



## SÜRDÜRÜLEBİLİR BİR TEDARİK YÖNETİM SİSTEMİ ÖRNEĞİNDE, ASKERİ TURBOFAN MOTOR GELİŞTİRME PROJELERİ MALİYET TAHMİNİ VE TEKNOLOJİ HAZIRLIK SEVİYESİ TABANLI RİSK FAKTÖRLERİ

Ali DİNÇ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ALP Havacılık A.Ş., Organize Sanayi Bölgesi 8. Cad. 26110 Eskişehir, [alidinc@yahoo.com](mailto:alidinc@yahoo.com)

DOI: [10.23890/SUHAD.2016.0104](https://doi.org/10.23890/SUHAD.2016.0104)

### ÖZET

Gaz türbinli motorlar geçmişten günümüze sivil ve askeri amaçlarla havacılık, deniz ulaşımı ve enerji üretimi gibi pek çok alanda kullanılmaktadır. En üst teknolojiye sahip bu sistemlerin geliştirilmesi süreci sistematik bir tedarik yönetim (ArGe'ye dayalı) anlayışını gerektirmektedir. Bu kapsamda; Amerika Savunma Bakanlığı, gaz türbinli motor geliştirme programları başta olmak üzere çeşitli savunma ve enerji projelerinde 5 aşamalı süreç kullanmaktadır. Bu aşamalar; Sistem Çözüm Analizi, Teknoloji Geliştirme, Mühendislik ve İmalat Geliştirme, Üretim ve Geliştirme, Operasyon ve Destektir. Bu çalışmada askeri turbofan motor geliştirme projelerinin Mühendislik ve İmalat Geliştirme aşaması için ön maliyet tahmini analizleri yapılmıştır. Literatürdeki 4 farklı maliyet tahmin modeli incelenmiştir. F119 ve F135 motorları örnek alınarak farklı modellerle maliyet tahmin hesaplamaları yapılmış ve gerçek değerlerle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, teknoloji hazırlık seviyesi ile ilgili riskler incelenmiş ve tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Turbofan, maliyet tahmini, teknoloji hazırlık seviyesi, savunma tedarik yönetim sistemi

### MILITARY TURBOFAN ENGINE DEVELOPMENT PROJECT COST ESTIMATION AND TECHNOLOGY READINESS LEVEL BASED RISK FACTORS IN A SUSTAINABLE ACQUISITION MANAGEMENT SYSTEM EXAMPLE

### ABSTRACT

Gas turbine engines in the past to the present are used for civil and military purposes in many fields such as aviation, marine, transportation and energy production. The development process of these systems which have highest technology, requires a systematic acquisition management (research & development based) approach. In this context, United States Department of Defense has been using a 5-phase process in a variety of defense and energy projects including gas turbine engine development programs. These phases are: Analysis of System Solutions, Technology Development, Engineering and Manufacturing Development, Production and Development, Operations and Support. In this study, preliminary cost estimate analysis is made for the Engineering and Manufacturing Development phase of military turbofan engine development projects. 4 different cost estimation models in literature have been investigated. By taking F119 and F135 engines as examples, cost estimates were calculated with different models and compared with the actual values. Additionally, risks associated with the technology readiness level are investigated and discussed.

**Keywords:** Turbofan, cost estimation, technology readiness level, defence acquisition management system

### 1. GİRİŞ

Savunma sanayi yüksek teknoloji kullanan, yüksek maliyetli projelerin gerçekleştirildiği bir sektördür. Geliştirme proje maliyetleri milyon ABD doları mertebesinde başlayıp milyar ABD doları seviyelerinde sıklıkla görülebilmektedir. Bu anlamda projelerin yönetim sistematığı ve maliyet tahmini önem kazanmaktadır. Dünyada bu

konularda detaylı çalışmalar yapılmakta ve projelerin yönetim süreci ve maliyet tahminleri ile ilgili yöntem ve modeller geliştirilmektedir.

Savunma sanayiinde proje maliyetlerinin doğru tahmini hem projeyi gerçekleştiren kuruluşlar hem de proje finansmanını sağlayan devlet kurumları için oldukça önemlidir. Bir taraftan devlet kurumları kısıtlı bütçelerle ihtiyaç olan birçok projeyi

fonlamada zorluk yaşarken, diğer taraftan şirketler yaptıkları maliyet tahminleri ile proje bütçesi içinde kalıp zarar etmeden faaliyetlerini sürdürmeye çalışmaktadır. Son dönemlerde, savunma bütçelerindeki kısıtlamalar, proje maliyetlerinin düşürülmesini ve tamamlanma zamanının azaltılmasını gerektirmektedir (Gencer ve İncel, 2002). Bu nedenlerle geliştirme projeleri maliyet tahmininin doğruluğu ve risklerin belirlenmesi taraflar için önemlidir. Ayrıca, askeri ortamlarda verilen tedarik kararları, maliyet ve hazır olma kriterleri arasında yapılan fayda-maliyet analizleri sonucunda değişebilmektedir (Güler, 2012). Türkiye’de hâlihazırda geleneksel tedarik yöntemleri uygulanmaktadır. Ancak, geliştirme projelerinin çoğu planlanan zaman ve maliyet içerisinde tamamlanamamaktadır (Müslüm vd., 2010).

Bu çalışmada, askeri uçak motorları geliştirme projeleri maliyet tahminleri incelenmiştir. Askeri savaş uçaklarında genellikle ardyanmalı, düşük bypass oranlı turbofan tipi motorlar kullanılmaktadır. Bu motorlar yüksek Mach sayısına

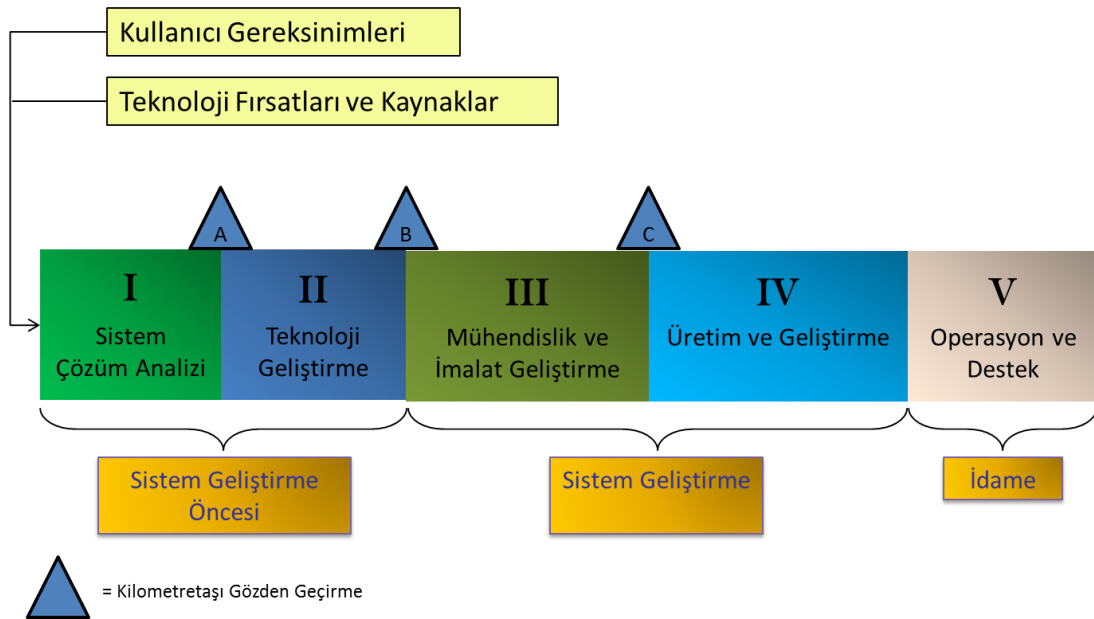
ulaşabilmekte ve böylelikle sesüstü hızda uçabilmektedirler (Turan ve Karakoç, 2010).

## 2. SAVUNMA TEDARİK YÖNETİM SİSTEMİ

Bu çalışmada Sistemleri kullanıcılara, etkili, ekonomik ve zamanında sağlayan yönetim süreci (DoD, 2007) olarak tanımlanan ABD Savunma Bakanlığının uyguladığı savunma tedarik yönetim sistemi (ArGe’ye dayalı) temel alınmıştır. Bu sistem dahilinde Şekil 1’de verilen 5 aşamalı süreç uygulanmaktadır (DoD, 2008). Bu aşamalar;

- I. Aşama 1: Sistem Çözüm Analizi
- II. Aşama 2: Teknoloji Geliştirme
- III. Aşama 3: Mühendislik ve İmalat Geliştirme
- IV. Aşama 4: Üretim ve Geliştirme
- V. Aşama 5: Operasyon ve Destek

Her bir aşamanın kontratı, proje devam ederken aşama aşama yapılmakta böylece uzun süreli ve karmaşık sistemlerin ortaya çıkardığı riskler ortadan kaldırılabilmektedir (DoD, 2008).



Şekil 1: Savunma tedarik yönetim sistemi (DoD, 2008)

Aşama I, Sistem Çözüm Analizi aşaması kullanıcı ihtiyaçlarına ve bu ihtiyaçlara cevap verebilme kabiliyetlerine bağlı olarak değişkenlik gösterebileceğinden bu aşamanın maliyetlerini çıkarmak her bir ihtiyaç tanımına göre farklılık göstermektedir. Aşama II, Teknoloji Geliştirme ise, kullanıcı ihtiyaçlarına cevap verecek teknolojilerdeki olgunluk seviyesi ve bu teknolojileri olgunlaştırmak için gerekli çalışmaları kapsayacağından bu aşamaya ait maliyet çalışmaları yüksek belirsizlikler içerecektir. Aşama III, Mühendislik ve İmalat Geliştirme aşaması

maliyetlerinin ise; kullanıcı isterlerinin netleşmiş olması, bu isterleri karşılayacak teknolojik kabiliyetlerin kazanıldığı ve üründe kullanılabileceğinin gösterilmiş olması nedeniyle belirli bir sistematik çerçevesinde hesaplanması mümkündür. Ancak Aşama III’ün başında teknolojik olgunluğun ve yeterliliğin değerlendirmesi en doğru şekilde yapılmalıdır. Son 2 aşamaya (IV ve V) ait maliyetler de ürünün teknik özellikleri, operasyon gereklilikleri ve kullanıcının operasyon ihtiyacına göre oluşturduğu program çerçevesinde geliştirilecek çeşitli yöntemlerle

hesaplanabilmektedir. Nitekim Amerika gibi çeşitli gaz türbinli motor projelerine imza atmış ülkelerde özel şirketler, araştırma kuruluşları ve devlet kurumlarında bu maliyetlerin hesaplanması için ekipler oluşturulmakta ve program bütçeleri kontrol altında tutulmaktadır.

Şekil 1’de verilen ABD Savunma Tedarik Yönetim Sisteminin, aşamaları arasında bazı kilometre taşları ve net çıktıları da tanımlanmıştır. Örnek olarak, Ülkemizde teknoloji geliştirme ve ürün geliştirme süreçleri farkı hakkında tartışmalar mevcutken, ABD Savunma Tedarik Yönetim Sistemi bu iki süreci Aşama II ve III olarak ayırmıştır. Bu anlamda, Aşama II ve III’ün arasında “kilometre taşı B” olarak net bir onay noktası tanımlanmıştır (DoD, 2008).

### 3. MALİYET TAHMİN YÖNTEMİ

ABD Sayıştay (US Government Accountability Office- GAO), maliyet tahmin yöntemi geliştirirken 12 temel adıma dikkat edilmesini tavsiye etmektedir (GAO, 2009);

1. Maliyet tahmininin amacının belirlenmesi
2. Maliyet tahmini planı oluşturulması
3. Proje (veya Program) özelliklerinin belirlenmesi
4. Maliyet tahmini yapısının belirlenmesi (iş dağılım ağacı vb.)
5. Temel kural ve varsayımların belirlenmesi
6. Verilerin toplanması
7. Baz maliyet tahmininin yapılması ve bağımsız bir çalışma ile karşılaştırılması
8. Duyarlılık analizi yapılması
9. Risk ve belirsizlik analizi yapılması
10. Çalışmaların dokümantasyonunun yapılması
11. Yönetim onayına sunulması
12. Gerçekleşen maliyetler ve değişiklikler ışığında veri tabanının güncellenmesi

Literatürde maliyet hesabı için genel olarak 3 farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada maliyet tahmininin yapılabilmesi için literatürdeki temel kural ve varsayımlar incelenerek bir örnek incelenmiştir.

**Tüme Varım:** Bu hesaplama yönteminde motor konfigürasyonuna büyük oranda karar verilmiş olunmalıdır. Motora ait tüm sistem ve alt sistemlere ilişkin, tasarım, analiz, malzeme maliyeti, prototip imalat maliyeti ve test süreleri ile ihtiyaç duyulan personel sayıları hesaplanarak geliştirme maliyeti hesaplanır. Baz motor konfigürasyonuna ve performans isterlerini karşılayacak teknolojilere uzman personelin karar vermesi gerekmektedir. Bu yöntemi uygularken dikkat edilmesi gereken en önemli nokta yeni teknolojik gelişmeler ışığında sistemde yeni malzeme, proses veya yöntemlerin uygulanması gerekliliklerinin hesaba dahil edilmesidir (Younossi vd., 2002).

**Kıyaslama ile hesaplama:** Özellikle bir benzerinden türetilerek (derivative) geliştirilecek motorların geliştirme maliyetlerinin hesaplanması için geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde tüme varım yönteminden farklı olarak sadece değişiklik yapılacak komponentle ilgili bölüm bütçesi güncellenir ve toplam proje maliyeti hesaplanır. Böylece maliyet hesabı için gerekli süre kısalmaktadır (Younossi vd., 2002).

**Parametrik hesaplama:** Parametrik hesaplama yöntemi, ilk iki yöntemden daha farklı olarak temel istatistiksel yöntemlerin uygulandığı ve motora ilişkin teknik özelliklerin (itki, ağırlık, türbin giriş sıcaklığı vb.) kullanıldığı bir yöntemdir. Parametrik hesaplama yönteminde genel olarak regresyon analizi kullanılır. Aşağıda çoklu en küçük kareler regresyon analizinin genel formülü verilmiştir (Younossi vd., 2002):

$$\ln Y = \beta_0 + \sum_i \beta_i \ln X_i + \varepsilon \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde X, bağımsız değişken; Y: Bağımlı Değişken;  $\beta_0$ , X=0 olduğunda bağımlı değişkenin alacağı değer (kesim noktası),  $\beta_i$ : regresyon katsayısı;  $\varepsilon$ , hata terimidir. Parametrik hesaplama yönteminde logaritmik değerlerin kullanılması hata oranlarının ve karşılaştırmaların yüzdesel olarak yapılmasına olanak tanır. Oluşturma süreci oldukça zor olan parametrik metod bir kez doğrulandığında takip eden projelerin maliyet hesabının yapılma süresi kısalmaktadır.

Maliyet tahminleri projenin başında yapılıp sona erene kadar kullanılan statik bir doküman değildir. Projenin her aşamasında sürekli güncellenmekte ve tahmin hassasiyeti iyileştirilmektedir. Sürekli güncellenen maliyet hesaplama araçlarının tahmin hassasiyeti proje tanımı netleştikçe artar. Projenin tanımı (konu, kapsam, hedeflenen çıktılar vb.) netleştikçe tahmin hassasiyeti iyileşmektedir (DoE, 2011).

### 4. MALİYET TAHMİN MODELLERİ

Bu çalışmada parametrik hesaplama yöntemi ile geliştirilen ve literatürde bulunan 4 farklı maliyet hesaplama yaklaşımı incelenmiştir. Çalışmalar farklı tarih aralıklarında yapıldığından ABD İstatistik Kurumu tarafından yayınlanan enflasyon oranları dikkate alınarak geliştirme maliyetleri günümüz ABD dolarına çevrilmelidir. Aşağıdaki formülleri verilen Model 1, 2001 yılı; Model 2, 1980 yılı; Model 3, 1980 yılı; Model 4 ise 1993 yılı ABD dolarına göre hesaplama yapmaktadır:

- o **Model 1:** RAND 2002–Maliyet Hesaplama Yaklaşımı (Younossi vd., 2002)

$$y = e^{-24.429+4.027 \ln T/T} \quad (2)$$

- **Model 2:** Monte Carlo Simülasyonu ile Maliyet Hesaplama Yaklaşımı (Culy ve Gossen, 1984)

$$y = 0.0872T^{0.8927} \quad (3)$$

- **Model 3:** RAND 1982–Maliyet Hesaplama Yaklaşımı (Birkler, 1982)

$$y = -845.8 + 0.005T + 249,8M + 0.313TiT \quad (4)$$

- **Model 4:** NASA Maliyet Hesaplama Yaklaşımı (Peffley vd., 1996)

$$y = 7.4871T^{0.511} \quad (5)$$

Bu çalışmada verilen maliyet modelleri sadece Aşama III'ü kapsamaktadır (Aşama I, II, IV, V dahil değildir). Örnek vermek gerekirse Aşama III'e gelmek için gerekli ve önce gerçekleştirilmesi gereken Aşama II "Teknoloji Geliştirme" faaliyetleri ile Aşama IV'te olacak uçak/motor entegrasyonu ve uçuş testlerinin maliyetlerini içermemektedir. Ayrıca herhangi bir yatırım kalemini (tasarım, imalat, test bina ve ekipmanları) kapsamamaktadır.

Modellerin türetilmesi için kullanılan gerçek maliyet değerlerinin birçoğu gizlilik nedeniyle literatürde verilmemiştir. Üstelik bu değerler ABD'nin farklı veri tabanlarında farklılık göstermektedir. Yapılan motor geliştirme projelerinde birçok etken (teknoloji seviyesi, yeni veya türev motor olması, proje kapsamı vb.) nedeniyle modellemelerdeki hata payı yüksektir (Younossi vd., 2002).

Konunun değerlendirilmesi için sırasıyla, F-22 ve F-35 savaş uçaklarında kullanılan F119 ve F135 motorları örnek uygulama için seçilmiştir (Şekil 2-3). Bu motorların özet tasarım parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 2: F-35 savaş uçağı F135 motoru (Pratt & Whitney, 1996)

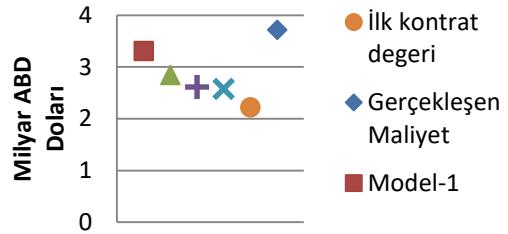


Şekil 3: F-22 savaş uçağı F119 motoru (Pratt & Whitney, 1996)

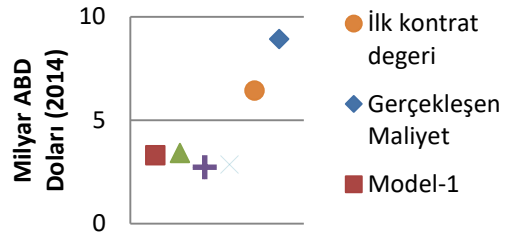
Tablo 1: Varsayılan motor parametreleri (Younossi vd., 2002), (Pratt & Whitney, 1996)

	F119	F135
İtki seviyesi	155,7 kN (35000 lb)	191,3 kN (43000 lb)
TiT	1922 K (3000 F)	1922 K (kabul)
Azami uçuş hızı (Mach)	2	2

Seçilen F119 ve F135 askeri turbofan motorlarının Mühendislik ve İmalat Geliştirme aşaması maliyetleri literatürde bulunan 4 farklı yöntemle hesaplanmıştır. Bu sonuçlar ayrıca literatürdeki ilk kontrat ve gerçekleşen maliyetleri (Skira, 2002; GAO, 2010) ile de 2014 yılı ABD doları mertebesine göre karşılaştırılmıştır (Şekil 4-5).



Şekil 4: F119 motoru maliyet karşılaştırması



Şekil 5: F135 motoru maliyet karşılaştırması

Şekil 4'te F22 savaş uçağına ait F119 motoru geliştirme maliyet modelleri sonuçları ile gerçekleşen ve ilk kontrat değerleri verilmiştir. Bu motorun ilk kontrat değeri 2014 ABD dolarına çevrilmiş olarak \$2,22 milyar dolar (1991 yılı 1,36 milyar ABD doları) iken proje \$3,72 milyar dolar civarında tamamlanmıştır (Skira, 2002). Maliyet modellerinin hepsi ilk kontrat değerinin üzerinde sonuç vermiştir. Ancak gerçekleşen değer bu sonuçların üzerinde olmuştur.

Şekil 5'te ise, F35 uçağına güç veren F135 motoru geliştirme maliyet modelleri sonuçları ile gerçekleşen ve ilk kontrat değerleri verilmiştir. İlk kontrat değerinin 2001 yılında \$4,8 milyar dolar

(2014 yılı eşdeğeri 6,43 milyar ABD doları) olmasına rağmen gerçekleşen maliyetin \$2,5 milyar dolar artışla, \$7,3 milyar dolara (2014 yılı eşdeğeri  $6,43+2,5=8,93$  milyar ABD doları kabul edilebilir) ulaşacağı tahmin edilmektedir (GAO, 2010). Maliyet modellerinin hepsinin ilk kontrat değerinin altında sonuç verdiği görülmektedir. Maliyetinin fazla olmasının bir nedeni de F135 motorunun birkaç farklı versiyonda geliştirilmesi ve diğer motorlarda yaygın olmayan ek bileşenlere sahip olmasıdır. STOVL (kısa mesafede kalkış ve dikey iniş) versiyonunda Şekil 2'de görüldüğü gibi ön kısma entegre olan dikey itki sağlayan "lift fan" isimli bir fan, yanlarda denge sağlayıcı itki veren 2 adet "roll post" ve yatay/dikey eksenler arasında 95 derece hareket edebilen itki yönlendirme (thrust vectoring) kabiliyetine sahip bir egzoz bileşeni genel olarak motorun geliştirme maliyetini artırmaktadır. STOVL versiyonundaki "lift fan", "roll post" ve itki yönlendirici egzoz bileşenlerinin geliştirilmesi Rolls-Royce İngiltere şirketi tarafından yapılmaktadır. Rolls-Royce firmasına ait bu işpaketinin toplam değeri 1 milyar dolardır (projenin yaklaşık %20,8'i) (Rolls-Royce, 2008). Ancak gerçekleşen değer bu sonuçların üzerindedir. Maliyet artış nedenleri arasında, işçilik ve malzeme fiyatlarındaki artışlar, tedarikçi sorunları ve motor paalesindeki sorunun tekrar tasarım yoluyla giderilişi vb. sayılmaktadır (GAO, 2010).

JSF (müşterek taaruz uçağı) olarak ta adlandırılan F-35 uçağı sisteminin toplam geliştirme maliyeti 2001 yılında \$34,4 milyar dolardan 2012 itibarıyla %60 artışla \$55,2 milyar dolara çıkmıştır (GAO, 2013). Bunun sebeplerinden birisi, JSF uçağının 2001'de sistem geliştirme fazına "olgunlaşmamış kritik teknolojiler" ile girmesi olarak belirtilmiştir (GAO, 2005).

## 5. TEKNOLOJİ HAZIRLIK SEVİYESİ VE RİSK FAKTÖRLERİ

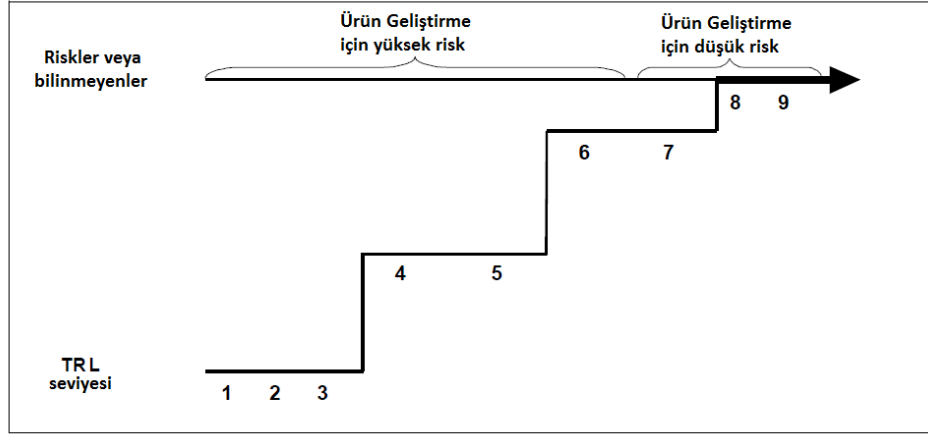
Teknoloji Yönetimi, firmaların teknolojiden en üst düzeyde yararlanmasını, teknolojik gelişmelere uyum sağlanmasını ve bu değişimlerin bizzat firmalar tarafından yaratılmasını hedefler (Ünsal, 2009). Projelerin tedarik sürecinde yer alan organizasyonlar, hızla değişen rekabet ortamında, maliyet, zaman ve performans risklerini en aza indirgeyerek daha az kayıp süre ve daha düşük

maliyetle daha yüksek performansa sahip projeleri hayata geçirebilecek mekanizmaların, süreçlerin veya metodolojilerin arayışı içindedirler. Bu doğrultuda geliştirilmiş çözümlerden bir tanesi de olgunluk değerlendirme araçlarıdır (Babaçoğlu vd., 2009). Teknoloji Hazırlık Seviyesi (TRL: Technology Readiness Level), belirli bir teknolojinin olgunluğunun değerlendirilmesini sağlayan ve farklı teknolojiler arasında olgunluğun tutarlı bir şekilde karşılaştırılmasına imkân veren sistematik bir ölçüm sistemidir (Mankins, 1995). TRL metriği, ilk olarak 1980'lerde NASA Goddard Uçay Uçuş Merkezi tarafından uzay teknolojisinin riskini ve hazırlığını değerlendirmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Kullanımında görülen faydalar nedeniyle, ABD Sayıştayı (GAO) tarafından ABD'nin büyük savunma tedarik projelerinde kullanılması önerilmiştir ve 1999'dan itibaren kullanılmaktadır (Fernandez, 2010). Tablo 2'de NASA Teknoloji Hazırlık Seviyeleri (TRL) açıklamalı olarak verilmiştir. Bu metrik son yıllarda Ülkemizde önde gelen savunma kuruluşlarında (TEI, TUSAŞ, Roketsan vb.) devlet kurumları (TUBİTAK vb.) araştırma enstitülerinde (TUBİTAK SAGE vb.) yer yer kabul görmüş ve kullanılmaya başlanmıştır.

Ürün geliştirme projeleri sürecinde kullanılan teknolojilerin TRL seviyeleri ile projenin maliyet ve takvim parametrelerinin arasında bir ilişki olduğu görülmüştür. Yeni bir ürün geliştirme projesinde kullanılması düşünülen teknolojilerin olgunluk seviyesi (TRL), projenin maliyetini ve süresini etkilemektedir. ABD Sayıştayı GAO tarafından incelenen ABD savunma ve ticari teknoloji geliştirme proje örnekleri göstermektedir ki; ürün geliştirme projelerinde kullanılacak teknolojilerin olgunluk seviyesi yüksek ise bu programların başarılı olma şansı daha fazladır (GAO, 1999). Başka bir deyişle, projede daha olgun teknolojilerin kullanımı, bu projenin hedeflerine ulaşmasına daha fazla yardım edecektir. Bir ürün geliştirme programına olgunlaşmadan dahil edilen teknolojiler daha sonra bu ürünlerde maliyet artışı ve takvimsel gecikmelere sebep olmuştur. Şekil 6'da teknoloji olgunlaşma seviyesi TRL6 olarak gösterilmiş ve bu seviyenin altındaki teknolojiler ile ürün geliştirme sürecinde başlanması yüksek risk olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2: NASA teknoloji hazırlık seviyeleri (Mankins, 1995)

TRL 1 – Temel prensiplerin gözlenmesi (Fikir oluşturma)
TRL 2 – Teknoloji konseptinin formüle edilmesi
TRL 3 – Konseptin deneysel kanıtlanması
TRL 4 – Laboratuvar ortamında teknolojinin doğrulanması
TRL 5 – İlgili ortamda teknolojinin doğrulanması
TRL 6 – İlgili ortamda teknolojinin denenmesi
TRL 7 – Gerçek çalışma ortamında sistem prototipin performans gösterimi (uçuş testinin yapılması)
TRL 8 – Sistemin tamamlanması ve kalifiye edilmesi (uçuş ile kalifiye edilmiş sistem)
TRL 9 – Çalışma ortamında gerçek sistemin kanıtlanması (operasyonel olarak sistemin kanıtlanması)



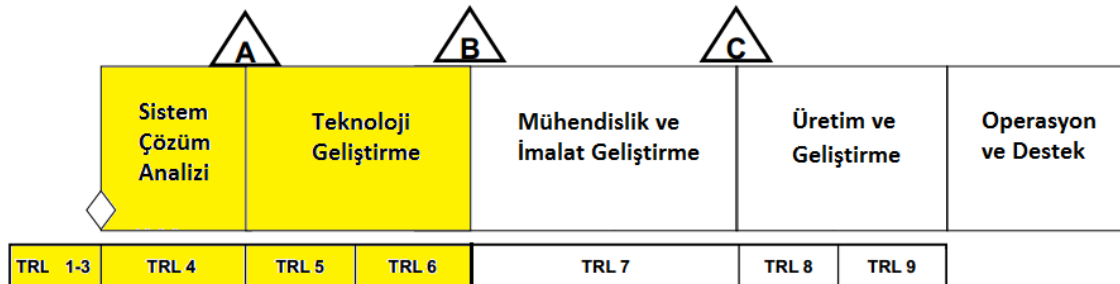
Şekil 6: TRL seviyelerinin ürün geliştirme sürecine getirdiği risk miktarı (GAO, 1999)

ABD Sayıştay GAO'nun 54 savunma projesi üzerindeki incelemesine göre; projelerin sadece %15'i sistem tasarımına (kilometre taşı B sonrası, bkz. Şekil 1) olgun teknoloji ile başladılar (TRL 7). Olgunlaşmamış teknolojiler kullanan projeler ortalama olarak 41% maliyet artışı ve 13 ay takvimsel gecikme ile karşılaştılar (GAO, 2005).

Savunma tedarik sistemlerinin mühendislik ve imalat geliştirme aşamasına (Aşama III, bkz. Şekil 1) olgunlaşmamış teknolojiler ile giren projelerde maliyet artışı ve gecikme sorunları olması nedeniyle ABD Kodu 10, Başlık kısım 2366b'de kilometre taşı B onayından önce teknolojinin ilgili ortamda gösterimini (TRL 6 seviyesine getirilmesini) şart koşturmuştur (DoD, 2008). Bu Aşama II ve III arasında kesin bir onay noktası ve süreç kilometre taşıdır. Bu noktada teknoloji hazırlık

seviyesi metriği ve teknoloji hazırlık seviyesi değerlendirme araçları devreye girmektedir. Başarılı bir kilometre taşı B değerlendirmesi için bu metrik ve değerlendirme araçlarının kullanımı şarttır. Bu anlamda tedarik yönetim sistemi süreci ve TRL seviyelerinin düzenlenmesi Şekil 7'de verilmiştir (Keenan, 2013).

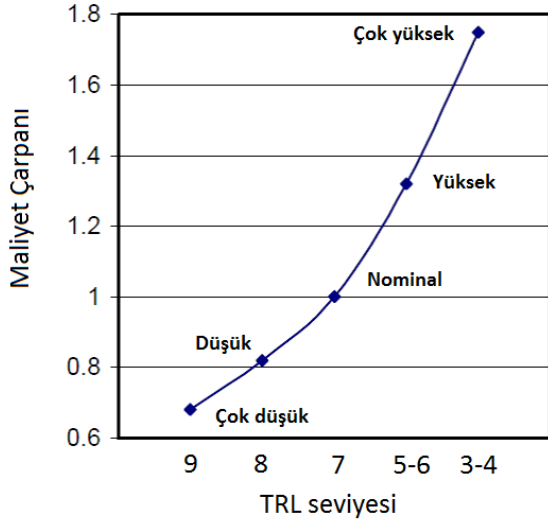
Maliyet tahmini modellerinde dahil edilmesi gereken en önemli risk faktörlerinin başında teknoloji riski gelmektedir (Valerdi ve Kohl, 2014). Teknoloji riskine ait maliyet çarpanları Tablo 3'te açıklanmış ve Şekil 8'de verilmiştir. Görüldüğü üzere TRL seviyesinin düşük olduğu durumlarda risk faktörü maliyet çarpanı sayısal olarak artmaktadır.



Şekil 7: Tedarik yönetim sistemi süreci ve teknoloji hazırlık seviyeleri hizalaması (Keenan, 2013)

Tablo 3: Teknoloji riski maliyet çarpanları (Valerdi ve Kohl, 2014)

	Çok Düşük	Düşük	Nominal	Yüksek	Çok Yüksek
Olgunlaşma eksikliği	Teknoloji kanıtlanmış ve endüstride yaygın olarak kullanılmakta	Gerçek kullanım ile kanıtlanmış ve yaygın uyarılma için hazır	Pilot projelerle kanıtlanmış ve üretim işleri için kullanıma hazır	Pilot kullanım için hazır	Hala laboratuvarda
Hazırlık eksikliği	Operasyonel olarak kanıtlanmış (TRL9)	Kavram kalifiye edilmiş (TRL8)	Kavram gösterimi yapılmış (TRL7)	Teknoloji doğrulanmış (TRL 5-6)	Kavram tanımlanmış (TRL 3-4)
Eskime	(Eskime sözkonusu değil)	(Eskime sözkonusu değil)	Teknoloji en modern seviyede	Teknoloji eskimeye başlamış, kısa vadede yeni ve daha iyi teknoloji	Teknoloji eskimiş ve yeni sistemlerde kullanımında kaçınılmalı
Maliyet çarpanı	0,68	0,82	1,0	1,32	1,75



Şekil 8: Teknoloji riski maliyet çarpanları (Valerdi ve Kohl, 2014)

## 6. SONUÇLAR

Bu çalışmada askeri turbofan motoru geliştirme projeleri için (Aşama III) literatürde geçen 4 farklı maliyet tahmin modeli ve gerçek değerler ile karşılaştırmaları verilmiştir. Bunlara ek olarak maliyet tahminlerini önemli ölçüde etkileyebilecek teknoloji riski tanımlanmıştır. Maliyet tahminlerini etkileyen teknoloji riski ise kilometre taşı B'de (bkz. Şekil 1) geçiş metriği olarak ta kullanılan TRL seviyelerine endeksli olarak tahmin edilebilmektedir. Ülkemizde ve dünyada çeşitli geliştirme projelerinde tahmin edilenin üzerinde maliyet ve süre artışı olmasının en önemli sebeplerinden biri de savunma tedarik sistemi sürecinin uygulamasında ve teknoloji riski öngörülerindeki eksikliklere bağlanabilir.

Sonuç olarak bu çalışmada anlatılan savunma tedarik sistemi süreci ABD örneği, maliyet tahmin yöntemleri,

askeri turbofan geliştirme maliyet tahmin modelleri ve örnek hesaplamaları, teknoloji hazırlık seviyesi metriği ve değerlendirme araçları ile buna bağlı maliyet risk çarpanları birbirleri ile ilişkili ve bir bütün olarak özetlenmiştir. Ülkemizdeki savunma projeleri kapsamında tedarik süreç yönetimi (ArGe'ye dayalı) ile teknoloji seviye ve risklerinin anlaşılması ve buna göre icra edilmesi, projelerde maliyet ve takvim sınırları içinde kalmayı kolaylaştırıcı ve başarı oranını artırıcı bir etken olacaktır.

## SEMBOLLER DİZİNİ

- M : Mach sayısı  
T : itki  
TiT : türbin giriş sıcaklığı  
X : bağımsız değişken  
y : mühendislik ve imalat geliştirme aşaması maliyeti (Aşama III, bkz. Şekil 1)  
Y : bağımlı değişken (bkz. Denklem (1))
- ### Yunan Harfleri
- $\beta_0$  :  $X=0$  için bağımlı değişkenin değeri  
 $\beta_i$  : regresyon katsayısı  
 $\varepsilon$  : hata terimi

## KAYNAKLAR

- Babaçoğlu, S., Akgün, İ., Kayhan, A., "Sistem Geliştirme Projelerinde Kullanılan Olgunluk Değerlendirme Araçları Üzerine Bir Literatür Araştırması", Savunma Bilimleri Dergisi; 13-1, 1-36, 2014
- Birkler, J.L., Garfinkler, J.B., Marks, K.E., "Development and Production Cost Estimating Relationships for Aircraft Turbine Engines", RAND, USA, 1982
- Culy, D., Gossen, J., "Monte Carlo Simulation of the Engine Development Process", Journal of Aircraft,

- 1984
- DoD, Directive “The Defense Acquisition System (5000.01)”, Department of Defense, USA, 2007
- DoD, Instruction “Operation of the Defense Acquisition System (5000.02)”, Department of Defence, USA, 2008
- DoE, “Cost Estimating Guide (DOE G 413.3-21)”, Department of Energy, USA, 2011
- Fernandez, A., “Contextual Role of TRLs and MRLs in Technology Management”, Sandia National Laboratories, USA, 2010
- GAO, “Best Practices: Better Management of Technology Development Can Improve Weapon System Outcomes (GAO/NSIAD-99-162)”, Government Accountability Office, USA, 1999
- GAO, “Defense Acquisitions: Assessments of Selected Major Weapon Programs (GAO-05-301)”, Government Accountability Office, USA, 2005
- GAO, “Cost Estimating and Assesment Guide (GAO-09-3SP)”, Government Accountability Office, USA, 2009
- GAO, “Joint Strike Fighter, Additional Costs and Delays Risk Not Meeting Warfighter Requirements on Time (GAO-10-382)”, Government Accountability Office, USA, 2010
- GAO, “F-35 Joint Strike Fighter, Restructuring Has Improved the Program, but Affordability Challenges and Other Risks Remain (GAO-13-690T)”, Government Accountability Office, USA, 2013
- Gencer, C., İncel, S., “Tümleşik Ürün ve Süreç Geliştirme Tekniğinin Mühendislik-Geliştirme Tabanlı Üretim Projelerinde Uygulamasına Ait Bir Uygulama”, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 17-4, 1-14, 2002
- Güler, Ç.U., “Türk Hava Kuvvetlerinde Malzeme İhtiyaç Planlaması”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 5-3, 35-45, 2012
- Keenan, B., “Capabilities Development and System Acquisition Management”, Army Force Management School (AFMS), USA, 2013
- Mankins, J.C., “Technology Readiness Levels, A White Paper”, Advanced Concepts Office, Office of Space Access and Technology, NASA, USA, 1995
- Müslüm, S., Topcu, M.K., Mala, M., “Savunma Tedarikinde Güncel Yaklaşımlar: Evrimsel Tedarik Stratejisi ve Türkiye Açısından Bir Değerlendirme”, Savunma Bilimleri Dergisi, 9-2, 91-115, 2010
- Peffley, A., Hagen, J., Bock, R., “A User's Manual for Developing Cost Estimating Relationships”, NASA Contractor Report 194428 (D658-10343-1), USA,
- 1996
- Pratt & Whitney, F135 ürün broşürü, [http://www.pw.utc.com/F135\\_Engine](http://www.pw.utc.com/F135_Engine), 2012
- Rolls-Royce, Basın Büleni, [http://www.rolls-royce.com/news/press\\_releases/2008/231208\\_liftsystem\\_delivery.jsp](http://www.rolls-royce.com/news/press_releases/2008/231208_liftsystem_delivery.jsp), 2008
- Skira, C.A., “Reducing Military Aircraft Engine Development Costs through Modeling and Simulation”, RTO AVT Symposium on Reduction of Military Vehicle Acquisition Time and Cost through Advanced Modelling and Virtual Simulation, RTO-MP-089, France, 2002
- Turan, Ö., Karakoç, T.H., “Ardaynalı ve Ayrık Akışlı Turbofanlarda Fan Basınç Oranı ve Bypass Oranı ile Toplam Verimin Değişiminin İncelenmesi”, Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 4-2, 67-76, 2009
- Ünsal, E., “Dinamik Bir Yetenek Olarak Teknoloji Yönetimi: Teknoloji Yönetimi Yeteneği” Savunma Bilimleri Dergisi, 8-2, 167-189, 2009
- Valerdi, R., Kohl, R., “An Approach to Technology Risk Management”, Engineering Systems Division Symposium, 2014
- Younossi O., Arena M., Lorell R., Mason J. ve Graser J. C., (2002), “Military Jet Engine Acquisition: Technology Basics and Cost-Estimating Methodology”, RAND, USA.

#### **SORUMLULUK REDDİ (Disclaimer)**

Bu makalede bulunan tüm fikir ve görüşler sadece yazarına ait olup, ALP Havacılık A.Ş. veya başka bir kurum veya kuruluşun resmi görüşünü yansıtmaz.