

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

SAVAŞ UÇAĞI GELİŞTİRME PROJELERİNİN ÇİZELGELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

AHMET ATIL ÇETİN

ANKARA - 2023

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
SAVUNMA TEKNOLOJİLERİ VE SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI
SAVUNMA PLATFORMLARI TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

SAVAŞ UÇAĞI GELİŞTİRME PROJELERİNİN ÇİZELGELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

AHMET ATIL ÇETİN

TEZ DANIŞMANI

DR. ÖĞR. ÜYESİ ESRA DİNLER

ANKARA – 2023

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Ahmet Atıl ÇETİN tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 31 / 05 / 2023

Tez Adı: Savaş Uçağı Geliştirme Projelerinin Çizelgelenmesi

Tez Jüri Üyeleri (Unvanı, Adı- Soyadı, Kurumu)

İmza

Dr. Öğr. Üyesi, Murat ÜÇÜNCÜ, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi, Esra DİNLER, Başkent Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi, Ayyüce AYDEMİR KARADAĞ, Gazi Üniversitesi

.....

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 04 / 06 / 2023

Öğrencinin Adı, Soyadı: Ahmet Atıl ÇETİN

Öğrencinin Numarası: 22110204

Anabilim Dalı: Endüstri Mühendisliği

Programı: Savunma Platformları Tezli Yüksek Lisans Programı

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı: Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER

Tez Başlığı: Savaş Uçağı Geliştirme Projelerinin Çizelgelenmesi

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 56 sayfalık kısmına ilişkin, 04 / 06 / 2023 tarihinde tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı %1'dir. Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

ONAY

... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER

Hür kanatlara, hür semalara...

Ahmet Atıl ÇETİN

Ankara – 2023

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgilerini, desteklerini ve zamanını esirgemeyen ve bu çalışmada bana yol gösteren değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Esra DİNLER'e teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde yanımda olan, maddi manevi desteklerini hiç esirgemeyen başta annem ve babam olmak üzere tüm aileme varlıkları ve destekleri sebebiyle çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatımın en başından beri, ulaştığım noktadan bir adım daha ileri gitmem için beni cesaretlendiren, desteklerini ve telkinlerini hiçbir zaman esirgemeyen, ilk öğretmenim ve dedem Ahmet ÇETİN başta olmak üzere bugüne kadar üzerimde emeği olan tüm öğretmenlerime, hocalarıma ve eğitmenlerime, bana göstermiş oldukları sabırları için teşekkür ederim.

Tezimin uygulama bölümünde desteklerini ve değerli yorumlarını benimle paylaşan tüm çalışma arkadaşlarım ve yöneticilerime teşekkür ederim.

ÖZET

Ahmet Atıl ÇETİN

SAVAŞ UÇAĞI GELİŞTİRME PROJELERİNİN ÇİZELGELENMESİ

Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Savunma Teknolojileri ve Sistemleri Anabilim Dalı

2023

Geliştirme faaliyetlerinin uzun zaman aldığı savaş uçağı projelerinde, projenin hedeflenen sürede bitirilmesi ve proje dahilinde gerçekleştirilecek aktivitelerin kendinden sonra gelen aktiviteleri destekleyecek şekilde ilerleyebilmesi adına proje başında yapılan takvimsel öngörülerin doğruluğu çok önemlidir. Bu tarz büyük ölçekli bir proje, özellikle ilk defa gerçekleştiriliyor ise aktivite sürelerinin gerçeğe en uygun şekilde tanımlanması, aktivitelerin öncüllük ilişkilerinin belirlenmesi projenin başarısı açısından önemlidir. Bu çalışmada, ülkemizde ilk defa gerçekleştirilen beşinci nesil savaş uçağı geliştirme projesi dahilindeki aktiviteler arasında öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ilk adım olarak görülmüştür. Öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ile birlikte, gerçekleştirilecek aktivitelerin önceden öngörülemeyecek sebepler ile gecikmesi veya beklenenden çok daha erken bitmesi gibi durumlar da hesaba katılarak iyimser, kötümser ve en olası süreler tanımlanmıştır. Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniğı (Program Evaluation and Review Technique-PERT) ile proje aktivitelerinin beklenen süreleri hesaplanmıştır. Doğrusal karar modeli ile kritik aktiviteler bulunmuş ve projenin beklenen tamamlanma süresi elde edilmiştir. Bulunan bu süre, diğer ülkelerde geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin ilk uçuş ve proje gerçekleşme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar uyumlu olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır. Bununla beraber, müşterinin ihtiyaç tarihini öne çekmesi durumunda farklı süreler için proje gerçekleşme olasılıkları hesaplanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Beşinci Nesil Savaş Uçakları, PERT, CPM, Proje yönetimi.

ABSTRACT

Ahmet Atıl ÇETİN

SCHEDULING OF FIGHTER AIRCRAFT DEVELOPMENT PROJECTS

Başkent University, Institute of Science and Engineering

Department of Defence Technologies and Systems

2023

In fighter aircraft development projects, where development activities take a long time, the accuracy of the calendar predictions made at the beginning of the project is very important in order to complete the project within the targeted time and the activities to be carried out within the project to progress in a way that supports the activities that follow it. Especially if such a large-scale project is carried out for the first time, defining the activity durations in the most realistic way and defining the precedence relations of the activities are important for the success of the project. In this study, defining the predecessor relations among the activities within the fifth-generation fighter jet development project, which was carried out for the first time in our country, was considered to be the first step. Along with the definition of precedence relations, optimistic, pessimistic and most likely durations were defined by considering situations such as delays of the activities to be carried out due to unforeseen reasons or ending much earlier than expected. The expected duration of the project activities was calculated by the Program Evaluation and Review Technique (PERT). With the mathematical model based on linear programming, critical activities were determined and the time for the project to be realized was obtained. By comparing this time with the first flight and project realization times of other fifth generation fighter jet projects succeeded in other countries in the past, an inference was made about how compatible the predictions were. In addition, the project realization probabilities have been calculated for different duration in case the stakeholder's date of need bring forward.

KEY WORDS: Fifth Generation Fighter Aircraft, PERT, CPM, Project Management.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
TABLolar LİSTESİ	viii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. PROJE YÖNETİMİ.....	8
3.1. CPM.....	9
3.2. PERT	10
3.3. Proje Yönetimi İçin Doğrusal Programlama Modeli	11
4. SAVUNMA SANAYİSİNDE MEVCUT DURUM	13
4.1. Savunma Sanayisi Projeleri ve Özellikleri	14
4.2. Savaş Uçağı Geliştirme Süreci.....	14
4.3. Savaş Uçağı Geliştirme Aktivite Adımları.....	15
4.3.1. Konsept belirleme	17
4.3.2. Farklı alternatiflerin analizi	17
4.3.3. Sözleşme imzası.....	18
4.3.4. Planform seçimi	18
4.3.5. Uçak seviyesi teknik çizimler	19
4.3.6. Rüzgâr tüneli testleri	20
4.3.7. Malzeme testleri.....	20
4.3.8. Detay analizler	21

4.3.9. Alt sistem tedarik anlaşmaları.....	21
4.3.10. Hammadde tedariki.....	21
4.3.11. Teknik çizimlerin yayınlanması.....	22
4.3.12. Montaj ekipmanlarının tedariki	22
4.3.13. Alt seviye komponent üretimleri	22
4.3.14. Kalite kontrol	22
4.3.15. Ön gövde montajı	23
4.3.16. Ön orta gövde montajı	23
4.3.17. Orta gövde montajı.....	23
4.3.18. Ana gövde montajı.....	23
4.3.19. Kanat birimlerinin montajı	23
4.3.20. Arka gövde montajı.....	24
4.3.21. Gövde birleşimi.....	24
4.3.22. İniş takımı montajı	24
4.3.23. Stabilizatör montajı.....	24
4.3.24. Motor entegrasyonu	24
4.3.25. Montaj hattı testleri.....	25
4.3.26. Tam boy yorulma testleri	25
4.3.27. Tam boy statik yükleme testleri.....	25
4.3.28. Alt sistem entegrasyonu	25
4.3.29. Elektrik sistemi testleri	26
4.3.30. Yakıt sistemi testleri	26
4.3.31. Hidrolik sistemi testleri.....	27
4.3.32. Mekanik sistem testleri	27
4.3.33. Radar sistemi testleri.....	27
4.3.34. İletişim sistemleri testleri	28
4.3.35. Elektro-optik testleri	28

4.3.36. Uçuş kontrol sistemleri testleri.....	28
4.3.37. İniş takımı testleri.....	29
4.3.38. Silah sistemi testleri.....	29
4.3.39. Motor testleri.....	30
4.3.40. Kuş çarpması testleri.....	30
4.3.41. İklimlendirme testleri.....	30
4.3.42. İlk enerjilendirme öncesi emniyet değerlendirme kurulu	31
4.3.43. Entegre uçak sistemleri testleri	31
4.3.44. Entegre aviyonik sistem testleri.....	31
4.3.45. İlk motor çalıştırma öncesi emniyet değerlendirme kurulu	31
4.3.46. Kızıl-ötesi görünürlük testleri	32
4.3.47. Radar izi testleri.....	32
4.3.48. Yıldırım testleri.....	32
4.3.49. Yerde titreşim testleri	33
4.3.50. Yağmur testleri.....	33
4.3.51. Ağırlık ve balans testleri	34
4.3.52. İlk uçuş öncesi emniyet değerlendirme kurulu.....	34
4.3.53. Taksi testleri	34
4.3.54. Sensor kalibrasyon uçuş testleri.....	35
4.3.55. Güvenli uçuş testleri	35
4.3.56. Çevresel koşullar uçuş testleri	36
4.3.57. Uçak sistemleri uçuş testleri	36
4.3.58. Performans uçuş testleri	36
4.3.59. Yük uçuş testleri	37
4.3.60. Aviyonik sistemler uçuş testleri	37
4.3.61. Silah sistemleri uçuş testleri	38
4.3.62. Düşük görünürlük testleri	38

4.3.63. Kabul uçuş testleri.....	38
5. UYGULAMA	40
5.1. Verilerin Toplanması.....	41
5.2. PERT Metodunun Uygulanması ve Kritik Aktiviteler	46
5.3. Geçmiş Projeler ile Karşılaştırmalar	51
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR	58
EKLER	

EK 1: DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MATEMATİKSEL MODELİ

EK 2: MATEMATİKSEL MODELİN ÇÖZÜMÜ

TABLÖLAR LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 4.1. Savaş Uçağı Geliştirme Adımları	16
Tablo 5.1. Proje Aktiviteleri ve Diğer Bilgiler	42
Tablo 5.2. Proje Aktivitelerinin Beklenen Süre / Varyans Değerleri ile Kritiklik Durumu.	48
Tablo 5.3. Süreye Bağlı Proje Gerçekleşme Olasılıkları	50
Tablo 5.4. Savaş Uçağı Projelerinde Süreler	54



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 4.1. Farklı Kanat Planformları [46]	19
Şekil 5.1. Uygulama Adımları	41
Şekil 5.2. Proje Serimi	45
Şekil 5.3. Kritik Aktivitelerin Proje Seriminde Gösterimi	47
Şekil 5.4. Süreye Bağlı Proje Gerçekleşme Olasılıkları	51
Şekil 5.5. F-22 Savaş Uçağı – Amerika Birleşik Devletleri [53]	52
Şekil 5.6. F-35 Savaş Uçağı – Amerika Birleşik Devletleri [55]	53
Şekil 5.7. SU-57 Savaş Uçağı – Rusya Federasyonu [57]	53

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
CPM	Critical Path Method
PERT	Program Evaluation And Review Technique
UHF	ultra high frequency (ultra yüksek frekans)
V _{AC}	volt alternatif akım
V _{DC}	volt doğru akım
VHF	very high frequency (çok yüksek frekans)



1. GİRİŞ

Askeri sistem geliştirme projeleri, devletlerin iç ve dış tehdit algılamalarına bağlı olarak gereksinimlerini belirlediği, önceden tanımlı bir zaman diliminde maliyet etkin olarak hayata geçirilmesi gereken projelerdir. Askeri sistem geliştirme projeleri, geliştirildiği ülkenin tehdit algılamalarına cevap verecek şekilde, yeni ve/veya henüz ispatlanmamış teknolojilerin kullanıldığı, birbirleri ile tam bir uyum içerisinde çalışması beklenen birçok alt sistemden oluşan ve buna bağlı olarak birçok yüklenicinin dahil olduğu takvim ve maliyet anlamında yüksek riskli projelerdir [1]. Genel olarak kavramsal tasarım süreci ile başlayan askeri sistem geliştirme projeleri, ilgili askeri sistemin envantere alınarak kullanıcıya teslim edilmesi ile sonuçlandırılır. Bu kapsam genelde ilgili sistemin idamesi, bakımı ve envanterden çıkarılmasını da kapsayan ömür devri lojistik desteğini ihtiva eder. Bu süreçte projenin kapsamına, ihtiyaç duyulan sistemin karmaşıklığına, sistemin operasyonel konseptine ve gereksinimlere göre birçok farklı aktivite sıralı ve/veya paralel şekilde ilerletilmelidir.

Günümüzde operasyonel olarak kullanılan ve hali hazırda geliştirme süreçleri devam eden savaş uçakları, ülkelerin askeri operasyon kabiliyetlerini ciddi anlamda arttıran en önemli unsur olmuştur. Bu tarz projelerin başarılı olarak gerçekleştirilmesi ülke havacılık endüstrisinin ilerletilmesine, genel manada temel bilimlerde ve teknolojilerde gelişimin de önünü açması açısından da önemlidir. Ancak savaş uçağı geliştirme projelerinde ön görülemeyen farklı problemler ile karşılaşmış ve çoğu problem geliştirme sürecinin uzamasına sebep olmuştur [2].

Bu noktada aktivitelerin başlama zamanlarının, aktivite sürelerinin ve önceliklerinin, aktivitelerde yaşanacak gecikmelerin genel proje takvimini nasıl etkileyeceği gibi bilgilerin olabildiğince erken aşamalarda bilinmesi ve belirlenmesi savaş uçağı geliştirme projelerinin başarılı olması için önemlidir. Ayrıca savaş uçağı geliştirme projelerinde çok yeni veya önceden hiç kullanılmamış teknoloji ve çözümler ile ilerleniyor olması belirtilen cevaplara olan ihtiyacı arttırmaktadır. Projenin bir savaş uçağı olması ile birlikte havacılık endüstrisinin kendine has katı kurallarının da proje üzerinde ek bir baskı oluşturması planlama süreçlerinin önemini arttırmaktadır.

Bir savaş uçağı geliştirme projesini, özellikle sektörde gerçekleştirilecek ilk savaş uçağı projesi ise, sadece bir savaş uçağı geliştirme projesi olarak görmek yanlış olacaktır. Sektörün bir savaş uçağını geliştirebilecek altyapıları edinmesi, test ve üretim tesislerini

hayata geçirmesi de projenin başarısı için önemlidir. Bu sebeple proje dahilinde hangi testlerin hangi zamanlarda yapılacağını bilmesi, kullanılacak altyapıların belirlenmesi, eksik altyapıların inşası, alt seviye üretim ve test planlarının yapılabilmesi konusunda da sektöre destek sağlayacaktır.

Bu çalışmada savunma sanayisine hizmet veren bir şirketin geliştirmekte olduğu beşinci nesil savaş uçağı projesinde proje gerçekleşme süresinin tahmin edilmesi ve yukarıda anlatılan üretim ve test planlama faaliyetlerine katkıda bulunacak bir proje yönetimi konusu ele alınmıştır. Projenin ilk defa gerçekleştiriliyor olması, üretim ve özellikle test süreçlerindeki olası aksaklıkların öngörülememesi süre anlamında gecikmelere sebebiyet verebilir. Bu sebeple kötümser süre tanımı yapılması projenin başarısına katkı sağlayacaktır. Ayrıca projenin ilerleyen süreçlerde yapılabilecek fazla mesai uygulamaları ile üretim ve test teknolojilerindeki gelişmelerin de iyimser anlamda etkileri olacağından iyimser süre tanımlaması da önem arz etmektedir. İyimser ve kötümser anlamda proje aktivitelerine zaman ataması yapmak ve bu tanımlardan bir sonuç çıkarabilmek adına proje yönetimi ve planlama için PERT tekniği kullanılmış ve analizler gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonucunda elde edilen “beklenen proje gerçekleşme süresi”, geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin gerçekleşme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar doğru olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır.

Yapılan bu çalışma ile bir savaş uçağı geliştirme projesi kapsamında uygulanması gereken belli başlı yönetsel, üretim ve test aktiviteleri ile bu aktiviteler arasındaki öncüllük ilişkileri anlamında literatüre bir referans kazandırmak en önemli amaçtır. Bununla beraber yapılan süre öngörülerini de ilerleyen zamanlarda hayata geçirilecek benzer projeler için bir ilk referans olarak kullanılabilir.

Tezin ikinci bölümünde literatür araştırmasına yer verilmiş olup Critical Path Method (CPM) ve PERT metodlarının kullanıldığı farklı sektör uygulamaları ile ilgili taranan kaynaklara ve kaynaklar ile ilgili özet bilgilere yer verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde ise, proje yönetimi, CPM, PERT ve doğrusal programlama ile ilgili genel bilgiler verilmiştir.

Bu çalışmanın dördüncü bölümünde savunma sanayisi projeleri ve askeri savaş uçağı geliştirme projeleri ile ilgili günümüzdeki mevcut durumlar değerlendirilmiş olup, bu tarz büyük projelerde işletilen süreçler ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Beşinci bölümde uygulama başlığı altında yapılan çalışma sonucunda üretilen çıktıları yer verilmiştir.

Altıncı ve son bölümde sonuçlar ve önerilere değinilmiş, bahse konu olan savaş uçağı geliştirme projesi kapsamında elde edilen sonuçların daha önce hayata geçirilmiş benzer projelerin sonuçları ile karşılaştırılmasına, çalışmanın sonucu ile ilgili değerlendirmelere ve gelecek çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu bölümde PERT ve CPM metotlarının uygulandığı diğer çalışmalar ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Kritik yol metodu ise, bir projenin gerçekleşme süresinin minimize edildiği durumda, hangi aktivitelerin bu süreye direkt olarak etki ettiğini ortaya koyan bir proje yönetim tekniğidir. Bu noktada belirlenen aktiviteler kritik olarak adlandırılır ve proje süresinin hedeften sapmaması için bu kritik aktivitelerin gecikmemesi gerekir.

PERT, yöneticilerin projeleri planlamasına, zamanlamasına ve kontrol etmesine yardımcı olmak için geliştirilmiş bir proje yönetim aracıdır. PERT, çeşitli proje görevlerini tamamlamak için gereken süreyi tahmin etmek için istatistiksel analiz kullanan proje planlama ve çizelgeleme için olasılıksal bir yaklaşımdır. Birçok farklı sektör için kullanılan PERT metodu, projenin beklenen sürelerden daha hızlı ve maliyet etkin tamamlanmasında büyük rol oynamıştır.

Aksoy vd. [3], proje teslim sürelerinde ve maliyetlerde oluşan sapmaların sebeplerini belirlemek ve olası sapmaları en aza indirmek amacıyla otomotiv sektörüne montaj ekipmanları üreten bir firmada aktivite sürelerini ve bütçeyi aynı anda takip edebilen bir proje yönetim aracı ortaya koymayı hedeflemişlerdir.

Farida and Anenda [4], Endonezya’da 114 gün içerisinde hayat geçirilmesi gereken bir asfaltlama projesinde, kritik yolların bulunması ve olasılık kavramı kullanılarak optimum tamamlama süresinin belirlenebilmesi amacıyla PERT yöntemi kullanılmıştır. Farklı senaryoların ortaya çıkarıldığı uygulamada en uygun sonuca ulaşılarak proje başarıyla sonuçlandırılmıştır.

Sadow [5], askeri bir uçak geliştirme projesinde PERT yönteminin nasıl kullanıldığı, farklı ağlarla yönetilen ve birçok farklı adımın olduğu büyük bir projede PERT entegrasyonunun nasıl organize edildiği ile ilgili bir çalışma yapmıştır.

Bintang et al. [6], kapalı devre televizyon projesini zamanında ve bütçe dahilinde tamamlamak adına proje başında yapılan çizelgeleme, planlama ve maliyet öngörülerini gibi aktiviteleri ele almışlardır.

Desticioğlu [7], çalışmasında savunma sanayisi alanında çalışmalar yürüten bir şirketin ilk defa geliştirdiği bir proje kapsamındaki genel planlama sürecini ele almış, aktivite sürelerinin ilk kez hayata geçirilecek bir projede tahmininin zor olması sebebiyle PERT yöntemini kullanmıştır.

Budiawati and Sarno [8] tarafından kablosuz cihaz tedariki yapan bir firmanın, garanti süresi boyunca ürünleri için verdiği değişim, onarım ve geri ödeme süreçlerinin zaman ve maliyet açısından etkinliğini tartışmaya açmış ve PERT metodu kullanılarak sürelerde ve maliyetlerde iyileşmeler sağlamıştır.

Agyei [9] tarafından yapılan çalışmada Gana’da yapılan bir inşaat projesinin tamamlanma süresinin ve proje maliyetinin tahmini için PERT metodu kullanılmıştır. Ayrıca projenin hızlandırılması durumunda oluşacak maliyet değişimleri de ele alınmıştır.

Kutlu [10] tarafından yapılan çalışmasında bir hastane inşaatı projesi kapsamında oluşabilecek problemlerin tanımlanması ve alternatif çözümlerin araştırılması adına kritik faaliyetlerin bulunması, projenin gecikmesine sebep olabilecek farklı kritik yolların araştırılmasını ele almıştır.

Karahan ve Ezin [11] çalışmalarında 52 haftada bitmesi öngörülen bir inşaat projesinin gerçekleşme süresinin kısaltılmasına ve bütçenin olabildiğince minimize edilmesi adına bir çalışma gerçekleştirmişlerdir.

Coşkun ve Ekmekçi [12] çalışmalarında bir yol ve kavşak inşaatı projesine gelen teklifin maliyet ve süre açısından irdelenerek proje sonunda gerçekleşen maliyetler ile karşılaştırılmasını konu almışlardır. Bu sırada projenin maliyet sapmalarının önceden belirlenmiş sınır değerlere uyumunu irdelemişlerdir.

Daniel and Gabriela [13] çalışmalarında bir projenin gerçekleşmesi için gereken proje adımlarının belirlenmesi, Avrupa fonlarıyla gerçekleşen projeler için özel olarak tasarlanmış bir projeyi hayata geçirmek ve süre minimizasyonu yapmayı amaçlamışlardır.

Ashadi et al. [14] Indonesian Sunda Strait köprüsü çalışmalarında proje süresi tahmini için PERT ve PERT’in farklı bir yorumu olan M-PERT yöntemlerini kullanarak çıkan sonuçların simülasyonlar sonucu çıkan sonuçlar ile karşılaştırmaya yer vermişlerdir. .

Ahmed et al. [15] ürün geliştirme projelerinde risk yönetimini destekleyen tekniklerin bir incelemesini sunmayı amaçlamadıkları çalışmalarında PERT yönteminin proje süresini tahminine katkısı sebebiyle kritik yol yöntemi ile birlikte kullanılması durumunda proje yönetimine katkısını değerlendirmişlerdir.

Aliyu [16] çalışmasında Yola Federal Teknoloji Üniversitesi’nde bir binanın inşasında CPM uygulanarak, proje gerçekleşme süresini 41 haftadan 32 haftaya düşürülebilmesine olanak olduğunu ortaya koymuştur.

Zareei [17] çalışmasında İran’da kurulan bir biogaz tesisinin inşaat projesi için CPM kullanarak, projenin analizi ve planlamasına odaklanmıştır. Proje aktivitelerinin

kritikliklerinin belirlendiği çalışmada, herhangi bir gecikme olmaması durumunda inşaatın 38 haftada bitirilebileceği yorumu yapılmıştır.

Ljevo and Vukomanović [18] çalışmalarında Bosna Hersek'te herhangi bir proje yönetim aracı veya metodu kullanmayan 50 kadar inşaat şirketinin projelerinde karşılaştıkları problemleri incelemişler ve buna bağlı olarak proje yönetim araç ve metodlarının kullanımının olası maliyet ve takvim aşımalarının önüne geçilebileceği değerlendirmesinde bulunmuşlardır.

Chen et al. [19] çalışmalarında maden havalandırma sistemlerinde kullanılan doğal, yarı kontrollü ve tam kontrollü havalandırma sistemlerini gözden geçirerek CPM ile olası havalandırma basınç düşümünün minimize edilebilmesi için tek fanlı ve çift fanlı iki sistem üzerinde çözümlemeye gidilmiştir. Sonuç olarak daha esnek, daha verimli ve daha sağlam bir havalandırma sistemine ulaşılmıştır.

Takakura et al. [20] bu çalışmada belirsiz olan aktivite sürelerinin üstesinde gelmek adına geçmiş verileri kullanarak projenin hedeflenen süre içerisinde bitirilmesi hedeflenmiş, bu veri seti üzerinden CPM kullanılarak aktivitelerin uygulanma sırası tanımlanmıştır.

Cheng [21] çalışmasında tren trafiği üzerinde zaman ve kaynak kısıtı ile optimal bir sonuca ulaşabilmek adına CPM kullanmış ve olası darboğazların bulunmasına katkı sağlama anlamında bu metodu geleneksel yöntemlerden daha faydalı olacağı yorumunu yapmıştır.

Pebrianto et al. [22] çalışmalarında bir kuruma kurulacak olan toz toplama makinasının kurulum sürecinde CPM ve PERT metodlarını kullanarak proje süresini minimize etmeyi amaçlamışlardır. 75 günlük hedef sürenin CPM ile 53, PERT ile 54 güne kadar kısaltılabileceği konusunda bir çözüm önermişlerdir.

Cynthia [23] çalışmasında bir ev inşaatı projesinde CPM ve PERT kullanarak kritik adımları belirlemiş ve her iki yöntemle de proje bitiş süresini CPM için 151, PERT için 150 gün olarak birbirlerine çok yakın bularak, her iki yöntemin de bu projede uygulanmasının etkili ve verimli olacağı sonucuna ulaşmıştır.

Kholil et al. [24] çalışmalarında Endonezya'da başlatılan bir ev inşası projesinde 173 günlük proje gerçekleşme süresini CPM ile 131 PERT ile 136 gün gibi yüksek bir miktarda kısaltılabileceğini görmüşlerdir.

Dundas and Krentler [25] tüketim malları kapsamında yeni ürün geliştirme süreçlerinde birçok hatanın yapılmasına dikkat çekerek bu aşamada hataları minimize etmek anlamında CPM kullanımını önermişlerdir.

Gupta [26] çalışmasında CPM'in sadece proje başlangıcında değil bütün bir süreç boyunca ele alınmasını önererek, kritik yolların tekrar tekrar hesaplanması adına bir model ortaya koymuştur.

Leachman and Kim [27] çalışmalarında CPM'in yanında proje aktivitelerinde kaynak yükleme eğrilerini de ele alarak envanter dengesini kurmak adına bir model sunmaktadırlar.

Badruzzaman et al. [28] çalışmalarında çocuklar için başlık üreten bir sürecin planlanmasında CPM ve PERT kullanarak üretim sürecini planlamışlar ve 15 düzine ürün üretimini 4,28 saatten 3,822 saate düşürerek üretim hızında iyileşme sağlamışlardır.

Malcolm et al. [29] çalışmalarında ABD donanması için geliştirilen Polaris nükleer denizaltı programında araştırma ve geliştirme programının planlanması, kontrolü ve ilerlemenin ölçülmesi adına PERT uygulaması yapmışlardır.

Ba'Its et al. [30] çalışmalarında büyük projeler için uygun olmayan çizelgeleme yöntemlerine karşın PERT ve CPM önerisinde bulunmuşlardır. Sonuç olarak CPM ile 135 gün, PERT için %68,00 oranla 139,78 gün, %95,00 oranla 144,56 gün ve %99,70 oranda 149,34 günlük proje gerçekleşme sürelerine ulaşmışlardır.

Amaruddin et al. [31] çalışmalarında ilk etapta 180 günde ve 7,939,812,640 Rupiyat maliyetle bitirilmesi planlanan bir projenin PERT ile planlanması sonucunda günde 2 saat fazla mesai ile %99,20 oranla 176 günde 7,649,700,010 Rupiyat maliyetle bitirilebileceğini öngörmüşlerdir.

Literatür taraması sırasında araştırmacıların birçok farklı sektör için proje planlaması çalışmalarına katıldığı görülmüştür. Ancak bu tarama sırasında savunma sanayisi ve askeri havacılık alanında yapılan çalışmaların çok kısıtlı olduğu belirlenmiştir. Bu sebeple savaş uçağı geliştirme projesi kapsamında yapılacak olan aktivitelerin planlanması, aktiviteler arası öncüllük ilişkilerinin ve kritik aktivitelerin belirlenmesi ile projenin gerçekleştirilme süresinin öngörülmesi adına bu çalışma ortaya konmuştur.

Bu çalışmaya konu olan savaş uçağı geliştirme projesi kapsamındaki aktivitelerin sürelerinde kesinlik gözlenmemesi sebebiyle uygulanacak metot olarak PERT seçilmiştir. Ayrıca kritik aktivitelerin bulunabilmesi adına da doğrusal programlama modeli ile çözüme ulaşılmıştır.

3. PROJE YÖNETİMİ

Proje, daha önce hiç yapılmamış benzersiz bir hizmet veya tasarım yaratmak için, belirli bir süre için hayata geçirilen, dikkatlice planlanmış aktiviteler bütünüdür [32, 33]. Projeler özgün bir hedefe, faydalı bir değişime ya da herhangi bir şekilde değer katmak adına ortaya konur. Her şey gibi projelerde belirli kaynaklar tüketir ve hiçbir kaynak sınırsız değildir. Bu sebeple projelerin başarılı bir şekilde ilerletilebilmesi ve sonuçlandırılabilmesi için planlı bir çalışma ile ilerlemek önemlidir. Bu noktada ise proje yönetimi devreye girer.

Proje yönetimi, bir projenin hayata geçirilebilmesi için çalışan bir ekibe, önceden belirlenmiş bir kapsam, zaman ve bütçe kısıtı ile liderlik etme sürecidir [34]. Proje yönetimi olgusu medeniyetin kurulmaya başlandığı ilk dönemlerden beri uygulamaya konulmuş ve genelde inşaat projelerinde mimarlar ve mühendisler tarafından üstlenilmiştir. Proje yönetiminin sistematik bir temele oturması ise yirminci yüzyılın ortalarında karmaşık inşaat, mühendislik ve savunma projelerinin hayata geçirilmesi sırasında olmuştur.

Proje yönetimi konusunda ilk sistematik çalışmayı Gantt Çizelgesinin tasarımcısı Henry Gantt ortaya koymuştur. Gantt şeması ile proje takvimi birbiri ardına gelen ve birbiri ile ilişkili aktivitelerin görselleştirilmesi ve anlık statünün görülebilmesi adına proje yöneticilerine yardımcı olan bir yöntemdir.

Proje yönetimi konusunda Henry Gantt ile birlikte en önemli iki fikir babasından diğeri olan Henri Fayol ise proje yönetiminin beş fonksiyonunu tanımlamıştır. Bu beş fonksiyon aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Projenin başlatılma aşaması
- Projenin planlama ve tasarım aşaması
- Projenin yürütme aşaması
- Projenin denetlenme aşaması
- Projenin bitişi

Projenin başlatılması aşamasında projenin genel kapsamı tanımlanır. Riskler ve fırsatlar ortaya konur, projeye uygun bir organizasyon tanımlanır, genel aktiviteler gözden geçirilir ve en önemlisi bütçe ve takvim kısıtları ortaya konur.

Planlama sürecinde ise projeye uygun bir şekilde hayata geçirilmesi gereken aktiviteler detaylandırılır. Maliyet tahminleri ve kaynak planlamaları bu süreçte yapılarak proje için genel bir takvim ortaya konur. Ayrıca proje dahilindeki rol ve sorumluluklar bu süreçte tanımlanır.

Planlama sürecinde ortaya konan plana göre, proje kapsamında tanımlanmış gereksinimlerin sağlanması amacıyla hayata geçirilen aktiviteler ve ortaya konan çaba ve bu çaba sonucunda meydana getirilen çıktılar projenin yürütme bölümünü oluşturur.

Denetleme süreci ise bir projenin başarısı için belki de en kritik süreçtir. Zira proje süreçleri içerisinde yapılan aktivitelerin denetlenerek olası sorunları en erken zamanda fark edilmesi ile olası takvim ve maliyet zararları en aza indirilir. Ayrıca denetleme süreci ile proje planına karşılık ortaya çıkarılan çıktılar izlenerek proje performansı hakkında yorum yapılabilir olası farklılıklar ortaya konur.

Projenin bitişi ise proje kapsamındaki bütün sözleşmelerin kapatılması, gerekli dokümantasyonun arşivlenmesi ve proje süresinde öğrenilen derslerin kayıt altına alınarak, başlatılan projenin resmi olarak sonuçlandırılmasını kapsar.

3.1. CPM

CPM bir dizi proje aktivitesinin planlanması adına ortaya konan bir algoritmadır [35]. Bu algoritma ile kritik yol olarak adlandırılan proje aktiviteleri dizisi belirlenir ve bu aktivitelerin bitirilmesi için gereken süre projenin gerçekleşme süresi olarak verilir. Kritik yol üzerindeki aktiviteler kritik aktivite olarak tanımlanır ve bu aktivitelerdeki herhangi bir gecikme proje gerçekleşme süresinde de gecikmeye sebep olur. CPM kullanılırken öncelikle bir proje serimi oluşturulur. Bu serim oluşturulurken aşağıdaki soruların sorulması gerekir [36].

- Hangi aktivite başlangıç aktivitesidir?
- Hangi aktivite bitiş aktivitesidir?
- Aktiviteler arasındaki öncüllük ilişkileri nelerdir?
- Aktiviteler arasındaki ardıllık ilişkileri nelerdir?
- Aktiviteler arasında paralellik ilişkileri nelerdir?

Daha sonra hesaplamaların yapılabilmesi için ayrıt tabanlı serim üzerinden aşağıdaki değerler tanımlanır.

$P_{i,j}$: (i,j) aktivitesi süresi

E_i : i aktivitesi en erken gerçekleşme zamanı

C_i : i aktivitesinin en geç gerçekleşme zamanı

$S'_{i,j}$: (i,j) aktivitesinin en erken başlama zamanı

$C'_{i,j}$: (i,j) aktivitesinin en erken tamamlanma zamanı

$S''_{i,j}$: (i,j) aktivitesinin en geç başlama zamanı

$C''_{i,j}$: (i,j) aktivitesinin en geç tamamlanma zamanı

Ψ_t : (i,j) aktivitesinin toplam bolluğu

Ψ_f : (i,j) aktivitesinin bolluğu

Bu tanımlamalar yapıldıktan sonra ilk aktivitenin başlama zamanı sıfır kabul edilerek

$$E_j = \max\{E_{i_1} + P_{i_1,j}, E_{i_2} + P_{i_2,j}, \dots, E_{i_n} + P_{i_n,j}\} \quad (3.1)$$

(i₁, i₂, ..., i_n j aktivitesi için bitmiş olması gereken aktiviteleri tanımlamaktadır.)

(i,j) aktivitesinin en erken başlama ve tamamlanma süreleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$S'_{i,j} = E_i \quad (3.2)$$

$$C'_{i,j} = E_i + P_{i,j} \quad (3.3)$$

Proje tamamlanma süresi de aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$C_{max} = E_n \quad (3.4)$$

Bu hesaplamalar yapıldıktan sonra son aktiviteden geriye doğru gelinerek en geç bitme süreleri hesaplanır.

$$L_i = \min\{L_{j_1} - t_{i,j_1}, L_{j_2} + t_{i,j_2}, \dots, L_{j_v} + P_{i,j_v}\}, i < n \quad (3.5)$$

(j₁, j₂, ..., j_n j aktivitesinden önce gelen ardıl aktiviteleri tanımlamaktadır.)

(i,j) aktivitesinin en geç başlama ve tamamlanma süreleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$C''_{i,j} = L_j \quad (3.6)$$

$$S''_{i,j} = L_j - P_{i,j} \quad (3.7)$$

Bu adımdan sonra her (i,j) aktivitesi için bolluk aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$\Psi_{f_{i,j}} = E_j - E_i - P_{i,j} \quad (3.8)$$

Bunun sonucunda sıfır bolluğa sahip aktiviteler kritik olarak tanımlanır, bu aktivitelerin süreleri toplanır ve proje süresine ulaşılır. CPM metodunda her aktivitenin süresi önceden bilinir ve bu süre değişiklik göstermez.

3.2. PERT

PERT 1957 yılında ortaya çıkarılan merkezi limit teoremi kullanılarak projeler için takvim ve bütçe çalışmalarında kullanılan bir proje yönetim metodudur [37]. Bu metotta dikkate alınan her aktivite için, daha önceki projelerden toplanan verilere veya muhakeme ve deneyime bağlı olarak, bütçe veya takvimsel anlamda sırasıyla olası iyimser, olası ve kötümser tahminler yapılır [38]. İyimser (t_a), olası (t_b) ve kötümser (t_c) tahminler sonucunda proje gerçekleşme olasılığı için gereken beklenen süre (t_e), varyans (σ²) ve standart sapma (S) değerlerine ulaşılır [36].

$$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6} \quad (3.9)$$

$$\sigma^2 = \left[\frac{t_c - t_a}{6} \right]^2 \quad (3.10)$$

$$S = \frac{t_c - t_a}{6} \quad (3.11)$$

$$\sigma_{proje}^2 = \sum_{i \in \text{Kritik Aktiviteler}} \sigma_i^2 \quad (3.12)$$

$$S_{proje} = \sqrt{\sigma_{proje}^2} \quad (3.13)$$

Ayrıca PERT ile projenin hedeflenen bir sürede (t_d) tamamlanması olasılığı ile ilgili bir hesaplama da yapılabilir. Bu sebeple Z'ye ihtiyaç duyulur. Bulunan Z değeri ile normal dağılım grafiği üzerinden hedef sürenin gerçekleşme olasılığı bulunabilir.

$$Z = \frac{t_d - t_e}{S} \quad (3.14)$$

3.3. Proje Yönetimi İçin Doğrusal Programlama Modeli

Proje serimi üzerinden farklı yollarla kritik aktivitelere ve kritik yol süresine ulaşılabilir. Ancak bu durum daha az aktivitenin oluşturduğu serimler için geçerli iken birçok aktiviteden oluşan karmaşık serimlerde, kritik aktivitelerin ve kritik yol süresinin bulunabilmesi için doğrusal programlamadan yararlanılabilir. Doğrusal programlama, kompleks bir işlem içerisinde belirlenen bir hedefe en iyi şekilde ulaşmak için alınması gereken detaylı kararların yolunu belirlemek için uygulanan bir yöntemdir [39]. Oluşturulan matematiksel modelin herhangi bir bilgisayar programı ile çözülmesi sonucunda kritik aktivitelere ve kritik yola ait süreye kolayca ulaşabiliriz.

Çalışmada matematiksel modelin oluşturulmasında kritik yol analizi için önerilen matematiksel model kullanılmıştır. Doğrusal programlama ile kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modele ait karar değişkeni ve parametreler aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır:

Karar değişkeni

x_j j olayının başlama zamanı $j = 1, \dots, n$

Parametreler

t_{ij} (i, j) faaliyetinin süresi

$$Enk z = x_n - x_1 \quad (3.15)$$

$$x_j \geq x_i + t_{ij} \quad \forall (j, i) : i, j' \text{nin öncülü} \quad (3.16)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3.17)$$

Kritik yol analizinde kullanılan matematiksel modelde Eş.3.15 ile verilen amaç fonksiyonu projenin tamamlanma süresinin en küçüklenmesidir. Eş.3.16 ile verilen kısıtlar her bir öncüllük ilişkisi için bir görevin tamamlanmadan diğer görevin başlamayacağını garanti etmektedir. Eş.3.17 ile verilen kısıtlar ise karar değişkenlerinin negatif olmamasını sağlamaktadır.



4. SAVUNMA SANAYİSİNDE MEVCUT DURUM

Savunma sanayisi veya bir başka deyişle silah endüstrisi, devletlerin silahlı kuvvetleri ve güvenlik güçleri için ya da sivil vatandaşlar için silah üreten bu teknolojileri geliştiren sektör olarak tanımlanabilir. Ancak günümüz dünyasında silahlar dışında iletişim sistemleri, uydular, gözetleme ve keşif sistemleri gibi aslında silah olmayan ama güvenlik güçlerini savaş ortamında avantajlı duruma getirebilecek diğer birçok sistemin de tasarımı, üretimi ve idamesi savunma sanayisi tarafından hayata geçirilir.

Savunma sanayisine devletler tarafından ayrılan kaynaklar günden güne arttırılmakta ve bu noktada geliştirme projelerinin sayılarında da bu duruma paralel olarak artış gözlenmektedir. Askeri harcamalar, silah ticareti ve silah kontrolü için veri analiz ve tavsiyelerde bulunmak adına kurulan Stockholm Uluslararası Barış Araştırma Enstitüsü (Stockholm International Peace Research Institute-SIPRI) 2022 yılı verilerine göre 2022 yılında dünyadaki savunma sanayisi harcamaları bir önceki yıla göre %3,7 artarak 2,24 Trilyon Amerikan Doları olarak gerçekleşmiştir ve bu durum 2015 yılından beri artarak ilerlemiştir [40]. Bu durum dünya ortalamasında devletlerin gayri safi milli hasıllarının yaklaşık %2'sini savunma harcamalarına ayırdığı sonucunu ortaya çıkarıyor.

Günümüzde savunma sanayisi anlamında en büyük kaynak ayırımını 2022 yılı verilerine göre 877 Milyar Amerikan Doları ile Amerika Birleşik Devletleri yapmaktadır. Bu miktar tüm dünya savunma harcamalarının %39'una tekabül etmektedir. ABD'yi kendilerinin açıkladıkları resmi veriler olmasa da yapılan tahminlere göre 292 Milyar Amerikan Doları ile Çin Halk Cumhuriyeti ve 86,4 Milyar Amerikan Doları ile Rusya Federasyonu izlemektedir [40].

Türkiye, 2022 SIPRI verilerine göre bir önceki yıla göre %26'lık bir düşüşle 10,6 Milyar Amerikan Doları savunma sanayisi harcamasıyla dünyada en çok savunma sanayisi harcaması yapan yirmi üçüncü ülkedir. Bu miktar Türkiye gayri safi milli hasıllarının %1,2'si olarak gerçekleşmiş ve dünya ortalamasının altında gerçekleşmiştir [40].

Türk savunma sanayisi 2022 yılında savunma ve havacılık alanında 4,4 Milyar Amerikan Doları ihracat ile tarihinin en yüksek sektörel ihracat rakamına ulaşmıştır. Bu noktada en önemli destekleyici unsurun savunma sanayisi proje sayısının 812'ye ve bu projeler için ayrılan kaynağın 60 Milyar Amerikan Doları seviyelerine çıkarılması etkin olmuştur [41]. Türkiye hali hazırda kara platformlarından savaş gemilerine, silah ve

mühimmatlardan taktik füze sistemlerine birçok farklı amaç ve konseptte sistem tasarımı ve üretimi yapmaktadır.

4.1. Savunma Sanayisi Projeleri ve Özellikleri

Askeri sistemleri, sivil sistemlerden ayıran en büyük özellikleri; hata paylarının çok düşük olması, zorlu savaş koşulları altında da tam performansla çalışmaları, uzun depolama süreçleri geçirseler dahi ilk günkü gibi performans göstermeleri olarak sıralanabilir. Ayrıca kullanılan standartlar ve tabii olunan regülasyon ve kanunlar, kapsamlar ve kullanılan teknolojiler anlamında da sivil sistemlerden ayrışır. Bir diğer ayrışılan nokta ise harcanan kaynaklar ve proje süreleridir.

Savunma sanayisi projeleri bilindiği üzere devletlerin ve güvenlik güçlerinin ihtiyaçlarını yerine getirmek için ortaya çıkan projelerdir. Bu projelerin bazıları birkaç sene içerisinde sonuca ulaştırılabilirken, gemi, tank ve benzeri platform seviyesinde projeler uzun yıllar süren tasarım ve üretim süreçlerine sahiptir. Bu noktada hem kullanılan teknolojilerin en üst seviyede olması hem de genel havacılık isterlerinin çok katı ve zorlayıcı olmasından kaynaklı olarak savaş uçakları başı çekmektedir.

Ortalama proje geliştirme süreleri anlamında on yıldan fazla sürede hayata geçirilen savaş uçağı projelerinde, maliyetler anlamında da milyarlarca dolarlık bütçeler harcanır. Bu kadar uzun süren ve bu kadar büyük bütçelere sahip projelerin başarıya ulaşabilmesinde proje yönetimi aktivitelerinin önemi büyüktür. Özellikle kaynak planlaması, bütçelendirme ve hayata geçirilecek proje aktivite adımlarının sıralaması projelerde oluşabilecek gecikmelerin önüne geçmek için proje başlangıcından itibaren ele alınmalı ve yapılan planlamalara uygun bir şekilde ilerlenmesi noktasında denetimler ile desteklenmelidir.

4.2. Savaş Uçağı Geliştirme Süreci

Bir savaş uçağı geliştirme projesi öncelikle konsept ve kapsamın tanımlanması ile başlar. Bu aşamada ihtiyaç sahibi devlet ve kullanıcı askeri birimlerin ihtiyaçları ortaya konularak en optimal sistemin ne olacağına karar verilir. Kapsam belirlendikten sonra gereksinimlerin ortaya çıkarılması, bu gereksinimlerin projeyi hayata geçirecek ekipler tarafından analiz edilmesi ve daha detaylı bir biçimde alt sistemlere indirgenmesi proje başında yapılması gereken en önemli aktivitelerdir. Bu noktadan sonra tasarım süreçleri ile devam edilen projede, üretim, test, doğrulama ve kabul süreçleri olarak basite indirgenebilir. Ancak gerçekte yüzbinlerce farklı aktivitenin hayata geçirilmesi, üretilecek ve entegre edilecek binlerce sistemin tasarımı veya tedariki, binlerce kişiden ve onlarca farklı şirket ve

tedarikçinin organizasyonu, ortaya konulan platformun testleri ve belirli regülasyonlara uyumun gösterimi anlamında yapılacak yüzlerce farklı testin gerçekleştirilmesi gibi birçok farklı zorlu sürecin bütçe ve takvim kısıtı altında hayata geçirilmesi gerekir. Testlerin üretimle, üretimin tasarımıyla desteklenmesi projeyi başarıya ulaştıracak olan en önemli noktadır.

Uygulanacak her bir aktivite bir savaş uçağı platformu için tekil anlamda çok önemli olsa da bazı aktivitelerin gecikmesinden proje direkt olarak etkilenebilir. Bu sebeple hangi aktivitelerin kritik aktivite olduğunun bilinmesi o aktivitelere girdi sağlayacak süreçlerde daha dikkatli davranılması anlamında proje yöneticilerine bir ışık tutacaktır. Kritik aktivite adımlarının bilinmesi ve diğer aktiviteler ile ilgili ilişkilerinin ortaya konulabilmesi için proje yönetim teknikleri kullanılmaktadır.

Savaş uçaklarının savunma sistemleri anlamında en zorlayıcı, en karmaşık ve en yüksek teknolojilerin kullanıldığı platformlar olması ve bir savaş uçağı geliştirmek noktasında ilk defa aksiyon alınması durumunda, tecrübe eksikliği ve bilinmezlikler noktasında birçok görünen görünmeyen proje riski vardır. Risklerin tanımlanabilmesi, ortadan kaldırılması, bu mümkün değil ise riskin en aza indirilmesi proje yönetimi aktiviteleri içinde önemli süreçtir.

4.3. Savaş Uçağı Geliştirme Aktivite Adımları

Detayına bakıldığında yüzbinlerce adımdan oluşan bir savaş uçağı geliştirme projesinde aktiviteleri genellemek gerekirse konsept belirleme ile başlayan, kabul testleri ile sonlandırılan genel bir aktivite listesi çıkarılabilir. Aktivite Listesi Tablo 4.1 ile verilmektedir. Her bir aktivitenin ne amaçla yapıldığı, kapsamı ve aktiviteler ile ilgili genel bilgiler de bu bölümün ilerleyen sayfalarında verilmektedir.

Tablo 4.1. Savaş Uçağı Geliştirme Adımları

Aktivite #	Aktivite	Aktivite #	Aktivite
1	Konsept Belirleme	33	Radar Sistemi Testleri
2	Farklı Alternatiflerin Analizi	34	İletişim Sistemleri Testleri
3	Sözleşme İmzası	35	Elektro-Optik Testleri
4	Planform Seçimi	36	Uçuş Kontrol Sistemleri Testleri
5	Uçak Seviyesi Teknik Çizimler	37	İniş Takımı Testleri
6	Rüzgâr Tüneli Testleri	38	Silah Sistemi Testleri
7	Malzeme Testleri	39	Motor Testleri
8	Detay Analizler	40	Kuş Çarpması Testleri
9	Alt Sistem Tedarik Anlaşmaları	41	İklimlendirme Testleri
10	Hammadde Tedariki	42	İlk Enerjilendirme Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu
11	Teknik Çizimlerin Yayınlanması	43	Entegre Uçak Sistemleri Testleri
12	Montaj Ekipmanlarının Tedariki	44	Entegre Aviyonik Sistem Testleri
13	Alt Seviye Komponent Üretimleri	45	İlk Motor Çalıştırma Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu
14	Kalite Kontrol	46	Kızıl-Ötesi Görünürlük Testleri
15	Ön Gövde Montajı	47	Radar İzi Testleri
16	Ön Orta Gövde Montajı	48	Yıldırım Testleri
17	Orta Gövde Montajı	49	Yerde Titreşim Testleri
18	Ana Gövde Montajı	50	Yağmur Testleri
19	Kanat Birimlerinin Montajı	51	Ağırlık ve Balans Testleri
20	Arka Gövde Montajı	52	İlk Uçuş Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu
21	Gövde Birleşimi	53	Taksi Testleri
22	İniş Takımı Montajı	54	Sensor Kalibrasyon Uçuş Testleri
23	Stabilizatör Montajı	55	Güvenli Uçuş Testleri
24	Motor Entegrasyonu	56	Çevresel Koşullar Uçuş Testleri
25	Montaj Hattı Testleri	57	Uçak Sistemleri Uçuş Testleri
26	Tam Boy Yorulma Testleri	58	Performans Uçuş Testleri
27	Tam Boy Statik Yükleme Testleri	59	Yük Uçuş Testleri
28	Alt Sistem Entegrasyonu	60	Aviyonik Sistemler Uçuş Testleri
29	Elektrik Sistemi Testleri	61	Silah Sistemleri Uçuş Testleri
30	Yakıt Sistemi Testleri	62	Düşük Görünürlük Testleri
31	Hidrolik Sistem Testleri	63	Kabul Uçuş Testleri
32	Mekanik Sistem Testleri		

4.3.1. Konsept belirleme

Her ülkenin farklı tehdit algılamaları ve buna bağlı olarak farklı savunma ve savaş doktrinleri olsa da her askeri sistem bir operasyonel ihtiyaç üzerine tasarlanır ve kullanılır. Operasyonel ihtiyaçlar hükümetler ve askeri kurumlar tarafından ulusal güvenliği sağlamak adına, değişen tehdit algılamaları, askeri risk ve fırsatlar, gelişen teknolojiler, politik ve ekonomik koşullar göz önünde bulundurularak belirlenir.

Operasyonel ihtiyacın belirlenmesi sonucunda iki soruya cevap aranır “Neye ihtiyacımız var?” ve “Neden bu sisteme ihtiyaç duyuluyor?”. Bu soruların cevabına bağlı olarak Konsept Belirleme faaliyetlerine başlanır [42]. Konsept belirleme faaliyetleri genel olarak güncel ve yakın gelecek teknolojilerinin araştırıldığı, kabiliyetlerin irdelendiği, neyin mümkün olup neyin mümkün olmadığına ortaya konulduğu süreçtir.

Bu sürecin sonucunda problem tam anlamıyla tanımlanır, çözüm uzayı ve alternatifler ile olmazsa olmaz olarak tanımlanabilecek operasyonel kriterler belirlenir. Bu süreçte yapılacak bir hata veya eksik, projenin ilerleyen aşamalarında tekrar ve tekrar aynı süreçlerin işletilmesinin önüne geçeceği için projenin başarısı için önemlidir.

4.3.2. Farklı alternatiflerin analizi

Konsept belirleme sürecinden sonra ortaya konulan farklı alternatifler, belirli kriterler göz önünde bulundurularak analiz edilir. Bu kriterler hükümet ve askeri kurumların belirleyeceği operasyonel ihtiyaçlara uygun seçilir. Bir savaş uçağı için bu kriterler;

- i. Maksimum hız
- ii. İrtifa
- iii. Faydalı yük
- iv. Menzil
- v. Manevra
- vi. Korunma
- vii. Güvenilirlik
- viii. Tamir edilebilirlik
- ix. Satın alma maliyeti
- x. İşletme maliyeti
- xi. Boyutlar

gibi özellikler olabilir [43]. Önceden belirlenen bu tarz özelliklere göre farklı alternatifler değerlendirilerek üst seviyede nasıl bir tasarıma ihtiyaç duyulduğu belirlenir.

4.3.3. Sözleşme imzası

Sözleşme kelime anlamı olarak, hukuki sonuç doğurmak amacıyla iki veya daha çok kişinin, kuruluşun karşılıklı ve birbirine uygun irade beyanlarıyla gerçekleşen işlemdir [44]. Hemen hemen her konuda olduğu gibi askeri projelerde de ihtiyaç makamı ve yüklenici firma arasında bir sözleşme görüşmeleri ve bu sürecin sonucunda proje ile ilgili sözleşme imzası yapılır.

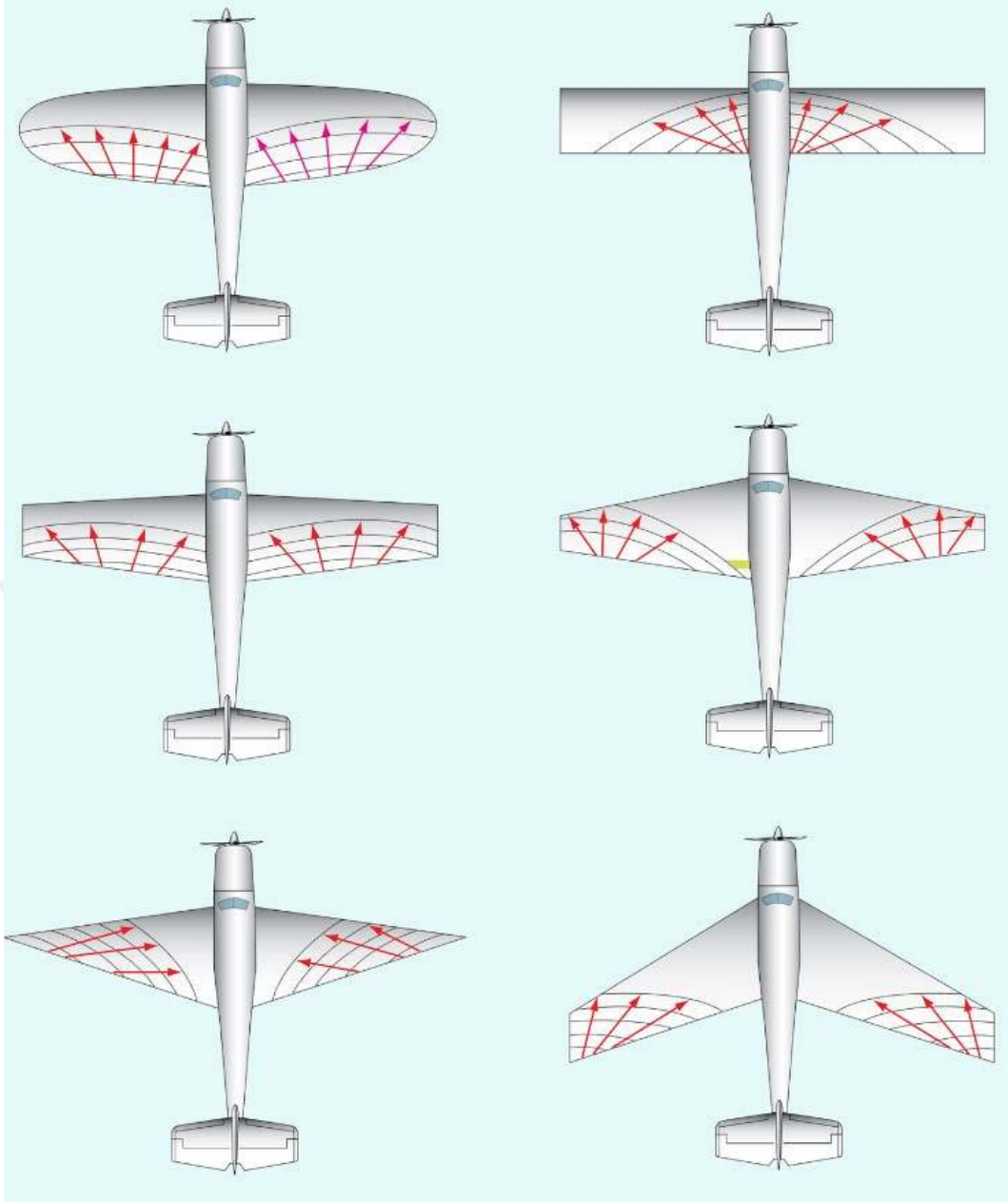
Askeri projelerin sözleşmelerinde; tasarımı yapılacak sistem ile ilgili en üst seviye gereksinimler, uyulması gereken kanunlar, yönergeler ve standartlar, oluşturulması beklenen dokümanlar ve bu dokümanların içerikleri, yapılması beklenen her türlü aktivitenin tanımlandığı iş tanımı, teminat mektupları, satın alım planları ve benzeri bilgiler bulunur.

Bu süreçte tüm sözleşme maddeleri üzerinden geçilerek sözleşme üzerinde gerekli değişiklikler ve düzeltmeler yapılarak sözleşme imzalanır. Sözleşme imzası ile bir proje resmi olarak başlatılmış olur. Zira konsept belirleme ve farklı alternatiflerin analizi süreçleri sonrasında herhangi bir proje başlatılmayabilir.

4.3.4. Planform seçimi

Planform bir uçağın kanatlarının ve diğer uçuş kontrol yüzeylerinin izdüşümü olarak tanımlanır. Hava araçları üzerindeki kaldırma kuvvetlerinin klasik kanat teorisi kullanılarak tahmin edilmeye çalışıldığı ve her uçuş kontrol yüzeyinin tekil olarak analiz edildiği ilk çalışmaların yerini, özellikle yüksek manevra kabiliyetine sahip uçakların ortaya çıkması ile birlikte kanard, kanat ve kuyruk tasarımlarının birbirleri ile ilgili etkileşimlerine dikkat çekilmeye başlandı [45].

Kanat ve uçuş kontrol yüzeylerinin şekilleri, birbirlerinden uzaklıkları, hangi uçuş kontrol yüzeylerinin kullanılacağı, birbirleri arasındaki açısal ilişkiler ve benzeri birçok konunun irdelendiği süreçte, uçağın genel performans kriterlerine uygun bir planform seçimi yapılmaya çalışılır. Bu süreçte günümüzde farklı analiz programları kullanılmaktadır. Farklı kanat planform tasarımlarına ilişkin örnek bir görsel Şekil 4.1.'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Farklı Kanat Planformları [46]

4.3.5. Uçak seviyesi teknik çizimler

Teknik çizimler bir şeyin nasıl çalıştığını veya üretildiğini görsel olarak anlatmaya yarayan çizimler oluşturma eylemidir. Teknik çizimler endüstri ve mühendislikte fikirlerin iletilebilmesi adına önemlidir. Teknik çizimlerde, tasarımlar sırasında kullanılan eskizlerin ve taslakların her kişi tarafından aynı şekilde anlaşılması adına önceden belirlenmiş referans standartlar, belirli sembol setleri, perspektif kuralları, ölçü birimleri, notasyonlar, stiller ve belirli sayfa düzenleri kullanılarak oluşturulur.

Projeler kapsamında oluşturulan teknik çizimler üretim aşamalarında parçaların nasıl ve hangi boyutlarda üretileceğini, hangi renge boyanacağı, ne tür işlemlerde geçirileceği gibi birçok farklı bilgiyi kapsayabilir.

4.3.6. Rüzgâr tüneli testleri

Rüzgâr tüneli testleri, araştırmacıların ya da tasarımcıların herhangi bir nesnenin, hareket halindeyken hava ile arasındaki etkileşimini görmek adına, ölçekli modeller üzerine yaptıkları çalışmaları kapsar. Rüzgâr tünelleri, içerisindeki havayı nesne etrafında belirli hızlarda hareket ettirerek nesnenin hareket ediyormuş gibi görünmesini sağlar.

Proje kapsamında uygulanan rüzgâr tüneli testlerinde, seçilmiş olan planform özelinde farklı ölçeklerde üretilen modeller üzerinde, farklı hızlar, farklı manevralar, farklı hücum açıları ve benzeri değişkenler üzerinde testler yapılarak hava aracının uçuş esnasında hava ile oluşacak etkileşimi kestirilmeye çalışılır. Ölçekli modeller için aerodinamik özellikler aynı kalmayacaktır [47]. Bu sebeple rüzgâr tüneli testlerinde belirli benzerlik kurallarına uyulması, ölçekli model üzerinden toplanan verinin tam boy hava aracı için gerekli bilginin doğruluğu adına önemlidir. Özellikle model ile gerçek hava aracının tüm boyutları ile ölçeklendirilmesi, test esnasında kullanılan havanın hızının hava aracı ile ilgili hızlar ile aynı olması testlerin güvenilirliği için önemlidir.

4.3.7. Malzeme testleri

Savaş uçağı kapsamında kullanılacak tüm materyallerin belirli standartlara ve savaş uçağının operasyonel konsepti gereği farklı koşullarda ve seviyelerde testlere tabi tutulurlar. Bu testler sonucunda belirli özelliklere sahip malzemelerin kullanılması, savaş uçağı birim maliyeti, yapısal geliştirmelere uygunluk, tasarım, yakıt tüketimi, ömür, operasyonel kabiliyetler, performans ve benzeri kriterleri sağlaması adına önem arz eder [48].

Savaş uçağının her bölgesinde aynı koşulların görülmemesi veya her bölgede aynı karakteristik özelliklerin beklenmemesi sebebiyle savaş uçakları birçok farklı materyal kullanılarak üretilirler. Her bir materyalin diğer materyallere üstün olduğu ya da zayıf kaldığı özellikleri vardır. Bu sebeple hava aracı üzerinde hangi malzemenin hangi bölgelerde kullanılacağı konusu malzeme testlerinde alınacak sonuçlara ve genel malzeme karakteristiklerine göre belirlenir. Örnek vermek gerekirse, motora yakın bölgelerde sıcaklığa dayanıklı titanyum malzemesi kullanılırken, gövde kaplamalarında kompozit materyaller kullanılabilir.

4.3.8. Detay analizler

Savaş uçağı tasarımı ile ilgili gelişmeler devam ettikçe yeni ve farklı analizlere ihtiyaç duyulmaya başlanır. Yapısal analizler, operasyonel analizler, güvenlik analizleri gibi farklı disiplinlerin hedefleri göz önünde bulundurularak birçok farklı detay analizler yapılır.

Yapısal analizler, savaş uçağı yapısının operasyonel durumda, farklı yükleme ve çevre koşullarına bağlı olarak tasarım ve ömür hedeflerine ne kadar yaklaşıldığının irdelendiği; statik yükleme ve yorulma, dinamik yükleme ve yorulma, kırılma ve çatlak büyümesi gibi birçok alanda analizleri kapsar [49].

Operasyonel analizler ise, tasarlanan savaş uçağının önceden belirlenmiş şartlar ve konseptlere uygun olarak kendisinden beklenen operasyonları ne derece yapabildiği, hangi yönlerinde eksiklikler olduğu gibi noktalara ışık tutar.

Güvenlik analizleri, hava aracının operasyonel olduğu durumlarda hangi risklere sahip olduğunun belirlenmesi, bu risklerin hangilerinin kabul edilebilir veya kabul edilemez olduğunun ortaya çıkarılması, ortadan kaldırılabilecek risklerin belirlenmesi, ortadan kaldırılamayan riskler için ise gerekli noktalarda tasarıma girdi verilmesi adına yürütülen analizlerdir [50].

4.3.9. Alt sistem tedarik anlaşmaları

Savaş uçakları, motor, yakıt sistemleri, uçuş kontrol sistemleri, kokpit aviyonikleri, elektro-optik sistemler ve bunun gibi onlarca farklı alt sistemden oluşmaktadır. Bu alt sistemlerin bazıları sadece ilgili savaş uçağına uygun olarak tasarlanırken, bazı sistemler de direkt olarak üretici firmalardan hazır olarak alınmaktadır. Her iki süreçte de genel proje takvimini etkilemeyecek şekilde, tedarik anlaşmalarının yapılması ve bu anlaşmalara uygun olarak tasarım geliştirme faaliyetlerinin takibi proje başarısı için önemlidir.

4.3.10. Hammadde tedariki

Savaş uçağı yapısal üretimi sırasında malzeme testleri başlığında da belirtildiği gibi birçok farklı hammadde kullanılmaktadır. Bu hammaddelerin tasarıma bağlı olarak çok yüksek miktarlarda veya çok büyük boyutlarda tedarik edilmesi gerekebilir. Hatta savaş uçaklarında kullanılan bazı hammaddeler dünya üzerinde çok talep gören ve teslim süreleri çok uzun olan titanyum, özel alüminyum alaşımları ve benzeri hammaddelerden oluşmaktadır. Bu nedenle, hammadde tedarikindeki en ufak aksama bütün projenin gecikmesine veya planlanan şekilde üretim yapılamamasına sebep olabilir.

4.3.11. Teknik çizimlerin yayınlanması

Uçak seviyesi teknik çizimlerin detaylandırılması ile birlikte, uçak üzerindeki en küçük alt birime kadar tüm tasarım dijital ortamda tasarlanarak belirli tasarım kurallarına uygunlukları gözden geçirilerek ve yapılan analizler ile desteklenerek son hallerini alırlar. Bu noktadan sonra üretim faaliyetlerine geçmek adına bu çizimlerin savaş uçağını üretecek olan firma bünyesinde yayınlanarak ilgili üretim ekipleri ile paylaşılır.

4.3.12. Montaj ekipmanlarının tedariki

Montaj ekipmanları ya da bir diğer adıyla takımlar birçok endüstride üretim adımlarını kolaylaştırmak ve olası hataların önüne geçme adına kullanılan yardımcı ekipmanlardır. Montaj takımları, savaş uçağı üretimi sırasında birleştirilecek parçaların doğru yerleştirilmesi, parçalara istenen şeklin verilmesi, montaj deliklerinin doğru şekillerde ve istenen noktalardan delinebilmesi, birleştirme kaynak işlemlerinin doğru yapılması ve yapının montajı esnasında belirli bir düzende tutulması gibi farklı amaçlarla kullanılır. Bu ekipmanların tasarımı ve tedariki üretim süreçlerinin planlanan takvime uygun olarak ilerletilmesi için önemlidir [51].

4.3.13. Alt seviye komponent üretimleri

Hava araçları genellikle küçük parçalar şeklinde üretilip, bu küçük parçaların kaynak, perçin, vidalama, yapıştırma gibi birçok farklı metot ile birleştirilmesi prensibi ile üretilirler. Bu şekilde hem üretim maliyetlerinde hem de kullanılacak altyapı maliyetlerinde ciddi azalma görülür. Her parça kendisine özel yayınlanmış olan teknik çizimde belirtilen şekilde önceden belirlenmiş hammaddenin, kesme, şekil verme, boyutlandırma, ısıtma işleme tabi tutma, kaplama, boyama ve benzeri önceden belirlenmiş ve belirli bir sıra işlem ile üretilir.

4.3.14. Kalite kontrol

Savaş uçağının üretimi sırasında uygulanan her bir işlemin, proje sözleşmesinde belirlenmiş olan ulusal ve/veya uluslararası otoritelerce yayınlamış bazı kalite güvence standartlarına uygun olarak yapılması gerekmektedir. Havacılık endüstrisi bu konuda en katı kalite süreçlerini işleten endüstrilerin başında gelmektedir. Kalite kontrol süreçlerinin öncelikli amacı hataların önlenmesidir ancak tüm çabalara rağmen hata yapılması kaçınılmazdır. Bu noktada kalite kontrol süreçleri bu hataları tespit ederek hataların ne, nerede, ne zaman, neden ve kim sorularına cevaplar üreterek kayıt altına alınmasına ve düzeltici faaliyetlerin başlatılmasına ön ayak olur.

4.3.15. Ön gövde montajı

Hava araçları daha önceki bölümlerde de anlatıldığı üzere küçük parçaların birleştirilerek daha büyük parçaların oluşturulduğu bir şekilde üretilir. Ana hava aracı bileşenleri ortaya çıkarıldıktan sonra asıl hava aracı montajı başlatılır. Bu süreçte belli bir sıra izlenmesi önemli değildir. Önemli olan son montaj hattında gövde birleşimi işleminin gecikmemesidir.

Savaş uçaklarında, ön gövde genellikle burun ile başlayıp kokpiti de içine alan bölüm olarak adlandırılır. Genellikle aviyonik sistemlerini, burun ve yan radarlarını, elektro-optik sistemleri ve kokpit aviyoniklerini taşıyan bölüm ön gövdedir. Ayrıca ön iniş takımı da ön gövdeye monte edilir.

4.3.16. Ön orta gövde montajı

Ön orta gövde beşinci nesil savaş uçaklarında kokpit arkasından başlayarak, yan silah yuvalarını ve topu içerisine alan bölümdür. Bu bölgede ayrıca yine bazı elektro-optik sistemler, silah sistemleri, yakıt tankları ve diğer hava aracı sistemleri entegre edilir.

4.3.17. Orta gövde montajı

Orta gövde savaş uçaklarında dahili ana silah yuvalarını, yakıt tanklarını, ana iniş takımlarını ve birçok farklı hava aracı ve görev sistemlerinin entegre edildiği bölümdür. Savaş uçaklarının genelde hacimsel anlamda en büyük parçası orta gövdedir. Bunun yanında kanatlar da ana gövdeye bu bölümden bağlanır.

4.3.18. Ana gövde montajı

Ön, ön orta ve orta gövde bölümlerinin birbirlerine entegre edildiği aşamadır. Ana kanat birimlerinin montajı ana gövdeye yapılacağı için, kanat montajından önce yapılması önemlidir. Ana gövde montajı yapıldıktan sonra alt sistem bileşenlerinin entegrasyonlarına başlanabilir.

4.3.19. Kanat birimlerinin montajı

Kanat birimleri hava aracının uçuşu için gerekli kaldırma kuvvetinin oluşturulduğu, üretimi en zorlu hava aracı bileşenidir. Ayrıca bazı uçuş kontrol yüzeylerine de ev sahipliği yapan kanat birimleri; savaş uçaklarında yakıt tanklarının, elektronik harp ve bazı radar anten sistemlerinin, kanat altı silah sistemlerinin entegre edildiği birimler olmaları sebebiyle önemlidir.

4.3.20. Arka gövde montajı

Arka gövde genel olarak motorun entegre edildiği uçak bölümü gibi düşünülse de motor dışında motor çalıştırıcı sistemler, alternatif güç ünitesi, uçağın arka tarafını tarayan radar sistemleri ve iletişim antenleri, yakalama kancası ve bunun gibi birçok alt sistemi bünyesinde barındırır. Ayrıca dikey ve yatay stabilizatörler ve kuyruk parçaları da bu bölüme montajlanır.

4.3.21. Gövde birleşimi

Tüm gövde ve kanat bileşenlerinin bir araya getirildiği işlemdir. Uçağın genel şekli ortaya çıkmıştır. Silah yuvası kapakları, iniş takımı kapakları, burun konisi, kanopi, yakalama kancası ve kapakları gibi detay parçaların montajına bu noktadan sonra geçilir.

4.3.22. İniş takımı montajı

İniş takımları hava aracının hasarsız bir şekilde iniş ve kalkış yapmasına, hava aracının yer de olduğu sürelerde taksi ve yönlendirilmesi görevlerini yerine getiren alt sistemdir. Uçak havalandıktan kısa bir süre sonra gövde içerisinde kendisine özel olarak tasarlanan bölüme alınarak hava sürtünmesi azaltılır. Tüm gövde bileşenlerinin montajı akabinde uçağın gövdesine entegre edilir ve bu noktadan sonra hava aracının montaj destek ekipmanları ile bağına son verilir.

4.3.23. Stabilizatör montajı

Flap, flaperon, aileron, dikey ve yatay kuyruklar, bu kuyruklar üzerindeki uçuş kontrol yüzeyleri gibi detay parçaların montajının yapıldığı son aşamadır. Bu aşamadan sonra hava aracı alt sistem entegrasyonlarına hazır hale gelir.

4.3.24. Motor entegrasyonu

Motor hava aracının kaldırma kuvveti oluşturabilmesi için gereken itkiyi sağlayan hava aracının en önemli alt sistemidir. İtki dışında, oluşturduğu dönme kuvveti ile hava aracının bünyesinde bulunan jeneratör sistemlerinin çalışmasını sağlayarak hava aracının tüm sistemlerine elektrik sağlar, ayrıca basınçlı hava kullanan pnömatik sistemler için gerekli basınçlı hava da motor sayesinde elde edilir. Motor entegrasyonu, motorun birçok alt sistem bileşeni ile ara yüzü olması sebebiyle çok karmaşık ve zorlu bir süreçtir.

4.3.25. Montaj hattı testleri

Yapılan tüm montaj aktivitelerinin doğru parçalar ile teknik çizimlerde belirtilen şekilde yapıldığının test edildiği bölümdür. Bu testler sırasında performans ölçümleri yapılmaz sadece fonksiyonalite kontrolü yapılarak ilerlenir.

4.3.26. Tam boy yorulma testleri

Yorulma testleri alt parçalar bazında da yapılan testlerdir ancak bir hava aracının yapısal bakım talimatlarının doğrulanması, genel yorulma hasarlarına duyarlı olabilecek noktaların belirlenmesi, yapının yorgunluk verisinin çıkarılması, çatlak başlangıcı ve büyüme ve çatlaklar için kritik konumların belirlenebilmesi gibi bütün hava aracı yapısı aynı anda teste tabi tutulur.

Tam boy yorulma testleri çok uzun yıllar sürebilen testler olup projenin zamanında bitirilebilmesi adına, bu testler için özel ayrı bir hava aracı gövdesi üretilir. Yapı üzerine gerinim ölçerler, ivme ölçerler, yer değiştirme göstergeleri, çatlak sensörleri gibi sensörler entegre edilir. Ayrıca yorulmaya sebep olacak yükü simüle etmek adına yükleme elemanları da kullanılır.

4.3.27. Tam boy statik yükleme testleri

Tam boy statik yükleme testleri bir hava aracının uçmadan önce yapısal bütünlüğünün analiz verileri ile ne kadar uyumlu olduğunun irdelendiği testlerdir. Bu test sırasında işlevsel bir hava aracı kullanılmasına gerek duyulmadığı için sadece bu test için üretilen bir hava aracı yapısı kullanılır. Bu test sayesinde statik yükler anlamında doğrulanmamış bir uçakla uçuşmanın riskleri alınmamış olur.

Tam boy statik yükleme testleri sırasında hava aracının operasyonel konsepti gereği taşınması gereken yükler yapıya uygulanarak yapının tepkisi ölçülür. Hatta bazı durumlarda yapı geri döndürülemez bir deformasyon alana kadar yükleme yapılarak, tasarımın uygunluğu doğrulanabilir. Beklenenden çok daha fazla yük taşıyan bir yapı olması durumunda, tasarımın aşırı güvenli olduğu sonucu çıkar ve yapı üzerinde iyileştirmeler ile ağırlık azaltılması yoluna giderek hava aracı tasarımı optimize edilir.

4.3.28. Alt sistem entegrasyonu

Laboratuvar ortamında tekil olarak belirli fonksiyonları yerine getiren hava aracı alt sistemleri daha sonrasında yine laboratuvar ortamında sistem entegrasyon laboratuvarlarında entegre bir biçimde de testlere tabi tutulurlar ve bu sayede hava aracına entegre edilmeye

hazır hale gelirler. Bu süreç ekipmanların hava aracı yapısına entegre edilmesini, tüm sistemlerin birbirleri ile olan ara yüzlerinin test edilmesini kapsar. Bu testler sadece yapılan entegrasyonun doğruluğu amaçlı olup herhangi bir performans beklentisi içine girilmez.

4.3.29. Elektrik sistemi testleri

Elektrik sistemi, hava aracı sistemlerinin ihtiyaç duyduğu elektrik enerjisini üreten ve üretilen bu enerjiyi ihtiyaç duyan sistemlere ileten sistemdir. Elektrik sistemi bünyesinde jeneratörler, bateriler, invertörler, konvertörler ve güç dağıtım üniteleri bulunur. Motorun dönü hareketinin, elektrik sistemi dahilinde bulunan jeneratörler ile elektrik enerjisine dönüştürülmesi ve bu üretilen enerjinin 28 V_{DC}, 270 V_{DC}, 115 V_{AC} gibi havacılıkta standart olarak kullanılan farklı enerji seviyelerine dönüştürülmesi bu sistemin en önemli görevidir. Bunun dışında ara yüzü olduğu diğer sistemlerden gelen geri beslemeler ile üretilen enerjinin artırılması veya azaltılması, hata durumlarının pilota iletilmesi ve benzeri görevleri de mevcuttur.

Laboratuvar ortamında doğrulanan elektrik sistemi, hava aracına entegrasyonu akabinde güç çıkışlarından farklı yük durumlarında istenilen voltajların alınabildiğinin, hata durumlarında ilgili hata verisinin pilota iletilebildiğinin görülebilmesi adına bazı testlere tabi tutulur. İlk etapta testler motor çalıştırılmadan yapılır. Elektrik sistemi ve bileşenlerinde bir problem görülmemesi durumunda motor çalışır vaziyette testlere geçilir.

4.3.30. Yakıt sistemi testleri

Yakıt sistemi hava aracı dahilinde bulunan motor veya motorlara her türlü operasyonel koşul ve manevra altında kesintisiz bir şekilde ihtiyaç duyulan debide yakıt sağlayan sistemdir. Yakıt sistemi bünyesinde harici ve dahili yakıt tankları, yakıt pompaları, yakıt hatları, valfler, yakıt sıcaklığını ve miktarını ölçen sensörler bulunur. Ayrıca bu sistem kullanılan yakıtın miktarına göre, hava aracının ağırlık merkezinin belirli bir noktada tutulabilmesi adına yakıtın farklı tanklarda farklı miktarlarda depolanması noktasında da sorumludur.

Laboratuvar ortamında fonksiyonel olarak doğrulanan yakıt sistemi, hava aracına entegre edildikten sonra, yakıt hatlarında ve tanklarında sızdırmazlık, yakıt transfer debisi, yakıt yükleme ve yakıt boşaltma, yakıt beslemesinin sonlandırılması, hata durumlarının pilota iletilmesi, yakıt basıncı, yakıt sıcaklığı gibi verilerin istenilen seviyelerde olduğunu görmek adına farklı senaryo ve durumlar için testlere tabi tutulur. Yakıt sistemi testleri olası

bir hatanın geri dönülemez sonuçları olabileceği göz önünde bulundurularak çok dikkatli bir şekilde gerçekleştirilir.

4.3.31. Hidrolik sistemi testleri

Hidrolik sistemi, hava aracı dahilinde bulunan ve hareket kabiliyetini hidrolik güçten alan ekipman veya sistemlerin çalışması için gerekli hidrolik gücü sağlayan sistemdir. Uçuş kontrol sisteminin, iniş takımlarının ve iniş takımı kapaklarının, silah yuvası kapaklarının hareketleri ve fren sistemi için gerekli hidrolik gücün sağlanması hidrolik sistemin en önemli görevidir. Sistem hidrolik pompalar ve valfler, hidrolik hatları, hidrolik tankları ve hidrolik sıvısı sıcaklığının basıncı ve benzeri bilgileri ölçen sensörlerden oluşur.

Laboratuvar ortamında fonksiyonel olarak doğrulanan hidrolik sistem hava aracına entegre edildikten sonra, hidrolik hatlar ve tanklarda sızdırmazlık, hidrolik sıvısı yüksek basınç, yüksek ve düşük sıcaklıkta operasyon, farklı koşullar ve yükler altında uçuş kontrol yüzeylerinin hareketi, silah ve iniş takımı kapaklarının açılış ve kapanış hareketleri, iniş takımı açılış ve kapanış hareketleri gibi birçok farklı teste tabi tutulur.

4.3.32. Mekanik sistem testleri

Hava aracı üzerinde bulunan silah yuvası kapakları, kanopi, havadan havaya yakıt doldurma kapağı, yakalama kancası kapağı gibi hareketli kapak ve mekanizmaların operasyonel konsept gereği yapmaları gereken hareketleri sağlayan eyleyicilerin tamamı mekanik sistem olarak adlandırılır.

Her biri tekil olarak laboratuvar ortamında doğrulanan sistemler hava aracına entegre edildikten sonra, hareketli yüzeyin istenilen hareketi yapıp yapmadığı, istenilen hareketin ne kadar sürede yapılabildiği, hareketin açıları ve bu sistemlerin belirli sayıda herhangi bir fonksiyonel kayıp yaşamadan yorulma testleri gibi testler farklı operasyonel yükler ve koşullar altında bu sisteme uygulanır.

4.3.33. Radar sistemi testleri

Hava aracı üzerinde birçok farklı amaçla birçok farklı bant genişliğinde çalışan farklı radar sistemleri mevcuttur. Bu radarlar hedef arama, hedef takip, hedef tanımlama, hava ve yer hedeflerine kilitlenme, hareketli ve sabit hedef takibi, görüntüleme, silah sistemlerinin hedefe yönlendirilmesi, elektronik harp, yeryüzü şekillerinin takibi ve hava durumu tanımlaması yapmak gibi farklı amaçları yerine getirirler.

Her biri tekil olarak laboratuvar ortamlarında test edildikten sonra hava aracına entegre edilen radar sistemleri, birbirlerine olan etkileri, bant genişliklerinin taranması, genlik ve faz datalarının toplanması, simüle edilen senaryolar karşısında alınan verilerin doğruluğu test edilir. Radar sistemi testleri, herhangi bir dış kaynaklı sinyalin alınan verileri bozmaması için, özel olarak dizayn edilmiş tesislerde yapılmaktadır.

4.3.34. İletişim sistemleri testleri

Hava aracı bünyesinde farklı bant genişliklerinde çalışan radyo ve antenler sayesinde farklı iletişim protokollerine göre diğer uçaklar veya yer istasyonları ile iletişim gerçekleştirebilir. Hava araçlarında, UHF ve VHF frekanslarda iletişim, iletişim uyduları üzerinden güvenli data, video ve ses iletimi, dost düşman tanımlaması gibi görevler iletişim sistemleri ile yerine getirilir.

Bu sistemler öncelikle tekil olarak laboratuvar ortamlarında doğrulandıktan sonra hava aracına entegre edilir. Her bir protokolde istenilen iletişimin istenilen hızda ve kalitede yapılıp yapılmadığı, tüm ana ve yedek sistemlerin farklı senaryolarda fonksiyonel olduğu, iletişim ve veri aktarımında kesilme olup olmaması gibi durumlar test edilir.

4.3.35. Elektro-optik testleri

Hava aracı ve pilotun durumsal farkındalığını arttırmak ile düşman unsurlar tarafından ateşlenmiş füzelere karşı önlem almak amacıyla savaş uçakları birçok farklı elektro-optik sistem ile donatılmışlardır. Bu sistemler kızılötesi arama ve takip sistemleri, füze ikaz sistemleri, lazer ikaz sistemleri, elektro-optik hedefleme gibi sistemlerdir.

Her bir sistem laboratuvar ortamında test edilerek fonksiyonelite ve performans anlamında doğrulandıktan sonra hava aracına entegre edilir. Hava aracı üzerindeki yerleşimleri ile amaçlanan durumsal farkındalık ve operasyonel kabiliyetler bağlamında tüm sistemlerin uyumlu olarak çalıştıkları doğrulanır.

4.3.36. Uçuş kontrol sistemleri testleri

Her hava aracı, pilottan ya da otomatik pilot sisteminden gelen komutlara göre, güvenli ve kontrollü bir şekilde, kabiliyetleri ve performans parametreleri dahilinde uçabilmesi için bir uçuş kontrol sistemine ihtiyaç duyar. Bu sistem uçuş kontrol yüzeylerinin hareketini sağlayan eyleyiciler, uçuş kontrol bilgisayarı, uçuş kontrol sensörleri, meteorolojik sensörler ve pilotun komutlarını verdiği pedallar ve kollardan oluşur.

Uçuş kontrol sistemleri hava aracına entegre edilmeden önce demir kuş (Iron Bird) olarak adlandırılan özel altyapılarda farklı senaryolara göre hidrolik sistemin entegrasyonu ile birlikte uzun soluklu testlerini gerçekleştirir. Bu süre zarfında toplanan veriler ve performans parametreleri hava aracı üzerinde yapılan entegre testler ile doğrulanır.

4.3.37. İniş takımı testleri

İniş takımları, hava aracının ağırlığını taşıyan, iniş sırasındaki şok etkisini sönümleyerek hava aracının zarar görmesini engelleyen, frenleme ve yönlendirme fonksiyonlarını yerine getiren sistemlerdir. Bu sistemler burunda bulunan burun iniş takımı ve orta gövdede bulunan sağ ve sol ana iniş takımları olarak adlandırılır. Sistem ayrıca iniş takımı açma ve kapatma sistemine, teker kilit sistemine ve burun iniş takımı yönlendirme sistemini bünyesinde bulundurur.

İniş takımları tekil olarak birçok farklı teste tabi tutulur. Bu testlerden en önemlileri düşürme testleri, frenleme testleri, açılma kapanma testleri, burun iniş takımı için yönlendirme testleri gibi testlerdir. İlk etapta tekil olarak test edilen iniş takımları daha sonra demir kuş (Iron Bird) olarak adlandırılan özel altyapıda hidrolik ve uçuş kontrol sistemi ile entegre bir şekilde hava aracına monte edilmeden önce tekrar testlere tabi tutulur. Daha sonra uçağa entegre edilen iniş takımları hava aracında da gerçek koşullarda testlere maruz bırakılır.

4.3.38. Silah sistemi testleri

Savaş uçaklarını sivil uçaklardan ayıran en önemli özellik, bünyelerinde operasyonel konseptleri gereği hava-yer, hava-hava mühimmatlar ile top sistemi bulundurmasıdır. Silah sistemlerinin ana amacı, gövde içi ve kanat altında bulunan istasyonlarda farklı konfigürasyonlarda taşınmakta olan mühimmatların gerektiği durumlarda aktif olarak ateşlemesi veya pasif olarak bırakılması şeklinde uçaktan güvenli bir şekilde ayrılmasını sağlamak, hava aracında taşınan mühimmatların sayısı, çeşidi ve bulunduğu istasyon hakkında pilota anlık olarak bilgi sağlamak ve top sisteminin ateşlenmesidir.

Silah sistemleri dahilinde bulunan kontrolcüler, bağlantı ve salan elemanları, ateşleyici sistemler olarak laboratuvar ortamında fonksiyonel olarak testlere tabi tutulurlar. Daha sonrasında bu sistemler hava aracına entegre edilerek, yerde güvenli ayrılma, asimetrik taşıma, top ateşleme testlerine tabi tutulurlar.

4.3.39. Motor testleri

Motor, bir uçağın ihtiyaç duyduğu itkiyi sağlamak ve diğer alt sistemler için gerekli elektrik enerjisinin üretilmesi gibi kritik görevlere sahip olması sebebiyle bir uçağın en önemli bileşenidir. Motorlar günümüzde itki kontrolü ve asimetrik itki konfigürasyonları ile hava aracının yapacağı manevralara katkı sağlamaktadır.

Motorlar entegrasyon öncesinde laboratuvar ortamlarında farklı hava yoğunlukları, farklı yakıt debileri gibi senaryolar ile testlere tabi tutulurlar. Bunun dışında balans, titreşim ve sıcaklık verileri toplanarak tasarıma girdi sağlanır. Ayrıca her motorun belirli oranlarda toz, dolu, yağmur gibi dış etkilere karşı da performans kaybı yaşamadan çalıştığının doğrulanması gerekir. Laboratuvar ortamında yapılan testlerden sonra savaş uçağına entegre edilen motor için hava aracı üzerinde de benzer testler yapılmaya başlanır. Motorun çıkardığı gürültü seviyeleri için ayrıca uçak üzerinde akustik testler yapılır. Hava aracı üzerine entegre edilen motorun çalıştırılması için ilk motor çalıştırma öncesi emniyet değerlendirme kurulunun onayı gerekir.

4.3.40. Kuş çarpması testleri

Hava araçlarının özellikle iniş ve kalkış yaptıkları evrelerde, kuş sürüleri ile karşılaşmaları ve bu kuşların hava aracına çarparak hava aracına zarar vermesi söz konusudur. Özellikle kokpit camları, burun bölgesi, kanat ve stabilizatörlerin hücum kenarları, hava alıkları ve motorlar kuş çarpmasından en çok etkilenen bölgeler olmaktadır.

Olası bir kuş çarpması durumunda hava aracının kritik bölgelerinde hangi sonuçlar ile karşı karşıya kalınacağına görülebilmesi adına kuş çarpmasını simule edecek özel test cihazları geliştirilerek uçak üzerinde kritik bölge olarak tanımlanan bölgelerin veya bu bölgelerde kullanılacak materyallerin kupon seviyesinde kuş çarpması testlerine tabi tutulur.

4.3.41. İklimlendirme testleri

Hava araçları özellikle yüksek irtifa düşük hız kış koşullarında ve düşük irtifa yüksek hız yaz koşullarında çok düşük veya çok yüksek sıcaklıklara ulaşabilmektedir. Bu sıcaklıklar insanların yaşayabileceği sıcaklıklar değildir ve hatta, özellikle elektronik ekipmanlar için, çalışabilecekleri sıcaklık aralıklarının çok üstünde veya çok altında kalmaktadır. Bu sebeple hava araçlarında pilotun bulunduğu kokpit ve belirli kritik ekipmanların yerleştiği bölgeler özel olarak iklimlendirilir. Bu bölgeler belirli sıcaklıklar arasında tutulmak adına ısıtılır veya soğutulur. İklimlendirme sistemleri bu ısıtma ve soğutma işleminden sorumlu hava aracı sistemidir.

İklimlendirme sistemleri, tekil olarak laboratuvarında sıcak gün, soğuk gün, yüksek nem ortamı, düşük basınç ortamı gibi farklı hava durumlarında farklı senaryolar için doğrulanır. Daha sonra hava aracına diğer sistemler ile birlikte entegre edilen iklimlendirme sistemi, yine farklı senaryolar için diğer elektronik ekipmanların yaydıkları ısılar dış dünya ısısı ve benzeri durumların da etkisiyle gerçek koşullarda testlere tabi tutulur.

4.3.42. İlk enerjilendirme öncesi emniyet değerlendirme kurulu

Hava araçlarının testleri sırasında her aşama dikkatle irdelenip belirli şartların yerine getirilip getirilmediği konusunda projeler bağımsız ekipler tarafından incelenir. Bu aşamalardan ilki hava aracının ilk enerjilendirilmesi noktasıdır. Bu ana kadar sistemler tekil olarak enerjilendirilmekte, hava aracının tamamına enerji verilmemektedir. Bu da sistemlerin entegre olarak çalışmasının sonuçlarını görme açısından bir engeldir. Belirli şartlar sağlandıktan sonra ilk enerjilendirme onayını alan hava aracı yer güç üniteleri ile enerjilendirilerek bünyesine entegre edilmiş sistemler bir bütün olarak testlere tabi tutularak sistemlerin birbirlerine olan etkileri irdelenir.

4.3.43. Entegre uçak sistemleri testleri

Uçak sistemleri her uçakta olması gereken motor, yakıt sistemi, hidrolik sistemler, uçuş kontrol sistemi, mekanik sistemler gibi sistemlerdir ve bu sistemlerin bir bütün olarak uyumlu çalışıyor olması bir uçağın güvenli olarak operasyon yapabilmesi için çok önemlidir. Bu testler sırasında tüm uçak sistemleri bir arada çalıştırılarak sistemlerin birbirleri üzerindeki etkilerine bakılır. İlk başlarda bu testlerde motor çalıştırılmaz ve hava aracı dışarıdan yer güç üniteleri ile enerjilendirilir.

4.3.44. Entegre aviyonik sistem testleri

Aviyonik sistemler, hava aracının operasyonel konseptine uygun olacak şekilde hava aracına entegre edilen ve amacı, istenilen görevlerin başarıyla yerine getirilmesi için pilota bilgi ve kabiliyet kazandırmak olan sistemlerdir. Bu sistemlerin birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışması ilgili görevin başarısı için elzemdir. Tekil olarak başarılı olarak çalışan sistemlerin entegre bir şekilde de çalıştığının görülmesi bu testlerin en önemli çıktısıdır.

4.3.45. İlk motor çalıştırma öncesi emniyet değerlendirme kurulu

İlk enerjilendirme öncesi emniyet değerlendirme kurulundan sonra gelen ikinci önemli aşama hava aracının motor çalıştırmasıdır. Motor çalıştıran hava aracı dışarıdan bir enerji

kaynağına ihtiyaç duymadan sistemlerini enerjilendirebilir ve hidrolik güç üretebilir hale gelir. Bu aşamada ilk enerjilendirme öncesi emniyet değerlendirme kurulu sırasında istenen bazı minimum kalifikasyon isterlerine ek olarak, ilk motor çalıştırma öncesi emniyet değerlendirme kurulunda ekstra kalifikasyon isterlerinin yerine getirilmiş olması beklenir. Örnek vermek gerekirse, ilk enerjilendirme öncesi emniyet değerlendirme kurulunda hava aracındaki ekipmanlar herhangi bir titreşim koşuluna dayanıklılık beklenmezken, ilk motor çalıştırma öncesi emniyet değerlendirme kurulunda titreşim ortamına dayanıklılık beklenir.

4.3.46. Kızıl-ötesi görünürlük testleri

Savaş uçakları birçok farklı yöntem ile düşman unsurlar tarafından fark edilebilirler veya ateşlenen bir mühimmat birçok farklı yöntem ile hedefe ulaştırılmaya çalışılabilir. Bu yöntemlerden en sık kullanılanı kızıl-ötesi taramadır. Ortam sıcaklığından daha düşük ya da daha yüksek sıcaklık yayan her şey kızıl-ötesi görüntülemeye fark edilir hale gelir. Bu prensibe uygun olarak geliştirilen izleme ve mühimmat sistemleri savaş uçakları için tehdit oluşturur. Bu sebeple savaş uçakları kızıl-ötesi görünürlüğünü minimize etmek veya zayıf noktalarının bilinerek önlem alınmasına yönelik çalışmaları başlatmak adına bir dizi düşük-görünürlük testine tabi tutulur. Bu sırada hava aracının motorundan ya da yardımcı güç ünitesinin egzozundan çıkan sıcak hava farklı operasyonel konseptler için incelenir. Ayrıca uçak üzerinden herhangi bir bölgede başka bir sistemin çalışması sebebiyle sıcak bölge oluşup oluşmadığı konusu irdelenir. Eğer böyle bir durum var ise izolasyon çalışmaları yapılabilmesi için tasarım ekiplerine girdi yapılır.

4.3.47. Radar izi testleri

Beşinci nesil savaş uçaklarının en karakteristik özelliklerinden biri düşük radar kesit alanına sahip olmalarıdır. Bu düşük radar kesit alanını oluşturabilmek adına savaş uçakları radar dalgalarını yansıtacak bir geometrik şekle sahip olacak şekilde üretilirler, ayrıca mühimmatlarını gövde altında taşıyarak yansıtıcı yüzey alanlarını olabildiğince azaltırlar ve belki de en önemli konu olan özel radar dalgalarını soğurucu boya ile boyanırlar. Tüm bu tasarımlar belirli analizler ve kabuller ile yapılır ve yapılan analizlerin ve kabullerin doğrulukları ve kullanıcının beklentileri testler ile doğrulanmaya çalışılır.

4.3.48. Yıldırım testleri

Askeri veya sivil her hava aracı doğrudan yıldırıma maruz kalabilir ve bu etkiden güvenli uçuşu tehlikeye atmadan kaçınılmelidir. Hava araçlarında yıldırım etkisinden

kaçınabilmek için birçok farklı tasarım çözümü kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak uçağın bir Faraday kafesi olarak tasarlanması veya yıldırım çarpma olasılığının yüksek olduğu burun ve kanat uçlarına yıldırım çubukları yerleştirilerek yıldırımın güvenli bir şekilde uçağı terk etmesi sağlanabilir. Tabi bu tarz çözümler her ne kadar sivil havacılıkta sıkça kullanılıyor olsa da askeri havacılıkta bu tarz çözümlerin özellikle taktik savaş uçaklarında radar kesit alanını arttırdığı için pek tercih edilmemektedir.

Genel olarak iki amaç için yapılan yıldırım testleri sırasında yıldırım etkisi laboratuvar ortamında simüle edilerek hava aracına olan etkilerine bakılır. Bu amaçlardan ilki yıldırımın doğrudan etkilerini görmek adına diğeri de dolaylı etkilerini görmek adına yapılır. Doğrudan yıldırım etkileri yıldırımın isabet ettiği bölgede görülen genelde yapısal hasara sebebiyet veren etkilerdir. Dolaylı yıldırım etkileri ise yıldırımın çarpması ile birlikte oluşan yüksek manyetik alan kuvvetinin uçağın diğer elektronik bileşenleri üzerinde nasıl bir etki gösterdiğinin tespiti için yapılır. Direkt etkiler genelde kupon testler olarak yapılmakta olup, dolaylı etkiler için uçağın tam boy bir örneğine ihtiyaç olur.

4.3.49. Yerde titreşim testleri

Hava araçları iniş, kalkış ve seyir süresinde hem motorun çalışmasına bağlı olarak hem de aerodinamik etkilere bağlı olarak titreşimler üretir. Bu titreşimler hava aracı yapısı ve sistemleri üzerinde yorulmalara veya mekanik olarak yüklenmelere sebebiyet verebilir. Yerde titreşim testleri hava aracının doğal frekansı, çarpınma, yapısal sönümleme katsayısı gibi dinamik özelliklerinin belirlenmesi için yapılır [66]. Bu sebeple hava araçları uçuşlarına başlamadan önce yerde bir dizi titreşim testine tabi tutulur.

Yerde titreşim testleri hava aracının gerçek boyutlarda ve genelde tüm sistemleri ile gerçek bir uçak olarak, operasyonel konsepti gereği maruz kalacağı titreşimleri ve aerodinamik kuvvetleri simüle eden özel bir platform üzerinde yapılır. Hava aracı belirli noktalarından titreşim üreteçleri sayesinde titreşime tabi tutulurken, birçok bölgesinden de ivme ölçerler ile titreşim etkilerinin analizi için veri toplanır. Bu süreçte hava aracının yapısal olarak da herhangi bir bozulma ve deformasyona uğramadığı da kontrol edilir.

4.3.50. Yağmur testleri

Hava araçları özellikle taksi, iniş, kalkış ve düşük irtifa seyir gibi durumlarda yağmur etkilerine maruz kalmaktadırlar. Bu gibi durumlarda özellikle motorlar, aviyonik sistemler ve uçuş kontrol sisteminin yağmur etkisine karşı nasıl tepkiler vereceğini görmek güvenli bir uçuş için önemlidir.

Yağmur testleri sırasında hava aracına birçok farklı noktadan ve açılardan yüksek basınçlı su püskürtülür. Bu püskürtme işlemi için özel altyapılar kullanılır. Test sırasında yağmurun hava aracı üzerinde birikip birikmemesi, hava aracının yüzeyinden içeri yağmur suyunun sızıp sızmadığı, içeri sızan yağmur suyunun güvenli bir şekilde drenaj sistemi ile herhangi bir hasar oluşturmada hava aracından uzaklaştırılma yeteneği gibi konular irdelenir.

4.3.51. Ağırlık ve balans testleri

Hava araçlarının kontrollü ve dengeli bir şekilde uçabilmesi ve istenilen manevraları güvenli bir şekilde yapabilmesi için ağırlık merkezinin belirli bir sınır içerisinde olması önemlidir. Ayrıca hava aracına yüklenen yüklerin veya entegre edilen sistemlerin de ağırlık olarak hava aracı üzerine olabildiğine homojen dağıtılması önemlidir.

Ağırlık ve balans testleri sırasında hava aracının farklı yükleme konseptlerine göre ağırlık merkezi tespiti ve toplam ağırlık ölçümü gibi testler yapılır. Bu sırada hava aracı özel olarak bir askı mekanizmasına alınır.

4.3.52. İlk uçuş öncesi emniyet değerlendirme kurulu

Hava araçlarının belki de en önemli ve en kritik testi ilk uçuş testidir. Bu test sırasında yaşanabilecek en ufak sorun üretilen uçağı, pilotu ve hatta bütün projeyi tehlikeye atabilir. Bu sebeple ilk uçuş öncesi hava aracı uzman ve bağımsız bir ekip tarafından, önceden belirlenmiş ve bir hava aracının güvenli bir şekilde belirli kısıtlar dahilinde uçabilmesi için gerekli minimum gereklilikleri yerine getirip getirmediği konusunda incelenir. İlk uçuş için genellikle ilk uçacak konfigürasyonun tüm testlerinin bitmiş olması, bitmemiş testlerin ise güvenli uçuşu tehlikeye atmayacağına belirli yöntemler ile analizinin yapılması beklenir. Arıza durumunda güvenli uçuşu tehlikeye atabilecek olan uçuş kritik ekipmanlarda bu durum istisnasız olarak tüm testlerin bitirilmiş olması şeklindedir. Önceden belirlenmiş tüm kriterlerin yine önceden belirlenmiş ilk uçuş profiline uygun olarak onaylanmasından sonra hava aracı ilk uçuşunu yapmak için pist başı yapar.

4.3.53. Taksi testleri

Taksi bir hava aracının tekerleri yerde iken bir noktadan diğer bir noktaya yönlendirilmesidir. Taksi testleri de bir hava aracına uçmadan önce yerde yapılan son testidir. Bu testler öncelikle yavaş taksi testleri ile başlar. Amaç olarak hava aracının motorları ile ürettiği itki gücü ile hareket kabiliyetinin doğrulanması, ayrıca fren ve direksiyon

sistemlerinin fonksiyonallitesine bakılır. Daha sonra bu testler daha yüksek süratlerde tekrarlanır. Bu süreçte uçağın motor, fren, direksiyon gibi sistemleri test edilirken hava aracını kullanan pilot da hava aracını tanımaya başlar. Hava aracının verdiği frenleme, direksiyon ve yol tutuş karakteristiğine aşına olur, gördüğü herhangi bir sorunda düzeltici faaliyet başlatarak gerekli önlemleri aldırır.

4.3.54. Sensor kalibrasyon uçuş testleri

Hava araçları ilk uçuşlarından itibaren sürekli olarak veri toplayan birçok sensör ile donatılmışlardır. Bu durum test uçakları için çok daha fazla veriye ihtiyaç duyulduğu için genişletilmiş bir şekilde uygulanmaktadır. İrtifa, hız, sıcaklık, basınç, yakıt miktarı, hidrolik basıncı, yapısal gerinim ve buna benzer birçok parametre uçuş testleri sırasında hava aracı üzerindeki sensörler vasıtasıyla toplanır. Bu veriler hem bazı gereksinimlerin doğrulanması için hem de tasarım geliştirme ve analiz aktivitelerinde kullanılır. Sensörler vasıtasıyla toplanan bu verilerin güvenilirliği çok önemlidir. Zira, doğru kabul edilen yanlış bir veri tasarım ve analizlere yanlış girdi olabilir veya aslında doğrulanması gereken bir gereksinimin doğrulanmamış görünmesine ya da tam tersi durumlara sebebiyet verebilir. Çok daha kötü bir senaryoda okunan yanlış bir veri hava aracının düşmesine, pilot ve test ekibinin hayatlarının tehlikeye atılmasına sebep olabilir.

Sensör kalibrasyon uçuş testlerine başlamadan önce her bir sensörden doğru veri alındığı ile ilgili kontroller yerde yapılır. Daha sonrasında uçuş testine geçilirken dış dünyadan alınan veriler anlamında sensör verilerinden emin olunan ikinci bir hava aracı ile birlikte sensörleri test edilecek olan hava aracı uçuşuna başlar. Alınan dış dünya verisi diğer hava aracından alınan veriler ile karşılaştırılır. Test edilen hava aracının iç sensörlerinden alınan veriler de birçok farklı sensörden geleceği için kendi içlerinde tutarlılıkları karşılaştırılarak ilerlenir. Herhangi bir sapma görüldüğü noktalarda sensörler değiştirilir ya da kalibre edilerek doğru verinin gösterilmesi sağlanır. Bu testlerden başarılı olarak geçen bir hava aracının diğer testlerde topladığı verilerin güvenilirliği sağlanmış olur.

4.3.55. Güvenli uçuş testleri

Güvenli uçuş testleri, bir hava aracının herhangi bir şekilde insan hayatını ve hava aracının bütünlüğünü riske atamayacak şekilde güvenli ve uçuşa elverişli olduğundan emin olunmak için yürütülen kritik bir süreçtir. Bu süreçte hava aracının güvenlik kritik diye tabir edilen olası bir hatada pilotu ve hava aracının bütününe riske atabilecek fonksiyonlarında herhangi bir istenmeyen durum olup olmadığı kontrol edilir.

Bu testler sırasında özellikle motor, yakıt, hidrolik, iniş takımı sistemleri ve belirlenmiş bazı aviyoniklerin, iniş, kalkış, irtifa kazanma ve kaybetme, seyir gibi farklı operasyonel koşullar altında, kritik fonksiyonları takip edilerek herhangi bir problem olmadığı garanti altına alınır.

4.3.56. Çevresel koşullar uçuş testleri

Hava araçları operasyonel kabiliyetleri ve operasyonel konseptleri gereği sıcak ve soğuk hava koşullarına, yağmur, kar, dolu gibi yağış tiplerine, güneş ışınlarına, yüksek nem etkilerine, titreşim, ivmelenme ve mekanik şok gibi mekanik etkilere maruz kalırlar. Hava araçlarının ömürlerinin on yıllar mertebesinde olduğunu düşünürsek bu etkilere karşı dayanıklı bir tasarım yapılmış olması önemlidir. Hava aracı bünyesinde bulunan her sistem istisnasız olarak önceden belirlenmiş çevre koşullarına uygun şekilde tasarlanmakta ve detay seviyelerde test edilmektedir. Ancak bu durum hava aracı üzerinde gerçek uçuş koşullarındaki entegre sistem tepkilerini görmek adına yetersiz kalır. Bu sebeple hava araçları gerçek operasyonel koşullara dayanıklılığını göstermek adına çevre koşulları uçuş testlerine tabi tutulurlar.

Bu testlerin en önemlileri; yüksek irtifa uçuş testleri, sıcak gün koşulları uçuş testleri, soğuk gün koşulları uçuş testleri, çeşitli yağış koşullarında uçuş testleri gibi testlerdir.

4.3.57. Uçak sistemleri uçuş testleri

Uçak sistemleri her uçakta olması gereken motor, yakıt sistemi, hidrolik sistemler, uçuş kontrol sistemi, mekanik sistemler gibi sistemlerdir ve bu sistemlerin bir bütün olarak uyumlu çalışıyor olması bir uçağın güvenli olarak operasyon yapabilmesi adına çok önemlidir. Bu testler sırasında yerde entegre olarak testleri yapılmış olan tüm uçak sistemleri uçuş koşullarındaki iniş, kalkış, irtifa kazanma ve kaybetme, seyir gibi farklı operasyonel koşullar altında da test edilerek gereksinimlerinin doğrulamaları yapılır.

4.3.58. Performans uçuş testleri

Savaş uçaklarının performansları üstünlük kurulmak istenen diğer savaş uçaklarına göre hız, manevra yeteneği, menzil ve çıkılabilen en yüksek irtifa özellikleri üzerinden değerlendirilir. Çıkılabilecek maksimum hız değerinin yüksekliği düşman unsurlara angaje olma ve herhangi bir tehlikeden kaçabilme yeteneği sağlar. Aynı şekilde daha yüksek manevra kabiliyeti de olası bir savaş durumunda düşman savaş uçaklarına daha kolay angaje olmak ve düşman unsurların yarattığı tehlikelerden daha kolay kaçabilme yeteneği sağlar.

Menzilin daha uzun olması düşman unsurlardan olabildiğince uzak konuşlanabilme ve daha uzun süre operasyonel olabilme yetenekleri sağlarken daha yüksek irtifada uçabilmesi ise düşman radarlarından veya hava savunma sistemlerinden kaçınmasına fırsat verir.

Performans uçuş testleri, belirtilen parametreler ve istenilen performans değerlerine uygun tasarlanan savaş uçağının gerçek uçuş koşullarında, analizler sonucu çıkan sonuçlarla uyum gösterimi için yapılır. Ancak bu testler bir süreç halinde her parametre için, peyderpey performans parametresi arttırılarak ilerlenir ilk testte istenilen limit değerlere ulaşılmaya çalışılmaz. Her performans parametresinin ayrıca farklı hava durumlarında da test edilmesi gerekir.

4.3.59. Yük uçuş testleri

Savaş uçakları gerek taşıdıkları silah, yakıt ve alt sistem bileşenleri gerekse de yaptıkları manevralar sırasında farklı yüklere maruz kalırlar. Bu yüklere uygun yapılmayan tasarım ise ya uçuş güvenliğini tehlikeye atacak olan kazalara ya da savaş uçağının daha kısa ömürlü ve daha çok bakıma ihtiyaç duyar hale gelmesine sebebiyet verir. Yük uçuş testleri, uçağın operasyon sırasında karşılaştacağı çeşitli streslere ve yüklere dayanabileceğini doğrulamak için uçağın bir dizi kontrollü uçuş testine tabi tutulmasını içeren, uçak geliştirme sürecinin kritik bir aşamasıdır. Bu testler genelde özel olarak sensörler ile donatılmış bir prototip üzerinde gerçekleştirilerek, uçağın yüksek hızlarda, hızlı manevra değişikliklerinde ve farklı hava koşullarında verdiği tepkiler kayıt altına alınarak bazı veriler toplanır. Daha sonra bu veriler uçağın tasarım gereksinimlerini ve farklı uçuş koşullarında güvenli bir şekilde operasyon kabiliyetlerini doğrulamak için mühendisler tarafından analiz edilir.

4.3.60. Aviyonik sistemler uçuş testleri

Aviyonik sistemler, hava aracının operasyonel konseptine uygun olacak şekilde hava aracına entegre edilen, amacı istenilen görevlerin başarıyla yerine getirilmesi için pilota bilgi ve kabiliyet kazandırmak olan sistemlerdir. Bu sistemlerin birbirleri ile uyumlu bir şekilde çalışması ilgili görevin başarısı için elzemdir. Bu testler sırasında yerde entegre olarak testleri yapılmış olan tüm aviyonik sistemlerin uçuş koşullarındaki iniş, kalkış, irtifa kazanma ve kaybetme, seyir gibi farklı operasyonel koşullar altında da test edilerek gereksinimlerinin doğrulamaları yapılır.

4.3.61. Silah sistemleri uçuş testleri

Bir savaş uçağını sivil uçaklardan ayıran birçok farklı özelliği olsa da en önemli özelliği silah taşıyabilme ve bu silahları istenilen zamanda güvenli bir şekilde düşman unsurlara karşı kullanabilme yeteneğidir. Silah sistemleri hava-hava ve hava-yer mühimmatları, top sistemi ve bu sistemlerin diğer elektronik bileşenlerinden oluşur. Bu sistemler ile savaş uçağı pilotuna bir savaş uçağının en önemli parametrelerinden biri olan savaşma yeteneği kazandırılır.

Savaş uçakları daha önceden belirlenmiş olan operasyonel konseptleri ve görev profillerinin icrası için çok farklı kombinasyonda birçok farklı mühimmatı farklı sayılarda taşıma yeteneğine sahiptirler. Silah sistemleri uçuş testleri sırasında farklı mühimmatlar ile güvenli ateşleme, güvenli bırakma, atış kontrol sistemlerinin doğruluğu gibi farklı parametreler test edilir.

4.3.62. Düşük görünürlük testleri

Düşük görünürlük, savaş uçaklarının radar, kızılötesi sensörler ve bunlara benzer uzaktan algılama sistemleri tarafından tespit edilememesi adına geliştirilen yetenektir. Bir savaş uçağı, savaş ortamında ne kadar az görünür olursa o kadar fazla oranda hayatta kalabilir ve bu durum yapılacak olan operasyonların başarısını önemli oranda artırır. Bu noktada savaş uçağının radar kesit alanı ve ısı izi olabildiğince düşürülmeye çalışılır. Bu amaçla savaş uçakları radar kesit alanlarını düşürmeye yönelik özel bir dış yüzey tasarımına, mühimmatlarını kanat altı yerine gövde içinde taşımaya ve özel bir radar emici malzeme ile boyanması gibi tasarım çözümlerine sahiptirler. Ayrıca ısı izi düşürmek adına da ısı yalıtımı anlamında bazı önlemler alınmaktadır.

Yapılan bu tasarımların gerçek operasyonel koşullarda, gerçek radarlar ve sensörler kullanılarak, müşteri tarafından belirlenmiş düşük görünürlük sınırlarının altında olup olmadığı konusu belirli şartlar altında uçuş koşullarında test edilir.

4.3.63. Kabul uçuş testleri

Kabul uçuş testleri müşteri tarafından teslim alınacak konfigürasyon için daha önceden müşteri ve üretici arasında anlaşılmış bir çerçeve dahilinde yapılan testlerdir. Bu testler sırasında üretici tarafında mühendisler, test kalite ve tasarım ekipleri ile yönetim ekiplerinin, müşteri tarafında da kabul heyeti ve temsilciler hazır bulunurlar. Bu testler sırasında yerde yapılan testler, görsel ve ölçüm muayeneleri ve hava aracının belirli performanslarının gerekliliklerinin karşılandığının doğrulanması için bir dizi test uçuşu yapılır. Herhangi bir

problem, sapma, eksiklik veya sorun görülmediği takdirde hava aracı konfigürasyonu envantere alınarak ilgili proje tamamlanmış olur.



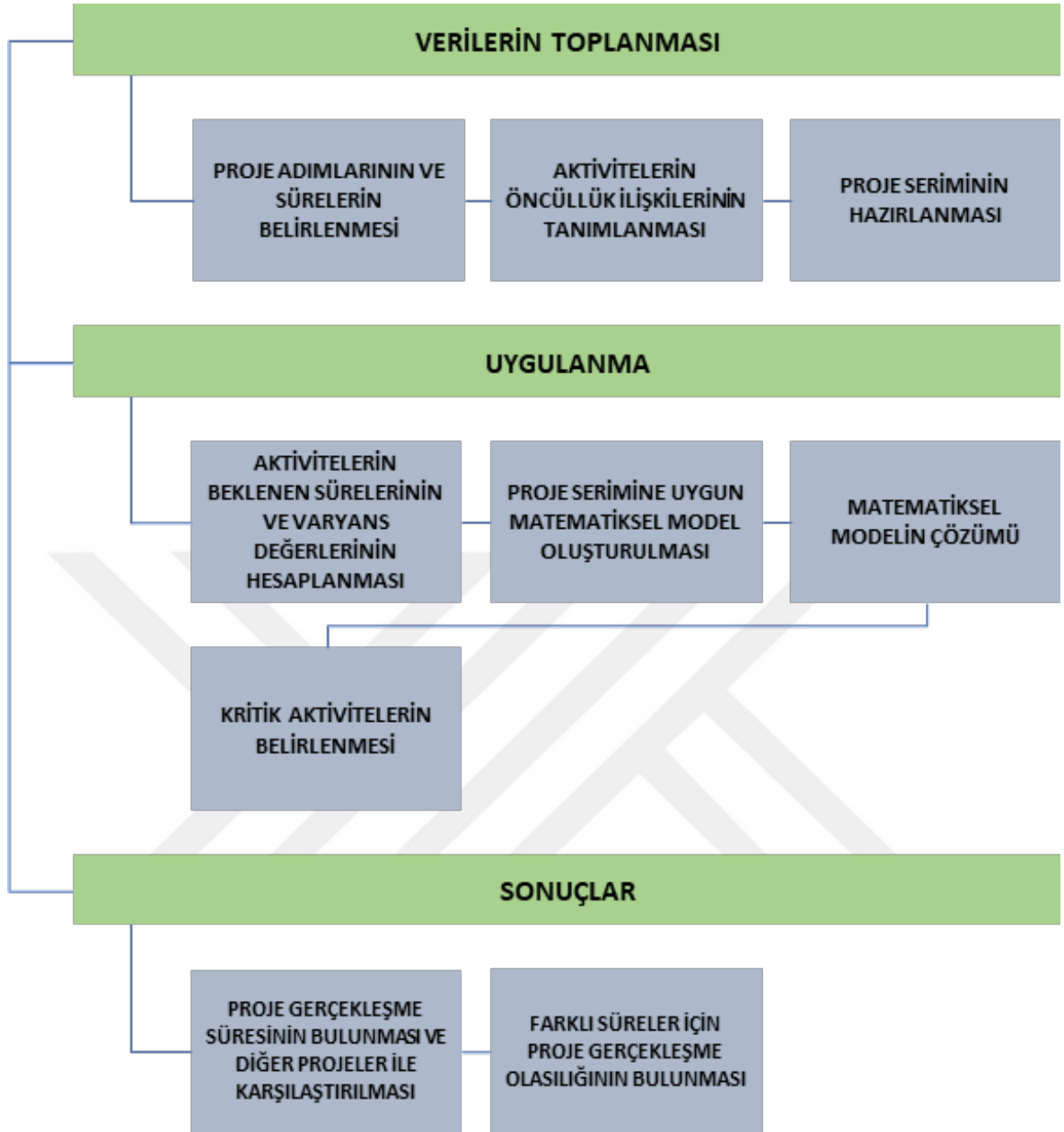
5. UYGULAMA

Bu çalışmada savunma sanayisine hizmet veren bir şirketin ilk defa geliştirmekte olduğu savaş uçağı projesinin indirgenmiş aktiviteleri ve bu aktivitelerin öncüllük ilişkileri üzerinden proje gerçekleşme süresi tahmin edilmeye çalışılmıştır. Ayrıca yapılan tahminin geçmişte başka ülkeler tarafından gerçekleştirilmiş olan muadil projelerin süreleri ile karşılaştırması yapılmıştır.

Çalışmada ilk olarak, projenin ilk bloğu için oluşturulan ve on binlerce farklı aktiviteden oluşan detay takviminin incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Bu takvim adımları, alanında uzman bir ekip tarafından 63 adımlık genel bir aktivite listesine indirgenmiştir. Bu aktiviteler yönetsel, analiz, test, üretim gibi farklı disiplinleri içermekte olup savaş uçağı geliştirilmesi için yapılması zorunlu aktiviteler olarak belirlenmiştir. Genel aktivitelerin belirlenmesinden sonra, gerçekleştirilmesi gereken aktiviteler arasındaki öncüllük ilişkileri tanımlanmış ve öncüllük ilişkilerinin tanımlanması ile birlikte, gerçekleştirilecek aktivitelerin önceden öngörülemeyecek sebepler ile gecikmesi veya beklenenden çok daha erken bitmesi gibi olgular da hesaba katılarak iyimser, kötümser ve olası süreler tanımlanmıştır. PERT metodu ile her aktivite için belirlenen iyimser, kötümser ve olası süreler bir araya getirilerek, proje aktivitelerinin beklenen süreleri hesaplanmıştır.

Bu noktadan sonra aktiviteler arası öncüllük ilişkileri de göz önünde bulundurularak proje serimi oluşturulmuş ve bu serim üzerinden matematiksel model oluşturularak kritik aktiviteler ve beklenen proje gerçekleşme süresi elde edilmiştir. Bulunan bu süre, geçmişte hayata geçirilen diğer beşinci nesil savaş uçağı projelerinin gerçekleşme süreleri ile karşılaştırılarak, yapılan öngörülerin ne kadar uyumlu olduğu konusunda bir çıkarım yapılmıştır. Bu karşılaştırma proje başlangıcından ilk uçuşa kadar geçen süre ve ilk uçuştan envantere girişe kadar geçen süre olarak iki parametre üzerinden yapılmıştır.

Bununla beraber, müşterinin ihtiyaç tarihini öne çekmesi durumunda farklı süreler için proje gerçekleşme olasılıkları hesaplanmıştır. Bulunan sürenin dünyadaki benzer uçakların geliştirme süreleri ile ne kadar örtüştüğü irdelenmiştir. Ayrıca bu sürenin kısaltılması durumunda proje başarı oranı hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen uygulamanın adımları Şekil 5.1.'de verilmiştir.



Şekil 5.1. Uygulama Adımları

5.1.Verilerin Toplanması

Savaş uçağı geliştirme projeleri tasarım, üretim, test ve doğrulama aktiviteleri gibi birçok farklı disiplinden aktivitenin bir arada yürütüldüğü projelerdir. Projenin geneline bakıldığında gerçekleştirilen aktivitelerin sayısı yüzbinleri bulmaktadır. Ancak böyle bir aktivite sayısı üzerinden çalışma gerçekleştirmek ve öngörü yapmak çok anlamlı olmayacağı için, savaş uçağı projesinde çalışan konusunda uzman kişiler ile görüşülerek indirgenmiş aktiviteler belirlenmiştir.

Aktivitelerin belirlenmesi noktasında bu proje kapsamında çalışmalar yürüten hava aracı seviyesi kalifikasyon baş mühendisliği çalışanlarından, mühendislik entegrasyon

müdürlüğü çalışanlarından ve proje yönetim ofisi çalışanlarından oluşan bir ekipten destek alınmıştır. Aktivitelerin iyimser, olası ve kötümser sürelerinin tanımlanması için yapılan çalışmada proje yönetim ofisi çalışanları ve alt sistem tasarım ekipleri ile ortak çalışma yapılmıştır. Öncüllük ilişkisi kurulması noktasında ise şirket süreçleri ve havacılık standartları incelenmiş, geçmişte hava aracı tasarım süreçlerinde çalışmış olan sistem tasarım liderlerinin yorumlarına başvurulmuştur.

Tüm bu çalışmalar Tablo 5.1.'de aktivite numarası, aktivite, öncül aktivite(ler), iyimser, olası ve kötümser süre başlıkları altında verilmiştir. Şekil 5.2.'de ise her bir aktivitenin olası süresi ve diğer aktiviteler ile olan öncüllük ilişkisi göz önünde bulundurularak ayrıt tabanlı bir proje serimi hazırlanmıştır.

Tablo 5.1. Proje Aktiviteleri ve Diğer Bilgiler

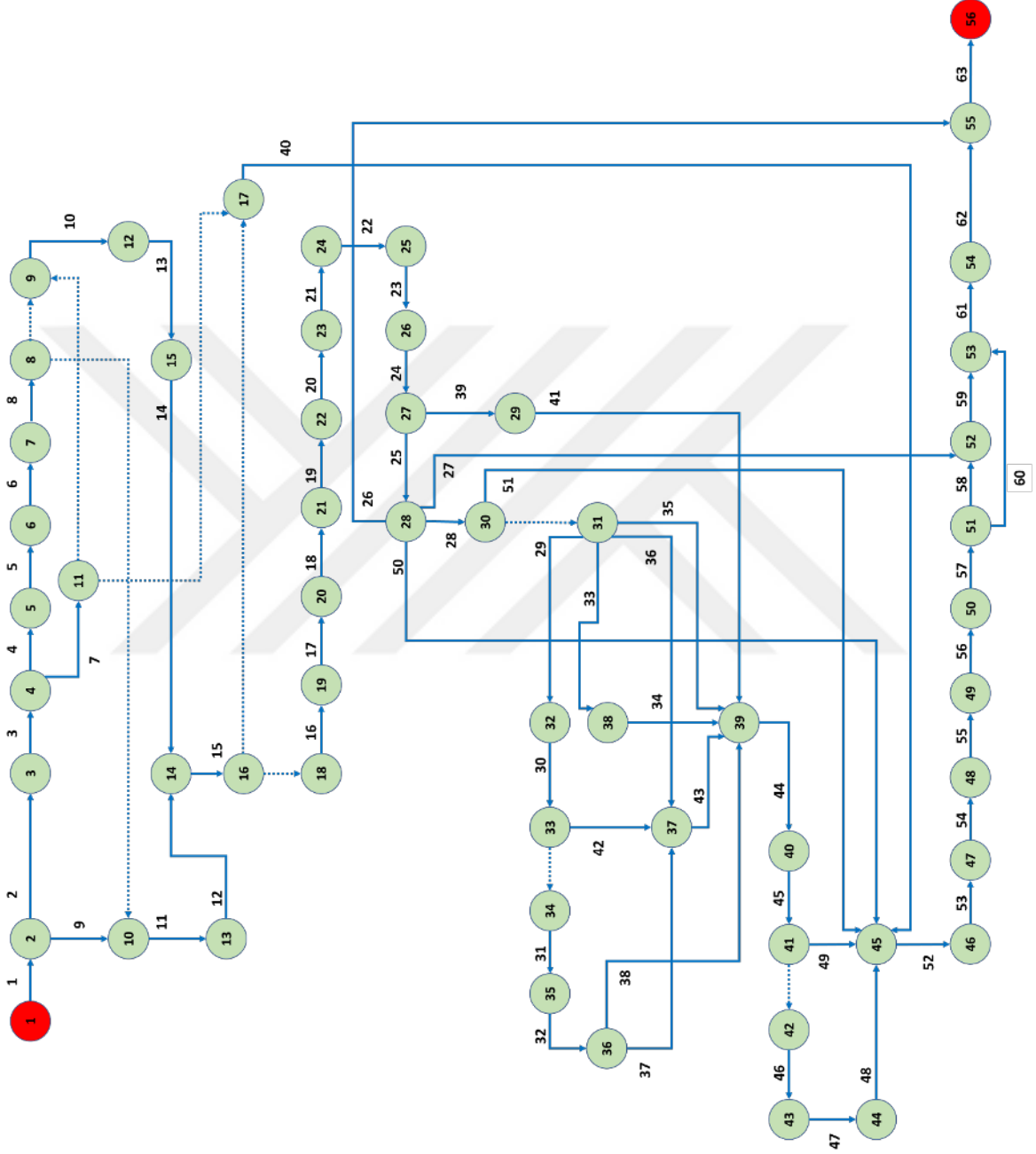
Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktivite(ler)	İyimser Süre-t _a (Ay)	Olası Süre-t _b (Ay)	Kötümser Süre-t _c (Ay)
1	Konsept Belirleme	-	4	6	8
2	Farklı Alternatiflerin Analizi	1	6	8	12
3	Sözleşme İmzası	2	1	2	4
4	Planform Seçimi	3	1	3	6
5	Uçak Seviyesi Teknik Çizimler	4	6	6	8
6	Rüzgâr Tüneli Testleri	5	8	12	14
7	Malzeme Testleri	3	9	12	15
8	Detay Analizler	6	14	18	24
9	Alt Sistem Tedarik Anlaşmaları	1	3	6	9
10	Hammadde Tedariki	7, 8	9	12	18
11	Teknik Çizimlerin Yayınlanması	8, 9	4	6	9
12	Montaj Ekipmanlarının Tedariki	11	4	6	8
13	Alt Seviye Komponent Üretimleri	10	2	3	4
14	Kalite Kontrol	13	1	1	2
15	Ön Gövde Montajı	12, 14	2	3	4
16	Ön Orta Gövde Montajı	15	2	3	4
17	Orta Gövde Montajı	16	3	4	5
18	Ana Gövde Montajı	17	2	3	4
19	Kanat Birimlerinin Montajı	18	1	1	2
20	Arka Gövde Montajı	19	3	4	5

Tablo 5.1. devam ediyor.

Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktivite(ler)	İyimsen Süre-t _a (Ay)	Olası Süre-t _b (Ay)	Kötümser Süre-t _c (Ay)
21	Gövde Birleşimi	20	1	1	1
22	İniş Takımı Montajı	21	1	1	1
23	Stabilizatör Montajı	22	1	1	1
24	Motor Entegrasyonu	23	1	1	1
25	Montaj Hattı Testleri	24	1	2	3
26	Tam Boy Yorulma Testleri	25	84	96	120
27	Tam Boy Statik Yükleme Testleri	25	1	2	3
28	Alt Sistem Entegrasyonu	25	1	2	3
29	Elektrik Sistemi Testleri	28	1	2	3
30	Yakıt Sistemi Testleri	29	1	2	3
31	Hidrolik Sistem Testleri	30	2	3	4
32	Mekanik Sistem Testleri	31	3	6	8
33	Radar Sistemi Testleri	28	6	6	9
34	İletişim Sistemleri Testleri	33	3	4	6
35	Elektro-Optik Testleri	28	4	6	8
36	Uçuş Kontrol Sistemleri Testleri	28	4	6	8
37	İniş Takımı Testleri	32	2	4	5
38	Silah Sistemi Testleri	32	2	3	4
39	Motor Testleri	24	6	6	9
40	Kuş Çarpması Testleri	7, 15	1	2	2
41	İklimlendirme Testleri	39	2	3	4
42	İlk Enerjilendirme Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	30	1	1	2
43	Entegre Uçak Sistemleri Testleri	36, 37, 42	6	9	10
44	Entegre Aviyonik Sistem Testleri	34, 35, 38, 41, 43	6	9	10
45	İlk Motor Çalıştırma Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	44	1	1	1
46	Kızıl-Ötesi Görünürlük Testleri	45	1	2	3
47	Radar İzi Testleri	46	3	6	8
48	Yıldırım Testleri	47	1	2	3
49	Yerde Titreşim Testleri	45	1	1	2
50	Yağmur Testleri	25	1	1	2
51	Ağırlık ve Balans Testleri	28	1	1	2
52	İlk Uçuş Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	40, 48, 49, 50, 51	1	2	2
53	Taksi Testleri	52	1	1	2

Tablo 5.1. devam ediyor.

Aktivite #	Aktivite	Öncül Aktivite(ler)	İyimser Süre-t _a (Ay)	Olası Süre-t _b (Ay)	Kötümser Süre-t _c (Ay)
54	Sensor Kalibrasyon Uçuş Testleri	53	1	2	2
55	Güvenli Uçuş Testleri	54	2	3	4
56	Çevresel Koşullar Uçuş Testleri	55	1	2	3
57	Uçak Sistemleri Uçuş Testleri	56	4	4	6
58	Performans Uçuş Testleri	57	4	6	8
59	Yük Uçuş Testleri	27, 58	6	8	10
60	Aviyonik Sistemler Uçuş Testleri	57	8	8	12
61	Silah Sistemleri Uçuş Testleri	59, 60	18	24	24
62	Düşük Görünürlük Testleri	61	4	4	5
63	Kabul Uçuş Testleri	26, 62	3	3	4



Şekil 5.2. Proje Serimi

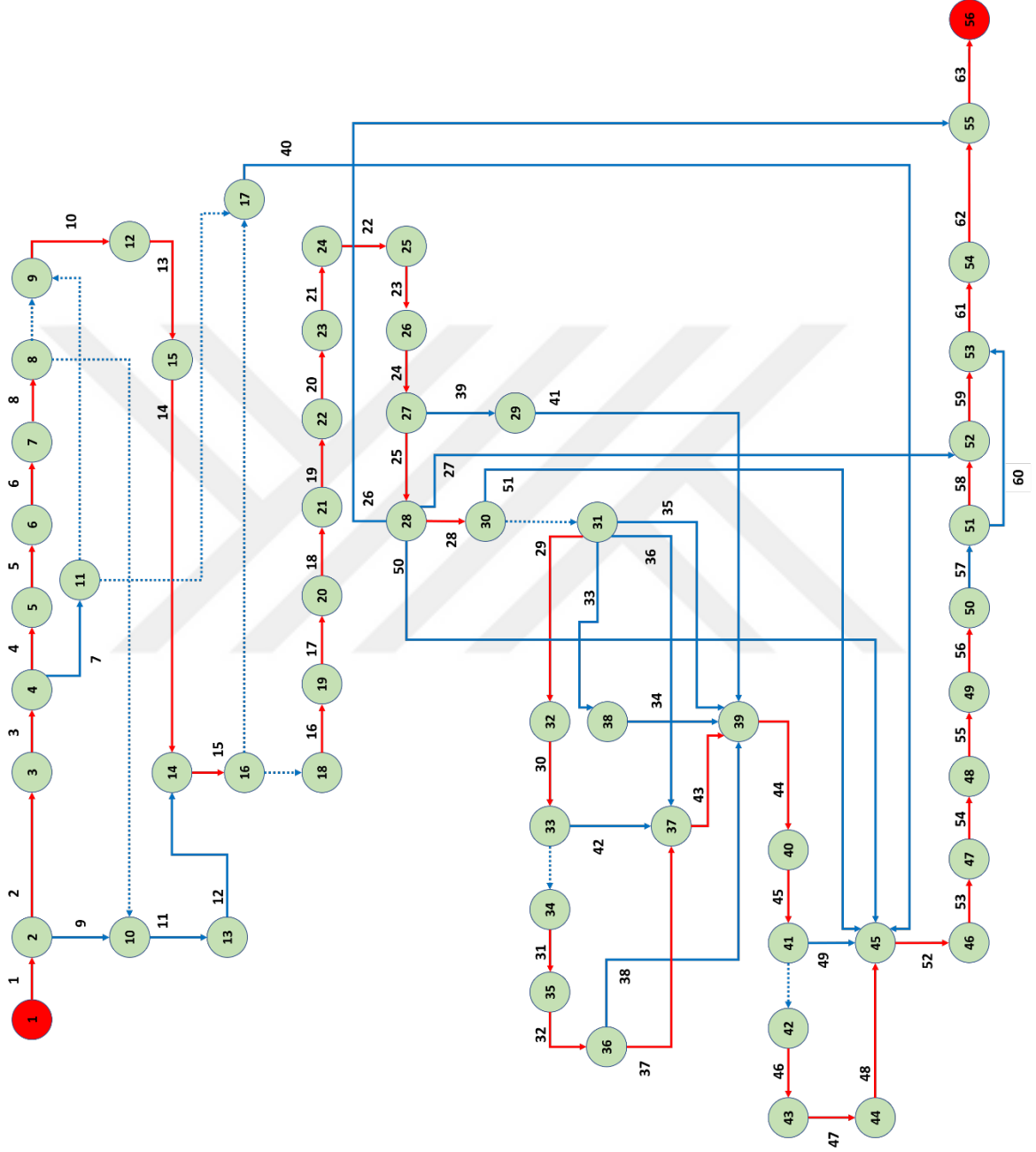
5.2. PERT Metodunun Uygulanması ve Kritik Aktiviteler

PERT metodu ile her bir proje adımı için tanımlanan iyimser, kötümser ve olası süreler ile Eş.3.9 ve Eş.3.10 kullanılarak beklenen süre (te) ve Varyans (σ^2) değerlerine ulaşılır. Şekil 5.2. ile tanımlanan proje serimi üzerinden Eş.3.15, Eş.3.16 ve Eş.3.17 kullanılarak oluşturulan matematiksel modelin çözümü ile proje aktivitelerinin hangilerinin kritik aktivite olduğu bilgisine ulaşılır. Hazırlanan matematiksel model Ek 1’de ve elde edilen çıktılar Ek 2’de verilmektedir. Ek 2’de bolluğu sıfır bulunan aktiviteler kritik olarak tanımlanmakta olup, yazılan matematiksel modelin her satırına karşılık olarak, verilen denklem satırının kritik bir aktivite tanımlayıp tanımlamadığı görülmektedir.

Ek: 2’de verilen çözüm çıktısında bulunan “Row” başlıklı sütunu Ek: 1’de verilen matematiksel modelin kaçınıcı satırı ile ilgili bilgi verildiğini belirtir, “Slack or Surplus” başlıklı sütunu ilgili satırda belirtilen aktivitenin ne kadar süre bolluğunun olduğunu ve son olarak da “Dual Price” başlıklı sütunu ise negatiflik durumunda ilgili satırla belirtilen aktivitenin kritik olması durumunu anlatır. Hazırlanan matematiksel model ve çıkan sonuçlar satır satır karşılaştırıldığında EK: 2’de verilen çözümde “Dual Price” başlıklı sütunu negatif değer alan satırların aktivite karşılıkları bulunmuştur. Bu karşılaştırma sonucunda 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 28, 29, 30, 31, 32, 37, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 61, 62 ve 63 numaralı aktiviteler kritik aktivite olarak tanımlanmıştır. Kritik aktivitelerin kırmızı renkle belirtilerek gösterildiği serime Şekil 5.3.’ten ulaşılabilir.

Her bir aktivite için Eş.3.9 ve Eş.3.10 hesaplanan beklenen süre (te) ve Varyans (σ^2) değerleri ile proje aktivitelerinin hangilerinin kritik aktivite olduğu (kritik aktiviteler kırmızı, kritik olmayan aktiviteler yeşil renk kodu ile) Tablo 5.2’de verilmiştir.

Proje süresinin uzaması durumunda projenin gerçekleşme olasılığının değişkenliğini bulmak adına 0,99-0,50 arasında değişen güven düzeylerine ait sonuçlar da Eş.3.12, Eş.3.13 ve Eş.3.14 kullanılarak bütün proje için hesaplanarak Tablo 5.3’de verilmiştir. Bu bilgilerin grafiksel gösterimi de Şekil 5.4.’te sunulmuştur. Hem Tablo 5.3’te hem de Şekil 5.4.’te görülebileceği gibi proje gerçekleşme süresi arttıkça proje gerçekleşme oranı artmaktadır.



Şekil 5.3. Kritik Aktivitelerin Proje Seriminde Gösterimi

Tablo 5.2. Proje Aktivitelerinin Beklenen Süre / Varyans Değerleri ile Kritiklik Durumu

Aktivite #	Aktivite	Beklenen Süre (Ay)	Varyans
		$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$	$\sigma^2 = \left[\frac{t_c - t_a}{6} \right]^2$
1	Konsept Belirleme	6,00	0,44
2	Farklı Alternatiflerin Analizi	8,33	1,00
3	Sözleşme İmzası	2,17	0,25
4	Planform Seçimi	3,17	0,69
5	Uçak Seviyesi Teknik Çizimler	6,33	0,11
6	Rüzgâr Tüneli Testleri	11,67	1,00
7	Malzeme Testleri	12,00	1,00
8	Detay Analizler	18,33	2,78
9	Alt Sistem Tedarik Anlaşmaları	6,00	1,00
10	Hammadde Tedariki	12,50	2,25
11	Teknik Çizimlerin Yayınlanması	6,17	0,69
12	Montaj Ekipmanlarının Tedariki	6,00	0,44
13	Alt Seviye Komponent Üretimleri	3,00	0,11
14	Kalite Kontrol	1,17	0,03
15	Ön Gövde Montajı	3,00	0,11
16	Ön Orta Gövde Montajı	3,00	0,11
17	Orta Gövde Montajı	4,00	0,11
18	Ana Gövde Montajı	3,00	0,11
19	Kanat Birimlerinin Montajı	1,17	0,03
20	Arka Gövde Montajı	4,00	0,11
21	Gövde Birleşimi	1,00	0,00
22	İniş Takımı Montajı	1,00	0,00
23	Stabilizatör Montajı	1,00	0,00
24	Motor Entegrasyonu	1,00	0,00
25	Montaj Hattı Testleri	2,00	0,11
26	Tam Boy Yorulma Testleri	98,00	36,00
27	Tam Boy Statik Yükleme Testleri	2,00	0,11
28	Alt Sistem Entegrasyonu	2,00	0,11
29	Elektrik Sistemi Testleri	2,00	0,11
30	Yakıt Sistemi Testleri	2,00	0,11
31	Hidrolik Sistem Testleri	3,00	0,11
32	Mekanik Sistem Testleri	5,83	0,69
33	Radar Sistemi Testleri	6,50	0,25
34	İletişim Sistemleri Testleri	4,17	0,25
35	Elektro-Optik Testleri	6,00	0,44
36	Uçuş Kontrol Sistemleri Testleri	6,00	0,44
37	İniş Takımı Testleri	3,83	0,25
38	Silah Sistemi Testleri	3,00	0,11

Tablo 5-2. devam ediyor.

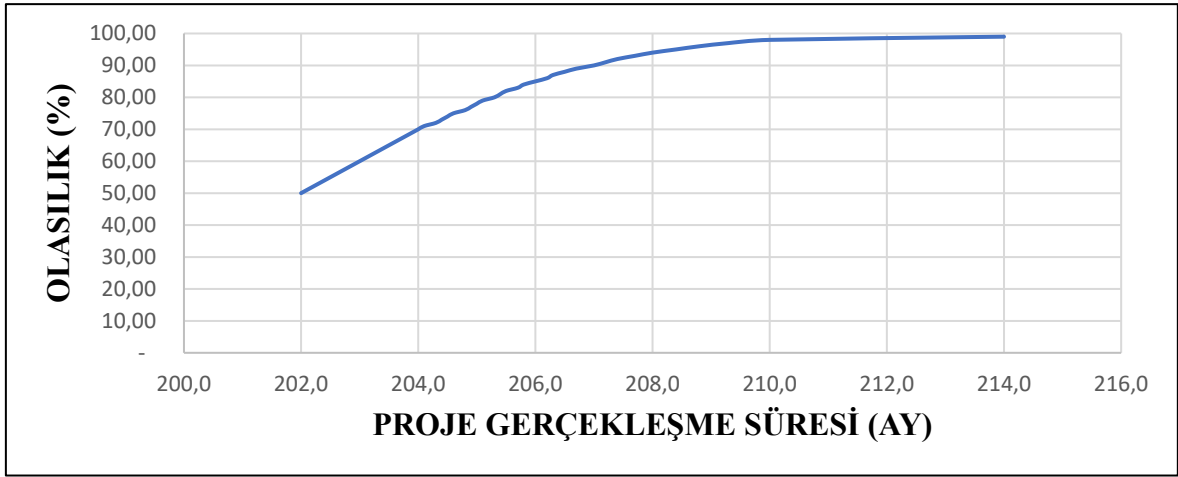
Aktivite #	Aktivite	Beklenen Süre (Ay)	Varyans
		$t_e = \frac{t_a + 4t_b + t_c}{6}$	$\sigma^2 = \left[\frac{t_c - t_a}{6} \right]^2$
39	Motor Testleri	6,50	0,25
40	Kuş Çarpması Testleri	1,83	0,03
41	İklimlendirme Testleri	3,00	0,11
42	İlk Enerjilendirme Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,17	0,03
43	Entegre Uçak Sistemleri Testleri	8,67	0,44
44	Entegre Aviyonik Sistem Testleri	8,67	0,44
45	İlk Motor Çalıştırma Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,00	0,00
46	Kızıl-Ötesi Görünürlük Testleri	2,00	0,11
47	Radar İzi Testleri	5,83	0,69
48	Yıldırım Testleri	2,00	0,11
49	Yerde Titreşim Testleri	1,17	0,03
50	Yağmur Testleri	1,17	0,03
51	Ağırlık Ve Balans Testleri	1,17	0,03
52	İlk Uçuş Öncesi Emniyet Değerlendirme Kurulu	1,83	0,03
53	Taksi Testleri	1,17	0,03
54	Sensor Kalibrasyon Uçuş Testleri	1,83	0,03
55	Güvenli Uçuş Testleri	3,00	0,11
56	Çevresel Koşullar Uçuş Testleri	2,00	0,11
57	Uçak Sistemleri Uçuş Testleri	4,33	0,11
58	Performans Uçuş Testleri	6,00	0,44
59	Yük Uçuş Testleri	8,00	0,44
60	Aviyonik Sistemler Uçuş Testleri	8,67	0,44
61	Silah Sistemleri Uçuş Testleri	23,00	1,00
62	Düşük Görünürlük Testleri	4,17	0,03
63	Kabul Uçuş Testleri	3,17	0,03

Kritik Aktiviteler

Kritik Olmayan Aktiviteler

Tablo 5.3. Süreye Bağlı Proje Gerçekleşme Olasılıkları

Proje gerçekleşme Süresi (Ay)	Olasılık (%)	Proje gerçekleşme Süresi (Ay)	Olasılık (%)
202,0	50,00	204,6	75,00
202,1	51,00	204,8	76,00
202,2	52,00	204,9	77,00
202,3	53,00	205,0	78,00
202,4	54,00	205,1	79,00
202,5	55,00	205,3	80,00
202,6	56,00	205,4	81,00
202,7	57,00	205,5	82,00
202,8	58,00	205,7	83,00
202,9	59,00	205,8	84,00
203,0	60,00	206,0	85,00
203,1	61,00	206,2	86,00
203,2	62,00	206,3	87,00
203,3	63,00	206,5	88,00
203,4	64,00	206,7	89,00
203,5	65,00	207,0	90,00
203,6	66,00	207,2	91,00
203,7	67,00	207,4	92,00
203,8	68,00	207,7	93,00
203,9	69,00	208,0	94,00
204,0	70,00	208,4	95,00
204,1	71,00	208,8	96,00
204,3	72,00	209,3	97,00
204,4	73,00	210,0	98,00
204,5	74,00	214,0	99,00



Şekil 5.4. Süreye Bağlı Proje Gerçekleşme Olasılıkları

5.3. Geçmiş Projeler ile Karşılaştırmalar

Yapılan öngörülerini diğer beşinci nesil savaş uçağı projeleri ile karşılaştırmak adına dünyada halihazırda operasyonel olarak kullanılan ve beşinci nesil olarak kabul edilebilecek Amerika Birleşik Devletleri'nin geliştirdiğı F-22 ve F-35 uçakları ile Rusya Federasyonu'nun geliştirdiğı SU-57 savaş uçakları incelenmiştir.

ABD hava kuvvetleri ilerleyen süreçte F-15 ve F-16 savaş uçaklarının yerini alması ve dünyadaki tehdit algılamalarına cevap verebilmesi amacıyla önceliğı hava üstünlüğü sağlayabilecek bir savaş uçağı geliştirilmesi için konsept belirleme çalışmalarına 1983 yılında başlamıştır. Konsept belirleme çalışmalarının ardından 1985 yılında F-22 projesi başlatıldı. İlk uçuşunu Eylül 1997 yılında yapan F-22 savaş uçağı, Aralık 2005 yılında ABD hava kuvvetlerine teslim edilerek envantere girmiştir. F-22 projesi, konsept belirleme çalışmaları ile başlayıp envantere giriş ile son bularak toplamda yaklaşık 22 yıl sürmüştür [52]. Şekil 5.5.'te F-22 savaş uçağının bir görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.5. F-22 Savaş Uçağı – Amerika Birleşik Devletleri [53]

ABD hava kuvvetleri 1993 yılında hali hazırda devam eden Çok Rollü Avcı Uçağı ve Gelişmiş Savaş Uçağı projelerini iptal ederek Ortak Gelişmiş Saldırı Teknolojisi programını başlattı. Bu projede amaç yeni bir uçak geliştirmek değil, olgun teknolojileri daha da geliştirmek ve gelişmiş taarruz savaşı konseptlerini göstermekti. Bu kapsamda ortaya çıkarılan F-35 savaş uçağı ilk uçuşunu Aralık 2006'da yapmış olmasına rağmen Temmuz 2015 yılında envantere girebilmiştir. F-35 projesi 1993 yılında başlatılan Ortak Gelişmiş Saldırı Teknolojisi programı da dahil edilerek toplamda yaklaşık 22 yıl sürmüştür [54]. Şekil 5.6.'da F-35 savaş uçağının bir görseline yer verilmiştir.



Şekil 5.6. F-35 Savaş Uçağı – Amerika Birleşik Devletleri [55]

Rusya Federasyonu'nun geliştirdiği SU-57 savaş uçağı ile ilgili ilk çalışmalar 1980'lerin sonunda Sovyetler dönemine dayanmaktadır ancak siyasi gelişmeler bu projenin 2000'lere kadar başlatılamamasına sebep olmuştur. 2003 yılında başlatılan proje kapsamında Ocak 2010 yılında ilk uçuş yapılmış ve ilk uçak Aralık 2020 yılında envantere girmiştir. SU-57 projesi 2003-2020 yılları arasında toplam 18 yıl sürmüştür [56]. Şekil 5.7.'de Su-57 model savaş uçağının bir görseli paylaşılmıştır.



Şekil 5.7. SU-57 Savaş Uçağı – Rusya Federasyonu [57]

Dünyada gerçekleştirilmiş diğer projelerin ilk uçuş için ihtiyaç duyduğu sürelerden F-22'nin 165 aylık süresini kötümser (t_c), SU-57'nin 84 aylık süresini iyimser (t_a) ve F-35'in 155 aylık süresini olası (t_b) süre olarak kabul eder ve Eş.3.1 kullanırsa t_c değeri yaklaşık 145

ay olarak bulunur. Bu süre Tablo 5.4.'te görüleceği üzere Türkiye'de geliştirilen savaş uçağı projesi ile ilgili olarak 146 ay olarak öngörülmüştür.

Aynı şekilde ilk uçuştan envantere giriş için geçen süre için, SU-57'nin 131 aylık süresini kötümser (t_c), F-35'in 90 aylık süresini iyimser (t_a) ve F-22'in 99 aylık süresini olası (t_b) süre olarak kabul eder ve Eş.3.1 ile 102 aylık bir t_e değerine ulaşılır. Tablo 5.4.'te de görüleceği üzere Türk savaş uçağı projesinde bu süre 56 ay olarak görece daha kısa bir süre olarak tahmin edilmektedir.

Tablo 5.4. Savaş Uçağı Projelerinde Süreler

AKTİVİTELER		F-22	F-35	SU-57	t_e (F-22/F-35/SU-57)	Türk Savaş Uçağı Öngörü
Proje Başlangıcından İlk Uçuşa Kadar Geçen Süre	İlk	165 Ay	155 Ay	84 Ay	145 Ay	146 Ay
İlk Uçuştan Envantere Girişe Kadar Geçen Süre	Girişe	99 Ay	90 Ay	131 Ay	102 Ay	56 Ay

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye'nin geliştirdiği ilk savaş uçağı projesi kapsamında gerçekleştirilecek olan aktivitelerin öncüllük ilişkileri ve süreleri göz önünde bulundurularak genel proje gerçekleşme süresi hesaplanmaya çalışılmıştır. Hesaplanan proje gerçekleşme süresinin muadil projelerin gerçekleşme süreleri ile uyumu irdelenmiş, uyumlar ve uyumsuzluklar üzerine değerlendirmeler yapılmıştır.

Türkiye'de geliştirilen beşinci nesil savaş uçağı projesi incelendiğinde, proje gerçekleşme süresi 202 ay olarak bulunmuştur. Kritik aktiviteler incelendiğinde ise projenin ilk aşamalarında hayata geçirilen ve savaş uçağının ana tasarım özelliklerinin ortaya çıkarıldığı konsept belirleme, planform seçimi ve rüzgâr tüneli testlerinin kritik aktivite olması beklenen bir durumdu. Bunun dışında detay analizlerin de üretim öncesi bitirilmesi olası hataların önüne geçmek, bütçe ve iş gücü kayıplarını azaltmak adına kritik bir aktivitedir. Savaş uçağı projelerinde kullanılan bazı nadir bulunan özel hammaddelerin tedariki de üretim süreçlerindeki durdurucu etkisi sebebiyle yine kritik bir aktivitedir.

Üretime başlanması ile birlikte tüm üretim sürecinin kritik aktivite olması da aynı şekilde beklenen bir durum olup olası bir gecikmenin testlere başlama noktasında projeyi geciktirmesi söz konusudur. Testler incelendiğinde ise önceliklerin genelde uçağın güvenli bir şekilde uçmasını sağlayan elektrik, yakıt, hidrolik sistemler gibi alt bileşenlerin testlerinde kritiklik mevcut olup, operasyonel gereksinimleri karşılayacak olan radar, elektro optik gibi sistemlerin testlerinde bu durum görülmemiştir. Aynı durum uçuş testlerine geçildiğinde de görülmüş olup kritik testler olarak güvenli uçuş, uçak sistemleri uçuş, performans uçuş testleri gibi öncelikle savaş uçağının gerçek manada güvenli bir operasyon gerçekleştirebileceğinin garanti altına alındığı testler kritiktir.

Tüm kritik aktiviteler incelendiğinde ise genellikle üretim ve test aktivitelerinin proje süresi üzerinde yüksek etkisinin olduğu görülmüştür. Böyle büyük kapsamlı ve bazı teknolojilerin ilk defa kullanılacağı bir projede test süreçlerinde öngörülemez hataların alınması ve bu süreçlerde beklenen sürelerin üzerine çıkılabileceği sürelerin kısaltılmaya çalışılması her ne kadar mümkün görülse de riskleri attıracağı görülmüştür. Daha önce de bahsedildiği gibi sektörde bu tarz bir proje daha önce gerçekleştirilmediği için kurulacak altyapıların ve ilk defa gerçekleştirilecek aktivitelerin de proje süresi üzerinde sonucu belirsiz etkileri olacaktır.

Konsept belirleme çalışmalarına 2011 tarihinde başlanan Türk savaş uçağı projesinde; ilk uçuş için yaklaşık 12 yıl, ilk uçuş sonrası envantere giriş için ise 56 aylık bir süre öngörülmektedir. Bu öngörülere göre ilk uçuşun 2023 yılı içerisinde yapılması beklenmekte olup, envantere giriş için ise 2027 yılı hedeflenmektedir. Bu sürenin ötelenmesi durumunda proje gerçekleşme oranının yükseldiği sonucuna ulaşılmaktadır.

Dünyada diğer ülkeler tarafından gerçekleştirilmiş projeler ile karşılaştırıldığında Türkiye’de geliştirilen savaş uçağı projesinin 146 aylık bir süre içerisinde uçurulması öngörüsü, ABD ve Rusya Federasyonun geçmişte hayata geçirdiği birçok savaş uçağı projesi olduğu da göz önünde bulundurulduğunda, Türkiye savunma sanayisi için gayet iyimser bir hedeftir. Ayrıca kurulacak altyapıların devreye alınması, ilgili personelin gerekli yetkinliklere ulaşması gibi durumlar da göz önünde bulundurulduğunda zorlayıcı bir hedef olarak düşünülebilir.

Türkiye savunma sanayisi tarafından geliştirilmekte olan beşinci nesil savaş uçağının tasarım, üretim ve test faaliyetlerini kapsayan, proje başlangıcından ilk uçuşa kadar öngörülen sürenin daha önce gerçekleştirilmiş savaş uçağı projeleri ile uyumlu olması noktasında gelişen üretim, tasarım ve analiz metodlarının geçmişe göre daha etkin olması da pozitif etki yaratmıştır. Birçok tasarım ve analiz aktiviteleri bilgisayar ortamlarında, analiz programlarında gerçek dünya ile çok yakın bir oranda uyum göstererek bu aktiviteler için gereken süreyi kısaltmaktadır. Bununla beraber bu projeyi hayata geçirecek olan savunma sanayisine hizmet veren şirketin de daha önce yaptığı, her ne kadar aynı konseptte bir hava aracı olmasa da farklı konseptlerde ürettiği hava araçlarından edindiği bilgi birikim ve bugüne kadar kurulmuş olan altyapıları da destekleyici bir etki oluşturmaktadır.

Diğer projelerin ilk uçuş sonrası genel doğrulama faaliyetlerini ve envantere giriş sürecini incelediğimizde diğer projelerde 102 aylık bir süre değerine ulaşmakta olup, Türk savaş uçağı projesinde bu süre 56 ay olarak çok daha kısa bir süre olarak tahmin edilmektedir. Bu sürenin diğer projelerden çok daha kısa olmasına savunma sanayisinin, savaş uçağı geliştirme stratejisinde kullandığı bloklandırma bakış açısı etkili olmuştur. Blok yaklaşım; projenin tüm ihtiyaç ve isterlerinin tek seferde karşılanması yerine birden fazla fazda, peyderpey ihtiyaç ve isterlerin yerine getirilmesini, hedeflenen asıl sisteme kabiliyetleri arttırarak ulaşmayı amaçlar. Bu strateji özellikle ilk defa geliştirilen projelerde çokça kullanılan ve başarı getiren bir stratejidir. Bununla beraber günümüzde etkinliği ve güvenilirliği hızla artan simülasyon ve simülatör teknolojileri de uçuş testlerinde geçirilecek süreler üzerinde azaltıcı bir etkisi olacağı düşünülmektedir.

Savaş uçağı geliştirme projeleri sadece bir tasarım, üretim veya test aktivitesi olarak görülmemelidir. Bu tarz projelerde birbirleri ile etkileşimli, birbirleri ile bağlantılı ve öncül ardıl ilişkileri olan birçok aktivitenin belirli bir takvim ve plan çerçevesinde ilerletilmesi gerekmektedir. Hatta proje ile direkt olarak ilgisi olmayan altyapıların inşası, o altyapılarda kullanılacak olan ekipmanların tedariki ve yıllar sonra yapılması planlanan testler için iş gücü ve bilgi birikiminin planlanması gibi çok farklı konuların da projeyi destekler nitelikte gerçekleştirilebilmesi için proje yönetimi çok önemlidir.

Bu çalışmada herhangi bir kaynak kısıtı olmadan proje gerçekleşme süresi hesaplanmış ve proje yönetim tekniklerinden PERT kullanılmıştır. Gelecek çalışmalarda PERT dışında bir yöntem ile ilerlenerek ulaşılabilecek farklı sonuçlar değerlendirilebilir. Bunun dışında maliyet, işgücü, kaynak kısıtı ve benzeri durumlar da modellere entegre edilebilir, farklı noktalarda optimizasyonlar yapılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] G. Korkmaz, “Gelecek Öngörüler ve Alınan Dersler Çerçevesinde Savunma Tedarik Projeleri,” *Savunma Bilimleri Dergisi*, 1(41), 163-204, 2022, Doi: 10.17134/khosbd.1101488
- [2] N. Ercan Erşahin, “Savaş Uçağı Geliştirme Programlarını Olumsuz Etkileyen Faktörlerin Önem Derecelerinin Belirlenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2019.
- [3] A. Aksoy, M. Akansel, C. Atalay, A. M. Çamlıbel, D. Yaşar, D. Keseroğlu ve S. Vanlıoğlu, “Proje Yönetiminde Zaman ve Maliyet Odaklı Bütünleşik Planlama Yaklaşımı ve Bir Uygulama,” *Journal of Entrepreneurship and Innovation Management*, 8(1), 1-20, 2019, ISSN: 2147-5792.
- [4] Y. Farida, and L. P. Anenda, “Network Planning Analysis on Road Construction Projects by CV. X Using Evaluation Review Technique (PERT)-Critical Path Method (CPM) and Crashing Method,” *International Journal of Integrated Engineering*, 14(4), 377-390, 2022, Doi: 10.30880/ijie.2022.14.04.029.
- [5] R. M. Sadow, "How PERT was used in managing the X-20 (Dyna-Soar) program," in *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. EM-11, no. 4, pp. 138-154, Dec. 1964, Doi: 10.1109/TEM.1964.6446422.
- [6] M. R. Bintang, K. Rossa Sungkono and R. Sarno, "Time and Cost Optimization in Feasibility Test of CCTV Project using CPM and PERT," *2019 International Conference on Information and Communications Technology (ICOIACT)*, Yogyakarta, Indonesia, 2019, pp. 678-683, Doi: 10.1109/ICOIACT46704.2019.8938466.
- [7] B. Desticioğlu, “Project Planning with CPM and PERT Methods: Example of Defence Industry,” *Journal of Naval Sciences and Engineering*, vol. 18, no. 2, pp. 363–385, Nov. 2022, ISSN: 1304-2025.

- [8] G. I. Budiawati and R. Sarno, "Time and cost optimization of business process RMA using PERT and goal programming," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 17, no. 2, p. 781, Apr. 2019, Doi: 10.12928/telkomnika.v17i2.11792.
- [9] W. Agyei, "Project planning and scheduling using PERT and CPM techniques with linear programming: case study," *International journal of scientific & technology research*, 4(8), 222-227, 2015, ISSN 2277-8616.
- [10] N. Kutlu, "Proje planlama teknikleri ve PERT tekniğinin inşaat sektöründe uygulanması üzerine bir çalışma," Yüksek Lisans Tezi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Mustafa Kemal Üniversitesi, Hatay, Türkiye, 2001.
- [11] M. Karahan ve Y. Ezin, "PERT-CPM tekniğiyle bir inşaatın yapım süresi ve maliyetlerinin optimizasyonu," *Bartın Üniversitesi İİBF Dergisi*, 5(10), 73-89, 2014, ISSN: 1309-954X.
- [12] O. Coşkun ve İ. Ekmekçi, "Bir inşaat projesinin evreleri ile zaman ve maliyet analizinin proje yönetim teknikleri vasıtasıyla incelenmesi," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(20), 39-53, 2012, ISSN: 1305-7820.
- [13] D. P. Daniel and N. Gabriela, "Estimating the Duration of a Project Using PERT Technique," *Ovidius University Annals, Series Economic Sciences*, 13(2), 2013, ISSN/2393-3127.
- [14] R. F. Ashadi, A. E. Husin, and I. Guntorojati, "Infrastructure Construction Projects Scheduling Using Manual-Program Evaluation and Review Technique (M-PERT) Method," *Jurnal Teknik Sipil*, 29(2), 125-132, 2022, Doi: 10.5614/jts.2022.29.2.3.
- [15] A. Ahmed, B. Kayis, and S. Amornsawadwatana, "A review of techniques for risk management in projects," *Benchmarking: An International Journal*, 14(1), 22-36, 2007, Doi: 10.1108/14635770710730919.

- [16] A. M. Aliyu, "Project management using critical path method (CPM): a pragmatic study," *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 18(3-4), 197-206, 2012, Doi: 10.4314/gjpas.v18i3-4.11.
- [17] S. Zareei, "Project scheduling for constructing biogas plant using critical path method," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 756-759, 2018, Doi: 10.1016/j.rser.2017.08.025
- [18] Ž. Ljevo and M. Vukomanović "Project management practiced in public project stream of Bosnia and Herzegovina," *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 119, 692-701, 2014, Doi: 10.1016/j.sbspro.2014.03.077
- [19] Y. Fan, J. Si, F. Zhou, Zhang Renwei, H. Shao, and H. Zhao, "Optimization of air quantity regulation in mine ventilation networks using the improved differential evolution algorithm and critical path method," *International journal of mining science and technology*, 25(1), 79–84, 2015, Doi: 10.1016/j.ijmst.2014.11.001.
- [20] Takakura, Y., Yajima, T., Kawajiri, Y., & Hashizume, S. (2019). Application of critical path method to stochastic processes with historical operation data. *Chemical Engineering Research and Design*, 149, 195-208.
- [21] Y. Cheng, "Optimal train traffic rescheduling simulation by a knowledge-based system combined with critical path method," *Simulation Practice and Theory*, 4(6), 399-413, 1996, Doi: 10.1016/S0928-4869(96)00034-1
- [22] E. P. Pebrianto, E. W. Yunitasari, and D. A. Susanti, "Scheduling Time and Project Costs Using the Critical Path Method (CPM) And the Evolution and Review Technique (PERT) Program on The Dust Collector Machine at Pt. The Glorious Element of Suryamasinka (Elgisa)," *ICSET: International Conference on Sustainable Engineering and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 133–142, Aug. 2022, Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: <https://seminar.ustjogja.ac.id/index.php/ICSET/article/view/219>

- [23] O. U. Cynthia, "Implementation of Project Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM): A Comparative Study," *International Journal of Industrial and Operations Research*, 3(004), 2020, Doi: 10.35840/2633-8947/6504
- [24] M. Kholil, B. N. Alfa and M. Hariadi, "Scheduling of house development projects with CPM and PERT method for time efficiency (Case study: House type 36)," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 140, no. 1, IOP Publishing, 2018, doi: 10.1088/1755-1315/140/1/012010
- [25] G. R. Dundas and K. A. Krentler, "Critical path method for introducing an industrial product," *Industrial Marketing Management*, vol. 11, no. 2, pp. 125–131, Apr. 1982, doi: 10.1016/0019-8501(82)90006-2.
- [26] T. Gupta, "Applying the critical path method to manufacturing routing," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 21, no. 1–4, pp. 519–523, Jan. 1991, doi: 10.1016/0360-8352(91)90145-v.
- [27] R. C. Leachman and S. Kim, "A revised critical path method for networks including both overlap relationships and variable-duration activities," *European Journal of Operational Research*, vol. 64, no. 2, pp. 229–248, Jan. 1993, doi: 10.1016/0377-2217(93)90179-q.
- [28] H. Farid, Badruzzaman, Y. Fajar, O. Rohaeni, G. Gunawan, and E. Harahap, "CPM and PERT technique efficiency model for child veil production," *International Journal Of Scientific & Technology Research* volume 9, issue 04, pp. 1470-1476, 2020, ISSN: 2277-8616.
- [29] D. G. Malcolm, J. H. Roseboom, C. E. Clark, and W. Fazar, "Application of a Technique for Research and Development Program Evaluation," *Operations Research*, vol. 7, no. 5, pp. 646–669, 1959, Accessed: May 15, 2023. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/167013>

- [30] H. A. Ba'Its, I. A. Puspita, and A. F. Bay, "Combination of Program Evaluation and Review Technique (PERT) and Critical Path Method (CPM) for Project Schedule Development," *International Journal of Integrated Engineering*, vol. 12, no. 3, pp. 68–75, Feb. 2020, doi: 10.30880/ijie.2020.12.03.009
- [31] H. Amaruddin, K. S. B.r, and A. W. Perdana, "Optimization of Air Center Development Projects Implementation Using Critical Path Method And Project Evaluation Review Technique In Perum Peruri's Non Money Production Division," *International Conference on Innovations in Social Sciences Education and Engineering (ICOISSEE)*, vol. 1, no. 1, 2021, ISSN: 2808-9448
- [32] "PROJECT MANAGEMENT BODY OF KNOWLEDGE (PMBOK ® GUIDE) Fourth Edition," 2008. Available: [https://lms.aambc.edu.et:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/160/PROJECT%20MANAGEMENT%20BODY%20OF%20KNOWLEDGE%20\(PMBOK%20GUIDE\)%20\(%20PDFDrive.com%20\).pdf?sequence=1](https://lms.aambc.edu.et:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/160/PROJECT%20MANAGEMENT%20BODY%20OF%20KNOWLEDGE%20(PMBOK%20GUIDE)%20(%20PDFDrive.com%20).pdf?sequence=1).
- [33] T. Klastorin, "*Project management: tools and trade-offs*," Hoboken: Wiley, 2004, pp. 86-103.
- [34] J. Phillips, "*PMP® Project Management Professional Study Guide*," McGraw-Hill Ltd., UK, 2009.
- [35] J. E. Kelley, "Critical-Path Planning and Scheduling: Mathematical Basis," *Operations Research*, vol. 9, no. 3, pp. 296–320, 1961, ISSN: 0030-364X
- [36] I. M. Alharkan, "Algorithms for sequencing and scheduling. Industrial Engineering Department," King Saud University, Riyadh, Saudi Arabia, 2005.
- [37] P. Bakhshi and A. Touran, "An Overview of Budget Contingency Calculation Methods in Construction Industry," *Procedia Engineering*, vol. 85, pp. 52–60, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.528.

- [38] O. Moselhi, "Risk assessment and contingency estimating," *AACE International Transactions*, pp. 90-95, 1997. Available: <https://www.proquest.com/scholarly-journals/risk-assessment-contingency-estimating/docview/208188747/se-2>.
- [39] G. B. Dantzig, "Linear Programming," *Operations Research*, 50(1):42-47, 2002, Doi: 10.1287/opre.50.1.42.17798
- [40] "SIPRI Fact Sheet," 2023. Available: https://www.sipri.org/sites/default/files/2023-04/2304_fs_milex_2022.pdf
- [41] Mevcut Durum, Türk Savunma Sanayisinin 2022 Yılı Performansı. Retrieved May 17, 2023, from <https://www.ssb.gov.tr/WebSite/contentlist.aspx?PageID=48&LangID=1>
- [42] D. Liu, *Systems Engineering: Design Principles and Models* (1st ed.). CRC Press., 2016, doi: 10.1201/9781315273860
- [43] G. Tüysüz, "Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri ile Savaş Uçağı Seçimi," Yüksek Lisans Tezi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2014.
- [44] "Türkçe Sözlük, Ankara: Türk Dil Kurumu Yayınları, 2011.
- [45] A. R. Davari, "A simple analytical model to describe the impact of wing on the flowfield over the tail in subsonic flow," *Aerospace Science and Technology*, vol. 75, pp. 88–98, 2018, doi: 10.1016/j.ast.2018.01.017.
- [46] "Effect of Wing Planform." Available: <https://www.flight-study.com/2021/01/effect-of-wing-planform.html> (Accessed: May 15, 2023)
- [47] P. B. S. Lissaman, "Low-Reynolds-Number Airfoils," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 15, no. 1, pp. 223–239, 1983, doi: 10.1146/annurev.fl.15.010183.001255.

- [48] A. P. Mouritz, *Introduction to aerospace materials*. Reston, Va: American Institute Of Aeronautics And Astronautics, Cambridge, Uk, 2012.
- [49] S. Y. Ho, *Structural Failure Analysis and Prediction Methods for Aerospace Vehicles and Structures*. Bentham Science Publishers, 2010.
- [50] *MIL-STD-882E, DEPARTMENT OF DEFENSE STANDARD PRACTICE: SYSTEM SAFETY*, Department of Defense, USA, 2012.
- [51] J. G. Nee, W. Dufraine, J. W. Evans, M. Hill, and Society Of Manufacturing Engineers, *Fundamentals of tool design*. Dearborn, Mich.: Society Of Manufacturing Engineers, 2010.
- [52] D. R. Jenkins, *Lockheed Secret Projects: Inside the Skunk Works*, Zenith Imprint, 2001.
- [53] “An F-22A Raptor on a combat mission over Syria,” Available: https://customer.janes.com/explorer/Equipment_5709?bc=a714f432-8fee-404d-bef9-5a82c3b42914 (Accessed: May 8, 2023)
- [54] C.E Steidle, “The joint strike fighter program,” Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol 18, Number 1, pp. 6-20, 1997.
- [55] “First F-35A for South Korea flew on 19 March 2018” Available: <https://customer.janes.com/display/JAWA1347-JAWA> (Accessed: May 8, 2023)
- [56] Piotr Butowski, *Su-57 Felon*. Modern Military Aircraft Series, 2022.
- [57] “Sukhoi Su-57 prototype T-50-4” Available: <https://customer.janes.com/display/JAWA5596-JAWA> (Accessed: May 8, 2023)

EKLER

EK 1: DOĞRUSAL PROGRAMLAMA MATEMATİKSEL MODELİ

```
MIN=T56-T1;      T39-T36>=3;
T2-T1>=6;        T29-T27>=6;
T3-T2>=8;        T45-T17>=2;
T4-T3>=2;        T39-T29>=3;
T5-T4>=3;        T37-T33>=1;
T6-T5>=6;        T39-T37>=9;
T7-T6>=12;       T40-T39>=9;
T11-T4>=12;      T41-T40>=1;
T8-T7>=18;       T43-T42>=2;
T10-T2>=6;       T44-T43>=6;
T12-T9>=12;      T45-T44>=2;
T13-T10>=6;      T45-T41>=1;
T14-T13>=6;      T45-T28>=1;
T15-T12>=3;      T45-T30>=1;
T14-T15>=1;      T46-T45>=2;
T16-T14>=3;      T47-T46>=1;
T19-T18>=3;      T48-T47>=2;
T20-T19>=4;      T49-T48>=3;
T21-T20>=3;      T50-T49>=2;
T22-T21>=1;      T51-T50>=4;
T23-T22>=4;      T52-T51>=6;
T24-T23>=1;      T53-T52>=8;
T25-T24>=1;      T53-T51>=8;
T26-T25>=1;      T54-T53>=24;
T27-T26>=1;      T55-T54>=4;
T28-T27>=2;      T56-T55>=3;
T56-T28>=96;     T9-T8>=0;
T52-T28>=2;      T10-T8>=0;
T30-T28>=2;      T9-T11>=0;
T32-T31>=2;      T17-T11>=0;
T33-T32>=2;      T17-T16>=0;
T35-T34>=3;      T18-T16>=0;
T36-T35>=6;      T31-T30>=0;
T38-T31>=6;      T34-T33>=0;
T39-T38>=4;      T42-T41>=0;
T39-T31>=6;      END
T37-T31>=6;
T37-T36>=4;
```

EK 2: MATEMATİKSEL MODELİN ÇÖZÜMÜ

Row	Slack or Surplus	Dual Price			
1	202.0000	-1.000000	54	0.000000	-1.000000
2	0.000000	-1.000000	55	0.000000	-1.000000
3	0.000000	-1.000000	56	0.000000	-1.000000
4	0.000000	-1.000000	57	0.000000	-1.000000
5	0.000000	-1.000000	58	0.000000	-1.000000
6	0.000000	-1.000000	59	0.000000	-1.000000
7	0.000000	-1.000000	60	0.000000	-1.000000
8	0.000000	0.000000	61	6.000000	0.000000
9	0.000000	-1.000000	62	0.000000	-1.000000
10	47.00000	0.000000	63	0.000000	-1.000000
11	0.000000	-1.000000	64	0.000000	-1.000000
12	0.000000	0.000000	65	0.000000	-1.000000
13	0.000000	0.000000	66	4.000000	0.000000
14	0.000000	-1.000000	67	27.00000	0.000000
15	0.000000	-1.000000	68	46.00000	0.000000
16	0.000000	-1.000000	69	0.000000	0.000000
17	0.000000	-1.000000	70	0.000000	-1.000000
18	0.000000	-1.000000	71	0.000000	-1.000000
19	0.000000	-1.000000	72	0.000000	-1.000000
20	0.000000	-1.000000	73	0.000000	-1.000000
21	0.000000	-1.000000			
22	0.000000	-1.000000			
23	0.000000	-1.000000			
24	0.000000	-1.000000			
25	0.000000	-1.000000			
26	0.000000	-1.000000			
27	11.00000	0.000000			
28	66.00000	0.000000			
29	0.000000	-1.000000			
30	0.000000	-1.000000			
31	0.000000	-1.000000			
32	0.000000	-1.000000			
33	0.000000	-1.000000			
34	0.000000	0.000000			
35	16.00000	0.000000			
36	20.00000	0.000000			
37	11.00000	0.000000			
38	0.000000	-1.000000			
39	10.00000	0.000000			
40	0.000000	0.000000			
41	67.00000	0.000000			
42	21.00000	0.000000			
43	12.00000	0.000000			
44	0.000000	-1.000000			
45	0.000000	-1.000000			
46	0.000000	-1.000000			
47	0.000000	-1.000000			
48	0.000000	-1.000000			
49	0.000000	-1.000000			
50	9.000000	0.000000			
51	47.00000	0.000000			
52	45.00000	0.000000			
53	0.000000	-1.000000			