

MUHARİP HAVA ARAÇLARINDA MANEVRA NIN BEKA ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Sinem ERDOĞAN¹ ve Almila BEKTAŞ²
TUSAŞ, Ankara

Halit ERGEZER³
Çankaya Üniversitesi, Ankara

ÖZET

Savaş durumunda, hava araçları kalkmadan önce görev planlaması yapılmaktadır. Bu görev planlamasında hava aracının bekasını ve öldürücülüğünü arttırmak için rotaları planlanır. Bu çalışmada hava aracının görev öncesi bekasını maksimize etmek için kullanılabilir, görev planlamasına da katkıda bulunabilecek bir model geliştirilmiştir. Bu modelde hava aracının bekası olasılık olarak; radara, füze kabiliyetlerine, radar kesit alanına (RKA) ve karıştırıcı kabiliyetlerine bağlı bir şekilde hesaplanmıştır. Farklı manevraların beka üzerindeki etkisi tüm diğer etkenler sabit tutularak hesaplanmıştır.

GİRİŞ

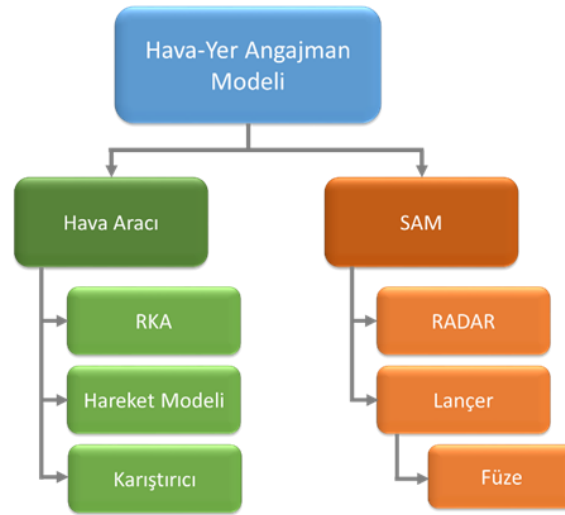
Günümüz muharebelerinde görevlerin başarı kriterleri arasında hava aracının bekasının sağlanması önemli bir kriterdir. Bekanın sağlanması ve artırılması için en uygun yöntem insan faktörünü minimize edecek ancak tecrübe bazlı fikirleri ve taktikleri kaybetmeyecek, hava aracının ve muharebe sahasındaki düşman imkânlarını dikkate alacak bir analiz modeli geliştirilmesidir.

Bu çalışmada hava aracının bekasını radara, füze kabiliyetlerine, radar kesit alanına (RKA) ve karıştırıcı kabiliyetlerine bağlı bir şekilde olasılık olarak hesaplayan bir model oluşturulmuştur. Analizin detayı ve analizin tamamlanması için gereken sürede dikkate alınarak modeller angajman seviyesinde tutulmuştur. Oluşturulan model için özel bir kullanıcı ara yüzü tasarlanmıştır. Ara yüz üzerinden her bir alt model için gerekli parametreler girilebilmektedir. Angajman ortamı temel olarak iki ana modelden; hava aracı ve SAM (Surface to Air Missile), oluşmaktadır. Bu modeller ve alt modelleri Şekil 1’de görülebilmektedir. Modeller MATLAB Simulink üzerinde oluşturulmuş, bu sayede zamana bağlı gerçekçi senaryolar yaratılabilmektedir. Her senaryonun sonucu ve girdileri otomatik olarak kaydedilmektedir ve bir senaryo tekrar koşulumak istenirse bu dosya üzerinden ara yüz otomatik olarak doldurulabilmektedir. Bu özellik sayesinde modelin aynı senaryoyu farklı RADAR’lar ve RKA değerleri kullanarak koşulumabilmesi kolaylaştırılmıştır.

¹ Harekat Analiz Mühendisi, E-posta: sinem.erdogan@tai.com.tr

² Harekat Analiz Mühendisi, E-posta: almila.bektas@tai.com.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, E-posta: halitergezer@cankaya.edu.tr



Şekil 1 Genel Modelleme Mimarisi

YÖNTEM

Bu bölümde hava aracının bekasının hesaplanmasında kullanılan formüller, bu formüllerin arasındaki bağlantılar açıklanmıştır.

Beka ve Öldürücülük

Bir sistemin hayatta kalabilirliği $P_s = 1 - P_k$ ile ifade edilmektedir. Bu çalışmada P_s hava aracının bekasını, P_k yerden havaya savunma sisteminin öldürücülüğünü ifade etmektedir. Yerden havaya savunma sisteminin (SAM) öldürücülüğü (1) numaralı denklemle hesaplanır, bu denklemde P_d SAM'ın hava aracını tespit etme olasılığını, P_h SAM tarafından atılan füzenin hava aracını vurma olasılığı, R_w SAM tarafından atılan füzenin güvenilirliğini, R_{sys} SAM hedefleme sisteminin güvenilirliğini ifade etmektedir [Smith, Stoner, 2004]. Bu denkleme SAM daha iyi temsil edilmek istenilirse farklı parametrelerde eklenebilmektedir.

$$P_k = P_d * P_h * R_{sys} * R_w \quad (1)$$

RADAR Modeli

RADAR modeli yerden havaya savunma sisteminin hava aracını tespit etme olasılığını hesaplamaktadır. Bu hesaplama için gerekli olan parametrelerden SNR (sinyal gürültü oranı - Signal Noise Ratio) hesaplanırken iki temel RADAR modu baz alınmıştır, bunlar takip ve arama modlarıdır. Bu formülasyonlar üzerinden radarın birden fazla modu temsil edilebilmektedir. Kullanıcı girdilerine ve hava aracı bilgilerine göre modların SNR (sinyal gürültü oranı - Signal Noise Ratio) değerleri her simülasyon saniyesinde güncellenmektedir. RADAR modeli takip modu ve arama modu için kullanıcıdan iki farklı SNR eşik değeri almaktadır. Model bu eşik değerlerini kullanarak iki mod arasındaki geçiş yaparken eşik değerleri arasında kalan SNR değerlerinde bulunduğu modu korumaktadır, bu sayede modlar arası geçişler daha dengeli bir hale getirilmiştir. RADAR takip modundan arama moduna takip eşığının altına düşse bile arama eşığına ulaşmadan geçmemektedir. Takip modu ve arama modu SNR değerleri aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır [Scheler, 1999].

$$SNR_{arama} = \frac{P_{ort} A_e t_s \tau(\theta, \varphi)}{4\pi \Omega R^4 k T_s L + J} \quad (2)$$

$$SNR_{takip} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \tau(\theta, \varphi)}{(4\pi)^3 R^4 k T_s B L + J} \quad (3)$$

$$t_s = \frac{\theta_s}{6\omega}, \quad \Omega(hacim) = \frac{\theta_{az} \theta_{el}}{57.23^2}, \quad A_e = \frac{G \lambda^2}{4\pi} \quad (4)$$

Denklemlerde P_{ort} (W) ortalama güç değerini, A_e (m^2) antenin açılal hızını, t_s aydınlatma zamanı, $\tau(\theta, \varphi)$ zaman bağlı RKA değerini (m^2), Ω radarın ilgilendiği hacmi (m^3), R radar anteni ile hedef arasındaki mesafeyi, k Boltzman sabitini, T_s alıcının sıcaklığını (K), L toplam kayıpları, θ_{az} yanca hüzmeye genişliğini, θ_{el} yükseliş hüzmeye genişliğini, B (Hz) bant genişliğini, λ (m) dalga boyunu, P_t

(W) gücü, G takip modu anten kazancını, ω Açılma Hız, J hava aracının karıştırıcısının sinyali, G alma ve gönderme anten kazançlarının toplamını ifade etmektedir. Bu denklemin sonucunda çıkan SNR değeri ile P_d (probability of detection)(tespit etme olasılığı) hesaplanmaktadır [Mahafza,2018].

$$P_d = 0.5 * \operatorname{erfc}\left(\sqrt{-\ln(P_{fa})} - \sqrt{SNR + 0.5}\right) \quad (5)$$

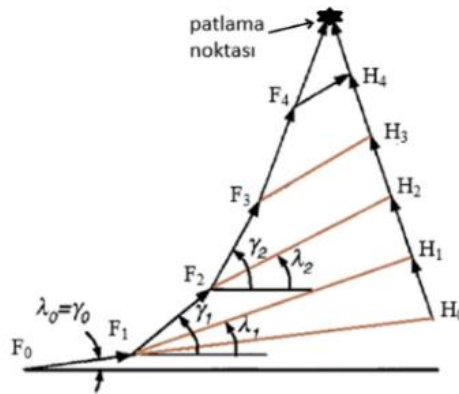
Bu denklemde P_{fa} kullanıcı tarafından girilmektedir ve yanlış bir tespit olasılığını ifade etmektedir. Bu denklemin çıktısı SAM sisteminin hava aracını tespit etme olasılığıdır. Bu değer arttıkça hava aracının bekası düşmektedir.

Füze Modeli

Hava aracının bekasının denkleminde yer alan füze tarafından beslenen P_h değeri için SAM'a sadece bir adet füze koyulmuştur. Bu füze modeli RADAR modelinin de çıktılarından biri olan modlara bağlı olarak çalışmaktadır.

Füze modelinin girdilerinde kullanıcıdan füzenin atışını tetiklemesi için bir süre istenmiştir, bu süre RADAR'ın takip modunda kalma uzunluğunu ifade etmektedir. RADAR modeli kullanıcı tarafında girilen süre kadar takip modunda kaldığında füze aktif hale gelir, atılır. Bu süre ile SAM'ın operatörünün karar verme süresi ifade edilebilmektedir, eğer süre sıfır girilirse SAM'ın hava aracını takip ettiği anda füzesinin atacağı kabul edilmektedir.

Füze, hava aracı gibi Sözde-5 serbestlik derecesinde modellenmiştir. Konum güncellemeleri füzenin yönelim açıları ile yapılmaktadır. Füzenin çalışma prensibi Şekil 2'de gösterilmiştir. Atış sonrası füzenin hedefi vurma ihtimali 4 numaralı denklemde verilmiştir [Ball,2003].



Şekil 2: Orantılı seyirüfefer çalışma prensibi

$$P_h = 1 - \exp(-V_{area} * Mass * \left(\frac{1}{R_{miss}}\right)^2) \quad (6)$$

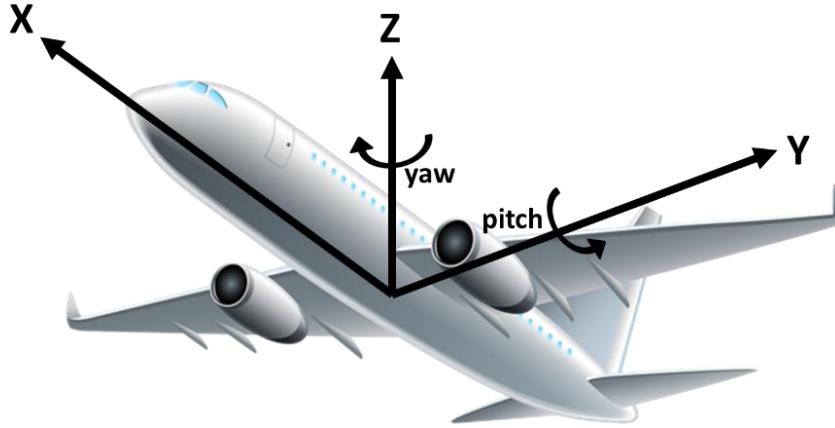
Bu denklemde V_{area} hava aracının hassas alanını, $Mass$ füzenin patlayıcı ağırlığını R_{miss} füze uçuş süresinin ya da mesafesinin sonuna geldiğinde hava aracı ile arasında bulunan mesafeyi ifade eder. Kaçırma mesafesi, füze eğer hedefe ulaşabilir ise 1 olarak alınır.

Hava Aracı Modeli

Hava aracı modeli içinde 3 farklı model içermektedir, bunlar hareket modeli, RKA modeli ve karıştırıcı modelidir. Hareket modeli sözde 5 serbestlik derecesi ile oluşturulmuştur ve hava aracının manevralarını, rotasını ve temel hareketlerinin tamamını içermektedir [Bektaş,Ergezer,Erdoğan,2022]. Hava aracının nasıl temsil edildiği Şekil 3'te gösterilmiştir.

Hava aracının hareketleri lateral, aksenal ve normal ivmelerden beslenmektedir. Bu ivme değerleri kullanılarak hava aracının simülasyon boyunca her bir saniyedeki konumu hesaplanmaktadır. Bu konum bilgisi radara SNR hesaplaması için, karıştırıcıya gürültü hesaplaması için beslenmektedir. Modelinin girdilerinden birisi olan yerden havaya savunma sisteminin konumu, hava aracının içinde bulunan RKA modeline beslenmektedir. Bu modelde hava aracının radarla arasında bulunan yanca ve yükseliş açıları hesaplanır. Bu açılar ile daha sonra bir tablo üzerinden RKA değeri interpolasyon ile çekilir. Tablonun ilk satırında yükseliş, ilk sütununda ise yanca açıları bulunmaktadır. Kullanıcı isteğine göre RKA değerini olduğu gibi, sabit bir gürültü ile ya da stokastik

bir gürültü ile koşullabilmektedir. Bu durumu sağlamak için CPU zamanının beslendiği bir Rayleigh dağılımı kullanılmıştır.



Şekil 3 Hava Aracı (Temsili)

Karıştırıcı Modeli

Karıştırıcı modeli bir gürültü karıştırıcısı şeklinde modellenmiştir. Hava aracının karıştırıcısından çıkan sinyal, yerden havaya savunma sisteminin radarına beslenmiş ve SNR denklemine yerleştirilmiştir. Bu sayede karıştırıcı etkisi ile P_d değerinin üzerinde karıştırıcının etkisi üzerine çalışmalar yapılabilmektedir. Karıştırıcı denklemi aşağıdaki gibidir [Vakin,2004].

$$J = \frac{P_j * BO * P_g}{R * SL} \quad (7)$$

Bu denklemde P_j karıştırıcının gücünü, BO bant genişliği seyreltme oranını, P_g karıştırıcının anten kazancını, R radar ile hedef arasındaki mesafeyi, SL yan lob faktörünü ifade etmektedir.

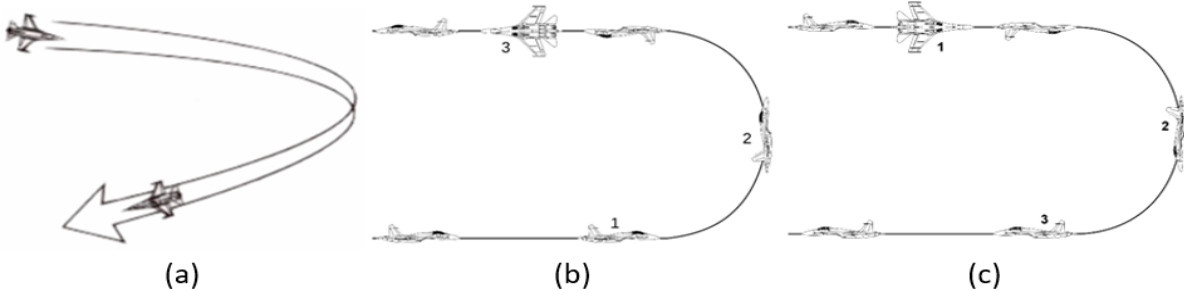
Manevralar

Harekât ortamında tehlide bağlı olarak yapılan manevra türleri vardır. Bu çalışmada manevranın etkisini incelemek için 3 tür manevra seçilmiştir. Bu manevralar, frenli dönüş (break turn), Immelmann dönüşü ve Split-s manevrasdır [Akdağ, 2005].

Frenli Dönüş Manevrası: Fren dönüş manevrası bir savunma manevrasdır. Yüksek yatış değerleri ile yapılan bu manevra yakında tespit edilen bir füzeden kaçmak adına yapılır (Şekil 3(a)).

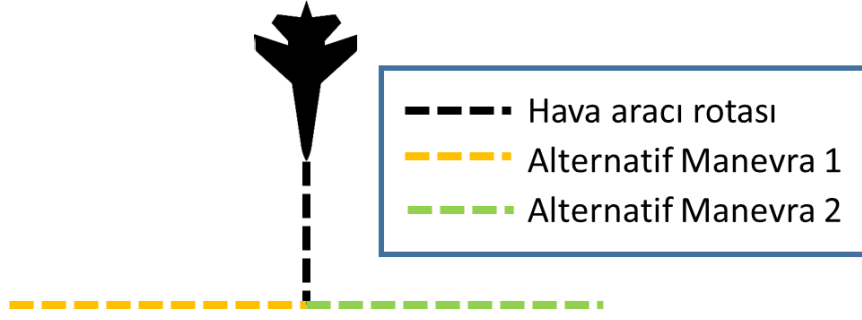
Immelmann Manevrası: Immelmann manevrası (Şekil 3(b)) tekrar pozisyon almak için uçağın hızlı bir şekilde tırmanması ve daha sonra yüksekliğini düşürüp aynı pozisyona geri gelmek için yaptığı bir manevradır. Bu manevra füzenin kilidini kırmasını sağlayabilir ya da füze hava aracını takip edip tırmanacağı için enerjisini kaybetmesini sağlayabilir.

Split-s Manevrası: Split-s manevrası (Şekil 4 3(c)) pilot tarafından hızlı bir şekilde enerji kazanıp olabildiğince hızlı bir şekilde kaçmak için yapılır. Bu manevrada pilot uçağa 90 derece bir yatış vererek uçağı tamamen ters çevirir. Yükseklik kaybederek uçağı tekrar düz bir hale getirene kadar dönüşüne devam eder.



Şekil 4: (a) Fren Dönüş Manevrası (b) Immelmann Manevrası (c) Split-s Manevrası

Fren dönüş manevrası, Immelmann manevrası ve Split-s manevrası dışında 2 alternatif manevra daha incelenmiştir. Bu manevralarda hava aracı sadece pozitif ve negatif yanca dönüşler yapmıştır. Manevralar Şekil 5 de gösterilmiştir.



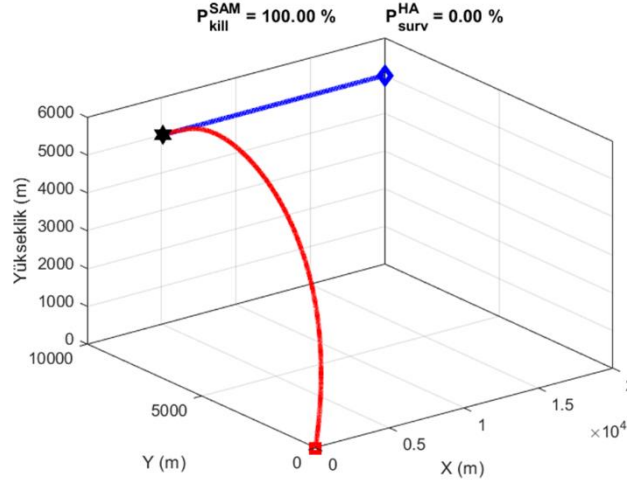
Şekil 5 Alternatif Manevralar

UYGULAMALAR VE DEĞERLENDİRME

Farklı manevraların hava aracının bekasının üzerindeki etkisi incelenirken, hava aracının hızı 0,9 M (Mach) olarak alınmış ve sabit tutulmuştur. Hava aracının bir dönüş açısı limitinin olmadığı kabul edilmiştir. Hava aracının ve SAM'ın başlangıç konumları sabit tutulmuştur.

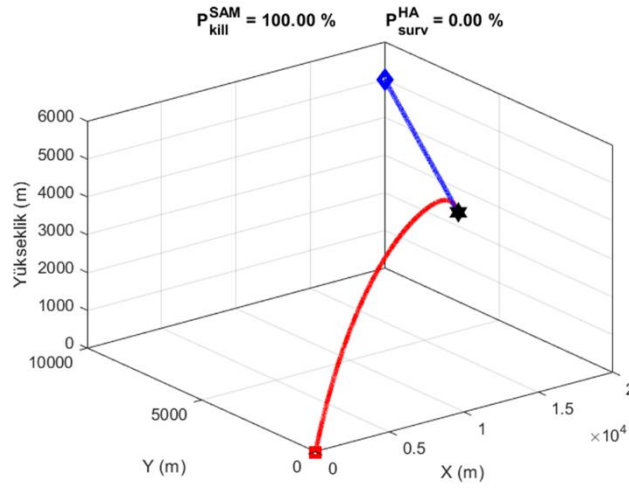
Manevrasız Senaryo Sonuçları

Manevraların hava aracının bekasının üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek, karşılaştırma yapabilmek adına öncelikle simülasyon hava aracına manevra yaptırmadan koşulmuştur. Bu seçenekte hava aracının yönelim açısı değiştirilerek 2 farklı koşul senaryosu için beka hesaplanmıştır. İlk senaryoda, hava aracının başlangıç yanca açısı 180 alınmış ve SAM kapsamının girip çıkması hedeflenmiştir (Şekil 6). İkinci senaryoda hava aracının başlangıç yanca açısı 225 alınmış ve SAM pozisyonuna doğru bir rota çizilmiştir (Şekil 7).



Şekil 6: Manevrasız koşul senaryosu 1

Manevrasız koşul senaryosu 1'in sonucunda hava aracının vurulduğu, hayatta kalma olasılığının olmadığı görülmektedir.

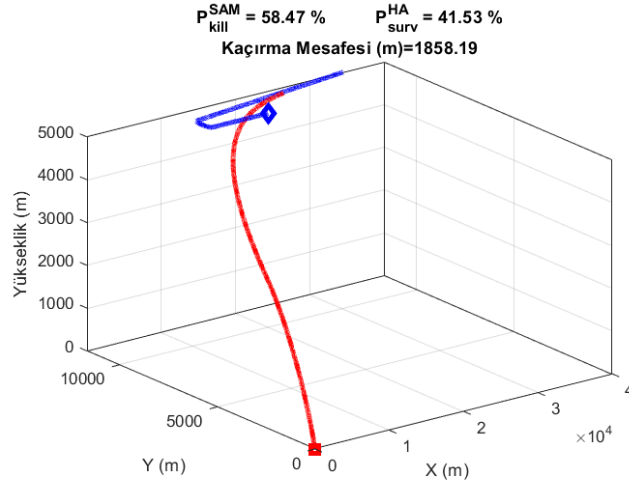


Şekil 7: Manevrasız koşum senaryosu 2

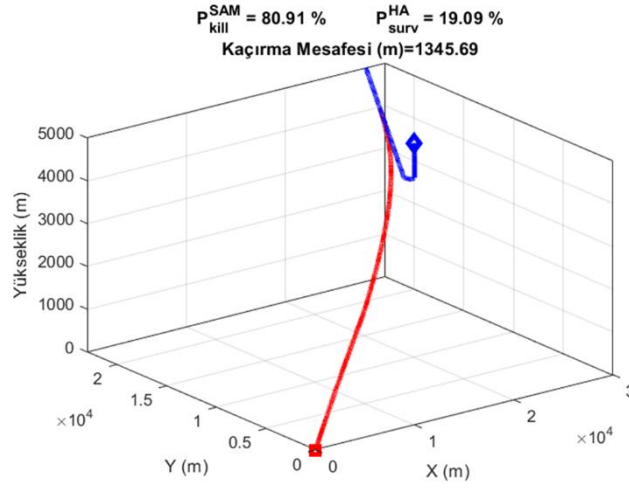
Manevrasız koşum senaryosu 2'nin sonucunda hava aracı vurulmaktadır ve manevrasız koşum sonucu 1 gibi hava aracının hayatta kalma olasılığı yoktur.

Frenli Dönüş Manevrası Sonuçları

Manevrasız koşumlar için atılan senaryolara lateral ekseninde frenli dönüş manevrasını yaratacak ivmeler tanımlanarak simülasyonlar bahsedilen 180 ve 225 yanca açıları için tekrar koşulmuştur. Frenli dönüş manevrasını yansıtabilmek için iki senaryoda da hava aracı ile füze arasındaki mesafenin 8500 metreye düştüğü noktalar seçilmiştir. Bu mesafe değiştirilerek MWR (Missile Warning Receiver/ füze ikaz sistemi) gibi önemli angajman akışını değiştirebilecek komponentlerinde analiz edilebilmesine olanak sağlanmıştır. Frenli dönüş manevrasının sonuçları Şekil 8 ve Şekil 9 de görülebilmektedir.



Şekil 8: Frenli Dönüş Manevrası Senaryo 1

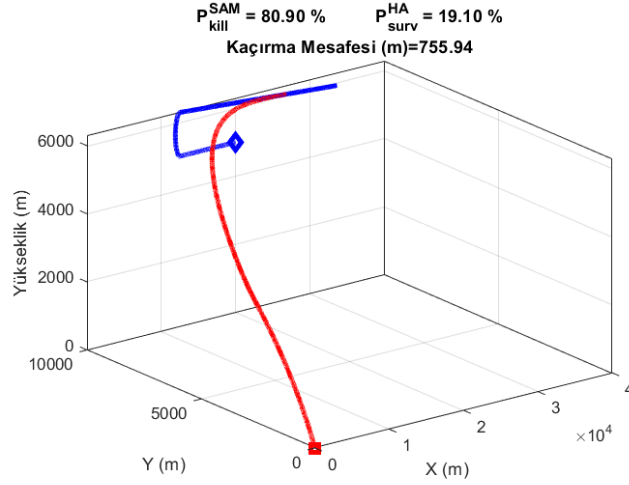


Şekil 9: Frenli Dönüş Manevrası Senaryo 2

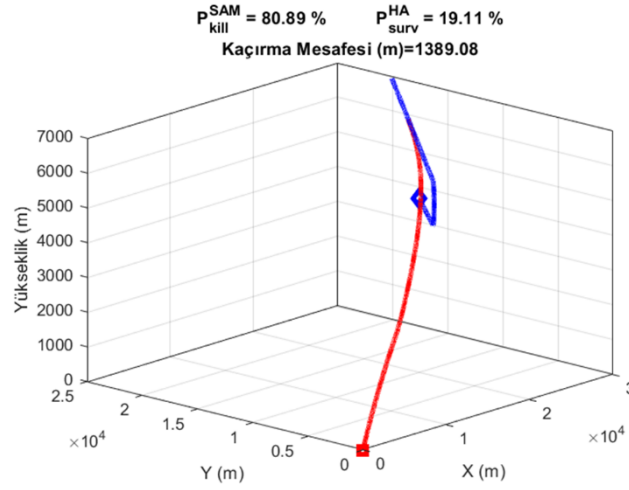
Şekil 8 ve Şekil 9 da gösterilen sonuçlardan frenli dönüş manevrasının hava aracının bekasını arttırdığı anlaşılabilmektedir.

Immelmann Manevrası Sonuçları

Immelmann manevrası hava aracına normal eksende pozitif ivme komutu verilerek modellenmiştir. Modelin içinde tırmanma hızı ve ivmesi için limit tanımlanmamıştır. Manevraların beka üzerindeki etkisini karşılaştırabilmek için Immelmann manevrası frenli dönüş manevrasında da olduğu gibi hava aracı ile füze arasındaki mesafenin 8500 metreye düştüğü noktada, 180 ve 225 yanca açıları için simülasyon koşulmuştur (Şekil 10 ve Şekil 11).



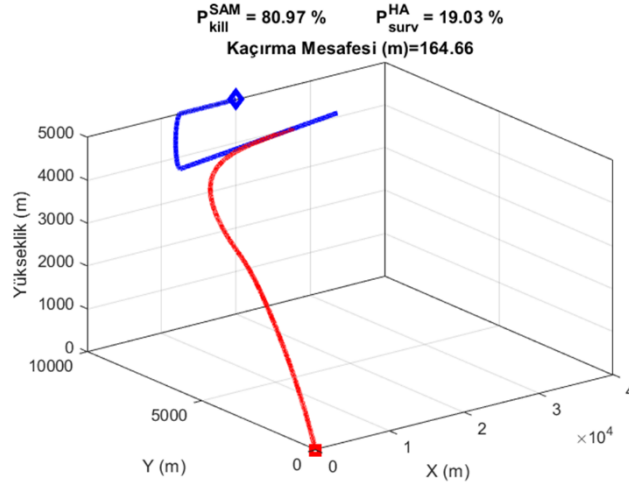
Şekil 10: Immelmann Manevrası Senaryo 1



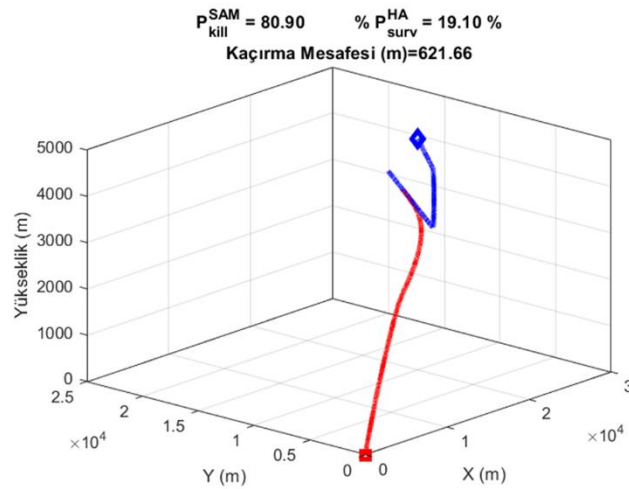
Şekil 11: Immelman Manevrası Senaryo 2

Split-s Manevrası Sonuçları

Split-s manevrası temsil edilirken hava aracına Immelman manevrasındaki gibi sadece normal eksende ancak negatif ivme değerleri ile manevra komutu verilmiştir. Hava aracı ile füze arasındaki mesafenin 8500 metreye düştüğü noktada Split-s manevrası uygulanmıştır (Şekil 12 ve Şekil 13).



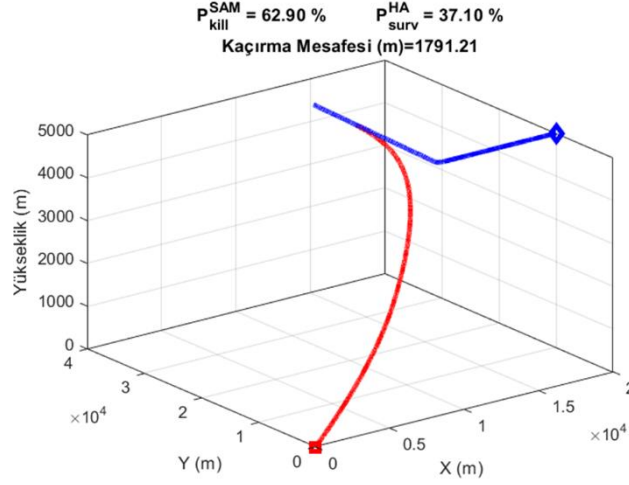
Şekil 12: Split-s Manevrası Senaryo 1



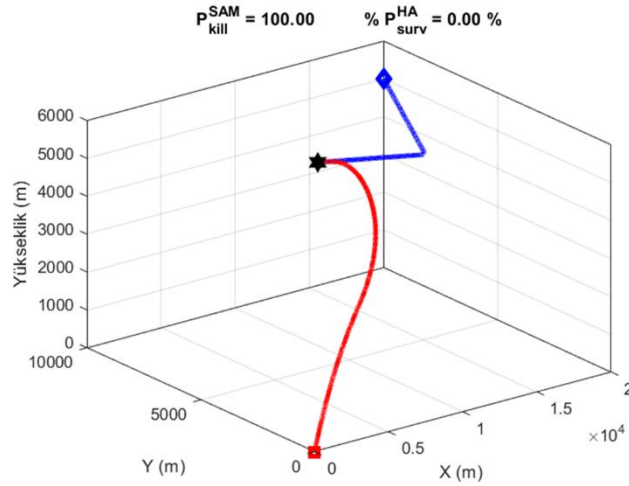
Şekil 13: Split-s Manevrası Senaryo 2

Alternatif Manevra 1 Sonuçları

Hava aracının kaçmadan sadece bir krank manevrası ile füzeden uzaklaşmaya çalışması istenmiştir. Alternatif manevra 1'i hava aracına yansıtmak için hava aracına lateral ekseninde ivme tanımlanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi adına alternatif manevra 1 180 ve 225 yanca açıları için ayrı ayrı koşturulmuştur (Şekil 14 ve Şekil 15).



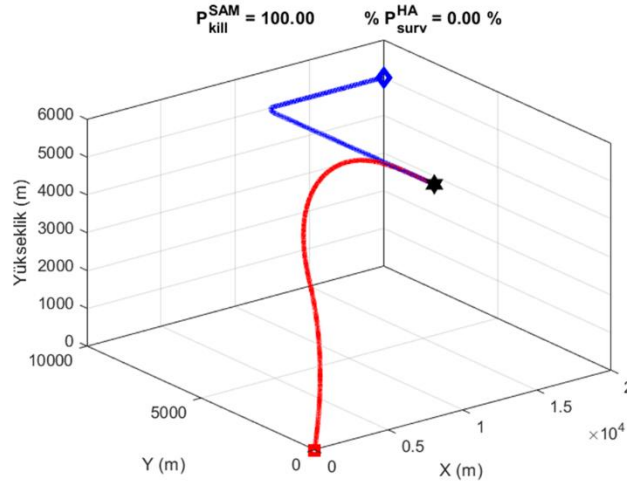
Şekil 14 Alternatif Manevra 1 Senaryo 1 Sonuçları



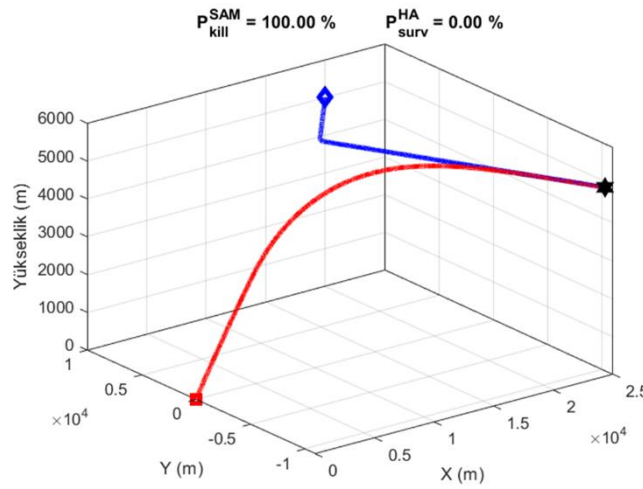
Şekil 15 Alternatif Manevra 1 Senaryo 2 Sonuçları

Alternatif Manevra 2 Sonuçları

Hava aracının kaçmadan sadece bir krank manevrası ile füzeden uzaklaşmaya çalışması istendiği için oluşturulan alternatif manevra 1 in aksine hava aracının tam tersi yönde ilerlemesinin bekasına etkisini incelemek adına alternatif manevra 2 oluşturulmuştur.. Alternatif manevra 2'yi hava aracına yansıtmak için hava aracına lateral ekseninde ivme tanımlanmıştır. Karşılaştırma yapılabilmesi adına alternatif manevra 2 180 ve 225 yanca açıları için ayrı ayrı koşturulmuştur (Şekil 16 ve Şekil 17).



Şekil 16 Alternatif Manevra 2 Senaryo 1 Sonuçları



Şekil 17 Alternatif Manevra 2 Senaryo 2 Sonuçları

Manevralar kullanılarak atılan koşumlar sonrasında aşağıdaki sonuçlara (Tablo 1) ulaşılmıştır. Bütün senaryolar incelendiğinde bekayı en çok arttıran manevranın frenli dönüş manevrası olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi hava aracı ile füzenin çarpışma noktasının, füzenin kinematik menzilin dışına çıkmasıdır. Yanca 225 derece dönüş senaryo sonuçları incelendiğinde alternatif manevralar hariç bütün manevraların manevrasız sonuçtan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Manevrasız koşumda yanca 225 dönüş senaryosu hava aracı füzenin kendisine yaklaştığı yöne doğru ilerlediği için bekasını arttırmanın en zor olduğu senaryo olmuştur. Alternatif manevraların bekayı arttırmamasının sebebi, hava aracının yaptığı manevraların füzenin kinematik menzili içinde kalmış olması olmuştur. Hava aracı SAM'a 0,9 M ile yaklaşırken Immelmann ve Split-s manevraları bekayı aynı oranda etkilemiştir, bunun nedeni Immelmann manevrasında hem hava aracı hemde füze enerji kaybederken split-s manevrasında hava aracı enerji kazanmış, füzenin ise sadece split-s manevrasının ilk saniyelerinde menzilin çok içine girmiştir.

Tablo 1: Yüzdeler Olarak Hava Aracının Bekası ve SAM'ın Öldürücülük Değerleri

Manevra Adı	Yanca Açısı	P_{surv} (%)	P_{kill} (%)
Manevrasız	180	0,00%	100,00%
	225	0,00%	100,00%
Frenli Dönüş	180	41,53%	58,47%
	225	19,09%	80,91%
Immelmann	180	19,10%	80,90%
	225	19,11%	80,89%
Split-s	180	19,03%	80,97%
	225	19,10%	80,90%
Alternatif 1	180	37,10%	62,90%
	225	0,00%	100,00%
Alternatif 2	180	0,00%	100,00%
	225	0,00%	100,00%

Tüm sonuçlar incelendiğinde frenli dönüş manevrasının uçağın bekasını bütün manevralardan daha çok arttırdığı, kabul edilen koşullarda Immelman manevrası ile Split-s manevrasının hava aracının bekasında aynı etkiyi bıraktığı gözlemlenmiştir.

SONUÇ

Bu çalışmada, olasılıksal olarak hava araçlarının beka analizleri gerçekleştirilirken, gelecekte görev planlamalarında öngörü yaratabilecek çalışmalara evrilmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın sonucunda bir SAM radarının, lançerinin paralelinde ve üzerine ilerleme durumları incelenmiş, füze atış noktasından uzaklaşmanın ve füze kinematik mesafesinin dışına kaçmaya çalışmanın hayatta kalabilirliği artırıcı bir taktik olduğu görülmüştür. İleride hava aracının performans limitleri göz edilerek farklı hızların aynı senaryolarda etkisi incelenebilir ve bu hava aracının bekasına hızının etkisini gösterebilir. Modele yapılacak eklemelerle Hava-Yer angajman analizlerinde öldürücülük değeri hava aracı için de hesaplanıp görev başarımları da ölçülebilir bir simülasyon aracı yaratılabilir.

Kaynaklar

- Akdağ, R., 2005. *Evaluation of Fighter Evasive Maneuvers Against PN Missiles*, Türk Naval Akademisi.
- Ball, R.E., 2003. *The Fundamentals of Aircraft Combat Survivability Analysis and Design*, New York: AIAA, 2nd Ed..
- Bektaş, A., Ergezer, H. ve Erdoğan, S., 2022. *Muharip hava araçlarının hava - yer angajman analiz modelinin geliştirilmesi*, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 37 (4) , 2225-2240 . DOI: 10.17341/gazimmfd.747596
- Mahafza, B., 2018. *Radar signal analysis and processing using MATLAB*, CRC Press, s.169
- Smith, R., Stoner, D., 2004. *Fingers of Death: Algorithms for Combat Killing*, Charles River Media.
- Vakin, S.A., 2004. *Fundamentals of Electronic Warfare* , Publishing House of Electronic Industry.