

**UYARLAMALI SİNİRSEL BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE  
HAVA MUHAREBESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

**AIR COMBAT IMPLEMENTATION USING ADAPTIVE  
NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM**

**MUSTAFA KARLI**

**PROF.DR. MEHMET ÖNDER EFE**  
Tez Danışmanı

**PROF.DR. HAYRİ SEVER**  
İkinci Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin  
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü  
DOKTORA TEZİ olarak hazırlanmıştır.


2018

**Mustafa KARLI'nin hazırladığı "Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi ile Hava Muharebesinin Gerçekleştirilmesi" adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI'ında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.**

Dr. Murat AYDOS  
Başkan



Prof. Dr. Mehmet Önder EFE  
Danışman



Doç. Dr. Tolga GİRİCİ  
Üye



Dr. Tayfun KÜÇÜKYILMAZ  
Üye



Dr. Adnan ÖZSOY  
Üye



Bu tez Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **DOKTORA TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Menemşe GÜMÜŞDERELİOĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## YAYINLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/raporumun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Hacettepe üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

- Tezimin/Raporumun tamamı dünya çapında erişime açılabilir ve bir kısmı veya tamamının fotokopisi alınabilir.**  
(Bu seçenekle teziniz arama motorlarında indekslenebilecek, daha sonra tezinizin erişim statüsünün değiştirilmesini talep etmeniz ve kütüphane bu talebinizi yerine getirirse bile, tezinin arama motorlarının önbelleklerinde kalmaya devam edebilecektir.)
- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını ve fotokopi alınmasını (İç Kapak, Özet, İçindekiler ve Kaynakça hariç) istemiyorum.**  
(Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin/raporumun tamamı her yerden erişime açılabilir, kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı ve ya tamamının fotokopisi alınabilir)
- Tezimin/Raporumun ..... tarihine kadar erişime açılmasını istemiyorum, ancak kaynak gösterilmek şartıyla bir kısmı veya tamamının fotokopisinin alınmasını onaylıyorum.**
- Serbest Seçenek/Yazarın Seçimi**

29 / 05 / 2018

  
MUSTAFA KARLI

## ETİK

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı beyan ederim.

29 / 05 / 2018

  
MUSTAFA KARLI

## ÖZET

### UYARLAMALI SİNİRSEL BULANIK ÇIKARIM SİSTEMİ İLE HAVA MUHAREBESİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

**Mustafa KARLI**

**Doktora, Bilgisayar Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mehmet Önder EFE**

**İkinci Tez Danışmanı: Prof. Dr. Hayri SEVER**

**Mayıs 2018, 86 sayfa**

Hava araçlarının insandan bağımsız olarak tam otonom kontrolü çok sayıda alt seviye parametrelerin kontrolünü gerektiren doğrusal olmayan karmaşık bir problemdir. İnsansız hava araçlarının tam otonom olarak belirli bir uçuş rotasını takip ettiği, iniş ve kalkış yaptığı çözümler bulunmaktadır. Fakat yakın hava muharebesinde enerjinin korunması, rakip uçağa karşı avantajlı konumun elde edilmesi, bağıl geometriye göre ilave değişkenlerin kontrolü ve sürekli değişen rota gibi farklı hedef davranışları da hesaplama katma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Bu ihtiyaç kontrol problemini alana özgü ve karmaşık hale getirmektedir. Hava araçlarını tam otonom hale getirmek, insanoğluna insansız hava araçlarını otonom hava muharebesi amaçlı kullanma olanağı sunmaktadır. Hava muharebesinin tehlikeli, pahalı ve zor öğrenilen bir görev olması nedeniyle, bilgisayarlara uzman savaş pilotlarının tecrübelerini kullanarak makine öğrenmesi teknikleriyle tam otonom savaşmayı öğretmek faydalı görülebilir. Böyle bir çalışma pilot eğitime destek amaçlı olarak da kullanılabilir. Bu tez çalışmasında insansız bir hava aracının insanların yerine savaşması için adım adım bir yöntem önerilmiştir. Çalışmada önce alt seviyedeki uçuş kontrolünü üst seviyedeki uçuş zekâsından ayıran soyutlama katmanları tanımlanmıştır. Böylece uçağın kontrol yönteminden bağımsız olarak hava muharebesi sorununa odaklanmak mümkün olmuştur. Karmaşık ve işlemesi güç uçuş verisini insan ve makine tarafından okunabilen ve kolayca anlaşılır bir

yapıya dönüştüren bir teknik tanımlanmıştır. Bu yöntem yüksek miktarda uçuş verisinin işlenmesini kolaylaştırmakta, uçuş kontrol parametre sayısını azaltmakta ve uçak manevrasına ortak anlayış birliği getirmektedir. Yöntem ayrıca uçuş dili için dizinleme ve arama araçları da içermektedir. Devamında hava muharebesi manevralarının uçuş dilinde nasıl tanımlanacağı gösterilmiş, gerçek F-16 uçuş verileri kullanılarak bağıl geometri ve manevra sınıflandırma yönteminin de olduğu makine öğrenme verisi oluşturulmuştur. Öğrenme verisi çokça kullanılan tüm savaş manevralarını örnekleyecek ve eğitimini sağlayacak kadar tam bir çözüm örneği değildir. Fakat önerilen yöntemin doğru çalıştığını gösterecek ve kavramın ispatını sağlayacak kadar örnek savaş senaryosu içermektedir. Yakın hava muharebesinde kullanılacak makine öğrenmesi teknikleri hakkında kısa bir özet ve karşılaştırma verilmiş, örnek olarak bir ANFIS tasarımı yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** uçuş bölümlenme, temel savaş manevraları, hava muharebesi, makine öğrenmesi, ANFIS, otonom uçuş, bilgi teorisi, uçuş zekâsı.

# **ABSTRACT**

## **AIR COMBAT IMPLEMENTATION USING ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM**

**Mustafa KARLI**

**Doctor of Philosophy, Department of Computer Engineering**

**Supervisor: Prof. Dr. Mehmet ÖNDER EFE**

**Co-supervisor: Prof. Dr. Hayri SEVER**

**May 2018, 86 pages**

Autonomous control of aerial vehicle is a non-linear problem that requires low level robust control of many parameters. There are solutions to control an unmanned aircraft to follow a flight path, take-off and landing. In case of close range air combat there are additional objectives like preserving aircraft energy, getting to an advantageous position over the opponent, consider controlling of relative variables, instantly changing trajectory requirements. This makes control problem domain specific and very complex. With fully autonomous aerial vehicles man-kind can also take advantage of using UAV for air combat. While air combat is a dangerous, expensive and difficult activity, computers can be trained by using human combat fighters experience with machine learning techniques. Computers can also be used to support pilot training process. In this thesis, a step by step methodology is proposed to train an unmanned aircraft to fight on behalf of human. An abstraction stack is defined to isolate low level robust control of aircraft from flight intelligence. This approach allows us to focus on air combat problem independent from flight control techniques. A technique is defined to decompose complicated and hard to process flight information into machine and human readable and easily understandable format. This technique eases processing of huge amount of flight data, decreases the number of control parameters and brings a common understanding of aircraft maneuvering. The technique also includes indexing and

search mechanism on flight language. It is shown how to compose air combat maneuvers using flight language. A machine learning corpus data is composed from real F-16 flight information including relative geometry and maneuver identification methodology. The sample data is not a complete solution to train widely used combat maneuvers. But as a proof of concept it is shown that the technique works fine for sample scenarios. A comparison and brief information on machine learning techniques specific to close range air combat problem is given and an ANFIS design is applied as example.

**Keywords:** flight parsing, basic fighter maneuvers, air combat, machine learning, ANFIS, autonomous flight, information theory, flight intelligence



## TEŐEKKÖR

Bu alıőmanın yapılmasında sevgili eőim ve ocuklarım, tez danıőmanlarım sayın Prof. Dr. Mehmet Önder EFE, Prof. Dr. Hayri SEVER, önceki alıőmaları ile yol gösteren bilim insanları ve Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü Otonom Sistemler Laboratuvarı çalıőanlarına teşekkür ederim.

# İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	iii
TEŞEKKÜR .....	v
İÇİNDEKİLER .....	vi
ÇİZELGELER .....	viii
ŞEKİLLER .....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR .....	xi
1 Giriş .....	1
1.1 Problem Alanları .....	5
1.1.1 Hava Savaşı Modellemesi .....	6
1.1.2 Soyutlama .....	6
1.1.3 Veri Toplama .....	6
1.2 Mevcut Çalışmalar .....	7
1.3 Çalışmanın Katkıları .....	14
2 Hava Muharebesi .....	16
2.1 Hava Platformu .....	16
2.1.1 Temel Fizik Kuralları .....	17
2.1.2 Kontrol .....	19
2.2 Temel Savaş Manevraları .....	20
2.2.1 Enerjinin Korunması .....	21
2.2.2 Bağlı Geometri .....	21
2.2.3 Alan Bilgisi .....	24
3 Yöntemler .....	25
3.1 Soyutlama .....	25
3.1.1 Kontrol Sistemi .....	26
3.1.2 Uçuş Denetleyicisi .....	27
3.1.3 Hareket Seviyesi .....	27
3.1.4 Manevra Seviyesi .....	27
3.1.5 Taktik Seviye .....	28
3.1.6 Stratejik Seviye .....	28
3.2 Veri Çözümleme .....	30
3.2.1 Veriyi Elde Etme .....	30
3.2.2 Hareket Tanımlama .....	32
3.2.3 Manevra Tanımlama .....	37
3.2.4 Düzgünleştirme .....	38
3.2.5 Hareket Belirleme .....	40
3.3 Dizin ve Arama .....	41
3.3.1 Sıralı Arama .....	42
3.3.2 Sonlu Durum Makinesi .....	42
3.3.3 Sepet Dizini .....	43
3.4 Makine Öğrenmesi .....	45
3.4.1 Öğreticili Öğrenme .....	45
3.4.2 Öğreticisiz Öğrenme .....	46
3.4.3 Pekiştirilmiş Öğrenme .....	46
3.4.4 Hava Muharebesinde Makine Öğrenmesi .....	47
3.4.5 ANFIS Tasarımı .....	56
3.4.6 Eğitim .....	67
3.4.7 Test .....	68

3.5	Test Sonuçları .....	73
3.5.1	Veri özümleme .....	73
3.5.2	Manevra Tespiti .....	79
4	Sonuçlar .....	81
4.1	Kullanım alanları .....	81
4.1.1	Pilot Performans Değerlendirmesi .....	82
4.1.2	Bilgisayar Destekli Hava Muharebesi .....	82
4.1.3	İHA Savaş Eğitimi .....	83
KAYNAKLAR .....		84
ÖZGEÇMİŞ .....		89

## ÇİZELGELER

<b>Tablo 1.</b> Hareket Kipleri .....	33
<b>Tablo 2.</b> Örnek Manevra Hareketleri .....	37
<b>Tablo 3</b> Veri Düzgünleştirme Örneği .....	39
<b>Tablo 4.</b> Açık Sınıflandırma Matrisi .....	41
<b>Tablo 5.</b> Sepet Dizini İkili Sıralaması .....	43
<b>Tablo 6.</b> Bulanık Kümeler ve Üyelikler .....	58
<b>Tablo 7.</b> Nihai Kural Listesi .....	63
<b>Tablo 8.</b> Durulaştırma Denklemleri .....	67

## ALGORİTMALAR

Algoritma 1. Uçuş Kaydı Etiketleme .....	44
Algoritma 2. Manevra Etiketleme.....	44
Algoritma 3. Manevra Eşleme .....	45

## ŞEKİLLER

Şekil 1. Kaldırma Kuvveti .....	17
Şekil 2 Dikey Kuvvetler.....	18
Şekil 3. Yatay Kuvvetler .....	18
Şekil 4 Uçak Kontrolü .....	20
Şekil 5 Bağlı Pozisyon Geometrisi.....	22
Şekil 6 Soyutlama Yiğiti .....	27
Şekil 7 Düz Uçuş .....	34
Şekil 8 Dönüş .....	34
Şekil 9 Tırmanma .....	35
Şekil 10 Yön Değiştirme .....	35
Şekil 11 Yatış .....	36
Şekil 12 Yatan Tırmanış .....	36
Şekil 13 Microsoft Makine Öğrenmesi Algoritma Seçimi [64] .....	48
Şekil 14 Kesikli Küme .....	51
Şekil 15 Üçgensel Küme .....	51
Şekil 16 Yamuk Küme .....	51
Şekil 17 Kuadratik Küme .....	52
Şekil 18 Gaus Küme.....	52
Şekil 19 Çan Eğrisi .....	52
Şekil 20 Bulanık Denetleyici .....	53
Şekil 21 ANFIS Mimarisi.....	55
Şekil 22 Çok Çıkışlı ANFIS Mimarisi .....	56
Şekil 23 Tırmanma Açısı Sınıfları .....	59
Şekil 24 Kuyruk Takip Açısı Sınıfları .....	60
Şekil 25 Baş Kesişim Açısı Sınıfları.....	60

Şekil 26 Örnek Kıırma Manevrası.....	70
Şekil 27 Açılar .....	71
Şekil 28 Tırmanma Denetimi .....	71
Şekil 29 Yatış Denetimi .....	72
Şekil 30 Dönüş Denetimi .....	72
Şekil 31 Barrel Roll Attack.....	73
Şekil 32 Zamana göre aradaki mesafe - 1.....	74
Şekil 33 Zamana göre aradaki mesafe - 2.....	75
Şekil 34 Zamana göre aradaki mesafe - 3.....	75
Şekil 35 Zamana göre aradaki mesafe - 4.....	76
Şekil 36 Zamana göre kuyruk açısı ( $\eta$ ) değişimi - 1.....	76
Şekil 37 Zamana göre kuyruk açısı ( $\eta$ ) değişimi - 4.....	77
Şekil 38 Hareket kipi seçimi - 1 .....	77
Şekil 39 Hareket kipi seçimi - 2 .....	78
Şekil 40 Hareket kipi seçimi - 3 .....	78
Şekil 41 Hareket kipi seçimi - 4 .....	78

## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

$T$	: İtki (newton)
$L$	: Kaldırma (newton)
$D$	: Sürtünme (newton)
$m$	: Kütle (kg)
$F$	: Kuvvet (newton)
$x$	: Kuzey (metre)
$y$	: Doğu (metre)
$z$	: İrtifa (meter)
$v$	: Hız (m/s)
$a$	: İvme (m/s <sup>2</sup> )
$g$	: Yer çekimi (kg m/s <sup>2</sup> )
$\gamma$	: Dikey uçuş açısı
$\chi$	: Yatay uçuş açısı
$\theta$	: Yunuslama açısı
$\Phi$	: Yatış açısı
$\Psi$	: Baş açısı
$\alpha$	: Saldırı açısı
$\beta$	: Savrulma açısı
$P$	: Yatış açısında değişim
$Q$	: Yunuslama açısında değişim
$R$	: Baş açısında değişim
$M$	: Moment (newton metre)
$r$	: İki uçak arasında mesafe
$\eta$	: Kuyruk takip açısı
$V_c$	: Yaklaşma hızı ( $\Delta r$ )
$\lambda$	: Baş kesişim açısı

## **Kısaltmalar**

DVM	: Destek Vektör Machine
İHA	: İnsansız Hava Aracı
GMI	: Görüş Mesafesi İçinde
GMD	: Görüş Mesafesi Dışında
TSM	: Temel Savaş Manevraları

## **İngilizce Kısaltmalar**

ADP	: Approximate Dynamic Programming
AML	: Adaptive Maneuvering Logic
ANFIS	: Adaptive Neuro Fuzzy Inference System
BVR	: Beyond Visual Range
DFA	: Deterministic Finite Automata
G	: Gravity
GB	: Gigabyte
HDFS	: Hadoop Distributed File Systems
MB	: Megabyte
MIMO	: Multiple Input Multiple Output
M&R	: Map and Reduce
NASA	: National Aero Space Agency
PID	: Proportional Integrator Deviator
SISO	: Single Input Single Output
SMC	: Sliding Mode Controller
TDG	: Tactical Decision Generator
WVR	: Within Visual Range



# 1 GİRİŞ

Robotik cihazlar öncelikli olarak insanlar tarafından yapılması zor, pahalı, tehlikeli veya sıkıcı işlerin yapılmasında kullanılmaktadır. Hava muharebesi söz konusu olduğunda ise İnsansız Hava Araçları (İHA) etkinliği yadsınamaz savaş silahları olarak ön plana çıkmaktadır. Birçok ülke İHA'ları keşif, gözetleme, rota izleme, istihbarat ve harekât sonu hasar tespit gibi askeri alanlarda, yangın söndürme, ulaştırma, reklam ve televizyonculuk gibi sivil alanlarda kullanmaktadır.

Literatürde insanlı hava araçları için çok sayıda otonom hareket kabiliyeti, çoklu savaşçıların bütünleşik hareket kabiliyeti, pilota yardımcı olmak amacıyla çoklu algılayıcı füzyonu, hava resminin analizi, karar ağaçlarının yorumlanması gibi alanlarda yayınlanmış eserler bulunmaktadır. İHA'lar günlük hayatın birçok alanına kullanılmakta, ticari olarak akıllı veya insan güdümlü varlıklarını hızla artırmaktadır. Ancak kontrolün tamamen İHA'ya verildiği tam otonom platformlarda yorumlama, hızlı karar verme, diğer platformlarla eş güdümlü hareket etme ve düşmanı yok etmeye yönelik manevraların uygulanması, özetle İHA'ların tam otonom ve kendi kendine karar veren bir silah olarak kullanılması, literatürde yeni çalışılmaya başlanmış ve henüz gerçek hayatta uygulanmamış bir konudur. İHA insan biyolojisinin getirdiği kısıtlara tabi olmadığından insanlı araçlara uygulanan manevra kısıtlarından bağımsız hareket edebilmektedir. İnsan hayatını tehlikeye atmadığı için riskli görülen işler can kaybı endişesi duyulmadan yapılabilmektedir. İnsanlı araçlarda insanın yaşam desteği için gerekli alan ve bu alanda kullanılan teçhizatın getirdiği yükten kurtulmak ayrıca ilave hareket kabiliyeti sağlamaktadır. İHA'lar askeri alanda çok az ülke tarafından doğrudan muharebe aracı olarak kullanılmakta, geliştirilen sistemlere ait kritik teknolojiler milli güvenlik konusu sayılarak milli sır kapsamında gizli tutulmaktadır. Tam anlamıyla otonom savaşan bir İHA ise henüz tasarlanmamıştır. Bu konuda teknoloji yanında konunun hukuki boyutu da henüz uluslararası platformlarda karara bağlanmamıştır.

Konunun hukuki sorumluluk boyutu göz ardı edilecek olursa, tam otonom İHA aşağıdaki kısıtlar nedeniyle bir ihtiyaçtır.

- Yerden kontrol, kısıtlı sürede karar verilmesi gerektiğinde veya uçak sinyal iletişim bölgesi dışına çıkılması durumunda silahın etkinliğini ortadan kaldıracaktır. Bu uçan bir silah için çok olası bir durumdur. Hava

muharebesinde birbir eşleme sağlanıp yakın kapışma durumuna geçildiğinde karar süreleri saniyeler, bazen saniyenin altında sürelere inmektedir. Yerdeki bir kumanda merkezinde bir manevraya karar verilmesi, bu kararın İHA'ya iletilmesi, alınan bilginin yorumlanması, sisteme kumanda edecek sinyallere dönüştürülmesi ve sistem dinamiklerinin buna uygun hale gelmesinin beklenmesi, kritik bir kararın zamanında uygulanmasını geciktirmekte, her durumda uçuş platformunda bir insanın varlığını zorunlu kılmaktadır.

- Eğitimli savaş pilotlarını yetiştirmek için çok uzun süre ve kaynağa ihtiyaç vardır. Buna rağmen bilgi sistem desteği alınan kararlarda davranışların hassas ayarında çok yardımcı olmaktadır. Yerden kumanda durumunda karar almada bilgisayar gücünün kullanılmasının etkinliğinden faydalanılmamaktadır.
- İnsanlı savaş araçlarında uçak başına bir pilot ihtiyacı ortaya çıkmakta, sürü halinde ve bolca İHA kullanımını insan sayısı ile kısıtlamaktadır. Uçağı silah olarak kullanmak ise normal uçuş eğitimi dışında, belki daha fazla ve farklı bir disiplinde eğitim gerektirmekte, bu da insan faktörüne bağımlılığı devam ettirmektedir.

İt dalaşı savaş pilotları için yüksek derecede tehlikeli ve ölümcül bir savaş tekniğidir. Hava savaşlarında teknoloji ne kadar ileri giderse gitsin yakın hava muharebesi hiçbir zaman önemini kaybetmeyecektir. Buna örnek olarak savaş uçağı üretim süreci incelenebilir. İkinci dünya savaşı sonrasında ABD hükümeti tarafından silah üretim sürecinde füze teknolojilerinin çok ileri gittiğı, yakın hava muharebesine artık ihtiyaç olmadığı, gelecekte hava savaşlarında uzak hamlelerin yapılacağı, en iyi füze teknolojilerine sahip olan tarafın galip geleceğı görüşü hâkim olmuştur. Bu görüş doğrultusunda 1955 yılında tasarlanan F-4 savaş uçaklarında uçaksavar topu yer almamıştır. Fakat uçak üretimi sonrasında teknik hususların basit olmadığı anlaşılmıştır. Füze teknolojileri ile birlikte füzeden savunma teknikleri de aynı hızda ilerleme sağlanmış, yakın hava muharebesindeki üstünlüğün önemi ortaya çıkmıştır. Bunun sonucu olarak F-4 uçaklarının gövde dinamiklerinden feragat etmek pahasına dışarıdan uçaksavar topu eklenmiştir.

Daha sonraki yıllarda ise yakın hava muharebesi için gerekli silahların yanı sıra uçağın manevra kabiliyetlerindeki üstünlüğü ön plana çıkmıştır. Bunlar dönüş

yarıçapı kısalığı, sürtünme, ses üstü hız limitleri, havada kalış süresi gibi özellikler olarak ön plana çıkmaktadır. Son olarak 2007 yılında aralarında Türk Hava Kuvvetlerinin de bulunduğu 9 ülke askeri servislerin ortak katkısı ile F-35 Joint Strike Fighter uçağının üretim süreci başlamıştır. Uçağın düşük görünülük, bilgi işlem, mühimmat kapasitesi, dikey kalkış, üstün manevra kabiliyetleri gibi 5'inci nesil jet savaşçısı özelliklerine rağmen gövde içine uçaksavar topu eklenmesine karar verilmiştir. Bu karar yakın hava muharebesi olarak da adlandırılan it dalaşının hiçbir zaman önemini kaybetmeyeceği, her zaman en son vuruşu yaparak rakibi yok edenin galip geleceği gerçeğini açıkça desteklemektedir.

Yetkin bir savaş pilotunun eğitimi uzun yıllar almakta ve bu yüksek maliyetler ile mümkün olmaktadır. Temel subay eğitimini 4 yılda tamamlayan bir asker 2 yıl süren bir eğitim sonunda pilot olabilmektedir. Buna 1 yıl uzmanlaşacağı uçak modelindeki eğitimi eklendiğinde 7 yıl içinde bir jet pilotuna sahip olmak mümkündür. Uçağın silah olarak kullanılması ise pilot eğitimi dışında bambaşka bir eğitim süreci gerektirmektedir. Burada 2 yıl boyunca temel savaş manevraları, 1 yıl yakın hava muharebesi, 2 yıl silah taktikler eğitimi süreci eklendiğinde harbe hazır bir savaş pilotunun yetişme süresi, parasal maliyetinin yanında okula girişten itibaren 12 yıl olarak karşımıza çıkmaktadır. Yakın hava muharebesinde iki pilottan birinin kaybedileceği göze alındığında bu çok yüksek bir maliyettir.

Savaş uçakları insan biyolojisinin dayanabileceğinin üzerinde manevra kabiliyetlere sahiptir. Örneğin en yetkin pilotların bile dönüş performansı olarak 9G kuvveti üzerine dayanmaları biyolojik olarak mümkün değildir. Fakat F-16 uçağı bunun çok üzerinde bir dönüş performansına sahiptir. Uçağı zorlayarak yapılan manevralar nedeniyle bayılmış ve hayatını kaybetmiş pilotların olduğu örnekler bulunmaktadır.

Otonom savaştan söz edildiğinde yakın hava muharebesi öğrenilmesi kaçınılmaz ve kazananı belirleyen manevraları içermektedir. Bu nedenlerle, yakın hava muharebesi manevralarının İHA araçlarına öğretilmesi tam otonom bir savaş aracının üretilmesi için kritik ihtiyaç olarak ön plana çıkmaktadır.

Yapay olarak bir uçağı güvenli ve güvenilir bir şekilde kontrol etmenin zorlukları vardır. Dünya atmosferi ve yerçekimi etkisi problemi güçleştiren etmenlerdir. Uçuş dinamikleri, yüzeysel katsayılar, gövde test sonuçları, gece, gündüz, mevsim, yağış, sıcaklık, nem, irtifa, kütleinin değişkenliği gibi çok sayıda denklem de eklenince havada uçan sabit kanatlı bir nesnenin kontrolü oldukça karmaşık bir hal almaktadır.

Uçuş kontrolünü gürbüz, güvenilir, beklenmedik durumların üstesinden gelebilen, hiçbir zaman zaman belirsiz duruma düşmeyen bir yöntemle kontrol eden çok sayıda bilimsel çalışma bulunmaktadır. Uçuşun otonom olarak kontrolünü sağlayan bilimsel çalışmalar ilerleyen bölümlerde örneklerle özetlenmiştir.

Hava muharebesi gibi uçuş kontrolü ile doğrudan ilgili olmayan bir alanı da probleme dâhil ederek uçuş kontrolünü daha da karmaşık hale getirmek kaçınılması gereken bir durumdur. Uçuş zekâsını uçuş kontrolü dışında değerlendirmek, alt seviyedeki uçuş kontrolünü soyutlamak gerekir.

Uçuş zekâsının bir parçası olarak ele alabileceğimiz savaş zekâsını uçuş kontrolünden soyutlamanın aşağıdaki faydaları vardır.

- Savaş zekâsı uçuş kontrolünden bağımsız olarak ele alınabilmektedir. Uçak hangi yöntemle kontrol edilirse edilsin, geliştirilen savaş zekâsı her yöntemle kullanılabilir.
- Savaş zekâsı aynı zamanda kullanılan uçuş platformundan (uçaktan) da bağımsız hale gelmektedir. Platform performansı parametrik olarak tanımlandıkça savaş taktikleri aynıdır.
- Uçuş kontrolü alana özel hale gelmeden özgürce tasarlanabilmektedir.

Hava muharebesinin amacı, uçağı düşmanı vurabilecek bir pozisyona taşıyarak silahını ateşlemek veya düşmanın vuruş avantajının olduğu pozisyondan uzaklaşarak düşman silahından sakınmak olarak açıklanabilir. Birçok uçuş kontrol yönteminde uçağın tanımlanan bir rotayı takip edeceği ön görülmüştür. Kontrol problemi verilen yol noktalarını takip edebilmek olarak ele alınmaktadır. Hava savaşı söz konusu olduğunda bu doğru bir yöntem değildir. Burada amaç pozisyon, önceden tanımlı bir rotadan çok diğer uçağa göre bağıl pozisyona bağlıdır. Bu nedenle yalnız kendi durumu değil, düşman uçağı ve diğer çevresel faktörler de anlık olarak izlenmeli ve hesaplama sürecine dâhil edilmelidir. Süre kısıtları değerlendirildiğinde rota girdisi ile kontrol yöntemleri değerlendirme dışı kalmaktadır.

Uçuş kontrolünü rota değil, uçuş hareketleri olarak ele alan kontrol teknikleri hava muharebesi açısından daha doğru bir yöntemdir. Bu ihtiyaç yalnız hava savaşı değil, eşzamanlı dost uçak hareketleri olarak ele alınan formasyon uçuşları, koordineli harekât veya tek başına hava yer görevleri için de gerekli bir durumdur. Pilotlar uçuş

eğitimini rota takibi olarak değil, manevraları doğru yapmak olarak öğrenmektedir. Öyleyse insansız uçaklara da rota takibi değil manevraları öğretmek doğru bir yöntem olacaktır.

Yapay zekâ teknikleri kullanarak makinaları eğitmek amacıyla farklı teknikler kullanılsa da, bu tekniklerin ortak ihtiyaçları bulunmaktadır. Bunlar öncelikle öğrenme ihtiyacını tanımlamakla başlar. Öğrenmenin durum uzayını (state space), bunlardan hangilerinin ilk durumlar olduğunu tanımlamak gereklidir. Daha sonra bir durumdayken yapılması muhtemel “olası hareketler” (possible actions) ve “geçiş modeli” (transition model) tanımlanmalıdır. İstenen hedefe ulaşıp ulaşılmadığını belirleyen “hedef testi” (goal test) ve hareketlerin “geçiş maliyeti” (path cost) tanımlandığında yapay olarak karar süreci tanımlanabilecektir.

Diğer bir ihtiyaç ise elde etmesi daha zor olan öğrenme verisidir. Makine öğrenmesi zor ve karmaşık olan problemleri insanların geçmiş tecrübelerinden yararlanarak çözen öğrenme yöntemleri disiplindir. Fakat üç boyutlu uzayda savaşan iki makinadan öğrenme verisi elde etmek, elde edilse dahi bunu kullanmak başka zorluklara sahiptir. Öncelikle bu veriyi elde etmek hem teknik olarak, hem de hukuki olarak çok zordur. Veriyi elde etmek için uçakların içinde gömülü bulunan uçuş kayıt cihazlarına veya askeri radar sistemleri tarafından kaydedilmiş radar iz bilgilerine ulaşılmalıdır. Askeri gizlilik kuralları dikkate alındığında böyle bir bilginin akademik çalışmalara açılması oldukça zor olacaktır. Diğer zorluk ise verinin işlenmesindedir. Bir uçağın anlık durumu en az 12 değişkenden oluşmaktadır. Buna rakip uçak ile bağlı geometri verisi de eklendiğinde çok sayıda parametreyi öğrenmesi gereken bir yapay zekâ algoritmasına ihtiyaç vardır. Ayrıca bu veri insan tarafından da anlaması mümkün olmayan içeriktedir. Verinin hem insan hem de makine tarafından daha kolay anlaşılır basit bir yapıya dönüştürülmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada ortam ve rakip hakkında tam ve gecikmesiz bir bilgi sahibi olunduğu varsayılmış, bu konudaki veri toplama yöntemleri ve gecikme ihmal edilmiştir.

## **1.1 Problem Alanları**

Yakın hava muharebesi yüksek başarımı hava araçları tarafından görüş mesafesi içinde (GMI) gerçekleştirilmektedir. Manevralar çeşitli algoritmalar kullanılarak anlık kararlar ile uygulanabilir. Karar almada bilinen formülleri kullanarak manevralara karar vermek yeterli değildir.

- Yalnız bilinen teknikleri kesikli yöntemler kullanarak kodlamak yapılacak manevraları tahmin edilebilir kılmaktadır.
- Durum parametrelerinin sayısı, sayılamaz çoklukta durumun varlığını kodlama ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır.
- Sistemin güvenlik, güvenilirlik, sağlamlık gibi ihtiyaçlarını savaş mantığı ile birleştirmek tasarımı karmaşık, hantal ve hataya açık hale getirmektedir.

### 1.1.1 Hava Savaşı Modellemesi

Yukarıda özetlenen nedenlerden dolayı tam otonom bir insansız savaş uçağının tasarımı gelişmiş makine öğrenmesi yöntemlerini mecburi hale getirmektedir. Konu makine öğrenmesi olunca en önemli eğitim kaynağı olarak uzman pilotların geçmiş uçuş tecrübeleri öne çıkmaktadır. Birinci problem *“insansız uçaklara savaş pilotlarının deneyimlerini makine öğrenmesi yöntemleri ile öğretmek”* olarak tanımlanabilir. Bu problemi çözmek için öğrenme modeli tanımlanmalı, hangi makine öğrenmesi yönteminin uygun olduğu belirlenmeli, öğrenme için gerekli eğitim ve test verisi sağlanmalıdır.

### 1.1.2 Soyutlama

Savaş uçakları yüksek başarımlı manevraları gerçekleştirmektedir. Bu uçakların kontrolü hız, sağlamlık ve reaksiyon süreleri açısından diğer uçuş kontrol sistemlerinden tamamen ayrı bir karakteristiğe sahiptir. Her iki uçak da 3 boyutlu uzayda sınırsız sayıda hareket yapabildiğinden doğru harekete karar vermek yalnız uçuş kontrol mantığı dışında daha zeki öğrenme kontrol yöntemlerine ihtiyaç duymaktadır. Bu durumda *“uçuş ve savaş kontrolünün birbirinden soyutlanarak yönetimi”* ihtiyacı vardır.

### 1.1.3 Veri Toplama

Uçuş platformları çok sayıda veri kaynağından anlık olarak yüksek miktarda veriyi kaydetmektedir. Bu verinin yalnız haliyle makine öğrenmesi amaçlı kullanılması bazı sorunlar barındırmaktadır.

- Hava muharebesi yöntemlerini içeren *“veri askeri otoriteler tarafından gizli olarak değerlendirilmekte”* ve akademik amaçlı kullanılmak üzere paylaşılmamaktadır.

- Diğer bir sorun ise “elde edilen verinin makine tarafından öğrenilebilir bir yapıda olmamasıdır”. Verinin savaş zekâsının türetileceği anlamlı bir yapıya dönüştürülmesine ihtiyaç vardır.

## 1.2 Mevcut Çalışmalar

Yakın hava muharebesinin yapay olarak makineler tarafından yapılması neredeyse bilgisayar tarihi kadar eskidir. İki rakip arasında yapılan bir mücadeleyi bilgisayarlara yaptırmak denince akla ilk gelen kavramlar makine öğrenmesi, insan davranışlarının modellenmesi, oyun teorisi, katmanlı mimariler olmaktadır.

Oyun teorisinin yakın hava muharebesine uygulandığı ilk çalışma 1973 yılında Lynch tarafından yapılmıştır [3]. Çalışmada uçağın manevra ve silah kabiliyetleri de dikkate alınmıştır. Uygulanan yöntemde sıfır-toplam fonksiyonları çeşitli üstünlükler oyun teorisine dâhil edilmiştir. Uçağın hangi niteliğinin hangi durumda daha etkin olduğu, üstünlük sağlanması istenen karar aşamaları ile uçak nitelikleri (dönüş performansı, hız, ağırlık/güç oranı) arasında eşlemeler de matematiksel modellerde yer almaktadır.

Literatürde oyun teorisini kovalayan-kaçan yaklaşımı ile it dalaşına uyarlayan çözümler yer almaktadır [1]. Fakat bu çalışmada rollerin çok sık yer değiştirmesi ve kısıtlı sayıda durumu ve manevrayı kapsayabilmesi nedeniyle oyun teorisi yöntemleri kullanılmamıştır.

Lekey tarafından 1985 yılında hava savaşı için uzman sistem veritabanı tasarlanmıştır [10]. Savaş pilotunun yakın muharebeye girmeden önce kurgulaması gereken oyun planı hakkında kural tabanlı uzman sistem ile uzman sistem veritabanı arasında bütünleşme kurgulanmıştır. Tasarlanan sistem gerçek pilota yardımcı olmak amacını gütmekte, otonom uçuş amacı taşımamaktadır.

Her yöne hedef takibi yapabilen gelişmiş füze teknolojileri ve yüksek manevra kabiliyetli jet uçaklarının gelişmesi ile birlikte NASA Langley Araştırma Merkezinde hava muharebesinde yapay zekâ teknikleri geliştirilmeye başlanmıştır. Bu amaçla öncelikle yüksek sadakat düzeyli F-16 modeli geliştirilmiştir [6]. Aynı araştırma merkezinin desteği ile devamında aşağıdaki gelişmeler yaşanmıştır.

Burgin and Sidor insanlı savaş pilotlarını it dalaşı sırasında desteklemek amacıyla kural tabanlı sistem önermektedir [11]. Çalışmada algoritmanın kaynak kodları da yer almaktadır. Çalışma hava-hava muharebesi ve füzeden kaçma kurallarını

içermekte, uyarlamalı manevra mantığı kurallarını silah sistemi, uçak modeli ve performans parametrelerini dikkate alarak gerçekleştirmektedir.

McManus tarafından aynı dönemde yapılan çalışmada Fortran dilinde geliştirilen AML projesinin yönetiminin zor olduğu, kural tabanlı sistemlerin makine öğrenmesi kadar başarılı olamayacağı gösterilmiş, yapay zekâ tekniklerinin taktik karar üretici sistemlerde nasıl uygulanacağı örneklenmiştir [12].

McMahon ve Goodrich çalışmasında yapay sinir ağları tarafından bir manevranın seçilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada kural tabanlı uzman sistemler ile yapay sinir ağlarının performansı karşılaştırılmış, kural tabanlı sistemin sinir ağına dönüştürülmesi için bir yöntem de sunulmuştur [13].

Rodin ve Amin tarafından yapılan çalışma, yapay zekâ yöntemleriyle bire bir, bire çok hava muharebelerinin sinir ağları kullanarak gerçekleştirildiği ilk olgunlaşmış çalışmadır [14]. Burada ortam hakkında kısmî veya eksik bilginin olduğu ortamda hava muharebesi için gerekli rotanın sürekli yapıda üretilmesi amaçlanmıştır. Bire bir muharebede tek gizli katmanlı sinir ağı, daha karmaşık manevralarda ise iki veya daha fazla katmanlar kullanılmıştır. Giriş verisi olarak anlık pozisyon ve hız verileri değil, hız ve gövde pozisyonun büyüklük ve açısal değişimleri verilmiştir. Çeşitli yapay zekâ teknikleri karşılaştırılarak en iyi, hataya dayanıklı, gürbüz ve yüksek performanslı sonucu yapay sinir ağlarının ürettiği belirtilmiştir.

NASA Langley Araştırma Merkezi dışında literatürde yer alan diğer çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Beard, McLain ve Goodrich takımlar arası savaş senaryosu içi hiyerarşik bir model tasarlamıştır [23]. Hiyerarşik modelde savaş sahası tehdit odaklı Voronoi diyagramına [20] bölünmüştür. En alt seviyede birebir eşlemeler, yukarıya doğru rota üretici, hedef yöneticisi ve önleme yöneticisi yer almaktadır. Modüler yapıda kurulan tasarım farklı sayıda elemanı bulunan İHA takımları için hem görüş mesafesi içinde, hem de görüş mesafesi dışında koordinasyonu içermektedir.

Tran, Ajith ve Jain tarafından yapılan taktik hava muharebesi karar destek sistemi çalışmasında ANFIS yapısı kullanılmıştır [24]. Girdi değişkenleri olarak yakıt ve mühimmat durumu gibi uçuş dinamikleri ile doğrudan ilgili olmayan stratejik seviyede değişkenler de göze alınmıştır. Çalışma uçuşun kontrolünden çok üst seviyede görevlerin sınıflandırılması amacını taşımaktadır.



Andriambololona ve Lefeuvre tarafından yapılan çalışmada pilotun uçuş sırasındaki durumsal farkındalığı sorunu üzerinde durulmuştur [25]. Uçuş sırasında çok sayıda kaynaktan sürekli veri akmaktadır. Pilot veri yoğunluğu içinde hata yapma riskiyle karşı karşıya kalmaktadır. Verinin çokluğu içinde kaybolan pilota sürekli durumsal farkındalığı sağlayacak veri filtreleme ve özetleme sistemi önermekte, yapay bir insansı pilotun kendine gelen veri karşısında nasıl davranacağı modellenmektedir. Çalışmada özellikle it dalaşı sırasında insansı modelin nasıl davranacağı incelenmiş, pilotun alan bilgisi, karar alma adımları modele eklenmiştir. Modelin insansı davranışları uzun, orta ve kısa vadeli karar sürecine dâhil edilmiştir.

Nusyirwan ve Bil hava muharebesinde stokastik yöntemler kullanarak en uygun rotanın hesaplanmasını yapmıştır [28]. Çalışmada kaçan uçak evrimsel algoritma kullanarak kovalayan uçağın rotasından uzaklaşmaktadır. Evrimsel algoritmada rastgele seçilen tırmanma ve dönüş açılarının 100 saniye sonra en iyi sonuç veren ikilisi seçilmektedir.

Freed, Haris ve Shafto İHA tabanlı gezgin satıcı problemi çözümünü kullanan tam otonom kurtulma yöntemlerini ve insanlı kurtulma yöntemlerini karşılaştırmışlardır [29].

Karim ve Heinze tam otonom olmayan İHA kontrolünü daha otonom hale getirmek için erkin tabanlı iki farklı yaklaşımı çalışmışlardır [30]. İlk yaklaşımda uçuş kontrol sisteminin üzerine görev kontrolü için ilave bir seviye eklemektedir. Diğer yaklaşımda ise gözlem, uyum, karar, hareket zincirinden oluşan insansı karar modeli tabanlı otonom denetleyici önerilmiştir.

Altshuler, Yanovsky, Wagner ve Bruckstein çalışmalarında çok sayıda eşgüdümlü İHA tarafından yapılan avcılık algoritmaları tartışılmıştır [31]. Avlanan hedefleri zeki oldukları ve belli bir alanda kaçma yöntemleri uyguladıkları varsayılmış, buna göre eşgüdümlü davranan avcı İHA grubu ile tek başına davranan aynı sayıda İHA sürüsünün başarımları karşılaştırılmıştır. Aynı çalışmada şekli belirsiz olan bölgede avcılık için başka bir algoritma daha önerilmiştir.

Lent, Carpenter, McAlinden ve Tan [32] kara unsurlarında savaş taktiklerinin uygulanması için gerçek zamanlı oyun stratejilerinin kullanıldığı 2 katmanlı yapay zekâ yöntemlerini kullanmıştır. Birinci katmanda stratejik yapay zekâ kararları alınmış, ikinci katmanda çalışan yapay zekâ unsurlarını yönlendirmiştir.

İşler, Sun ve Sastry tarafından mobil robotlar arasında çarpışmadan kaçınma oyunları çalışılmıştır [33]. Çalışmada robotlar arasında paylaşılan çarpışma olasılık haritası göz önüne alınarak rota planlama yöntemleri yer almaktadır.

Konakoğlu ve Kaynak tarafından yapılan oto pilot çalışmasında İHA için enlem, boylam ve irtifasını kontrol etmek amacıyla hız, yatış acısı ve irtifasını denetleyen üç adet ANFIS temelli otonom uçuş denetleyicileri tasarlanmıştır [35]. Çalışmada ANFIS temelli denetleyicilerin başarımları PID ve Bulanık Mantık temelli denetleyicilerle karşılaştırılmıştır. ANFIS mimarisi sadece uçuş kontrolü amaçlı kullanılmış, düşman bir uçak ile muharebe veya dost bir uçak ile formasyon uçuşu öngörülmemiştir.

Virtanen çalışmasında çok sahneli etki diyagramı oyunu ile yakın hava muharebesindeki pilotun manevra kararları modellemiştir [36]. Oyun karar sürecini, uçağın dinamiklerini ve belirsizlik altında pilotun kararlarını modellemektedir. Denetim yaklaşımı hareket eden planlama ufkunu da içermektedir. Oyun her bir adım ilerlediğinde planlama ufkundaki bir sahne silinmekte, yeni sahne eklenmektedir. Çalışma kendine özgü bir grafik ara yüzü ile test sonuçları sunmaktadır. Çalışma sadece noktasal kütle üzerinde denenmiş, yüksek sadakat düzeyli veya 6 bağımsızlık düzeyinde modelde sonuçlar sunulmamıştır.

Valenti tarafından yapılan çalışmada erkin yönelimli bir çözüm sunulmuştur [37]. Çözümde bir çalışma çerçevesi tasarlanmış, otonom görev sistemi ile çok erkinli operasyonların bütünleştirilmesi hedeflenmiştir. Görev icrası sırasında en iyileme amacıyla ADP kullanarak erkinler arasında yapılan hesaplamalar paylaşılmış, çalışma zamanında çok erkin tarafından atanan görevlerin paylaşılması öngörülmüştür. Erkin olarak İHA sistemleri ele alınmış, test ortamında tasarlanan sistem gerçek İHA (quadrator) erkinleri ile denenmiştir.

Alver ve Özdoğan tarafından yapılan çalışmada farklı türdeki İHA sistemlerine gerçekçi savaş ortamında (hava şartları, arıza oranları) olası etkenler de eklenerek görev atama çalışması yapılmıştır [39]. Yapılan çalışma iş ataması ve görevin yerine getirilmesinde izlenecek tüm durum uzayı ve geçişleri gösteren bir çizge ile tam savaş ortamına uyarlanmıştır.

Tisdale tarafından yapılan çalışmada uçuş sahasındaki belirsizlikler ele alınmıştır [40]. Birden çok uçağın birlikte görev yaptığı ortamda görüş tabanlı algılama

sisteminin tanımladığı belirsizlikler uçaklar arası bir matris ile paylaşılmıştır. Olasılık değerleri ile erkinler tarafından belirsizliklere atanan tanımlamalar kıyaslanarak belirsizlik giderme yöntemleri tartışılmıştır.

Çoklu algılayıcı füzyonu Hall tarafından alan bilgisi kitabı olarak basılmıştır [41]. Algılayıcı füzyonu savunma alanında otomatik hedef tanıma, muharebe sahası keşfi, otonom araçları yönetim ve denetimi, savunma alanı dışında karmaşık mekanik, tedavi ve akıllı bina teknolojilerinde kullanılmaktadır. Çoklu algılayıcı füzyonunda yapay zekâ, desen tanıma, istatistiksel kestirim gibi yöntemler kullanılmaktadır.

Çoklu algılayıcı füzyonunda kullanılan algoritmaları inceleyen başka bir özet çalışma ise Fong, Zhuang, Huang ve Jingying tarafından yapılmıştır [42]. Çalışmada özellikle farklı uydu görüntülerinden çoklu füzyon yöntemi ile ortam çıkaran görüntü işleme yöntemleri incelenmiş, ayrıca ortamda hareketli hedeflerin tespit ve izlenmesi tartışılmıştır. Çalışmanın sonunda füzyon algoritmalarında iyileştirmeler, algoritma füzyonu yöntemleri ve otomatik kalite değerlendirme şeması önerilmiştir.

Çetin ve Kaynak tarafından ANFIS ile otonom İHA uçuş kontrol sistemi tasarlanmıştır [44]. Çalışmada İHA için üç boyutlu uzayda kontrol sağlayan otonom ANFIS denetleyiciler tanımlanmıştır. Üç boyutta pozisyonu kontrol edebilmek için tırmanma açısı, yatış açısı ve motor gücünü denetleyen üç farklı bulanık model geliştirilmiştir. Sistem verilen bir rotayı takip etmek üzere kurgulanmıştır. Sistemin başarımını gerçekçi görmek amacıyla tam bir hava görev emir rotası izlenmiştir. Sistem başka bir uçakla formasyona veya muharebeye girmesi öngörülmemiş, uçuşu tek başına gerçekleştireceği değerlendirilmiştir.

McGrew, How, Bush, Williams ve Roy hava muharebesinde kaçan-kovalayan durum sayısını çoğaltmak amacıyla yaklaşık dinamik programlama yöntemini önermektedir [45]. Önerilen yöntemde ADP teknikleri kullanılarak çok sayıda durum diyagramının önceden hesaplanmış çözümleri saklanarak dinamik programlama ile hesaplama iyileştirmesi sağlanmıştır. Böylece daha çok nitelik ve daha geniş örnekleme yapılabilmiştir.

Kerimoğlu tarafından ucuz maliyetli algılayıcı ve mikro denetleyiciler kullanılarak İHA sistemleri için otopilot sistemi tasarlanmıştır [46]. Tasarımda verilen rota

noktaları arasında uçuş sağlanmış, sistemin gürültünün ve beklenmeyen durumların üstesinden gelmesine yönelik gürbüzleştirme çalışmaları yapılmıştır.

Bry ve Roy belirsiz ortamda hareket planlaması için varsayım ağaçları üzerinde çalışmışlardır [47]. Bu amaçla doğrusal bir tahmin algoritması ve denetleyici kullanımı, aday bir rota üzerinde gelecek durum dağılımları tahmin edilerek belirsizlikler ağacı oluşmuştur. Farklı rotalardan çarpışma olasılıkları hesaplanarak en uygun güvenli rotalar elde edilmeye çalışılmıştır.

Johansen tarafından tasarlanan PID ve SMC denetleyici tabanlı otopilot verilen rotayı takip ederken tırmanma ve dönüş açılarını denetlemektedir [50]. PID denetleyicisi tırmanma, dönüş ve irtifa kontrolü için, SMC ise tırmanma ve irtifa kontrolü için uçuş simülatörü ile test edilmiş, PID denetleyicinin daha iyi sonuç verdiği iddia edilmiştir.

Heng, Tan, Yuan ve Yeo tarafından hava manevralarını öğrenen kendini organize edebilen sinir ağları çalışılmıştır [51]. Çalışmada alan bilgisi kullanılarak bir karar ağacı oluşturulmuştur. Daha sonra ağaç düzleştirilerek tek seviyeli bir kural tabanı elde edilmiştir. Bu kurallardan durum ve hareket uzayı elde edilerek alan bilgisini kullanmadan geri beslemeli yapay sinir ağı tasarlanmıştır.

Üre ve İnalhan [52] temel hava hareketlerini gerçekleyen kayar kipli kontrol sistemi önermekte, temel hareketleri kullanarak manevra inşa etmeyi örneklemektedir. Önerilen temel hareketler bu çalışmada tanımlanan hareket kiplerinin temelini oluşturmaktadır. Hareket kipleri denetlenmesi gereken uçak durum değişkenlerinin sayısını önemli sayıda azaltmakta, uçak bir kipte hareket ederken yalnız o kip içinde denetlenebilir değişkenler ile ilgilenilmekte, böylece her kip için bağımsız fakat daha basitleştirilmiş bir denetim yöntemi kullanılabilir. Değişken sayısının azaltılması uçuş zekâsından soyutlamada kullanılacak arayüz sayısını da azaltmaktadır.

Wang tarafından yapılan çalışmada rakip uçağa en uygun saldırma mesafesi ve bağıl parametrelerin hesaplandığı formüller tartışılmıştır [54]. Çalışma rakibe yaklaşırken belirli manevraların zamanlamasına nasıl karar verileceğini belirtmektedir.

Makine öğrenmesi hava muharebesinde etkin öneriler sunabilmektedir. Fakat senaryolar karmaşık hale gelerek öğrenilmesi gereken parametre sayıları arttığında

öğrenme süresi ve eğitim verisi ihtiyacı da artmaktadır. Aktarımlı öğrenme birbirine yeteri düzeyde benzeyen alanlarda öğrenme süresini azaltacak olanaklar sunmaktadır. Toubman, Roessingh, Spronck, Plaat ve Herik yaptıkları çalışmada farklı savaş senaryolarından elde ettikleri öğrenme tecrübesini paylaşmakta ve bunu ikiye bir veya ikiye iki senaryolarda örneklemektedir [56].

Yüksek, Üre, Çalışkan ve İnalhan dikey kalkış özellikli sabit kanatlı bir uçak için yatay açığı (baş açısı) kontrol eden hataya dayanıklı denetleyici geliştirmişlerdir [57]. Kapalı devre alt seviyede denetleyici tasarımı her bir algılayıcı çıktısı için Kalman filtresi ile hata tespit ederek gidermekte, gürbüz bir uçuş denetimi sağlamaktadır.

İHA sistemlerinin hava sahasının güvenilir ve etkin kullanımını düşürmemesi için güvenli, etkin ve mevcut insanlı uçak trafiği ile uyumlu çalışmalıdır. Bu konudaki en zorlayıcı teknik kıstas “Algıla ve Kaçın” (ABD Ulusal Havacılık Dairesi - 14CFR 91.111 ve 91.113) gereksinimleridir. Bu gereksinimler yakındaki hava trafiğini tespit edecek ve izleyecek, pilota olası çarpışma riskleri hakkında farkındalık sunacak ve çarpışmaları engelleyecek yönlendirmeleri yapacak olan algılayıcılar, donanım ve yazılım bileşenlerini içerir. Burada iki bağımsız koruma katmanı vardır. Bunlar kendini ayırıştırma (self separation - SS) ve çarpışma önleme (collision avoidance - CA) katmanlarıdır. Kendini ayırıştırma ICAO Global ATM işletim konseptindeki [34] gereksinimleri karşıladığında sağlanmaktadır. Çarpışmadan kaçınmayı engelleyecek test ortamına ait sonuçlar General Atomics firması tarafından yayınlanan bir çalışmada yer almaktadır [59]. Bu çalışmada çarpışmadan kaçınma gereksinimlerini sağlamak için İHA tasarımında yer alacak temel gereksinimler açıklanmıştır.

Kasnakoğlu tarafından yapılan çalışmada çok girişli çok çıkışlı gürbüz denetim yaklaşımı ile uçuş kontrolü sağlanmıştır [58]. Denetleyicide bulunan iç döngü denetleyicisi ve dış döngü denetleyicisi performans, gürbüzlük ve savrulma engelleme fonksiyonlarını birlikte sağlamaktadır. Dış döngüde PID denetleyicilerden oluşan SISO denetleyiciler, iç döngüde ise MIMO denetleyici ile uçuş kontrolü sağlanmaktadır. Otopilot tasarımı açısından diğer denetleyicilere göre oldukça başarılı test sonuçları üretilmiştir.

Changqiang, Kangsheng, Hanqiao, Shangqin ve Zhuoran çalışmasında otonom bir hava muharebesi karar sistemi tasarlamıştır [63]. Hava muharebe oyunu bir Markov modeli olarak görülmüş, muharebe durumu sonuçlarına göre manevra kararlarının

ağırlıkları güncellenmiştir. Buna göre hedef fonksiyon tanımlayarak üstünlük hesabı yapmaktadır. Karar sürecinde bulanık mantık uygulanmış, dört manevra seçim faktörü kullanılmıştır. Tüm karar sürecini modellemek amacıyla kayan ufuklu optimizasyon yöntemi kullanılmıştır.

Hava muharebesinde görüş mesafesi dışında takımlar arası mücadeleyi inceleyen çalışma Özpala tarafından yapılmıştır [65]. Çalışmada oyun teorisi uygulanmış, takımlar arası rakip eşlemelerde üstünlük hesabı yapılmış, uçağın değil takımın galibiyetini esas alan oyun taktikleri incelenmiştir.

### **1.3 Çalışmanın Katkıları**

Bu tez çalışması kapsamında çalışma alanına aşağıdaki katkılar sunulmuştur.

Uçuş kontrolünde alt seviyede güvenli ve güvenilir kontrol ile uçuş ve savaş zekâsını birbirinden ayıran bir soyutlama yaklaşımı önerilmiştir. Soyutlama stratejik, taktik, manevra, hareket ve uçuş kontrol seviyelerinden oluşmaktadır. Karmaşık yapıdaki uçuş verisi insan ve makine tarafından anlaşılabilen bir hareket tanımlama diline çevrilmiş, uçuş hareketlerinde dizinleme ve arama yöntemi geliştirilmiş, veri çözümleme yöntemi örnek olarak F-16 uçuş kayıtlarına uygulanmıştır. Veri çözümlemeyi takiben hava muharebesinde kullanılan hareket türleri incelenmiştir. Uçuş verilerinin makine öğrenmesi yönteminde eğitim verisi olarak kullanılarak uçuş manevralarının yapay öğrenilmesi örneklenmiş, bu konudan farklı makine öğrenmesi teknikleri incelenmiştir. Çalışma sonunda sonuçlar değerlendirilerek katkıların uygulama alanları analiz edilmiştir.

Bu tez dokümanı aşağıdaki şekilde hazırlanmıştır.

İkinci bölümde kontrol edilmesi gereken hava platformunu etkileyen temel fizik kuralları, kontrol yöntemleri ve konuyu doğrudan ilgilendiren temel kısıtlar açıklanmış, hava platformunu savaş silahı olarak kullanma yöntemleri ve bu konudaki alan bilgisi özetlenmiştir.

Üçüncü bölümde tez çalışmasında kullanılan yöntemler açıklanmış, test sonuçları incelenerek uygulanan yöntemlerin başarımı yorumlanmıştır. Kullanılan yöntemler;

- (i) alt seviye uçuş kontrolü, uçuş ve savaş zekâsı kontrolünün birbirinden ayrıştırılması için gerekli soyutlama,

- (ii) uçuş hakkında toplanan ve anlama ve işlenmesi kolay olmayan ikili verinin insan ve makine tarafından anlaşılır hale getiren veri çözümleme yöntemi,
- (iii) yüksek miktarda veri üzerinde dizinleme ve arama yöntemleri,
- (iv) çalışmada kullanılacak makine öğrenmesi teknikleridir.

Dördüncü bölümde bu çalışmanın çeşitli uygulama alanları ve bu alanlara yaptığı katkıların incelendiği sonuç ve kapanış notları yer almaktadır.

## 2 HAVA MUHAREBESİ

İkinci dünya savaşı, maruz kalınan yıkımlar ve kaybedilen insan sayısı açısından insanlık tarihinin o tarihe kadar yaptığı savaşların toplamından daha büyük bir savaş olmuştur. Bunun en temel nedeni savaşın üç boyutlu uzaya taşınması, hava gücü ve hareket esnekliğinin savaşa yeni bir boyut kazandırmasıdır. O tarihten itibaren hava gücü bir ulusun vazgeçilmez bir varlık unsuru haline gelmiştir. Hava gücü üstünlüğünü elinde bulunduran tarafın ayakta kalacağı ve her şartta galip geleceği sabit bir varsayım olmuştur.

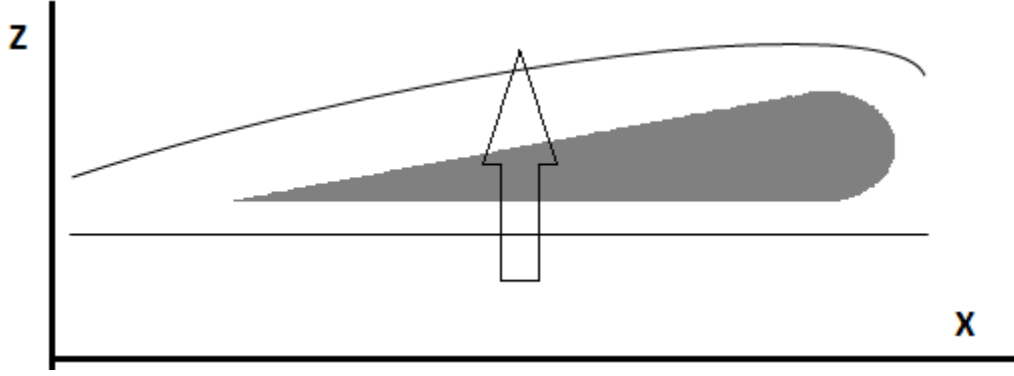
Hava muharebesi stratejik, taktik ve manevra seviyelerine ayrıldığında en temelde yakın hava muharebesi yer almaktadır. Yakın hava muharebesi kabiliyeti, hava gücü üstünlüğü bulunan iki tarafın birbiri ile çatışması halinde ayakta kalan tarafın galip gelmesi bakımından hava gücünün vazgeçilmez bir parçasıdır.

Bu bölümde hava muharebesinde kullanılacak hava platformunun özellikleri ve temel savaş manevraları hakkında bilgi verilecektir.

### 2.1 Hava Platformu

18.yy İtalyan bilim adamı Bernoulli bir gaz ne kadar hızlı hareket ederse basıncının da o kadar düşük olduğunu keşfetti. Gaz kütesinin içinden geçen düzlemin Şekil 1'deki cismin bombeli yüzeyinde düz olan tarafa göre daha düşük basınç oluşmaktadır. Bu durum havaya göre hareket eden cismin bir tarafının diğer tarafına göre daha az basınç, dolayısı ile daha düşük kuvvetle hareket edebildiğini göstermektedir. Bu durum düz yüzeyden bombeli yüzeye doğru bir kaldırma kuvveti sonucunu doğurur. Bu temel prensip doğadaki tüm kuşlar tarafından kullanılmakta, havada aşağıda yukarı hareket etmeyi sağlamaktadır. İnsanoğlu bu buluşla birlikte sabit kanatlı uçabilen hava araçlarını üretebilmeyi başarmıştır.





Şekil 1. Kaldırma Kuvveti

### 2.1.1 Temel Fizik Kuralları

Sabit kanatlı hava araçlarının ürettiği kaldırma kuvveti ( $L$ )  $Z$  düzleminde, uçağın motorunun ürettiği itki kuvveti ( $T$ ) ise  $Y$  düzleminde Şekil 2'deki gibi cisimlerin hareket etmesini sağlar.  $L$  kuvveti yerden yükseklik, atmosferik katsayılar, uçak yüzeyinin rüzgâr testleri sonucu ürettiği katsayılar ile ilgilidir. Matematiksel gösterim kullanılan uçağın gövdesine göre de değişmektedir.  $P$  deniz seviyesinde sabit hava basıncı ( $1.225 \text{ kg / m}^3$ ), gözleme bağlı  $\beta$  sabit katsayısı ( $1/ 9,042\text{m}$ ),  $h$  irtifa,  $V$  hava hızı,  $C_L$  uçağa tipine özel kaldırma katsayısı,  $C_D$  sürtünme katsayısı,  $S$  yüzey alanı olarak kabul edilsin. Bu değişkenler ve sabit kullanılarak hava yoğunluğu (1) eşitliği, dinamik basınç (2) eşitliği, uçağın herhangi bir anda üreteceği kaldırma kuvveti (3) eşitliği, sürtünme (4) eşitliği ile hesaplanır.

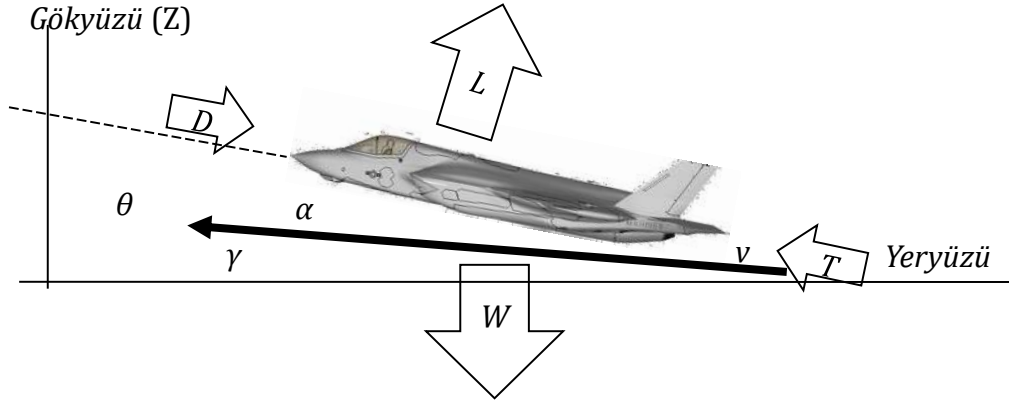
$$p=Pe^{\beta h} \quad (1)$$

$$q=phV^2/2 \quad (2)$$

$$L=C_LqS \quad (3)$$

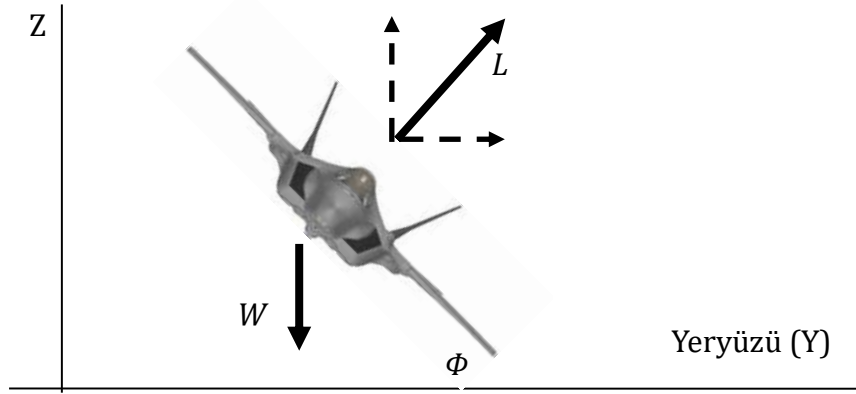
$$D=C_DqS \quad (4)$$

Uçak gövdesi üzerindeki kuvvetlerden motor gücü  $T$  kuvveti ile ileri yönde,  $L$  kuvveti gövdeye dik yukarı yönde,  $D$  sürtünme kuvveti ise geri yönde etki eder. Yerçekimi ise uçağın gövde pozisyonundan bağımsız olarak yeryüzüne göre aşağı yönde  $W$  kuvveti ile etki eder. Uçak motorunun çalıştıkça anlık olarak değişken miktarlarda yakıt tükettiği, üzerindeki silahları rastgele zamanlarda ateşlediği göz önüne alındığında kütleli sürekli olarak rastgele miktarda azalacağı hesaplanmalıdır.



Şekil 2 Dikey Kuvvetler

Uçağa yatay yönde kuvvet uygulamak için bir yöne yatış yapması kaldırma kuvvetinin yatay ve dikey düzlemde Şekil 3'deki gibi bölünmesine olanak verir.



Şekil 3. Yatay Kuvvetler

Uçağın gövde düzlemine göre burun yönü X, kanat yönü Y ve üst yönü Z kabul edilsin. Buna göre gövde yönünde uygulanan kuvvetlerin X, Y ve Z düzlemlerine dağılımı (5), (6) ve (7) eşitliklerinde verilmiştir. Kuvvetler gövdenin o anki ağırlık merkezine etki etmekte olup eşitlikler ağırlık merkezinin değişken olmadığı durumlarda geçerlidir.

$$F_x = T \cos \gamma - D \quad (5)$$

$$F_z = L \cos \phi + T \sin \gamma - W \quad (6)$$

$$F_y = L \sin \phi + T \sin \gamma \quad (7)$$

### 2.1.2 Kontrol

Sabit kanatlı uçaklar insan tarafından levye ve gaz pedalı kullanılarak kontrol edilir.

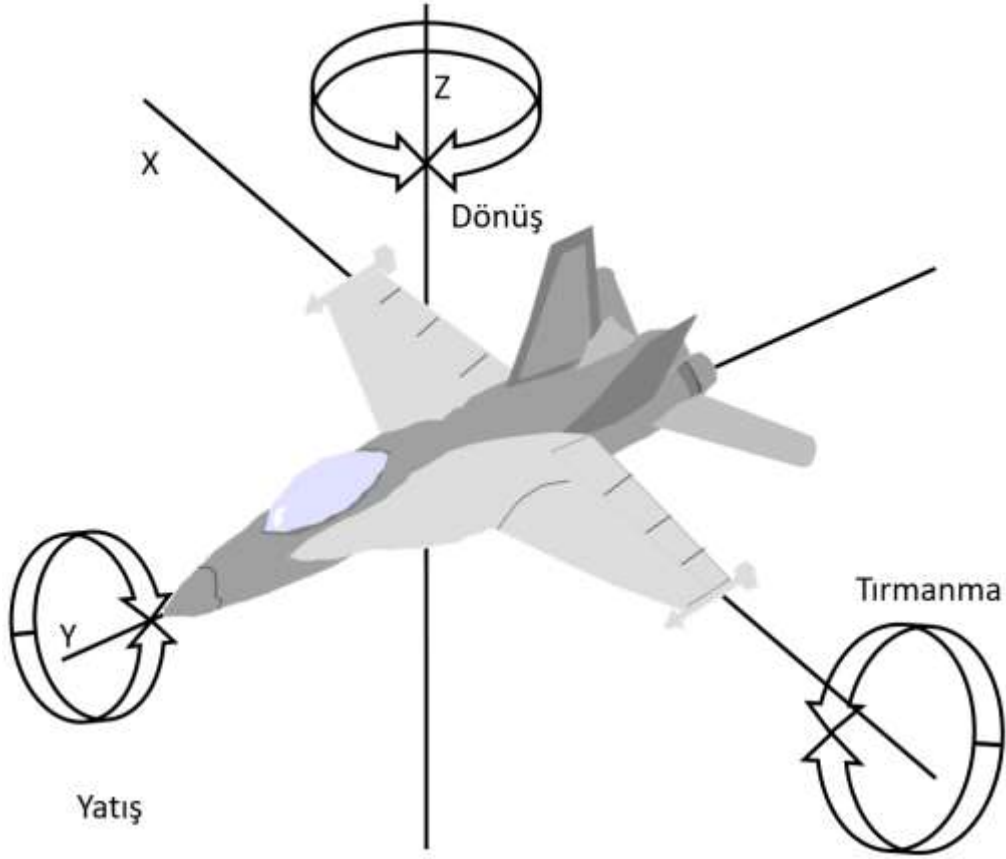
- Levye den alınan girdiler uçağın kanat, kanatçık ve kuyruğunda hareketlere ve gaz pedalından alınan girdi motorda itki kuvvetine neden olur.
- Bu değişim çeşitli fizik, uçak geometrisi ve atmosferik denklemlerin çalışması ile 3 boyutlu uzayda kuvvetler oluşturur.
- Her 3 yönde oluşan kuvvetler sonucu ortaya çıkan ivme, hız ve mevcut pozisyona göre uçak yer ve yön değiştirir.

İnsanlı veya insansız sabit kanatlı bir uçuş platformunun (8) eşitliğinde verilen 13 temel durum değişkeni vardır. Bu değişkenler; ( $t$ ) zaman damgası, ( $n$ ) kuzey yönünde pozisyon, ( $e$ ) doğu yönünde pozisyon, ( $h$ ) irtifa, ( $v$ ) hızın büyüklüğü, ( $\varphi$ ) yatış açısı, ( $\theta$ ) tırmanma açısı, ( $\psi$ ) baş açısı, ( $\beta$ ) hız vektörü ve gövde vektörünün baş açısı arasındaki fark, ( $\alpha$ ) hız vektörü ve gövde vektörünün yunuslama açısı arasındaki fark ve ( $P$ ) yatış açısındaki değişim, ( $Q$ ) yunuslama açısındaki değişim, ( $R$ ) baş açısındaki değişim olarak sıralanmaktadır.

$$X = \{t, n, e, h, v, \varphi, \theta, \psi, \alpha, \beta, P, Q, R\} \quad (8)$$

Uçak kontrolü atmosfer, irtifaya göre değişen yer çekimi, yakıt tüketimine göre değişen kütle, pozisyona göre değişen kütle merkezi gibi çok sayıda deterministik olmayan durumdan etkilenmektedir. Bu nedenle uçuş kontrol sistemleri doğrusal olmayan sistemlerdir.

Uçağın kumandasında 4 temel komut vardır. Bunlar uçağın yukarı doğru daire çizmesi için verilen tırmanma (pitch) komutu, yatay düzlemde daire çizmesi için verilen dönüş (turn) komutu, kendi boy ekseninde yatış (roll) komutu ve motor gücü ile ilerleme (move) komutudur. Uçak üç boyutlu uzayda dört komutu kullanarak çeşitli hareketler yapabilmektedir. Uçağın yön kontrolü için yapılan temel hareketler Şekil 4'de gösterilmiştir.



Şekil 4 Uçak Kontrolü

## 2.2 Temel Savaş Manevraları

Temel savaş manevraları (Basic Fighter Maneuvers - BFM) 2. Dünya Savaşı ile birlikte popüler olmuş, bire bir, bire çok, takımlar arası savaş senaryoları çeşitli formatlarda bilimsel biçimde tanımlanmıştır. Manevralar temel olarak füzeden kaçınma, savunma ve saldırı manevraları olarak gruplandırılmıştır. Yakın hava muharebesi askeri havacılık literatüründe it dalaşı olarak da isimlendirilmektedir. Askeri otoriteler tarafından kullanılan uçuş eğitim kaynağı Shaw tarafından basılmıştır [8]. Yüksek teknoloji ürünü savaş uçakları ile birlikte önemi daha da artan BFM, insanlı uçaklarda savaş pilotlarının asıl eğitim konusunu oluşturmaktadır. Alan bilgisi birçok manevrayı içermekle birlikte bu çalışma kapsamında yalnızca bire bir yakın hava muharebe teknikleri incelenmiştir.

Hava muharebesi sırasında her iki taraf da avantajlı pozisyona geçmek için manevralar yapmakta, anlık olarak saldırgan konumdayken savunana konumuna

düŖebilmektedir. Bu durum klasik kovalayan kaçan algoritmalarını kullanışsız hale getirmektedir. Ayrıca uzun dönemli planlama ufku böyle bir durumda mümkün veya gerekli görülmemektedir.

### **2.2.1 Enerjinin Korunması**

Üç boyutlu uzayda hareket ederken enerji ve hız dönüşümü de dikkate alınmalıdır. Enerji israf edilmemesi gereken önemli bir kaynaktır ve hava muharebesinde etkisi çok daha etkin biçimde kendini göstermektedir. Uçağı anlık olarak hızlandırmak çok yüksek maliyetlere neden olması ile beraber ani olarak yavaşlatmak önemli miktarda enerjinin israf edilmesine ve rakibe karşı avantaj kaybına neden olmaktadır. Örneğın manevra kabiliyetini artırmak amacıyla dönüş yarıçapını düşürmek için hızı düşürmeye ihtiyaç duyulur. Bu durumda yavaşlamak yerine yükselerek hızı enerjiye çevirmek, sonra yönünü değıştirerek tekrar alçalarak enerjiyi hıza çevirmek gerekir.

### **2.2.2 Bağlı Geometri**

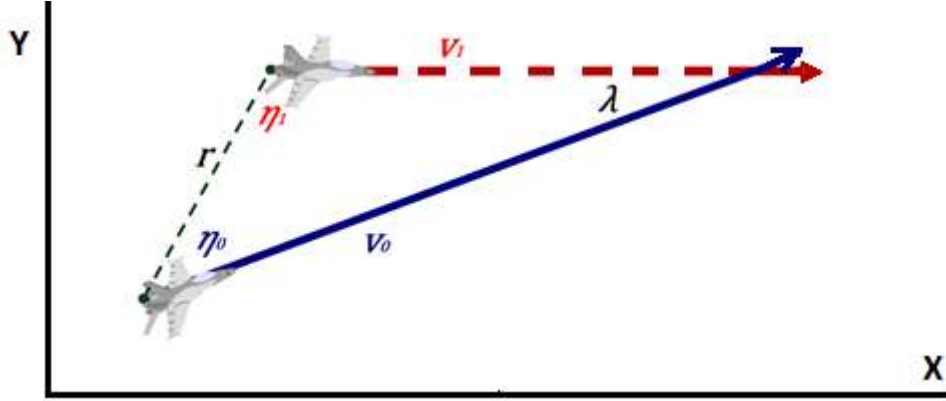
Bağılı geometri birden fazla uçağın birbirlerine göre konumlarıdır. Savaş manevralarında uçakların birbirlerine göre üstünlük hesabı bağılı geometriye göre yapılır. Aradaki mesafeye göre bağılı geometrinin farklı bileşenleri daha önemli hale gelmektedir. Yakın savaş manevralarında diğere uçağı göre açısız üstünlüğü elde ederek en uygun vuruş avantajını elde etmek önemlidir. Bu manevralar genellikle görüş mesafesi içinde yapılır. Görüş mesafesi dışında ise birebir muharebeden daha çok takım savaşı ön plana çıkar. Burada bir takımın diğere göre ilk pozisyonlarının üstünlüğüne ve rakiplerin paylaşımına göre üstünlük hesabı yapılır. Birebir üstünlük yerine stratejik üstünlük önemlidir.

GMD teknikleri, takım oyununda yapılacak üstünlük hesapları, rakip paylaşma usulleri bu çalışma dışındadır. Bu konuda Özpala tarafından yapılan oyun teorisi ile hava muharebesi teknikleri çalışması vardır [67]. GMİ üstünlük hesabında dikkate alınan açısız üstünlük, enerji üstünlüğü ve bağılı matris hakkında açıklamalar aşağıda verilmiştir.

#### **2.2.2.1 Birebir Bağlı Geometri**

Bağılı geometri kısaca bir uçağın diğere uçağı göre pozisyonu olarak tanımlanabilir. İki uçağın konumları ve hız vektörlerinin  $(x,y)$  düzleminde kesiştiğı noktadan oluşan üçgen temel hesaplama aracıdır. Bağılı geometri; uçaklar arasındaki mesafe ( $r$ ), uçakların birbirine yaklaşma hızı ( $v_c$ ), irtifa farkı ( $h$ ), her iki uçağı ait hız vektörlerinin

mesafe vektörü ile yaptığı açılar ( $\eta_0 \eta_1$ ) ve hız vektörlerinin kesişim açısından ( $\lambda$ ) oluşur.



Şekil 5 Bağlı Pozisyon Geometrisi

Mesafe ( $r$ ) iki uçağın pozisyonları arasındaki Euclid mesafesi olarak hesaplanır. Mesafedeki değişim yaklaşma hızını verir. Mesafe ve uçak gövdelerinin mesafe vektörü ile yaptıkları açılarının ( $\eta_0 \eta_1$ ) hesaplama yöntemi önceki yayınlarda [49] yer almıştır. Açılarının şematik gösterimi Şekil 5'de yer almaktadır.

Bağlı geometri bir uçağın diğerine göre ne kadar avantajlı olduğunu belirler. Avantajı yüksek olan saldırgan (*offensive*) pozisyonda, düşük olan ise savunan (*defensive*) pozisyonda olarak adlandırılır. Saldırgan pozisyonuna geçmek, savunan pozisyonundan kurtulmak temel hedeflerden biri olmalıdır. Avantaj açısal ve enerji üstünlüğü olarak 2 grupta incelenebilir.

### 2.2.2.2 Açısal Üstünlük

Uçağın burnu rakip uçağı ne kadar gösteriyorsa açısal üstünlüğü o kadar yüksektir. Rakip uçağı göstermek mesafe doğru parçasının hız vektörü üzerinde olmasıdır. Bu nedenle  $\eta_0$  açısı ne kadar düşük olursa açısal üstünlük o kadar yüksektir.

Pozisyon avantajını hesaplandığı [49] yayında  $\lambda < (\pi - \eta_0) < \pi/2$  durumu avantajlı konum olarak ele alınmıştır. Bu durumda  $\cos(\eta_0)$  değeri avantaj fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Böylece avantaj fonksiyonunun -1 ile 1 aralığında bir değer ile ifade edilmesi de sağlanmış olacaktır. En dezavantajlı konum olan  $\eta=180$  durumunda avantaj fonksiyonu -1, en avantajlı konum olan  $\eta=0$  durumunda avantaj fonksiyonu

1 değerini verir. Hava muharebesinde asıl uçağın açısal üstünlüğü (9) eşitliğinde, rakip uçağın açısal üstünlüğü (10) eşitliğinde sunulmuştur.

$$\cos(\eta_0) = - \frac{(d_x \cos(\gamma_1) \cos(\chi_1)) + (d_y \cos(\gamma_1) \sin(\chi_1)) + (d_z \sin(\gamma_1))}{r} \quad (9)$$

$$\cos(\eta_1) = \frac{(d_x \cos(\gamma_2) \cos(\chi_2)) + (d_y \cos(\gamma_2) \sin(\chi_2)) + (d_z \sin(\gamma_2))}{r} \quad (10)$$

### 2.2.2.3 Enerji Üstünlüğü

Enerji üstünlüğü çeviklik ve kıvraklık demektir. Bu da istendiğinde pozisyonunu daha kolayca değiştirebilme kabiliyetidir. Enerji üstünlüğünü sadece hız ile ifade etmek doğru değildir. Rakibine göre daha yüksek irtifada bulunan uçak serbest düşüş ile rakibinin irtifasına düştüğünde yerçekiminin verdiği enerjiyi (veya daha önceden yer çekimine karşı tükettiği enerji) de hıza dönüştürmüş olacaktır. Bu nedenle enerji hesabına irtifa farkı da dâhil edilmelidir. Bu hesabın nasıl yapıldığı [49] çalışmasında yer almaktadır. Nihai olarak elde edilen fonksiyon (11) eşitliğinde verilmiştir.

$$v_f = \sqrt{v_0^2 + (2d_z g)} \quad (11)$$

Sonuç olarak bağıl geometrinin bileşenlerini oluşturan değişken kümesi (12) eşitliğinde yer almaktadır. Burada ( $t$ ) kaydın yapıldığı evrensel zamandır.

$$R_{12} = \{t, r, h, v, \lambda, \eta_1, \eta_2, v_f\} \quad (12)$$

### 2.2.2.4 Bağıl Matris

Bağıl geometriyi birden çok uçak arasında hesaplamanın takım savaşlarında önemli bir yeri vardır. Bu durumda veri kümesi bir matristen oluşmaktadır. Aynı evrensel zamana ait bağıl değişkenler tüm uçaklar için hesaplanarak bağıl matris oluşturulur. Bağıl matrisin elemanları (13) eşitliğinde verilmiştir.

$$G_0 = \{R_{01}, R_{02}, \dots, R_{0n}\} \quad (13)$$

Takım savaşlarında bir uçağın rakip takımdaki uçaklara üstünlüğü ve rakip takımdaki bir uçağın kendi takımındaki diğer uçaklara üstünlüğü, rakip seçiminde oyun teorisi kurallarının uygulanmasına etkileri Özpala tarafından incelenmiştir [66]. Bağıl pozisyon sadece savaş manevraları değil, aynı zamanda formasyon uçuşlarında da dikkate alınmalıdır.

### 2.2.3 Alan Bilgisi

Hava muharebesinde birinci amaç sahip olduğu enerjiyi koruyarak elindeki mühimmat ile rakibi vuracak bir pozisyon elde etmektir. Bu alandaki temel prensipler aşağıda açıklanmıştır.

- Rakibi tespit edildikten sonra sürekli rakibin arkasında bulunmalı ve düşük  $\eta_0$  ve  $\lambda$  açılarına sahip olunmalıdır. Bu durum uçağı sürekli saldırgan pozisyonunda tutmayı netice verecektir.
- Rakip uçağı vurabilmek için belki de tek bir şans olacaktır. Tüm manevraların birinci amacı bu tek şansı kazanmak ve elde ettiğinde vurmaktır. Bu nedenle etkin bir pozisyon bulunduğunda rakip derhal vurulmalı, atış yapılırken rakip ve mühimmatın keşişeceği nokta iyi hesaplanmalıdır.
- Rakip dönüş yaptığında rakibin dönüş çemberinin içinde kalınmalıdır. Bunu yaparken eğer yüksek hızda ise enerji korunmalı, gerekirse enerji irtifaya dönüştürülmelidir. Rakipten önce dönmek uçağı saldırgan konumundan savunan konumuna düşürebilir. Geç kalmak ise belki de sahip olunacak tek şansı kaybettirir. Uçağın manevra kabiliyetleri çok iyi bilinmeli ve sınırların zorlandığı yerlerde dezavantajlı konuma düşülmemelidir.
- Eşiş veya yakın manevra kabiliyetine sahip iki uçak arasında yüksek irtifaya sahip olan her zaman avantajlıdır. Çünkü irtifa istendiğinde enerjiye çevrilebilir bir kaynaktır.
- Mükemmel saldırgan manevralar mükemmel savunma manevralarına her zaman galip gelir. Bu nedenle saldırgan konum elde edildiğinde hata yapmadan ve vazgeçmeden rakip yok edilinceye kadar devam edilmelidir.
- Her bir konumda uygulanması gereken manevralara ait detaylar alan bilgisi kaynaklarından detaylı incelenebilir [8].



### 3 YÖNTEMLER

Soyutlama bu çalışmanın temel bir ihtiyacı olarak öne çıkmaktadır. Sabit kanatlı bir uçağın güvenli, güvenilir ve her ortamda kontrolünün sağlanması alt seviyede hassas ve gürbüz denetleyicilere ihtiyaç duymaktadır. Literatürde bu amaçla yapılmış örnek çalışmalar mevcuttur [52] [56]. Fakat bu kontrol mekanizmaları dışarıdan yapısal müdahalelere veya eklentilere izin verecek yapıda değildir. Bunu yapmak kontrol sistemini tutarsız hale getirebilir. Burada uçuş zekâsını uçak kontrolünden ayıracak bir soyutlama tanımlanmıştır.

Uçak kontrolünden kurtulmak, denetlenecek değişken sayısını önemli sayıda azaltmış, uçuşa farklı açıdan bakma olanağı sunmuştur. Uçuşu takip edilecek noktalar değil, yapılacak hareketler cinsinden ifade etmek hem insan ve makine açısından kolay ve ortak anlaşılır bir dil ortaya koymuş, hem de makine öğrenmesi gibi teknikler açısından kolay kullanılabilir bir veri modeli ortaya çıkarmıştır. Fakat bununla beraber uçuş verisi ile uçuş dili arasında bir dönüşüm ihtiyacı bulunmaktadır. Çalışmada bu ihtiyacı karşılayacak çözüm önerilmiştir. Bu çözüm aynı zamanda veriyi dizinleyecek, sıralayacak, arama yapacak yöntemleri de içermektedir. Bu yöntem aracılığı ile gerçek uçuş verileri öğrenme verisine dönüştürülmüştür.

Makine öğrenmesi teknikleri kullanım amacına göre daha avantajlı olabilmektedir. Uçuş verisinden hava muharebesi öğrenmeye gelince konu; önce bağıl geometriye göre doğru manevrayı seçmenin öğretilmesi, sonra seçilen manevraya göre uygun hareketlerin açısız parametrelerinin hesaplanması olarak özetlenebilir. Burada karar ağaçları, kural tabanlı öğrenme, yapay sinir ağları ve bulanık mantık yaklaşımları incelenmiş, örnek olarak bir ANFIS tasarlanmıştır.

#### 3.1 Soyutlama

Bir sistemin başka bir sisteme soyutlanmasında tanımlanacak ara yüzler 3 temel özelliğe sahip olmalıdır. Bunlar;

- Anlamlı (Sound): Soyutlama düzeyleri anlamlı arayüzler sunmalıdır.
- Tam (Complete): Soyutlanan sistemin istenen tüm özellikleri sunulmalıdır.
- Dik: Soyutlamada tekrarlar veya artıklık (redundancy) olmamalı, bir soyutlama arayüzü diğeri cinsinden ifade edilememelidir.

Hava platformunun kontrolündeki karmaşıklık ve hava muharebesindeki alan bilgisi ve öğrenme ihtiyacı, bu iki görevin aynı anda yerine getirilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bu iki görevin birbirinden soyutlanmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Aşağıda bu ihtiyacın gerekçeleri ve soyutlama düzeyleri açıklanmıştır.

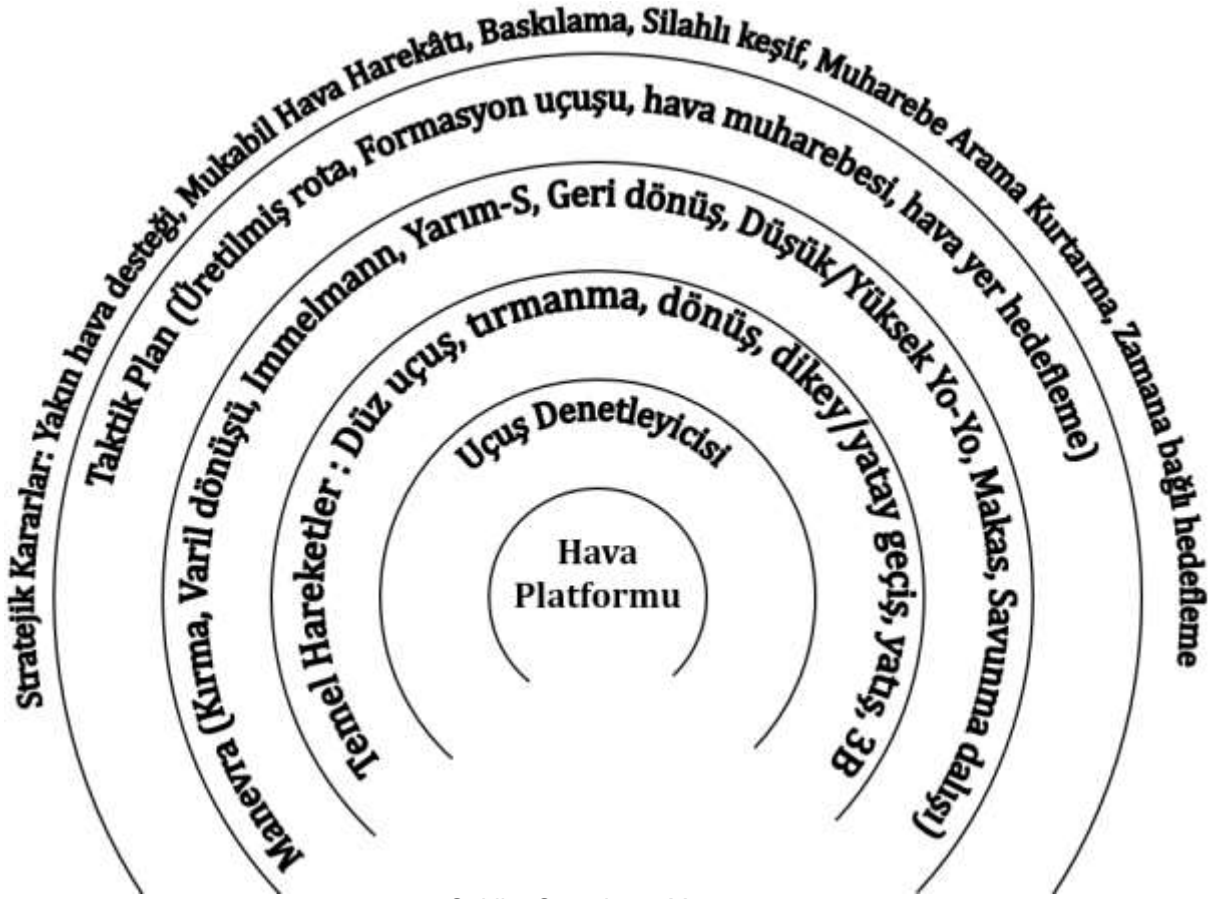
### 3.1.1 Kontrol Sistemi

Hava platformu alt seviyede doğrusal olmayan bir kontrol sistemine ihtiyaç duymaktadır. Kontrol sisteminin temel özellikleri aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Kararlı (Stability): Sistem sınırlarını hiçbir zaman aşmamalıdır.
- İzleme (Tracking): Sistem kendine belirtilen referans yörüngeleri takip edebilmelidir.
- Gürbüzlük (Robustness): Sistem çeşitli parametrelerdeki değişimlerden bağımsız olarak performansını devam ettirebilmelidir.
- Güvenirlik (Disturbance Rejection): Sistem beklenmedik şartların üstesinden gelebilmelidir.
- En uygunluk (Optimality): Sistem görevini en iyi yoldan yapmalıdır.

Alt seviyede uçuş kontrolü için doğrusal olmayan bir sistem olan uçak dışında, atmosfer, irtifa, rüzgâr, yeryüzü şekilleri, kütle değişimi gibi denetlenemeyen veya nasıl değişeceği önceden kestirilemeyen başka parametreler de denkleme eklenmektedir. Tüm bu zorluklar ile birlikte, savaş yöntemlerini de kontrol sistemine dâhil etmek denetleyici yapısını oldukça karmaşık hale getirmekte, denetim problemi alana özel bir hal almaktadır. Fiziksel kontrol, manevra, taktik ve stratejik seviyelerin birbirinden ayırıştırarak bir soyutlama seviyesine ihtiyaç vardır.

Alan bilgisi manevra ve taktik seviyede yer almaktadır. Seviyeleri birbirinden soyutladıktan sonra gerçek hava muharebesine ait uzman bilgileri yapay zekâ yöntemlerini kullanarak fiziksel kontrol ve manevra seviyelerinden bağımsız olarak savaş aracına öğretmek daha kolay olacaktır. Uygulanan soyutlama seviyeleri Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 6 Soyutlama Yiğiti

### 3.1.2 Uçuş Denetleyicisi

Yüksek başarılı bir hava platformu, istikrarlı, gürbüz ve en uygun yöntemlerle kontrol edilmekte ve beklenmedik durumların üstesinden gelebilmektedir. Kontrol sistemi önceden tanımlı hareketleri ve hareketlerin parametrelerini referans sinyaller olarak aldıktan sonra tüm dinamikleri hesaba katarak gerekli kontrol sinyallerini üretmektedir.

### 3.1.3 Hareket Seviyesi

Hava platformunun hareketleri önceden tanımlı eylemlerin kümesi olarak tanımlanır. Bir rotanın her yer değişimi bu eylemler kümesinin bir üyesidir. Hareketler insan veya yapay pilot tarafından yapılan manevraların yapı taşlarıdır. Her hareketin süresi, hareket boyunca ortalama hızı, yapılacak açısal değişimler belirtilmelidir.

### 3.1.4 Manevra Seviyesi

Ardışık olarak gerçekleştirilen hareketler bir araya gelerek manevraları oluşturmaktadır. Manevralar belirli hedefleri elde etmek amacıyla insanlar

tarafından iyi sınanmış ve bilinen hareketler sıralamasıdır. Bu seviye alan bilgisini içerir ve yapay öğrenme yöntemleri ile öğrenilebilir.

### 3.1.5 Taktik Seviye

Manevraların farklı taktik seviyelerde farklı amaçları olabilir. Hava muharebesinde anlık karar ihtiyacı nedeniyle önceden bir rota belirlemek mümkün değildir. Formasyon uçuşları ise birden çok dost uçağın koordineli uçuşundan oluşmaktadır. Havadan yere saldırı görevleri ise radar kapsama alanı dışındaki bölgeleri izlemeyi, hedefe belirli açılardan yaklaşmayı ve kullanılan mühimmatın özelliğine göre belirli irtifadan ateşlemeyi gerektiren manevraları içerir. Görüş Ötesi (Beyond Visual Range) manevralar ise yakın hava muharebesi öncesinde en iyi pozisyonu tutmak amacıyla izlenen taktikleri içerir. Taktik karar vericiler fiziksel kontrol ve hareket seviyesinde detayları bilmek zorunda değildir, fakat manevra seviyesinde yapılmış soyutlamaları bilmesi gerekir.

### 3.1.6 Stratejik Seviye

Bu seviyede taktik düzeyde alınacak kararları belirleyen üst düzey hedefler belirlenmektedir. Stratejik kararlar hava savaşının amacını, kullanılacak yöntemleri belirler. Stratejik seviyede harekât türleri aşağıda açıklanmıştır.

- Hava Müdahalesi (*Air Interdiction - AI*): Düşman unsurlarını saldırıya geçmeden veya amacına ulaşmadan önce önlemek, engellemek, geciktirmek veya tamamen yok etmek amacıyla yapılan harekâttir. Bu harekâtta dost kuvvetlerden uzaklık ve dost kuvvetlerin gücünü tehlikeye atmamak, dost kuvvetler ile entegrasyona girmemek esastır.
- Stratejik Saldırı (*Strategic Attack - SA*): Özel olarak seçilmiş ulusal stratejik hedeflere yapılan saldırılardır. Bu saldırının amacı düşmanın direnç, dayanma veya savaşma kabiliyetini, arzusunu veya inancını savaş girmeden önce kırmak ve savaşmadan galip gelmektir.
- Yakın Hava Desteği (*Close Air Support - CAS*): Dost hava unsurlarına karşı tehdit olabilecek mesafede düşman unsurlarına yapılan harekât veya dost unsurlarına saldırıyı caydıracak mesafede bulunmadır.

- Yüzey Harekâtı (*Surface Warfare - SUW*): Düşmanın yüzen deniz unsurlarına karşı yapılan yok etme, etkisiz hale getirme veya ele geçirilebilir duruma düşürme harekâtıdır.
- Taaruzi Mükabil Hava Harekâtı (*Offensive Counter Air - OCA*): Dost unsurlarının taaruzu öncesinde düşmana ait uçak, füze, fırlatma rampası, radar, iletişim ve bunların destek unsurlarının imha, engelleme, etkisizleştirme veya geciktirme harekâtıdır. Bu harekât doğrudan saldırı, düşman hava sahasının baskılanması, eşlik etme gibi taktikleri içerir.
- Müdafi Mukabil Hava Harekâtı (*Defensive Counter Air - DCA*): Dost muharip unsurlara karşı gelecek saldırıları engellemek amacıyla yapılan tespit, teşhis, önleme ve imha harekâtıdır.
- Düşman Savunmasına Baskı ve İmha (*Suppression and Destruction of Enemy Air Defenses - SEAD*): düşman hava unsurlarını ve destek elemanlarını yerde imha, engelleme ve geciktirme harekâtıdır.
- Keşif (*Reconnaissance - Recce*): Görsel veya başka yöntemler kullanarak, bir bölge veya düşman unsurunun tespit, teşhis ve harekâta yönelik niteliklerinin keşfedilmesi veya belirli bir bölgenin meteorolojik, hidrografik veya coğrafik verinin gizlenmesi harekâtıdır.
- Silahlı Keşif (*Armed Reconnaissance - Armed Recce*): Önceden bir hedef belirlemeksizin keşif sırasında tespit ettiği düşman unsurlarını aynı zamanda imha harekâtıdır.
- Muharebe Arama Kurtarma (*Combat Search and Rescue - CSAR*): Muharebe sırasında savaş dışı kalan personeli bulmak ve kurtarmak amacıyla kullanılan taktik, teknik ve usullerdir.
- Uçak ve Personel Kurtarma (*Tactical Recovery of Aircraft and Personnel - TRAP*): Yeri tespit edildiğinde personel, uçak ve destek teçhizatının arama, kurtarma taktik, teknik ve usulleridir.
- Zamana Bağlı Hedefleme (*Time Critical Targeting - TCT*): Belirli bir anda ortaya çıkacak bir tehdit olduğunda veya yalnız belirli bir zamanda yapılabilecek bir harekâttir.

### 3.2 Veri Çözümleme

Uçuş verisi bilgisayar ve insan tarafından anlaşılması ve işlenmesi çok zor olan veridir. Bu zorlukları incelediğimizde;

- Veri farklı kaynaklardan farklı biçimlerde sağlanmaktadır.
- Veri çoğunlukla gizlilik dereceli olarak sınıflandırılmakta, erişimi kısıtlanmaktadır.
- Veri anlık akan veri biçiminde olup okunduğu anda eskimiş olmaktadır.
- Birbiri ile ilgili farklı verinin ilişkilendirilmesi ihtiyacı vardır.
- Aynı nesne hakkında birden farklı kaynaktan alınan verinin tekilleştirilmesi ve zenginleştirilmesi gereklidir.
- Verinin insan ve makine tarafından anlaşılır biçime dönüştürülmesine ihtiyaç vardır.

Bu bölümde mevcut uçuş verisinin elde edilme yöntemi, temel savaş manevralarının biçimi ve anlaşılmaz verinin hareket zincirlerine dönüştürülerek makine öğrenmesine hazır hale getirilmesi yer almaktadır.

#### 3.2.1 Veriyi Elde Etme

Sabit kanatlı bir uçağın uçuş kayıtları aşağıdaki yöntemlerle elde edilebilir.

Birinci yöntem; fiziksel erişim imkânı olan bir uçağın üzerindeki veri saklama birimlerine doğrudan ulaşmaktır. Birçok yeni nesil savaş uçağı üzerindeki uçuş bilgisayarı aracılığı ile tüm uçuş ceridesini kaydetmekte, uçuş sonu analiz için dışarıya alınmasına olanak sağlamaktadır. Bu yöntemdeki sorunlar şunlardır;

- i) Birden çok uçağın uçuş verisinin evrensel saat ile eş zamanlama ihtiyacı vardır. Her ne kadar yeni nesil uçaklar sürekli güncelle saate sahip olmalar da ses üstü hızlarda saniyelik farklar veriyi tamamen kullanışsız hale getirebilmektedir. Bu yöntem kullanıldığında uçak bilgisayarları evrensel saat ile tam olarak eşitlenmelidir.
- ii) İkinci zorluk ise fiziksel erişim olmayan uçaklarda bu yöntemin kullanılamamasıdır. Fiziksel erişim uçağın düşman ülkeye ait olması, başka bir ülkeye ait olması, erişilen yerde hesaplama olanaklarının olmaması nedenlerinden kaynaklı olabilir.

- iii) Üçüncü zorluk yetkilendirme zorluğudur. Askeri otoriteler savaş taktiklerinin açığa çıkması endişeleri ile bu bilgileri akademik amaçlı paylaşmazlar.
- iv) Dördüncü zorluk verinin karmaşıklığıdır. Uçaktan alınan veride konu ile ilgisi olmayan yüksek hacimde ve farklı formatlarda veri bulunmaktadır. Çoğu zaman bu veri yapısının analiz edilerek çözülmesi gerekli olmaktadır. Uçak üreticileri veri yapılarını ticari sır kapsamında paylaşmamaktadır. Tersine mühendislik yöntemleri kullanarak veriyi çözmek hem zor, hem de hukuki yükümlülükleri olan bir konudur. Ayrıca her uçak türü için aynı emeğin tekrar harcanması gereklidir.

Veri toplamada ikinci yöntem ise birden çok radar sisteminden gelen iz bilgilerinin birleştirilerek çoklu radar füzyonu ile uçuş bilgisi toplamaktır. Bu yöntemin avantajları aşağıda sıralanmıştır.

- i) Radar tarafından tespit edilebilen herhangi bir nesnenin uçuşu kaydedilebilir. Kayıt işini yapabilecek küçük boyutlu fakat geniş kapsama alanına sahip radar sistemleri bulunmaktadır.
- ii) Uçağa fiziksel erişime ihtiyaç yoktur. Radar tarafından tespit edilebiliyorsa bu bilgi gizli de değildir.
- iii) Evrensel saat ile eş zamanlama ihtiyacı yoktur. Çünkü veri zaten tek kaynaktan akmaktadır. Referans saat olarak veriyi toplayan ve depolayan yerin saatinin alınması yeterlidir.

Bu yöntemdeki sorun aynı nesne için farklı radar kaynaklarından gelen iz bilgilerinin tekilleştirilmesi ihtiyacıdır. Radar birbirinden gecikmeli olarak gördükleri sinyalleri gönderirler. Radarın özelliğine göre gönderme sıklığı hava muharebesi için yeterli hassasiyette olmayabilir. Bu ilk bakışta sorun gibi görünse de farklı kaynaktan gelen verinin birleştirilmesi ile nesne hakkında daha doğru ve hassas bilgi elde etmek de bir avantajdır. Böylece aynı nesnenin ardışık olarak daha sık aralıklarla durum bilgisi alınabilir. Literatürde çoklu radar füzyonu yapan bir çalışma [61] yer almaktadır.

Bu çalışmada örnek olarak kullanılan veri F-16 hava platformundan alınmıştır. F-16 savaş uçağı her 40 milisaniyede bir defa 232 sütunluk ikil veriyi kaydetmektedir. Gürültü filtrelemesi ve tekrarlı uçuş kiplerinin birleştirilmesinden sonra uçuş verisi ardışık hareketlere dönüştürülmüştür.

### 3.2.2 Hareket Tanımlama

Sabit kanatlı bir hava aracının 3 boyutlu uzayda yapabileceği tüm hareketlerin 7 gruba ayrılacağı Üre ve İnalhan [40] tarafından gösterilmiştir. Aynı çalışma içinde uçuş kontrolü yapan SMC tasarımı da örneklenmiştir. Bu 7 uçuş veya kontrol kipinin 3 değişken kümesi vardır. Birinci küme uçuş kipi, hız ve açısal değişimlerden oluşan hareket girdileri, ikinci küme hareket süresince sabit kalan değerler ve üçüncü küme ise hareket süresince dinamik olarak değişen değerlerdir. Uçuş kiplerinden 2 tanesi sadece yön değişimi olduğundan süre ve hız değerleri ihmal edilmiştir. Soyutlama açısından bu iki kipi bir anlamı yoktur. Sistem uçuş kipi, girdileri ve çıktılarından oluşan kara kutu şeklinde soyutlanmıştır.

Her 3 boyutta yer değiştirme olan 3 boyutlu hareket yaygın kullanılmadığı gerekçe gösterilerek aynı yazarların sonraki çalışmalarında bu harekete yer verilmemiştir [52]. Fakat gerçek F-16 uçuşlarında bu hareketin hava muharebesinin en kızıştığı anlarının belirleyici hareketlerinden olduğu bu çalışmada tespit edilmiştir. İlerleyen bölümlerde bu konuya yer verilmiş, 3 boyutlu hareket kipi korunmuştur. 3 boyutlu kipte uçak aynı anda 360 derece tırmanma döngüsü ve 270 derece yatış döngüsü yapmaktadır. Yatış döngüsü normal yatış hareketinin aksine tırmanma süresince yavaşça aynı sürede yapılmaktadır. Tam daire tırmanma yapıldıktan sonra 90 derece daha aynı yönde yatmak suretiyle çok yüksek hızlarda enerji, hız ve zaman kaybetmeden ve savrulmadan 90 derecelik keskin bir dönüş mümkün olmaktadır. Savaş pilotları bu hareketi çeyrek düzlem (Quarter Plain) manevraları olarak sınıflandırmaktadır. Zor bir hareket olmasına rağmen keskin manevralar yapabilen bir hedefe karşı hızla yaklaşmanın en etkin yöntemidir.

Diğer bir zorluk ise dönüşlerde meydana gelmektedir. Yatay düzlemde uçak gövdesine göre doğu veya batı yönünde bir kuvvet elde etmek için uçak önce belli bir yatış açısı ile yatmakta, böylece kaldırma kuvvetinin yatay bileşeni gövdeyi doğu veya batı yönünde hareket ettirmektedir. Yeterli dönüş elde edildiğinde yatış açısının düzeltilmesi ile hareket sonlanmaktadır. Yatış için geçen ve dönüş manevrası ile örtüşen süre yüksek hızlarda hareketin toplam süresinin dörtte biri kadar olabilmekte ve bu durum açı belirleme matrisinde hatalı hesaplamalara neden olmaktadır. Bu durumun üstesinden gelebilmek amacıyla Üre ve İnalhan tarafından önerilen yatış hareketinde sürenin ihmal edilmesi yaklaşımından vazgeçilmiştir [52].



Yatış hareketinde süre belirtilmeli veya uçağın kabiliyetine göre istenen yatış açısından hesaplanmalıdır.

Üre ve İnalhan tarafından tanımlanan 6 hareketten biri olan düz uçuş kipi sınıflandırmaya dâhil edilmemiş, tırmanma hareketi ile birlikte ele alınmıştır [52]. Bunun nedeni sabit bir açı ile tırmanmak ile 0 derece ile tırmanma yapmaksızın uçmanın açısal sınıflandırma bakımından aynı anlama gelmesidir.

Dikey/yatay geçiş kipinde, yatış kipinde olduğu gibi süre ve hız ihmal edilmemiştir. Bunun nedeni ses ötesi hızlarda ihmal edilen sürelerde hava muharebesinin seyrini değiştirecek düzeyde pozisyon değişiminin olabilmesidir.

Her hareket kipi 6 adet değişkenden oluşmaktadır. Bunlar kip, süre, hız, yatış, tırmanma ve baş açılarındaki değişimlerdir. Kip 1'den 6'ya kadar tam sayı değeri, süre milisaniye cinsinden uçuş süresi, hız metre/saniye cinsinden yer değişim miktarı, açılar ise radyan cinsinden değerlerdir. Okunurluğu kolaylaştırmak için açısal gösterimler derece cinsinden sunulmuştur. Hareket değişkenleri (14) numaralı eşitlikte verilmiştir.

$$\sigma = \{q, \Delta t, v, \phi, \theta, \psi\} \quad (14)$$

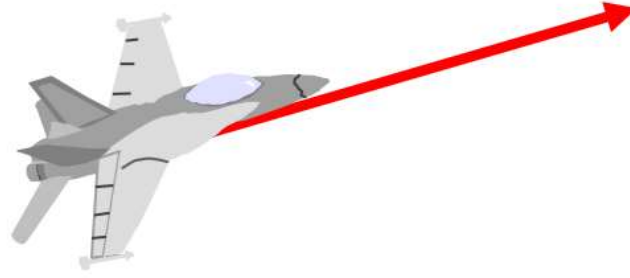
Bu çalışma kapsamında kullanılan hareket kipleri Tablo 1 de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Hareket Kipleri

<b>Kip</b>	<b>Açıklama</b>	<b>Girdiler</b>
1 SP	Düz uçuş	$\Delta t, v, \theta$
2 TU	Dönüş	$\Delta t, v, \theta, \psi$
3 LO	Tırmanma	$\Delta t, v, \theta, \psi'$
4 PY	Dikey/yatay geçiş	$\Delta t, v, \theta, \psi$
5 RO	Yatış	$\Delta t, v, \phi$
6 RP	Yatan tırmanma (3B)	$\Delta t, \phi, \theta$

Hareket kiplerinin neden olduğu yer değişikliği ve parametrelerin ne anlama geldiği aşağıdaki maddelerde açıklanmıştır. Tüm hareketlerde ortak değer olan  $\Delta t$  hareketin ne kadar süre boyunca gerçekleşeceğini  $v$  ortalama hızın ne olacağını belirler.

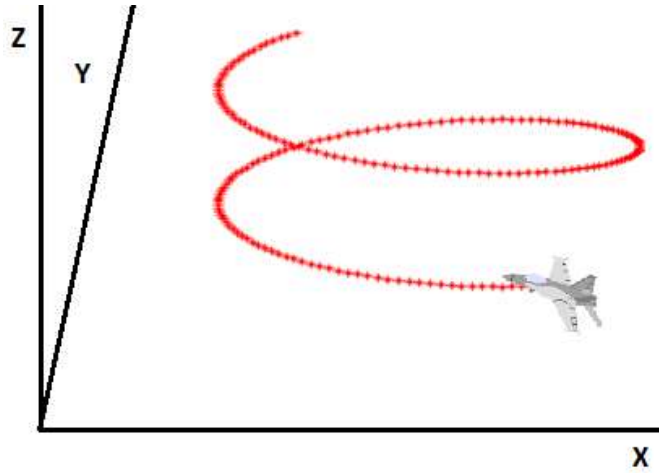
### 3.2.2.1 Düz Uçuş



Şekil 7 Düz Uçuş

Düz uçuşta (*straight path*) uçağın hız vektöründe veya gövdesinde Şekil 7’de gösterildiği gibi herhangi bir açısal değişiklik olmaz. Uçak var olan bir rotada düz ilerler. Hızın büyüklüğü değişebilir. Hız büyüklüğünün değişmesi gövde ile hız vektörü arasındaki açının ( $\alpha$ ) değişmesine neden olabilir. Bu durum uçuş kipinde değişiklik olarak ele alınmamalıdır. Bu hareketin parametrelerinden  $\theta$  sabit tırmanma açısının ne olacağını belirtir.

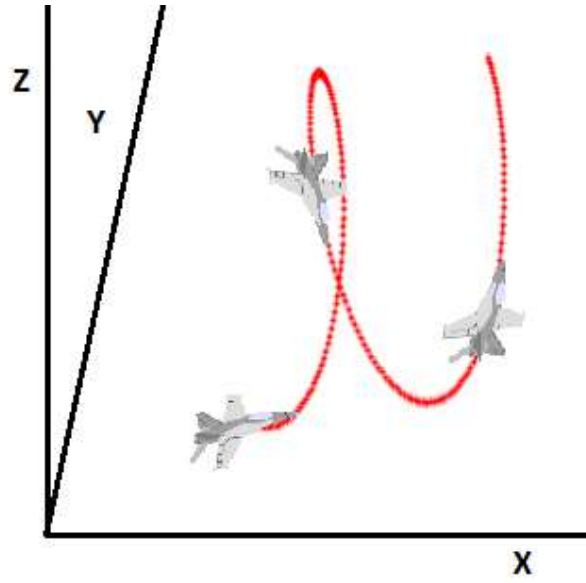
### 3.2.2.2 Dönüş



Şekil 8 Dönüş

Dönüşte (*turn*) Şekil 8’deki gibi uçağın baş açısı yatay düzlemde değişir. Tırmanma açısı ise sabittir. Uçak yatay düzlemde daire çizer. Dikey düzlemde ise ya sabittir veya sabit bir açıyla yukarı tırmanır. Şekil olarak dikey bir silindiri andıran rota izler. Bu hareket sırasında da gövde ile hız vektörü arasında sürekli fark ( $\beta$ ) olacaktır. Bu değişimde ihmal edilmelidir. Bu hareketin parametrelerinden  $\theta$  sabit tırmanma açısının ne olacağını,  $\Delta\psi$ , toplam kaç derecelik bir dönüş yapılacağını belirtir.

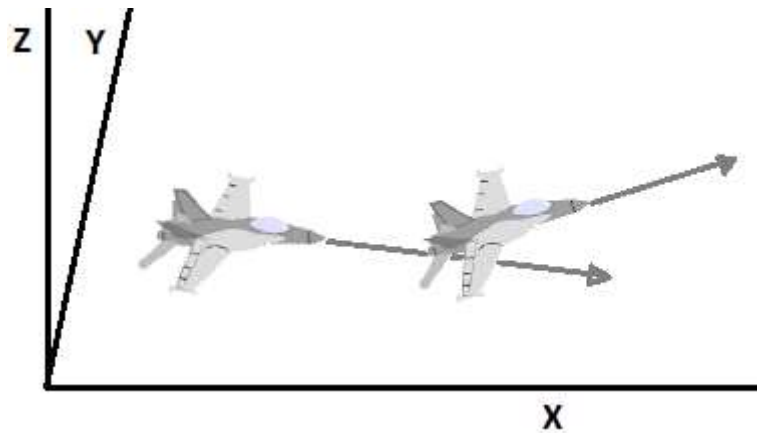
### 3.2.2.3 Tırmanma



Şekil 9 Tırmanma

Tırmanma (*loop*) hareketinde uçak Şekil 9'daki gibi dikey bir daire çizer. Aynı zamanda sabit bir açı ile yatay düzlemde de hareket edebilir. Bu durumda yatay düzlemde ya sabittir veya sabit bir açıyla ilerlemektedir. Hareket yatay düzlemde bir silindiri andıran bir rotaya benzemektedir. Bu hareketin parametrelerinden  $\Delta\theta$  tırmanma açısının toplam kaç derece değişeceğini,  $\Delta\psi$  kaç derecelik bir sürekli değişimle yatay düzlemde ilerleneceğini belirtir.

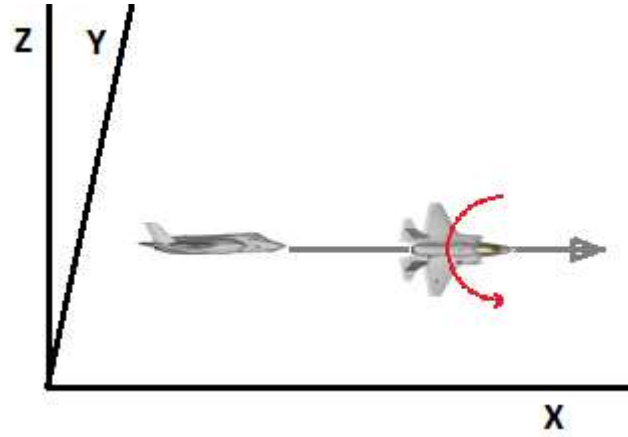
### 3.2.2.4 Dikey Yatay Geçiş



Şekil 10 Yön Değiştirme

Şekil 10'da resmedilen dikey yatay geçiş (*pitching yaw transition*) hareketi sırasında geçen zaman ihmal edilecek kadar azdır. Ses üstü hızlarda bu süre önemli olduğundan ihmal edilmemiştir. Uçak kısa süre içinde hem dikey, hem de yatay düzlemde yönünü değiştirir. Bu hareketin parametrelerinden  $\Delta\theta$  tırmanma açısının toplam kaç derece değişeceğini,  $\Delta\psi$  dönüş açısının toplam kaç derece değişeceğini belirtir.

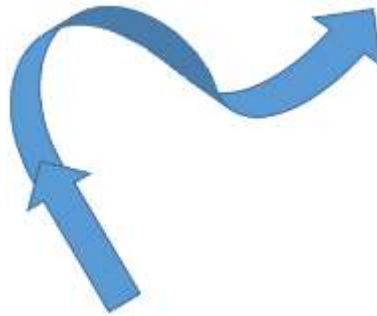
### 3.2.2.5 Yatış



Şekil 11 Yatış

Şekil 11'de resmedilen yatış (*roll*) hareketi, uçağın hız vektöründe herhangi bir açısal değişim olmaksızın kendi eksenini etrafında dönmesidir. Bu dönüş sırasında hız vektöründe ihmal edilebilir gürültü olabilir. Bu gürültü dönüş sonunda hızda açısal değişikliğe neden olmuyorsa ihmal edilmelidir. Bu hareketin parametresi  $\Delta\phi$  toplam kaç derece yatış gerçekleşeceğini belirtir.

### 3.2.2.6 Yatan Tırmanış (3B)



Şekil 12 Yatan Tırmanış

Her üç düzlemde yön değiştiren yatan tırmanış hareketi Şekil 12’de gösterilmiştir. Benzer hareketler çeyrek düzlem manevra olarak adlandırılmaktadır. Hareket sırasında hem yatış, hem de tırmanma hareketi yapılmaktadır. Fakat sonuçta baş açısı değişerek yatay düzlemde yön değişikliği olmaktadır. Hareket zor bir hareket olmasına rağmen başarılı olarak uygulanması hava savaşının kazanılmasında önemli yere sahiptir. Bu harekette toplam 360 derece tırmanma ve 360 derece yatış hareketi yapılmaktadır. Sonuçta ise yatışın yapıldığı yönde 90 derece yön değişikliği olmaktadır. Bu hareketin parametrelerinden  $\Delta\theta$  tırmanma açısının toplam kaç derece değişeceğini,  $\Delta\varphi$  toplam kaç derece yatış gerçekleşeceğini belirtir.

### 3.2.3 Manevra Tanımlama

Temel hareket sınıfları tanımlandıktan sonra uçak tarafından yapılacak manevraların bu hareketler cinsinden nasıl ifade edileceği Tablo 2’de örneklenmiştir. Verilen örnekte [53] çalışmasında yer alan tanımlar kullanılarak tablodaki manevralar hareketler cinsinden çözümlenerek tanımlanmıştır.  $\Delta t$ ,  $v$  değerleri uçuş anında bir önceki hareketin çıktısına göre anlık hesaplanacaktır. Parametrelerin kesin değerleri, tanımlar ve bağıl geometri ihtiyaçları göz önüne alınarak hareket öncesinde öğrenme yönteminin önerdiği biçimde hesaplanmalıdır. Tablo 2’de yer alan tanımlar [53] çalışmasından orijinal açıklamaları tercüme edilerek kullanılmıştır.

**Tablo 2.** Örnek Manevra Hareketleri

<b>BFM</b>	<b>q</b>	<b><math>\varphi</math></b>	<b><math>\Theta</math></b>	<b><math>\Psi</math></b>
Kırma	RO			
	TU			$\pi/2$
Varil yatış saldırısı	RP	$3\pi/2$	$2\pi$	
	RO	$\pi/2$		
Immelmann	LO		$\Pi$	
	RO	$\pi$		
Yarım-S	RO	$\pi$		
	LO		$\Pi$	
Şandal	RO	$x$		
	PY		$y$	
	TU			$\pi$
	PY		$-y$	
	RO	$-x$		

Buradaki örnek savaş manevraları dışındaki manevralarında benzer yöntemle ifade edilebileceği açıktır. Bu çalışmada olası her manevra çözümlenmemiş, alan bilgisi kullanılarak çözümlenmenin yapılabileceği gösterilmiştir.

### 3.2.4 Düzgünleştirme

Uçuş hakkında anlık pozisyon, hız ve açısal değerleri içeren ham veri elde edildikten sonra, her bir uçuş anına ait veri ile bir önceki ana ait veri arasındaki fark alınarak anlık değişimler hesaplanmıştır. Anlık olarak alınan bu değişimler ilk bakışta gürültü de içermektedir. Kısa aralıklarla kaydedilmiş veride yer alan gürültü kullanımını elverişsiz hale getirmektedir. Verideki gürültünün giderilmesi için bu veri üzerinde yumuşatma yapılmıştır. Düzgünleştirme sırasında veri aynı zamanda sabit zaman aralıklarına da dönüştürülmüştür. F-16 uçağından saniyede yaklaşık 25 kayıt alınmasından dolayı bu zaman aralığı 40 milisaniye olarak belirlenmiştir. Kullanılan Laplace transfer fonksiyonu (8) eşitliğinde verilmiştir. Her 3 açı (15) eşitliğinde yer alan fonksiyon ile düzgünleştirilmiştir. Aynı yöntem farklı uçaklar için kullanıldığında katsayılar farklı veri kaynaklarından alınan veri yapısına göre dönüştürülmelidir.

$$H(s) = \frac{25}{s^2 + 10s + 25} \quad (15)$$

Düzgünleştirme sonucunda bir zaman aralığındaki toplam açısal değişim korunmaktadır. Fakat veri hem sabit zaman aralıklarına yayılmakta, hem de çok kısa zaman aralıklarında görülen taşmalar giderilerek daha yumuşak ve tutarlı değişim değerleri elde edilmektedir. Veri düzgünleştirildikten sonra 3 saniye boyunca örnek veride gözlemlenen değişim Tablo 3'de verilmiştir. Tablonun ilk sütununda zaman damgası bulunmaktadır. Bu zaman damgası uçuşun başladığı andan itibaren geçen milisaniye cinsinden süredir. İlk veri sütunlarında sırasıyla yatış, yunuslama ve baş açılarındaki değişim, düzgünleştirilmiş veri sütunlarında ise aynı açıların düzgünleştirilmiş hali bulunmaktadır. Tablonun sonunda alınan toplamda 3 saniye sonunda gözlemlenen toplam değişimin yaklaşık değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Daha uzun süreli düzgünleştirmede bu miktarlar daha da yakındır.

**Tablo 3** Veri Düzgünleştirme Örneği

t	İlk veri			Düzgünleştirilmiş veri		
	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
2,035	0,256410	0,224671	-0,204997	1,305251	0,321083	-0,199486
2,075	0,750000	0,694232	-0,394671	1,298124	0,340347	-0,209917
2,121	0,217391	0,102868	-0,052101	1,267766	0,357688	-0,220071
2,155	0,000000	0,760391	-0,564361	1,230403	0,380370	-0,232615
2,194	-0,769231	0,160554	-0,345020	1,176431	0,407046	-0,249322
2,235	-0,487805	0,730023	-0,243024	1,088117	0,426028	-0,267029
2,280	-1,111111	0,267886	-0,254584	0,972820	0,440007	-0,279674
2,315	-0,857143	0,520744	-0,228155	0,836618	0,450809	-0,287148
2,353	-1,315789	0,720790	-0,202040	0,685770	0,456470	-0,290625
2,395	-0,952381	0,387701	-0,182810	0,525918	0,465882	-0,290446
2,440	-2,000000	0,561123	-0,218562	0,364619	0,474730	-0,287083
2,475	-1,714286	0,352776	-0,328331	0,194864	0,480841	-0,282030
2,513	-2,105263	1,017368	-0,199725	0,013961	0,483924	-0,278480
2,554	-1,707317	0,613959	-0,418600	-0,170941	0,493327	-0,275486
2,599	-1,111111	0,356199	-0,171433	-0,351470	0,509780	-0,274824
2,634	-2,285714	0,828159	-0,312725	-0,506586	0,519715	-0,274774
2,673	-1,282051	0,556441	-0,294991	-0,651010	0,529273	-0,273820
2,714	-1,463415	0,702624	-0,222278	-0,783947	0,540739	-0,274149
2,759	-0,444444	0,695798	-0,203454	-0,892602	0,551502	-0,273780
2,794	-1,142857	0,540524	0,056370	-0,966336	0,563563	-0,271510
2,832	-0,263158	0,871155	-0,340443	-1,010852	0,573272	-0,263200
2,874	0,238095	0,629110	-0,046420	-1,029614	0,584498	-0,254082
2,919	-0,222222	0,806048	-0,399862	-1,008222	0,597200	-0,245655
2,954	-0,285714	0,663985	0,058802	-0,960997	0,609864	-0,239654
2,992	-1,052632	0,447946	-0,581969	-0,906178	0,622310	-0,232858
3,033	-0,487805	0,704791	-0,223410	-0,862484	0,628236	-0,229947
3,078	-0,888889	0,543449	-0,114125	-0,829545	0,630785	-0,233280
3,113	-0,571429	0,823970	-0,149152	-0,803264	0,632098	-0,233275
3,151	-0,789474	0,984336	-0,041905	-0,782899	0,634982	-0,229970
3,193	-0,714286	0,551446	-0,165730	-0,766119	0,645934	-0,223220
3,238	-0,888889	1,038519	-0,154915	-0,754322	0,656810	-0,214907
3,273	-1,428571	0,492008	-0,155237	-0,748158	0,669173	-0,207529
3,312	-2,051282	1,104573	-0,357689	-0,758107	0,680019	-0,200861
3,353	-2,439024	0,812862	-0,211316	-0,797718	0,691847	-0,198439
3,398	-1,555556	0,591025	-0,114194	-0,872256	0,708224	-0,199484
3,432	-2,647059	0,808375	0,183155	-0,958220	0,718754	-0,198871
3,471	-1,794872	0,679299	-0,176266	-1,054598	0,725423	-0,190467
3,512	-2,439024	0,990044	-0,027668	-1,156594	0,730358	-0,178856
3,558	-1,739130	0,572061	-0,029935	-1,257225	0,737433	-0,168383
3,592	-3,529412	1,084825	-0,402500	-1,351248	0,743152	-0,156779
3,630	-2,105263	0,591354	0,157044	-1,458390	0,750349	-0,151361
3,672	-2,619048	1,096826	-0,150664	-1,573305	0,757516	-0,146177
3,717	-2,666667	0,808092	0,019447	-1,676817	0,765719	-0,138130
3,752	-2,000000	0,856117	0,021346	-1,777998	0,777037	-0,130167
3,790	-2,368421	1,005465	-0,120275	-1,863340	0,786486	-0,119880
3,832	-1,190476	0,839982	0,103156	-1,931492	0,797724	-0,110826
3,877	-2,000000	0,851949	-0,131557	-1,970892	0,809184	-0,101152
3,912	-1,142857	0,790247	0,014355	-1,985845	0,818088	-0,092067
3,951	-2,307692	1,161375	0,120346	-1,981313	0,824087	-0,084717
3,991	-1,250000	0,507289	-0,122979	-1,971136	0,833500	-0,074678
4,037	-1,956522	0,840670	0,093764	-1,956839	0,839122	-0,065805
4,071	-2,058824	0,987126	0,177255	-1,936411	0,837828	-0,057937
4,109	-0,789474	1,216569	0,122740	-1,925170	0,839621	-0,046216
4,151	-1,904762	1,105888	-0,248220	-1,899784	0,849690	-0,031971
4,196	-0,444444	0,571856	0,062701	-1,865828	0,866555	-0,023839
4,231	-0,285714	1,066173	0,188873	-1,818756	0,876367	-0,020313

t	İlk veri			Düzgünleştirilmiş veri		
	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$	$\Delta\phi$	$\Delta\theta$	$\Delta\psi$
4,269	0,263158	1,011024	0,167233	-1,739263	0,881599	-0,013010
4,311	0,238095	1,192607	-0,061331	-1,628598	0,890206	-0,001861
4,356	0,444444	0,522563	-0,027246	-1,492696	0,903126	0,007164
4,391	1,428571	1,425895	0,139099	-1,341111	0,909558	0,011560
4,428	2,702703	1,187541	0,118069	-1,163585	0,916982	0,016146
4,470	2,142857	0,690829	0,153244	-0,937084	0,934504	0,022892
4,515	2,888889	0,858811	-0,057257	-0,675468	0,945860	0,031158
4,550	2,571429	0,979842	0,079403	-0,394423	0,948036	0,037022
4,589	3,076923	1,038469	-0,013050	-0,103711	0,948683	0,040249
4,630	1,707317	0,559962	-0,077282	0,187918	0,951169	0,042079
4,675	2,000000	0,894585	0,066797	0,454332	0,947318	0,040368
4,710	1,714286	0,830438	-0,024897	0,679214	0,937873	0,037881
4,748	1,052632	0,658295	-0,025828	0,868350	0,928995	0,035556
4,789	0,975610	0,792087	0,067139	1,011333	0,916789	0,031996
4,835	0,652174	0,653606	0,130682	1,107185	0,902458	0,029338
4,870	0,857143	0,771500	-0,025032	1,161445	0,886798	0,029912
4,908	0,000000	0,508069	0,018456	1,184675	0,870704	0,030879
4,949	-0,487805	0,697589	-0,024275	1,174464	0,852041	0,030453
4,994	-0,888889	0,309282	-0,019103	1,120481	0,831549	0,029024
<b>Toplam</b>	<b>-48,827077</b>	<b>55,874630</b>	<b>-7,544122</b>	<b>-42,150710</b>	<b>52,746616</b>	<b>-10,498411</b>

### 3.2.5 Hareket Belirleme

Uçaktan alınan ikili verinin anlamlı hareketlere dönüştürülmesi için kullanılan yöntem [53] çalışmasında yer almaktadır. Bu yöntemde Üre ve İnalhan [40] çalışmasında yer alan açı sınıflandırma matrisi Tablo 4’de belirtildiği şekilde değiştirilmiştir. Yapılan değişiklikte sabit olan tırmanma ve baş açıları sınıflandırma açısından anlamı olmadığı için çıkarılmış, tırmanma ve baş açıları değişimlerine yatış açısındaki değişim eklenmiştir. Kullanılan notasyon değiştirilmemiş, 0 sabit kalan değer, T zamanla değişen değer olarak adlandırılmıştır.

Açı sınıflandırma matrisine göre elde edilen her bir anlık uçuş kaydı işaretlenmiştir. Bu işaretlemeden  $A_i = \{A_{\phi_i} A_{\theta_i} A_{\psi_i}\}$  sonra [53] çalışmasında yer alan hareket çözümü algoritması kullanılarak uçuş kayıtlarından ardışık hareketler türetilmiştir. Algoritma detaylarına [53] kaynağından ulaşılabilir.

Ardışık hareket zinciri elde edildikten sonra ardışık ve yönleri de aynı olan hareketler birleştirilmiş, sınır değerlerin altında olan ve gürültü sayılan hareketlerin açısal değerleri önceki veya sonraki harekete eklenerek silinmiş, uçuş senaryosu en uygun hareket zinciri cinsinden tekrar ifade edilmiştir. Bu iyileştirme algoritmasına ait detaylar [53] referans çalışmada yer almaktadır. Ardışık hareketlerden oluşan uçuş verisi (16) veri kümesiyle ifade edilmektedir.



$$F = \{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\} \quad (16)$$

Bu yöntemle uçuşun hiçbir anının ihmal edilmediği ve ardışık tekrar eden hiçbir uçuş kipinin olmadığı garanti edilmiştir.

**Tablo 4.** Açık Sınıflandırma Matrisi

<b>Q</b>	$\dot{\psi}_r$	$\dot{\theta}_w$	$\dot{\psi}_w$
SP	0	0	0
TU	0	0	T
LO	0	T	0
PT	0	T	T
RO	T	0	-
RP	T	T	-

### 3.3 Dizin ve Arama

Manevraların tanımı ile uçuş hareketlerinin tanımı birbirine çok benzerlik göstermektedir. Uçuş kipinde kesin açısal değerlere sahip olan hareket kipleri manevra tanımlarında yaklaşık değerler ile ifade edilmektedir. Örneğin sağa kırma savunma manevrası yapan bir uçak önce sağa dönüşünü sağlayacak kadar yani 90 dereceye yakın bir miktar sağa yatış yapmış, saldırganın savrulmasını sağlayacak kadar, yaklaşık çeyrek daire sağa dönmüş ve sonrasında yatışı düzeltip yoluna devam etmiştir. Bu manevranın biçimsel tanımında ise 90 derece yatış, 90 derece dönüş, 90 derece ters yönde yer almaktadır. Görüldüğü üzere hareket kipleri aynı olmakla beraber açısal değerler belirli sınıflandırma veya yakınlık ile benzerdir. Bu nedenle manevra tanımındaki kesikli açıların yapılan hareketle eşlenerek arama yapılabilmesi için kesikli değerlere yuvarlanmış veriler ile dizinlemeye ihtiyaç vardır.

Makine öğrenmesinde bir uçağın;

- i) bir manevrayı ne zaman yaptığı,
- ii) belirli bir anda hangi manevrayı yaptığı

bilinmek isteniyorsa, uçuş kayıtları içinde manevraya ait hareketler hızlı ve etkin bir yöntemle bulunabilmelidir. Uçuş kayıtları sayısı yüksek miktarlara ulaştığında bunun için çıkılması mümkün olmayan bir zorluk olacağı aşikârdır. Bu durum uçuş içindeki hareketlerin dizinlemesi ve bu dizin üzerinde etkin bir arama yapılabilmesi

ihtiyacını ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla 2 arama yöntemi incelenmiş ve özgün bir dizinleme ve arama yöntemi önerilmiştir.

### 3.3.1 Sıralı Arama

Bu yöntemle manevra içindeki hareket listesi, uçuşun ardışık hareketleri ile karşılaştırılarak örtüşmeleri bulmaktadır. Bu yöntemin 2 sakıncası vardır.

- i) Manevrada tekrar eden hareketler teması varsa uçuş kayıtlarındaki her uymazlıkta manevranın hareket listesine tekrar geriye doğru bakılması gerekir. Bu işlem önemli düzeyde performans kaybı demektir.
- ii) Diğer bir sakıncası ise her manevra aramasında aynı maliyetin tekrar etmesi, bu yöntemle aynı anda birden çok manevranın aranmamasıdır.

Yukarıdaki sakıncalar göz önüne alındığında sıralı arama, uçuş içinde manevra aramak için performansı düşük bir yöntemdir.

### 3.3.2 Sonlu Durum Makinesi

Bir manevranın içindeki 6 hareket kipi ve bunların arasındaki geçiş diyagramı bir DFA diyagramı olarak ele alınır. Tüm manevraların bir araya gelmesi ile bir biçimsel dil grameri elde edilir. Hareket kipleri bu gramerin alfabesi veya durumları, manevralardaki hareket sıralaması geçişler olur. Nihai DFA sadeleştirilerek durum sayısı azaltılabilir. Uçuş hareketleri listesi üzerinden gidilerek nihai durumlarda manevra tanıma problemine çözüm bulunur.

Bu yöntem soruna uygulanabilecek çok etkin, bilimsel olarak ispatlanmış, kesin bir çözüm olarak görülmektedir. Yöntemin tanımı gereği manevra tanıma problemine aşağıdaki çözümleri getirmiş olmaktadır.

- Aynı anda çok sayıda manevra tanıma sorununu çözmektedir.
- Geri bakma sorunu gramer tanımı gereği ortadan kalkmaktadır.
- Algoritma karmaşıklığı  $O(n)$  düzeyindedir.

İlk bakışta etkin ve ispatlanmış bir yöntem olarak görülse bile bu yöntemin de olumsuz yönleri vardır.

Savaş manevraları sezgisel hareketlerdir. Olası tüm manevraların önceden bilinmesi ve tahmin edilebilir olması savaşın doğasına aykırıdır. Önceden hareketleri, sayısı ve biçimleri tanımlanmış manevra listesine bağlı kalmak, düşman tarafından manevraların tahmin edilebilir olması anlamına gelir. Ayrıca savaş

manevraları dışında sonradan farklı amaçlar ile farklı manevra türleri eklenebilir. Bu durum hiçbir zaman tamamlanması mümkün olmayacak bir DFA mimarisini sonuç verecektir. DFA veya manevra dili her değiştiğinde önceden yapılmış aramalar dâhil tümü yeniden yapılmak zorunda kalınacaktır. Etkin ve bilimsel bir yöntem gibi görülmesine karşın bu yöntem büyük miktarda ve farklı türlerde uçuş verisi söz konusu olduğunda pratik olmaktan uzak durmaktadır.

### 3.3.3 Sepet Dizini

Bu çalışmada her hareketin kendinden önceki belirli sayıdaki hareketi çıkarsayacağı bir bilgi ile etiketlenmesinden oluşan sepet dizini yöntemi kullanılmıştır. Herhangi bir manevra yaklaşık 2 ila 5 hareketten oluşmaktadır. Bunun dışında olası daha karmaşık manevraları aramak ise ilk baştaki hareketler örtüştükten sonra kolay olacaktır.

Her hareket kaydı ile birlikte 32 bit tamsayısı değerinden oluşan bir sepet etiketi kaydedilmektedir. Bu bilgi kendinden önce 4 hareketin ne olduğunu saklamaktadır. Bu etiketin ikil değerlerinin ne anlama geldiği Tablo 5’de açıklanmıştır. Açık değerleri çeyrekler cinsinden 4 grupta ifade edilmiştir. Bu nedenle her açı sınıfı için yalnız 2 bit kullanılmıştır. Açısal etiketleme çeyrek, yarım, üççeyrek, tam daire şeklinde, her 90 derece 1 birim olacak şekilde yapılmıştır. Herhangi bir hareketin en fazla iki açısal parametresi olmaktadır. Bu nedenle açılar tırmanma, baş ve yatış şeklinde değil, birinci ve ikinci açısal parametre olarak kaydedilmiştir.

**Tablo 5.** Sepet Dizini İkili Sıralaması

İkil Sırası	Uzunluk	Açıklama
29 – 32	4	Kullanım Dışı
26 – 28	3	Önceki Hareket
23 – 25	3	İki Önceki Hareket
20 – 22	3	Üç Önceki Hareket
17 – 19	3	Dört Önceki Hareket
15 – 16	2	Önceki Hareketin 1. Açısı
13 – 14	2	Önceki Hareketin 2. Açısı
11 – 12	2	İki Önceki Hareketin 1. Açısı
9 – 10	2	İki Önceki Hareketin 2. Açısı
7 – 8	2	Üç Önceki Hareketin 1. Açısı
5 – 6	2	Üç Önceki Hareketin 2. Açısı
3 – 4	2	Dört Önceki Hareketin 1. Açısı
1 – 2	2	Dört Önceki Hareketin 2. Açısı

Bu etiket değeri Algoritma 1 de yer alan kod parçasının uçuş çözümleme algoritmasındaki döngüye eklenmesiyle  $O(1)$  süresinde hesaplanmaktadır. Uçuş çözümlemde zaten var olan bir döngünün içine eklenmesi nedeniyle hesaplama maliyeti yoktur.

Algoritma 1. Uçuş Kaydı Etiketleme

---

```

1   pfm0 = 0
2   FOR each  $q$  in flight
3     CASE  $q_i$ 
4       SP: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow 0$ 
5       TU: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
6       LO: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
7       TR: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
8       RO: $\alpha \leftarrow \varphi_i/\pi, \beta \leftarrow 0$ 
9       3D: $\alpha \leftarrow \varphi_i/\pi, \beta \leftarrow \theta_i/\pi$ 
10      pfm $i$  = (pfm $i-1$  shr 7) + ( $q_i$  shl 25)
11      pfm $i$  = pfm $i$  ( $\alpha$  shl 14)
12      pfm $i$  = pfm $i$  ( $\beta$  shl 12)

```

---

Aynı etiketleme manevra tanımı için de Algoritma 2 de yapılmıştır. Manevradaki her hareketin sepet etiketi bulunmaktadır.

Algoritma 2. Manevra Etiketleme

---

```

1   pfm0 = 0
2   maskb = 0
3   FOR each  $q$  in BFM
4     CASE  $q_i$ 
5       SP: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow 0$ 
6       TU: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
7       LO: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
8       TR: $\alpha \leftarrow \theta_i/\pi, \beta \leftarrow \psi_i/\pi$ 
9       RO: $\alpha \leftarrow \varphi_i/\pi, \beta \leftarrow 0$ 
10      3D: $\alpha \leftarrow \varphi_i/\pi, \beta \leftarrow \theta_i/\pi$ 
11      pfm $i$  = (pfm $i-1$  shr 7) + ( $q_i$  shl 25)
12      pfm $i$  = pfm $i$  ( $\alpha$  shl 14)
13      pfm $i$  = pfm $i$  ( $\beta$  shl 12)
14      maskb = (maskb shr 3) + 0x0E00F000

```

---

Sepet etiketlemenin  $O(1)$  hesaplama yükü ihmal edilir bir zamandır. Bu yöntem uçuş içinde herhangi bir arama yapmamaktadır. Fakat hareketin başlangıç anında tamamlanmış olan uçuş manevrasının bulunmasında kesin fikir verecek değerli bir

bilgi saklamaktadır. Bu etiket bir tamsayı değeridir. Bu nedenle kolayca dizinlenebilir veya hesaplamalara kolayca dâhil edilebilir, ikili işlemlere sokulabilir, sepet sıralama algoritmasında etkinlikle kullanılabilir. Manevralar soldan başlanarak kaydedildiği için arama logaritmik sürelerde bitirilebilir. Veriyi dizinleme tek erişim ile veriye ulaşmaya olanak sağlar. Diğer bir seçenek ise tüm uçuşu  $O(n)$  zamanda radix sıralama algoritmasını 3 bit sepet boyu kullanarak sıralamaktır [2]. Sıralama işlemi uçuş işlendiğinde bir defaya mahsus yapıp sonucu tekrar kullanılmak üzere kaydedilebilir. Herhangi bir manevranın bir hareket başlangıcı ile eşleme algoritması Algoritma 3 de verilmiştir.

Algoritma 3. Manevra Eşleme

---

```
1  boolean match(i,b)
2      return (ptmb equals (ptmi and maskb))
```

---

### 3.4 Makine Öğrenmesi

Makine öğrenmesi insanlar tarafından yapılmasında güçlük yaşanan konulara çözüm üretme tekniği olarak açıklanabilir. Bir problemi yapay olarak çözmek için aşağıdaki süreci tanımlamak gerekir.

Var olan bir sorunu çözmek amacıyla;

- i. bir durum uzayı,
- ii. yapılması muhtemel faaliyet, iş veya tercihler,
- iii. herhangi bir anda bulunulan durumun arzulanan durum olup olmadığı tanımlanabiliyorsa;

makine durum uzayındaki bir ilk durumdan hedef duruma götürecek adım, iş veya tercihlerden oluşan bir çözüm önerir.

Bir problem yukarıdaki şekilde tanımlanabiliyorsa, o probleme makine öğrenmesi yöntemleri uygulanabilir. Makine öğrenmesi yöntemleri denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve pekiştirilmiş öğrenme başlıkları altında gruplanmaktadır.

#### 3.4.1 Öğreticili Öğrenme

Öğreticili öğrenme (*supervised learning*) daha önceden var olan bir öğrenme verisini kullanarak sonraki gelecek veri kümelerini öğrenebilir. Veri setini sınıflandırmaya yarayan öznitelik değerleri her kümeyi öğrenilmesi gereken bir kümeye

götürmektedir. Öğrenilmesi gereken sınıfa göre öznitelik değerleri sınıflandırılarak makine öğrenmesi sağlanır. Burada var olan öğrenme verisinin bir kısmı eğitim, bir kısmı test amaçlı kullanılmaktadır.

Öğreticili öğrenme sonucuna göre 3 gruba ayrılabilir.

Sınıflandırma (*classification*): Öğrenme ile verilen veri setini kategorilere ayırmak amaçlanıyorsa bu tür öğrenme sınıflandırma olarak adlandırılır. Sınıflandırma kendi içinde kümedeki eleman sayısına göre ikili (*binary*) veya çoklu (*multi-class*) sınıflandırma olarak ikiye ayrılır. Örneğin; “verilen bir bağıl geometriye göre seçilmesi gereken hareket kipi nedir?” sorusunu cevaplamak için makinenin 6 elemanı bulunan hareket kipleri kümesinden birini önermesi beklenir. Bu örnek çoklu sınıflandırma olarak adlandırılır.

Hesaplama (*regression*) : Öğrenme sonucunda sınıflandırma değil de hesaplanmış değerlerin üretilmesi isteniyorsa buna hesaplama öğrenmesi denir. Örneğin; “verilen bir bağıl pozisyona göre tercih edilen hareket kipinde uygulanması gereken yatış açısının değeri nedir?”

Olağan dışılık tespiti (*anomaly detection*) : Verilen bir veri kümesinde normal olmayan verinin bulunmasıdır. Örneğin; “verilen bir bağıl pozisyona göre seçilmesi önerilen hareket kipleri dışında kalan kayıtlar hangileridir?” Bu sorunun cevabı hava muharebesinde başarısı değerlendirilen gerçek bir pilotun hatalı manevralarının tespit edilmesinde, pilotun daha çok eğitime ihtiyacı olduğu alanın belirlenmesinde yardımcı olacaktır.

### 3.4.2 Öğreticisiz Öğrenme

Öğreticisiz öğrenmede (*unsupervised learning*) verinin önceden belirlenmiş bir etiketi yoktur. Bu öğrenmenin amacı veriyi bir yöntemle gruplandırmak veya veri yapısını tanımlamaktır. Yöntem olarak veri kümelemesi, farklı kümelenmiş veriye farklı veri yapısıyla bakılması uygulanabilir. Hava muharebesinde öğreticisiz öğrenme yöntemleri kullanılmamıştır.

### 3.4.3 Pekiştirilmiş Öğrenme

Pekiştirilmiş öğrenmede (*reinforcement learning*) algoritma çalıştığı her veri için bir hareket (*action*) tercihi yapar. Kısa bir süre sonra yaptığı tercihin isabetli olup olmamasına göre bir ödül (*reward signal*) alır. Algoritma en çok ödülü alacak şekilde

sürekli stratejisini iyileştirir. Bu çalışmada pekiştirilmiş öğrenme kullanılmamıştır. Fakat hava muharebesinde açısız avantaj pekiştirilmiş öğrenmede ödül olarak ele alınabilir.

#### **3.4.4 Hava Muharebesinde Makine Öğrenmesi**

Hava muharebesine makine öğrenmesi yöntemleri uygulandığında öncelikle öğrenme ihtiyacını doğuran problemi tanımlamak gerekir. Problem çözme tanımdaki kavramlardan hareket edilirse;

İlk durum (*initial state*) : Fiziksel durum 3 boyutlu uzayda sayılamaz çoklukta noktadan oluşabilir. Aynı şey rakip uçak için de gereklidir. Fakat burada göz ardı edilebilir değişkenler bulunmaktadır. Rakip ile bağılı pozisyon eğer sınıflandırılabilirse ve uçağın güvenli uçabileceği bir irtifada ise uzayda hangi noktada olduğunun fazla önemi yoktur. Fakat bağılı pozisyon bazen birden çok şekilde sınıflandırılabilir. Örnek olarak 90 dereceden büyük kuyruk açısı dezavantaj, 90 dereceden küçük avantajlı pozisyon diye sınıflandırıldığını varsayalım. Sınır değerlerde bulunan 91 veya 89 derecelik kuyruk açılarının nasıl isimlendirileceği bulanık bir konudur. Çünkü küçük veya anlık hareketlerle avantajlı veya dezavantajlı pozisyona geçilebilir. Bazen bu geçişler gürültü düzeyinde ölçüm hatalarından da kaynaklanabilir. Durum değerlerinin sınıflandırması sırasında sınıflar arası geçişin kolay olduğu, gerçek durumun tam olarak kesin olmadığı değerlerde durum uzayına bulanık mantığa dayanan bir bakış açısına ihtiyaç vardır.

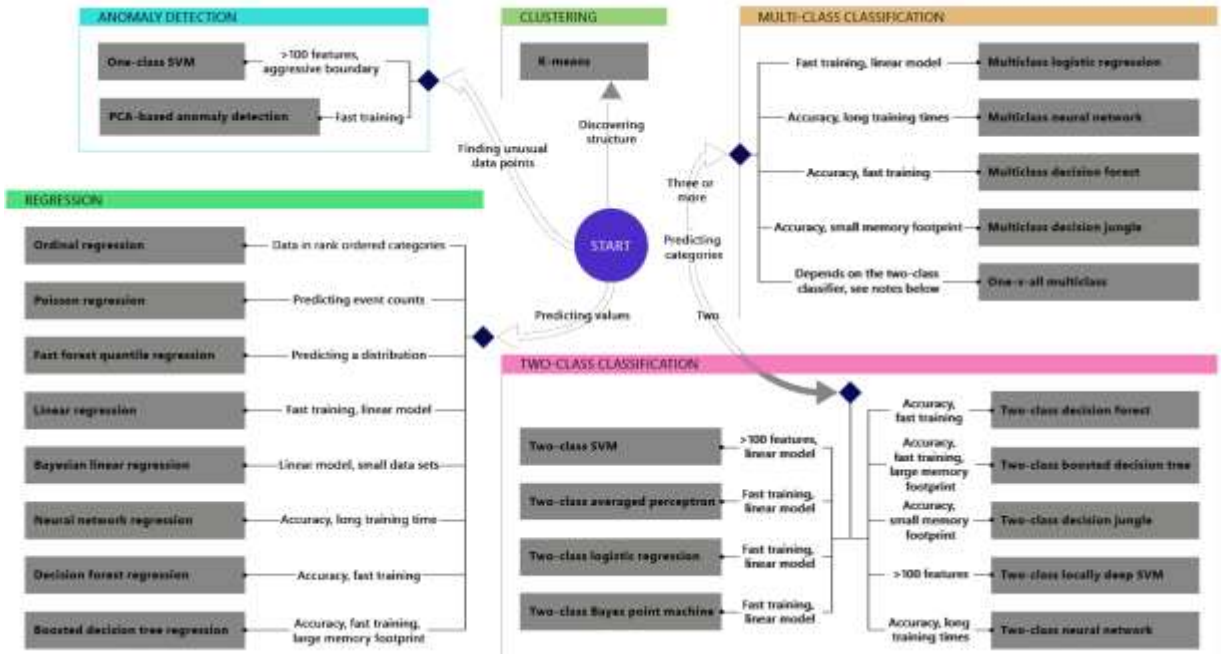
Olası Hareketler (*possible actions*) : Soyutlama düzeyine göre olası hareketler hareket kipleri veya savaş manevrası olarak sınıflandırılabilirler. Makine öğrenmesi duruma göre bir manevrayı veya hareketi ön plana çıkarıp tercih olarak sunabilir. Bu öğrenmenin birinci adımındır. İkinci adımda ise önerilen hareketin açısız parametrelerini de hesaplayarak sunması beklenmektedir. Öyleyse yöntem hem bulunan duruma göre bir sınıflandırma yaparak doğru hareketi önermeli, hem de hassas hesaplamalar, katsayılar kullanarak hareketin nasıl yapılacağını da bilmelidir.

Geçiş Modeli (*transition model*) : Yapılacak bir hareketin uygulanması için gerekli adımların soyutlama modelinin alt seviyeleri tarafından çözülebildiği varsayılmaktadır.

Hedef Testi (*goal test*) : Hedef durum rakip uçağı vuracak ve rakip uçak tarafından vurulmayacak pozisyonda bulunmaktır. Bu amaçla tanımlanmış avantaj fonksiyonları önceki bölümlerde açıklanmıştır. Ayrıca eldeki silahların rakibi vurup vuramayacağı tekdüze biçimde anlık hesaplanabilir.

Geçiş Maliyeti (*path cost*) : Hava muharebesinde kaynaklar sınırlıdır. En önemli kaynaklar zaman ve enerjidir. Kritik durumlarda çoğu zaman tek seçenek bulunmaktadır. Bu seçenek en hızlı biçimde, enerji (hız ve irtifa) kaybetmeden, savrulmadan uygulanmalıdır. Makine öğrenmesi bir durumdan diğer duruma en uygun geçiş yöntemini önermek zorundadır. Bu bilgi uzman pilot tecrübesinde saklıdır ve yöntem bunu öğrenmelidir.

Problemin tanımında yukarıdaki girdileri aldıktan sonra makine öğrenmesi ihtiyaçları ortaya çıkmaktadır. Sayılamaz çoklukta olan durum uzayını bulanık bir şekilde alt kümelere ayırmalı, geçmiş tecrübelerle bakarak olası hareketler arasında doğru tercihi yapmalı, yine geçmiş tecrübelerle bakarak olası hareketlerin alt soyutlama düzeyinde ihtiyaç duyulan parametrelerini hassas biçimde hesaplamalı, yeni duruma geçerken bunu en iyi şekilde yapmalıdır.



Şekil 13 Microsoft Makine Öğrenmesi Algoritma Seçimi [64]



Makine öğrenme yöntemi için Microsoft firmasının bulut hesaplama (Azure) ortamında algoritma seçiminde önerdiği kurallar Şekil 13'de gösterilmiştir. Bu yöntemde göre hem sınıflandırma yapmak için, hem de değerleri tahmin etmek için önerilen seçenekler yapay sinir ağlarının kullanımını önermektedir.

Bu ihtiyaçlara göre çeşitli makine öğrenmesi yöntemlerinin nasıl katkıları sunduğu aşağıda incelenmiştir.

#### **3.4.4.1 Kural Tabanlı Öğrenme**

Kural tabanlı öğrenmede durum değişkenlerin ait olduğu sınıflara göre kurallar ve bir kural gerçekleştiğinde geçerli sonuç üretilmektedir [16]. Eğer kısıtlı sayıda önceden bilinen kurallar işletilerek karar alınacaksa kural tabanlı öğrenme iyi sonuçlar üretmektedir. Var olan öğrenme verisinden kurallar türeterek kural kümesi üretmek, karar ağaçlarını kullanarak kural üretmekten farklı değildir. Hava muharebesinde kural tabanlı veya karar ağaçları oluşturularak yapılan makine öğrenmesinde aşağıdaki sorunlar ile karşılaşmıştır.

- i) Aynı anda birden çok kuralın sağlandığı durumlar olmaktadır. Bu durumda kurallardan biri seçilmeli veya sonuç birbirini tam dışlamıyorsa her iki kuralı beraber seçmenin yöntemi belirlenmelidir. Bu genelde bir ağırlık atama yöntemi ile yapılmaktadır. Bu durumda ağırlığın ne olacağını veri üzerinden tespitine ihtiyaç vardır.
- ii) Durum değişkenleri değer aralıklarına göre sınıflandırıldığında sınır noktalara yakın verinin üyeliği farklı değerlendirilmeli, bu konuda bulanık mantığa dayalı bir yaklaşım izlenmelidir.
- iii) Üretilen sonuç sadece seçilecek manevrayı değil, aynı zamanda açışal sınıfları da üretebilmelidir. Örneğin sağa dönüş yap yerine sağa çeyrek daire dönüş yapmak sonucu üretilmelidir. Kural tabanlı öğrenmede hassas hesaplar yaparak sonuç üretmek mümkün olmamıştır.

Yukarıda sıralanan sorunlar karar ağacı veya kural tabanlı öğrenmenin hava muharebesi için yeterli olmayacağını ortaya koymuştur. Literatürde yer alan kural tabanlı ve yapay sinir ağlarını kullanarak hava muharebesi öğrenme tekniklerinin karşılaştırmalarında da benzer tespitler vardır [12]. Hava muharebesinde birden çok kuralı bulanık yaklaşımla işletebilecek, aynı veriden birden çok sonuç üretebilecek,

ürettiği sonuçların bir kısmı sınıflandırma, bir kısmı olabilecek bir makine öğrenmesi yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

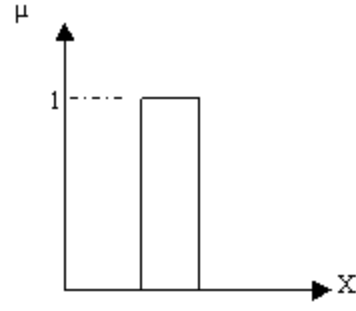
#### **3.4.4.2 Yapay Sinir Ağları**

Çok katmanlı nöron yapısı sayesinde yapay sinir ağları [21] eğitim verisi üzerinden kesin sonuçlar üretebilmektedir. Ayrıca birden çok değişken için sonuç üretme sorununu da çözmektedir. Girdi değişkenlerinin değeri ne olursa olsun sayısal büyüklükleri doğru öğrenmekte güçlü bir yapıya sahiptir. Ancak kesikli değer üretilmesi gereken durumlarda kural tabanlı yapının getirdiği hareket seçme becerisini sağlamak için ilk nöron katmanında kullanılacak eşik değerlerinin ve nöron sayısının hesaplanmasında ön tasarıma veya kesinleşmiş alan bilgisine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle yapay sinir ağları tek başına hava muharebesinde hareket kipi ve açılal parametrelerin hesaplanmasında yeterli değildir.

#### **3.4.4.3 Bulanık Mantık**

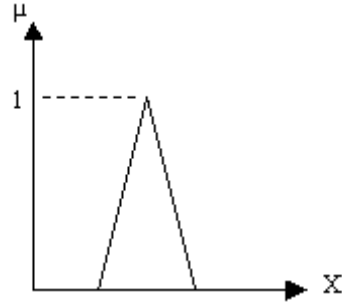
İnsanlar günlük hayatında cevapladıkları sorunların az bir kısmını kesin olarak evet veya hayır diye yanıtlar. Sorulara çoğu zaman kesin olmayan yargılarla güçlü veya zayıf yanıtlar verilir. Zadeh tarafından önerilen bulanık küme teorisi hayatın bu belirsiz olduğu alanlarını kapsar [4]. Klasik mantık kesin değerler kullanarak sınıflandırmaya zorlarken bulanık mantık bulanık alanları bulanık bırakır.

Bulanık mantıkta sınıflandırma için kullanılacak kümeler de bulanık olarak tanımlanır. Kümedeki sınıflar tanımlanırken doğal dil veya insan bakış açısı ile örtüşen sınırlar belirtilir. Bir veri seti kümenin hangi sınıfa aittir sorusunun cevabı; belirli oranda bir sınıfa, belirli oranda diğer sınıfa şeklinde olacaktır. Bir bulanık kümeye ait olmayı belirleyen fonksiyon üyelik fonksiyonu olarak adlandırılır. Bulanık küme fonksiyonu ürettiği [0-1] aralığındaki değerler ile verilen bir referans değer ne oranda hangi sınıfa üye olduğu belirtir. Bulanık olmayan üyeliklerde Şekil 14'de gösterilen kesikli değer ile referans değer belirtilen aralıkta olup olmadığına bakılır. Aralıkta değilse 0 değeri kesin üye olunmadığını, aralıkta ise 1 değeri kesin üyeliği belirtir. Bulanık küme teorisinde ise aşağıda belirtilen farklı üyelik türleri yer almaktadır.



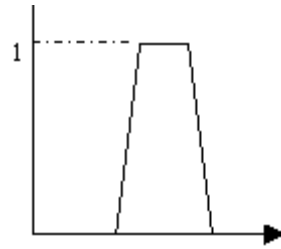
Şekil 14 Kesikli Küme

Üçgensel üyelik fonksiyonu Şekil 15’de gösterildiği gibi merkez değerde kesin üyelik, başlangıç ve bitiş değerlerine doğru doğrusal olarak azalan bulanık üyelik değeri döner.



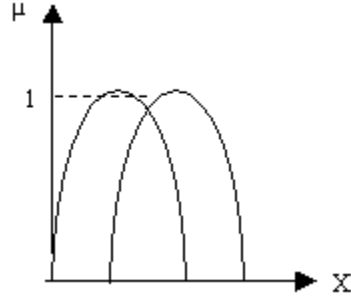
Şekil 15 Üçgensel Küme

Şekil 16’da gösterilen yamuk kümede ise üçgen kümeden farklı olarak tam üyeliği gösteren merkez nokta yerine tam üyelik aralığı bulunmaktadır.



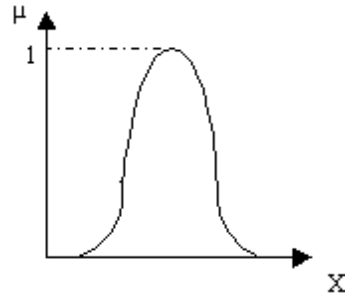
Şekil 16 Yamuk Küme

Üyelik değerinin merkez noktadan kuadratik olarak azaldığı ve birden çok sınıfa üyeliğin üstü üste çakıştığı gösterim Şekil 17’de sunulmuştur.



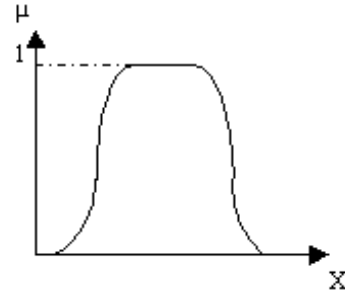
Şekil 17 Kuadratik Küme

Gaus dağılımında kuadratik fonksiyondan farklı olarak üyeliğin sınır noktalarda daha geniş bir alana yayılmıştır. Gaus üyelik fonksiyonu Şekil 18’de gösterilmiştir.



Şekil 18 Gaus Küme

Gaus üyelik kümesinde tam üyelik merkez nokta yerine aralık olarak tanımlandığında Şekil 19’da gösterilen çan eğrisi üyelik fonksiyonu elde edilmektedir.



Şekil 19 Çan Eğrisi

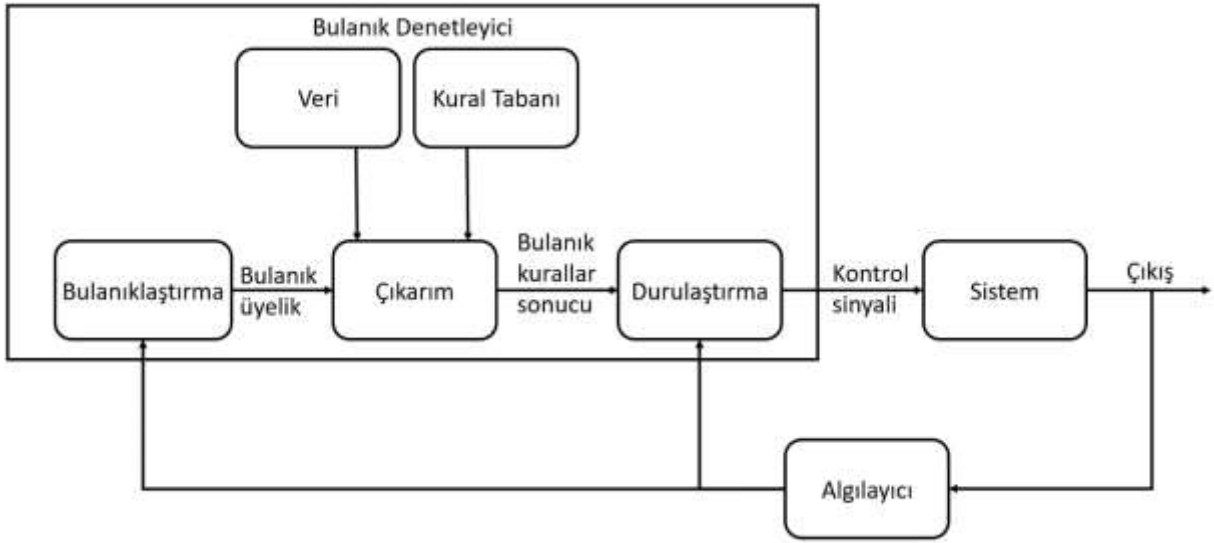
Yukarıdaki şekillerde tek bir sınıfa ait üyelik gösterilmiştir. Gerçekte ise verilen bir referans değer aynı kümedeki birden çok sınıfa üye olabilir. Bulanık mantık her sınıfa ait üyelik değeri atanmasına olanak vermektedir.

**Bulanık Denetim:** Doğal dil ile ifade edilen kuralların bulanık üyeliklerin değerlerine göre yapılan denetimdir. Bulanık denetim öncelikle sınıflara göre tanımlanmış bir kural tabanı gereklidir. Fakat üyelikler bulanık olduğu için aynı anda birden çok kuralı

tetikleme olanağı olacaktır. Bu durumda çeşitli ağırlıklar kullanarak kuralların ortak sonucuna dayalı bir denetim sistemi oluşturmak mümkündür [9]. Sugeno [9] tipi bir kural yapısı (17) ifadesindeki gibi tanımlanmaktadır.

$$\text{If } \chi_1 \text{ is } A_1, \dots, \chi_m \text{ is } A_m \text{ then } y = \chi_0 + k_1\chi_1 + \dots + k_m\chi_m \quad (17)$$

Yapılacak denetime esas olacak kurallar (17) ifadesindeki gibi tanımlandığında denetleyicinin bir kural tabanı oluşmuş olacaktır. Bulanık denetleyici bir sistemin çalışma adımları bulanıklaştırma, çıkarım motoru ve durulaştırma başlıklarında özetlenebilir.



Şekil 20 Bulanık Denetleyici

**Bulanıklaştırma:** Bulanıklaştırma denetleyicilere giren giriş değerlerinin ait olduğu üyelik sınıflarının belirlenmesidir. Bir giriş değeri birden çok sınıfa farklı oranlarda üye olabilir.

**Çıkarım:** Giriş üyelikleri bulanık olması nedeniyle kuralların tetiklenmesi de bulanık olacaktır. Bir kuralın aktif olup olmayacağı çeşitli katsayılar ile belirlenir. Bulanık çıkış değeri, kurala giren her üyeliğin bir katsayı ile çarpımı sonucu elde edilir. Sonuç olarak bir kuralın ne oranda tetiklenmiş olduğu da bulanık olarak ifade edilmiş olur.

**Durulaştırma:** Sugeno tipi kural tanım gereği giriş değerlerini de içeren bir sonuç üretmektedir. Yukarıda verilen (17) eşitliğinde kural tetiklendiyse her giriş değeri bir katsayı ile çarpılarak kural oluşturacağı çıkış elde edilmiş olur. Fakat bulanık denetleyicide aynı anda birden çok kuralın tetiklenmesi ve her kural bulanık bir

katsayı ile tetiklenmiş olması, kurallar arasında bir ağırlık belirleme ihtiyacı ortaya çıkarmaktadır. Durulaştırmada tetiklenen her kuralın sonucu ne oranda etkileyeceği kuralın giriş değerlerini de dikkate alarak ürettiği çıkış değeri, her kural çıkışı için sabit bir katsayı ve kuralın bulanık ağırlığı ile birlikte hesaplanmaktadır. Durulaştırma sonucu üretirken izlenen yaklaşımlar şunlardır;

En yüksek değer: Birinci seçenek en etkili kuralı almaktır. En yüksek tetiklenme değerine sahip olan kural en etkili kuraldır. Bu yöntemde birden çok kural en yüksek değere sahip olduğunda ne yapılacağı bilinmemektedir.

En yükseklerin ortalaması (*Mean of Maximum*): Birden çok en yüksek tetikleme olması sorununa çözüm olarak en yüksek tetiklemeye sahip kuralların çıkışlarının ortalaması alınır.

Alan Merkezi (Center of Area): Bu yöntemde kurallar arasında ayırım yapılmaz. Tetiklenen her kuralın bulanık çıkışlarına ait üyelik fonksiyon değeri ile ağırlıkları çarpılarak toplanır. Üyelik fonksiyon değerlerinin toplamına bölünerek her kuralın bulanık tetiklenmesine göre sonuca belirli bir katsayı oranında katkıda bulunması sağlanır. Alan merkezi en yaygın kullanılan yöntemlerden biridir.

Bulanık denetleyici ile birden çok kuralın aynı anda işletilmesi, kurallara ağırlıklar atanarak sonuca etki etmesi, sınır değerlere yakın üyeliklerin farklı kuralları da tetiklemesi sorunu çözülmektedir. Fakat bu yöntemde zorluk üyelik fonksiyonlarının yazılmasında ve sonucun üretilmesindeki katsayıların belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Makine öğrenmesi yöntemiyle bu katsayıların hesaplanabileceği bir yönetime ihtiyaç vardır.

Yukarıdaki yöntemler incelendiğinde her yöntemin öğrenme ihtiyacının çeşitli kısımlarını karşıladığı görülmektedir.

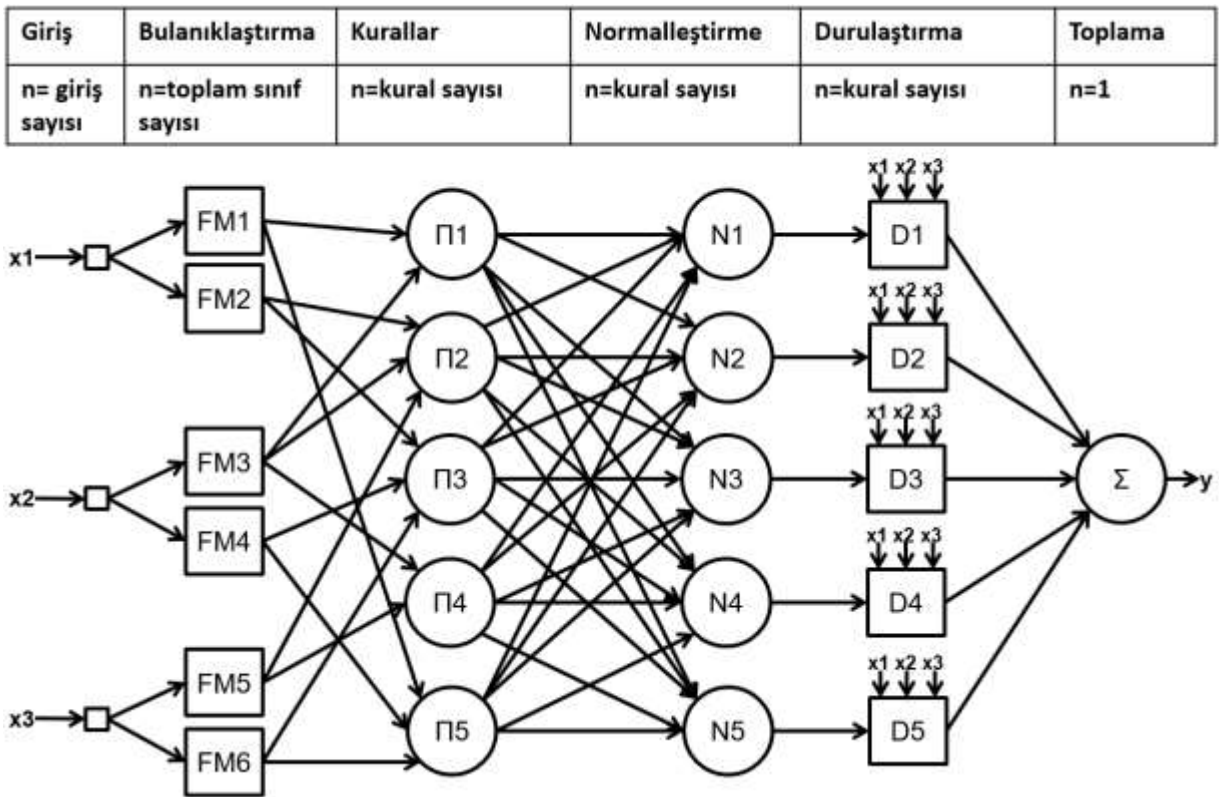
- Kural tabanlı öğrenme; alan bilgisinden gelen kuralların insan dilinde kolayca ifade edilmesine, var olan veriden yeni kurallar üretilmesine, doğal dile yakınlığı nedeniyle üretilmiş kuralların alan bilgisine sahip uzmanlar tarafından doğrulanmasına olanak sağlar.
- Yapay sinir ağları; öğrenme verisinden pilot deneyimlerini güçlü biçimde öğrenerek sınıflandırma, hesaplama ve çoklu çıkış sorunlarının tamamını çözer.

- Bulanık mantık; birden kuralın aynı anda tetiklenmesini, kurallara ağırlık tanımlanmasını, sınıflandırmadaki bulanık küme sorunlarını çözer.

#### 3.4.4.4 Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS)

Yukarıda bahsedilen farklı öğrenme yöntemlerinin hava muharebesinde adreslediği ihtiyaçlar ve eksik kaldığı alanlar vardır. Tüm bu yöntemleri bir araya getiren çözüm olarak Jang tarafından tasarlanan Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım (ANFIS) Sistemi ihtiyacı karşılayacak bir makine öğrenme yöntemi olarak belirmektedir [15].

Yapay sinir ağları yüksek miktarda veriyi çeşitli çıktı gruplarına göre sınıflandırmayı başarabilen en eski makine öğrenme yöntemlerinden biridir. Bulanık çıkarım sistemleri ise girdi değerlerini bulanık üyeliklere göre sınıflandırıp tanımlanmış katsayılara göre durulaştırılmış çıktılar üretebilmektedir. ANFIS mimarisi ise her iki yöntemi bir araya getirerek eğitim verisini kullanarak durulanmış sonuçlar üreten bir çözüm üretmektedir. Tipik bir ANFIS mimarisinin blok diyagramı Şekil 21’de sunulmuştur.

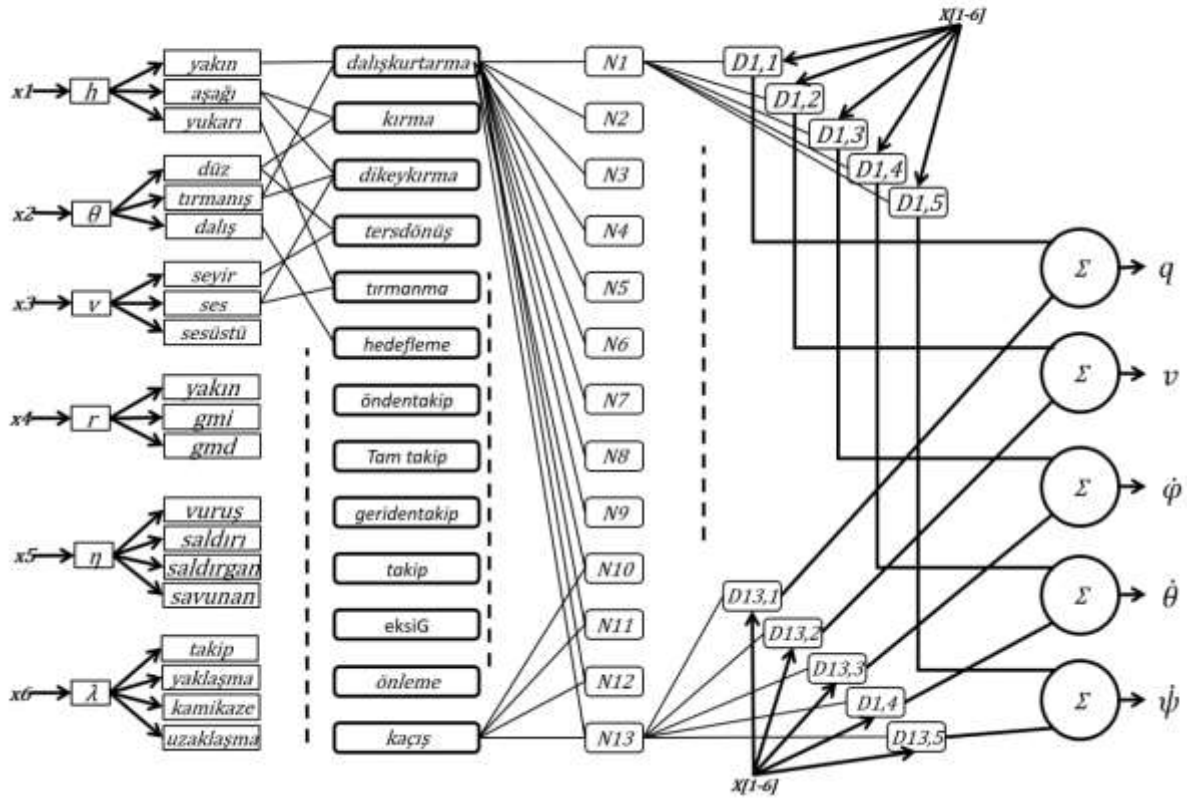


Şekil 21 ANFIS Mimarisi

Yukarıdaki yapıda ilk katmanda girdi değişkenleri yer almaktadır. İkinci katmanda her girdi değişkeninin üye olabileceği değer sınıfları ve bu sınıfa üyeliğini hesaplayan üyelik fonksiyonları yer almaktadır. Üçüncü katmanda ise kurallar yer almaktadır. Bu kurallar kolay anlaşılır, doğal dile yakın ifade edilebilen kurallardır. Şekilden de görüleceği üzere bir üyelik fonksiyonu birden çok kuralı tetikleyeceği gibi, bir kural birden çok üyelik fonksiyonu tarafından tetiklenebilmektedir. Hangi fonksiyonun ne kadar sonuca etkileyeceği durulaştırıcı katsayılarına bağlıdır. Bu yapı geri beslemeli yapay sinir ağı eğitimi yöntemi ile ANFIS mimarisini eğitime olanağı sağlamaktadır. Dördüncü katmanda ise kuralların sonuçları bir araya getirilerek her kuralı sonuca olan etkisi belirlenmektedir. Beşinci katmanda durulaştırma yapılmaktadır. Burada ilk katmanda kullanılan girdi değerleri tekrar kullanılmaktadır. Son katmanda ise durulanmış değerler toplanarak sonuç üretilmektedir.

### 3.4.5 ANFIS Tasarımı

Giriş	Bulanıklaştırma	Kurallar	Normalleştirme	Durulaştırma	Toplama
$n = \# \text{ giriş}$	$n = \# \text{ sınıf}$	$n = \# \text{ kural}$	$n = \# \text{ kural}$	$n = \# \text{ kural} \times \# \text{ çıkış}$	5



Şekil 22 Çok Çıkışlı ANFIS Mimarisi



Bu çalışmada bulanık sistemin ilk kural tabanını oluşturmak amacıyla karar ağaçlarından faydalanılmıştır. Ayrıca ANFIS mimarisindeki durulaştırıcı ve sonuç katmanı çıktı sayısı kadar tekrar edilmiş, böylece 5 farklı çıktı üretebilen çoklu çıkışlı ANFIS (Multi Output ANFIS) üretilmiştir. Çıktılar sırayla hareket kipi, ortalama hız ve açılal değışimleri vermektedir. Tasarlanan çok çıkışlı ANFIS mimarisinin blok diyagramı Şekil 22’de verilmiştir.

ANFIS mimarisinde veri girişı, bulanıklaştırma, kural işleme, normalleştirme, durulaştırma ve sonuçların toplamından oluşan altı katman bulunmaktadır. ANFIS katmanlarına ilişkin açıklamalar aşağıda sunulmuştur.

### 3.4.5.1 Girdi Katmanı

İlk katman olan girdi katmanı giriş değerlerini ikinci katmana aktarır. Buradaki hücre sayısı girdi sayısına eşittir. Girdide uçakların bağıl geometri bilgileri ve durum bilgilerinden bazı değışkenler yer almaktadır. Bunlar yükseklik, tırmanma açısı ve hızdır. Uçaklara ait diğer durum değışkenleri karar sürecini etkilemediğinden dâhil edilmemiştir. Veri çözümlleme sonucunda uçuş kaydı olarak (18) ve (19) eşitliğinde verilen asıl ve rakip uçağın durum değeri, (20) eşitliğinde asıl uçağın yaptığı hareket, (21) eşitliğinde rakip uçağın yaptığı hareket, (22) eşitliğinde ise bağıl geometri değışkenleri saklanmaktadır. Öğrenme verisi olarak veri çözümlleme sonucunda üretilen aşağıdaki veri kümelerinin bir kısmı seçilerek kullanılacaktır.

$$S_1 = \{h_1, \theta_1, v_1\} \quad (18)$$

$$S_2 = \{h_2, \theta_2, v_2\} \quad (19)$$

$$\sigma_1 = \{\Delta t_1, q_1, v_1, \theta_1, \psi_1\} \quad (20)$$

$$\sigma_2 = \{\Delta t_2, q_2, v_2, \theta_2, \psi_2\} \quad (21)$$

$$R = \{r, h, v, \lambda, \eta_1, \eta_2\} \quad (22)$$

Durum değeri,lerinin saklandığı (18) ve (19) eşitliklerinde her iki uçağın irtifa ve hız bilgileri ihmal edilmiştir. Bunların yerine daha anlamlı olan irtifa farkı ve yaklaşma hızları alınmıştır. Kesişim açısı  $\lambda$  ve ilk uçağın yaklaşma açısından ikinci uçağın yaklaşma açısının ( $\eta_2$ ) hesaplanabilmesi nedeniyle  $\eta_2$  ihmal edilmiştir. Nihai olarak öğrenme için giriş veri kümesi (23) eşitliğinde sunulmuştur.

$$D = \{r, h, v, \lambda, \eta_1, \theta\} \quad (23)$$

### 3.4.5.2 Bulanıklaştırma Katmanı

İkinci katmanda bulanık üyelik fonksiyonları çalışarak her girdinin üye olabileceği kümeye ne oranda üye olduğu bulanık biçimde hesaplanmaktadır. Bu katmandaki hücre sayısı üyelik fonksiyonu veya üyelik kümesi sayısı kadardır. Bu katmandaki nöronların çıktıları (24) eşitliğindeki denkleme göre üretilmektedir. Bu denklemde  $y$  çıkış değerini, üstel dizin olan  $2$  ikinci katmanı, alt dizin olan  $i$  kaçınıcı nöronun çıktısı olduğunu,  $x$  nöronun girdi değerini,  $f$  üyelik fonksiyonunu ifade etmektedir. Bu katmanda nöronların girdileri, birinci katmandaki giriş değerleridir. Üyelik fonksiyonu bir giriş değerinin o nöronun ifade ettiği üyeliğe ne kadar ait olduğunu veya uyum gösterdiğini ifade etmektedir.

$$y_i^2 = f(x_i^2) \quad (24)$$

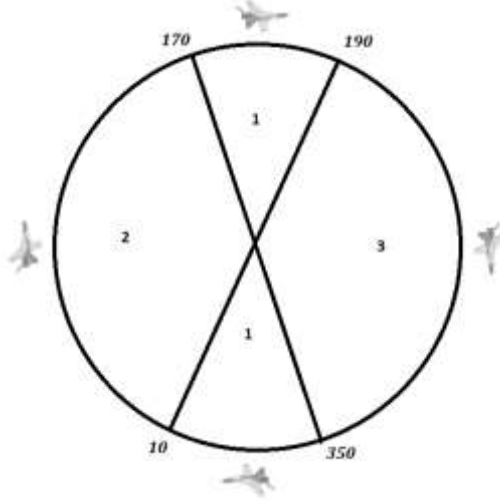
Bu çalışmada bulanıklaştırma fonksiyonu olarak tüm giriş değerleri için Şekil 19'da verilen çan eğrisi fonksiyonu kullanılmıştır. Giriş değerlerinin ait olduğu sınıflar ve bu sınıflara üye olmanın kesikli değer aralıkları Tablo 6'de verilmiştir.

**Tablo 6.** Bulanık Kümeler ve Üyelikler

Küme	Üyeler	Sayı
$A_h$	<i>aşağı yakın yukarı</i>	3
$A_\theta$	<i>düz tırmanma dalış</i>	3
$A_v$	<i>seyir ses sesüstü</i>	3
$A_r$	<i>yakın gmi gmd</i>	3
$A_\eta$	<i>vuruş saldırı saldıran savunan</i>	4
$A_\lambda$	<i>takip yaklaşma kamikaze uzaklaşma</i>	4

İrtifa farkı 3 değer aralığında incelenmiştir. 100 metreden yakın uçaklar birbirine yakın varsayılmış, diğer durumda altta veya üstte olarak sınıflandırılmıştır.

Tırmanma açısının üyelikleri Şekil 23'da görsel olarak ifade edilmiştir. Şekilde [350-10] derece ve [170-190] derece aralıklarını içeren 1'inci bölgeler düz uçuşu, [10-170] derece aralığındaki 2'nci bölge tırmanma, [190-350] derece aralığındaki 3'üncü bölge dalış açılarını ifade etmektedir.

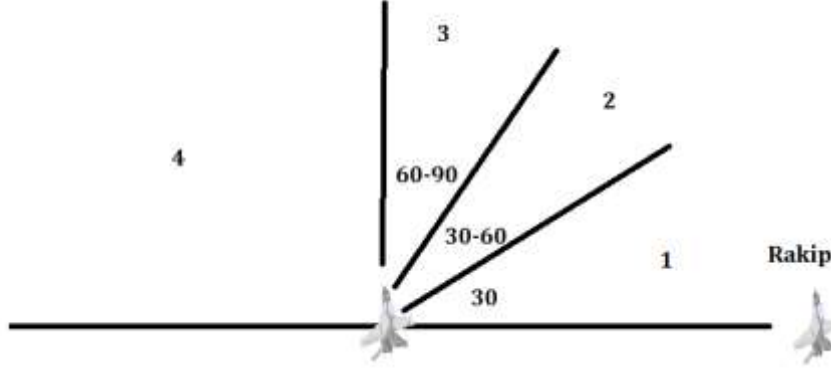


Şekil 23 Tırmanma Açısı Sınıfları

Hız uçağın çevikliğini belirleyen bir değişkendir. En düşük değeri uçağın daha yavaş uçamayacağı havadaki minimum hızıdır. Seyir hızı 0.8 Mach olan normal uçuş hızıdır. Yüksek hızlar ise 1.2 Mach değerine kadar ses hızı, yukarısı ses üstü olarak sınıflandırılmıştır.

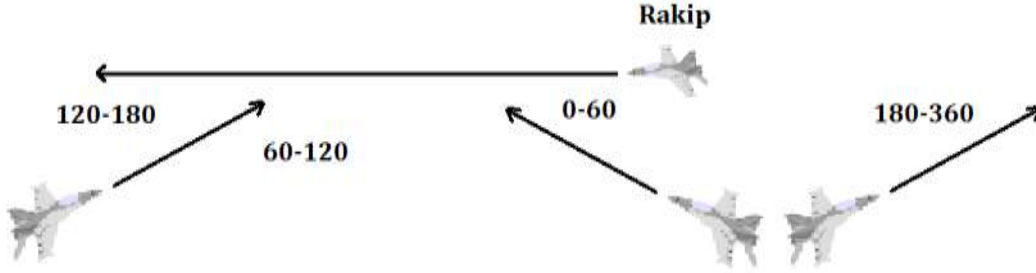
Uçaklar arası mesafe muharebenin şeklini belirlemektedir. Bunları 800 metre ve aşağısı yakın, 800 metre ile 10 kilometre arası görüş mesafesi içinde ve 10 kilometre ve ötesi görüş mesafesi dışında olarak sınıflandırılmıştır.

Uçağın hız vektörü ile rakip uçakla arasındaki mesafe vektörü arasındaki ( $\eta$ ) uçağın açısal üstünlüğünü, dolayısı ile savunan veya saldıran olduğunu belirler. 90 derecenin altı olan 3'üncü bölge saldırgan pozisyonudur. Saldırgan pozisyon da 60 derecenin altında ikiye ayrılır. Rakibi gösterdiği burun açısına göre 1'inci bölge olan [0-30] derece arası vuruş konumu, [30-60] derece arası olan 2'nci bölge saldırı konumudur. 4'üncü bölge ile gösterilen 90 derecenin üzeri ise savunan olarak sınıflandırılmıştır. Görsel olarak Şekil 24'de verilen kuyruk takip açısı sınıflarında 1'inci bölge vuruş, 2'nci bölge saldırı, 3'üncü bölge saldırgan, 4'üncü bölge savunan sınıflarını göstermektedir.



Şekil 24 Kuyruk Takip Açısı Sınıfları

Baş kesişim açısı ( $\lambda$ ) 4 gruba ayrılır. 60 derecenin altı düşük yaklaşma hızını gösterir. Takip olarak sınıflandırılmıştır. [60-120] derece aralığı yaklaşma, [120-180] derece kamikaze, 180 derecenin üstü ters istikamet olması nedeniyle uzaklaşma olarak adlandırılmıştır. En ideal açı  $\lambda < \eta < 90$  konumudur. Görsel olarak baş kesişim açısının görünümü Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 25 Baş Kesişim Açısı Sınıfları

Toplam 6 adet girişin her girişe ait üyelik sınıf sayılarını çarptığımızda 1296 sayısı elde edilmektedir. Bu bir sonraki katmanda olası kural sayısını verir.

### 3.4.5.3 Kural Katmanı

Bu katmanda birinci derece Sugeno [9] tipi bulanık kurallar işletilmektedir. Her bir nöron bir kurala denk gelmektedir. Nöron girdileri, kuralda kullanan bulanık üyeliklerin bir önceki katmandan gelen çıkışlarıdır. Girdilerin birer katsayı ile çarpımı bu kuralın doğruluk derecesini verir. Bir üyelik fonksiyonu birden çok kuralın girdisi olabilir. Her kuralın girişinde farklı katsayı ile çarpılır. Bu katmandaki nöronların çıkış değerleri (25) eşitliğinde verilmiştir. Eşitlikte üst dizin 3, üçüncü katmandaki nöron

çıkışlarını, 2 ikinci katmandaki nöron çıkışlarını, m ikinci katmandaki toplam nöron sayısını, c ise bu katmandaki nöronlara ait katsayıları göstermektedir. Bu katmandaki nöron çıktıları kendisine gelen girdiler ile katsayıların çarpımından oluşur.

$$y_i^3 = \prod_{j=1}^m y_j^2 c_{ij} \quad (25)$$

ANFIS mimarisi toplam 1296 kuralın tanımlanmasına olanak vermektedir. Olası her kural geçerli, uygulanabilir veya doğru olmasa bile bu kadar çok kuralı tanımlamak alan bilgisine sahip kişiler için bile zordur. Öyle durumlar olabilir ki; bir kural tanımlamak mümkün olmayabilir, bazı durumlarda da bir kuralın ihmal edilip edilmeyeceği söylenemeyebilir. Kural tabanlı ve katmanlı bir çözümün önerildiği Burgin ve Sidor [10] çalışmasında bir kısım kuralların varsayıldığı başlangıç noktası olarak ele alınabilir. Kurallar aşağıdaki hedeflere göre alan bilgisi kullanılarak incelenmiştir.

Dalış Kurtulma: Fiziksel şartlar belirli bir hareketi mecburi hale getirir ve başka seçenek kalmazsa tek seçenek kurtulma manevrası olacaktır. Hem irtifa, hem de hızın çok düşük olduğu durumda, yere çakılmamak için önce hız, daha sonra irtifa artırılmalıdır. Eğer yeterli irtifa varsa yerçekiminden faydalanılarak irtifa kaybına karşı hız artırılır. Diğer bir durum ise dalış kurtulmasıdır. Bu durumda da maksimum G kuvveti çekilerek uçağın burnu yukarı kaldırılır ve irtifa kazanılır. Bu da aşağıdaki kuralı üretir.

*if  $\theta$  is descend  $h$  is below then divererecovery*

Manevra Uygulaması Eğer mevcut durumda uygulanmakta olan bir manevra varsa, bu durumda mevcut manevranın mantığı korunmalıdır. Değilse öncelik mevcut durumun savunma manevrasını zorlayıp zorlamadığı kontrol edilir.

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  is defensive  $|h|$  is close and range is wwr then break*

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  is defensive  $|h|$  is below and range is close then verticalbreak*

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  is defensive  $|h|$  is above and range is wwr then oppositeturn*

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  is offensive then climb*

Hedefleme Algoritması: Mesafe görüş mesafesi dışında ise, rakibe karşı bir manevra yapmak yerine aradaki mesafeyi kapatacak avantajlı bir noktaya gitmek daha mantıklıdır. Diğer bir durum ise rakibi vurma ihtimali yüksekse, yani mesafe az ve  $\lambda$  ve  $\eta$  açıları çok düşükse, manevra yapmak yerine rakibe hedeflenerek atış yapılmalıdır.

*if  $\lambda$  is pursuit  $\eta$  is shoot then pointing*

Önden / Arkadan Takip Algoritması: Muhtemel bir vurma ihtimali veya vurulma riski varsa,  $\eta$  açısı sürekli belirli bir değerin altında tutulmalıdır. Bu durum çok yakın mesafede ve rakibin dönüş dairesi içinde olduğunda ortaya çıkmaktadır.

*if  $\lambda$  is pursuit and  $\eta$  is shoot then lead pursuit*

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  offensive then pure pursuit*

*if  $\lambda$  is approach and  $\eta$  is attack then lag pursuit*

*if  $\lambda$  is approach and  $180-\lambda < \eta$  then pursuit*

*if  $\lambda$  is pursuit and  $\eta_2 < -5$  and  $|\varphi|$  is small and  $v_1$  less than  $v_2$   $\delta\varphi < \varphi$  then negativeG*

*if  $\lambda$  is pursuit and  $\eta_2 < -5$  and  $|\varphi|$  is small and  $v_1$  less than  $v_2$  and  $\delta\varphi > \varphi$  then intercept*

Yüklenme Katsayısı Belirleme: Yüklenme katsayısı uçağa ne kadar G kuvvetinin uygulanacağını belirtir. Yüksek G keskin manevra dönüşlerine olanak verirken hız kaybına neden olur. Düşük G hızı korurken daha geniş dönüş yarıçaplarına neden olur. Bir uçağın en çok ne kadar G yükü çekebileceği, verilen bir hızda dönüş yarıçapının en az ne kadar olacağı ve ne kadar hız kaybına neden olacağı uçağın tasarımına bağlı bir bilgidir. Bu bilgi genelde çok hassas testler ve uzun yıllara dayalı istatistikler sonucu oluşmakta ve sabit tablolarda saklanmaktadır. Eğitim verisinin yetersizliği nedeniyle G yüküne dayalı manevra seçimi bu çalışmaya dâhil edilmemiş, uçağın performans sınırları içinde istenen hızda G yükünü taşıdığı varsayılmıştır.

G yüklemesinde diğer bir husus ise insan biyolojisidir. Yüksek performanslı uçaklar insanın fiziksel olarak dayanabileceğinin çok üzerinde G yüklenmesini kaldıracak özelliktedir. G yüklenmesini sınırlayan uçağın kabiliyeti değil, pilotun fiziksel yeterliliğidir. İnsansız uçaklar kullanıldığında bu kısıt göz ardı edilmelidir.

**Kaçış Manevrası:** Kurtarma veya savrulma durumlarında uçağın hızı dönüş hızının üzerinde ise veya rakip uçak önden takip konumunda ise motorun gazı kesilerek itki ayarı durağan konumuna getirilir. Bu uçağın savrulması avantaj kaybetmesini, dönüşü kaçırmamasını veya çakılma pozisyonuna düşmesini engeller. Rakip uçak takip ediyorsa dönüş sırasında yavaşlamak rakip uçağın öne düşmesine de olanak verebilir. Diğer durumlarda ise motor gücü maksimum olarak kaçış manevrası uygulanır.

*if  $\lambda$  is kamikaze and  $\eta$  is defensive then evasion*

Bu kurallar Shaw tarafından yazılan alan bilgisinden [8] ve Burgin ve Sidor tarafından örnek olarak yapılan bir kural tabanlı çalışmadan [10] alınmıştır. Manevraların uygulanması belirli miktarda hız ve açısal değişimlerin ve bağıl geometrinin sağlanmasına kadar zorunlu koşullmaktadır. Kuralların nihai listesi Tablo 7’de sunulmuştur.

**Tablo 7.** Nihai Kural Listesi

S.No	Durum	Seçilen Manevra
1	<i>if <math>\theta</math> is descend <math>h</math> is below</i>	<i>divererecovery</i>
2	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> is defensive <math> h </math> is close and range is <math>wwr</math></i>	<i>break</i>
3	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> is defensive <math> h </math> is below and range is close</i>	<i>verticalbreak</i>
4	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> is defensive <math> h </math> is above and range is <math>wwr</math></i>	<i>oppositeturn</i>
5	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> is offensive</i>	<i>climb</i>
6	<i>if <math>\lambda</math> is pursuit <math>\eta</math> is shoot</i>	<i>pointing</i>
7	<i>if <math>\lambda</math> is pursuit and <math>\eta</math> is shoot</i>	<i>lead pursuit</i>
8	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> offensive</i>	<i>pure pursuit</i>
9	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>\eta</math> is attack</i>	<i>lag pursuit</i>
10	<i>if <math>\lambda</math> is approach and <math>180-\lambda &lt; \eta</math></i>	<i>pursuit</i>
11	<i>if <math>\lambda</math> is pursuit and <math>\eta_2 &lt; -5</math> and <math> \varphi </math> is small and <math>v_1</math> less than <math>v_2</math> and <math>\delta\varphi &lt; \varphi</math></i>	<i>negativeG</i>
12	<i>if <math>\lambda</math> is pursuit and <math>\eta_2 &lt; -5</math> and <math> \varphi </math> is small and <math>v_1</math> less than <math>v_2</math> and <math>\delta\varphi &gt; \varphi</math></i>	<i>intercept</i>
13	<i>if <math>\lambda</math> is kamikaze and <math>\eta</math> is defensive</i>	<i>evasion</i>

#### 3.4.5.4 Normalizasyon Katmanı

Dördüncü katmanda her kuralın sonuca katkısı hesaplanmaktadır. Her kuralın aktifleşme derecesi bu kuralın nihai sonuca olan katkısını belirlemektedir. Bu katman bir önceki katmanda kuralların çıktıları oluştuğundan sonra işletilir. Sisteme verilen bir girdi kümesi aynı anda birden çok kuralı tetikleyebilir. Bu durumda bu katman hangi kuralın sonuca hangi oranda katkısı olacağını belirler. Basitlik için her kural için bir nöron tanımlanmış ve katsayıların başlangıç değeri olarak ilgili kural için 0.999, diğer kurallar için 0.001 atanmıştır. Hesaplama yöntemi (26) eşitliğinde sunulmuştur. Bu eşitlikte üst dizin 4, dördüncü katmanı, alt dizin  $d$  bir önceki katmandaki çıkış sayısını ifade etmektedir.

$$y_i^4 = \frac{x_d^4}{\sum x_d^4} \quad (26)$$

#### 3.4.5.5 Durulaştırma Katmanı

Bu katmandaki nöronlar normalleştirilmiş kural sonuçlarını alarak ağırlıklı sonuç değerini üretirler. Bu katmanda ayrıca girdi değerleri de hesaplama dâhil edilir.

Bu katman sistemin çıkışı belirler. Hava muharebesinde seçilebilecek her manevra için bir nöron tanımlanmıştır. Hareketin 6 değişkeni olması nedeniyle ANFIS her değişken için bir çıkış değeri üretmelidir. Burada hareket süresi ihmal edilmiştir. Hareketi ilgilendirmeyen değişkenlerin katsayısı 0.001 olarak belirlenmiştir. Durulaştırma katmanındaki çıkış (27) eşitliğindeki denkleme göre hesaplanır.

$$y_i^5 = x_i^5 (k_{i0} + k_{i1}x_1 + \dots + k_{in}x_n) \quad (27)$$

Her manevranın uygulama detayları aşağıda açıklanmıştır.

Dalış Kurtarma: Bu manevra seçildiğinde tırmanma açısı  $\theta$  sıfırdan küçüktür ve kurtama manevrası bu açıyı en az sıfıra getirmeyi hedeflemelidir. İlk hareket olarak Dikey/Yatay Geçiş hareketi (28) eşitliğindeki değerler ile seçilir.

$$\sigma=4, \theta'=-\theta, \psi'=\psi \quad (28)$$

Tırmanma: Tırmanma çeyrek daireler halinde karar verilen bir manevradır. Genellikle rakibe karşı irtifa kazanma, enerji kaybetmeden yavaşlama amaçlarıyla yapılır. İlk hareketi (29) eşitliğinde açısız değerleri verilen tırmanma hareketidir.

$$\sigma=3, \theta'=\pi/2, v=v \quad (29)$$



Kırma: Sağa veya sola kırma, yüksek hızla yaklaşan saldırgan rakibi savrulmaya sevk etmek veya hedefinden ayrılmak amacıyla yapılan keskin dönüştür. Dönüş rakibin yaklaştığı tarafa yatış hareketiyle başlar. Rakibin rotasını kesmek riskli gibi görünse de değildir. Yüksek hızda rakibin önünden dikey geçen hedefi vurması mümkün değildir. Aksine dikey geçen bir hedefe doğru yönelmesi oldukça zordur. Genellikle doğru zamanda yükselerek hızını enerjiye çevirmese saldırganın savrulmasıyla sonuçlanır. Kırmada yatış açısı (30) eşitliği ile hesaplanabilir.

$$\sigma=5, \varphi=\text{asin}(|h_1-h_2|/r) \quad (30)$$

Dikey Kırma: Dikey kırma yüksek irtifadan yaklaşan bir rakibe karşı yapılacak savunma manevrasıdır. Tırmanma ile aynı yöntem izlenir. Rakip ile mesafe 1000 metre altında olduğunda tercih edilmelidir. Tırmanma açısı (31) eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$$\sigma=3, \theta'=\pi/2, v=v \quad (31)$$

Geri Dönüş: Düşük irtifadaki bir rakibe karşı yaklaşma açısı  $\eta < 60$  oluncaya kadar yön değiştirmektir. İrtifa daha yüksek olduğu için hız da düşük, manevra kabiliyeti daha yüksek olacaktır. Açık ve hız (32) eşitliğinde değerlere göre hesaplanır.

$$\sigma=2, \psi'=\pi, v=v \quad (32)$$

Hedefleme: Rakibi vurmak için yüksek bir olasılık varsa rakibe karşı hassas nişan almak için yön düzeltmedir. Yunuslama açısı ve kuyruk takip açısı (33) eşitliğindeki gibi güncellenir.

$$\sigma=4, \theta'=\text{asin}((h)/r), \psi'=\eta \quad (33)$$

Önden Takip: Rakibi takip ederken uçağın burnuyla rakibin önünde bir noktayı hedeflemektir. Bu konumda rakibi vurmak için bir şans elde edilmesi beklenir. Vurma şansının en yüksek olduğu konum budur. Fakat bu konumda uzun süreli kalmak mümkün değildir. Çünkü bir süre sonra rakibin önüne düşmek yüksek bir ihtimaldir. Bu nedenle rakibin dönüş çemberinin içinde kalınmalı, hız düşürülmeli, uygun vurma fırsatı bulunduğu anda ateş edilmeli, sonra konum değiştirilerek geriden takip edilmelidir. Rakip vurulamazsa aynı işlem tekrar edilebilir. Fakat saldırgan pozisyonundan savunan pozisyona düşmemeye özen gösterilmelidir. Baş açısı ve hız (34) eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$$\sigma=2, \psi'=\psi'_2, V=0.9V_2 \quad (34)$$

Tam Takip: Rakibi takip ederken uçağın burnu rakibi hedeflemesidir. Bu durumda rakibi vurmak zordur. Çünkü atış yapıldığında mühimmat rakibin o anki konumuna gittiğinde rakip uçak o konumu değiştirmiş olacaktır. Fakat önden takibe geçmek için uygun zamanın kollanması bu konumda sağlanır. Baş açısı ve hız (35) eşitliğinde verilmiştir.

$$\sigma=2, \psi' = \eta_1 - \eta_0, V=V_2 \quad (35)$$

Geriden Takip: Rakip uçağı hedefinde tutmak, savrulmadan takip etmek, uygun fırsat bulduğunda önden takip pozisyonuna geçmek amacıyla, havacılık tabiriyle kuyruğuna takılarak takip etmektir. Bu pozisyonda uçağın burnu rakibin arkasında bir noktayı kesmekte ve  $\eta$  açısı çok düşük değere sahip olmaktadır. Baş açısı hesabı (36) eşitliğinde verilmiştir.

$$\sigma=2, \psi' = -\eta_0 \quad (36)$$

Takip: Tam takip ile aynı algoritmayı izlemektir. Tek farkı hızda değişim olmamasıdır. Tam takipte rakibi vurma ihtimali ancak akıllı füzeler ile mümkündür. Uçaksavar topu ile yapılacak atışlarda rakip top mermisinden önce hedeflenen pozisyondan ayrılmış olacaktır. Baş açısı hesabı (37) eşitliğinde verilmiştir.

$$\sigma=2, \psi' = \eta_1 - \eta_0 \quad (37)$$

Negatif G: Yatış açısı 30 dereceden büyük ( $\varphi > 30$ ) olduğunda 180 derecelik bir yatış yaparak pozisyonunu dönüş yapabilir hale getirmektir. Kanatlı uçaklarda dikey daireler her zaman yukarı doğru yapılır. Eğer aksi yönde dikey dönmek gerekli ise ters dönülerek dönüşün yine dikey yönde olması sağlanır. Bunun aksi hem uçağın gövdesine aykırıdır, hem de insanlı uçaklarda insan bedeninin fiziksel sınırları açısından mümkün değildir.

$$\sigma=5, \varphi = \varphi - \pi * \text{sign}(\varphi) \quad (38)$$

Önleme Rotası: Negatif G gerekmediği durumda hedefleme ile aynı mantığa sahiptir. Yaklaşan bir rakip uçağı karşı burnunu hedefleyerek bu uçağı önleme manevrasıdır. Açısal hesaplar (39) eşitliğinde verilmiştir.

$$\sigma=4, \theta' = \text{asin}((h)/r), \psi' = \eta \quad (39)$$

Kaçış: Rakip uçak tarafından vurulma ihtimalinin yüksek olduğu konumda sağa veya sola 90 derecelik kırma manevrası yapmak, sonra yatak konumdayken tırmanma

hareketi yaparak sağa veya sola doğru tırmanarak bölgeden uzaklaşmaktır. Yatış yönü (40) eşitliğindeki gibi hesaplanır.

$$\sigma=5, \varphi= \varphi-\pi\text{sign}(\varphi)/2 \quad (40)$$

**Tablo 8.** Durulaştırma Denklemleri

Manevra	Durulaştırma Çıktısı				
	$\sigma$	$\varphi$	$\theta'$	$\psi'$	$v$
Dalış kurtarma	4		$-\theta$	$\Psi$	
Tırmanma	3		$\pi/2$		$v_1$
Kırma	5	$\text{asin}( h /r)$			
Dikey kırma	3	$\pi/2$			$v_1$
Tersine dönüş	2			$\pi$	$v_1$
Hedefleme	4		$\text{asin}((h)/r)$	$\eta_1$	
Önden takip	2			$\psi'_2$	$0.9v_2$
Tam takip	2			$\eta_2-\eta_1$	$v_2$
Geriden takip	2			$\eta_1$	$v_1$
Takip	2			$\eta_2-\eta_1$	$v_1$
Eksi G	5	$\varphi-\pi\text{sign}(\varphi)$			
Önleme	4		$\text{asin}((h)/r)$	$\eta_1$	
Kaçış	5	$\varphi-\pi\text{sign}(\varphi)/2$			

Durulaştırma katmanındaki fonksiyonlarda kullanılacak katsayılar Tablo 8 de listelenmiştir. Bu hareketler seçilecek manevranın ilk hareketini vermektedir. Eşitliklerde açısız değerlerinin nasıl hesaplanacağı da formülle belirtilmiştir. Verilen formüller bulanık olarak, örneğin çeyrek veya 90 derecelik dönüş şeklinde belirtilmiştir. Durulaştırma sırasında kesin sayısal değerlerin anlık pozisyona göre hesaplanması beklenmektedir. Durulaştırma katmanındaki nöron sayısı tek çıkışlı nöron sayısının 5 katıdır. Bunun nedeni çıkışta 5 değişkenin olmasıdır.

### 3.4.6 Eğitim

Makine öğrenmesi 2 aşamadan oluşmaktadır. Öncelikle öğrenme verisi ile öğrenme gerçekleşir. Daha sonra test verisi sonuçlar test edilir. Bu istenen öğrenme düzeyi elde edilinceye kadar tekrar eder.

#### 3.4.6.1 Aktivasyon Fonksiyonu

Yapay sinir ağlarında nöronun çıkış değerinin belirlenmesinde kullanılan aktivasyon fonksiyonunun belirlenmesi önemli bir tasarım kuralıdır. Aktivasyon fonksiyonu çıkışın sürekli belirli bir değer aralığında olmasını sağlar. Bunun iki önemli faydası vardır.

En önemli faydası çıkışın taşmasını engeller. Katmanlar boyunca biriken çarpımların toplamları birkaç katman sonra hesaplanamaz veya yönetilemez seviyeye gelir. Bunun yerine her nöron çıkışında değeri örneğin  $[0 - 1]$  aralığında ifade etmek bu taşmayı engelleyecektir.

Aktivasyon fonksiyonunun tasarım açısından görevi ise, adından da anlaşılacağı üzere bir nöronun değerinin belirli bir eşik değere sahip olup olmayacağına bakmaktır. Aynı fonksiyonun tüm nöronlarda kullanılması tasarımı kolaylaştırır.

Bu çalışmada genel uygulamaya uygun olarak zil yapısında (41) eşitliğindeki sigmoid fonksiyonu kullanılmıştır. Eşitlikteki  $s$  ve  $r$  değerleri öğrenme verisindeki örneklerin sayısı ve kalitesine göre seçilebilir. Bu nöronların öğrenme katsayısını belirler. Bu çalışmada  $s=1$ ,  $r=10$  seçilmiştir.

$$y = \frac{1}{1 + \left[ \left( x - \frac{s}{r} \right)^2 \right]^t} \quad (41)$$

#### 3.4.6.2 Öğrenme Verisi İçeriği

Örnek alınan öğrenme verisinde 10 adet gerçek F-16 eğitim uçuşu vardır. Uçuşlardan her bir sorti bir saatlik uçuş için yaklaşık 700 harekete dönüştürülmüştür. Bu dakikada 12 hareket veya 5 saniyede bir hareket demektir. Her sortinin yaklaşık 25 dakikası hava muharebesi açısından anlamlı hareketler içermektedir. Diğerleri eğitim hava sahasına giden veya dönen rotadaki formasyon uçuşudur. İki uçak arasında eğitim verisi olacağı değerlendirilen 30 hareket it dalaşı manevraları öğrenilmesi için kullanılabilmiştir. Elde edilen 150 savaş manevrasının 120 tanesi eğitim, 30 tanesi test amaçlı kullanılmıştır.

#### 3.4.7 Test

Öğrenme verisi üzerine yoğunlaşarak seçilen manevralara bakıldığında savaş manevralarının önemli bir kısmının 3 boyutlu hareketi içerdiği gözlemlenmiştir. Savaş manevraları dışında 3 boyutlu hareket neredeyse hiç kullanılmamıştır. Uygulaması zor olan bu manevra savaş pilotlarının uzmanlaştığı bir harekettir. Manevranın tanımında yüksek hızla giderken aniden sağa veya sola keskin dönüş yapan bir rakibe karşı uygulanacak zor ama etkin bir saldırı türü açıklaması vardır. Manevra temel olarak dikey bir daire çizmekten ibaret gibi görülmektedir. Fakat 360 derecelik daire tamamlanırken aynı sürede kendi etrafında 270 derecelik yatış yapılmaktadır. Sonuç olarak sağa veya sola, yüksek hızda, savrulmadan, hız, enerji

veya zaman kaybetmeden helezonik keskin bir dönüş yapılmakta ve rakip takip edilmektedir.

ANFIS mimarisindeki sınırlı sayıdaki kural eldeki öğrenme verisi ile tutarlı görünmektedir. Sonuçlar görsel olarak incelendiğinde örnek bir manevra olan kırma manevrası Şekil 26'da gösterilmiştir. Şekilde kalın çizgi saldıran uçağın rotasını, ince çizgi savunan uçağın rotasını göstermektedir. Kırma manevrasını savunan uçak yapmıştır.

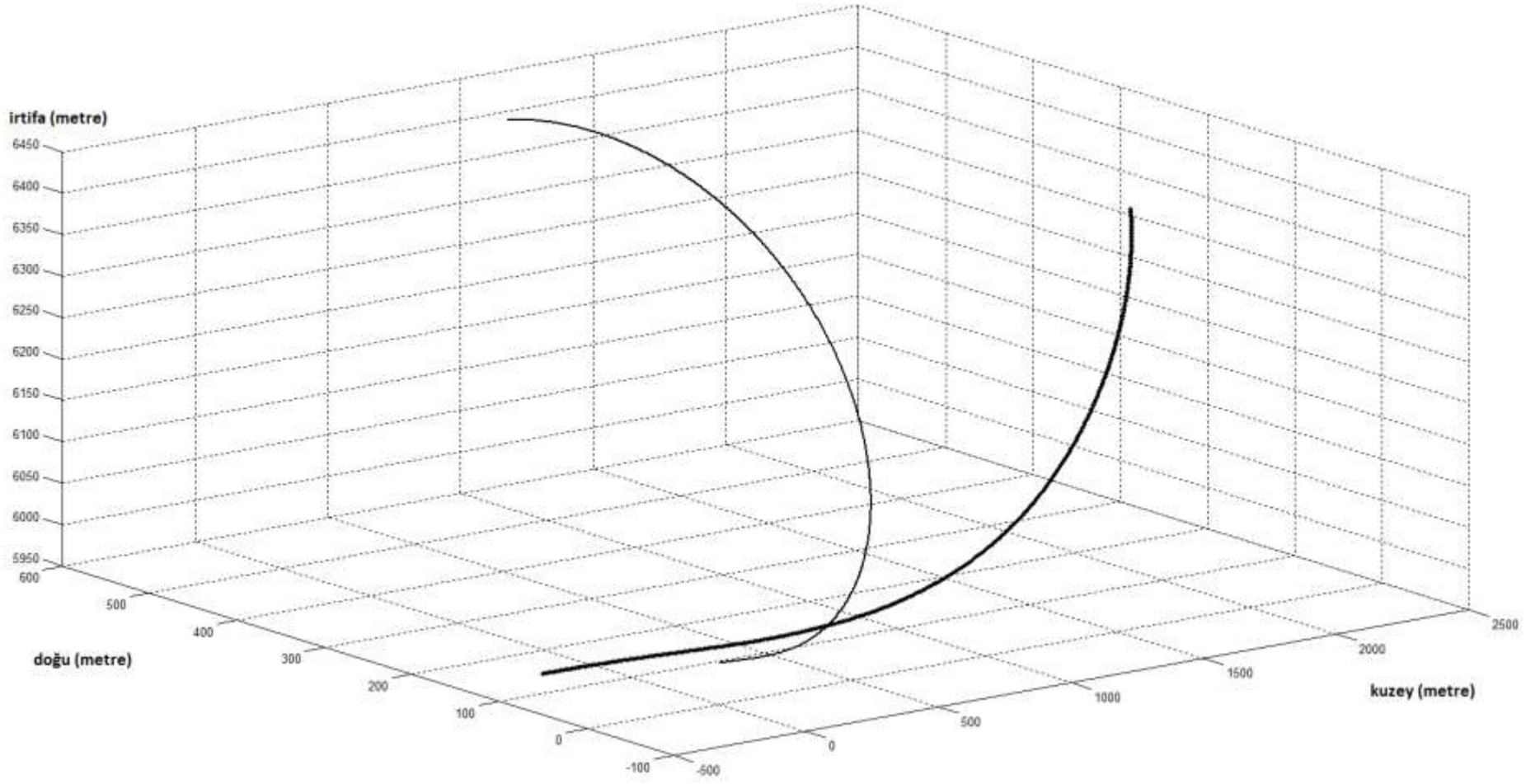
Simülasyon amacıyla yüksek doğruluk derecesine sahip F-16 modeli kullanılmıştır [27]. Kullanılan model uçağın tüm gövde ve dinamik katsayılarını karşılamakta, NASA tarafından yayınlanmış deneysel test sonuçlarına tam doğrulukla (*high fidelity*) bağlı bir uçak modeli sunmaktadır [6].

Örneklenen kırma manevrasının alan bilgisinden alınan kuralı aşağıda açıklanmıştır.

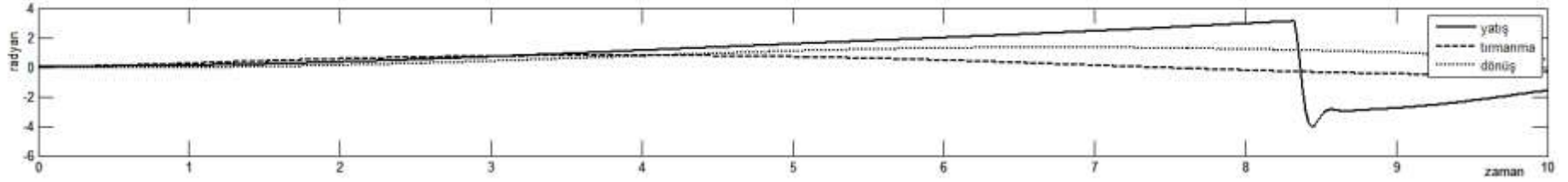
*if  $\lambda$  is takip and  $\eta$  is savunan then mode is yatış, angle is  $\text{asin}(h/r)$ , following mode is tırmanma, angle is  $\pi/2$  for dikeykırma, mode is dönüş, angle is  $\pi$  for kırma*

F-16 modeli 6000 metre irtifada ve 0.6 Mach hızla uçuşa başlamıştır. Kendisine yaklaşan yüksek hızda bir rakibe karşı Şekil 26'da görünen kaçış manevrasını uygulamıştır. Simülasyon 10 saniye sürmüştür. Uçak manevrayı 8 saniyede tamamlamıştır. Manevra tamamlandıktan sonra uçak yatış durumunu düzeltmiş burun açısını 90 derece değiştirmiştir.

Açıların anlık değerleri, açılardaki değişimler, referans değerler ve kontrol sinyalleri Şekil 27, Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da sunulmuştur. Açılar ve kontrol sinyalleri uçağın açısal değişimlerini ve tırmanma açısı için üretilen kontrol sinyallerini göstermektedir.

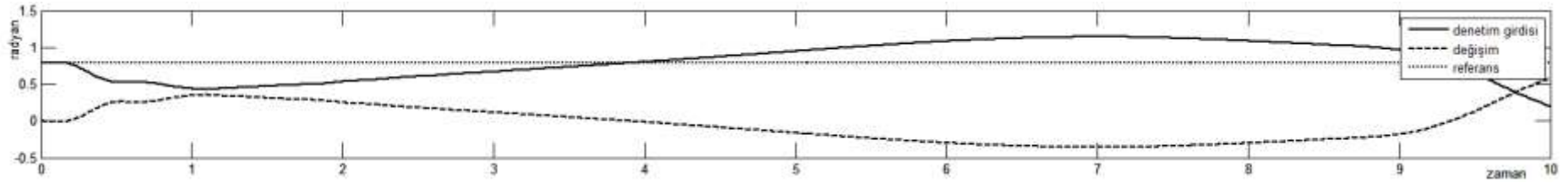


Şekil 26 Örnek Kıırma Manevrası



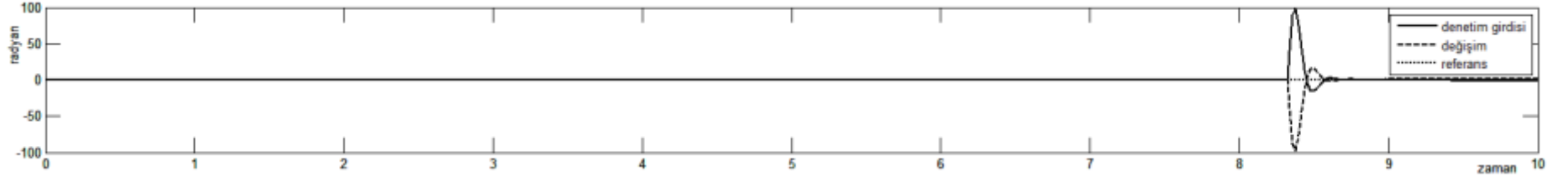
Şekil 27 Açılar

Şekil 27'de sürekli çizgi yatış açısını, kesikli çizgi tırmanma açısını, noktali çizgi ise dönüş açısını göstermektedir.

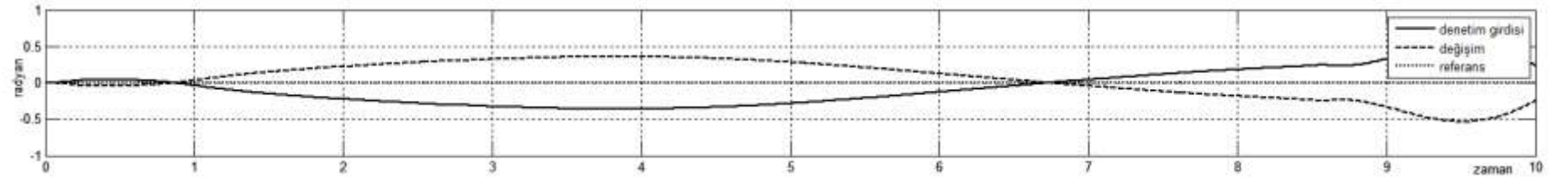


Şekil 28 Tırmanma Denetimi

Şekil 28, Şekil 29 ve Şekil 30'da sürekli çizgi denetim için sağlanan kontrol yörüngesini, kesikli çizgi açılardaki anlık değişim miktarını, noktali çizgi ise hedeflenen referans değeri göstermektedir. Tüm açılar radyan, zaman ise saniye birimindedir.



Şekil 29 Yatış Denetimi



Şekil 30 Dönüş Denetimi



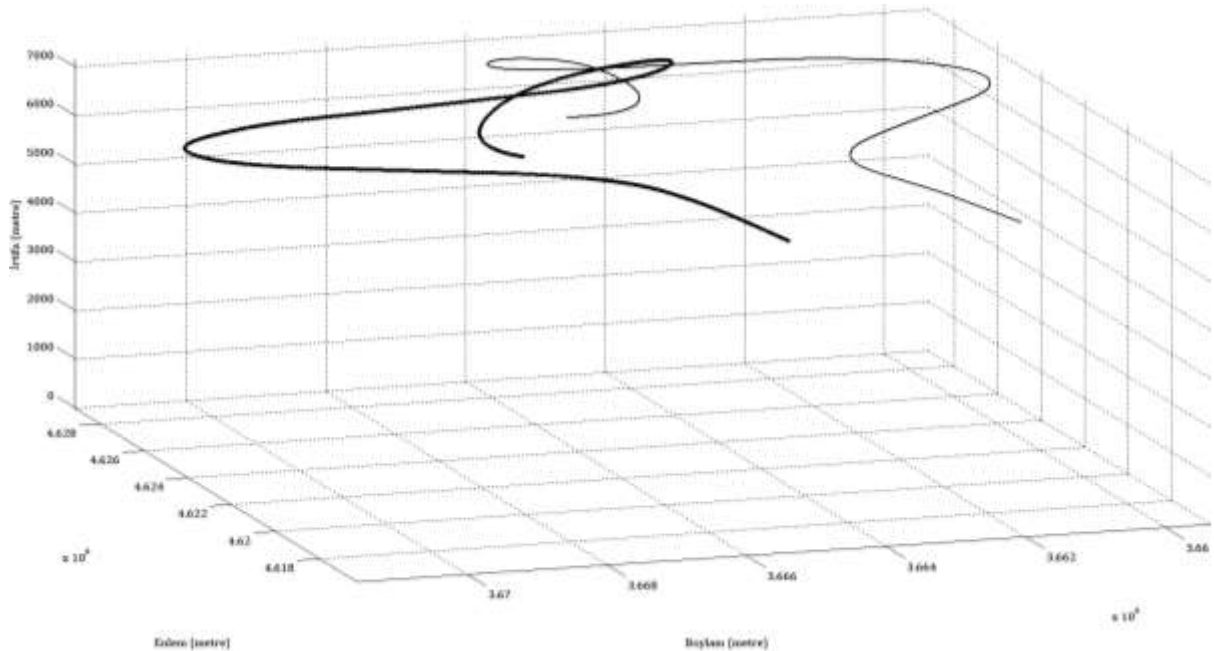
### 3.5 Test Sonuçları

Test sonuçları veri çözümü, uçuş verisinin muharebe zekâsı çıkarsama açısından incelenmesi, manevra çıkarma ve öğretme açısından incelenecektir.

#### 3.5.1 Veri Çözümü

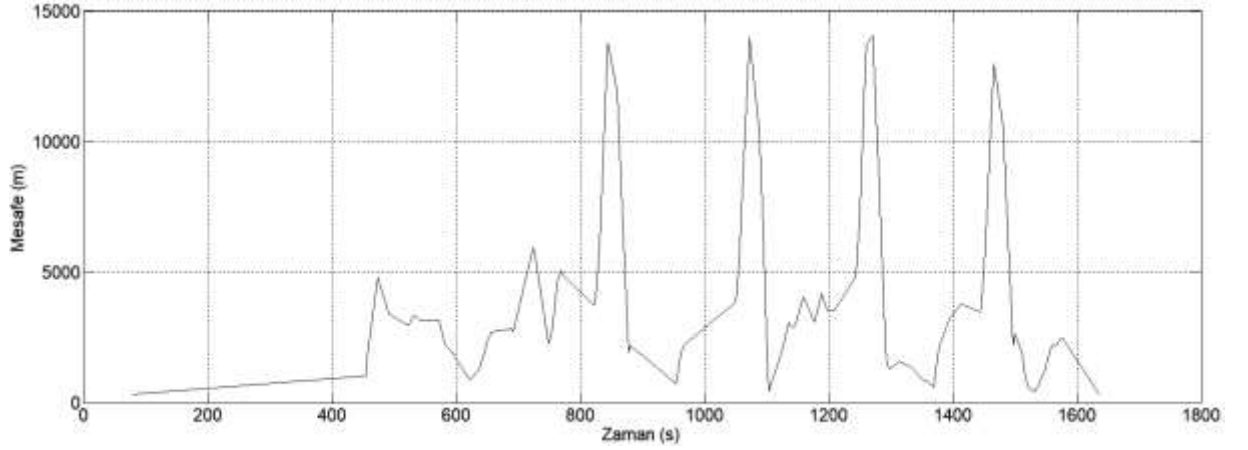
Örnek bir uçuş dönüştürmede 71 dakikalık 1x1 savaş eğitim uçuşunda kalkış öncesi ve iniş sonrası kayıtlar silindikten sonra yaklaşık 40 MB yer tutan 104 000 satır kadar veri bulunmaktadır. Veri aralıkları milisaniye bazında değişken olsa da ortalama 40 milisaniyede bir satırdan oluşmaktadır. Uçuş kartuşundan alındığında 216 sütun halinde ikili veriye dönüştürülen durum verisinden yalnız 12 değişkene ait sütunlar zaman bilgisi ile birlikte dışa aktarılmıştır. Birlikte uçan uçakların saatlerinin tam eş zamanlı olduğu da görülmüştür.

Uçuşların her biri yaklaşık 750 uçuş hareketi olarak çözümlenmiştir. İki uçak arasında 22 angajman (kayıp) gerçekleşmiş, örnek bir muharebe senaryosu olan “Barrel Roll Attack” Şekil 31 de sunulmuştur. Grafikte rotası kalın çizgi ile gösterilen uçak kaçış manevrası yaparken diğer uçak enerjisini korumak amacıyla yükselmekte, 3 boyutlu dönüş ile rakibinin rotasını keserek takibe devam etmektedir.



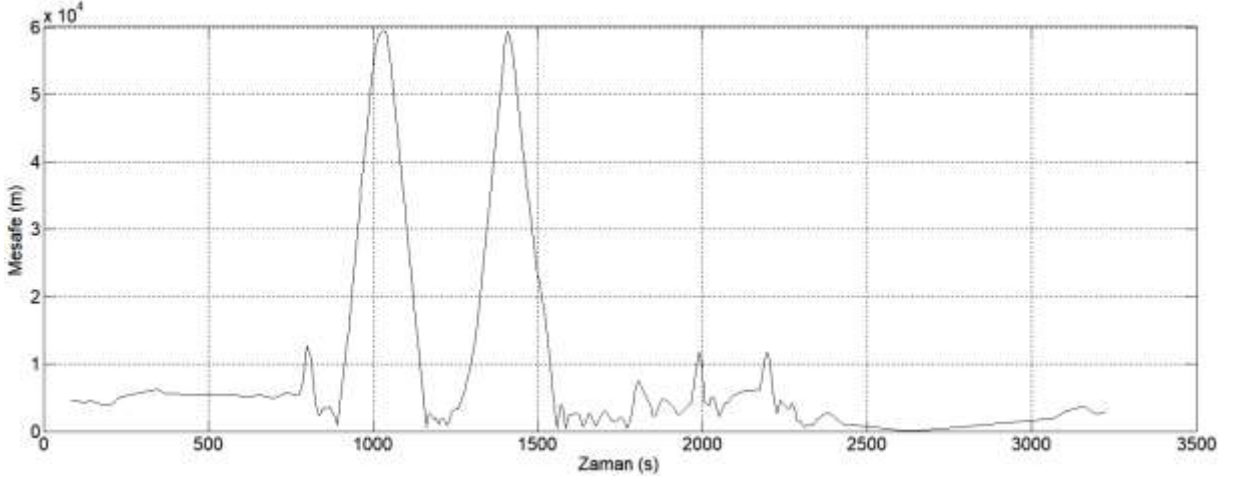
Şekil 31 Barrel Roll Attack

Örnek manevra "Barrel Roll Attack" kaçış manevrası yapan hedefe karşı yüksek hızlı saldırganın manevrasidir. Manevranın alandaki [8] tanımına göre saldırgan savrulmamak ve enerjisini korumak amacıyla tam bir tırmanış ve tırmanışla aynı zamanda 3/4 yatış, tırmanış bittiğinde 1/4 yatış daha yapar. Gerçek senaryoda rakip 90 derece yerine başka bir açıyla dönüş yaparak kaçış yapmış olabilir. Saldıran pilot uçağın gövdesinden dik geçen vektör rakibi gösterecek şekilde yatış açısını dengeli tutarak baş açısını değiştirebilir. Burada tırmanma açısı 90 derece olduğunda baş açısı değiştirilmiştir. Pilotun bu kararı verebilmek için genelde milisaniyeler düzeyinde süresi vardır. Genelde refleks davranışı olan bu karar anı makine öğrenmesi yöntemi için bir eğitim verisidir.



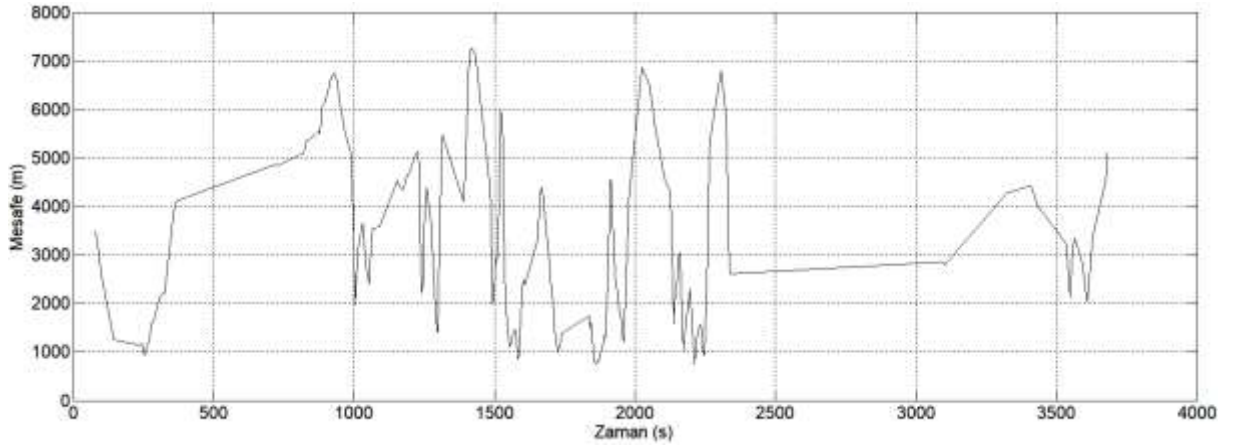
Şekil 32 Zamana göre aradaki mesafe - 1

Çözümleme sırasında Şekil 32 deki gibi iki uçak arasındaki mesafenin genelde yakın olduğu görülmüştür. Fakat eğitim amaçlı bir savaş manevrası başlangıcında uçaklar birbirinden uzaklaşmakta ve it dalaşına başlamaktadır. Bu tepe noktalar savaş manevralarının başladığı anların tespit edilmesinde çok yardımcı olmuştur.



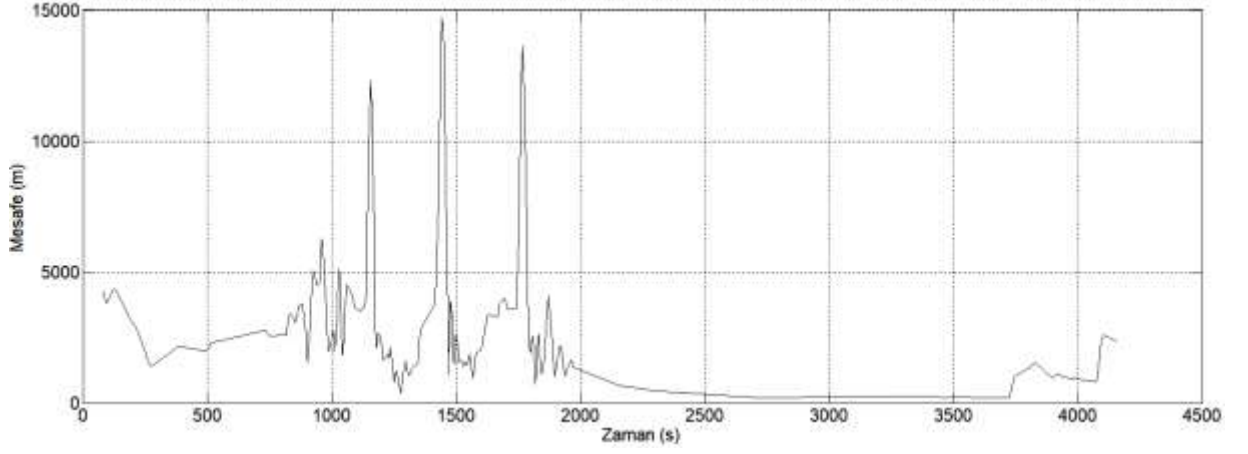
Şekil 33 Zamana göre aradaki mesafe - 2

Benzer ilişki Şekil 33 de görülmektedir. Seyir kipinde mesafe durağan ve yakın ilerlerken savaş kipinde açılmaktadır.



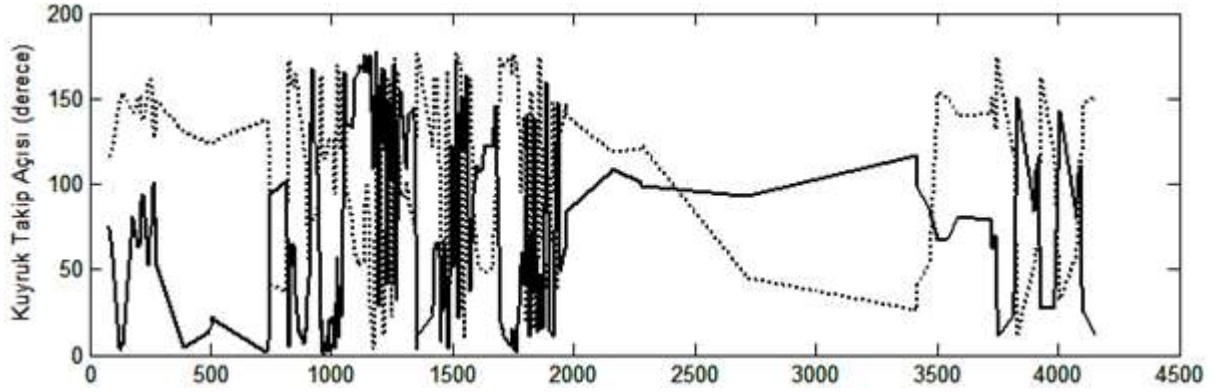
Şekil 34 Zamana göre aradaki mesafe - 3

Başlangıçtaki mesafe uzak görünse de Şekil 34 de mesafe arasında hızlı değişimler savaş kipini göstermektedir.



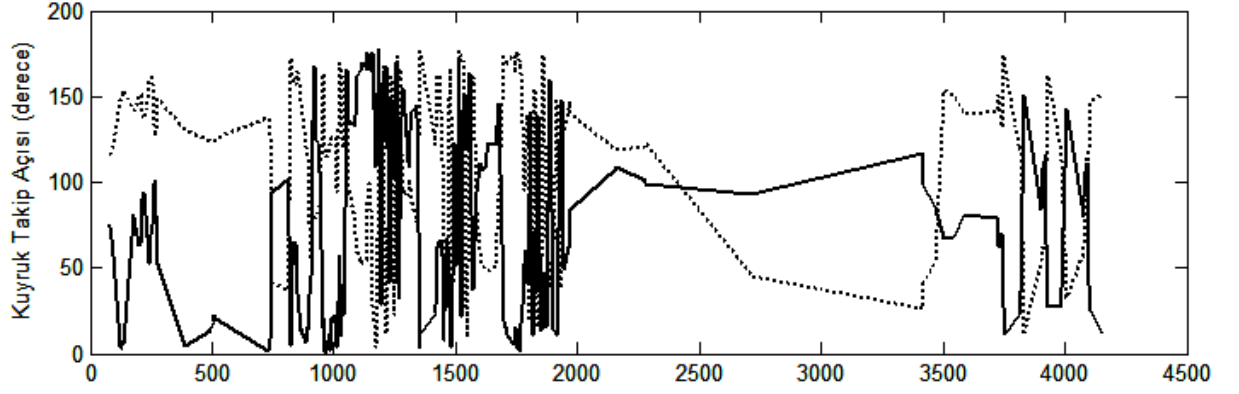
Şekil 35 Zamana göre aradaki mesafe - 4

Dördüncü çift (Şekil 35) örnek veride aynı gözlem yapılabilir. Bu uçuşta da eğitim sahasına seyir sırasında yakın giden uçaklar muharebe eğitimi sırasında çok sık mesafe değişimi yaşamışlardır.



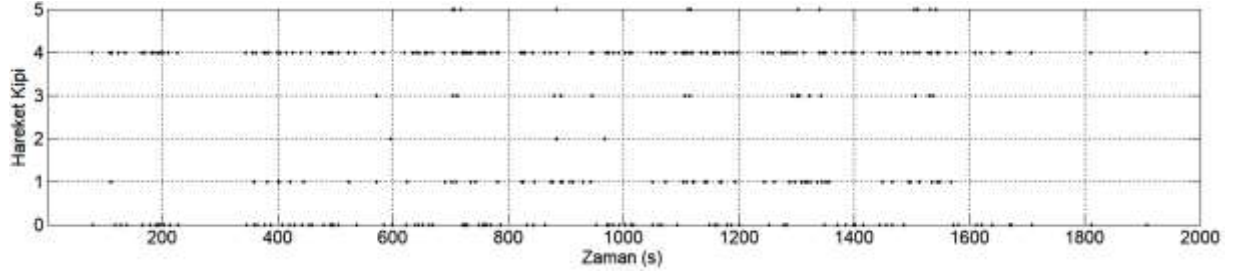
Şekil 36 Zamana göre kuyruk açısı ( $\eta$ ) değişimi - 1

Düşük kuyruk ( $\eta$ ) açısı daha yüksek avantaj demektir. Şekil 36 de iki uçağın uçuş boyunca karşılıklı avantajı görülmektedir. Sürekli çizgi birinci uçağın, noktali çizgi ikinci uçağın kuyruk takip açılarını göstermektedir. Seyir durumundaki değerler ihmal edildiğinde savaş senaryolarında pilotların ortalama başarımları da incelenebilmektedir. Manevra başarısına göre açının nasıl değiştiği grafikten kolayca görülmektedir.



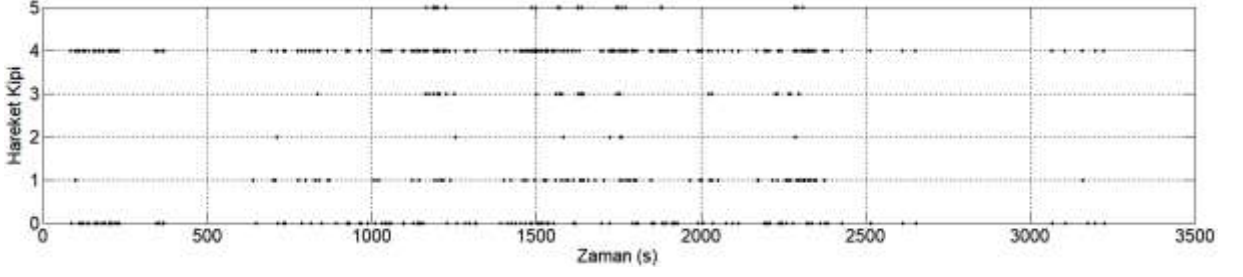
Şekil 37 Zamana göre kuyruk açısı ( $\eta$ ) değişimi - 4

Diğer uçuşlar için de aynı durum söz konusudur. Dördüncü uçuş çifti için kuyruk açısı değişimleri Şekil 37 de verilmiştir. Bu şekilde de seyir sırasında sabit giden açı savaş eğitiminde hızlı değişimler göstermektedir. Grafikte karmaşa görülen bölgeler aradaki mesafe grafiği ile örtüşmektedir.



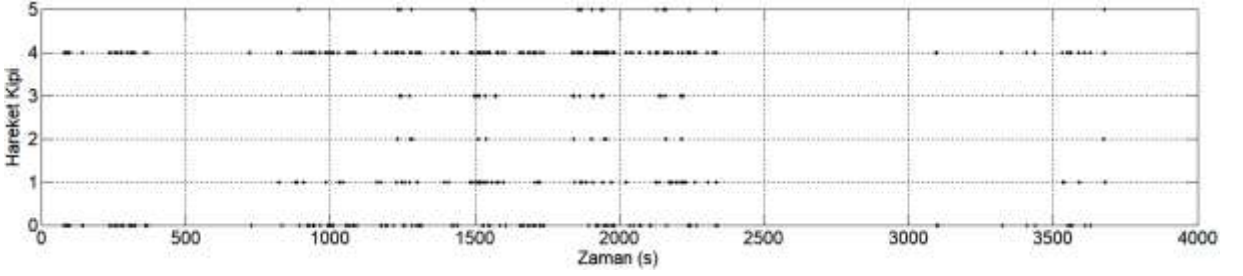
Şekil 38 Hareket kipi seçimi - 1

Uçuş verisi üzerindeki diğer bir analiz de tercih edilen hareketlere göre Şekil 38'da yapılmıştır. Yapılan tüm uçuş çözümlerinde 3 boyutlu (rp) hareketin yalnızca savaş eğitim sırasında yapıldığı, seyir sırasında da eğitim amaçlı karmaşık hareketlerin denendiği, fakat 3 boyutlu hareketin savaş eğitimi dışında yapılmadığı görülmüştür. Bu tercih literatürde geçen 3 boyutlu hareketin kullanılmadığı [40] görüşü ile çelişmektedir.



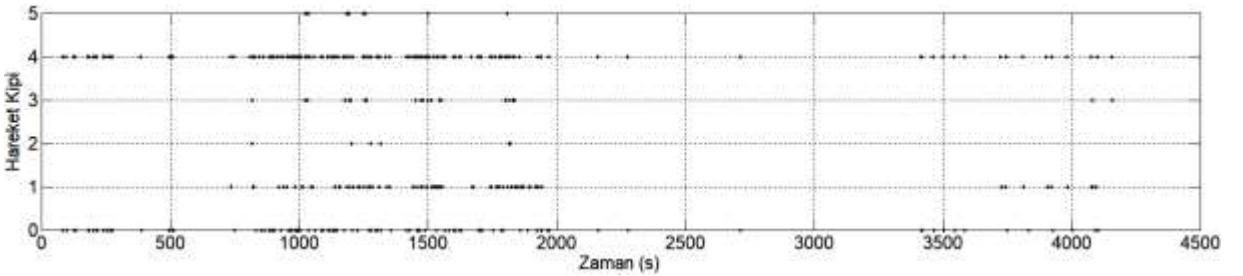
Şekil 39 Hareket kipi seçimi - 2

Mesafe değişimine göre savaş kipinin seçimine dikkat edildiğinde savaş kipinde 3D manevranın bolca kullanıldığı Şekil 39 üzerinden gözlemlenmektedir.



Şekil 40 Hareket kipi seçimi - 3

Aynı gözlemi Şekil 40 ve Şekil 41 üzerinden de yapmak mümkündür. Uçuşun başında ve sonundaki küçük hareketliliği de dâhil edersek savaş kipinde manevra tercihlerinin değiştiği görülmektedir.



Şekil 41 Hareket kipi seçimi - 4

Tüm uçuş boyunca uçuş kipinden bağımsız olarak en çok tercih edilen diğer bir hareket ise yatış hareketidir. Ticari veya nakliye uçuşlarında pek karşılaşılmayan bu

durum yüksek kabiliyetli savaş uçaklarında sık görülmektedir. Uçuşun manevra karakteristiği ne tür bir uçakla uçuş yapıldığına da ışık tutmaktadır.

Bu çalışmada uçağın alt seviye kontrolü ele alınmamıştır. Alt seviyede gürbüz bir kontrol yapılması çalışmanın başarısı açısından önemlidir. Bu konuda olgunlaşmış iki çalışma [52] ve [56] literatürde yer almaktadır.

Soyutlama düzeyine göre üst seviyede önerilen hareket ile alt seviyede gerçekleştirilen hareket birbiri ile aynı olmak zorunda değildir. Burada gerçek dünya fiziksel platform kısıtları veya bunların simülasyonu devreye girmektedir. Örneğin 90 sağa veya sola derece dönüş yapmak için ilgili tarafa biraz yatış yapmak ve dönüşü destekleyecek kadar hafif tırmanma açısı ile dönmek gereklidir. Burada kaldırma vektörü  $\sin(\varphi)$  oranında dönüş tarafına kuvvet uygulayacaktır. Bu kaybı dengeleyerek irtifayı korumak için ise bir miktar tırmanma açısı  $\theta$  değişikliği gereklidir. Bir miktar tırmanma açısını yapıncaya kadar gürültü olarak ele alınacak kadar irtifa kaybı olacaktır. Bu irtifa kaybının ihmal edilememesi gerekecek kadar alçak uçuşlarda ise dönüşü izin verilmemeli veya önce tırmanma, sonra yatış yapılmalıdır. Görüldüğü üzere alt seviyedeki kontrol hareketleri üst seviyedeki manevradan farklı daha farklı olmaktadır.

### 3.5.2 Manevra Tespiti

Tırmanma ve dikey kaçış manevraları karar parametreleri farklı olmasına rağmen manevra mantıklarının birbirine benzemesi nedeniyle birbirine karıştırılmaktadır. Aynı karışıklık kaçış ve kırma manevralarında da bulunmaktadır. Her iki manevra da sağa veya sola yatıp rakibe doğru burnunu kırarak uzaklaşmayı önermektedir. Kaçış manevrasında ilave olarak irtifa denetimi vardır. Birbirine benzeyen manevralar tekilleştirilerek karar mantığı basitleştirilmelidir. Bunun dışında önden, tam veya arkadan takip manevraları başarılı sonuçlar üretmiştir.

Çalışmada veri yetersizliği nedeniyle incelenen tek saldırı manevrası hedefleme (*pointing*) algoritmasıdır. Hedefleme algoritması burnunu rakibe çevirerek  $\eta$  açısını düşürmeyi hedeflemektedir. Bunun dışındaki saldırı manevraları (örneğin 3 boyutlu saldırı, çeyrek düzlem veya yoyo manevraları – high-yoyo low-yoyo) öğrenmeye dâhil edilmemiştir. Çalışmada yöntemin kullanılabilirliği hedeflenmiş, tüm manevraların öğretilbileceği kadar eğitim verisi olmadığı baştan kabul edilmiştir.

Savunma ve bir adet örnek saldırı manevrası öğrenmek yöntemin ispatı için yeterli görülmüştür.

Kullanılan diğer bir teknik ise çoklu çıkışlı [59] ANFIS mimarisidir. Burada her 5 değişken için ayrı ANFIS mimarisi kullanmak yerine, kuralları ilgilendiren ilk 3 katman ortak kullanılmış, çıkış katmanları değişken sayısınca tekrarlanmıştır.

Çalışmada pekiştirilmiş öğrenme teknikleri denenmemiştir. Pekiştirilmiş öğrenmede ödül sinyali olarak seçilen manevra sonunda elde edilen avantaj fonksiyonu çıktısı ele alınabilir.



## 4 SONUÇLAR

Bu doktora çalışmasında hava muharebesinin makine öğrenmesi ile İHA sistemlerine öğretilmesi hedeflenmiştir. Öğrenme amaçlı gerçek F-16 uçuş verisi kullanılmış, veriyi elde etmenin zorlukları ve farklı veri elde etme yöntemleri tartışılmıştır. Uçuş verisinin öğrenilebilir biçime dönüştürülmesi ve diğer uçuşlar ile bağlı pozisyonları ile birlikte makine öğrenmesine girdi oluşturması için bir yöntem önerilmiştir. Öğrenme verisi elde etmek ve öğrenilebilir biçime dönüştürmek bu çalışmanın en zorlu kısmını oluşturmuştur. Daha sonra hava muharebesi özelinde uygun öğrenme yöntemleri tartışılmış ve örnek ANFIS mimarisi tasarlanmıştır. Verinin yetersizliği nedeniyle yalnız yöntemin doğrulanmasına yetecek kadar kısıtlı sayıda manevranın öğrenmesi yapılabilmektedir. Kısıtlı sayıda makine öğrenmesi sağlansa dahi yöntem tutarlı sonuçlar üretmiş, daha çok veri ile bu alanda tam bir öğrenme sağlanabileceği gösterilmiştir.

Verinin askeri kaynaklar dışında açık ortamdan çoklu radar füzyonundan nasıl elde edileceğine yönelik öneriler sunulmakla birlikte aynı verinin benzetim ortamında üretilebileceği düşünülebilir. Fakat bu durumda da kısıtlı kaynak savaş deneyimi olan pilotlardır.

Öğrenme yöntemi olarak seçilen ANFIS mimarisi alan bilgisinin doğal insan dilinde tanımlanmasına, bulanık sınıflandırmanın yapılmasına, mevcut uçuş hareketleri üzerinde öğrenme yapılmasına ve gerekli açısal hesaplamaların yapılmasına olanak sağlamıştır. ANFIS mimarisinin bu konu için uygun bir öğrenme yöntemi olduğu görülmüştür. Bununla birlikte çalışmada pekiştirilmiş öğrenme (reinforcement learning) ile manevra sonunda elde edilen avantajı ödül (reward signal) olarak ele alan öğrenme mimarisi denenmemiştir.

### 4.1 Kullanım alanları

Bu çalışma kapsamında önerilen yöntemler yakın hava muharebesinin insansız hava araçları tarafından öğrenilmesinin yanında, savaş amaçlı olmayan uçuşların da makineler tarafından anlamlandırılarak öğrenilebilmesine olanak sağlayacaktır. Çalışmanın insan pilotların eğitimine katkı vereceği, pilot performans değerlendirmesine yardımcı olacağı, bilgisayar tabanlı muharebe desteği sağlayabileceği, insansız araçların yakın hava muharebesi, formasyon uçuşu gibi konularda eğitilmesine katkı sağlayacağı değerlendirilmektedir.

#### **4.1.1 Pilot Performans Değerlendirmesi**

Bir savaş senaryosunun uçuş sonrası değerlendirilmesi uzun zaman alan ve pahalı bir iştir. Tecrübeli eğitmen pilotlar zor bulunan kaynaklardır. Uçuşun değerlendirilmesi için uçuş süresinin iki katı süreye ihtiyaç duyulmaktadır.

Uçuşun tamamını incelemek yerine her manevranın başladığı tam zamanı bilmek önemli ölçüde zaman kazandıracaktır.

Çalışmanın diğer bir katkısı ise eğitilen bir pilotun manevrayı ne kadar başarılı yaptığının incelenmesindedir. Pilotun manevrayı yaptığı anın başlangıç ve sonundaki avantaj fonksiyonu sonuçları karşılaştırılabilir veya manevra tanımındaki değerler ile pilotun gerçekleştirdiği açısız değerler karşılaştırılabilir.

Çalışmanın pilot eğitime diğer katkısı manevra bazında pilotun eksiklerinin belirlenmesinde ortaya çıkmaktadır. Pilotun manevra bazında başarımının ölçülmesi eksik olan konulara daha fazla odaklanmasına ve başarımın zamanla gelişiminin incelenmesine olanak verir.

#### **4.1.2 Bilgisayar Destekli Hava Muharebesi**

Yöntemin uygulanması için mutlaka insansız bir uçağa ihtiyaç yoktur. Yöntem insanlı bir uçakta bulunan pilota destek amaçlı olarak da kullanılabilir. Havada zor fiziksel şartlarda anlık karar vermek zorunda olan pilotun yapması muhtemel hatayı en aza indirmek de önemli bir katkıdır. Bu tür bir destek pilotun verdiği kararının uçuş bilgisayarındaki yapay zekâ tarafından desteklendiğini bilmesini, muhtemel hatalı kararların alternatiflerini görmesini ve küçük hataların düzeltilmesini sağlayacaktır.

Makine öğrenmesinde en önemli kaynak öğrenme verisidir. Öğrenme verisi (corpus) gerçek savaş veya uçuş eğitim senaryolarından toplanmalı ve eğitim ve test verisi olarak sınıflandırılmalıdır. Ancak orijinal uçuş verisi makine öğrenmesinde kullanılamayacak kadar karmaşıktır. Çalışmanın belki de en önemli katkısı ikili uçuş verisinin insan ve makine tarafından anlamlı uçuş hareketleri verisine dönüştürülmesidir.

### 4.1.3 İHA Savaş Eğitimi

Literatürde otonom olarak iniş kalkış yapan [28] ve otonom olarak verilen bir rotayı takip eden [44] İHA tasarımları bulunmaktadır. Yapay olarak tam otonom uçuş yapmak çözülmüş bir sorundur.

İnsansız hava araçlarını silahlı veya silahsız tam otonom olarak savaştırmak bu çalışmanın yapıldığı tarihte yapılmamış bir çalışmadır. Bu konudaki etik kuralların belirlenmemiş olması çalışmaların önünde önemli bir engeldir. Etik kural en basit anlamıyla öldürülen insanın sorumluluğunu kimin alacağıdır. Aslında bu kısıt tüm robotik cihazlar için geçerli olmalıdır. Fakat konu savaşmak ve temel amaç da öncelikli olarak karşıdaki düşmanı yok etmek olduğunda, konu olası bir kazanın sorumluluğundan çok amacın sorgulanması haline gelmektedir. İnsansız silahların amacı insanları birbiri ile savaştırmamak olarak gösterilmek istendiğinde, etik kural karşıdaki rakibin de insansız olması durumunda biraz yumuşatılabilir. Fakat insansız rakipler yok edildiğinde kazanan insansız savaş aracı ile insan yine karşı karşıya kalacaktır. Etik sorun çıkmazı hala devam etmektedir.

Etik kuralın çözülmüş olduğu varsayılırsa, bu çalışma ile otonom uçuş yapabilen bir İHA platformuna, yetkin savaş pilotlarının deneyimlerini kullanarak yakın hava muharebesinde kullanabileceği temel savaş manevralarını öğretmek mümkündür.

## KAYNAKLAR

- [1] Isaacs R. *Games of Pursuit*, Tech. rep., The Rand Corporation, Santa Monica, CA, **1951**.
- [2] Knuth D.E. *Sorting and Searching. The Art of Computer Programming*, Addison-Wesley, Reading MA USA, **1973**.
- [3] Urban H.D. Lynch, *Differential Game Barriers and Their Application in Air-to-Air Combat*, Air Force Institute of Technology, Air Force Flight Dynamics Laboratory, **1973**.
- [4] Zadeh L., *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes*, IEEE Transactions on Systems, Management and Cybernetics, 1973.
- [5] Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan, **1975**.
- [6] Nguyen L.T. Ogburn M.E., Gilbert W.P., Kibler K.S., Brown P.W. and Deal P.L. *Simulator study of stall post-stall characteristics of a fighter airplane with relaxed longitudinal static stability*. Technical report, NASA, Langley Research Center, Dec **1979**.
- [7] Vapnik V. *Estimation of Dependences Based on Empirical Data*, Springer Verlag, **1982**.
- [8] Shaw R. *Fighter Combat Tactics and Maneuvering*, Naval Institute Press, Annapolis, Maryland, **1985**.
- [9] Sugeno M. *Industrial applications of fuzzy control*, Elsevier Science Pub. Co., **1985**.
- [10] Rodrick William Lekey, *A Prototype Expert Database For Air Combat Maneuvering*, University of Missouri-Rolla, MsD Thesis, **1985**.
- [11] Burgin, G., Sidor, L. *Rule-based air combat simulation*, Tech. rep., NASA, CR-4160, **1988**.
- [12] McManus J., Goodrich K. *Application of artificial intelligence (AI) programming techniques to tactical guidance for fighter aircraft*, AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, August 14-16 **1989**.
- [13] McMahan D.C. *A neural network trained to select aircraft maneuvers during air combat: a comparison of network and rule based performance*, University of Mexico, Department of Psychology, **1990**.
- [14] Rodin E.Y., Amin S.M. *Maneuver prediction in air combat via artificial neural networks*, Computers & Mathematics with Applications, vol. 24, p.95-112, **1992**.
- [15] Jang J.S.R. *Adaptive Network Based Fuzzy Inference System*, IEEE Transactions on Systems Man. and Cybernetics, Vol.23, No.3, p 665-685, **1993**.
- [16] Quinlan J. R. *C4.5 programs for machine learning*, San Mateo, Morgan Kaufmann, **1993**.
- [17] Cook M.V. *Flight dynamics principles*, Butterworth Heinemann, **1997**.

- [18] David L. Hall ve James Llinas , *An Introduction to Multisensor Data Fusion*, Invited Paper, Proceedings of the IEEE, Vol. 85, No. 1, January **1997**.
- [19] Burges C. *A tutorial on support vector machines for pattern recognition*. Data Mining and Knowledge Discovery, 2:121-167, **1998**.
- [20] Eppstein D., *Finding the k shortest paths*, SIAM Journal of Computing, vol. 28, no. 2, pp. 652-673, **1999**.
- [21] Efe M.Ö., Kaynak O. *Artificial Neural Networks and Their Applications*, Boğaziçi University Publications, ISBN: 975-518-223-3. **2000**.
- [22] Stevens B. L., Lewis F. L. *Aircraft Simulation and Control*, Hoboken, NJ: Wiley, **2002**.
- [23] Beard W., McLain W., Goodrich M., *Coordinated Target Assignment and Intercept for Unmanned Air Vehicles*, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Washinton DC, **2002**.
- [24] Tran C., Abraham A., Jain L., *TACDSS: Adaptation Using a Hybrid Neuro-Fuzzy System*, Advances in Soft Computing. Springer, London **2003**.
- [25] Andriambololona M., Lefeuvre P. *Implementing a dogfight artificial pilot*, PhD Thesis, Delft University, **2003**.
- [26] Coenen, F. *LUCS-KDD DN Software*, [http://www.csc.liv.ac.uk/~frans/KDD/Software/LUCS\\_KDD\\_DN/](http://www.csc.liv.ac.uk/~frans/KDD/Software/LUCS_KDD_DN/), Department of Computer Science, The University of Liverpool, UK, **2003**.
- [27] Russel R.S. *Non-linear F-16 simulations using Simulink and matlab*. Technical report, University of Minnesota, **2003**.
- [28] Istas F. Nusyirwan, Cees Bil, *Stochastic Trajectory Optimisation for Aircraft in Air Combat*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol 16, **2005**.
- [29] Freed M., Harris R., Shafto M., *Comparing methods for UAV-based autonomous surveillance*, National Conference on Artificial Intelligence, **2004**.
- [30] Karim S., Heinze C., *Experiences with the Design and Implementation of an Agent-based Autonomous UAV Controller*, Proceedings of the 4<sup>th</sup> international joint conference on autonomous agents and multiagent systems, July 25-29 **2005**.
- [31] Altshuler Y., Yanovsky V., Wagner I., Bruckstein A., *The Cooperative Hunters - Efficient Cooperative Search For Smart Targets Using UAV Swarms*, Robotica, 26(4), 551-557. doi:10.1017/S0263574708004141, **2008**.
- [32] Lent M., Carpenter P., McAlinden R., Tan P., *A Tactical and Strategic AI Interface for Real-Time Strategy Games*, University of Southern California, Institute for Creative Technologies, **2005**.
- [33] Isler V., Sun D., Sastry S., *Roadmap Based Pursuit-Evasion and Collision Avoidance*, Robotics: Science and Systems I, June 8-11 **2005**.
- [34] International Civil Aviation Organization, *Global Air Traffic Management Operational Concept*, Document 9854 AN/458 **2005**.
- [35] Konakoğlu E., Kaynak O. *Autonomous flight control of unmanned air vehicles by use of ANFIS*, MSc Thesis, ASTIN, **2006**.

- [36] Virtanen K., Karelahti J., Raivio T. *Modeling Air Combat by a Moving Horizon Influence Diagram Game*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 29, No. 5, Sep-Oct **2006**.
- [37] Mario J. Valenti, *Approximate Dynamic Programming with Applications in Multi-Agent Systems*, Massachusetts Institute of Technology, Department of Electrical Engineering and Computer Science, PhD. Thesis, **2007**.
- [38] Coenen F. *The lucs-kdd decision tree classifier software*, Department of Computer Science, The University of Liverpool, UK, **2007**.
- [39] Alver Y., Özdoğan M., *Mission Assignment Model and Simulation Tool for Different Types of Unmanned Aerial Vehicles*, Naval Postgraduate School, Monterey, California, MsD Thesis, **2008**.
- [40] Tisdale J., Kim Z., Hedrick J., *Autonomous Path Planning and Estimation using UAVs*, IEEE Robotics and Automation Magazine, June **2009**.
- [41] Liggins M., Hall D., Llinas J., *Handbook of Multisensor Data Fusion Theory and Practice*, Second Edition, CRC Press Taylor & Francis Group **2009**.
- [42] Dong J., Zhuang D., Huang Y., Fu J., *Advances in Multi-Sensor Data Fusion: Algorithms and Applications*, Sensors, ISSN 1424-8220, doi:10.3390/s91007771 **2009**.
- [43] Üre N.K., İnalhan G. *Feasible agile maneuver identification and generation algorithms on multi modal control framework*, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, Chicago, IL, 10-13 August **2009**.
- [44] Çetin Ö., Kaynak O. *Adaptive neuro-fuzzy inference system based autonomous flight control of unmanned air vehicles*, Expert Systems with Applications vol 37, p 1229-1234, **2010**.
- [45] McGrew J., How J., Bush L., Williams B. and Roy N. *Air combat strategy using approximate dynamic programming*, Journal of Guidance, Control and Dynamics, 33(5):1641-1654, Sept-Oct **2010**.
- [46] Kerimoğlu K., *Sabit Kanatlı Bir İnsansız Hava Aracı İçin Düşük Bütçeli Otopilot Sistemi Tasarımı*, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Y.Lisans Tezi, **2011**.
- [47] Bry A., Roy N., *Rapidly-exploring Random Belief Trees for Motion Planning Under Uncertainty*, Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, **2011**.
- [48] Fu L., *The Short-range Dogfight Combat Model of Modern Fighter Based on Differential Games*, IEEE, **2011**.
- [49] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Close range one to one air combat maneuvering for autonomous UAV*, 8th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Turkey (AIAC2015-046), 10-12 September **2015**.
- [50] Johansen I., *Autopilot Design for Unmanned Aerial Vehicles*, Norwegian University of Science and Technology, Department of Engineering Cybernetics, MsD. Thesis, **2012**.
- [51] Teng T., Tan A., Tan Y., Yeo A., *Self-organizing neural networks for learning air combat maneuvers*, IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, June, 10-15, **2012**.

- [52] Üre N.K., İnalhan G. *Autonomous Control of Unmanned Combat Air Vehicles*, IEEE Control System Magazine, 74-95, October **2012**.
- [53] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Extracting Basic Fighter Maneuvers from Actual Flight Data*, Lecture Notes on Information Theory, Vol. 5. No. 1, pp. 1-6, doi: 10.18178/lnit.5.1.1-6, June **2017**.
- [54] Wang H. *The Application of Proportional Navigation in the Process of UAV Air Combat Guidance and Optimization of Proportional Parameter*, Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference, July **2014**.
- [55] Xie R., Li J., Lou D. *Research on Maneuvering Decision for Multi-UAVs Air Combat*, 11th IEEE International Conference on Control & Automation (ICCA), June **2014**.
- [56] Toubman A., Roessingh J., Spronck P., Plaat A., Herik J., *Transfer Learning of Air Combat Behavior*, IEEE 14th International Conference on Machine Learning and Applications, **2015**.
- [57] Yuksek B., Üre N., Çalışkan F., and İnalhan G., *Fault tolerant heading control system design for Turac unmanned aerial vehicle*, Transactions of the Institute of Measurement and Control, DOI: 10.1177/0142331216645179, May **2016**.
- [58] Kasnakoğlu C. *Scheduled smooth MIMO robust control of aircraft verified through blade element SIL testing*, Transactions of the Institute of Measurement and Control, DOI: 10.1177/0142331216661760, 1-14, **2016**.
- [59] Kotegawa T., *Proof-of-Concept Airborne Sense and Avoid System with ACAS-XU Flight Test*, DOI. No. 10.1109/MAES.2016.150163, IEEE A&E Systems Magazine, Sept. **2016**.
- [60] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Air Combat Learning from F-16 Flight Information*, Fuzz-IEEE 2017 IEEE Conference on Fuzzy systems, Naples, Italy, 9-12 July **2017**.
- [61] Lee W.C., Park S.S., Choi H.K., *Track management architecture for distributed multiple radar fusion system*, Journal of Institute of Control 23(2):76-82, DOI10.5302/J.ICROS.2017.16.0206, February **2017**.
- [62] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Air Combat Rule Mining From Movement Sequence of Flights*, 9th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Turkey (AIAC2017-127), 20-22 September **2017**.
- [63] Changqiang H., Kangsheng D., Hanqiao H., Shangqin T., Zhuoran Z., *Autonomous air combat maneuver decision using Bayesian inference and moving horizon optimization*, Journal of Systems Engineering and Electronics, Vol.29, Issue: 1, Feb. **2018**.
- [64] Microsoft Azure Machine Learning Cheat sheet, <http://aka.ms/MLCheatSheet>
- [65] Özpala A., Efe M.Ö., Sever H., *A Multi Agent Pursuit-Evasion Game Model for Air Engagement*, 9th Ankara International Aerospace Conference, September 20-22, Ankara, Turkey, **2017**.
- [66] Özpala A., Efe M.Ö., Sever H., *A Game Theoretic Model for Multi Agent Pursuit-Evasion Problem*, 9th Ankara International Aerospace Conference, September 20-22, Ankara, Turkey, **2017**.

- [67] Özpala A., Efe M.Ö., Sever H., *Multiple UAV Engagement Decision by Game Theory*, IJCEE International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol.9, No.1, pp.384-392, (ISSN: 1793-8163), June **2017**.



## ÖZGEÇMİŞ

### Kimlik Bilgileri

Adı Soyadı : Mustafa KARLI  
Doğum Yeri : Kırklareli / Türkiye  
Medeni Hali : Evli  
E-posta : mustafa.karli@hacettepe.edu.tr  
Adresi : Serhat m. Serhat c. 23/E-6 06800 Yenimahalle/Ankara

### Eğitim

Lise : Ankara Fen Lisesi (1989-1992)  
Lisans : Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği (1992-1996)  
Yüksek Lisans : Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü (2007-2009)  
Doktora : Hacettepe Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği (2011-2018)

### Yabancı dil ve Düzeyi

İngilizce, gelişmiş seviyede konuşma ve okuma

### İş Deneyimi

Hava Kuvvetleri Komutanlığı - 1993-2017

### Deneyim Alanları

Askeri bilgi sistemleri yazılım geliştirme, UNIX (AIX, SOLARIS) sistem yöneticisi ve programcısı, nesne yönelimli yazılım geliştiricisi (C++, Java), sertifikalı veritabanı yöneticisi (ORACLE), veritabanı tasarımı ve uygulama geliştiricisi, SAP sistem yöneticisi, bulut çözüm mimarı (Certified Amazon AWS Solution Architect), veri çözümlene ve makine öğrenmesi teknikleri.

### Tezden Üretilmiş Projeler ve Bütçesi

-

### Tezden Üretilmiş Yayınlar

- [1] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Close range one to one air combat maneuvering for autonomous UAV*, 8th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Turkey (AIAC2015-046), 10-12 September **2015**.

- [2] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Extracting Basic Fighter Maneuvers from Actual Flight Data*, Lecture Notes on Information Theory, Vol. 5. No. 1, pp. 1-6, doi: 10.18178/lnit.5.1.1-6, June **2017**.
- [3] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Air Combat Learning from F-16 Flight Information*, Fuzz-IEEE 2017 IEEE Conference on Fuzzy systems, Naples, Italy, 9-12 July **2017**.
- [4] Karli M., Efe M.Ö., Sever H. *Air Combat Rule Mining From Movement Sequence of Flights*, 9th Ankara International Aerospace Conference, Ankara, Turkey (AIAC2017-127), 20-22 September **2017**.

**Tezden Üretilmiş Tebliğ ve/veya Poster Sunumu ile Katıldığı Toplantılar**

-



HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS/DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

HACETTEPE ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ  
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI BAŞKANLIĞI'NA

Tarih: 30/05/2018

Tez Başlığı / Konusu: Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Çıkarım Sistemi ile Hava Muharebesinin Gerçekleştirilmesi

Yukarıda başlığı/konusu gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş, c) Ana bölümler d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 92 sayfalık kısmına ilişkin, 30/05/2018 tarihinde ~~çalışmam~~/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 1'dir.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- Kaynakça hariç
- 2- Alıntılar dahil
- 3- 5 kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Uygulama Esasları'nı inceledim ve bu Uygulama Esasları'nda belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

30.05.2018

Tarih ve İmza

Gereğini saygılarımla arz ederim.

Adı Soyadı: Mustafa KARLI

Öğrenci No: N10248785

Anabilim Dalı: BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ

Programı: DOKTORA

Statüsü:  Y.Lisans  Doktora  Bütünleşik Dr.

**DANIŞMAN ONAYI**

UYGUNDUR.

Prof. Dr. Mehmet Önder EFE

(Unvan, Ad Soyad, İmza)