



Süleyman Demirel Üniversitesi

YEKARUM e-DERGI

(Journal of YEKARUM)



Cilt 10, Sayı 1, 61-75, 2025
E - ISSN: 1309-9388

Hava Muharebesi Angajman Analizi Yaklaşımı

Mutlu Ahmet AYNA^{1*}, Fatih PENBE², Mert ÇINAR³

^{1*} İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0000-0000-0000), mutluahmetayna@gmail.com

¹ Çukurova Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye, (ORCID: 0009-0004-0444-6920), fatihpenbe@hotmail.com

² Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye (ORCID: 0009-0001-7038-0438), mertcinar2014@gmail.com

(İlk Geliş Tarihi 17/05/2025 ve Kabul Tarihi 25/06/2025)

(DOI: 10,71208/yeکارum.1701107)

ÖZET:

Günümüz harp ortamının en temel ve vazgeçilmez unsurlarından biri keşif, savunma ve saldırı amaçlı kullanılabilen insanlı ve insansız savaş uçaklarıdır. Savaş uçakları, hava sahasının korunmasında ve ele geçirilmesinde büyük öneme sahiptir. Son derece karmaşık mühendislik ürünleri olan savaş uçaklarının tasarımı disiplinler arası bir konu olmakla beraber önemli mühendislik koordinasyonu ve yönetimi gerektirmektedir. Harp ortamında üstünlük kurulabilmesi için operasyonel ihtiyaçların iyi tanımlanması, hava aracına ait gereksinimlerin hem ihtiyaçları karşılayacak şekilde belirlenmiş olması, hem de birbiri ile uyumlu ve gerçekleştirilebilir olması gerekmektedir. Bu sebeplerle tasarım süreçlerinde ortaya çıkan birbiri ile çelişebilecek veya gerçekleşmesi güç olacak gereksinimlerin çok yönlü analiz edilmesi uçak tasarım projelerinin başarısı için kritik öneme sahiptir. Bu amaçla hava aracı tasarım projelerinde ödünleşim faaliyetleri yoğun olarak yürütülmektedir. Bu çalışmada, muharip bir savaş uçağının hava-hava angajmanlarında üstünlük sağlayabilmesi için ihtiyaç duyacağı sensör gereksinimlerinin belirlenebilmesi amacıyla kullanılacak basitleştirilmiş bir angajman analizi yaklaşımı ortaya konmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Angajman Analizi, Hava Muharebesi, Muharip Uçak

Air Combat Engagement Analysis Approach

ABSTRACT

One of the most fundamental and indispensable elements of today's warfare environment is manned and unmanned combat aircraft that can be used for reconnaissance, defense and attack purposes. Combat aircraft are of great importance in protecting and capturing airspace. The design of combat aircraft, which are extremely complex engineering products, is an interdisciplinary subject and also requires significant engineering coordination and management. In order to establish superiority in a warfare environment, operational needs must be well defined, the requirements of the aircraft must be determined to meet the needs and must be compatible and realizable with each other. For these reasons, multi-faceted analysis of requirements that may conflict with each other or are difficult to realize during the design process is of critical importance for the success of aircraft design projects. For this purpose, trade-off activities are intensively carried out in aircraft design projects. In this study, a simplified engagement analysis approach that can be used to determine the sensor requirements that a combat aircraft will need to achieve superiority in air-to-air engagements is presented.

Keywords: *Engagement Analysis, Air Combat, Fighter Aircraft*

1. GİRİŞ

İkinci Dünya Savaşı'nın ardından bir gelişim dönemine giren savaş uçağı teknolojisi, harp ortamının da değişimine sebep olmuş ve ülkelerin hava kuvvetleri, sonu henüz görünmemekte olan bir tedbir-karşı tedbir edinim sürecinin içerisinde girmiştir. İkinci ve üçüncü nesil olarak nitelendirilen uçaklar hava önleme görevleri için kullanılabilen kısa menzilli füzelere sahipken dördüncü ve beşinci nesil olarak nitelendirilen günümüz modern muharip uçakları uzun menzile sahip hava-hava füzelerinin yanında yoğun sensör kabiliyetlerine sahip hale gelmiştir [1]. Uçakların sahip olduğu manevra yeteneklerinin yanında tespit ve takip, elektronik karıştırma konularındaki becerileri ve silahlarının özellikleri, savaş ortamında hayatta kalabilirlik (İng. Survivability) ve ölümcüllük (İng. Lethality) özelliklerinde baskın rol oynamaya başlamıştır. Hava aracı ömür döngülerinde etkin bir hayatta kalabilirlik programının kurgulanması ve uygulanması önerilmektedir [2]. Modern muharip uçaklarda bulunan kritik görev ekipmanları arasında hava-hava füzeleri, atış kontrol radarları, radar ikaz sistemleri, kızıl ötesi füze ikaz sistemleri, karşı tedbir atım sistemleri, yönlendirilmiş kızılötesi karşı tedbir sistemleri sayılabilir.

Hava-hava füzeleri, görüş içi ve görüş ötesi füzeler olarak sınıflandırılmaktadır. Görüş içi füzeler genellikle kızılötesi arayıcı başlıklara sahiptir, hedefin ısı izine yönelmektedir ve görüş ötesi füzelere göre daha kısa menzile sahiptir [3]. Bu tür füzeler atıştan önce kilit alma (İng. Lock-On Before Launch) veya atıştan sonra kilit alma (İng. Lock-On After Launch) mantığı ile çalışabilmektedir. Görüş içi füzeler atıştan önce atış kontrol radarına köle edilebilmektedir, radarla takip edilen hedefe aynı zamanda füze arayıcı başlığı ile de kilit alınmasının ardından füze ateşlenebilmektedir. Görüş ötesi füzeler ise daha uzun menzile ve radar arayıcı başlığa sahip füzelerdir. Daha uzun menzile atılabilmeleri için, kendi radarlarının kullanım menziline önce belirli bir süre harici bir güdüme (uçak radarı vb.) ihtiyaç duyarlar.

Atış kontrol radarları, günümüz muharip uçaklarının radyo frekans bandında çalışan en temel ve kritik sensörleridir. Atış kontrol radarları, genellikle X bantta çalışan ve uzun mesafelerden çoklu hedef tespiti, takibi yapabilmeye olanak sağlayan sistemlerdir. Modern AESA (İng. Active Electronically Scanned Array) atış kontrol radarlarında SAR/ISAR ve elektronik destek/taarruz işlevleri de bulunabilmektedir. Atış kontrol radarları, hava aracı tasarımlarına (yapısal, elektrik, soğutma, aviyonik ve diğer RF sistemler) girdileri kapsamlı

olduğundan ve hava aracının operasyonel kullanımına doğrudan etkisi bulunduğundan, gereksinimlerine kavramsal tasarım fazında detaylı çalışılması gereken ekipmanlardır. Muharip uçakların birbirine üstünlük kurması konusunda hava-hava füzeleri ile birlikte tamamlayıcı ve hayati rol oynarlar. Atış kontrol radarlarının hedef bulmanın yanında önemli bir rolü de atılan görüş ötesi hava-hava füzelerinin güdülmelerini sağlamalarıdır. Gelişmiş radarlar ve hava-hava füzeleri, hava muharebesinin doğasının değişmesinde önemli rol oynamıştır [4].

Radar ikaz sistemleri, radyo frekans bandında yayın yapan kara ve hava hedeflerinin tespitinde kullanılan temel sistemlerdir ve frekans bandı kapsamına uygun olarak tehdit göndermeçlerin varlığında uyarı üretirler [5]. Tasarım ve entegrasyonları genellikle yarıda 360 derece kapsama sağlayacak şekilde yapılır ve uçuş boyunca operasyonel olması sağlanarak pilota hedef tespiti halinde sesli ve görsel uyarılar oluşturur. Radar ikaz sistemleri, sağlanan görev veri dosyaları ile hedef teşhisi de yapabilmektedir ve görüş ötesi füze atışı yapılması halinde atış tespiti de yapabilmektedir. Çalışma frekansları 0.5-18GHz arasında değişebilmektedir.

Kızılötesi füze ikaz sistemleri, havadan ve karadan atılan füzelerin tespiti için kullanılan sistemlerdir. Pasif sensörler, füzenin roket bölümünün ultraviyole ışınmasını veya füzenin sıcak bölümlerinin, roket bölümünün ve plümünün kızılötesi ışınmasını tespit edebilirler [6]. Pilotun kaçınma manevrası yapmasını veya karşı tedbir sistemlerinin kullanımını tetikleyebilen füze ikaz sistemleri, özellikle asimetrik savaşlarda düşük yoğunluklu tehdit ortamlarında kullanımı yaygınlaşan omuzdan atılan hava savunma sistemlerine karşı etkili şekilde kullanılabilirler.

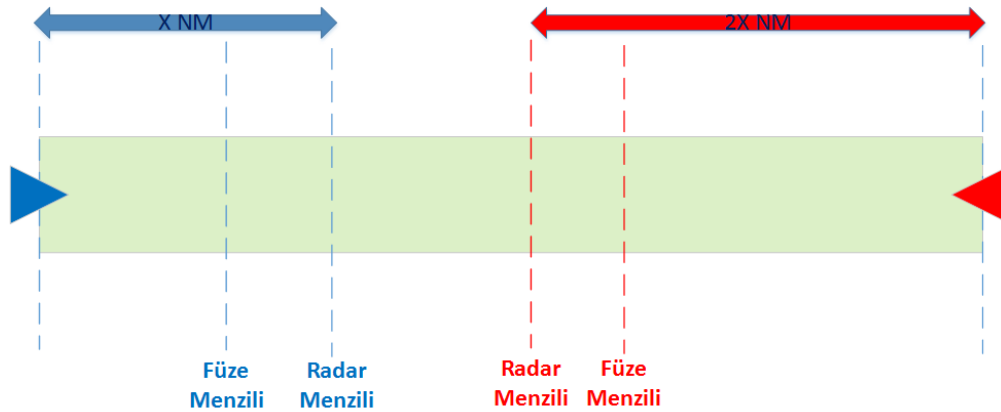
Karşı tedbir atım sistemleri, hava araçlarına atılan füzeleri yanıltmak için kullanılan sistemlerdir ve hava araçlarından atılan fişeklerle oluşturulacak sahte izlerin radarların, RF/IR güdümlü füzelerin arayıcı başlıklarını aldatması prensibi ile çalışır. Atış süreleri ve sıklıkları farklı tehditler için programlanabilmektedir.

Yönlendirilmiş kızılötesi karşı tedbir sistemleri, hava araçlarına atılan kızılötesi arayıcı başlıklı füzelerin karıştırılmasını ve köreltilmesini sağlayan sistemlerdir. Füze atışının tespiti ve füzenin hassas bir şekilde takip edilebilmesi, füze ikaz sistemleri gibi diğer sistemlerle koordineli çalışma gerektirmektedir. Tespit edilen kızılötesi arayıcı başlıklı füzelerin arayıcı başlıkları söz konusu sistem tarafından kızılötesi ışın demeti ile hedef alınarak füzenin mevcut kilidinin kırılması yöntemi ile tehdidin bertaraf edilmesi amaçlanmaktadır.

2. ANGAJMAN ANALİZİ AMACI

Hava aracı tasarımında, hava-hava angajmanlarında başarımlar için fazla sayıda değişkenin birlikte değerlendirilmesi ve nihai bir çözüm için ortak ve uygulanabilir çözümlerin ortaya konması gerekmektedir. Harekat analizi ve operasyonel analiz çalışmalarını mühendislik, angajman, görev veya hareket seviyesinde icra edebilmek mümkündür [7]. Hava aracının manevra kabiliyeti, düşük RF ve IR görünürlüğü, hedef takibindeki menzili ve başarımları, sahip olduğu hava-hava füzelerinin menzili ve başarımları, kendisine karşı oluşturulan tehditleri bertaraf etmekteki başarımları gibi konular hayatta kalabilirlik açısından kritik öneme sahiptir ve bu durum hava aracına entegre edilecek sensör ve silahların gereksinim belirleme çalışmalarında hassas bir getiri-götürü analizi gerektirmektedir. Sistem gereksinimleri analizleri, ürün sistem gereksinimlerinin analizi için yöntemler, süreçler ve gereksinimlerin takibi için özel gereçler içerebilir [8].

Muharip bir uçağın, başka bir muharip uçakla angajmanında başarılı olabilmesi için, birbirini tamamlayıcı nitelikte olan performans, sensör ve silah özelliklerinin detaylı şekilde analiz edilerek planlanması gerekmektedir. Çok uzun bir radar menziline sahip muharip bir uçak, kısa füze menzili sebebi ile hava muharebesini kaybedebileceği gibi kısa bir radar menziline sahip bir uçağın da çok uzun menzilli bir füzeye sahip olmasının, füzenin ağ erişimi veya “hand-over” yeteneği olmaması durumunda bir anlamı olmayacaktır. Şekil-1’de birbir bir yaklaşma senaryosu ve olası radar/füze menzilleri görülmektedir.



Şekil 1. Birebir Yaklaşma Senaryosu

Şekil-1’de görüleceği üzere hava-hava angajmanlarında silah koşullandırmasının yapılabilmesi, sağlıklı atış koşullarının yaratılması ve değerlendirmesinin yapılabilmesi, hedef paylaşımı gibi zaman gerektirebilen işlemlerin yürütülebilmesi için radar menzilin hava-hava füzesi menziline uzun olması genel bir beklenti olarak ifade edilebilir. Uçakların radar kilidini tespit edebilmesi radar ikaz alıcı sistemleri ile mümkün olmaktadır ve bu sistemlerin

hassasiyetlerinin radar kilidinin ilk anında ikaz sağlayacak seviyede olması beklenmektedir. Radar ikaz alıcıları, atılan görüş ötesi aktif füzelerin tespitini de sağlayabilmektedir. Atılan füzelerin tespiti radar ikaz alıcılarının yanında, füze türünden bağımsız olarak füze ikaz sistemleri (FİS) ile de yapılabilmektedir. Angajman senaryosunun adımları keskin sınırları olmamakla beraber aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Hedefin tespiti ve takibi, hedefe karşı tedbir kullanımı
- Hedefe atış yapılması, varsa hedeften yapılan atışın algılanması
- Atılan aktif arayıcı başlıklı füzenin güdümü, kaçınma manevrası icrası, varsa füzeye karşı tedbir uygulanması

Birebir bir angajman koşusunda sabit manevra kabiliyeti, sensör ve silah özellikleri ile tahmin edilebilir veya öngörülebilir sonuçlar elde edilebilecekken; etraflıca yapılan bir tehdit analizi ile oluşturulacak bir veri tabanının kullanılacağı, uçak manevra kabiliyetlerinin ve radarın, radar ikaz sisteminin, füze kinematik özelliklerinin taranabileceği ve üstünlük durumlarının analiz edilebileceği, çoklu koşuların yapılabileceği bir ortamda alınacak üstünlük verileri, ilgili sistemlerin gereksinimlerine anlamlı girdiler sağlayabilecektir. Yeterli olgunluktaki ve esneklikteki pilot, uçak, sensör ve silah modelleri ile hangi tehdide karşı nasıl bir uçak konfigürasyonu ile üstünlük sağlanabileceği tespit edilebilecektir. Bu çalışma, sadeleştirilmiş uçak, sensör ve silah modelleri ile bir hedef setine karşı hangi uçak/ekipman gereksinim seti ile üstünlük sağlanabileceğine yönelik değerlendirmeyi mümkün kılacak bir analiz yöntemi önermektedir. Yöntemi yukarıda bahsi geçen mühendislik ve angajman seviyelerinin arasına konumlandırmak mümkündür.

3. ANGAJMAN ANALİZİ YÖNTEMİ

Yöntemin kapsamı, gereksinim belirleme amacına hizmet etmesi için muharebe ortamındaki çoklu paketler ve karmaşık taktiklerle icra edilen görevlerin yerine iki muharip uçağın karşılıklı olarak görüş ötesi füze atışına indirgenmiştir. Sensör, silah ve karşı tedbir kullanımı sırasına, mevcut sistemlerin kabiliyetleri ve kullanım konseptleri doğrultusunda karar verilebileceği gibi farklı durumların gözlenmesi ihtiyacına bağlı olarak da karar verilebilir. Önerilen yöntemde aşağıdaki uçak ve sensör parametreleri için analiz yapılabilecektir:

1. Uçak Radar Kesit Alanı (m^2)
2. Radar Tespit Menzili ($1m^2$ RKA için)
3. Radar Anten Açıklığı (Derece)
4. Füze İkaz Sistemi Tespit Mesafesi (Deniz Mili)

Yukarıda ifade edilen parametreler platform, radar ve füze ikaz sistemi için temel gereksinimlerin belirlenmesini sağlayabilecekken, parametre setinin genişletilmesi ve daha

fazla platform ve sensör seviyesi gereksinimin belirlenmesi mümkündür. Radar kesit alanı, uçakların radarlar tarafından tespit edilme mesafesine doğrudan etki eden özellikleridir ve radar kilit durumu füze atış kararlarına doğrudan etki etmektedir. Radar kesit alanı, hayatta kalabilirlik açısından kritik öneme sahiptir ve günümüzde 5. nesil uçakların en temel özellikleri radar kesit alanlarının çok düşük olmasıdır. Radar tespit ve takip menzili, aynı şekilde hedefe füze atışının sağlıklı bir şekilde yapılabilmesi ve ölümcüllük (İng. Lethality) açısından çok önemlidir. İdealde daha uzun bir radar tespit menziline ve daha düşük bir radar kesit alanına sahip bir hava platformunun hava-hava füzesi angajmanında avantajlı olacağı açıktır. Radar anten açıklığı, görüş ötesi füze atışı sonrasında füzenin radar tarafından güdülmesi gereken fazda atış yapan platforma kaçınma manevrası konusunda kısıt getirmektedir. Füze ikaz sisteminin füzeleri tespit edebildiği mesafe de kaçınma manevrasını ve karşı tedbir sistemlerini tetikleyerek hayatta kalabilirliğe katkı sağlamaktadır. Analiz yönteminde uçağın sahip olduğu yukarıda bahsi geçen parametrelerinin değiştirilerek çoklu atışlarda hangi gereksinim seti ile ne kadar sayıda ve hangi koşullarda (menzil vb.) üstünlük sağlandığının tespit edilmesi amaçlanmaktadır.

Atış ve manevra karar mekanizmasına girdi olabilecek veriler aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

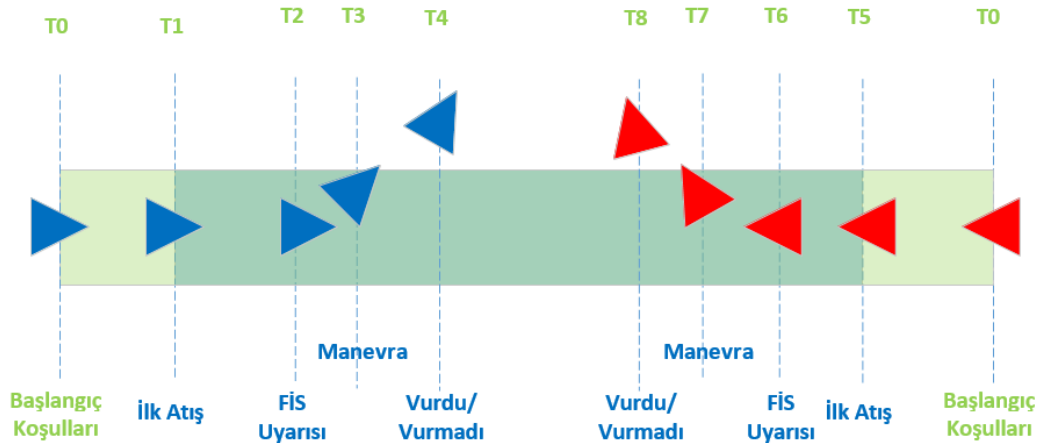
- Radar menzili: Radar kilidinin sağlanması durumu
- Füze menzili: Hedefin füzenin azami menzili içerisine girmesi durumu
- Füze ikaz sistemi: Füze atışı tespiti

Şekil-2’de analiz amacıyla geliştirilecek benzetim ortamı için bir kullanıcı arayüzü tasarımı görülmektedir. Avcı ve hedef uçaklarının ilk konumlarının ve hız, baş açısı gibi değerlerin kullanıcıdan alınması analizde esneklik sağlayacaktır. Simülasyon koşusu için azami simülasyon sayısı ile beraber azami ve asgari atış mesafeleri ve iterasyon için atış mesafesi adımları kullanıcıdan alınabilir.

The image shows a simulation environment interface with several panels. The 'AC Attitude' panel includes fields for AC Latitude [deg] (0.77), AC Longitude [deg] (0), AC Altitude (MSL) [ft] (35000), AC Roll [deg] (0), AC Pitch [deg] (0), AC True Heading [deg] (180), AC Velocity [Knot] (519), and AC Turn Rate [deg/s] (4.64). The 'Aggressor Attitude' panel has similar fields with values: AC Latitude [deg] (0), AC Longitude [deg] (0), AC Altitude (MSL) [ft] (35000), AC Roll [deg] (0), AC Pitch [deg] (0), AC True Heading [deg] (0), AC Velocity [Knot] (519), and AC Turn Rate [deg/s] (4.64). The 'AC Launch Parameters' panel includes Required Max Sim Count (10), Max Fire Range [NM] (45.5884), Min Fire Range [NM] (1.3824), and Launch Step [NM] (0.1645). The 'Aggressor Launch Parameters' panel has the same values. The 'AC Sensors' panel includes Radar Antenna Aperture [deg] (160), MAWS Detection Range [ft] (500000), Radar Cross Section [m²] (3), and Radar Range [NM] (m² RCS) (20). The 'Aggressor Sensors' panel has the same values. The 'Evasive Maneuver Selection' panel has two sections: 'AC Evasive Maneuver' and 'Aggressor Evasive Maneuver', each with radio buttons for 'No Evasion', 'Immediate Evasion', and 'Evasion Time' (0 sec). The 'Launch Condition Selection' panel has two sections: 'AC Launch Condition' and 'Aggressor Launch Condition', each with radio buttons for 'Use Manual Range' and 'Use Radar Coverage Range' (NM). A 'RUN SIMULATION' button is located at the bottom right.

Şekil 2. Benzetim Ortamı Arayüzü

Önerilen yöntemde gerçekleştirilecek atışlar için azami, asgari menzil değerleri ve atış aralıkları kullanıcıdan alınmaktadır. Atış mesafeleri, uçakların görev bilgisayarlarında kullanılan atış algoritmalarına dâhil olan ve dinamik hesaplamalara dayanan atış mesafesi hesaplamaları ile de belirlenebilecektir. Yöntemde, gereksinim belirleme amacına hizmet etmesi için kaçınma manevrası icrasına füze ikaz sisteminin uyarısına göre karar verilmesi önerilmektedir.



Şekil 3. Yaklaşma Senaryosu

Şekil-3’te görüleceği üzere T0 anı her iki uçağın sabit hız ve baş açıları ile birbirlerine sabit irtifada yaklaşmaya başladıkları anı temsil etmektedir. Benzetim ortamında tanımlanacak atış mesafelerine bağlı olarak T1 ve T5 anları karşılıklı füze atış anlarını tanımlamaktadır. Atış mesafeleri aynı veya farklı olarak belirlenebilecektir. T2 ve T6 anları, füze ikaz sistemlerinden havada bulunan füzelerin uçaklara olan mesafelerine göre ikaz oluşturulma anlarıdır ve alınacak ikaza bağlı olarak manevra kararı verildiği anlar T3 ve T7 olarak ifade edilmiştir. T4 ve T8 anları da simülasyonların sonlandırıldığı anlardır. Bu yaklaşımda radar kilit durumları, platformlara ait radar kesit alanına bağlı olarak kullanılabilir radar denklemleri ile hesaplanabilecektir. Görüş ötesi füzelerin genel karakteristikleri gereği atış yapıldıktan belli bir mesafeye kadar güdülmeleri gerekmektedir. T3 ve T7 anlarından itibaren uçakların yapacağı manevra radar kilidinin kırılmasına sebep olabileceğinden değerlendirmeye bu etkinin de dâhil edilmesi ve kilit kırıldığı durumun da değerlendirilmesi önerilmektedir. Angajman senaryosu ve veri kullanımı bir uçak için aşağıdaki şekilde olacaktır:

T0: Benzetim ortamında kullanıcı arayüzünden alınacak enlem, boylam, irtifa ve baş açısı gibi bilgilerle ilklendirme yapılır.

T1: Benzetim ortamında kullanıcı arayüzünden alınacak azami atış mesafesine gelindiğinde atış gerçekleştirilir ve füze simülasyonu koşturularak başlar.

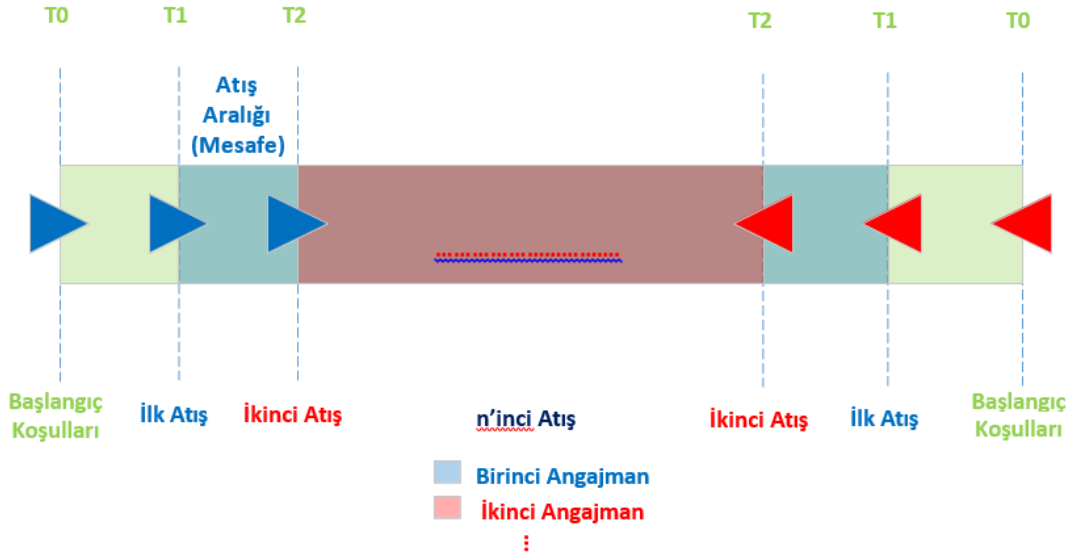
T2: Benzetim ortamında kullanıcı arayüzünden alınacak füze ikaz sistemi tespit menziline bir füze tespit edilir.

T3: Kullanıcı arayüzden alınan dönüş orana göre manevra başlar. Manevra yapıp yapılmaması veya manevraya gecikmeli başlanması da yine kullanıcı arayüzünden alınabilecektir. Manevra esnasında radar kilidinin kırılması durumu, kullanıcı arayüzünden alınan radar anten açıklığı verisi kullanılarak anlık olarak değerlendirilir. Atılan görüş ötesi füzenin radarı aktif duruma gelmeden kilit kırılması durumunda füze simülasyonu sonlandırılır. Yine füze aktif olmadan uçağın vurulması durumunda füze simülasyonu sonlandırılır.

T4: Atılan silahın hedefi vurması veya vurmamasına bağlı olarak füze simülasyonu sonlandırılır. Karşıdan atılan füzenin havada olma ihtimaline karşı uçak manevrası devam eder. Hedeften atılan füzenin de sonlanması ile senaryo sonlandırılır ve senaryo sonucu her iki uçak için de kullanıcıya rapor edilir.

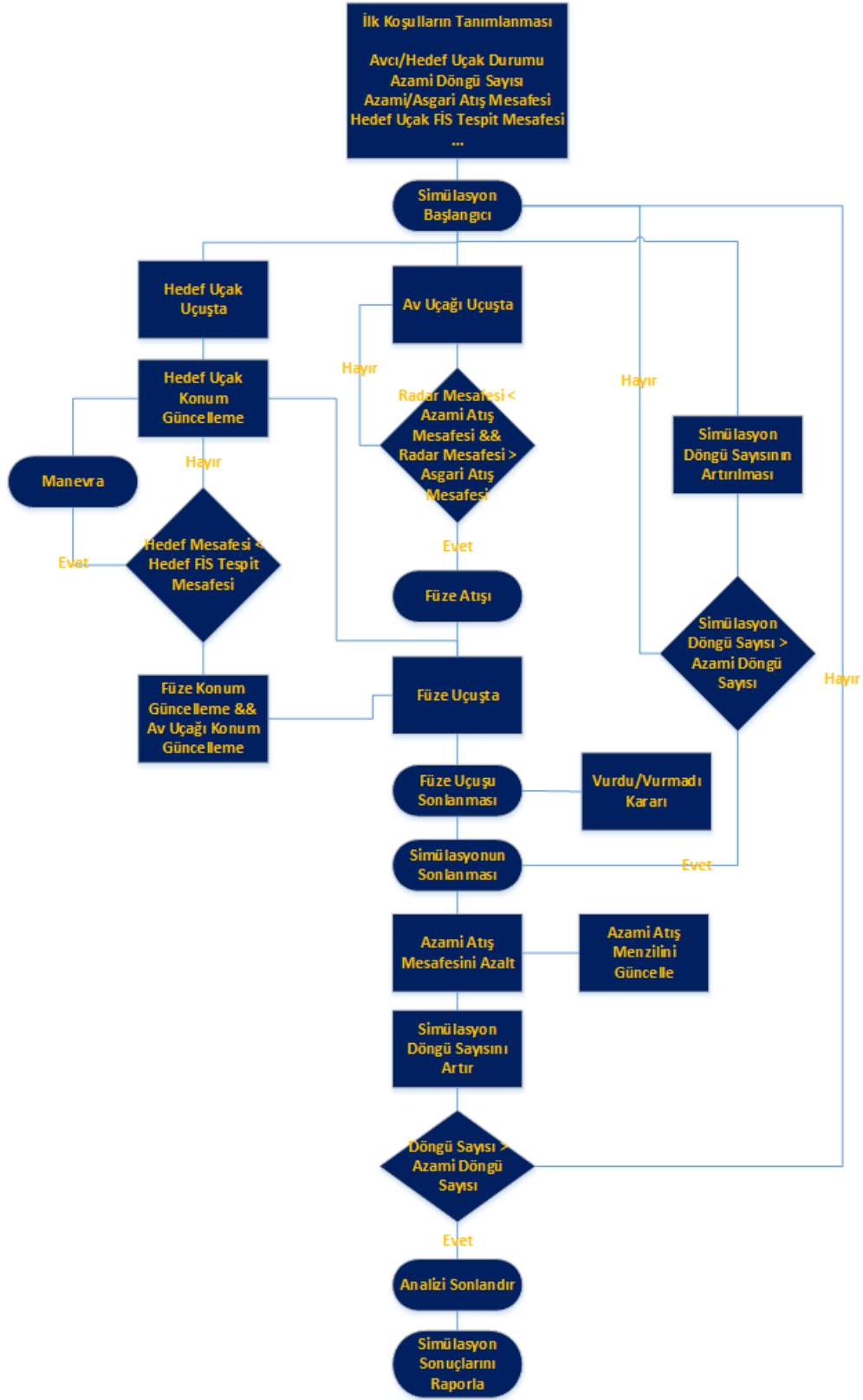
Analiz için Şekil-3’de verilen senaryonun belirlenen başlangıç ve bitiş atış mesafe değerleri arasında Şekil-4’te gösterildiği gibi çoklu sayıda koşturularak önerilmektedir. Üstünlük analizi için çoklu koşullarla sabit gereksinim setleri için hangi mesafelerden radar kilidi sağlanabileceği, hangi mesafeden atış yapılması durumunda hedefin vurulabileceği, hangi mesafelerde hedefin av uçağını vurabileceği, hangi koşullarda her iki uçağın da vurulduğu

bilgileri tespit edilebilecektir.



Şekil 4. Çoklu Atış Senaryosu

Çoklu atış senaryosu için benzetim ortamındaki mantıksal akış şeması Şekil-5'te verildiği gibidir.



Şekil 5. Çoklu Atış Senaryosu Akış Şeması

Analiz sonucunda yapılan atışların sayısı, koşulları, başarımlı durumu kullanıcıya rapor edilir. Füze modelinin olgunluk seviyesine bağlı olarak, füzenin hedef uçağı vuramaması halinde vuramama sebebi de sınıflandırılarak (radar kilidi kırılması, hedef manevrası, menzil dışında atış

vb.) kullanıcıya raporlanabilecektir. Girilen ilk koşullarda kontrollü değişiklikler yapılarak analiz girdilerinden (radar kesit alanı, radar tespit menzili, radar anten açıklığı, füze ikaz sistemi füze tespit mesafesi) hangisindeki ne kadarlık değişimin angajman sonucuna ne kadar etki edeceği tespit edilebilecektir. Analiz girdi ve sonuçlarına örnek veriler konum ve yönelim bilgilerine ek olarak Tablo 1 ve Tablo 2’deki gibidir.

Tablo 1. Av Uçağı ve Hedef Uçak Konfigürasyon Parametreleri

Av Uçağı/Hedef Uçak	Birim
Hız	Knot
Dönüş Oranı	Derece/Saniye
Azami Atış Sayısı	Birimsiz
Azami Atış Mesafesi	Deniz Mili
Asgari Atış Mesafesi	Deniz Mili
Atış Aralıkları	Deniz Mili
RadAR Anten Açıklığı	Derece
Füze İkaz Sistemi Tespit Mesafesi	Feet
RadAR Kesit Alanı	m ²
RadAR Menzili	Deniz Mili

Tablo 2. Simülasyon Sonuçları

Sonuç	Av Uçağı	Hedef Uçak
Sadece Vurdu	%23	%28
Sadece Vuruldu	%28	%23
Hem Vurdu, Hem Vuruldu	%49	%49
Toplam	%100	%100

Aşağıdaki örnekte av uçağının füze ikaz sistemi menziline angajman üstünlüğüne etkisinin değerlendirilebilmesi için örnek veri seti (Tablo 3, Tablo 4 ve Tablo 5) bulunmaktadır. Füze ikaz sistemi menzili verisi haricindeki parametreler sabit tutularak iki farklı konfigürasyonda (Konfigürasyon-1 ve Konfigürasyon-2) manevralı atışlar yapılmıştır.

Tablo 3. Av Uçağı Konfigürasyon-1 Parametreleri

Av Uçağı (Konfigürasyon-1)	Birim	Değer
Hız	Knot	400
Dönüş Oranı	Derece/Saniye	4.64
Azami Atış Sayısı	Birimsiz	100
Azami Atış Mesafesi	Deniz Mili	50
Asgari Atış Mesafesi	Deniz Mili	2
Atış Aralıkları	Deniz Mili	0.5
RadAR Anten Açıklığı	Derece	50
Füze İkaz Sistemi Tespit Mesafesi	Feet	60000
RadAR Kesit Alanı	m ²	3
RadAR Menzili	Deniz Mili	40

Tablo 4. Av Uçağı Konfigürasyon-2 Parametreleri

Av Uçağı (Konfigürasyon-2)	Birim	Değer
Hız	Knot	400
Dönüş Oranı	Derece/Saniye	4.64
Azami Atış Sayısı	Birimsiz	100
Azami Atış Mesafesi	Deniz Mili	50
Asgari Atış Mesafesi	Deniz Mili	2
Atış Aralıkları	Deniz Mili	0.5
Radar Anten Açıklığı	Derece	50
Füze İkaz Sistemi Tespit Mesafesi	Feet	80000
Radar Kesit Alanı	m ²	3
Radar Menzili	Deniz Mili	40

Tablo 5. Hedef Uçak Konfigürasyon Parametreleri

Hedef Uçak	Birim	Değer
Hız	Knot	420
Dönüş Oranı	Derece/Saniye	4.43
Azami Atış Sayısı	Birimsiz	100
Azami Atış Mesafesi	Deniz Mili	50
Asgari Atış Mesafesi	Deniz Mili	2
Atış Aralıkları	Deniz Mili	1
Radar Anten Açıklığı	Derece	55
Füze İkaz Sistemi Tespit Mesafesi	Feet	60000
Radar Kesit Alanı	m ²	2.5
Radar Menzili	Deniz Mili	45

Simülasyon sonuçlanma anlarına ait tüm veriler benzetim ortamında bulunmakta ve detay mühendislik analizleri için kaydedilmektedir.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Konfigürasyon-1 ile koşulan senaryoda karşılıklı olarak yapılan atışlarda av uçağının hedef uçak atışlarında vurulma oranı %57 iken Konfigürasyon-2 ile birlikte artan füze ikaz sistemi füze tespit menzili ile bu oran %45'e gerilemiştir. Artan füze ikaz sistemi menzili ile daha erken manevra yapılması sağlandığı için sonucun sağlıklı olduğu değerlendirilebilir. Konfigürasyon-1'deki parametreler sabit tutularak farklı dönüş oranları (4.64 ve 5.25 derece/saniye) için senaryo koşurulduğunda vurulma oranı %57'den %52'ye gerilemiştir. Sergilenen kaçınma manevrasındaki dönüş yarıçapının kısılmasının vurulma oranını düşürecek şekilde etki etmesi beklenen bir sonuç olmuştur.

Önerilen analiz yöntemi, hava aracı geliştirilirken iteratif olarak belirlenecek gereksinimlerin analizi ve olgunlaştırılması için kullanılabilir bir yöntem olmakla beraber model olgunluğu ve kabiliyetleri doğrultusunda benzetim ortamının operasyonel analiz amacına

hizmet etmesi de mümkündür. Analiz yönetiminde, önerilmiş mevcut kabiliyetlerin detaylandırılması ve ek kabiliyetlerin de analizine imkân tanıyacak geliştirmelerin yapılması mümkündür. Yöntem, güvenilir ve yüksek sadakatli bir tehdit veri tabanı ile taktik analizi için de kullanılabilir.

Kullanıcıdan girdi olarak alınan uçak manevra kabiliyeti, gelişmiş bir uçak ve hatta itki sistemi modeli ile detaylı gereksinimlerin belirlenmesine olanak tanıyacak şekilde genişletilebilecektir. Bu yönde yapılacak geliştirme, uçak performans ve itki sistemi gereksinimlerine katkıda bulunabilecektir. Benzetim ortamına eklenebilecek bilişsel bir pilot modeli; manevra, karşı tedbir kullanımı ve atış gibi kararların daha anlamlı koşullarda verilmesini sağlayarak analiz sayısını ve süresini azaltmak sureti ile daha sağlıklı istatistikler elde edilebilmesini sağlayabilecektir. Mevcut silah modelleri, atış öncesi dinamik atış bölgesi hesaplamaları ile detaylandırılarak pilot atış karar mekanizmasını besleyebilecektir. Silah sistemlerinin güdüm, itki, harp başlığı, arayıcı başlığı ve tapa özelliklerinin de yüksek sadakatle modellenmesi ile atışlara dair detaylı analiz yapılabilir. Gelişmiş bir silah modeli, başarısız atışlarla ilgili detay bilgi sağlayarak daha kapsamlı bir analizi olanaklı kılacaktır. Taktiksel değerlendirmelere bağlı olarak pilotun manevra kararına girdi sağlaması için radar ikaz sistemi de kullanılabilir. Radar kesit alanı, uçakları yönelimine göre değişebildiğinden dinamik bir uçak radar kesit alanı hesabı kullanımı ile kilit kırma mekanizması geliştirilebilecektir. Pilotların sensör, silah veya haberleşme kabiliyetleri haricinde hava araçlarından bekledikleri anahtar özellikler olan yüksek sürat, yüksek tavan irtifası, tırmanış oranı, yuvarlanma oranı, ağır silah yükü [9] gibi hava aracı seviyesi gereksinimler de analiz yöntemi ile araştırılabilir konulardır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında çıkar çatışması yoktur.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Çalışma, araştırma ve yayın etiğine uygundur.

KAYNAKLAR

- [1] A. Kırkar, “An Aircraft Design and Analysis Tool for a Fifth-Generation Fighter Jet: A Flight Mechanics Perspective”, M.S. thesis, Dept. Natural and Applied Sciences, Middle East Technical Univ., Ankara, Türkiye, 2025. [Online]. Available: <https://open.metu.edu.tr/handle/11511/113380>
- [2] MIL-HDBK-2069, Aircraft Survivability Military Handbook. United States of America Department of Defense, 1997.
- [3] K. A. Rigby, Aircraft Systems Integration of Air-Launched Weapons. John Wiley&Sons,

Ltd., 2013.

- [4] G. Rebecca, “The Radar Game – Understanding Stealth and Aircraft Survivability”, IRIS Independent Research, 1998.
- [5] A. Martino, Introduction to Modern EW Systems, Artech House, 2012
- [6] E. B. Robert, “Mission, Threats, and Threat Effects” in Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design, AIAA Education Series, 2003, pp.545.
- [7] S. Erdoğan, A. Bektaş, H. Ergezer, Development of an Air-to-Ground Engagement Analysis Model of Fighter Aircrafts, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, Ankara,
- [8] R. Sheng, “System Requirements Analysis” in System Engineering for Aerospace, A Practical Approach, Elsevier Academic Press, 2019, pp.5.
- [9] J. Stillion, Trends in Air-to-Air Combat, Center for Strategic and Budgetary Assessments, p.8, [Online]. Available: <https://csbaonline.org/uploads/documents/Air-to-Air-Report-.pdf>