

**HAVADA AYIRMA GÜVENCE  
SİSTEMLERİNE YENİ BİR YAKLAŞIM**

Ramazan Kürşat ÇEÇEN  
Yüksek Lisans Tezi

Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı  
Ağustos-2014

## JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

**Ramazan Kürşat Çeçen**'in "Havada Ayırma Sistemlerine Yeni Bir Yaklaşım" başlıklı **Havacılık Elektrik ve Elektronik** Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans Tezi 28.08.2014 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

| Adı Soyadı                                      | İmza  |
|---|-------|
| Üye (Tez Danışmanı) : Yrd. Doç. Dr. Hakan KORUL | ..... |
| Üye : Prof. Dr. Aydan CAVCAR                    | ..... |
| Üye : Yrd. Doç. Dr. Sinem KAHVECİOĞLU           | ..... |

**Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun**  
..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

## ÖZET

**Yüksek Lisans Tezi**

### **HAVADA AYIRMA GÜVENCE SİSTEMLERİNE YENİ BİR YAKLAŞIM**

**Ramazan Kürşat ÇEÇEN**

**Anadolu Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Havacılık Elektrik ve Elektronik Anabilim Dalı**

**Danışman: Yrd. Doç. Dr. Hakan KORUL  
2014, 63 sayfa**

Uçaklar arasında yapılan ayırma işlemlerinin etkili ve emniyetli bir şekilde yapılması hava trafik hizmetleri için büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada, havada ayırma güvence sistemine dayalı çarpışma ihtimalinin belirlenmesi ve uygun çözüm önerisinin bulunması üzerine araştırmalar yapılmıştır. Çarpışma ihtimalinin belirlenebilmesi için uçakların yörünge tahminlerinin yapılması gerekmektedir. Pozisyon bilgisi hesaplanırken determinist yöntem kullanılmıştır. Bu yöntem uçaklar hakkındaki konum bilgilerinin tam olarak bilindiği kabulüne dayanan bir yöntemdir. Çözüm önerileri uçaklar arasındaki göreceli irtifaya, göreceli mesafeye, irtifalarına, baş açılarına, minimum ayırma mesafesine ve hızlarına göre verilir. Çözüm önerisi yatay ekseninde ya da dikey ekseninde verilebilmektedir. Uygulanan çözüm önerileri ile uçakların hızlarında değişiklik yapılmadan sadece baş açıları ve tırmanma açıları değiştirilerek uçaklar arasındaki minimum ayırmanın sağlanması hedeflenmiştir. Tasarımı yapılan bu algoritma bilgisayar ortamında gerçekçi çarpışma ihtimalleri sayesinde test edilmiştir. Algoritmanın test edilmesi için MATLAB programı seçilmiş ve bu algoritmanın ürettiği çözüm önerileri grafikler yardımıyla görsel hale getirilmiştir. Uygulanan çözüm önerileri sonrasında uçaklar izlenmeye devam edilmiştir ve uyguladıkları çözüm önerileri sayesinde bir daha olası bir çarpışma ihtimali gözlemlenmemiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çarpışma İhtimali Belirleme, Çözüm Önerisi ve Minimum Ayırma

## **ABSTRACT**

**Master of Science Thesis**

### **A NEW APPROACH TO AIRBORNE SEPERATION ASSURANCE SYSTEM**

**Ramazan Kürşat ÇEÇEN**

**Anadolu University  
Graduate School of Sciences  
Department of Avionics**

**Supervisor: Assist. Prof. Dr. Hakan KORUL  
2014, 63 pages**

Safe and effective aircraft separation processes hold great significance for air traffic services. In this study, a new approach for aircraft conflict detection and resolution is demonstrated. In order to estimate the probability of aircraft collision, the current positions of aircraft and their trajectories are required to be known. The deterministic approach is used for the estimation of the positions of the aircrafts in the study. This approach is based on the assumption that the trajectories between the aircrafts are already known. The resolution algorithm is given according to the relative altitudes, relative ranges, altitudes, heading angles, minimum separation and velocity between the aircrafts and the resolution algorithm can be seen on the horizontal or vertical axis. Through the resolution algorithms, without any change of the velocity of the aircrafts, the heading angles and flight path angles of the aircrafts are altered with the aim of maintaining the minimum separation between the two aircrafts. This proposed algorithm is tested via MATLAB with realistic conflict scenarios as simulation. As a result of the resolution algorithm given, no other probability of conflict is detected.

**Key Words:** Conflict Detection, Conflict Resolution and Minimum Separation

## İÇİNDEKİLER

|  |           |
|--|-----------|
| ÖZET.....  | i         |
| ABSTRACT .....                                     | ii        |
| İÇİNDEKİLER .....                                  | iii       |
| ŞEKİLLER DİZİNİ .....                              | v         |
| ÇİZELGELER DİZİNİ .....                            | vii       |
| KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ .....               | ix        |
| <br>   |           |
| <b>1.GİRİŞ</b>                                     | <b>1</b>  |
| <b>2. TRAFİK UYARI VE ÇARPIŞMA ÖNLEYİCİ SİSTEM</b> | <b>4</b>  |
| 2.1. Tarihçe .....                                 | 4         |
| 2.2. Temel Bilgiler .....                          | 5         |
| 2.3. TCAS Çözüm Önerisi.....                       | 10        |
| 2.3.1. Duyarlılık seçimi .....                     | 10        |
| 2.3.2. Şiddet seçimi .....                         | 12        |
| <b>3. ÇARPIŞMA İHTİMALİ BELİRLEME</b>              | <b>14</b> |
| 3.1. Çarpışma İhtimali Kavramı .....               | 14        |
| 3.2. En Yakın Nokta Yaklaşımı .....                | 15        |
| 3.3. Sistem Modelleme .....                        | 16        |
| 3.4. Göreceli Hareket Hesaplamaları.....           | 20        |
| <b>4. UÇAK ÇARPIŞMA ÇÖZÜMÜ</b>                     | <b>24</b> |
| 4.1. Annex 2 Uçak Ayırma Kuralları.....            | 24        |
| 4.1.1. Yol hakkı .....                             | 24        |
| 4.2. Yatay Eksen Çözüm Önerisi.....                | 25        |
| 4.3. Dikey Eksen Çözüm Önerisi .....               | 28        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>5. SİMÜLASYON VE SONUÇLAR</b>                      | <b>29</b> |
| 5.1. Yatay Eksen Çözüm Önerisi Belirleme .....        | 30        |
| 5.1.1. Yörüngelerin kesişmesi durumu .....            | 30        |
| 5.1.2. Uçakların karşılıklı olmaları durumu .....     | 36        |
| 5.1.3. Uçakların aynı yörüngede olmaları durumu ..... | 42        |
| 5.2. Dikey Eksende Çözüm Önerisi Belirlemesi .....    | 48        |
| 5.2.1. Yörüngelerin kesişmesi durumu .....            | 49        |
| 5.2.2. Uçakların karşılıklı olmaları durumu .....     | 52        |
| 5.2.3. Uçakların aynı yörüngede olmaları durumu ..... | 55        |
| <b>6. SONUÇ</b>                                       | <b>59</b> |
| <b>KAYNAKÇA .....</b>                                 | <b>61</b> |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

|  |    |
|--|----|
| 2.1. TCAS çalışma mekanizması .....                                      | 6  |
| 2.2. TCAS ekipmanları .....  | 6  |
| 2.3. Trafik ekranı örneği 1.....   | 7  |
| 2.4. Trafik ekranı örneği 2.....   | 8  |
| 2.5. TCAS izleme.....  | 8  |
| 2.6. Yatay koruma alanı .....  | 9  |
| 2.7. Dikey koruma alanı .....  | 15 |
| 2.8. RA duyarlılık seçimi .....  | 11 |
| 2.9. Yörünge kesişmesi olmayan durum .....                               | 11 |
| 2.10. Yörünge kesişmesi olan durum.....                                  | 12 |
| 2.11. RA şiddet seçimi .....   | 12 |
| 2.12. Yeniden verilen farklı çözüm önerisi.....                          | 13 |
| 3.1. Uçak çarpışma ihtimali belirme ve çözüm öneri işlemi.....           | 15 |
| 3.2. Serbest uçuş koruma alanı.....                                      | 16 |
| 3.3. Basit kütle merkezi modeli ve uçak üzerine etki eden kuvvetler..... | 17 |
| 3.4. Uçak koordinat sistemi.....   | 18 |
| 3.5. Koordinat sistemi ve çözüm önerisi parametreleri.....               | 20 |
| 4.1. Uçaklar aynı yörüngede .....  | 26 |
| 4.2. Uçakların yörüngelerinin kesişmesi durumu .....                     | 27 |
| 4.3. Uçakların birbirlerine karşılıklı olarak yaklaşmaları .....         | 27 |
| 5.1. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı sola döner 1 .....               | 31 |
| 5.2. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı sağa döner 1 .....               | 32 |
| 5.3. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı düz gider 1 .....                | 32 |
| 5.4. B uçağı sağa/sola döner ve A uçağı düz gider 1 .....                | 33 |

|  |    |
|--|----|
| 5.5. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sola döner 2.....  | 37 |
| 5.6. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sağı döner 2.....  | 38 |
| 5.7. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı düz gider 2.....   | 38 |
| 5.8. B uçağı sağı/sola döner ve A uçağı düz gider 2.....   | 39 |
| 5.9. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sola döner 3.....  | 43 |
| 5.10. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sağı döner 3..... | 44 |
| 5.11. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı düz gider 3.....  | 44 |
| 5.12. B uçağı sağı/sola döner ve A uçağı düz gider 3.....  | 45 |
| 5.13. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 1.....            | 50 |
| 5.14. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 1.....            | 50 |
| 5.15. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 2.....            | 53 |
| 5.16. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 2.....            | 53 |
| 5.17. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 3.....            | 56 |
| 5.18. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 3.....            | 56 |

## ÇİZELGELER DİZİNİ

|   |    |
|---|----|
| 2.1. TCAS eşik değerleri.....                             | 9  |
| 5.1. Uçakların başlangıç değerleri 1.....                 | 30 |
| 5.2. Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 33 |
| 5.3. Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 33 |
| 5.4. Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 34 |
| 5.5. Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 34 |
| 5.6. İki uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 34 |
| 5.7. İki uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 34 |
| 5.8. İki uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 35 |
| 5.9. İki uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 1.....  | 35 |
| 5.10. Uçakların başlangıç değerleri 2.....                | 37 |
| 5.11. Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 39 |
| 5.12. Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 40 |
| 5.13. Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 40 |
| 5.14. Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 40 |
| 5.15. İki uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 40 |
| 5.16. İki uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 41 |
| 5.17. İki uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 41 |
| 5.18. İki uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 2..... | 41 |
| 5.19. Uçakların başlangıç değerleri 3.....                | 43 |
| 5.20. Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 3..... | 45 |
| 5.21. Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 3..... | 46 |
| 5.22. Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 3..... | 46 |
| 5.23. Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 3..... | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 5.24. İki uçağın $15^\circ$ yatış açısı ile dönüş yapması 3 ..... | 46 |
| 5.25. İki uçağın $20^\circ$ yatış açısı ile dönüş yapması 3 ..... | 47 |
| 5.26. İki uçağın $25^\circ$ yatış açısı ile dönüş yapması 3 ..... | 47 |
| 5.27. İki uçağın $30^\circ$ yatış açısı ile dönüş yapması 3 ..... | 47 |
| 5.28. Uçakların başlangıç değerleri 4.....                        | 49 |
| 5.29. A Uçağının yükselmesi 1 .....                               | 50 |
| 5.30. B Uçağının yükselmesi 1 .....                               | 50 |
| 5.31. Uçakların başlangıç değerleri 5.....                        | 52 |
| 5.32. A Uçağının yükselmesi 2 .....                               | 54 |
| 5.33. B Uçağının yükselmesi 2 .....                               | 54 |
| 5.34. Uçakların başlangıç değerleri 6.....                        | 55 |
| 5.35. A Uçağının yükselmesi 3 .....                               | 57 |
| 5.36. B Uçağının yükselmesi 3 .....                               | 57 |

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

|              |   |
|--------------|---|
| HTK          | : Hava Trafik Kontrol   |
| TCAS         | : Traffic Collision Avoidance System (Trafik Ayırma ve Uyarı Sistemi) |
| TA           | : Trafik Alert (Trafik İkazı)   |
| RA           | : Resolution Advisory (Çözüm Önerisi)                                 |
| FL           | : Flight Level (Uçuş Seviyesi)  |
| AGL          | : Above Ground Level (Yer Yüzeyinden Yükseklik)                       |
| T            | : Uçak motor itkisi   |
| D            | : Sürüklenme kuvveti  |
| m            | : Uçak kütlesi  |
| g            | : Yer çekimi ivmesi   |
| $\gamma$     | : Tırmanma açısı  |
| L            | : Taşıma kuvveti  |
| $\phi$       | : Yatış açısı   |
| $\psi$       | : Uçak baş açısı  |
| s            | : Pozisyon  |
| V            | : Uçuş hızı   |
| n            | : Yük faktörü   |
| r            | : Uçaklar arası mesafe  |
| $t_{coa}$    | : Uçaklar arası dikey ekseninde kalan mesafe                          |
| $t_{cpa}$    | : Uçaklar arası yatay ekseninde kalan mesafe                          |
| $\dot{x}$    | : x-y düzlemindeki ilerleme hızının doğu bileşeni                     |
| $\dot{y}$    | : x-y düzlemindeki ilerleme hızının kuzey bileşeni                    |
| $\dot{z}$    | : Uçağın düşey hızı   |
| x            | : Uçağın uzunlamasına eksen koordinatı                                |
| y            | : Uçağın yanlamasına eksen koordinatı                                 |
| z            | : Düşey koordinat   |
| $\Delta\psi$ | : Baş açısı değişimi  |
| R            | : Dönüş yarıçapı  |
| P            | : Dönüş sonrası uçak pozisyonu  |

## 1.GİRİŞ

Havacılık alanındaki gelişmeler her yıl bir önceki yıla oranla daha da artarak devam etmektedir. Havayolu şirketlerinin sefer sayılarını arttırması ve mevcut uçak kapasitelerini genişletmesiyle beraber hava sahalarında var olan uçak sayıları her geçen gün artmaktadır. Uçakların havadaki ve hava alanlarındaki trafiğinin emniyetli, düzenli ve hızlı bir şekilde sağlanması için uçaklar Hava Trafik Kontrol (HTK) hizmetleri almaktadırlar. Havacılık alanındaki gelişmeler hava trafik kontrolörlerinin iş yüklerinde artış meydana getirmiştir. Artan iş yükü ağırlığına rağmen, hava trafik hizmetleri uçakların istedikleri yerlere uçabilmeleri için emniyetten ödün vermeden oluşan trafik sıkıntılarını çözmeye çalışmaktadır. Mevcut HTK hizmetlerinde uçakları ayırma sorumluluğu hava trafik kontrolörlerindedir [1,2,3]. Teknolojinin ilerlemesi ile beraber hava trafik hizmetlerinin kalitesi her geçen gün artmaktadır.

Hava trafik hizmetlerinin öneminin artması araştırmacıların bu alana ilgi duymasına neden olmuştur ve bu konuyu araştırmacılar için büyük bir çalışma alanı haline gelmiştir. Araştırmacılar oluşan sıkıntıların çözümünde bilgisayar destekli sistemlere çok önemli bir yer vermektedirler. Bilgisayar destekli sistemler ile uçak çarpışmalarının azaltılması ve bu duruma neden olabilecek etmenlerin önceden tespit edilmesi için birçok çalışma yapılmıştır [4,5]. Bu çalışmalardan bir kısmı uçakların havaya dayalı ayırma prensibini uygulayabilecek araçlar üzerinedir. Uçak çarpışmalarının önceden tahmin edilmesi ve uçak ayırmalarının emniyetli bir şekilde yapılabilmesi için çeşitli sistemler geliştirilmiştir. Bu sistemlerden en yaygın olarak kullanılanı “Trafik Ayırma ve Uyarı Sistemi (Traffic Collision Avoidance System, TCAS)” adını alan sistemdir. TCAS uçaklar arasında meydana gelebilecek olan çarpışma ihtimalini belirmesi halinde devreye girer [7,8,9,10]. TCAS sistemi uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesinin korunması için hem yatay hem de dikey ekseninde olan trafik yoğunluğunu her zaman kontrol eder. Uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesinin ihlal edilmesi durumu sadece uçaklar arasında olan göreceli mesafe ve göreceli irtifa bilgileri yardımı ile değil aynı zamanda uçaklar arasında muhtemel bir çarpışmaya

kalan zamanın hesaplanması yardımı ile de belirlenebilmektedir. Mevcut TCAS sistemi uçaklar arasında ayırma işlemini uçakların yükselmesi ya da alçalması şeklinde yaptığı için uçaklar sadece irtifalarını değiştirerek çarpışma ihtimallerini ortadan kaldırmaktadırlar. TCAS sisteminden esinlenerek sadece irtifa değişimi sayesinde dikey ekseninde çözüm önerisi veren başka çalışmalar da bulunmaktadır [11,12]. Mevcut olan bu sistemin geliştirilmesi ve çözüm önerilerinin hem yatay ekseninde hem de dikey ekseninde verilebilmesi amacıyla uçakların dönüş hareketi yapabilmelerine imkân sağlayan sistemlerin kurulmasına yönelik çalışmalar da yapılmıştır [13,14]. Yapılan çalışmalara örnek olarak “Önceden Ayrılmalı Destekli Hava Sahası (Tactical Separation Assisted Flight Environment) verilebilir [15]. Bu sistemin amacı uçaklar arasında oluşabilecek muhtemel bir çarpışmanın üç dakika öncesinden saptanması ve çözüm önerisinin verilmesidir. Ayrıca bu sistem uçaklar arasında oluşabilecek muhtemel bir çarpışma ihtimalini önceden belirleyip uçakların verimli ve emniyetli bir ortamda çarpışmalardan korunmuş olarak operasyonlarını sürdürmesine imkân vermektedir. Kurulması planlanan muhtemel bir diğer sistemin adı da “Otomatik Hava Sahası Sistemi (Automated Airspace Computing System)” olarak belirlenmiştir [16].

Uçak çarpışma ihtimali belirleme ve çözüm önerisi üretme alanında yapılan çalışmalarda iki yöntem üzerinde yoğunlaşmıştır. İlk yöntem uçakların konum bilgilerinin tam olarak bilindiği bilgisi üzerine inşa edilmiş olan determinist (deterministic) yöntemdir. Diğer yöntem ise uçakların konumlarının belirlenmesinde ölçüm hatalarının göz önüne alınarak hesaplamaların yapıldığı olasılık (probabilistic) yöntemidir [17,18,19,20].

Yaklaşımın düzgün bir biçimde çalışabilmesi için çarpışma ihtimali belirleme ve çözüm üretimi algoritmasının iyi kurulması gerekmektedir. Algoritmanın doğru kurulması için uçak hareket denklemleri iyi anlaşılmalıdır. Uçakların birbirlerine göre olan hareketleri bu çalışmanın temel basamaklarından birini oluşturmaktadır.

Çalışmanın ikinci bölümünde trafik uyarı ve erken önleyici sistem anlatılmıştır. Bu bölümde TCAS sistemi ile ilgili bilgiler verilmiştir. Bu bölüm sistemin tarihçesi, sistem hakkındaki genel bilgiler ve üretilen çözüm önerilerinin nasıl belirlendiğini anlatan alt bölümlerden oluşmaktadır.

Çalışmanın üçüncü bölümünde çarpışma ihtimali belirleme kavramı anlatılmıştır. Bu bölümde uçaklar arasındaki hesaplamalarda kullanılan verilerin nasıl elde edildiğinden bahsedilmiştir.

Çalışmanın dördüncü bölümünde uçak çarpışma çözümü anlatılmıştır. Bu bölümde uçaklar arasında oluşabilecek çarpışma pozisyonlarından bahsedilmiş ve çözüm önerilerinin nasıl şekilleneceği anlatılmıştır.

Çalışmanın son bölümü simülasyon ve sonuçlar kısmıdır. Bu bölümde geliştirilen algoritma değişik çarpışma durumları karşısında denenmiştir ve uçakların performansları değerlendirilmiştir.

Yapılan bu çalışmanın amacı, uçaklar arasında oluşabilecek bir çarpışma ihtimalinin belirlenmesi ve uçakların havada olan ayırma işlemlerinin emniyetli bir şekilde yapılabilmesini sağlamaktır. Bu çalışma yapılırken uçakların ayırma işlemlerinin hem dikey ekseninde hem de yatay ekseninde yapılması ve uçaklara en uygun ekseninde çözüm önerisinin verilmesi planlanmıştır. Ayrıca tasarlanan bu algoritmanın mevcut TCAS sistemine adapte edilmesi ve TCAS sisteminin geliştirilmesi hedeflenmiştir. Ortaya konulan bu yeni yaklaşım yardımıyla uygun durumlarda uçaklara yatay ekseninde de çözüm önerisi verilmesine imkân sağlanmıştır. Kurulan bu algoritma determinist yöntem yardımı ile uçakların karşılaşabilecekleri çarpışma ihtimalleri karşısında test edilmiştir. Bunun sonucunda, çarpışma ihtimali belirleme ve çözüm önerisi üretme aşamalarının her ikisinin de başarılı olduğu görülmüştür.

## 2. TRAFİK UYARI VE ÇARPIŞMA ÖNLEYİCİ SİSTEM

Her geçen yıl hava trafik kontrol hizmetlerine olan ihtiyaç büyüyerek artmaya devam etmektedir. Havacılık otoriteleri önümüzdeki yıllarda da bu ihtiyacın devam edeceğini düşünmektedir [21]. Teknolojik gelişmelere bağlı olarak uçaklara yerde ve havada verilen HTK hizmetlerinin kalitesi artmıştır.

Hava trafik kontrol hizmetleri uçakların uçuşlarının herhangi bir safhasında birbirleriyle veya mâniyalarla çarpışmasını önlemek ve hava akışının düzenli olarak sürmesini sağlamak için uçaklar ile iletişim halinde olurlar. Uçak kokpit personelinin, radar kontrol hizmeti veren kontrolörlerin vereceği yönlendirmelere uyması ve yaptıkları manevradan sonra durumlarını sesli olarak rapor etmesi havada olan uçakların sorunsuz bir biçimde uçmaları için büyük önem arz etmektedir. HTK hizmeti alınmadığı durumda ise pilotlar “gör ve kaçın (see and avoid)” prensibi ile çarpışmalardan kaçınmaktadır [22]. Günümüzde çoğunlukla yere dayalı olarak yürütülen hava trafik kontrol hizmetleri yanında uçakların havaya dayalı olarak ayırma sorumluluğuna sahip olması, sorumluluğun bir kısmının pilotlara verilmesi konusundaki araştırmalar devam etmektedir. Bu çalışmanın konusunu da havaya dayalı ayırma prensipleri oluşturduğu için, hava trafik kontrol hizmetleri bu açıdan değerlendirilecektir.

### 2.1. Tarihçe

1950’li yıllarda “gör ve kaçın” durumunu ortadan kaldırmak için ortaya “çarpışma önleyici sistem” fikri ortaya çıkmıştır. Uçaklar arasındaki mesafe ve yaklaşma oranları dikkate alınarak yapılan hesaplamalar ile sistemin gerekli olan uyarıları uçaklara vermesi hedeflenmiştir. 1956 yılında Amerika’da gerçekleşen Grand Canyon kazasından sonra hava yolları ve havacılık otoriteleri çarpışma önleyici bir sistem tasarımı için çalışmalara başlamıştır. 1960’lar ve 70’lerde yapılan uyarı sistemleri ilk olarak sivil hava yolu şirketleri tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Yapılan sistemlerin ilk kez denenmesi sırasında pek çok kez gereksiz uyarı ortaya çıkmıştır. 1970’lerde ise Beacon Uçak Çarpışma Önleyici Sistem (Beacon Collision Avoidance System) kullanılmaya başlanmıştır.

1980'lere doğru ise TCAS sistemi için çalışmalara başlanmıştır. TCAS sistemi ile kokpitteki bir radar ekranından etraftaki diğer uçakların izlenmesine olanak sağlanmıştır. 1986 yılında ABD'de alınan bir karar ile TCAS ekipmanını uçaklarda bulundurmak zorunlu hale getirilmiştir [23].

## 2.2. Temel Bilgiler

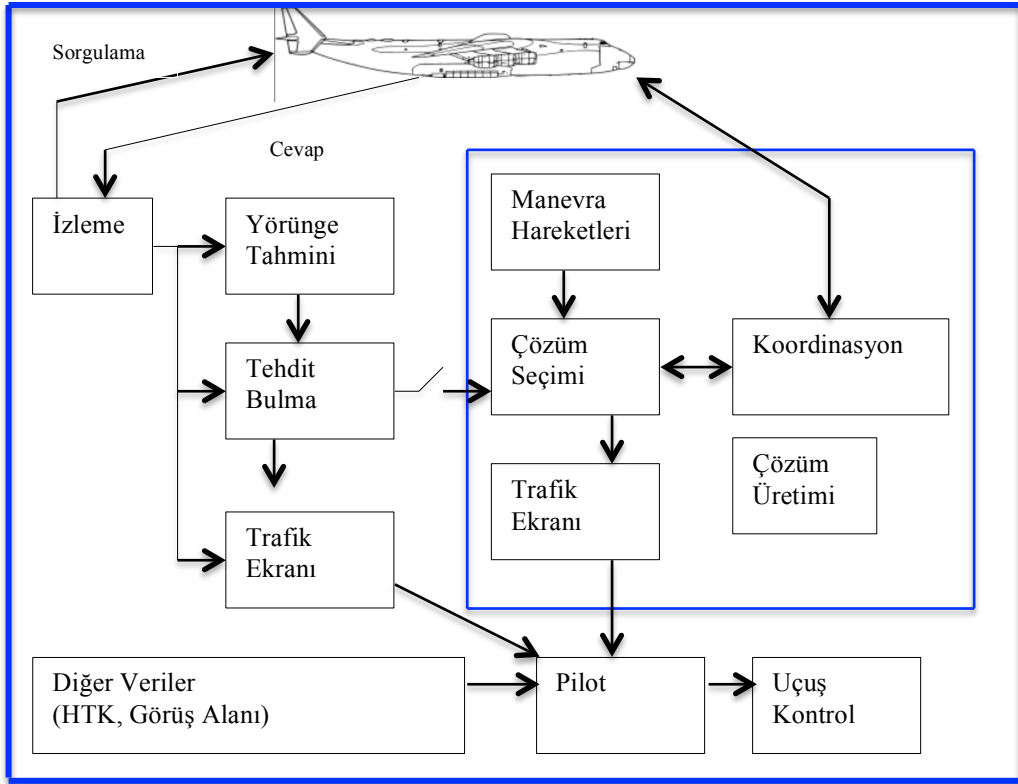
TCAS sistemi, hem oto pilot ile hem de pilot kontrolünde olan uçaklarda çalışabilmektedir. İkazlar kokpit içerisine hem sesli ile hem de yazılı olarak iletilir [23].

TCAS iki çeşit uyarı verir:

- Trafik İkazı (Trafik Alert) (TA)
- Çözüm Önerisi (Resolution Advisory ) (RA)

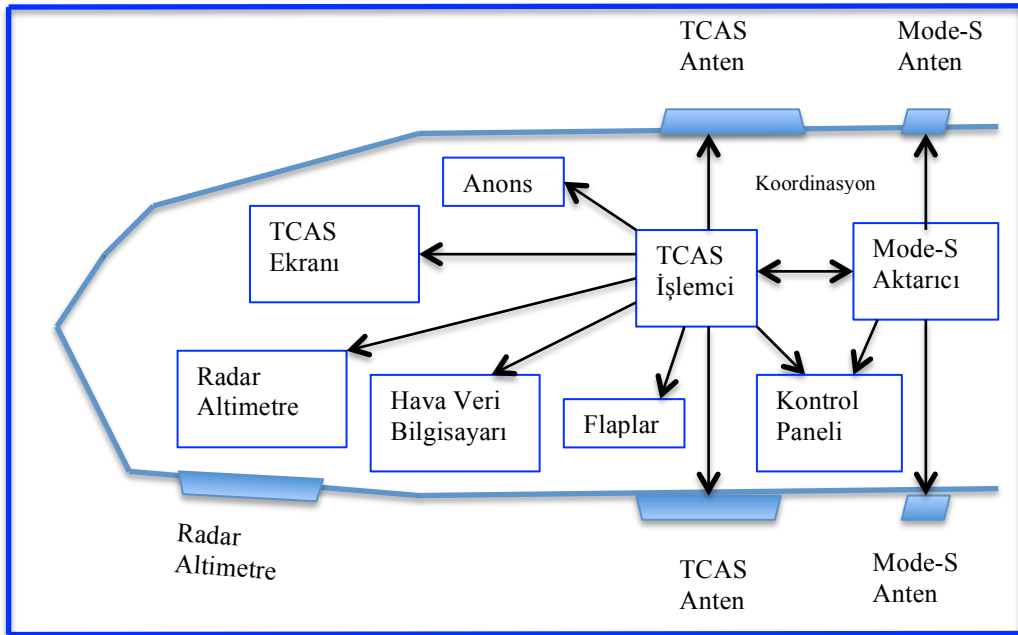
Trafik ikazı, kokpit ekibine oluşabilecek bir tehlike için hazır olmaları gerektiğini ve uçak etrafında oluşan trafiğe dikkat etmeleri gerektiğini bildirir. Trafik ikazının amacı kokpit ekibinin oluşabilecek olan bir tehlikeye daha kısa süre içerisinde tepki vermelerini sağlamaktır.

Çözüm önerisi ise oluşan tehlikeli durum karşısında pilotun uygulaması gereken komutları içerir. Komutlar uçaklar arasında eş zamanlı olarak verilmektedir. Pilotların 5 saniye içerisinde verilen çözüm önerisini uygulaması beklenir [22]. Koruma alanının ihlal edildiği durumlarda tek bir uçakta TCAS sistemi bulunuyorsa sistemin bulunduğu uçak tek taraflı olarak TA ikazı verir. TCAS'ın çalışma sisteminin ve karar mekanizmasının işleyişinin daha iyi anlaşılması için Şekil 2.1'de TCAS sisteminin çalışma mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 2.1. TCAS çalışma mekanizması [22]

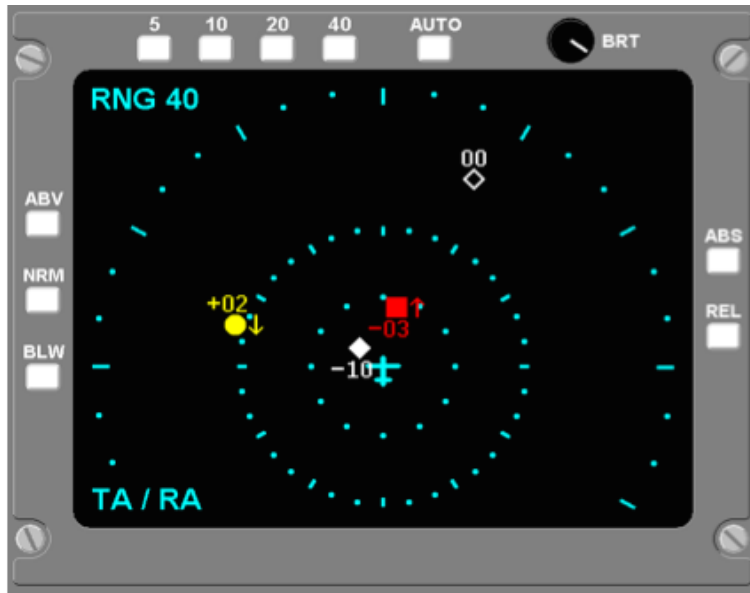
TCAS ekipmanlarının uçak içindeki yerleşimi Şekil 2.2’de verilmektedir.



Şekil 2.2. TCAS ekipmanları [23]

TCAS işlemcisi, alınan bütün verileri değerlendirir ve alınan sonuçlar doğrultusunda verilmesi gerekli olan bütün uyarıları kokpit içerisine yazılı ve sesli olarak yapar. TCAS uçakların çevrelerinin izlenmesi için kullanılan iki antene sahiptir. TCAS sisteminin gerekli haberleşmeleri yapabilmesi için Mode S aktarıcılarını kullanması gerekir. TCAS sistemi izlediği uçakları Mode-S aracılığı ile yakınlığıyla orantılı olarak sorgular ve 1030MHz frekansından veri gönderimini, 1090MHz frekansından ise veri alımını gerçekleştirir. Bu sorgulama sıklığı dakikada birden her saniyede birkaç sefere kadar artmaktadır. Uçakların uygulayacağı çözüm önerileri Mode S aktarıcılar tarafından uçaklara gönderilir. Mode S aktarıcılar 24-bit uzunluğunda benzersiz bir adrese sahiptirler. Aktarıcılarda olan bu benzersiz adres sayesinde gönderilen mesajların başka uçaklara iletilmesi imkânsızdır [23].

Uçak etrafında bulunan hava trafiği alıcılar vasıtasıyla uçak trafik ekranında görünür. Bu ekranda ayrıca gerekli durumlarda trafik ikazı ve çözüm önerisi ikazları görülür. Pilotlar bu ekran vasıtasıyla istedikleri belirli bir mesafeyi ekranda tutabilirler. Bu seçenek sayesinde pilotlar seyir uçuşu sırasında geniş mesafeleri rahat bir şekilde kontrol edebilirler. Ekranda görülebilecek bir tehdit algılamasında ise pilotlar mesafeyi daraltarak sadece belirli bir alanı ekranda görebileceklerdir [23]. Şekil 2.3 ve 2.4’de trafik ekranı görüntüsü verilmiştir.



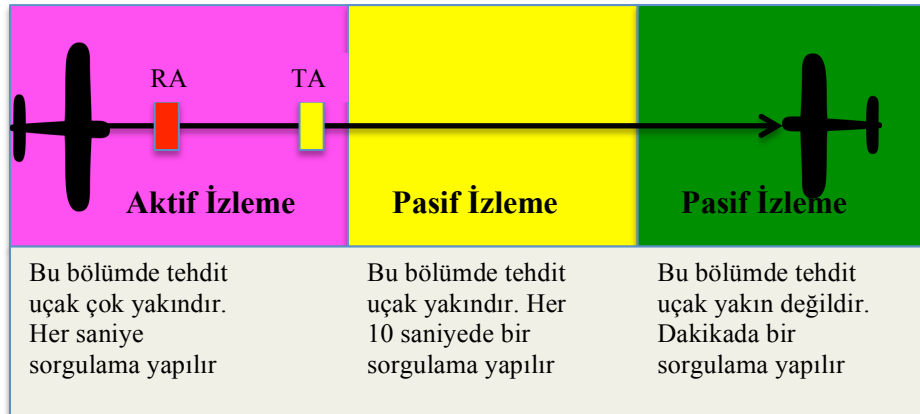
Şekil 2.3. Trafik ekranı örneği 1 [23]



Şekil 2.4. Trafik ekranı örneği 2 [23]

Yabancı bir uçağın trafik ikaz ekranında görünebilmesi için uçaklar arasındaki göreceli irtifanın 2700 feet aralığında bulunması gerekir. Yatay olarak incelediğimiz zaman ise göreceli mesafenin 4 deniz mili (Nmi) ile 60 deniz mili arasında olması gerekmektedir [22].

TCAS sisteminin uçakların çevrelerini nasıl izlediğinin daha iyi anlaşılması için Şekil 2.5 açıklayıcı olacaktır.



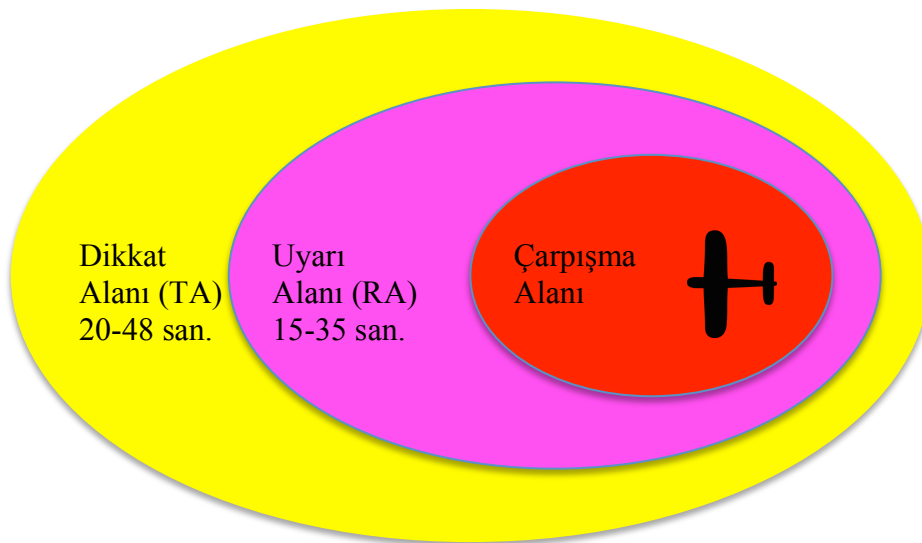
Şekil 2.5. TCAS izleme [23]

TCAS için hangi değerlerin (TA) ve (RA) eşik değeri olduğu Çizelge 2.1’de görülebilecektir [23].

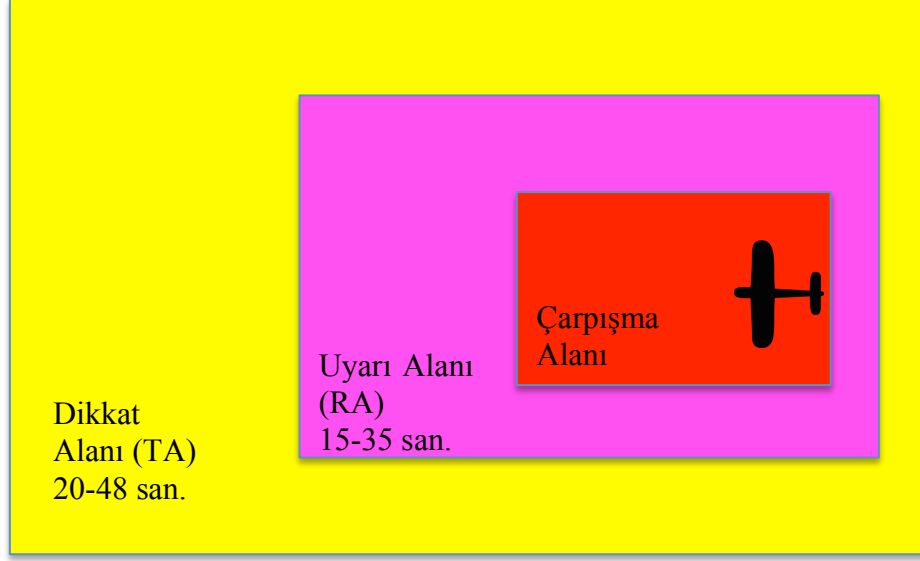
Çizelge 2.1. TCAS eşik değerleri [23]

| İrtifalar              | SL | Kalan zaman (sn.) |     | Düşük Hız zamanı (sn.) | Yatay Mesafe Eşik Değerleri (Nmi) |      | Yatay Mesafe Eşik Değerleri (feet) |     | En az İrtifa Farkı (feet) |
|------------------------|----|-------------------|-----|------------------------|-----------------------------------|------|------------------------------------|-----|---------------------------|
|                        |    | TA                | RA  | RA                     | TA                                | RA   | TA                                 | RA  | RA                        |
| 0-1000ft. AGL          | 2  | 20                | Yok | Yok                    | 0,30                              | Yok  | 850                                | Yok | Yok                       |
| 1000-2350 ft. AGL      | 3  | 25                | 15  | 15                     | 0,33                              | 0,20 | 850                                | 600 | 300                       |
| 2350-FL50 ft. AGL      | 4  | 30                | 20  | 18                     | 0,48                              | 0,35 | 850                                | 600 | 300                       |
| FL50-FL100 ft. AGL     | 5  | 40                | 25  | 20                     | 0,75                              | 0,55 | 850                                | 600 | 350                       |
| FL100-FL200 ft. AGL    | 6  | 45                | 30  | 22                     | 1,00                              | 0,80 | 850                                | 600 | 400                       |
| FL200-FL420 ft. AGL    | 7  | 48                | 35  | 25                     | 1,30                              | 1,10 | 850                                | 700 | 600                       |
| FL420-Yukarısı ft. AGL | 7  | 48                | 35  | 25                     | 1,30                              | 1,10 | 1200                               | 800 | 700                       |

TCAS sisteminin çalışma mekanizmasının temel basamaklarından biri de uçaklar arasında muhtemel bir çarpışmaya kalan süredir. TCAS işlemcileri uçaklar arasındaki muhtemel bir çarpışma tehlikesinin saptanması için mesafe ve zaman kavramlarını aynı anda değerlendirirler. Zaman ya da mesafe kavramlarından hangisinin eşik değeri aşılsa TCAS sistemi uyarı vermeye başlar. Şekil 2.7 ve Şekil 2.8’de uçaklar arasında çarpışmaya kalan zamana bağlı olarak değişen uyarılar verilmiştir.



Şekil 2.6. Yatay koruma alanı [23]



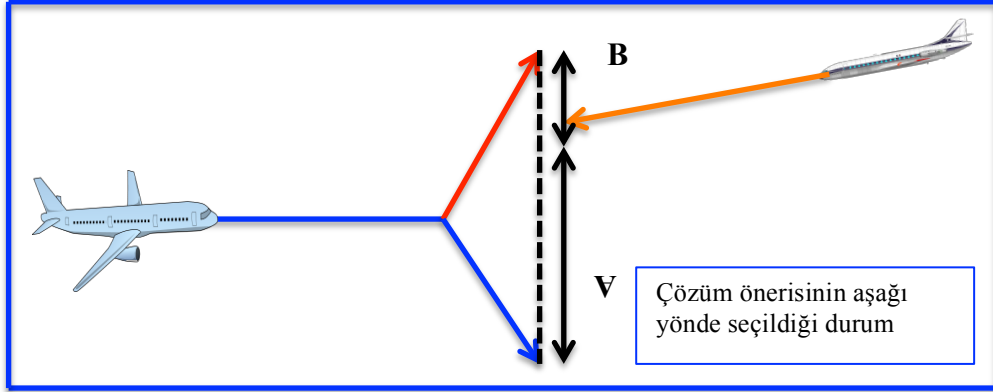
Şekil 2.7. Dikey koruma alanı [23]

### 2.3. TCAS Çözüm Önerisi

Kokpit içerisine verilen ikazların her birinin belirli bir eşik değeri vardır. TA için eşik değerleri daha yüksektir ve dikey ekseninde koruma mesafesi 42000 feet aşağısı için 850 feet, 42000 feet yukarısı için ise 1200 feet'dir. Çözüm önerisi iki aşamalı bir süreçten geçtikten sonra işleme konur [23]. İlk basamak Duyarlılık Seçimi (Sense Selection) kısmıdır. Diğer basamak ise Şiddet Seçimi (Strength Selection) kısmıdır.

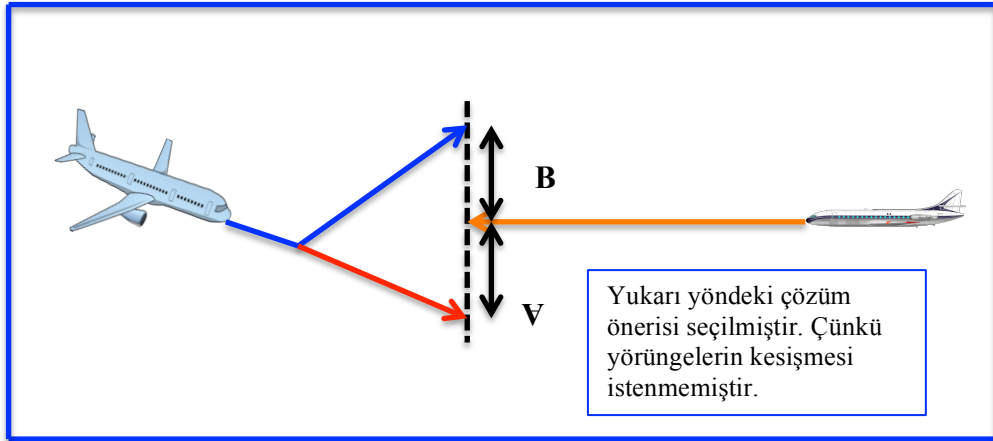
#### 2.3.1. Duyarlılık seçimi

Bu basamakta TCAS işlemcisi ilk olarak hangi yönde çözüm işlemi yapacağına karar verir. Bu işlem uçakların yükselmesi ya da alçalması şeklinde yapılır. Duyarlılık seçimi sırasında uçağın etrafında yapılan izlemelerden elde edilen veriler kullanılır. Ayrıca uçağın izlediği yörünge de çözüm önerisi üretilmesinde dikkate alınır [23].



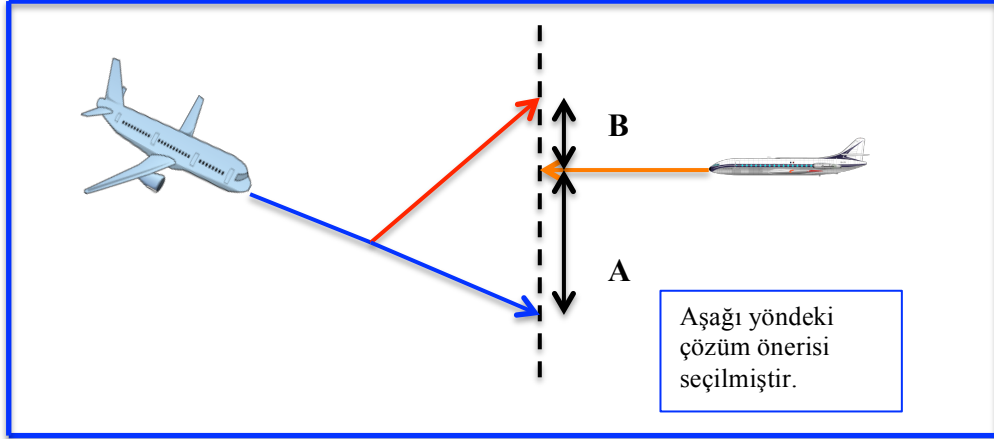
Şekil 2.8. RA duyarlılık seçimi [23]

Çözüm önerisi üretme işlemi yapılırken TCAS sistemi hangi yönde olan çözüm önerisinin daha fazla ayırma yapacağını belirler. Bu işlem sırasında yörüngelerin kesiştiği durumdan mümkün oldukça kaçınmak istenmektedir.



Şekil 2.9. Yörünge kesişmesi olmayan durum [23]

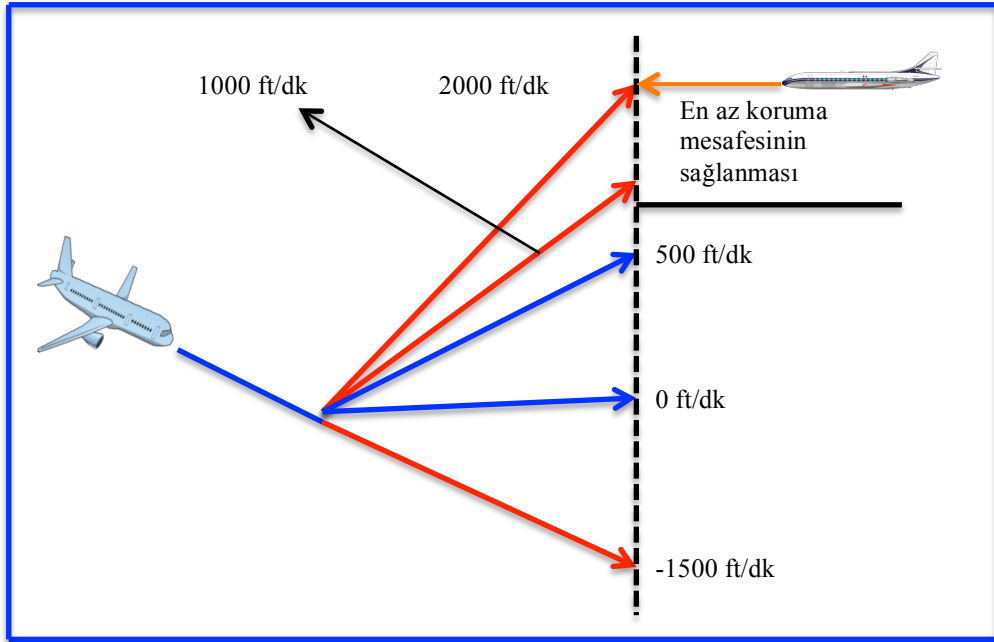
Yörüngelerin kesişmediği durumda gerekli olan ayırma miktarı sağlanmazsa, yörüngelerin kesiştiği çözüm önerisi de seçilebilir. Bu durum Şekil 2.11’de gösterilmiştir. Çözüm önerileri seçiminde daha önce TCAS algoritmasında belirlenen dikey emniyet mesafeleri dikkate alınır. Bu mesafeler irtifaya bağlı olarak 300 feet ile 700 feet arasında değişmektedir. Uçakların ayırma işlemlerinin sonunda aralarındaki irtifa farklarının yukarıda belirtilen değerlerin üzerinde veya en az onlara eşit olması istenmektedir [23].



Şekil 2.10. Yörünge kesişmesi olan durum [23]

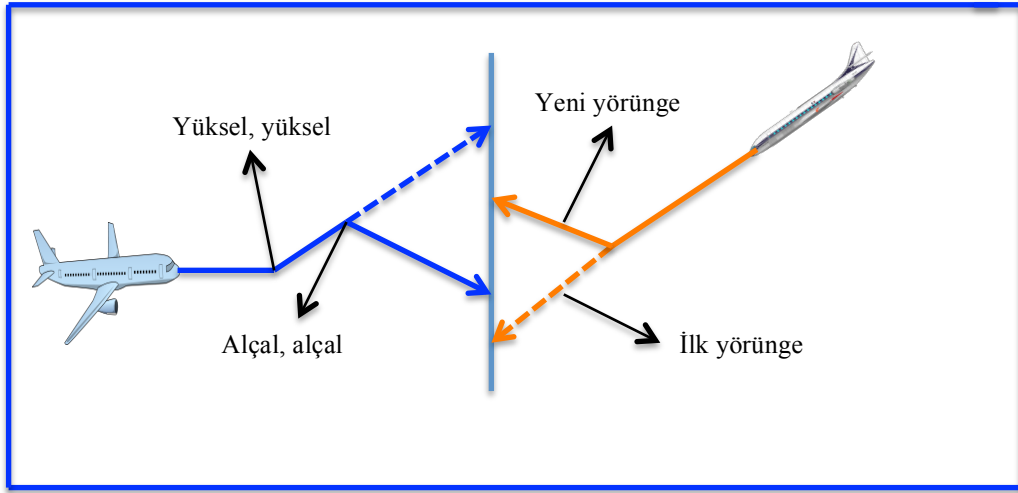
### 2.3.2. Şiddet seçimi

Duyarlılık seçimi işlemi tamamladıktan sonra çözüm önerisinin hangi hızla işleme konulacağına karar verildiği şiddet seçimi basamağına geçilir. Bu basamakta uçakların hız değerlerinin -1500 feet/dk. ile +2000 feet/dk. Değerleri arasında değiştiği gözlemlenmektedir.



Şekil 2.11. RA şiddet seçimi [23]

Şiddet seçimi yapıldıktan ve çözüm önerisi iletildikten sonra TCAS sistemi uçakların hareketlerini izlemeye devam etmektedir. Uçaklardan birisinin verilen çözüm önerisine uymadığı durumlarda TCAS hemen yeni bir çözüm önerisi üretir. Bu öneri uçakların kokpitlerine ulaştırılır ve çarpışmadan kurtulmaları için ikinci bir komut verilir. Bu çözüm önerisinin başarılı bir şekilde sonuçlanması için kokpit ekiplerinin uyarıya hemen gerekli tepkiyi vermesi gerekmektedir [23].



Şekil 2.12. Yeniden verilen farklı çözüm önerisi [23]

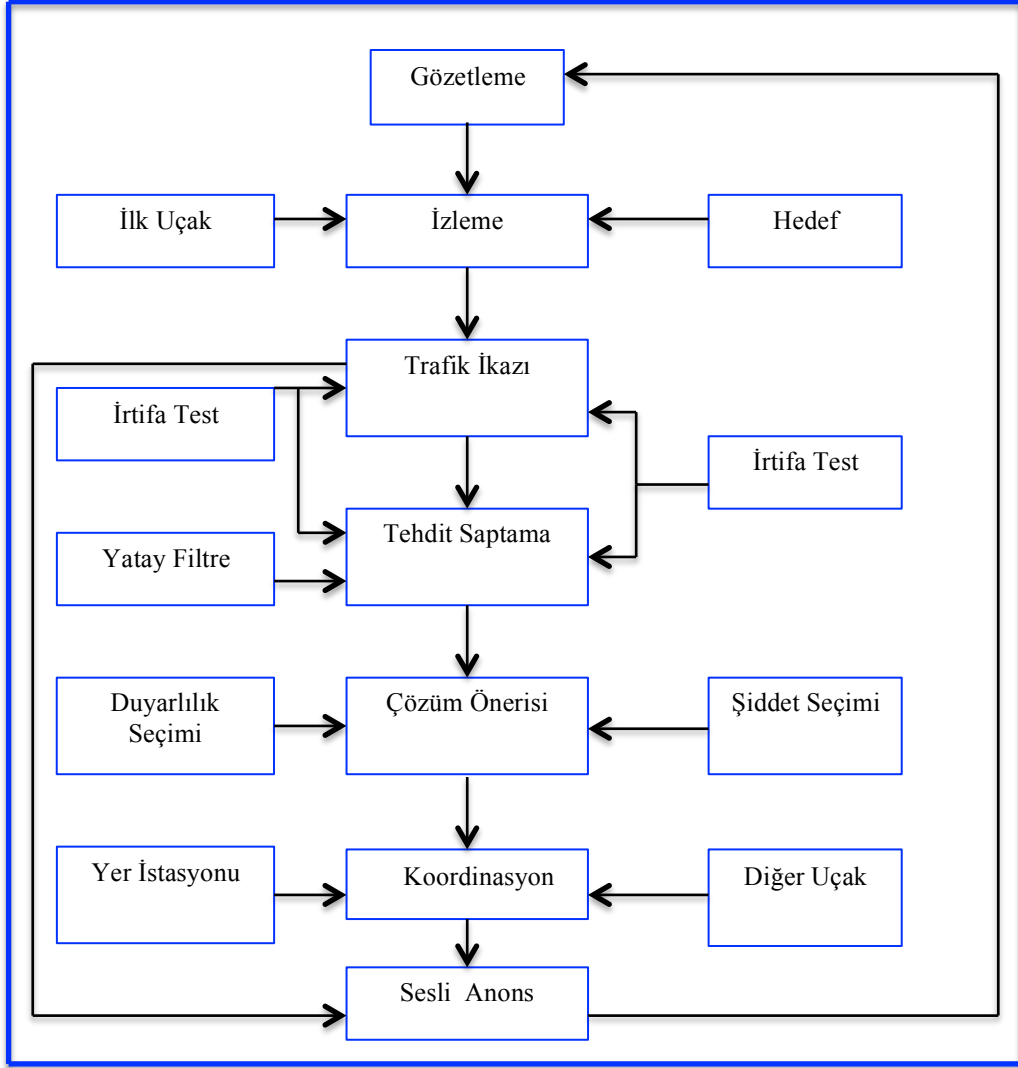
### **3. ÇARPIŞMA İHTİMALİ BELİRLEME**

Uçak çarpışma ihtimali kavramı, iki uçak arasında korunması gereken minimum ayırma mesafesinin ihlal edilmesiyle ortaya çıkan durumdur. Çarpışma ihtimalinin belirlenebilmesi için uçakların sahip oldukları konumları ve hızları bilinmelidir ve uçaklar arasındaki mesafe ve irtifa farkı düzenli olarak hesaplanmalıdır. Çarpışma ihtimalinin önceden belirlenmesi ile birlikte uçaklar çözüm önerisi alırlar ve uçuşlarına emniyetli bir şekilde devam ederler.

#### **3.1. Çarpışma İhtimali Kavramı**

Uçaklar arasındaki çarpışma ihtimali kavramının iyi bir şekilde anlaşılması için çalışmanın bir önceki bölümünde anlatılan bilgilerin iyi anlaşılması çok önemlidir. Bu çalışmada çarpışma olasılığı kavramı, “iki uçak arasındaki en az ayırma değerinin korunamadığında oluşan durum (loss of separation)” olarak adlandırılır. Başka bir ifadeyle uçaklar arasındaki korunması gereken ayırma mesafesinin herhangi bir uçak tarafından ihlal edilmesi sonucunda ortaya çıkan durum olarak da düşünülebilir.

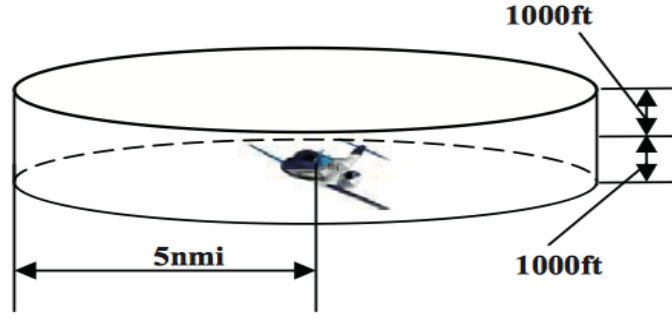
Uluslararası kabullere göre seyir aşamasında uçaklar arası yatay ayırma mesafesi 5 deniz mili ve dikey ayırma mesafesi 1000 feet olarak belirlenmiştir [19]. Belirtilen rakamların oluşturduğu koruma alanı herhangi bir nedenle ihlal edildiği zaman sistem otomatik olarak uyarı ikazları verecektir. Verilen rakamlar bu alanda yapılan çalışmalarda yaygın olarak kullanılan rakamlardır [23]. Fakat bu verilen bu rakamlar uçakların irtifalarına göre değişebilmektedir.



Şekil 3.1. Uçak çarpışma ihtimali belirme ve çözüm öneri işlemi [23]

### 3.2. En Yakın Nokta Yaklaşımı

Günümüze kadar tasarlanan uçak çarpışma önleyici sistem algoritmalarını anlamak için En Yakın Nokta Yaklaşımının (Points of Closest Approach) iyi anlaşılması gerekmektedir [27]. Bu yaklaşıma göre, iki uçak arasında kalan en kısa mesafe en yakın nokta olarak adlandırılır. Uçakların etrafında olan koruma alanı silindirik bir şekil olarak ortaya çıkmaktadır. Uçaklar arasında korunması gereken yatay ve dikey mesafeler sırasıyla silindirin yarıçapını ve yüksekliğini oluşturur [28]. Şekil 3.2’de bu alan gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Serbest uçuş koruma alanı [28]

TCAS işlemcisi uçaklardan aldığı konum bilgilerine göre uçaklar arasında kalan mesafenin hesaplamalarını yapar. Hesaplamalar sonucunda ortaya çıkan durum değerlendirilir. Herhangi bir tehdit algısı bulunduğu zaman işlemci hemen çözüm önerisini üretmeye başlar. Üretilen çözüm önerileri eş zamanlı olarak uçaklara iletilir.

Bu işlemler yapılırken sistem çalışması mükemmel en yakın noktadadır. Sistemin hatalı ikazlar üretmesi kabin ekibi ve yolcuların rahatsız olabileceği manevralara neden olabilecektir.

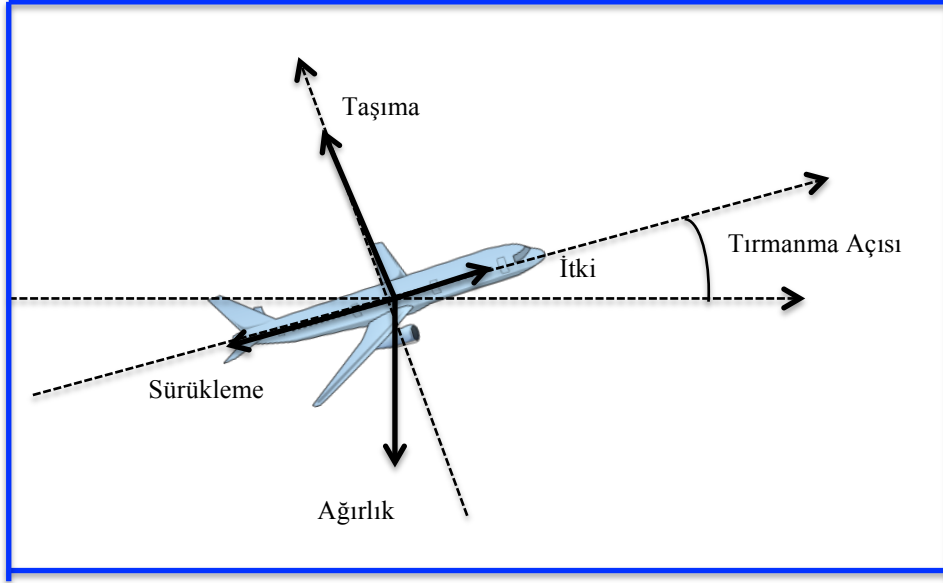
### 3.3. Sistem Modelleme

Yapılan bu çalışmada, uçaklar arasında muhtemel bir çarpışma ihtimalinin belirlenmesi ve çözüm üretiminin oluşturulması aşamasında gerçekçi ve verimli bir sistem tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Bu nedenden dolayı sistem modellemesi sürecinde dinamik bir sistem modellemesi tercih edilmiştir.

Sivil havacılık uygulamalarında çok yaygın olarak kullanılan Kütle Merkezi (Point of Mass) modeli bu çalışmada kullanılmak üzere seçilmiştir. Bu yöntem sayesinde uçuş sırasında oluşan kuvvetlerin neredeyse tamamı hesaplamalarda kullanılmaktadır [24].

Bu konu hakkında yapılan çalışmalarda kütle merkezi modelleme yöntemi toplam enerji modeli olarak da adlandırılmaktadır. Şekil 3.3'de kütle merkezi prensibine göre uçak üzerine etkiyen kuvvetler gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi kuvvetlerin uçağın kütle merkezine etki yaptığı

kabul edilmektedir [25]. Kütle merkezi modelleme yöntemi yardımıyla yörünge tahmini kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu sayede uçaklar arası çarpışma ihtimali saptanır ve çözüm önerisi üretilir.



Şekil 3.3. Basit kütle merkezi modeli ve uçak üzerine etki eden kuvvetler [25]

Tasarlanan algoritmanın geniş bir mesafede etkili bir şekilde çalışması hedeflenmiştir. Kütle merkezi modelinde kullanılan uçak kinematik denklemleri (3.1-3.6)'da belirtilmiştir [24]. Uçak hareketleri, uçak kinematik denklemlerin yardımıyla gösterilmiştir.

$$\dot{V}_i = \frac{T_i - D_i}{m_i} - g \sin \gamma_i \quad (3.1)$$

$$\dot{\gamma}_i = \frac{g}{V_i} (n \cos \phi_i - \cos \gamma_i) \quad (3.2)$$

$$\dot{\psi}_i = \frac{g}{V_i} \frac{n \sin \phi_i}{\cos \gamma_i} \quad (3.3)$$

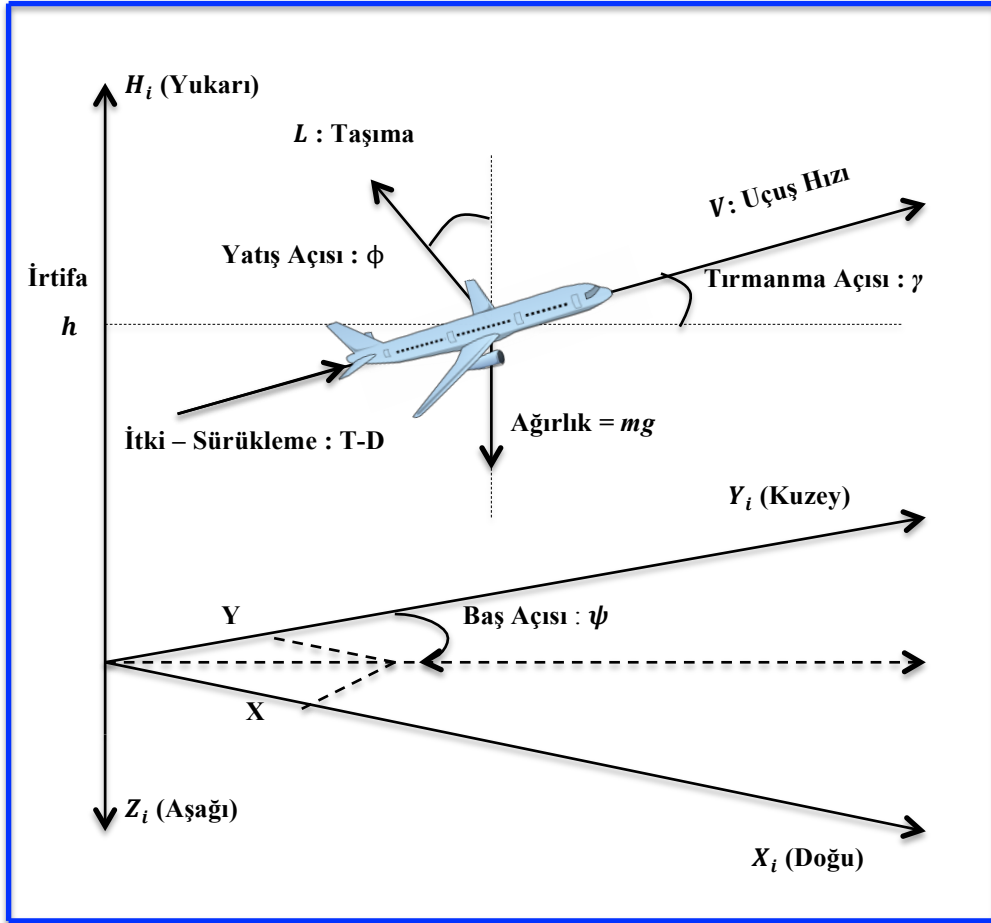
$$\dot{x}_i = V_i \cos \gamma_i \sin \psi_i \quad (3.4)$$

$$\dot{y}_i = V_i \cos \gamma_i \cos \psi_i \quad (3.5)$$

$$\dot{z}_i = V_i \sin \gamma_i \quad (3.6)$$

Denklemler (3.1-3.6)'da kullanılan  $i$  işlem yapılan uçağın numarası,  $T$  uçak motor itkisi,  $D$  uçak sürüklenme kuvveti,  $V$  uçuş hızı,  $m$  uçak kütlesi,  $g$  yer çekimi ivmesi,  $\gamma$  tırmanma açısı,  $L$  uçak taşıma kuvveti,  $\phi$  yatış açısı,  $\psi$  uçak baş açısı,  $n$  yük faktörü,  $\dot{x}_i$  x-y düzlemindeki ilerleme hızının doğru bileşeni,  $\dot{y}_i$  x-y

düzlemindeki ilerleme hızının kuzey bileşeni,  $\dot{z}_i$  uçağın düşey hızıdır. Şekil 3.4'te bu değerlerin uçak üzerinde yerleri gösterilmiştir[26].



Şekil 3.4. Uçak koordinat sistemi [26]

Hava aracı ayırmalarında kullanılan bir başka yöntem ise dönüş hareketidir. Denklem (3.7)'de ifade edilen  $\dot{\psi}_i$  değeri sabit yatış açısı için baş açısındaki değişimi gösterir. Denklem (3.8)'de ifade edilen  $R_i$  değeri uçak için dönüş yarı çapı değerini vermektedir. Denklem (3.10)'da ifade edilen  $\Delta\psi_i$  değerinin hesaplanabilmesi için denklem (3.9)'un iyi anlaşılması gerekmektedir. Denklem (3.9)'de verilen integral işleminin sonucunda denklem (3.10) elde edilir. Denklem (3.10)'da, kullanılan başlangıç değeri ( $t_{ilk}$ ) 0 kabul edilmektedir. Bu kabul neticesinde denklem (3.11) elde edilir.  $\Delta\psi_i$  değeri  $t$  süre sonundaki uçağın baş açısındaki değişimini gösterir [5].

$$\dot{\psi}_i = \frac{g \tan \phi_i}{V_i} \quad (3.7)$$

$$R_i = \frac{V_i^2}{g \tan \phi_i} \quad (3.8)$$

$$\int_{\psi_{ilk}}^{\psi_{son}} \Delta\psi_i = \int_{t_{ilk}}^{t_{son}} \frac{g \tan \phi_i}{V_i} dt \quad (3.9)$$

$$\Delta\psi_i = \frac{g \tan \phi_i}{V_i} (t_{son} - t_{ilk}) \quad (3.10)$$

$$\Delta\psi_i = \frac{t \cdot g \tan \phi}{V_i} \quad (3.11)$$

Denklemler (3.8-3.11)'deki ifadelerin yardımıyla oluşturulan denklem (3.17) sayesinde uçağın pozisyon bilgisi bulunur [5]. Şekil 3.5'de gösterilen  $\vec{R}_{Ci}$  değeri uçağın bulunduğu noktadan dönüş hareketinin merkezine uzanan vektörün uzunluğudur.  $C_i$  dönüş hareketinin merkezidir.  $\vec{R}_{\Delta\psi_i}$  değeri uçuş hareketinin tamamlanmasından sonra dönüş hareketinin merkezinden uçağa doğru uzanan vektörün uzunluğudur.  $\vec{P}_0(X_0, Y_0)$  uçağın başlangıç değerlerinin ifade edildiği pozisyonun vektörüdür.  $\vec{P}(X_i, Y_i)$  uçağın pozisyonunu ifade eder. Uçak pozisyon bilgisinin vektörler yardımıyla hesaplanması denklem (3.12)'de belirtilmiştir.

$$\vec{P} = \vec{P}_0 + \vec{R}_{Ci} + \vec{R}_{\Delta\psi_i} \quad (3.12)$$

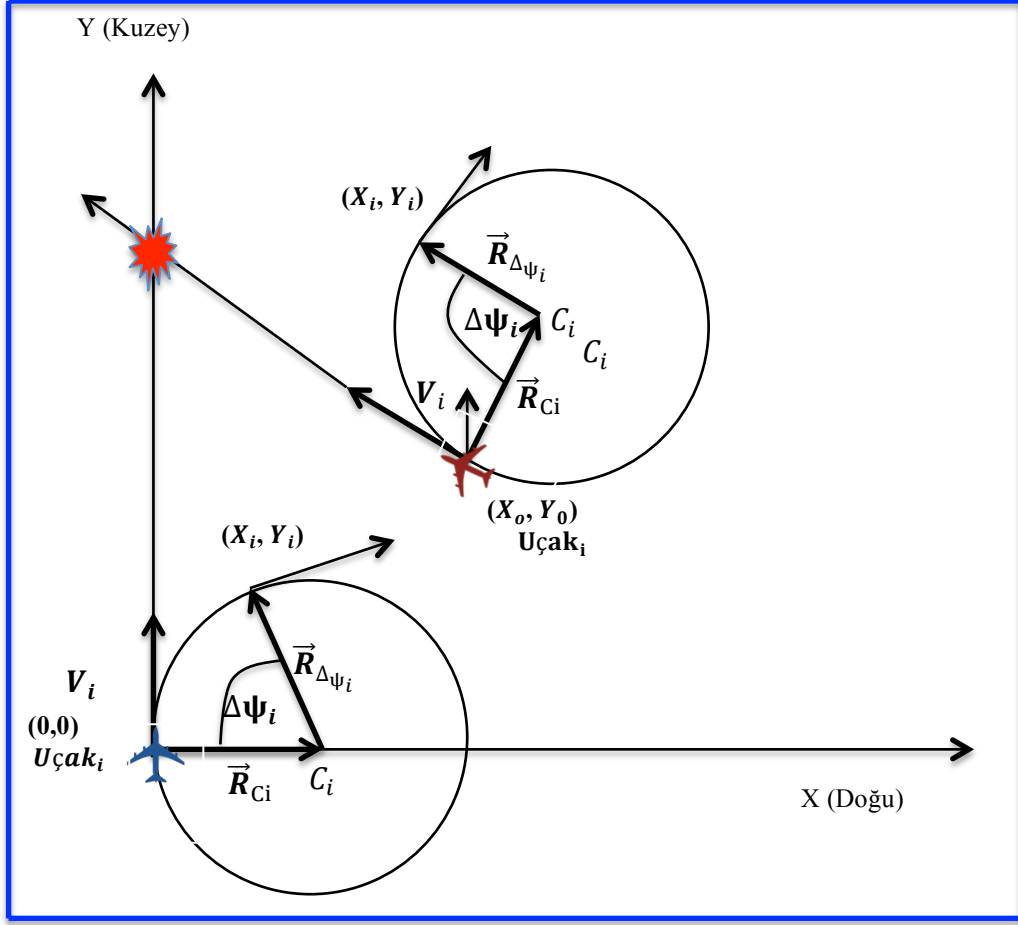
Denklem (3.12) verilen bilgilerin daha iyi anlaşılması için açı dönüşüm formüllerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu denklemler (3.13-3.16)'da belirtilmiştir.

$$\sin(a + b) = \sin a \cdot \cos b + \cos a \cdot \sin b \quad (3.13)$$

$$\sin(a - b) = \sin a \cdot \cos b - \cos a \cdot \sin b \quad (3.14)$$

$$\cos(a + b) = \cos a \cdot \cos b - \sin a \cdot \sin b \quad (3.15)$$

$$\cos(a - b) = \cos a \cdot \cos b + \sin a \cdot \sin b \quad (3.16)$$



Şekil 3.5. Koordinat sistemi ve çözüm önerisi parametreleri [5]

$$\begin{aligned} \vec{P} &= [X_0 + R_i \cdot \text{sgn}(\Delta\psi_i) \cdot \cos \psi_i - R_i \cdot \text{sgn}(\Delta\psi_i) \cdot \cos(\psi_i + \Delta\psi_i), \\ &Y_0 - R_i \cdot \text{sgn}(\Delta\psi_i) \cdot \sin \psi_i + R_i \cdot \text{sgn}(\Delta\psi_i) \cdot \sin(\psi_i + \Delta\psi_i)] \quad (3.17) \\ &\equiv [X_i, Y_i] \end{aligned}$$

### 3.4. Göreceli Hareket Hesaplamaları

Bu çalışmada yapılan hesaplamalar yardımıyla uçaklar arasında gerçekleşebilecek muhtemel bir çarpışmaya kalan zaman bulunmuştur. TCAS sisteminde uçaklar arasındaki muhtemel bir çarpışmaya kalan süre “tau” olarak adlandırılmıştır [9]. Bu kavram “ $\tau$ ” ifadesi ile gösterilmektedir. Bu çalışmada tasarlanan algoritma zaman ve mesafe hesaplamaları üzerine kurulmuştur.

Bu çalışmada **kalın** yazılan harfler vektör olarak kullanılmıştır [9]. Vektörlerin çarpma işlemi (3.18)'e göre gerçekleşmiştir.

$$\vec{s} \cdot \vec{v} = s_x \cdot v_x + s_y \cdot v_y \quad (3.18)$$

Vektör normu için (3.19)'da verilen ifade kullanılmaktadır

$$\|\vec{s}\| = \sqrt{\vec{s} \cdot \vec{s}} \quad (3.19)$$

Çalışma süresince yapılan bütün hesaplamalarda uçakların hızlarının sabit olduğu kabul edilmiştir. Uçaklar için yatay düzlemde buldukları pozisyon bilgisi (3.20) ve (3.21) yardımıyla hesaplanır.

$$\vec{s}_1(t) = \vec{s}_1 + t\vec{v}_1 \quad (3.20)$$

$$\vec{s}_2(t) = \vec{s}_2 + t\vec{v}_2 \quad (3.21)$$

Algoritmanın tasarım aşamasında 1. uçak merkez kabul edilerek bütün hesaplamalar yapılmıştır [9]. Uçaklar arasında kalan mesafe ve göreceli hız bilgisi denklemler (3.22 ve 3.23) yardımıyla hesaplanmıştır [9].

$$\vec{s} = \vec{s}_1 - \vec{s}_2 \quad (3.22)$$

$$\vec{v} = \vec{v}_1 - \vec{v}_2 \quad (3.23)$$

Uçaklar arasında kalan mesafe denklemler (3.22 ve 3.23) yardımıyla elde edilmiş olan denklem (3.24) yardımıyla hesaplanabilir [9].

$$\vec{s}(t) = \vec{s} + t\vec{v} \quad (3.24)$$

İkisi de sabit hızlı olan uçaklar arasındaki mesafenin herhangi bir andaki değeri denklem (3.25) yardımıyla hesaplanır.

$$r(t) \equiv \|\vec{s}(t)\| = \sqrt{\|\vec{s}\|^2 + 2t\vec{s} \cdot \vec{v} + t^2 \cdot \|\vec{v}\|^2} \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'e benzer olarak uçaklar arasındaki yatay mesafe denklem (3.26) yardımıyla da bulunabilir [9].

$$r(t) = \sqrt{(s_{1x} - s_{2x})^2 + (s_{1y} - s_{2y})^2} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'da verilen değerler sırasıyla  $s_{1x}$  1. uçağın x koordinat üzerinde bulunduğu pozisyon,  $s_{2x}$  2. uçağın x koordinat üzerinde bulunduğu pozisyon,  $s_{1y}$  1. uçağın y koordinat üzerinde bulunduğu pozisyon ve  $s_{2y}$  2. uçağın y koordinat üzerinde bulunduğu pozisyonudur. Yatay düzlemde uçaklar arasında kalan zaman  $t_{cpa}$  değeri olarak adlandırılır. İki uçak arasında kalan zaman denklem (3.27) kullanılarak hesaplanır [9].

$$t_{cpa}(\vec{s}, \vec{v}) = \frac{\vec{s} \cdot \vec{v}}{\|\vec{v}\|^2} \quad (3.27)$$

Uçaklar arasında olan minimum ayırma mesafesi denklem (3.28)'un yardımıyla hesaplanır. Bu denklemde  $s_x$  uçakların arasında bulunan mesafenin  $x$  koordinat düzlemi üzerindeki bileşenini,  $s_y$  uçakların arasında bulunan mesafenin  $y$  koordinat düzlemi üzerindeki bileşenini,  $V_x$  uçakların  $x$  koordinat düzlemi üzerindeki hızlarının farkını,  $V_y$  uçakların  $y$  koordinat düzlemi üzerindeki hızlarının farkını ifade eder.

$$d_{min} = \sqrt{\left((s_x) - V_x(t_{cpa})\right)^2 + \left((s_y) - V_y(t_{cpa})\right)^2} \quad (3.28)$$

Uçakların yatayda birbirlerine yaklaşmasının ya da birbirlerinden uzaklaşmasının belirlenmesi için  $\vec{s} \cdot \vec{v}$  işleminin sonucuna bakılır. Eğer sonuç  $\vec{s} \cdot \vec{v} > 0$  ise uçaklar yatay ekseninde birbirlerinden uzaklaşıyor. Eğer  $\vec{s} \cdot \vec{v} < 0$  ise uçaklar birbirlerine yaklaşıyor demektir [9].

Uçakların dikeyde birbirlerine yaklaşmasının ya da birbirlerinden uzaklaşmasının bilgisine ulaşabilmek için  $s_z v_z$  işleminin sonucuna bakılması gerekmektedir. Eğer sonuç  $s_z v_z > 0$  ise uçaklar dikey ekseninde birbirlerinden uzaklaşıyor. Eğer sonuç  $s_z v_z < 0$  ise uçaklar dikey ekseninde birbirlerine yaklaşıyor [9].

Dikey ekseninde hesaplamalar yapılırken sabit hızlı bir uçuşta uçaklar arasında bulunan mesafe ve göreceli hız değerleri (3.29) ve (3.30) yardımıyla bulunabilir.

$$s_z = s_{1z} - s_{2z} \quad (3.29)$$

$$v_z = v_{1z} - v_{2z} \quad (3.30)$$

Denklemler (3.29) ve (3.30) yardımıyla hesaplanan göreceli hız ve pozisyon bilgileri kullanılarak iki uçak arasında muhtemel bir çarpışmaya kalan zaman denklem (3.31) yardımıyla hesaplanır [9]. Çalışma içerisinde dikey ekseninde kalan zaman  $t_{coa}$  olarak adlandırılmıştır.

$$t_{coa} = \frac{s_z}{v_z} \quad (3.31)$$

Yatay ve dikey eksenlerde uçaklar arasında kalan mesafe ve zamanın sorgulanması yapılırken mesafe değerinin, minimum korunması gereken mesafenin altında olduğu saptandığı zaman veya uçakların hem birbirlerine

yaklaşık hem de hesaplanan çarpışma noktasına gelmesine 5 Nmi kaldığı zaman kokpite sesli ve yazılı olarak “Dikkat Trafik (Traffic Alert)” anonsu yapılır [9].

Yatay ve dikey eksenlerde sorgulama yapılırken uçaklar arası mesafenin korunması gereken değerin altına düştüğü analiz edildiği zaman veya uçakların birbirlerine yaklaşarak hem de hesaplanan çarpışma noktasına gelmesine 2 Nmi kaldığı zaman uçaklar çözüm önerisi alırlar [9].

## 4. UÇAK ÇARPIŞMA ÇÖZÜMÜ

Uçak çarpışma ihtimali belirleme bölümü ve uçak çarpışma çözümü bölümü birbirleri ile uyumlu olan basamaklardır. Uçaklar arasındaki korunması gereken minimum ayırma mesafesinin ihlal edildiği zaman ortaya çıkan uçak çarpışma ihtimali vakit geçirmeksizin ortadan kaldırılmalıdır. Bu olayın başarılı bir şekilde gerçekleşmesi için tehlike uyarısı geldiği zaman uçakların sahip olduğu konum bilgileri çok önemlidir. Uçak çarpışma ihtimali belirleme bölümünde elde edilen veriler ve yapılan hesaplamalar çözüm algoritmasının belirlenmesinde en önemli basamağı oluşturur. Öncelikle hesaplanan değerler uçaklar için hangi manevranın daha çok ayırma vereceği konusunda işleme tabi tutulur. Yapılan bu işlem sayesinde hangi ayırmanın daha etkili olacağı belirlenir.

Çözüm önerisinin belirlenmesi sırasında uçakların buldukları konumları, sahip oldukları hızları, baş açıları, çarpışmaya kalan mesafe, aralarındaki minimum ayırma mesafesi ve Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonunun 2. Ekinde (Annex 2 - Havacılık Kuralları) yer alan kriterler çözüm önerisinin şekillenmesinde büyük rol oynamaktadır.

### 4.1. Annex 2 Uçak Ayırma Kuralları

Annex 2’de verilen kurallar uçakların birbirleri ile karşılaşacakları durumlara göre belirlenmiştir. Bu durumlar; uçakların birbirlerine aksi yönlerden karşılıklı olarak yaklaşması, uçakların yörüngelerinin kesişmesi ve uçaklardan birinin arkadan gelip diğerini geçmek istediği durumlardır. Her bir durum için yol hakkı uygulaması farklıdır.

#### 4.1.1. Yol hakkı

Yol hakkına sahip olan uçak, yörüngesini ve süratini muhafaza edecektir. Ancak; bu kaide hiçbir zaman pilotun, bir çarpışmayı en iyi şekilde önlemek için, tedbir alma sorumluluğunu ortadan kaldırmaz. Aşağıda belirtilen kurallar gereği, diğer uçağa yol verecek uçak, arada yeterli mesafe bulunmadıkça diğerinin

üzerinden veya altından geçmekten veya önünden yolunu kat edecek şekilde geçmekten sakınacaktır [33].

a) Uçakların birbirlerini geçmesi

İki uçaktan biri diğerini aynı irtifada geçmek isterse geçilecek olan uçak hızını ve yörüngesini koruyarak uçuşuna devam eder ve diğer uçağı geçecek olan uçak kendi sağına doğru dönüş hareketi ile manevra yapar [33].

b) Yörüngelerin kesişmesi durumu

İki uçak yaklaşık aynı irtifada birbirlerine doğru yaklaşırken diğerini sağında gören uçak yol verecektir [33].

c) Aksi yönlerden karşılıklı yaklaşma

İki uçak aksi istikametlerden birbirine karşılıklı olarak yaklaşırken veya yaklaşık buna yakın bir durumda iken ve çarpışma tehlikesi bulunması halinde, her iki uçak da kendi sağına doğru dönüş hareketi yaparak diğerine yol verecektir [33].

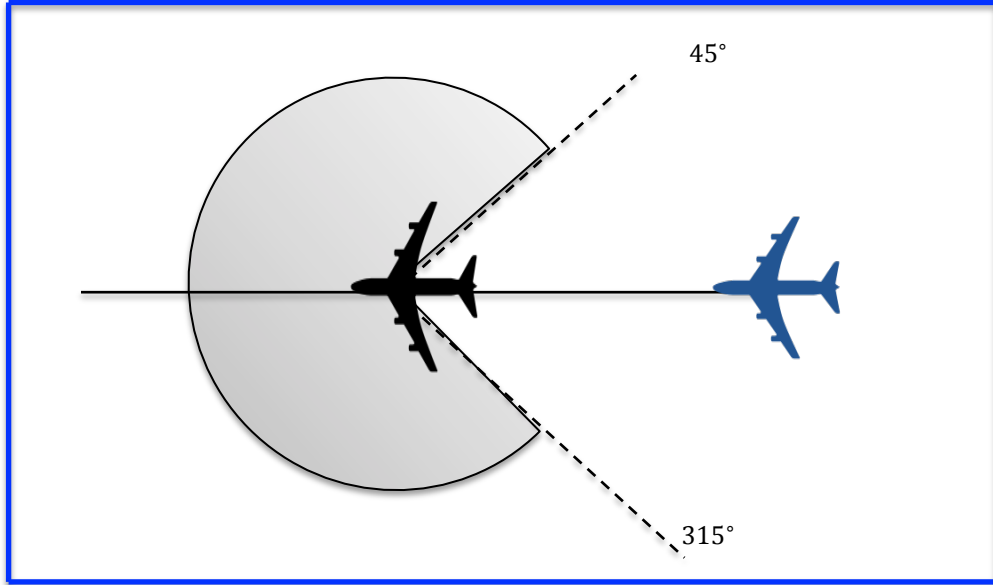
#### **4.2.Yatay Eksen Çözüm Önerisi**

Yatay ekseninde yapılan çözüm önerilerinde, uçakların hızları, baş açıları ve yatış açıları dikkate alınarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler kullanılır. Uçakların minimum ayırma mesafesine gelene kadar geçirdikleri süre Erzberger ve Heere'nin [5] yapmış olduğu, kısa mesafeli çarpışma ihtimallerinin çözümü konulu çalışmalarında hesaplamış oldukları bir değerdir ve bu değer çok yüksek olmaması istenmektedir. Bu çalışmada da minimum ayırma mesafesine gelene kadar geçen süre hesaplanmış ve grafiklerde gösterilmiştir. Yatay eksenindeki minimum ayırma mesafesi 5 Nmi olarak kabul edilmiştir [19].

Yatay ekseninde öncelikle tek uçağın manevra yapması ve diğer uçağın yoluna devam etmesi istenmektedir. Tek uçağın manevra yaptığı bazı durumlarda minimum ayırma mesafesi ihlal edilebilmektedir. Böyle durumlarda çözüm önerisi olarak iki uçağın da dönüş hareketi yaptığı manevralar tercih edilir. Bütün manevra çeşitleri uygulandıktan sonra hiçbir manevra çarpışma ihtimalini ortadan

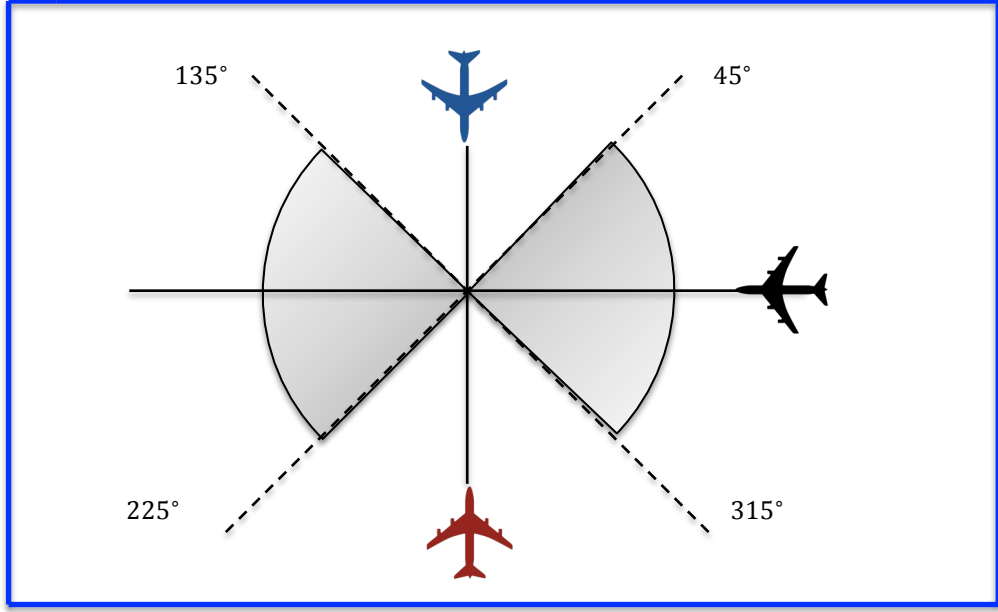
kaldırıyor ise manevralardan en çok ayırma veren durum çözüm önerisi olarak seçilir. Uçakların yatay ekseninde çözüm önerisini aldıkları zaman tırmanma açıları  $0^\circ$  kabul edilmiştir.

Yatay ekseninde yapılacak ayırmalar için uygun olan durumlardan biri uçakların aynı yörüngede olup birbirlerini takip ettikleri durumdur. Şekil 4.1’de uçakların aynı yörüngede olduğu durum gösterilmiştir [32]. Ayırma işleminin nasıl belirleneceğine bütün manevraların hesaplanması ve Annex 2’de yazılı olan kuralların değerlendirilmesi sonucunda karar verilecektir. Bu durumda arkadaki uçak önde olan diğer uçağı geçmek istediğı zaman kendi sağına doğru dönerek uçuşuna devam ederken önde olan uçak ise hızını ve yörüngesini değıştirmeden uçuşuna devam eder.



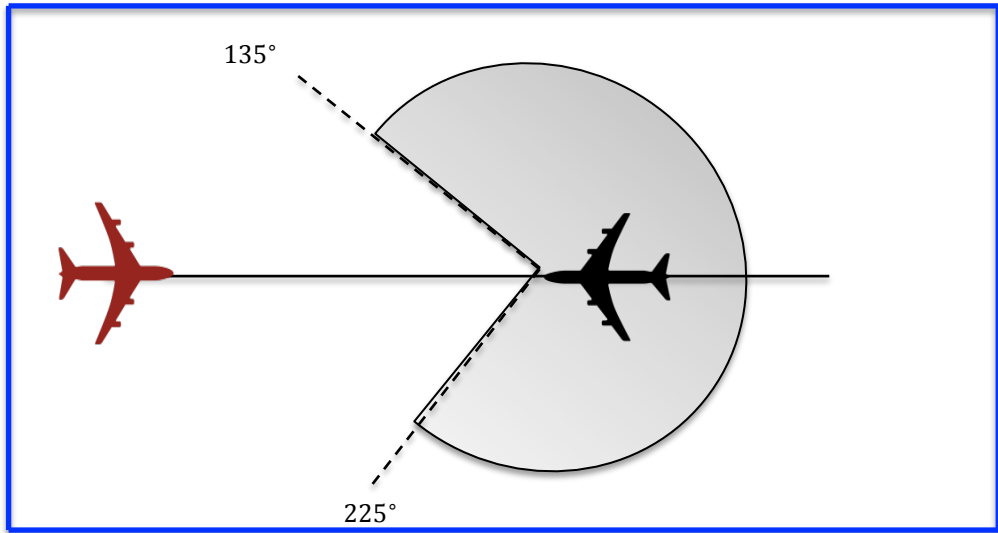
**Şekil 4.1.** Uçaklar aynı yörüngede

Başka bir uygun durum ise uçakların yörüngelerinin kesişmesi sonucu ortaya çıkan durumdur [32]. Şekil 4.2’de uçakların yörüngelerinin kesiştiğı durum gösterilmiştir. Bu durumda uçaklardan hangisi diğeri sağ tarafında görür ise o uçak yol vermek zorundadır. Sağ tarafta kalan uçak hızını ve yörüngesini değıştirmeden yoluna devam eder. Dönüş yapan uçak en uygun yatış açısını seçerek uçuşuna devam eder.



**Şekil 4.2.** Uçakların yörüngelerinin kesişmesi durumu

Yatay ekseninde ayırma yapılmasına uygun olan son durum ise uçakların karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştığı durumdur [32]. Şekil 4.3’de uçakların karşılıklı olduğu durum gösterilmiştir. Bu durumda, her iki uçak kendi sağına dönüş yaparak yollarına devam eder.



**Şekil 4.3.** Uçakların birbirlerine karşılıklı olarak yaklaşmaları

### 4.3. Dikey Eksen Çözüm Önerisi

Dikey eksen de yapılan çözüm önerilerinde, uçakların hızları, baş açıları, çarpışmaya kalan mesafe, uçakların yükselme zamanları, 1000 feet dikey ayırmanın ne kadar bir süre içinde gerçekleştiği ve ilk 400 feet irtifa farkında aralarında kalan minimum ayırma mesafesi çözüm önerisinin seçiminde kullanılmaktadır. TCAS'ın uçaklar arasındaki çözüm uyarısını vermeye başladığı zaman 400 feet göreceli irtifanın altına düştüğü durumlardır. Seçilecek olan çözüm önerisinin başka bir çarpışma ihtimali oluşturmaması için çalışmada ilk 400 feet boyunca uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesi hesaplanmıştır. Eğer bu mesafenin 2 Nmi değerinin altında olduğu belirlenir ise bu durum çözüm önerisi olarak değerlendirilemez. Uçakların başlangıç durumlarında verilen hızları gerçek hava hızlarıdır. Bu çalışmada uçakların dikey eksenindeki pozisyonlarının 10.000 feet ve üzeri olduğu kabul edilmiştir.

## 5. SİMÜLASYON VE SONUÇLAR

Uçaklar arasındaki çarpışma olasılığı hesaplamalarını yapmak ve uygulanan çözüm önerilerinin test edilmesi için birçok yazılım programı vardır. Bu programlara MATLAB, C ve C++ yazılımları örnek olarak verilebilir. Bu çalışmada algoritmanın test edilmesi için MATLAB programı seçilmiştir. MATLAB programının seçilmesinin birçok avantajı vardır:

- Matematiksel hesaplamaların kolaylıkla yapılabilmesi,
- Nesne tabanlı programlama kavramına uygun olması,
- Geniş bir kullanım alanına sahip olan araç kutusu (toolbox) çeşitleri,
- Programlama dilinin sade ve anlaşılabilir olması,
- Program çalıştırma sırasında istenilen yere kadar algoritmanın test edilebilmesi,
- Ortaya çıkan grafiklerin detaylı olarak incelenebilmesi,
- Grafiklerin anlaşılır olması,
- Aynı anda birden fazla grafiğin birlikte çizilerek sonuçların daha açık olması
- Daha önce yapılan benzer çalışmalarda kullanılmış olması

Yukarıda belirtilen sebeplerden dolayı çalışmanın test edilmesi için MATLAB programı seçilmiştir.

Bu çalışmada tasarlanan uçak çarpışma ihtimali bulma ve çözüm önerisi verme algoritması test edilmiştir. Bu çalışmada “determinist” yöntem olarak adlandırılan yaklaşım kullanılmıştır. Bu yaklaşımda uçakların konum bilgilerinin kesin olarak bilindiği kabul edilir. Bilinen bu konumlara göre uçaklar arası mesafe ve irtifa analizi yapılır. Bu yöntem grafik üzerinde gösterilirken uçakların her bir zaman değerinde bulunacağı yeni konumlarının hesaplanmasında bir nokta yaklaşımı (Euler’s Approximation) kullanılmıştır. Bu yaklaşım yardımıyla uçağın zamana bağlı olarak konum değişikliği detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Dikey eksenindeki ve yatay eksenindeki çalışmalarda aynı başlangıç değerlerine sahip olan uçaklar kullanılmıştır.

## 5.1.Yatay Eksen Çözüm Önerisi Belirleme

Bu bölümde uçakların yatay eksendeki değişik yatış açılarında gerçekleştirmiş oldukları performansları değerlendirilmiştir. Elde edilen performans sonuçları hangi ayırmanın daha etkili olacağı konusunda fikir vermektedir. Uçakların çarpışma ihtimallerinden kurtulmaları için yatay eksen kullandıkları manevralar vardır. Bu manevralar tek uçağın dönüş hareketi yaptığı ya da iki uçağın dönüş hareketi yaptığı hareketlerden meydana gelmektedir. Yatış açıları için 15°, 20°, 25° ve 30° tercih edilmiştir. Seçilen bu açılar uçakların dönüş hareketlerinde tercih edilen yatış açılarıdır. Yatay eksen olan en uygun ayırmanın seçilebilmesi için algoritmanın verdiği çıktılar, baş açısı değişimi, yatış açısı, zaman ve minimum ayırma miktarı iyi değerlendirilmelidir. Bu değerler ve Annex 2’de yer alan bilgilere göre en uygun çözüm önerisi belirlenir.

### 5.1.1 Yörüngelerin kesişmesi durumu

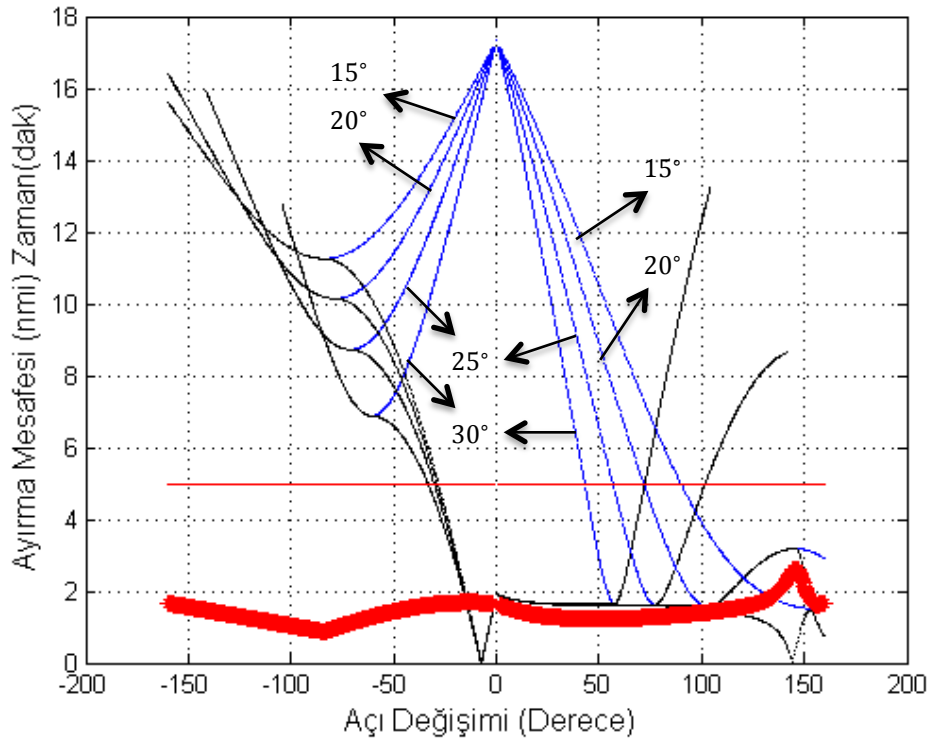
Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği durumlardan biri uçakların yörüngelerinin kesiştiği durumlardır. Bu duruma uygun olarak seçilen uçakların başlangıç değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir [5].

Çizelge 5.1. Uçakların başlangıç değerleri 1 [5]

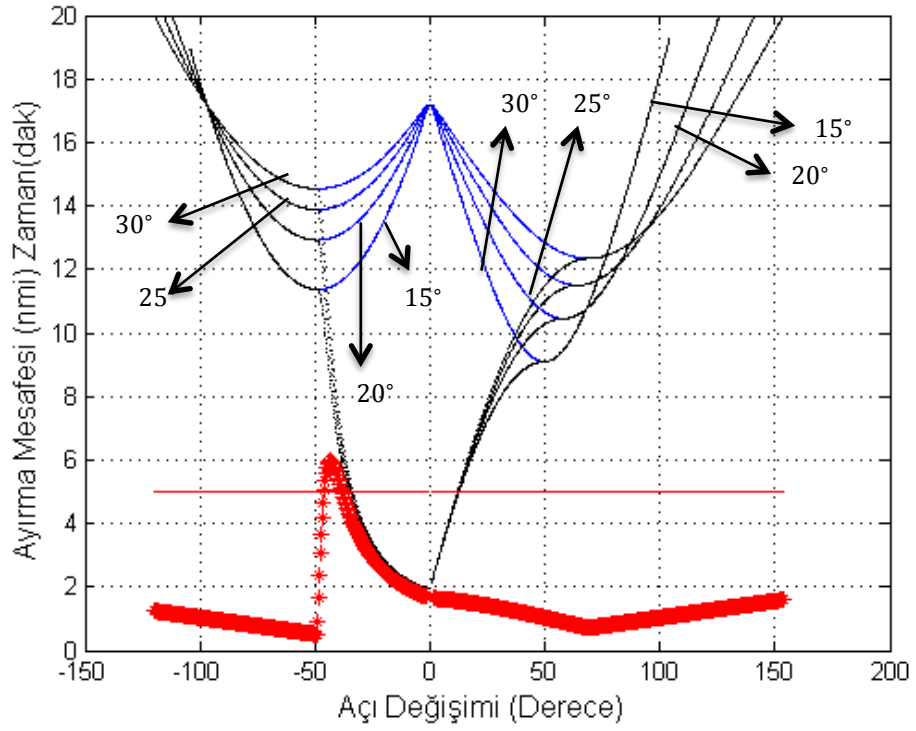
|                         | Uçak A | Uçak B |
|-------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)              | 400    | 480    |
| Baş Açıları (derece)    | 0      | 270    |
| X eksen konumları (Nmi) | 0      | 12     |
| Y eksen konumları (Nmi) | 0      | 12,5   |

Uçaklar arasındaki en uygun ayırmanın nasıl seçileceğine Çizelge 5.1’de verilen başlangıç değerlerine göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilere ve Annex 2’de verilen kurallara göre karar verilmektedir. Çizelge 5.1’de verilen değerler Erzberger ve Heere’nin [5] yapmış olduğu, kısa mesafeli çarpışma ihtimallerinin çözümü konulu çalışmalarından alınmıştır. Bu bölümde, Annex 2’ye göre seçilen çözüm önerisi ile [5]’de seçilen çözüm önerisi

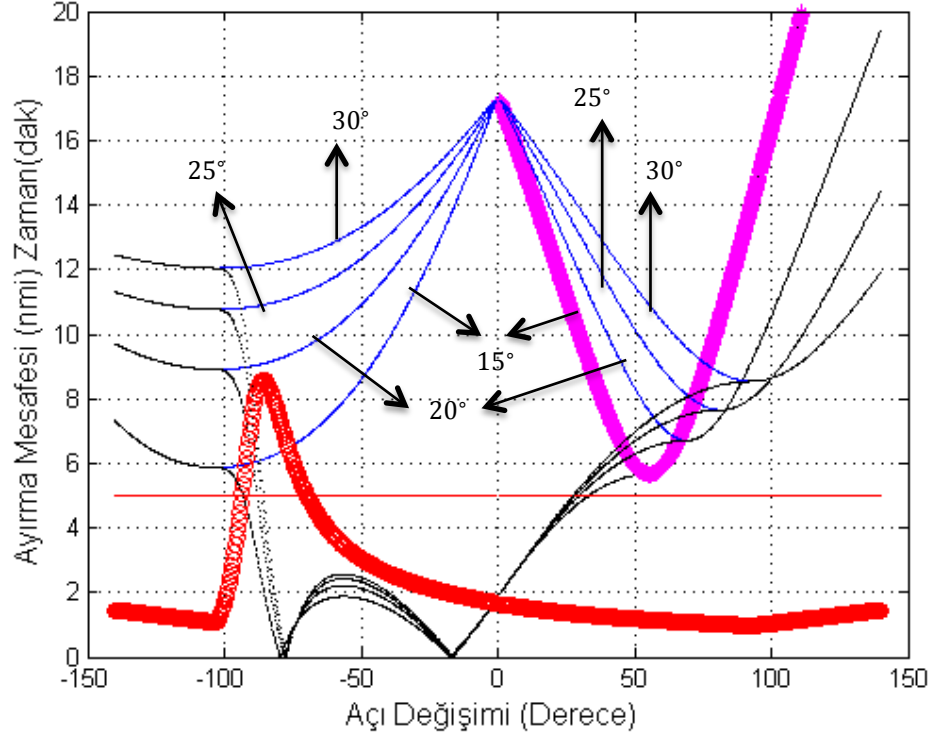
karşılaştırılmıştır. Program çıktıları Şekil 5.1-5.4'de gösterilmiştir. Program çıktıları şekiller üzerinde değişik renklerde gösterilmiştir. Mavi renk, uçaklar arasındaki ayırma mesafesini gösterir. Kırmızı düz çizgi, 5 nmi değerini gösterir. Siyah çizgi, minimum ayırma mesafesini gösterir. Kırmızı kalın çizgi, 30° yatış açısı için minimum ayırma mesafesine kalan zamanı gösterir. Son olarak pembe çizgi, seçilen çözüm önerisini gösterir.



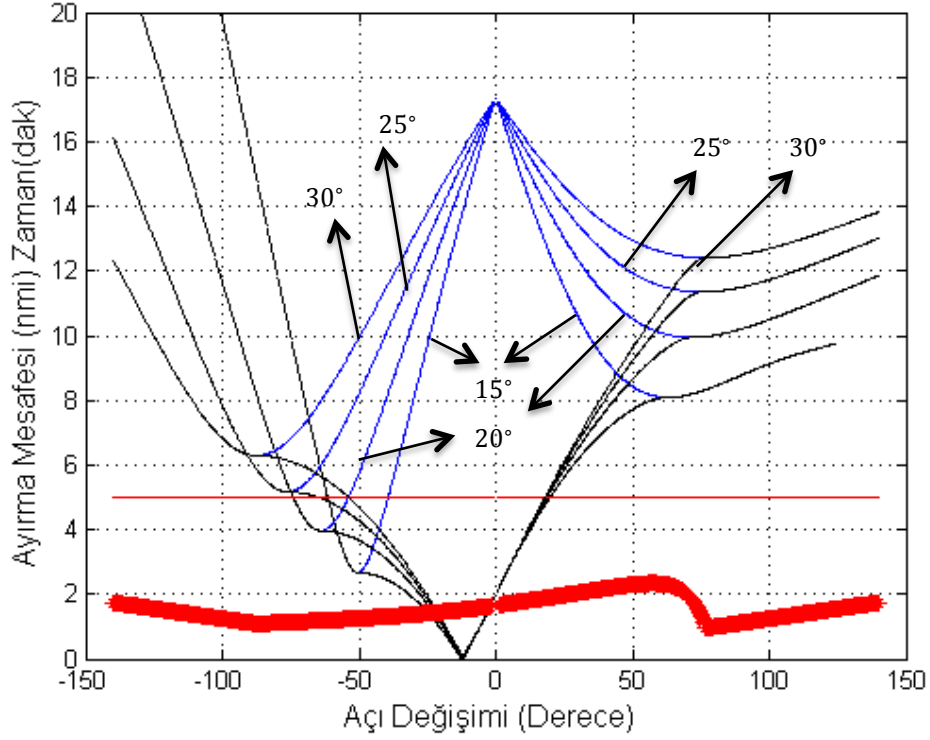
Şekil 5.1. A uçağının sağa/sola döner ve B uçağı sola döner 1



Şekil 5.2. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sağı döner 1



Şekil 5.3. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı düz gider 1



Şekil 5.4. B uçağı sağa/sola döner ve A uçağı düz gider 1

Şekil 5.1 - 5.4'te verilen grafikler yardımıyla her bir grafik için baş açısı değişimini, minimum mesafe değerini ve minimum mesafeye ne kadar zamanın kaldığını gösteren bilgiler çizelgelere aktarılmıştır.

Çizelge 5.2. Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 15° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 63,13                              | 1,69           | 8,09                  |
| A düz B sola                            | 50,72                              | 1,36           | 2,67                  |
| B düz A sola                            | 103,05                             | 2,30           | 5,87                  |
| B düz A sağa                            | 55,54                              | 1,24           | 5,66                  |

Çizelge 5.3. Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 20° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 71,64                              | 1,41           | 9,94                  |
| A düz B sola                            | 64,26                              | 1,27           | 3,96                  |
| B düz A sola                            | 102,76                             | 1,69           | 8,91                  |
| B düz A sağa                            | 69,38                              | 1,14           | 6,70                  |

**Çizelge 5.4.** Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 25° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 75,04                              | 1,15           | 11,35                 |
| A düz B sola                            | 76,39                              | 1,17           | 5,16                  |
| B düz A sola                            | 102,88                             | 1,32           | 10,77                 |
| B düz A sağa                            | 81,89                              | 1,05           | 7,65                  |

**Çizelge 5.5.** Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 30° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 76,87                              | 0,95           | 12,41                 |
| A düz B sola                            | 87,57                              | 1,09           | 6,29                  |
| B düz A sola                            | 102,68                             | 1,06           | 12,05                 |
| B düz A sağa                            | 93,05                              | 0,96           | 8,53                  |

**Çizelge 5.6.** İki uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 15° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sol B sağa                            | 48,84                                      | 40,95                                      | 1,09           | 11,36                 |
| A sağa B sola                           | 57,48                                      | 48,4                                       | 1,28           | 1,64                  |
| B sola A sola                           | 60,75                                      | 50,88                                      | 1,36           | 6,87                  |
| B sağa A sağa                           | 49,88                                      | 41,57                                      | 1,11           | 9,09                  |

**Çizelge 5.7.** İki uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 20° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sol B sağa                            | 49,15                                      | 41,30                                      | 0,81           | 12,92                 |
| A sağa B sola                           | 77,27                                      | 64,90                                      | 1,27           | 1,62                  |
| B sola A sola                           | 71,0                                       | 59,84                                      | 1,17           | 8,72                  |
| B sağa A sağa                           | 58,05                                      | 48,88                                      | 0,95           | 10,45                 |

**Çizelge 5.8.** İki uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 25° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sol B sağa                            | 49,24                                      | 41,03                                      | 0,63           | 13,88                 |
| A sağa B sola                           | 102,88                                     | 86,38                                      | 1,323          | 1,575                 |
| B sola A sola                           | 78,78                                      | 65,87                                      | 1,01           | 10,14                 |
| B sağa A sağa                           | 64,27                                      | 53,99                                      | 0,82           | 11,5                  |

**Çizelge 5.9.** İki uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 1

| Yatış açısı 30° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sol B sağa                            | 49,41                                      | 41,44                                      | 0,51           | 14,54                 |
| A sağa B sola                           | 155,94                                     | 131,02                                     | 1,62           | 1,499                 |
| B sola A sola                           | 84,07                                      | 70,86                                      | 0,87           | 11,25                 |
| B sağa A sağa                           | 68,98                                      | 57,49                                      | 0,71           | 12,34                 |

Her bir manevra için elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Uçakların başlangıç durumları için aralarındaki mesafenin 17,32 Nmi olduğu hesaplanmıştır. Tek bir uçağın 15° ve 20° yatış açıları ile manevra yaptığı durumlarda A uçağının düz gidip B uçağının kendi soluna döndüğü durum hariç her manevra uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesini sağlamıştır. Yatış açılarının 25° ve 30° olduğu durumlarda bütün manevralar uçaklar arasında minimum ayırma mesafesini sağlamıştır.

Uçaklar arasında gerçekleştirilen dönüş hareketlerinin sonuçları değerlendirildiği zaman A uçağının kendi sağına dönüp B uçağının kendi soluna dönüş yaptığı manevrada minimum ayırma mesafesinin korunamadığı görülmüştür. Bu manevra dışında kalan bütün dönüş hareketleri minimum ayırma mesafesini sağlamaktadır. Ayrıca, uçaklar arasındaki maksimum ayırma mesafesini gerçekleştiren manevra ise A uçağının kendi soluna dönüp B uçağının kendi sağına döndüğü durumdur. Bu mesafe 14,54 Nmi olarak hesaplanmıştır.

Referans [5]'de en uygun ayırma önerisinin seçimi için çözüm algoritması oluşturmuştur. Bu algoritmaya göre öncelikle uçaklar arasındaki minimum

ayırmanın sağlanması gerekmektedir. Bu kriter çözüm önerisinin seçiminde en önemli basamaktır. Minimum ayırmanın sağlanmasından sonraki en önemli kriter uçakların baş açılarındaki değişim miktarıdır. Baş açısı değişiminin az olması uçakların kısa süre içerisinde tekrar kendi yörüngelerine dönmeye imkân sağlamaktadır. En uygun çözüm önerisi tek uçağın düşük bir yatış açısı ile manevra yaptığı ve diğer uçağın uçuşuna devam ettiği manevradır. Düşük yatış açısı ile minimum ayırma mesafesi sağlanamadığı zaman uçakların yüksek yatış açıları ile dönüş hareketi yaptığı manevralar değerlendirilir. Tek uçağın dönerek uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesini sağlayamadığı durumlarda iki uçağın da dönüş hareketi yaptığı manevralar çözüm önerisi olarak değerlendirilmektedir. Referans [5]'te verilen çözüm algoritmasına göre A uçağının  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına dönüp B uçağının düz gittiği durum en uygun çözüm önerisi olarak seçilmektedir. Bu durum minimum ayırmanın sağlandığı ve baş açısı değişiminin en düşük olduğu manevradır.

Uçakların birbirlerine göre olan pozisyonları değerlendirildiği zaman B uçağı A uçağının sağına kalmaktadır. Annex 2'ye göre B uçağının hızında ve baş açısında bir değişiklik olmadan yoluna devam etmesi gerekmektedir. A uçağı manevra yapması gereken uçak olarak belirlenir. Bu durumda seçilecek olan manevranın minimum ayırma mesafesini sağlaması gerekmektedir ve aynı zamanda baş açısı değişimine de dikkat edilmelidir. Annex 2'de verilen kuralların elde edilen veriler ile tekrar değerlendirilmesi sonucunda A uçağının  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına dönüp B uçağının düz gittiği manevra en uygun çözüm önerisi olarak seçilir. Bu duruma göre A uçağının baş açılarındaki toplam değişim  $55,54^\circ$  uçaklar arası minimum ayırma da 5,66 Nmi olarak hesaplanmıştır. Her iki duruma göre A uçağının kendi sağına dönüp B uçağının düz gittiği manevra en uygun manevra olarak seçilmiştir.

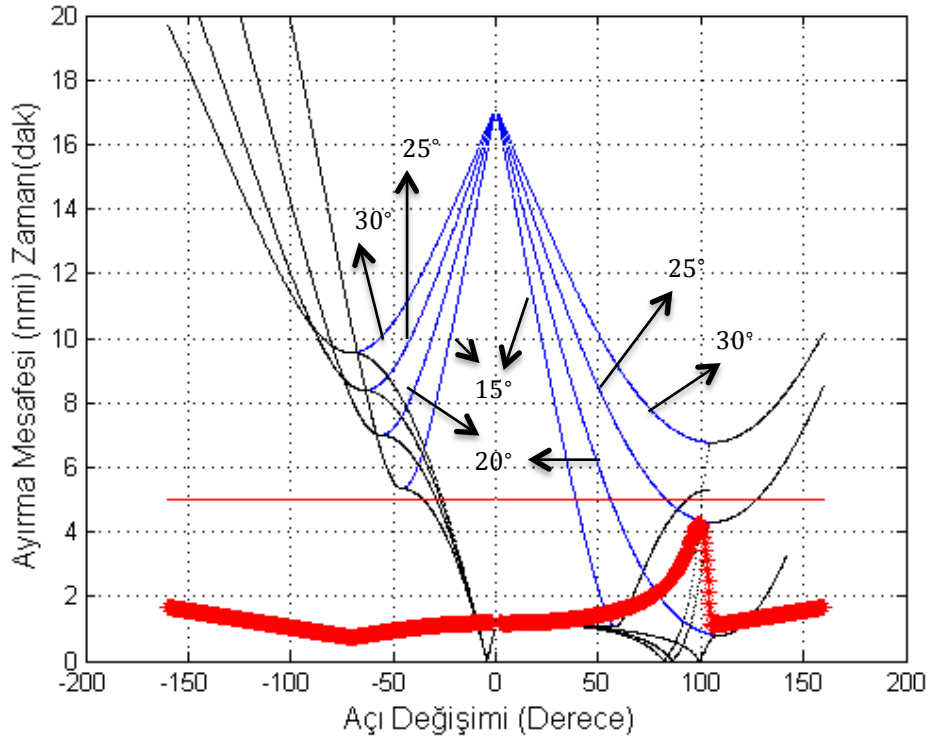
### **5.1.2 Uçakların karşılıklı olmaları durumu**

Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği durumlardan bir diğeri ise uçakların karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştığı durumlardır. Bu duruma uygun olarak uçakların seçilen başlangıç değerleri Çizelge 5.10'da verilmiştir. Program

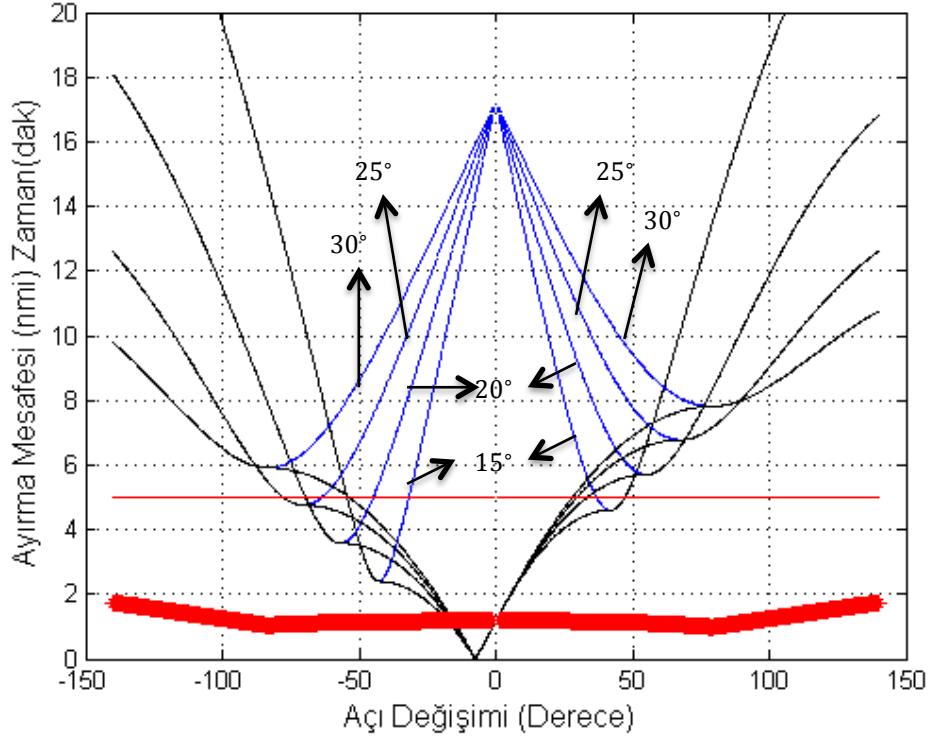
çıktıları Şekiller 5.5-5.8’de gösterilmiştir. Mavi renk uçaklar arasındaki ayırma mesafesini, kırmızı düz çizgi 5 Nmi değerini, siyah çizgi ise minimum ayırma mesafesini göstermektedir. Kırmızı kalın çizgi 30° yatış açısı için minimum ayırma mesafesine kalan zamanı gösterirken, pembe çizgi seçilen çözüm önerisini göstermektedir.

Çizelge 5.10. Uçakların başlangıç değerleri 2

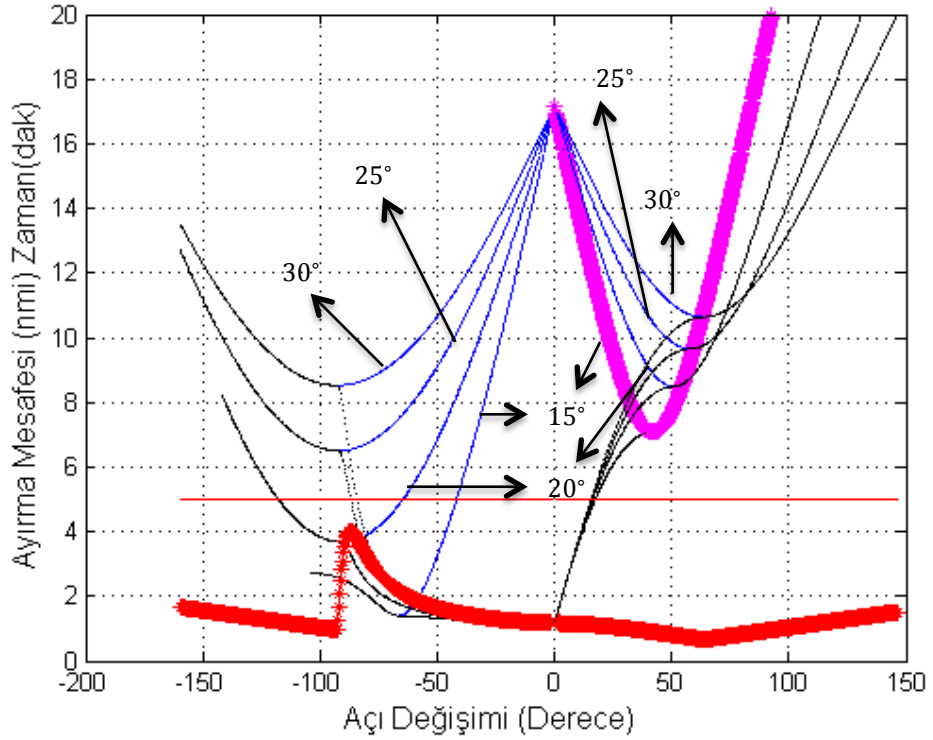
|                         | Uçak A | Uçak B |
|-------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)              | 400    | 480    |
| Baş Açıları (derece)    | 80     | 270    |
| X eksen konumları (Nmi) | 0      | 17     |
| Y eksen konumları (Nmi) | 10     | 12,5   |



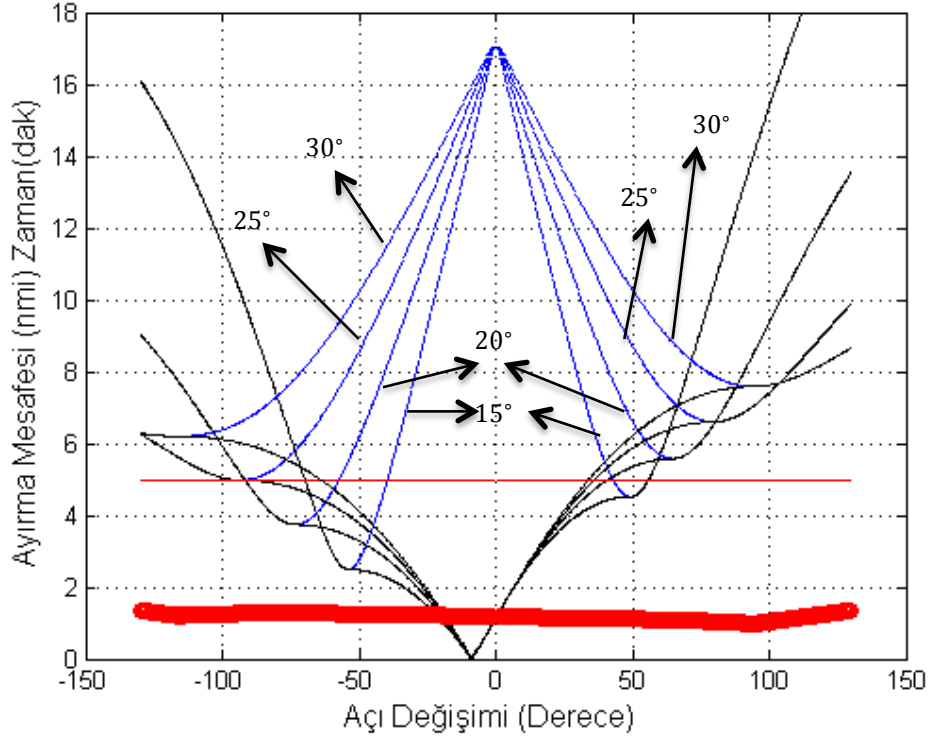
Şekil 5.5. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı sola döner 2



Şekil 5.6. B uçağı sağa/sola döner ve A uçağı düz gider 2



Şekil 5.7. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı sağa döner 2



**Şekil 5.8.** A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı düz gider 2

Şekil 5.5 - 5.8’de verilen grafikler yardımıyla her bir grafik için baş açısı değişimini, en yakın mesafenin değerini ve en yakın mesafeye ne kadar zamanın kaldığını gösteren bilgiler çizelgelere aktarılmıştır.

**Çizelge 5.11.** Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 15° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağı                            | 42,19                              | 1,13           | 4,56                  |
| A düz B sola                            | 42,81                              | 1,15           | 2,37                  |
| B düz A sola                            | 54,35                              | 1,21           | 2,45                  |
| B düz A sağı                            | 49,14                              | 1,10           | 4,48                  |

**Çizelge 5.12.** Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 20° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 55,62                              | 1,10           | 5,66                  |
| A düz B sola                            | 57,31                              | 1,13           | 3,55                  |
| B düz A sola                            | 73,83                              | 1,21           | 3,68                  |
| B düz A sağa                            | 64,73                              | 1,06           | 5,53                  |

**Çizelge 5.13.** Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 25° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 68,03                              | 1,05           | 6,72                  |
| A düz B sola                            | 71,27                              | 1,10           | 4,71                  |
| B düz A sola                            | 93,29                              | 1,20           | 4,90                  |
| B düz A sağa                            | 80,34                              | 1,03           | 6,55                  |

**Çizelge 5.14.** Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 30° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 80,22                              | 1              | 7,75                  |
| A düz B sola                            | 84,23                              | 1,05           | 5,86                  |
| B düz A sola                            | 115,51                             | 1,20           | 6,11                  |
| B düz A sağa                            | 94,65                              | 0,98           | 7,52                  |

**Çizelge 5.15.** İki uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 15° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 67,01                                      | 55,84                                      | 1,5            | 1,4                   |
| A sağa B sağa                           | 42,44                                      | 35,36                                      | 0,95           | 7,08                  |
| B sola A sola                           | 46,16                                      | 38,47                                      | 1,03           | 5,34                  |
| B sola A sağa                           | 58,82                                      | 49,02                                      | 1,31           | 1,07                  |

**Çizelge 5.16.** İki uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 20° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 91,02                                      | 75,85                                      | 1,5            | 3,68                  |
| A sağa B sağa                           | 51,58                                      | 42,98                                      | 0,85           | 8,48                  |
| B sola A sola                           | 56,64                                      | 47,20                                      | 0,93           | 6,99                  |
| B sola A sağa                           | “109,23                                    | 91,02                                      | 1,80           | 0,79                  |

**Çizelge 5.17.** İki uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 25° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 93,29                                      | 77,74                                      | 1,2            | 6,50                  |
| A sağa B sağa                           | 58,31                                      | 48,59                                      | 0,75           | 9,65                  |
| B sola A sola                           | 64,79                                      | 53,99                                      | 0,83           | 8,38                  |
| B sola A sağa                           | 106,25                                     | 88,54                                      | 1,36           | 4,30                  |

**Çizelge 5.18.** İki uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 2

| Yatış açısı 30° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 93,05                                      | 77,54                                      | 0,96           | 8,52                  |
| A sağa B sağa                           | 64,17                                      | 53,48                                      | 0,66           | 10,64                 |
| B sola A sola                           | 70,59                                      | 58,82                                      | 0,73           | 9,55                  |
| B sola A sağa                           | 105,89                                     | 88,24                                      | 1,1            | 6,77                  |

Her bir manevra için elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Uçakların başlangıç durumları için aralarındaki mesafenin 17,2 Nmi olduğu hesaplanmıştır. Tek bir uçağın 15° yatış açısı ile manevra yaptığı durumda hiçbir manevranın uçaklar arasındaki gerekli olan ayırma miktarını sağlayamadığı görülmüştür. Yatış açılarının 20° ve 25° olduğu durumlarda, 2 manevra uçaklar arasında korunması gerekli olan ayırma mesafesini sağlamıştır. Minimum ayırmanın sağlandığı manevralar A uçağının düz gidip B uçağının kendi sağına döndüğü ve B uçağının düz gidip A uçağının kendi sağına döndüğü manevralardır. Tek bir uçağın yatış

açısının  $30^\circ$  olduğu durumlarda bütün manevralar gerekli olan minimum ayırma mesafesini sağlamıştır.

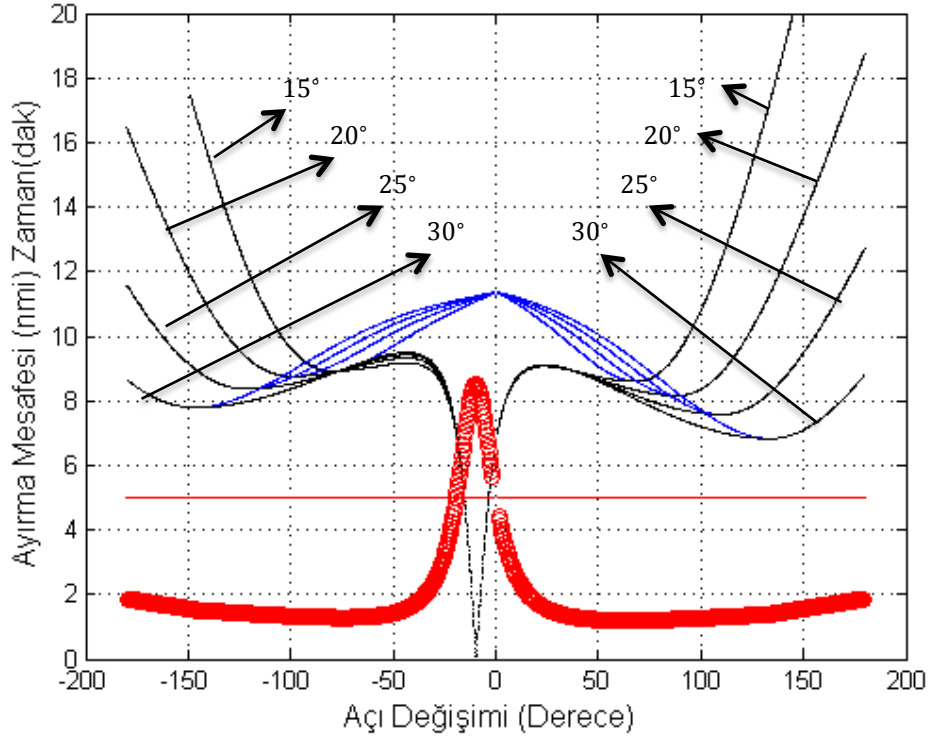
Uçaklar arasında gerçekleştirilen dönüş hareketlerinin sonuçları değerlendirildiği zaman  $15^\circ$  ve  $20^\circ$  yatış açıları için A uçağının sola dönüp B uçağının kendi sağına döndüğü ve A uçağının kendi sağına dönüp B uçağının kendi soluna döndüğü manevralarda minimum koruma mesafesinin ihlal edildiği görülmüştür. Dönüş hareketinde olan bir başka minimum koruma mesafesi ihlali de  $25^\circ$  yatış açısı için A uçağının kendi sağına dönüp B uçağının kendi soluna döndüğü manevrada görülmüştür. Diğer bütün dönüş hareketlerinde minimum ayırma mesafesi sağlanmıştır. Ayrıca uçaklar arasındaki maksimum ayırma mesafesinin sağlandığı manevra A uçağı ve B uçağının birlikte kendi sağına döndüğü harekettir. Bu mesafe 10,64 Nmi olarak hesaplanmıştır. Uçakların birbirlerine göre olan pozisyonları değerlendirildiği zaman uçaklar birbirlerinin karşısında bulunmaktadır. Bu durum Annex 2'ye göre değerlendirildiği zaman her iki uçağın da birlikte kendi sağına dönüş yapması gerekmektedir. Annex 2'ye göre yapılan değerlendirmede uçakların  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına döndükleri manevra en uygun çözüm önerisi olarak seçilmektedir. Bu manevra sonucunda A uçağının baş açısındaki toplam değişim  $42,44^\circ$  ve B uçağının baş açısındaki toplam değişim  $35,36^\circ$  olacaktır. Uçaklar arası minimum ayırma mesafesi 7,08 Nmi olarak hesaplanmıştır.

### **5.1.3. Uçakların aynı yörüngede olmaları durumu**

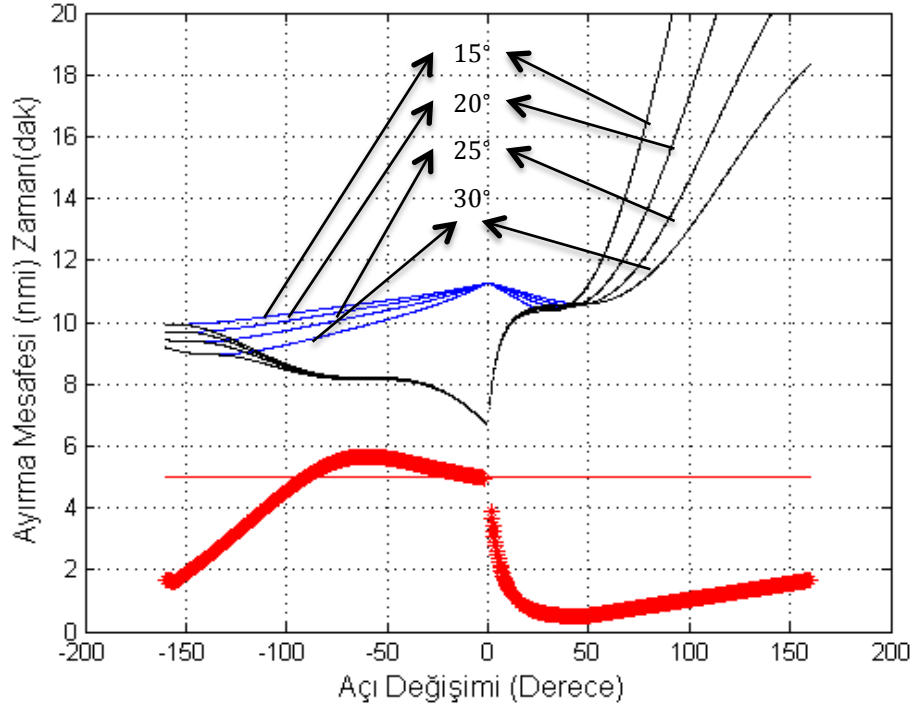
Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği son durum ise uçakların aynı yörüngede olduğu durumdur. Bu duruma uygun olarak uçakların seçilen başlangıç değerleri Çizelge 5.19'da verilmiştir. Program çıktıları Şekil 5.9-5.12 üzerinde değişik renklerde gösterilmiştir. Mavi renk uçaklar arasındaki ayırma mesafesini, kırmızı düz çizgi 5 Nmi değerini ve siyah çizgi ise minimum ayırma mesafesini göstermektedir. Kırmızı kalın çizgi  $30^\circ$  yatış açısı için minimum ayırma mesafesine kalan zamanı gösterirken, pembe çizgi ise seçilen çözüm önerisini gösterir.

Çizelge 5.19. Uçakların başlangıç değerleri 3

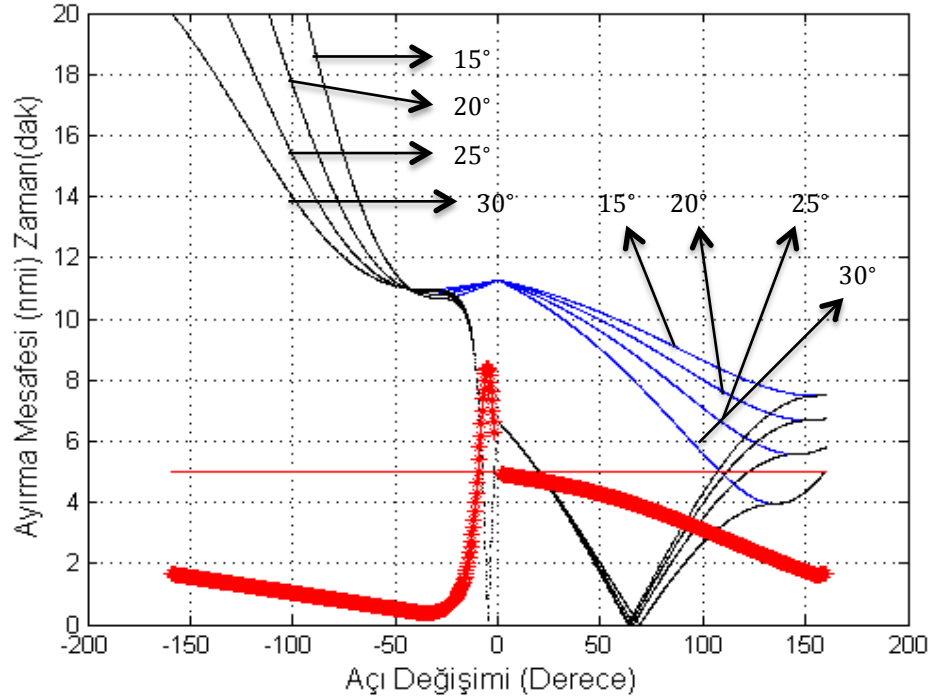
|                         | Uçak A | Uçak B |
|-------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)              | 400    | 480    |
| Baş Açıları (derece)    | 270    | 260    |
| X eksen konumları (Nmi) | 2      | 13     |
| Y eksen konumları (Nmi) | 10     | 12,5   |



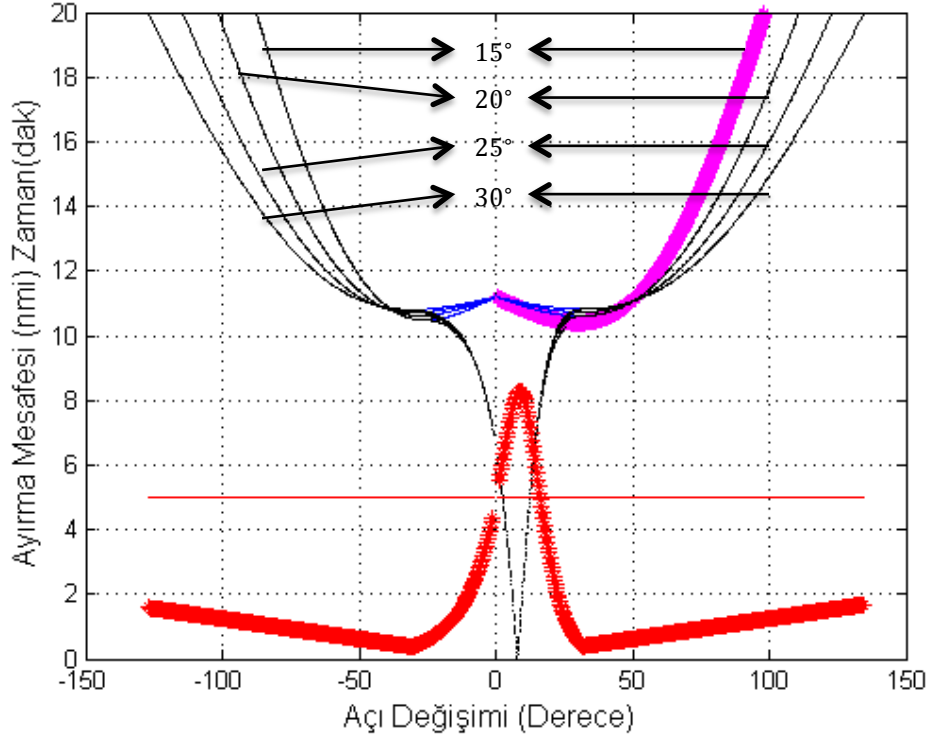
Şekil 5.9. A uçağı sağa/sola döner ve B uçağı düz gider 3



Şekil 5.10. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sola döner 3



Şekil 5.11. A uçağı sağı/sola döner ve B uçağı sağı döner 3



Şekil 5.12. B uçağı sağı/sola döner ve A uçağı düz gider 3

Şekil 5.9 - 5.12’de verilen grafikler yardımıyla her bir grafik için baş açısı değişimini, en yakın mesafenin değerini ve en yakın mesafeye ne kadar zamanın kaldığını gösteren tablolar elde edilmiştir.

Çizelge 5.20. Tek uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 15° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağı                            | 30,40                              | 0,81           | 10,47                 |
| A düz B sola                            | 26,06                              | 0,7            | 10,56                 |
| B düz A sola                            | 79,67                              | 1,78           | 8,84                  |
| B düz A sağı                            | 68,50                              | 1,53           | 8,52                  |

**Çizelge 5.21.** Tek uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 20° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 31,18                              | 0,616          | 10,68                 |
| A düz B sola                            | 27,81                              | 0,55           | 10,70                 |
| B düz A sola                            | 99,12                              | 1,63           | 8,68                  |
| B düz A sağa                            | 87,99                              | 1,45           | 8,10                  |

**Çizelge 5.22.** Tek uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 25° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 31,31                              | 0,48           | 10,81                 |
| A düz B sola                            | 30,23                              | 0,46           | 10,81                 |
| B düz A sola                            | 121,80                             | 1,56           | 8,32                  |
| B düz A sağa                            | 110,14                             | 1,41           | 7,52                  |

**Çizelge 5.23.** Tek uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 30° için tek uçağın dönmesi | Toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|------------------------------------|----------------|-----------------------|
| A düz B sağa                            | 32,08                              | 0,40           | 10,90                 |
| A düz B sola                            | 30,75                              | 0,38           | 10,88                 |
| B düz A sola                            | 146,00                             | 1,51           | 7,75                  |
| B düz A sağa                            | 133,16                             | 1,38           | 6,799                 |

**Çizelge 5.24.** İki uçağın 15° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 15° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 29,03                                      | 24,19                                      | 3,03           | 3,94                  |
| A sağa B sola                           | 32,01                                      | 26,68                                      | 0,71           | 10,36                 |
| B sola A sola                           | 136,26                                     | 113,55                                     | 0,65           | 10,67                 |
| B sağa A sağa                           | 135,51                                     | 112,93                                     | 3,05           | 8,95                  |

**Çizelge 5.25.** İki uçağın 20° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 20° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 31,35                                      | 26,12                                      | 2,4            | 5,57                  |
| A sağa B sola                           | 37,42                                      | 31,18                                      | 0,616          | 10,46                 |
| B sola A sola                           | 145,64                                     | 121,37                                     | 0,51           | 10,81                 |
| B sağa A sağa                           | 145,64                                     | 121,37                                     | 2,40           | 9,36                  |

**Çizelge 5.26.** İki uçağın 25° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 25° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 33,69                                      | 28,07                                      | 1,95           | 6,68                  |
| A sağa B sola                           | 42,76                                      | 35,63                                      | 0,55           | 10,53                 |
| B sola A sola                           | 151,61                                     | 126,34                                     | 0,43           | 10,90                 |
| B sağa A sağa                           | 151,61                                     | 126,34                                     | 1,95           | 9,68                  |

**Çizelge 5.27.** İki uçağın 30° yatış açısı ile dönüş yapması 3

| Yatış açısı 30° için iki uçağın dönmesi | A uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | B uçağı toplam baş açısı değişimi (derece) | Zaman (dakika) | En yakın mesafe (Nmi) |
|---|--|--|----------------|-----------------------|
| A sola B sağa                           | 35,29                                      | 29,41                                      | 1,61           | 7,48                  |
| A sağa B sola                           | 48,13                                      | 40,11                                      | 0,50           | 10,59                 |
| B sola A sola                           | 155,62                                     | 129,68                                     | 0,36           | 10,96                 |
| B sağa A sağa                           | 155,62                                     | 129,68                                     | 1,61           | 9,93                  |

Uçakların başlangıçtaki durumlarına göre aralarındaki mesafenin 12,28 Nmi olduğu hesaplanmıştır. Tek uçağın 15°, 20°, 25°, 30° yatış açıları ile manevra yaptığı bütün durumlarda uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafesi sağlanmıştır.

Uçaklar arasında gerçekleştirilen dönüş hareketlerinin sonuçları değerlendirildiği zaman bütün yatış açıları için uçaklar arasındaki minimum ayırma mesafenin sağlandığı görülmüştür. Uçaklar arasındaki maksimum ayırma mesafesi 10,96 Nmi olarak hesaplanmıştır. Uçakların birbirlerine göre olan pozisyonları değerlendirildiği zaman A uçağı B uçağının önünde bulunmaktadır. Annex 2'ye göre A uçağının hızında ve baş açısında bir değişiklik olmadan yoluna devam etmesi gerekmektedir. B uçağı manevra yapması gereken uçak

olarak belirlenir ve seçilecek olan çözüm önerisinde B uçağının kendi sağına dönüş yapması gerekmektedir. Seçilecek olan manevranın minimum ayırma mesafesini koruması gerekmektedir ve baş açısı değişiminin düşük olması gerekmektedir. Annex 2’de verilen kurallara göre B uçağının  $15^{\circ}$  yatış açısı ile kendi sağına dönüp A uçağının düz gittiği manevra en uygun durum olarak seçilmiştir. B uçağının baş açısındaki toplam değişim  $30,40^{\circ}$  olacaktır. Minimum ayırma mesafesi 10,47 Nmi olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.12’de seçilen çözüm önerisini göstermek için farklı renk kullanılmıştır.

## 5.2. Dikey Eksende Çözüm Önerisi Belirlemesi

Bu bölümde, uçakların için dikey eksende üretilen çözüm önerileri değerlendirilmiştir. Dikey eksende yapılan ayırma işlemleri, uçakların aralarındaki mesafenin 10 Nmi, 7 Nmi ve 4 Nmi kaldığı durumlar esas alınarak denenmiştir. Çözüm önerileri tek bir uçağın yükselme hareketi yapması ile gerçekleştirilmektedir. Yükselme hareketi uçaklar arasındaki irtifa farkının 1000 feet olana kadar devam etmektedir.

Her bir uçak için yükselme süreleri, toplam zaman, ilk 400 feet göreceli irtifa için uçaklar arasındaki en yakın mesafe, tırmanma açıları ve tırmanma hızları ayrı olarak hesaplanmaktadır. Dikey eksendeki çözüm önerilerinin değerlendirilmesi yapıldığı zaman 3 farklı mesafe için çizilen grafiklerin üst üste olduğu ve sadece 1 durumun fark edilebildiği belirlenmiştir. Çizelgeler elde edilirken hesaplamalara hiçbir ekleme yapılmamıştır. Sadece grafiklerin şekiller üzerinde daha rahat görülmelerini sağlamak amacıyla uçaklar arasında kalan mesafenin 7 Nmi ve 4 Nmi olduğu durumlar bir miktar yukarı kaydırılmıştır. Şekillerde kullanılan kırmızı renk uçaklar arasındaki göreceli irtifa farkını ifade etmektedir. İrtifa farkının diğer değerler ile birlikte aynı şekilde gösterilmesi için irtifa farkı değerinin  $1/50$ ’si alınmıştır ve aynı şekil üzerinde bütün hesaplamalar gösterilmiştir. Yeşil ve pembe rengin birlikte kullanıldığı eğri, aralarındaki mesafenin 10 Nmi olduğu zaman için aralarındaki minimum ayırma mesafesini vermektedir. Yeşil ve mavi rengin birlikte kullanıldığı eğri, uçaklar arasındaki mesafenin 7 Nmi olduğu zaman için aralarındaki minimum ayırma mesafesini

belirtmektedir. Yeşil ve sarı rengin birlikte kullanıldığı eğri, uçaklar arasındaki mesafenin 4 Nmi olduğu zaman için aralarındaki minimum ayırma mesafesini ve mavi renkli düz çizgi ise 2 Nmi değerlerini ifade etmek için şekiller üzerinde kullanılmıştır.

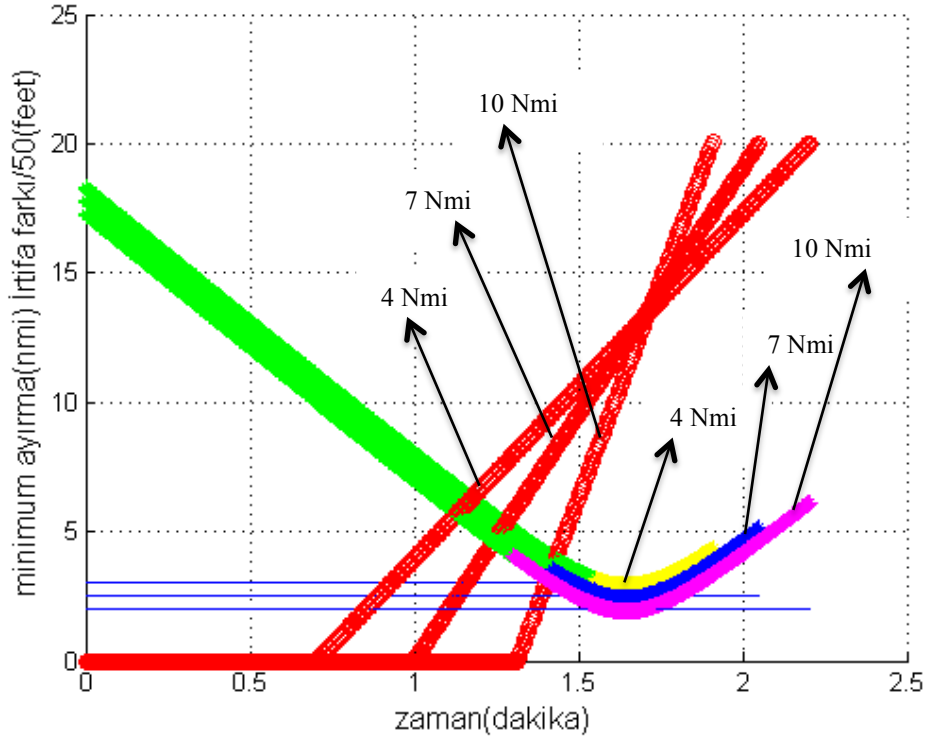
### 5.2.1. Yörüngelerin kesişmesi durumu

Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği durumlardan biri uçak yörüngelerinin kesiştiği durumdur. Bu duruma uygun olan uçakların başlangıç değerleri Çizelge 5.28’de verilmiştir.

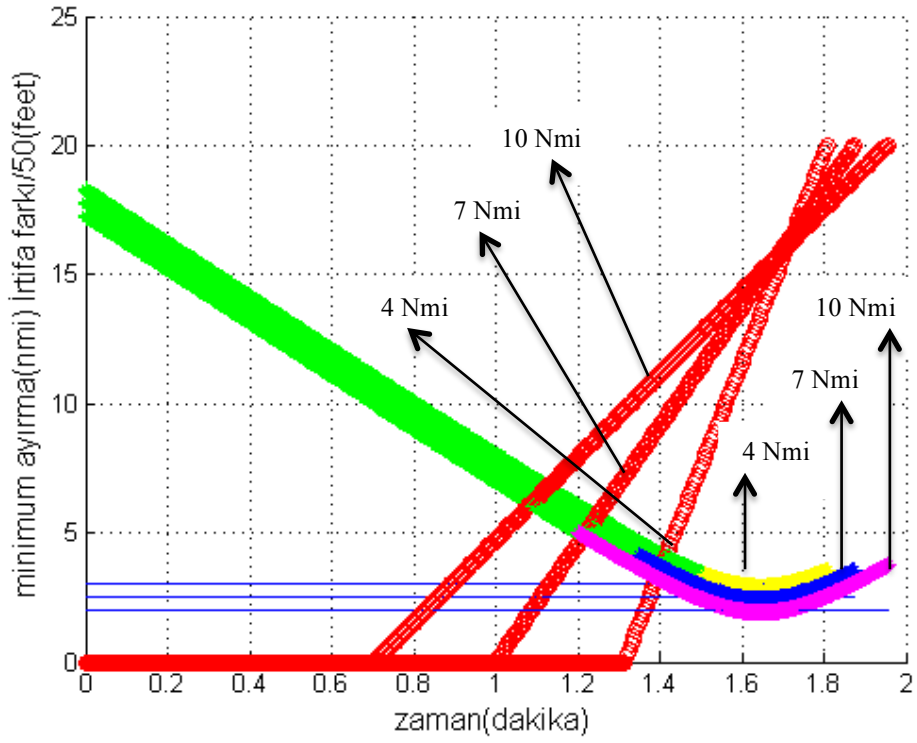
Çizelge 5.28. Uçakların başlangıç değerleri 4

|                          | Uçak A | Uçak B |
|--------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)               | 400    | 480    |
| Baş Açıları (derece)     | 0      | 270    |
| X eksen konumları (Nmi)  | 0      | 12     |
| Y eksen konumları (Nmi)  | 0      | 12,5   |
| Z eksen konumları (feet) | 10000  | 10000  |

Uçaklar arasındaki ayırma işleminin nasıl belirleneceğine Çizelge 5.28’de verilen değerlere göre yapılan hesaplamalar sonucunda karar verilmektedir. Bu değişimleri gösteren eğriler Şekil 5.13 - 5.14’te verilmiştir.



Şekil 5.13. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 1



Şekil 5.14. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 1

Şekil 5.13 ve 5.14’te verilen grafikler yardımıyla her bir uçak için uçaklar arası gerekli olan veriler tablolar halinde verilmiştir.

**Çizelge 5.29.** A Uçağının yükselmesi 1

| A uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 2,18          | 2,03         | 1,88         |
| Yükselme zamanı (dakika)                                  | 1,5           | 1,05         | 0,58         |
| Yatay Mesafe (Nmi)  | 6,16          | 4,7          | 3,34         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 4             | 2,99         | 2,12         |
| Tırmanma açısı (derece)                                   | 0,94          | 1,36         | 2,44         |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 670           | 965          | 1700         |

**Çizelge 5.30.** B Uçağının yükselmesi 1

| B uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 1,93          | 1,85         | 1,78         |
| Yükselme zamanı (dakika)                                  | 1,25          | 0,86         | 0,48         |
| Yatay mesafe (Nmi)  | 3,78          | 3,06         | 2,55         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 4,93          | 3,55         | 2,29         |
| Tırmanma açısı (derece)                                   | 0,94          | 1,36         | 2,44         |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 804           | 1158         | 2076         |

Uçakların yaptığı her bir manevra için değerlendirmeler yapılmıştır. A uçağının yükselme hareketi yaptığı her bir durum için A uçağının ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmadan uçaklar arasında kalan mesafe 2 Nmi’den yüksek çıkmıştır. A uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 2,18 dakika ile 1,88 dakika arasında değiştiği görülmüştür. A uçağının yükselmesi için geçen süre 1,5 dakika ile 0,58 dakika arasında değişmektedir. A uçağının tırmanma hızı 672 feet/dakika ile 1698 feet/dakika arasında değişmektedir. B uçağının yükselme hareketi yaptığı her bir durum için ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmadan uçaklar arasında kalan mesafe 2 Nmi’den yüksek çıkmıştır. B uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 1,93 dakika ile 1,78 dakika arasında

değiştirdiği görülmüştür. A uçağının yükselmesi için geçen süre 1,25 dakika ile 0,48 dakika arasında değişmektedir. A uçağının tırmanma hızı 804 feet/dakika ile 2076 feet/dakika arasında değişmektedir. Ayrıca uçaklar arasındaki maksimum ayırma mesafesinin sağlandığı manevra A uçağının muhtemel bir çarpışmaya 10 Nmi kala yükselmeye başlayıp B uçağının düz gittiği manevradır. Aralarında kalan mesafe 1000 feet yükselme sonucunda 6,16 Nmi olarak hesaplanmıştır. Manevralar arasında en uygun çözüm önerisi A uçağının yükselme hızının 670 feet/dakika olarak hesaplandığı ve çarpışmaya 10 Nmi mesafe kala yükselmeye başladığı çözüm önerisidir. Bu manevra diğer durumlara göre A uçağı için daha yumuşak bir yükselme olanağı sağlayacaktır.

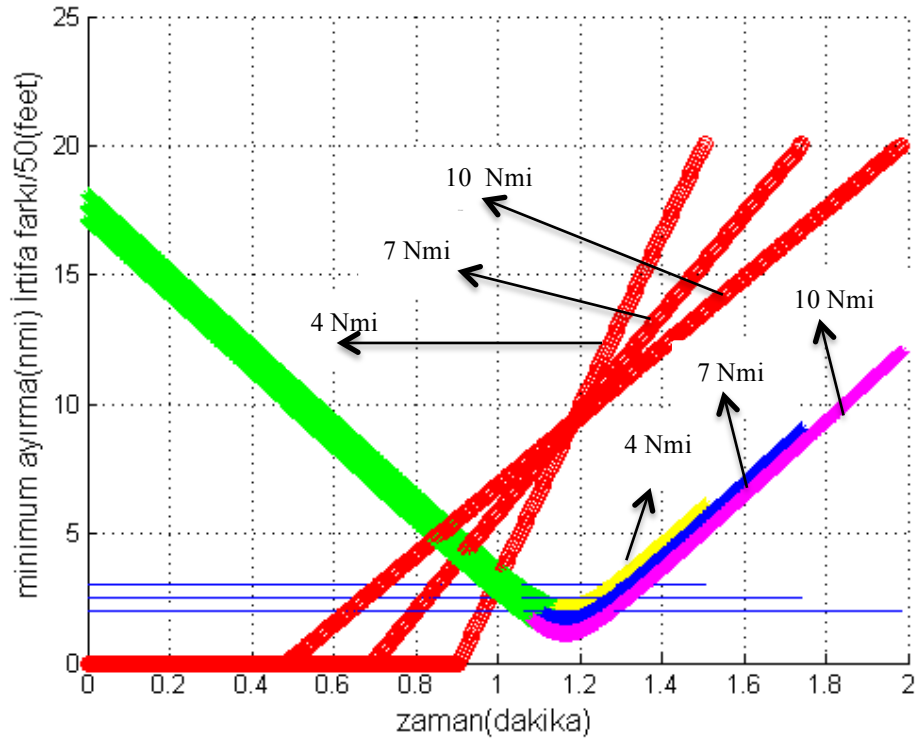
### 5.2.2. Uçakların karşılıklı olmaları durumu

Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği durumlardan bir diğeri de uçakların karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştığı durumdur. Bu duruma uygun olarak seçilen uçakların başlangıç değerleri Çizelge 5.31’de verilmiştir.

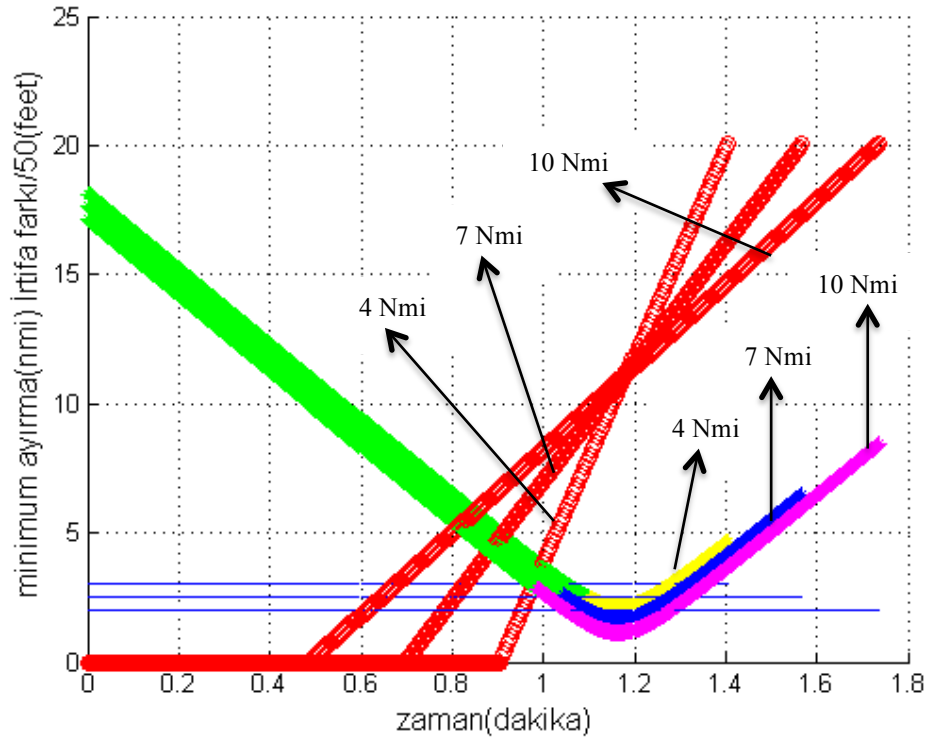
Çizelge 5.31. Uçakların başlangıç değerleri 5

|                          | Uçak A | Uçak B |
|--------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)               | 400    | 480    |
| Baş Açılı (derece)       | 80     | 270    |
| X eksen konumları (Nmi)  | 0      | 17     |
| Y eksen konumları (Nmi)  | 10     | 12,5   |
| Z eksen konumları (feet) | 10000  | 10000  |

Uçaklar arasındaki ayırma işleminin nasıl belirleneceği Çizelge 5.31’de verilen değerlere göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen veriler kullanılarak yapılır. Program çıktıları Şekil 5.15 ve 5.16’da gösterilmiştir.



Şekil 5.15. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 2



Şekil 5.16. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 2

Şekil 5.15 ve 5.16’da verilen grafikler yardımıyla her bir uçak için hesaplanan değerler çizelgeler halinde verilmiştir.

**Çizelge 5.32.** A uçağının yükselmesi 2

| A uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 1,96          | 1,7          | 1,48         |
| Yükselme Zamanı (dakika)                                  | 1,5           | 1,01         | 0,6          |
| Yatay mesafe (Nmi)  | 12,13         | 8,26         | 5,14         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 1,57          | 1,28         | 1,15         |
| Tırmanma açısı (derece)                                   | 0,95          | 1,39         | 2,4          |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 672           | 984          | 1698         |

**Çizelge 5.33.** B uçağının yükselmesi 2

| B uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 1,725         | 1,55         | 1,39         |
| Yükselme zamanı (dakika)                                  | 1,24          | 0,86         | 0,49         |
| Yatay mesafe (Nmi)  | 8,38          | 5,97         | 3,61         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 2,78          | 2,03         | 1,41         |
| Tırmanma açısı (derece)                                   | 0,95          | 1,36         | 2,40         |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 807           | 1160         | 2038         |

Uçakların yaptığı her bir manevra için değerlendirmeler yapılmıştır. A uçağının yükselme hareketi yaptığı her bir durum için A uçağı ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmadan aralarında kalan mesafe 2 Nmi’den düşük çıkmıştır. A uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 1,96 dakika ile 1,48 dakika arasında değiştiği görülmüştür. A uçağının yükselmesi için geçen süre 1,5 dakika ile 0,6 dakika arasında değişmektedir. A uçağının tırmanma hızı 672 feet/dakika ile 1698 feet/dakika arasında değişmektedir. B uçağının yükselme hareketi yaptığı 2 durum için ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmadan iki uçak arasında kalan mesafe 2 Nmi’den yüksek çıkmıştır. Bu durumlar uçağın muhtemel bir

çarpışmaya 10 Nmi ve 7 Nmi kala yükselmeye başladığı hareketlerdir. B uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 1,72 dakika ile 1,39 dakika arasında değiştiği görülmüştür. B uçağının yükselmesi için geçen süre 1,25 dakika ile 0,48 dakika arasında değişmektedir. B uçağının tırmanma hızı 804 feet/dakika ile 2076 feet/dakika arasında değişmektedir. Ayrıca uçaklar arasındaki maksimum ayırma mesafesinin sağlandığı manevra A uçağının muhtemel bir çarpışmaya 10 Nmi kala yükselmeye başlayıp B uçağının düz gittiği harekettir. Ayırma işlemin sonunda aralarında kalan mesafe 12,13 Nmi olarak hesaplanmıştır. B uçağının muhtemel bir çarpışmaya 10 Nmi ve 7 Nmi kala yükselmeye başladığı manevralar uygun manevra olarak seçebilir. Bu hareketlerden B uçağının yükselme hızının 807 feet/dakika olarak belirlendiği ve 10 Nmi öncesinden yükselmeye başladığı çözüm önerisi diğer durumlara göre B uçağı için daha yumuşak bir yükselme olanağı sağlayacaktır.

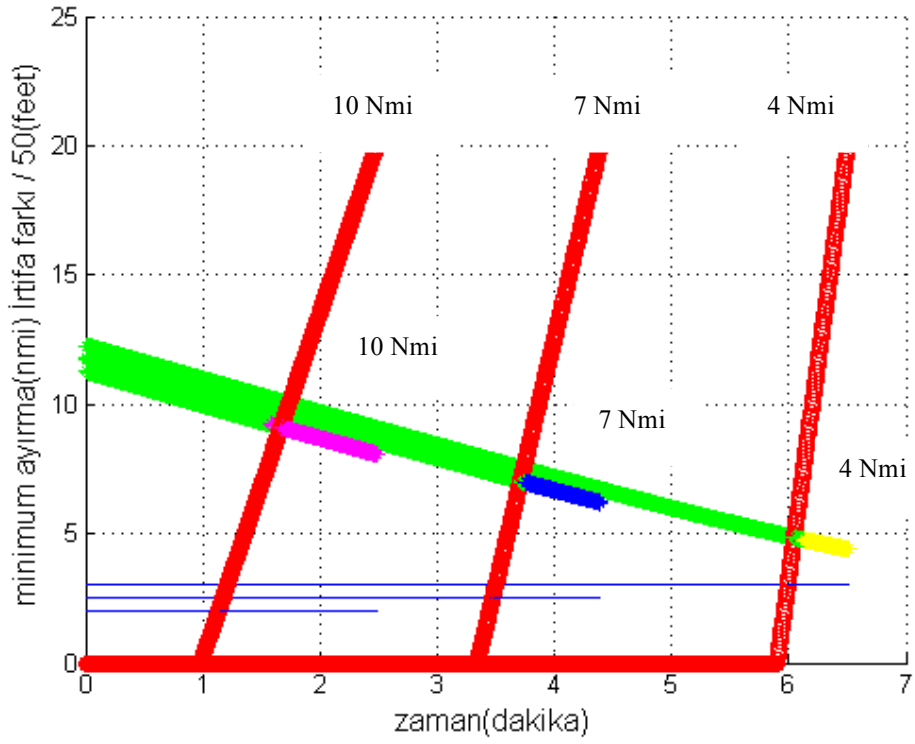
### 5.2.3. Uçakların aynı yörüngede olmaları durumu

Uçakların çarpışma ihtimali yaşayabileceği durumlardan bir diğeri de uçakların aynı yörüngede olduğu durumdur. Bu duruma uygun olarak seçilen uçakların başlangıç değerleri Çizelge 5.34'te verilmiştir.

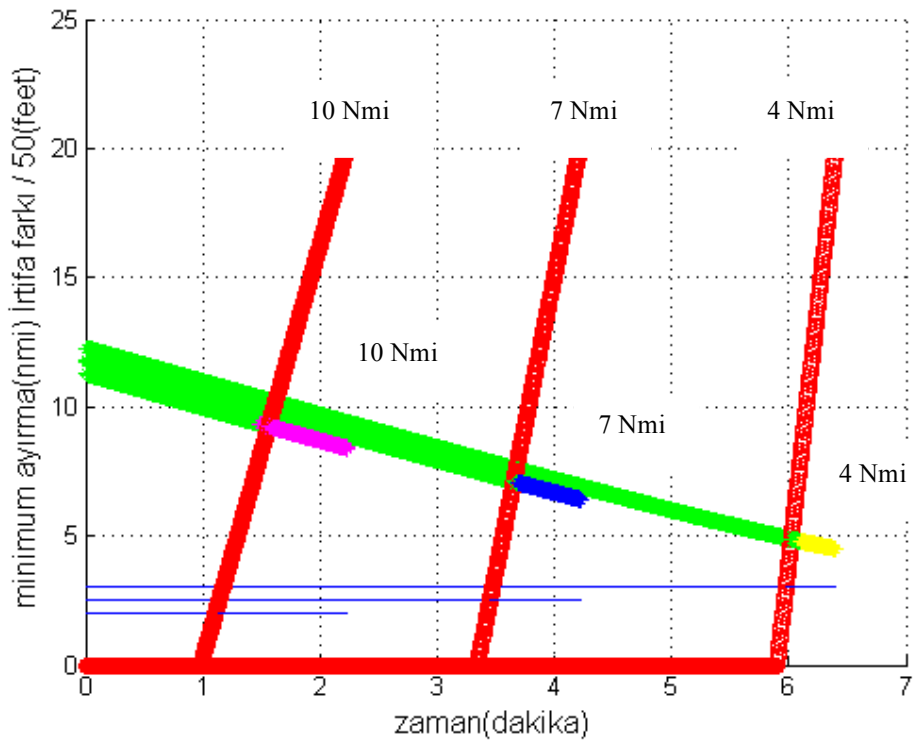
Çizelge 5.34. Uçakların başlangıç değerleri 6

|                          | Uçak A | Uçak B |
|--------------------------|--------|--------|
| Hız (knot)               | 400    | 480    |
| Baş Açıları (derece)     | 270    | 260    |
| X eksen konumları (nmi)  | 2      | 13     |
| Y eksen konumları (nmi)  | 10     | 12,5   |
| Z eksen konumları (feet) | 10000  | 10000  |

Uçaklar arasındaki ayırma işleminin nasıl belirleneceği Çizelge 5.34'te verilen değerlere göre yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen verilere göre karar verilmektedir. Program çıktıları Şekil 5.17 ve 5.18'de gösterilmiştir.



Şekil 5.17. A uçağı yükselir B uçağı düz gider 3



Şekil 5.18. B uçağı yükselir A uçağı düz gider 3

Şekil 5.17-5.18’te verilen grafikler yardımıyla her bir uçak için uçaklar arası ayırma mesafesi, uçağın yükselme zamanı, toplam süre, ilk 400 feet içinde uçaklar arasındaki en yakın mesafe, tırmanma açısı ve tırmanma hızları tablolar halinde verilmiştir.

**Çizelge 5.35. A Uçağının yükselmesi 3**

| A uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 2,46          | 4,36         | 6,48         |
| Yükselme zamanı (dakika)                                  | 1,5           | 1,05         | 0,6          |
| Yatay mesafe (Nmi)  | 8,06          | 5,70         | 5,83         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 9,21          | 6,45         | 3,40         |
| Tırmanma Açısı (derece)                                   | 0,94          | 1,34         | 2,36         |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 667           | 952          | 1668         |

**Çizelge 5.36. B Uçağının yükselmesi 3**

| B uçağın yükseldiği durum                                 | 10 Nmi mesafe | 7 Nmi mesafe | 4 Nmi mesafe |
|---|---------------|--------------|--------------|
| Toplam süre (dakika)                                      | 2,21          | 4,2          | 6,38         |
| Yükselme zamanı (dakika)                                  | 1,25          | 0,883        | 0,5          |
| Yatay mesafe (Nmi)  | 8,38          | 5,91         | 3,49         |
| 400 feet göreceli irtifa için en yakın yatay mesafe (Nmi) | 9,34          | 6,56         | 3,78         |
| Tırmanma açısı (derece)                                   | 0,94          | 1,34         | 2,36         |
| Tırmanma hızı (feet/dakika)                               | 801           | 1143         | 2002         |

Uçakların yaptığı her bir manevra incelenmiştir. A uçağının yükselme hareketi yaptığı her bir durum için A uçağının ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmasında önce uçaklar arasında kalan mesafe 2 Nmi’den büyüktür. A uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 2,46 dakika ile 6,48 dakika arasında değiştiği görülmüştür. A uçağının yükselmesi için geçen süre 1,5 dakika ile 0,6 dakika arasında değişmektedir. A uçağının tırmanma hızı 672 feet/dakika ile

1698 feet/dakika arasında değişmektedir. B uçağının yükselme hareketi yaptığı her bir durum için göre uçakların B uçağının ilk 400 feet yüksekliğe ulaşmasından önce uçaklar arasında kalan mesafe 2 Nmi'den yüksek çıkmıştır. B uçağının 1000 feet yüksekliğe ulaşması için geçen sürenin 2,21 dakika ile 6,38 dakika arasında değiştii görülmüştür. B uçağının yükselmesi için geçen süre 1,25 dakika ile 0,5 dakika arasında değişmektedir. B uçağının tırmanma hızı 801 feet/dakika ile 2002 feet/dakika arasında değişmektedir. Ayrıca uçaklar arasında maksimum ayırma mesafesini sağlayan manevra B uçağının muhtemel bir çarpışmaya 10 Nmi kala yükselmeye başlayıp A uçağının düz gittiği harekettir. Ayırma işlemi sonucunda aralarında kalan mesafe 8,38 Nmi olarak hesaplanmıştır. Uçakların her bir manevrası uygun çözüm önerisi olarak seçebilir. Bu hareketlerden A uçağının yükselme hızının 697 feet/dakika olduğu ve 10 Nmi öncesinden yükselmeye başladığı durum veya B uçağının yükselme hızının 801 feet/dakika olduğu ve 10 Nmi öncesinden yükselmeye başladığı durum uygun durum olarak seçilebilir.

## 6.SONUÇ

Bu çalışmada uçaklar arasında oluşabilecek muhtemel bir çarpışma olasılığını belirlemek ve bu muhtemel çarpışmayı önlemek amacıyla tasarlanmış bir algoritma denenmiştir. Bu algoritma için determinist yöntem esas alınarak denemeler yapılmıştır. Uçakların hareketleri kinematik denklemler yardımıyla tanımlanmıştır. Uçaklar arasında oluşabilecek koruma alanı ihlallerinde uçaklar arası çarpışma ihtimali belirir. Bu ihtimalin belirlenmesinde uçakların Euler yaklaşımına göre sahip oldukları pozisyonlarına, baş açılarına, minimum ayırma mesafelerine, tırmanma hızlarına, tırmanma açılarına göre yatay ve dikey eksenlerde hesaplamalar yapılmıştır. Oluşturulan algoritma MATLAB programı kullanılarak test edilmiştir. Hesaplamalar sonucu ortaya çıkan bilgilere göre uçaklar arasında herhangi bir tehdit olup olmadığı belirlenmiştir. Sistem tarafından tehdit algılandığı zaman uçaklar için uygun bir ayırma için çözüm önerisi hemen uçaklara iletilmiştir. Yatay ve dikey eksenlerdeki çözüm önerisinin şekillenmesinde programın süresince hesaplanan bilgiler ve Annex 2’de yer alan kurallar etkili olmuştur. Tasarlanan algoritma, 3 farklı çarpışma durumu ile test edilmiştir.

Yatay ekseninde yapılan ayırmalar için 4 farklı yatış açısı kullanılmıştır. Bu açılar  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$  ve  $30^\circ$  olarak belirlenmiştir. Uçakların yörüngelerinin kesiştiği durum değerlendirildiği zaman A uçağının  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına dönüp B uçağının düz gittiği manevra çözüm önerisi olarak seçilmiştir. Bu manevrada A uçağının baş açısındaki toplam değişim  $55,54^\circ$  ve uçaklar arası minimum ayırma mesafesi de 5,66 Nmi olarak hesaplanmıştır. Uçakların karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştıkları durum değerlendirildiği zaman çözüm önerisi iki uçağın da  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına döndükleri manevra olmuştur. Uçaklar arası minimum ayırma mesafesi de 7,08 Nmi olarak hesaplanmıştır. Bu manevra sonucunda A uçağının baş açısındaki toplam değişim  $42,44^\circ$  ve B uçağının baş açısındaki toplam değişim  $35,36^\circ$  olarak hesaplanmıştır. Uçakların aynı yörüngede oldukları durumda ise B uçağının  $15^\circ$  yatış açısı ile kendi sağına dönüp A uçağının düz gittiği manevra çözüm önerisi olarak seçilmiştir. Bu manevrada B

uçağının baş açısındaki toplam değişim  $30,40^\circ$  ve uçaklar arası minimum ayırma mesafesi de 10,47 Nmi olarak hesaplanmıştır.

Dikey eksen çözüm önerisi belirleme sürecinde her bir çarpışma durumu üç farklı mesafeye göre değerlendirilmiştir. Bu mesafeler çarpışmaya 10 Nmi, 7 Nmi ve 4 Nmi kala olarak belirlenmiştir. Uçakların yörüngelerinin kesiştiği durum değerlendirildiği zaman bütün manevraların uçaklar arasındaki minimum ayırmayı sağladığı görülmüştür. Bu manevralardan çözüm önerisi olarak A uçağının çarpışma noktasına 10 Nmi kala 670 feet/dakika hız ile yükselmeye başladığı manevra en uygun çözüm önerisi olarak seçilmiştir. Uçakların karşılıklı olarak birbirlerine yaklaştığı durum değerlendirildiği zaman sadece B uçağının yaptığı iki manevra uçaklar arasındaki gerekli olan minimum ayırmayı sağlamıştır. Bu manevralardan çözüm önerisi olarak B uçağının çarpışma noktasına 10 Nmi kala 807 feet/dakika hız ile yükselmeye başladığı manevra en uygun çözüm önerisi olarak seçilmiştir. Uçakların aynı yörüngede oldukları durum değerlendirildiği zaman bütün manevraların uçaklar arasındaki minimum ayırmayı sağladığı görülmüştür. Bu manevralardan çözüm önerisi olarak A uçağının çarpışma noktasına 10 Nmi kala 670 feet/dakika hız ile yükselmeye başladığı manevra veya B uçağının çarpışma noktasına 10 Nmi kala 801 feet/dakika hız ile yükselmeye başladığı manevra en uygun çözüm önerisi olarak seçilebilmektedir.

Uçakların uyguladıkları çözüm önerileri sonrasında bir daha çarpışma ihtimali gözlenmemiştir. Test edilen çözüm önerilerinin sonuçlarına bakıldığında tasarlanan algoritmanın başarılı bir şekilde çalıştığı gözlemlenmiştir. MATLAB yardımıyla elde edilen grafiklerde ise simülasyon sonuçları daha etkili bir şekilde görülmüştür. Tasarlanan bu algoritma ileride bu konu hakkında başka çalışmaların yapılmasına imkân sağlayacaktır.

## KAYNAKÇA

- [1] Lee C. Yang, James K. Kuchar, "Prototype Conflict Alerting System for Free Flight", American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1997.
- [2] RADIO TECHNICAL COMMISSION FOR AERONAUTICS, *Final report o/ the RTCA board o/directors' select committee on flee flight*, Tech. Report Issued 1-18-95, RTCA, Washington, DC, 1995.
- [3] Gibbs, W. W.: Free for All Flights-The FAA Plans a Revolution in Air-Traffic Control. *Sci. Amer.*, vol. 273, no. 6, Dec. 1995, pp. 34-36.
- [4] Erzberger, Heinz. *Automated conflict resolution for air traffic control*. [National Aeronautics and Space Administration], Ames Research Center, 2005.
- [5] Erzberger, Heinz, and Karen Heere. "Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 224.2 (2010): 225-243.
- [6] Krozel, J. and Peters, M., "Conflict Detection and Resolution for Free Flight", *Air Traffic Control Quarterly Journal*, Special Issue on Free Flight, 1997.
- [7] Erzberger, Heinz, and Karen Heere. "Algorithm and operational concept for resolving short-range conflicts." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering* 224.2 (2010): 225-243.
- [8] Murugan, Sathyan, and Aniruth A. Oblah. "TCAS Functioning and Enhancements." *International Journal of Computer Applications* 1.8 (2010): 46-50.
- [9] Munoz, César, Anthony Narkawicz, and James Chamberlain. "A TCAS-II Resolution Advisory Detection Algorithm." *Proceedings of the AIAA Guidance Navigation, and Control Conference and Exhibit*. 2013.
- [10] Williamson, T.; Spencer, N.A., "Development and operation of the Traffic Alert and Collision Avoidance System (TCAS)," *Proceedings of the IEEE*, vol.77, no.11, pp.1735, 1744, Nov 1989
- [11] Paielli, Russell A. "Tactical conflict resolution using vertical maneuvers in en route airspace." *Journal of Aircraft* 45.6 (2008): 2111-2119.
- [12] Paielli, Russell A. "Evaluation of Tactical Conflict Resolution Algorithms for Enroute Airspace." *Journal of Aircraft* 48.1 (2011): 324-330.

- [13] Bilimoria, Karl D. "Survey of Air/Ground and Human/Automation Functional Allocation for Separation Assurance." *12th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference and 14th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, September 2012
- [14] Lauderdale, Todd. "Probabilistic Conflict Detection for Robust Detection and Resolution." *AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference, Indianapolis, IN. 2012.*
- [15] Dennis, Gregory D. *TSAFE: Building a trusted computing base for air traffic control software*. Diss. MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2003.
- [16] Erzberger, Heinz. "The automated airspace concept." *4th USA/Europe Air Traffic Management R&D Seminar*. 2001.
- [17] Prandini, Maria, et al. "A probabilistic approach to aircraft conflict detection." *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on* 1.4 (2000): 199-220.
- [18] Blom, Henk AP, and G. J. Bakker. "Conflict probability and incrossing probability in air traffic management." *Decision and Control, 2002, Proceedings of the 41st IEEE Conference on*. Vol. 3. IEEE, 2002.
- [19] Paielli, R.A. and H. Erzberger, "Conflict probability estimation for free flight", *AIAA J. of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 20, 1997, pp. 588-596.
- [20] Paielli, R.A and H. Erzberger, "Conflict Probability Estimation Generalised to Non-Level Flight", *Air Traffic Control Quarterly*, Vol. 7, pp. 195-222, 1999.
- [21] Frost & Sullivan, "ATC: Problems to be solved", *The Journal Of Global Airspace Avionics Magazine*, 34-36, 2001.
- [22] Kuchar, J. E., and Ann C. Drumm. "The traffic alert and collision avoidance system." *Lincoln Laboratory Journal* 16.2 (2007): 277.
- [23] EUROCONTROL, "Airborne Collision Avoidance System II (incorporating version 7.1) GUIDE ", January 2012.
- [24] P. K. Menon, G. D. Sweriduk and B. Sridhar, "Optimal Strategies for Free Flight Air Traffic Conflict Resolution", *Optimal synthesis*, 1997.

- [25] M. Ghasemi Hamed, D. Gianazza, M. Serrurier, N. Durand, "Statistical prediction of aircraft trajectory: regression methods vs point-mass model", ATM 2013, 10th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar, Chicago: United States (2013).
- [26] Kwang-Yeon Kim, Jung-Woo Park, Min-Jea Tahk, "A Probabilistic Algorithm for Multi-aircraft Collision Detection and Resolution in 3-D", KSAS International Journal, Vol 9, No. 2, November 2008.
- [27] Bilimoria, Karl D. "A geometric optimization approach to aircraft conflict resolution." *AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit*. Reston, VA: AIAA, 2000.
- [28] Kim, Youngrae, et al. "A Development of 3-D Resolution Algorithm for Aircraft Collision Avoidance." *International Journal of Aeronautical and Space Sciences* 14.3 (2013): 272-281.
- [29] A.Nilim, L.Ghaoui, and V.Duong, "Robust dynamic routing of aircraft under uncertainty," 21<sup>st</sup> IEEE Digital Avionics Systems Conference, Irvine, CA, October 2002.
- [30] T.S. Mastrapostolis, P.G. Michaelides, and S.D. Fassois, "Short-Term Probabilistic Conflict Detection for PPlane Vehicles via Adaptive Time Series Modeling" AUVSI Isreal International Conference, 2012.
- [31] J. Kuchar and L. Yang, "Survey of conflict detection and resolution modeling methods," in *Proc. AIAA Guidance, Navigat, Contr. Conf.*, New Orleans, LA, Aug. 1997, AIAA-97-3732.
- [32] Doc, I. C. A. O. "4444" Procedures for Air Navigation Services." *Air Traffic Management* <http://www.paris.icao.int/or www.Icao.Int>. (2001)
- [33] Doc, I. C. A. O. "Annex 2" "Rules of the air" International standards [http://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/an02\\_cons%5B1%5D.pdf](http://www.icao.int/Meetings/anconf12/Document%20Archive/an02_cons%5B1%5D.pdf). Icao.Int.(2005)