyonlar ürün sertifikasyonu sürecinde EASA tarafından yayımlanmış sertifikasyon şartnamelerini kullanabilmektedir. Bu sebeple sistem mühendisliği rehber dokümanlarına uygun kurgulanan motor geliştirme süreçlerine entegrasyon kapsamında kullanılacak sertifikasyon şartnamesi olarak EASA tarafından yayımlanmış CS-E revizyon 6 dokümanı temel alınmıştır. Turboşaft motor geliştirme süreçlerinde referans hava aracı olarak büyük döner kanatlı hava aracı (CS-29 tipi) seçilmiştir.

Sistem mühendisliği, organizasyonun ürün ile ilgili sistemsel çalışmalarını maliyet ve zaman kısıtlarını baz alarak gerçekleştirmek amacıyla karmaşık sistemlerin modellenmesi, iyileştirilmesi, üretimi, kontrolü ve tasarımına yönelik bir mühendislik disiplindir.

1950'li yıllardan itibaren sistem mühendisliği farklı sektör ve ihtiyaçları karşılamak üzere otomotiv, havacılık, biyoteknoloji, yenilenebilir enerji vb. bir çok alanda ve sektörde kullanılmakta olan önemli bir mühendislik disiplini haline gelmiştir. Bu süreçte, sistem mühendisliği disipline yönelik ISO/IEC 15288, INCOSE Sistem Mühendisliği El Kitabı (Systems Engineering Handbook), NASA Sistem Mühendisliği El Kitabı (Systems Engineering Handbook), SAE ARP 4754 vb. rehber dokümanlar ve el kitapları oluşturulmuştur. Bu çalışma kapsamında sistem mühendisliği yaklaşımı olarak Uluslararası Sistem Mühendisliği Konseyi (INCOSE) tarafından oluşturulmuş INCOSE Sistem Mühendisliği El Kitabı temel alınmıştır.

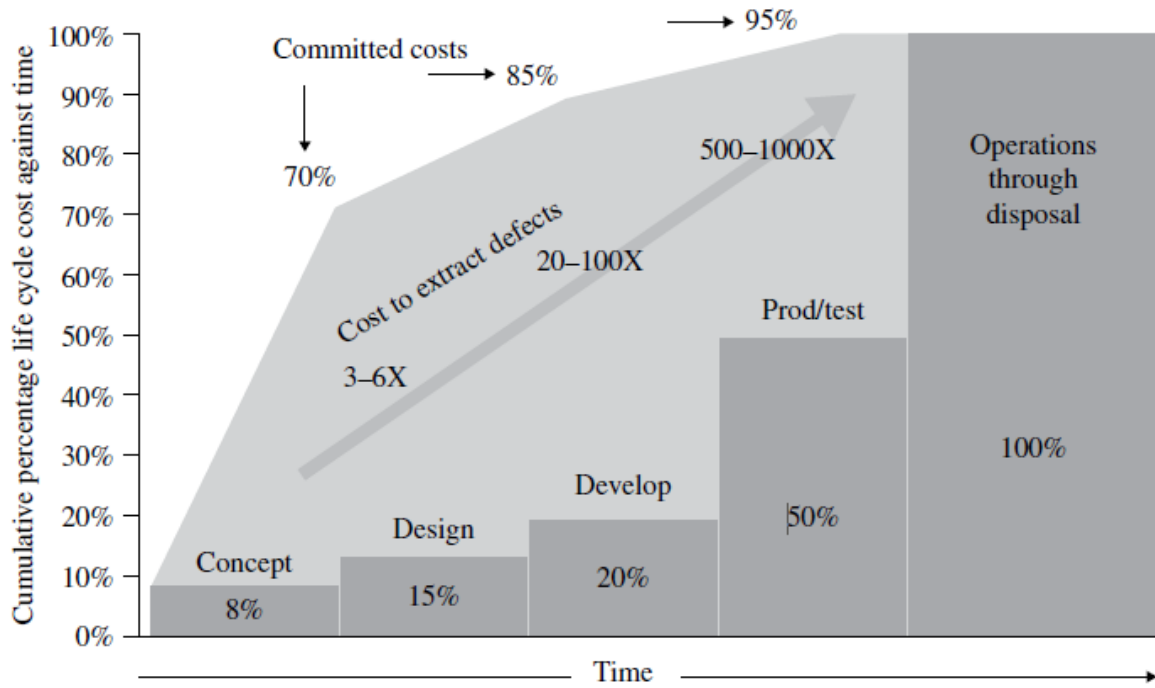
Uluslararası Otomotiv Mühendisleri Birliği (SAE) tarafından hava aracı ve hava aracıyla ilgili sistemlerinin sertifikasyonunu desteklemek amacıyla SAE ARP 4754 Sivil Hava Aracı ve Sistemleri Geliştirilmesi için Kılavuz (*Guidelines For Development of Civil Aircraft and Systems*) oluşturulmuştur. Doküman tüm hava aracı ve ilgili sistemlerinin, sistemlerin gereksiniminden, sistemlerin doğrulanması aşamasına kadar geliştirme süreci kurgulanabilmesini sağlayan bir havacılık rehber dokümanıdır. Sistem mühendisliği süreçleri ile ortak bir çok noktası olan dokümanın temel farkı emniyet odaklı olması ve aktivitelerin/analizlerin derinliğinin sistemin, donanımın ve yazılımın kritikliğine göre belirlenmesidir, [Gürbüz, 2010]. Dokümanın A revizyonu 2010 yılında yayımlanmıştır bu sebeple çalışma sırasında ARP 4754A temel alınmıştır.

Emniyet, riskin kabul edilebilir olduğu durumdur, [ARP 4754A, 2010]. Hava aracı ve ilgili sistemlerinin emniyeti ise, kişilere ve mallara gelebilecek zararlara ait risklerin, tehlikelerin kabul edilebilir seviyeye indirilmesi ve bu seviyede veya altında tutulabilmesine imkan veren bir süreçtir, [Gürbüz, 2010].

Çalışma kapsamında INCOSE ve SAE ARP 4754A dokümanlarında detaylandırılan ürün tasarım ve geliştirme süreçlerinin tek bir çatı altında toplanarak, tip sertifikalı motor geliştirme sürecinde gereksinim bazlı kritik girdilerinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bu sebeple bildiride ürün yaşam döngüsü içerisinde sistem gereksinimleri, kavramsal tasarım ve ön tasarım aşamaları ele alınmıştır, ilerleyen dönemlerde çalışmanın ürün yaşam döngüsünün tamamını kapsayacak şekilde genişletilmesi planlanmaktadır.

YÖNTEM

Ürün yaşam döngüsü Şekil 1’de zamana bağlı kümülatif ömür yaşam döngüsü maliyetleri üzerinden incelendiğinde, konsept çalışmaları tüm yaşam döngüsünün %8’ini, bu aşamada kaynak planlaması açısından toplam kaynak miktarının ise %70’ini temsil etmektedir, [DAU,1993]. Ayrıca şekil, projenin erken aşamalarında sağlam temellere dayanmayan verilere göre alınabilecek kararların uzun vadede proje üzerindeki sonuçlarının maliyet etkisini göstermektedir,[INCOSE, 2015]. Sertifikasyon projelerinde sistem mühendisliği faaliyet kümesinin, sertifikasyona bağlı olarak yönetmelikler ve gereklilikler kapsamında artmasıyla birlikte, geliştirme süreçleri içerisinde karmaşıklığı da beraberinde getirmektedir. Bu sebeple geliştirme süreçleri için girdilerin ve çıktıların INCOSE ve ARP 4754A objektiflerine uygun olarak oluşturulması süreç yönetiminin verimliliği açısından önemlidir. Çalışma tip sertifikalı motor geliştirmesi kapsamında INCOSE ve SAE ARP 4754A dokümanlarına uygun ürün yaşam döngüsü kurgusu için girdilerin sistem gereksinimleri, konsept tasarım ve ön tasarım aşamaları açısından incelenerek, tasarım faaliyetlerinin sertifikasyon ve emniyet disiplinleri ile beslendiği bir gereksinim yönetimi kurgusu ile projelerdeki karmaşıklığı azaltmak üzere gereksinim bazlı olarak kritik girdilerin belirlenmesi hedeflenmiştir.



Şekil 1 Zamana Bağlı Kümülatif Ömür Yaşam Döngüsü Maliyetleri [DAU, 2013]

Bildirinin bu bölümünde turboşaft motor geliştirme projesinde gereksinim oluşturma süreci sertifikasyon açısından incelenerek kritik girdilerin belirlenmesi sırasında yapılan kabullerden bahsedilecek olup, SAE ARP 4754A ve INCOSE süreçleri ile ilgili çalışmalar Uygulamalar ve Değerlendirmeler bölümünde ele alınacaktır.

Tip sertifikasyonunun dahil olduğu motor tasarım ve geliştirme çalışmaları, ilgili ürünün tasarımını gerçekleştiren organizasyonların uyması gereken bir dizi gerekliliği de beraberinde getirmektedir.

Tip sertifikası için başvuran herhangi bir organizasyon, kabiliyetini SHT-21 Altbölüm J'ye uygun olarak SHGM tarafından yayımlanmış bir tasarım organizasyon onayına sahip olmak suretiyle göstermelidir, [SHT-21, 2018]. Bu kapsamda organizasyonun yerine getirmek ile yükümlü olduğu gereklilikler bu çalışmanın kapsamına dahil edilmemiştir. SHGM 5431 sayılı Kanununun 8'inci Maddesi kapsamında; ürün, parça ve teçhizatın 5/6/1945 tarihli ve 4749 sayılı Kanunla uygun bulunan Şikago Sözleşmesinin 8 numaralı Ek'ine uyumunu göstermek için standart yöntemler olarak sertifikasyon şartnamelerini, operasyonel uygunluk verisi için sertifikasyon şartnamelerini de içerecek şekilde yayımlamaktadır veya EASA tarafından yayımlanmış Sertifikasyon Şartnamelerini operasyonel uygunluk verisi şartnamelerini de içerecek şekilde kullanabilmektedir, [SHT-21, 2018].

Bu sebeple çalışmada sertifikasyon gereklilikleri SHGM'nin motor tip sertifikasyonu için kullanmakta olduğu EASA tarafından oluşturulmuş CS-E olarak belirlenmiştir.

Çalışmada tip sertifikasyon süreci içerisinde final ürünün sağlamakla yükümlü olduğu sertifikasyon gerekliliklerinin motor seviyesi gereksinimlere dönüştürülmesi sırasında kullanılan yöntemlerden bahsedilecektir. Projenin içerisinde CS-E temel alınarak oluşturulacak gereksinimlerin gereksinim yönetim faaliyetlerine dahil edilmesi gereklidir.

Hava aracı ve motor geliştirme faaliyetleri, organizasyonlar tarafından farklı proje ve teknik kaygılar ile gerçekleştirilmektedir. Aksi havacılık otoritesi ile anlaşılmadığı takdirde tip sertifikasyonu başvurusu hava araçları için 5, motorda ise 3 yıl geçerlidir, [SHT-21,2018]. Dolayısıyla tip sertifikasyonun dahil olduğu hava aracı ve motor projelerinde, tarafların geliştirme ve sertifikasyon süreci takvimlerini ortaklaştırarak, bilgi akışının periyodu, aktarılacak bilgi paketinin içeriği ve yeterliliği konusunda anlaşılmalı ve iletişimin etkinliği garanti altına alınmalıdır.

Tablo 1: Hiyerarşik Yapıda Sistemlerin Adlandırılması

Sistem Tanımı	Sistem Seviyelendirmesi (INCOSE)	Sistem Seviyelendirmesi (SAE ARP 4754A)	Çalışma kapsamında yapılan kabuller
CS-29 Tipi Hava Aracı	Sistem Seviyesi	Hava Aracı Seviyesi	Hava Aracı Seviyesi
Turboşaft Motor	Üst Seviye Sistem Elemanı Seviyesi	Sistem Seviyesi	Motor Seviyesi

Çalışmada ömür yaşam döngüsü yaklaşımı olarak V (Vee) seçilmiştir. Hiyerarşik yapıyı tanımlarken hava aracını, motorun üstü bir sistem olarak değerlendirerek hava aracı seviyesi, motoru ise hava aracının bir alt kırılım sistemi olarak değerlendirerek motor seviyesi olarak kabul edilecektir. Bu kırılımı çalışmada kullanılan iki standarda göre irdelenecek olursak; INCOSE V döngüsünde hava aracı seviyesi, motor üst seviye sistem elemanı olarak değerlendirilmiştir, [Forsberg,2005]. SAE ARP 4754A'ya göre hava aracının sistem içerisinde hiyerarşik yapısı tanımlanırken hava aracı, motor ise sistem seviyesi olarak değerlendirilmiştir, [SAE ARP 4754A, 2010]. CS-29 tipi hava aracı ve bu hava aracına entegre edilecek motor için kabul edilecek isimlendirme Tablo 1'de verilmiştir.

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

Paydaşların belirlenmesi ve gereksinimlerin tanımlanması faaliyetleri açısından Tip sertifikalı motor için sistem gereksinimleri aşamasında kritik girdide bulunabileceği değerlendirilen kaynak dokümanlar Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmektedir.

Tablo 2: Tip Sertifikalı Motor Geliştirme Süreci Girdileri ve Kaynak Dokümanları

No	Süreç Girdisi	Kaynak Doküman
1	Havacılık Yönetmelik Gereklilikleri	<ul style="list-style-type: none"> SHGM SHT-21 EASA Part-21
2	Havacılık Motorları için Sertifikasyon Gereklilikleri	<ul style="list-style-type: none"> CS-E
3	Hava Aracı Entegrasyon Gereksinimleri	<ul style="list-style-type: none"> Motor Entegrasyon Teknik Şartnamesi
4	Müşteri Sözleşmesi	<ul style="list-style-type: none"> Ürün Teknik Şartnamesi İş Tanımı kapsamında gelen ilave gereksinimler Çevresel Şartlar Standartları (RTCA DO-160G, MIL-STD 810G)

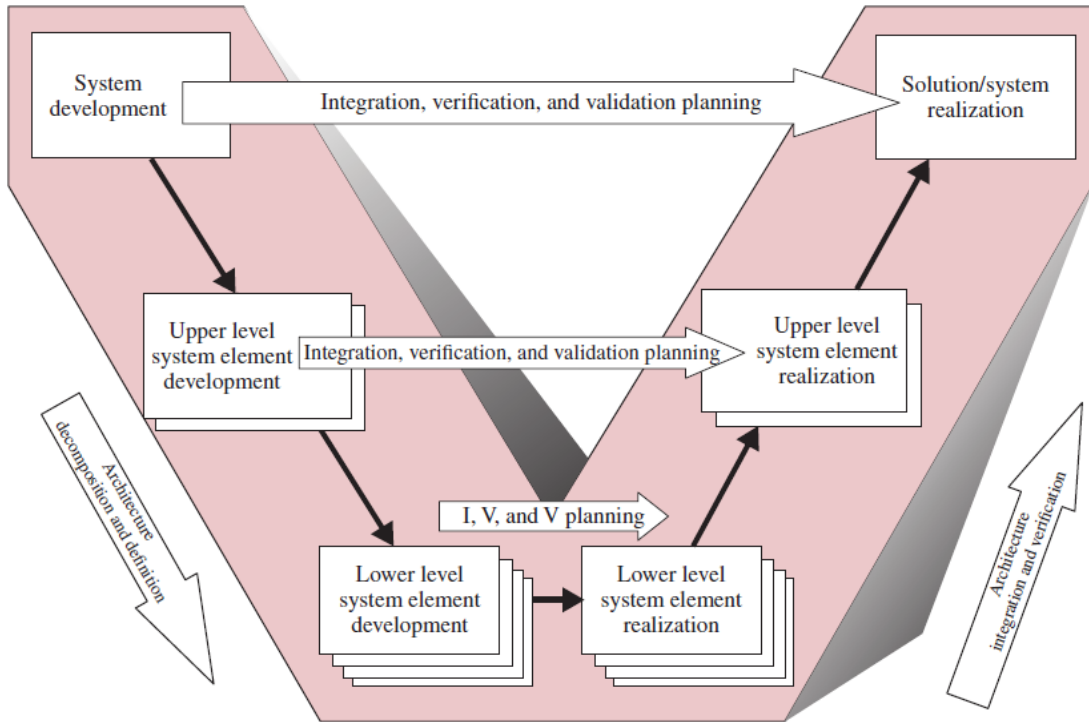
Tablo 3 Tip Sertifikalı Motor Geliştirme Süreci Girdileri ve Kaynak Dokümanları (Devamı)

5	Firma Pazar Hedefi Gereksinimleri	<ul style="list-style-type: none"> • Teknik Gereksinimler
6	Tasarım Pratikleri, En İyi Tasarım Uygulamaları Gereksinimleri	<ul style="list-style-type: none"> • Tasarım Pratikleri • En İyi Tasarım Uygulamaları

Müşteri sözleşmeleri ile aktarılan teknik şartname, organizasyonun sahip olduğu tasarım kabiliyetleri ve uygulamaları, test standartlar vb. bir çok doküman ya da anlaşma vasıtası ile ürün geliştirme uzayı şekillenmektedir. Bunlara ek olarak motor seviyesi sistem gereksinimleri aşamasında Tablo 2’de belirtilen hava aracı ve motor arasında imzalanacak entegrasyon sözleşmesi ile minimumda aşağıdaki gereksinim paketleri motor sağlayıcısına aktarılmalıdır.

- ❖ CS-29 gerekliliklerinden motor seviyesine indirilebilecek sertifikasyon gereksinimleri
- ❖ Hava aracı mimarisi kapsamında motor seviyesine indirilecek mimari kaynaklı gereksinimler
- ❖ Hava aracı emniyet değerlendirmeleri sonucu motor seviyesi indirilecek gereksinimler

V Model özellikle konsept ve geliştirme aşamalarında sistem mühendisliğinin farklı faaliyet alanlarının incelenmediği ardışık bir yöntemdir. V modeli ömür yaşam döngüsü boyunca paydaşlarla gerçekleştirilen doğrulama faaliyetlerini, gereksinim geliştirme sırasında doğrulama planlarının tanımlanması ve sürekli risk ve fırsat değerlendirmesinin ihtiyacının önemini ön plana çıkartmaktadır, [INCOSE, 2015]. Şekil 2’de verilen INCOSE V modeli ömür yaşam döngüsüne göre tasarım aktivitelerine başlamadan önce hava aracı tarafından Tablo 2’de 3. madde ile belirtilen gereksinim setinin oluşturularak motor sağlayıcısına aktarılacak olgunlukta olması önem arz etmektedir. Bu kapsamda motor sağlayıcısına aktarılacak gereksinimlerin yeterli olgunlukta olabilmesi için hava aracı seviyesinde sistem gereksinimleri, kavramsal tasarım ve ön tasarım aşamalarının INCOSE objektiflerine göre tamamlanmış olması gerekmektedir.

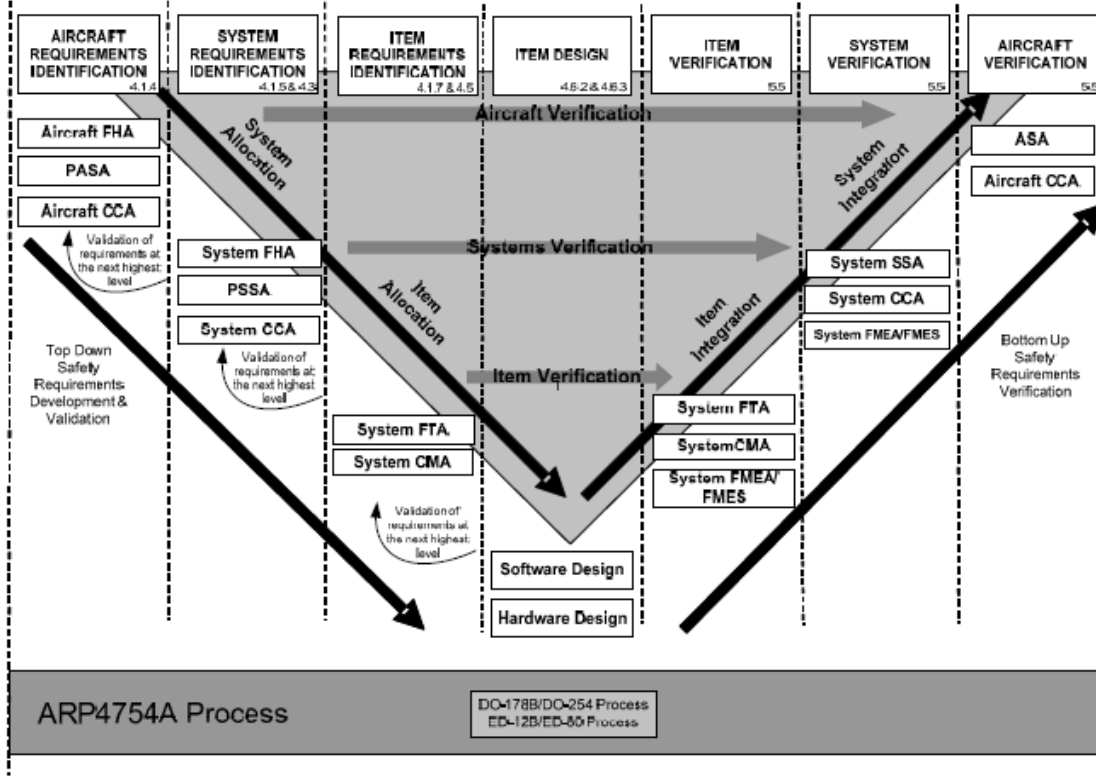


Şekil 2: V model [Forsberg et al, 2005]

Hava aracı seviyesi sistem gereksinimleri aşaması ile ana sistem ve ana alt sistem (motor) gereksinimlerinin belirlenmesi beklenmektedir. Bu aşamada hava aracı seviyesinde CS-29 temel alınarak oluşturulan gereksinimlerin de dahil edilerek tüm gereksinimlerin bir alt seviyeye yazılması

ve geçerlenmesi yapılabilir. Böylece CS-29 kapsamında motor sağlayıcısına indirilecek gereksinim seti şekillenebilir.

Hava aracı kavramsal tasarım ve ön tasarım aşamalarında, sistem gereksinimleri aşaması ile geçerlenmiş gereksinimlerin ve fonksiyonların ürün konsepti ile ilişkisini gösteren ana mimari belirlenmektedir. Bu çalışmalar sırasında arayüz yönetimi açısından kritik olan sistemlerin belirlenmesi ve sistem sınırları, beklenen sistem davranışı vb. yönelik veriler oluşturulmaktadır. Motor seviyesi açısından ise bir alt seviyede sistem gereksinimleri ve kavramsal tasarım çalışmalarının başlatılabilmesi için yeterli olgunlukta verilerin oluşturulması sağlanmaktadır.



Şekil 3: Geliştirme Süreçleri ile Emniyet Süreçlerinin Etkileşimi [SAE ARP 4754A, 2010]

ARP 4754A'dan alınan Şekil 3 incelendiğinde, hava aracı seviyesi gereksinimlerin tanımlanması aşamasında, temel performans ve operasyonel gereksinimler belirlenmektedir. Bu temel gereksinimlerden, hava aracı seviyesi fonksiyonlar ve bu fonksiyonlara ait gereksinimler oluşturulmaktadır. Ayrıca fonksiyonların fiziksel ve operasyonel ortam ile arayüzleri belirlenmektedir. Bu aktivitelerin çıktısı hava aracı seviyesi fonksiyonların listesi ve ilgili fonksiyon gereksinimleri ve hava aracı seviyesi diğer fonksiyonlar ile oluşturdukları arayüzlerdir, [SAE ARP 4754A, 2010].

Ön tasarım aşamasında hava aracı seviyesi aday mimariler fonksiyonel ve performans analizleri ile değerlendirilerek hava aracı ön emniyet değerlendirmesi, sistemler arasında gereksinimlerin fiziksel ve fonksiyonel ayrıştırılması, izolasyonu ve bağımsızlığının hava aracı seviyesinde emniyet hedefleri kapsamında doğrulandığı ortak sebep analizi gerçekleştirilmektedir. Ayrıca hava aracı fonksiyonların ilgili sistemlere atanarak çeşitli fonksiyonel arızaların ve ilgili tehlike sınıflandırmasının yapıldığı fonksiyonel tehlike değerlendirmesi gerçekleştirilerek hava aracı seviyesinden motor seviyesine aktarılacak emniyet gereksinimleri, fiziksel ve fonksiyonel gereksinimler ve hava aracı ile motor seviyesi arayüzler oluşturulmaktadır, [SAE ARP 4754A, 2010]. Böylelikle hava aracının tabi olduğu emniyet hedeflerini sağlayacak motor gereksinimleri ve motor fonksiyonları için emniyet hedefleri oluşturularak motor seviyesi emniyet değerlendirmeleri için girdiler sağlanmaktadır.

CS-E Gerekliliklerinin Motor Seviyesi Gereksinimlere Dönüştürülmesi

CS-E, EASA tarafından ilk yayımı 2003 yılında gerçekleştirilmiştir. Dokümanın 2020 Haziran ayı itibariyle 6. revizyonu yayımlanmıştır. Ürün tip sertifikasyonu ile ilgili yükümlülüklerin detaylandırıldığı SHT-21 Alt bölüm-B’de, ürünün sertifikasyon kapsamında sağlaması gereken minimum gereklilik paketi Sertifikasyon Temeli olarak adlandırılmaktadır. Sertifikasyon temelini belirlemesi hususunda göz önünde bulundurulması gereken gereklilikler SHT-21 revizyon 1 dokümanının 21.A.17A paragrafında verilmiştir. Bu kapsamda çalışmanın uygulanabilirliğini arttırmak adına ürünün SHT-21 revizyon 1 dokümanı 21.A.16B maddesinde detaylandırılan herhangi bir özel koşula sahip olmadığı kabulüyle, geçerli sertifikasyon temeli CS-E revizyon 6 olarak belirlenmiştir.

Specification ürün bazlı bir kelime olarak herhangi bir sistemin şeklini veren malzeme, genel boyut bilgisi, şematiği, kullanıcı ara yüzü gibi bilgileri tanımlamaktadır, [Weck,2018]. CS-E’de bulunan turboşaft motorlar için uygulanabilir olan her bir madde, tip sertifikasyon sürecinin sonunda ürünün sağlayacağı “gereklilik” olarak değerlendirilmiştir. Çalışma genelinde de bu ifade yapısı korunmuştur.

Diğer bir taraftan gereksinim, “requirement” kelimesinin Türkçe karşılığı olarak; ürünün ya da sistemin ne yapacağı, hangi fonksiyonları yerine getireceği, bu fonksiyonu hangi performans değerleri ile gerçekleştireceği, uyumlu olduğu cihazlar vb. ilgili sistem veya ürün için tasarım faaliyetleri ve girdileri tanımlamaktadır, [Weck,2018]

CS-E pistonlu motorlar ve turbinli motorlar için sertifikasyon gerekliliklerini de içermekle birlikte turbinli motorlar için gereklilikler turbofan, turboşaft ve turboprop gibi farklı motor tiplerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu sebeple CS-E gereklilikleri sistem gereksinimleri aşamasında turboşaft motorlar kapsamında ayrıştırılmalıdır. Çalışmaya temel oluşturacak turboşaft motorlar için geçerli sertifikasyon gereklilikleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4: Turboşaft Motorlar için Uygulanabilir CS-E Gereklilikleri

CS-E Bölümleri	Turboşaft Motorlar için Uygulanabilir CS-E Gereklilikleri
Alt Bölüm – A GENEL	CS-E 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100,110,120,130,140,150,160,170
Alt Bölüm – B PİSTONLU MOTORLAR: TASARIM VE İNŞA	U/D
Alt Bölüm – C PİSTONLU MOTORLAR: TİP TASARIM DOĞRULAMASI	U/D
Alt Bölüm – D TÜRBİNLİ MOTORLAR: TASARIM VE İNŞA	CS-E 500, 510, 520, 525, 540, 560, 570, 580, 590
Alt Bölüm – E TÜRBİNLİ MOTORLAR: TİP TASARIMI DOĞRULAMA	CS-E 600, 620, 640, 650, 660, 670, 680, 690, 700, 710, 720, 730, 740, 745, 750, 780, 790, 800, 810, 820, 830, 840, 850, 860, 870, 880, 910, 920
Alt Bölüm – F TÜRBİNLİ MOTORLAR: ÇEVRESEL VE OPERASYONEL TASARIM	CS-E 1000, 1030, 1050

CS-E gereklilik cümleleri incelendiğinde cümlelerin 4 temel cümle kipi olarak kullanıldığı göze çarpmaktadır. Tablo 4 ile CS-E’de yer alan gerekliliklerin gereksinim cümlelerine dönüştürülmesi sırasında temel alınacak karşılıklar verilmiştir.

Tablo 5: CS-E Gereklilik Cümle Kipleri ve Doküman İçerisinde Kullanılan Anlamları

CS-E Cümle Kipleri	Gerekliliğin içerdiği anlam
must	Gerekliliğe uyum için zorunlu kuralları içerir. CS dokümanlarında gereklilik dili olarak must kullanılmaktadır.
shall	Gerekliliğe uyum için zorunlu kuralları içerir ve must ile benzer kapsamda kullanılmaktadır.
should	Gerekliliğe uyum gösterebilmek için en iyi uygulamaları içermek ile birlikte genel olarak CS-E'nin kabul edilebilir uyum yöntemleri bölümünde yer alan cümlelerde kullanılmaktadır.
may	Gerekliliğe olası uyum yöntemlerinden yalnızca birinin önerilmesi amacıyla kullanılır.

Çalışma sırasında CS-E gerekliliklerinin motor seviyesi gereksinime dönüştürülme çalışmaları kapsamında aşağıdaki örnek incelenebilir. Örnek CS-E 40 ve AMC E 40 incelenerek oluşturulmuştur, bu sebeple gereksinim yönetimi kapsamında özellikler (attribute) tanımlamaları gerçekleştirilmemiştir.

Tablo 6: CS-E Gereksinim Örneği

<p>CS-E 40 Ratings (a): Power ratings must be established for Take-off Power and/or Thrust and for Maximum Continuous Power and/or Thrust, for all Engines. [EASA CS-E, 2020]</p>
<p>B.40A.1: Take-off Power: means the output shaft power identified in the performance data for use during take-off, discontinued approach and baulked landing: for turbine engines installed in aeroplanes and helicopters, limited in use to a continuous period of not more than 5 minutes, [EASA CS-Definition, 2010].</p> <p>B.40A.2: Maximum Continuous Power: means the power identified in the performance data for use during periods of unrestricted duration, [EASA CS-Definition, 2010].</p>
<p>D.40A.1: Take-off Power rating shall be substantiated using results of endurance tests of CSE 740.</p> <p>D.40A.2: Take-off Power rating shall be justified using results of calibration tests of CSE 730.</p> <p>D.40A.3: Maximum Continuous Power rating shall be substantiated using results of calibration tests of CSE 730.</p> <p>D.40A.4: Maximum Continuous Power rating shall be justified using results of endurance tests of CSE 740.</p>
<p>R.40A.1: Engine Take-off Power shall be minimum hp.</p> <p>R.40A.2: Engine Maximum Continuous Power rating shall be minimum hp.</p>

Herbir cümlelerin başındaki kodlamada geçen; B, bilgi cümlesini, D, iş tanımı cümlesini, R ise gereksinim cümlesini, 40A ise ilgili CS-E gerekliliğini ve .x formatı ilgili CS-E gereksinim temel alınarak oluşturulan bilgi, iş tanımı ve gereksinim cümlesinin 1'den başlayan sıra numarasını temsil etmektedir.

Hava Aracı ve Motor Yüklenicileri Arasında Sertifikasyon Gerekliliklerinin Belirlenmesi

Bir ürün olarak motorun, tip sertifikasyon süreci bir entegrasyon projesi kapsamında özel olarak tanımlanmış platform olmadığı durumda da, bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Hedef hava aracı tipi ve bu hedef hava aracı ile ilgili CS-E 30 kapsamında gerçekleştirilecek kabuller ile sertifikasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir,[CS-E, 2020]. Bu durum sertifikasyon kapsamında CS-29 gerekliliklerini yerine getirmek ile yükümlü hava aracı yüklenicisi açısından entegrasyon projelerinde CS-E'nin yetersiz kalabileceği özel koşullara ve bu eksikliklerin proje takviminde uygun noktada belirlenmediği durumlarda,ise tasarım değişiklikleri ve ilave doğrulama faaliyetlerine sebep olabilmektedir. Dolayısıyla tip sertifikasyon süreci içerisinde Hava Aracı ve Motor tasarım sahipleri, projelerin erken safhalarında ilgili sertifikasyon gereklilikleri kapsamında gerçekleştirilecek çalışmaları belirleyerek birbirlerinin çalışmalarından kredi alabilirler. Gerekliliklerde örtüşmeyen

noktaların olması halinde, gereksinimler en geç Hava aracı seviyesi ön tasarım aşaması öncesine kadar belirlenmeli ve gerçekleştirilecek çalışmalar üzerinde çift taraflı anlaşma sağlanmalıdır. Çalışmanın bu bölümünde CS-E ve CS-29 gereklilikleri arasında eksiklik barındırabilecek ve anlaşmaya açık CS'ler , başlıklar halinde gruplandırılmıştır ve Tablo 7 ve Tablo 8'de detaylandırılmıştır.

Uygulanabilir olduğu takdirde, hava aracı tarafından motor sağlayıcısına aktarılacak sertifikasyon gereklilikleri, ilgili CS-E maddeleri kapsamında değerlendirilebilmektedir. Bu sebeple motor sağlayıcısına aktarılacak gerekliliklerin hava aracı ön tasarım aşamasına kadar belirlenmesi, öncelikli hava aracı sertifikasyonu olmak üzere her iki taraf için kritik öneme sahiptir. Hava aracı seviyesi ön tasarım aşamasının tamamlanması, hiyerarşik yapıda motor seviyesi kavramsal tasarım aşamasına tekabül etmesi sebebiyle motor mimari seçimine etki etmektedir. Ayrıca Hava aracı seviyesi aktarılacak gereksinimler, motor seviyesinde SHT-21, 21.A.16B'ye göre özel koşullar dahilinde incelenebilmekte ve motor sertifikasyon temelini kapsamını genişletebilmektedir.

Tablo 7: Motor-Hava Aracı Sertifikasyon Gereklilikleri

Konu/Başlık	CS-E	CS-29
Limitations, Installation Instructions, and Manuals	20, 25, 30, 40	29.901, 1501(a)(1503–1533), 1501(b)(1541–1587), 1521(a)(b)(c), 1529, 1583(b)(1), 1583(b)(2), 1853(b)(3)(1549-1553), 1585(a)(b), 1585(c)(251), 1585(d)(e), 1587
Failure / Safety Analysis	50, 510	29.901(c), 903(b), 1309
Starting	910	29.901(b)(c), 903(b)(e), 1141(f), 1145(a)(b), 1163(a)(3), 1165(c), 1301, 1305(c)(4), 1351(d), 1461(c)
Powerplant Operating Characteristics	500	29.901(a)(b), 939,
Powerplant Performance & Limits Evaluation	20, 40	29.901(b), 903(d)(2), 939, 1305(b), (c), 1587
Fuel Contamination	560, 670	29.951, 977, 997, 1309(c), 1322
Fuel Systems	560, 670	29.951, 952, 954, 955, 959, 971, 973, 975, 977, 979, 981, 991, 993, 995, 997, 999, 1001, 1316 1337(b),
Powerplant Control Systems	50	29.779(b), 901, 903, 1141, 1143, 1145, 1147, 1316, 1323, 1325, 1555
Software and Hardware Development	50	29.901, 1309
Oil Systems	570	29.1011, 1013, 1015, 1017, 1019, 1305(c), 1021, 1023, 1025, 1027 1305(a)(6)(7)(8)(9)(10), (c), 1337(d),
Fire Protection / Prevention	130	29.859, 863, 903(c)(d)(1), 954, 975(a)(6), 993, 995, 1001(d), 1013(a)(967), 1013(e), 1017, 1023(b), 1025(a)(1189), 1181, 1183, 1185(c), 1187, 1189, 1191, 1195, 1197, 1199, 1201, 1203, 1305(a)(7), 1316, 1322, 1337(a), 1351(b)(2)(4), (d), 1353, 1357, 1435(c)

Tablo 8: Motor-Hava Aracı Sertifikasyon Gereklilikleri (Devamı)

Konu/Başlık	CS-E	CS-29
High Energy Rotor	510, 840	29.903(d)(1), 1461, 571(e),
Icing	780	29.1093(b), 1323(e), 1325(b), 1419 Appendix C
Air Contamination	690	29.831(b), 901(c), 1309
Engine System Loads	100, 520	29.571, 901(c), 903(c), 361,
HIRF and Lightning	50, 80, 170	29.901(b),(c), 954, 1316
External Accessories	20, 80	29.1163, 1305, 1337
Flight Deck Controls and Displays	60	29.771, 777, 779(b), 901(a)(2)(b)(1), 903(b)(c)(d)(2), 1141, 1143, 1145, 1147, 1203(b),(d), 1301, 1303, 1305, 1309, 1321(a)(c), 1322, 1337, 1351(b)(5)(6), 1357(d), 1501(b)
Function and Reliability (F&R) Testing	740	EASA Part 21.35(f)
Volcanic Ash	540, 1050	29.1593

Hava aracı ve motor sağlayıcısı arasında görüşülebilecek gereklilikler arasında Tablo 9'de verilen CS-E 60 (a) ve CS 29.1305 temel alınarak oluşturulmuş gereksinimler incelenebilir.

CS-E 60 maddesi, hava aracı tarafından kullanılacak motor üzerinden veri alacak enstrümanlara yönelik bir gerekliliktir. Bu madde motor sağlayıcısı tarafından CS-29'da 29.1305'e bağlantılı olarak incelenmelidir. Fakat üzerinde anlaşma sağlanmadı durumda motor sağlayıcısı bu maddeye uyum kapsamında hava aracının taleplerini tam karşılayamayabilir ve tasarım değişiklikleri gerçekleştirilmesi gerekebilir. Diğer bir taraftan Hava aracı tarafından talep edilecek enstrümanlar; pilot göstergelerini, hava aracı yazılım ve donanım mimarisini, motor kontrolcüsünü yani FADEC tasarımına ve motor tasarımına etki edecektir. CS-E'nin CS-29 detayında yazılmadığı bu madde, entegrasyon açısından güzel bir örnek teşkil etmektedir.

Tablo 9: CS-E ve CS-29 Temel Alınarak Oluşturulan Örnek İş Tanımları ve Gereksinimler

Örnek CS- E ve CS-29 gerekliliği	Gereklilik bazlı oluşturulmuş örnek motor ve alt sistem gereksinimleri
<p>CS-E 60 Provisions for Instrument</p> <p>(a) Provision must be made for the installation of instrumentation necessary to ensure operation in compliance with the Engine operating limitations. Where, in presenting the safety analysis, or complying with any other specification, dependence is placed on instrumentation which is not otherwise mandatory in the assumed aircraft installation, then this instrumentation must be specified in the Engine instructions for installation and declared mandatory in the Engine approval documentation. [EASA CS-E,2020]</p>	<p>D.60A.1: Engine manuals shall include description of mandatory instrumentation on the Engine.</p> <p>D.60A.2: Engine manuals shall include description of Engine information transmit to the aircraft.</p> <p>D.60A.3: Required Engine Provisions for the installation of instrumentation necessary to ensure operation in compliance with the Engine operating limitations shall be identified as per aircraft contract agreement specified under Certification section.</p>
<p>CS 29.1305 Power Plant Instruments</p> <p>The following are required power plant instruments:</p> <p>(a) For each rotorcraft:</p> <p>(8) An oil quantity indicator for each oil tank and each rotor drive gearbox, if lubricant is self-contained. [EASA CS-29, 2020]</p>	<p>R.60A.1: Engine shall have an oil quantity indicator for each oil tank and each rotor drive gearbox, if lubricant is self-contained.</p> <p>R.60A.1.1: The Engine Control System shall measure the oil quantity from each oil tank and each rotor drive gearbox, if lubricant is self-contained.</p> <p>R.60A.1.2: The Engine Control System shall produce a warning when the oil pressure falls below ... value, on the pressure-lubricated gearbox.</p>

Herbir cümlelerin başındaki kodlamada geçen; D, iş tanımı cümlesini, R ise gereksinim cümlesini, 40A ilgili CS-E gerekliliğini, .x formatı ilgili CS-E gereksinim temel alınarak oluşturulan, iş tanımı ve gereksinim cümlesinin 1'den başlayan sıra numarasını, .x.x ise bir alt kırılım için 1'den başlayan sıra numarasını temsil etmektedir.

SONUÇ

Çalışmada INCOSE ve SAE ARP 4754 dokümanlarında detaylandırılan ürün tasarım ve geliştirme süreçlerinin, sistem gereksinimleri, kavramsal tasarım ve ön tasarım aşamaları için tip sertifikasyonu açısından incelenmiştir. Karmaşıklığın arttığı sertifikasyon projelerinde, projenin erken aşamalarından itibaren alınacak kararların Tip sertifikalı motor geliştirme süreci açısından gereksinim bazlı olarak kritik girdiler değerlendirilmiştir. Bu kapsamda hava aracı emniyet değerlendirmeleri çıktıları, hava aracı mimarisi ve CS-29'dan aktarılabilecek gerekliliklerin tip sertifikalı motor geliştirme süreçleri açısından kritik olduğu değerlendirilmiştir. CS-E ve CS-29 temel alınarak gereksinim oluşturma çalışmaları sırasında temel alınan kabullerden bahsedilmiş ve örnek uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Geliştirme aşamalarına göre SHT-21 Alt bölüm B'de detaylandırılan tip sertifikasyon süreci hem motor hem de hava aracı-motor entegrasyonu açısından incelenmiş ve hava aracı ve motor sağlayıcılarının birbirlerinin çalışmalarından kredi alabileceği ya da üzerinde anlaşma sağlayabileceği sertifikasyon gereklilikleri bir tablo halinde listelenmiştir. Ürün geliştirme süreçleri yüzdesine bağlı olarak planlanan kaynak miktarları incelenmiş ve sertifikasyon projelerinde geliştirme uzayındaki değişikliklerin olası etkilerinden bahsedilmiştir. Çalışmanın devamı olarak bir motor sertifikasyon projesinin tüm aşamalarının rehber dokümanlara uygun olarak incelenmesi planlanmaktadır.

Kaynaklar

- DAU, 1993. *Committed Life Cycle Cost against Time. 3.1. Fort Belvoir, VA: Defense Acquisition University.*
- EASA, 2020. *Certification Specifications and Acceptable Means of Compliance for Engines CS-E Amendment 6, s.23-36*
- EASA, 2020. *Certification Specifications Large Rotorcraft, CS-29 Amendment 8, s. 81-82*
- EASA, 2010. *Definitions and abbreviations used in Certification Specifications for products, parts and appliances CS-Definitions Amendment 2, s. 17-19*
- Forsberg, K., Mooz, H., ve Cotterman, H. (2005). *Visualizing Project Management, (3 Ed). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.*
- Gürbüz, N., 2010. *Havacılık Projelerinde Emniyet Odaklı Sistem Mühendisliği Uygulamaları, 1. Aviyonik ve Sistem Entegrasyonu Sempozyumu, s.1-2*
- SAE, 2010. *Aerospace Recommended Practice 4754A Guidelines for Development of Civil Aircraft and System, s.13-25*
- SHGM, 2018. *Hava Aracı Ve İlgili Ürün, Parça Ve Cihazın Uçuşa Elverişlilik Ve Çevresel Sertifikasyon Talimatı, SHT-21*
- INCOSE, 2015. *System Engineering Handbook A Guide For System Life Cycle Processes And Activities Fourt Edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. s.27-48*
- Weck, O.L., 2014. *Fundamentals of System Engineering, Session 2 Requirement Definition, Massachusetts Institute of Technology, s. 11*