

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN YENİ BİR GERÇEK ZAMANLI  
EVİRİMSEL SEYRÜSEFER PLANLAMA VE GÜDÜMLEME SİSTEMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ferhat Uçan**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilgisayar Mühendisliği Programı**

**TEMMUZ 2013**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN YENİ BİR GERÇEK ZAMANLI  
EVRİMSEL SEYRÜSEFER PLANLAMA VE GÜDÜMLEME SİSTEMİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Ferhat UÇAN  
(504042502)**

**Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Bilgisayar Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. D. Turgay ALTILAR**

**TEMMUZ 2013**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504042502 numaralı Doktora Öğrencisi **Ferhat UÇAN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN YENİ BİR GERÇEK ZAMANLI EVRİMSEL SEYRÜSEFER PLANLAMA VE GÜDÜMLEME SİSTEMİ**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :**      **Doç. Dr. D. Turgay ALTILAR**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :**      **Prof. Dr. İbrahim EKSİN**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. A. Coşkun SÖNMEZ**      .....

Yıldız Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. M. Bülent ÖRENCİK**      .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Doç. Dr. Borahan TÜMER**      .....

Marmara Üniversitesi

**Teslim Tarihi :**      **17 Mayıs 2013**

**Savunma Tarihi :**      **29 Temmuz 2013**



*Eşim, çocuklarım, ailem ve hocalarıma ithaf ediyorum,*





## ÖNSÖZ

Yüksek lisans ve doktora eğitimim süresince akademik birikiminden, tavsiyeleri ve yönlendirmelerinden yararlandığım, doktora başlamak ve tez sürecinde motivasyonumu koruyarak devam etmem için beni teşvik eden sayın Prof. Dr. Coşkun SÖNMEZ'e teşekkürü borç bilirim.

TÜBİTAK BİLGEM BTE'deki yöneticiliği sürecinde, kurum içi danışmanlığı yapan, beni her zaman motive eden, çalışmalarını takip ederek beni yönlendiren saygıdeğer Prof. Dr. Bülent ÖRENCİK'e çok teşekkür ederim.

Tez çalışmamın bütün aşamalarında, makale ve bildiri yazımlarında bana yol gösteren tez danışmanım, sayın Doç. Dr. Turgay ALTILAR'a teşekkür ederim.

Doktora tezi ilerleme süreçlerinde beni çok iyi yönlendirdiğini düşündüğüm sayın Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e ve savunma sınavı sonrası tezimin iyileştirilmesi için beni yönlendiren sayın Doç. Dr. Borahan TÜMER'e teşekkür ederim.

Doktora eğitimim süresince dersleri takip edebilmem için ve tez aşamasında danışman hoca ile görüşmeler için akademik izin veren ve lisansüstü çalışmalarını her zaman destekleyen, TÜBİTAK BİLGEM kurumundaki yöneticilerimize teşekkür ederim.

Tez çalışmam süresinde varlığını ve desteğini hep yanımda hissettiğim, bana her konuda yardımcı olan sevgili eşim Hülya UÇAN'a teşekkür eder, uzun ve mutlu bir hayat dilerim.

Temmuz 2013

Ferhat Uçan  
(Bilgisayar Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY .....	xix
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı ve Motivasyon .....	4
1.2 Literatür Araştırması .....	4
1.2.1 Literatürdeki rota planlama çalışmaları .....	5
1.2.2 Literatürdeki güdümlenme ve insansız hava aracı çalışmaları .....	10
<b>2. GENETİK ALGORİTMALAR .....</b>	<b>15</b>
2.1 Genetik Algoritmanın Özellikleri.....	17
2.2 Genetik Algoritma Operatörleri .....	20
2.3 Genetik Algoritma Kontrol Parametreleri.....	21
2.4 Genetik Algoritmanın İşlem Adımları .....	22
2.5 Genetik Algoritmaların Güçlü Yönleri .....	24
2.6 Genetik Algoritmaların Zayıf Yönleri.....	25
2.7 Genetik Algoritma Uygulama Alanları .....	26
<b>3. EVRİMSEL UÇUŞ PLANLAMA ALTSİSTEMİ .....</b>	<b>29</b>
3.1 Evrimsel Seyrüsefer Sistemi Bileşenleri .....	30
3.2 Çok Amaçlı Karar Verme .....	32
3.2.1 Markov karar süreçleri ile uçuş planlama .....	33
3.3 Uçuş Planlama Sisteminde Çizge Kuramı .....	38
3.4 Tasarlanan Evrimsel Seyrüsefer Algoritması ve Operatörleri .....	39
3.5 Yakıt Planlama Regresyonu .....	49
3.6 Evrimsel Algoritmanın Uçuş Planlama Sistemindeki Yenilikleri.....	50
<b>4. SEYRÜSEFER VE GÜDÜMLEME ALGORİTMALARI .....</b>	<b>53</b>
4.1 Yatay Seyir Hesaplamaları.....	56
4.1.1 Uzaklık ve yönelim hesaplama .....	56
4.1.2 Koordinat hesaplama.....	59
4.1.3 Kesişim noktası koordinatlarını hesaplama .....	60
4.1.4 Yatay sapma mesafesi hesaplama .....	61
4.1.5 Zaman bazlı seyrüsefer .....	62
4.1.6 Yalpa açısı komutu hesaplama.....	64
4.1.7 Uçuş planından paralel sapma fonksiyonu.....	65
4.2 Dikey Seyir Hesaplamaları.....	69
4.2.1 Dikey sapma mesafesi hesaplama .....	70
4.3 Matlab Simulink Modelleri .....	70
4.4 Temel Uçuş Kalıpları .....	73

4.4.1 Daire kalıbının gerçekleştirilmesi.....	73
4.4.2 Merdiven kalıbının gerçekleştirilmesi.....	77
4.4.3 Genişleyen kare kalıbının gerçekleştirilmesi.....	82
4.4.4 Bekleme kalıbının gerçekleştirilmesi.....	87
4.4.5 Sekiz şekli kalıbının gerçekleştirilmesi.....	92
4.4.6 Uçuş kalıplarına girişler.....	97
<b>5. UÇUŞ PLANI YÜRÜTME ALTSİSTEMİ.....</b>	<b>103</b>
5.1 İki Boyutlu Uçuş Benzetimi.....	107
5.2 Üç Boyutlu Uçuş Benzetimi.....	111
5.3 Uçuş Planı Koşurma Alt Sisteminin Getirdiği Yenilikler.....	114
<b>6. SEYRÜSEFER SİMÜLASYONLARI.....</b>	<b>117</b>
6.1 Seyir Planlama Simülasyonları.....	117
6.2 Geliştirilen Planlama Algoritmasının Performansı.....	120
<b>7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>123</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>127</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>133</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>145</b>

## KISALTMALAR

<b>ARP</b>	: Araç Rotalama Problemi
<b>ATD</b>	: İz Mesafesi
<b>ÇAKV</b>	: Çok Amaçlı Karar Verme
<b>ÇPP</b>	: Çinli Postacı Problemi
<b>EA</b>	: Evrimsel Algoritma
<b>ECEF</b>	: Yer Merkezli Yer Sabit Koordinat Sistemi
<b>ETA</b>	: Tahmini Varış Süresi
<b>EUÇ</b>	: En İyi Uzlaşık Çözüm
<b>FMS</b>	: Uçuş Yönetim Sistemi
<b>FSM</b>	: Sonlu Durum Makinası
<b>GA</b>	: Genetik Algoritma
<b>GS</b>	: Yer Hızı
<b>GPS</b>	: Küresel Konumlama Sistemi
<b>GSP</b>	: Gezgin Satıcı Problemi
<b>İAF</b>	: İz Açısı Farkı
<b>İHA</b>	: İnsansız Hava Aracı
<b>KKA</b>	: Karınca Koloni Algoritması
<b>KTN</b>	: Kalıp Tanımlama Noktası
<b>LB</b>	: Libre
<b>LGS</b>	: Yerel Jeodezik Koordinat Sistemi
<b>MDP</b>	: Markov Karar Süreci
<b>MV</b>	: Manyetik Sapma
<b>NM</b>	: Deniz Mili
<b>NP</b>	: Belirsiz Polinom
<b>OSPF</b>	: İlk Açık En Kısa Yol
<b>PSE</b>	: Parçacık Sürü Eniyilemesi
<b>RGS</b>	: Gerekli Yer Hızı
<b>RTS</b>	: Rulet Tekerı Seçimi
<b>SS</b>	: Sıralı Seçim
<b>TAS</b>	: Gerçek Hava Hızı
<b>TB</b>	: Tavla Benzetimi
<b>TS</b>	: Turnuva Seçimi
<b>TTG</b>	: Tahmini Varış Zamanı
<b>VLSI</b>	: Çok Geniş Ölçekli Tümlleşim
<b>WDM</b>	: Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama
<b>XTD</b>	: Geçiş İzi Mesafesi
<b>YA</b>	: Yasaklı Arama
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları



## ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
<b>Çizelge 3.1</b> : Uygunluk fonksiyonu katsayı değerleri. ....	43
<b>Çizelge 5.1</b> : Altı noktalı uçuş planı için uçuş noktaları listesi. ....	107
<b>Çizelge 5.2</b> : Dokuz noktalı uçuş planı için uçuş noktaları listesi. ....	111
<b>Çizelge 6.1</b> : Asimptotik işlem karmaşıklıkları. ....	121





## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Basit genetik algoritma işlem adımları.....	23
Şekil 3.1 : Sistem bileşenleri ve alt sistemler arası bilgi akışı.....	31
Şekil 3.2 : Sekiz düğümlü şehir haritası. ....	36
Şekil 3.3 : Durumlar arası geçiş olasılıkları.....	37
Şekil 3.4 : Uçuş intikali rota haritası. ....	39
Şekil 3.5 : Uçuş planlama alt sistemi işlem adımları.....	41
Şekil 3.6 : Çaprazlama operatörü.....	44
Şekil 3.7 : Çevrim temizleme operatörü.....	45
Şekil 3.8 : Mutasyon operatörü.....	45
Şekil 3.9 : Çaprazlama oranına göre hata yüzdesi değişimi.....	46
Şekil 3.10 : Mutasyon oranına göre hata yüzdesi değişimi.....	47
Şekil 3.11 : Evrimsel algoritma hata oranı ile nesil sayısı ilişkisi.....	48
Şekil 3.12 : Sikorsky S-70A helikopteri için örneklenen yakıt akış hızı bilgileri.....	50
Şekil 4.1 : Seyrüsefer açı ve hız tanımları.....	54
Şekil 4.2 : Koordinat eksenleri.....	55
Şekil 4.3 : Büyük daire mesafesi.....	57
Şekil 4.4 : İki uçuş noktası arasındaki mesafe ve yönelim.....	58
Şekil 4.5 : Kesişim noktası.....	60
Şekil 4.6 : Yatay sapma mesafesi.....	61
Şekil 4.7 : Yatay uçuş hattına oturtma.....	64
Şekil 4.8 : Paralel sapmalı uçuş planı örneği.....	66
Şekil 4.9 : Hatların kesişim noktası ile paralel sapma.....	67
Şekil 4.10 : Köşegen uzantısındaki nokta ile paralel sapma.....	69
Şekil 4.11 : Simulink kütüphanesi ağaç yapısı.....	72
Şekil 4.12 : Daire kalıbı parametreleri.....	73
Şekil 4.13 : Daire kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.....	74
Şekil 4.14 : Geliştirilen güdümlenme sistemi ile örnek daire kalıbı uçuş izi.....	75
Şekil 4.15 : Mevcut güdümlenme sistemi ile daire kalıbı örnek uçuş izi.....	75
Şekil 4.16 : Daire kalıbı örnek simülasyon için yarıçap hatası.....	76
Şekil 4.17 : Daire kalıbı örnek simülasyon için yalpa açısı komutu.....	76
Şekil 4.18 : Daire kalıbı rüzgârsız ortam örnek simülasyonu için uçuş izi.....	77
Şekil 4.19 : Merdiven kalıbı parametreleri.....	78
Şekil 4.20 : Merdiven kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.....	79
Şekil 4.21 : Geliştirilen güdümlenme sistemi ile örnek merdiven kalıbı uçuş izi.....	80
Şekil 4.22 : Mevcut güdümlenme sistemi ile örnek merdiven kalıbı uçuş izi.....	80
Şekil 4.23 : Merdiven kalıbı örnek benzetim için deltaY değeri değişimi.....	81
Şekil 4.24 : Merdiven kalıbı örnek benzetim için yalpa açısı komutu.....	81
Şekil 4.25 : Merdiven kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.....	82
Şekil 4.26 : Genişleyen kare kalıbı parametreleri.....	83
Şekil 4.27 : Genişleyen kare kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.....	84

Şekil 4.28 : Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda genişleyen kare uçuş izi.....	85
Şekil 4.29 : Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda genişleyen kare uçuş izi.....	85
Şekil 4.30 : Genişleyen kare rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değişimi.....	86
Şekil 4.31 : Genişleyen kare rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.....	86
Şekil 4.32 : Genişleyen kare kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.....	87
Şekil 4.33 : Bekleme kalıbı parametreleri.....	88
Şekil 4.34 : Bekleme kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.....	89
Şekil 4.35 : Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.....	90
Şekil 4.36 : Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.....	90
Şekil 4.37 : Bekleme kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değişimi.....	91
Şekil 4.38 : Bekleme kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.....	91
Şekil 4.39 : Bekleme kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.....	92
Şekil 4.40 : Sekiz şekli kalıbı parametreleri.....	93
Şekil 4.41 : Sekiz şekli kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.....	94
Şekil 4.42 : Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda sekiz şekli kalıbı uçuş izi.....	95
Şekil 4.43 : Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.....	95
Şekil 4.44 : Sekiz kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değişimi.....	96
Şekil 4.45 : Sekiz kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.....	96
Şekil 4.46 : Sekiz kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.....	97
Şekil 4.47 : Uçuş kalıplarına giriş yöntemleri.....	98
Şekil 4.48 : Bekleme kalıbına damla girişi.....	98
Şekil 4.49 : Sekiz şekli kalıbına damla girişi.....	99
Şekil 4.50 : Daire kalıbı damla girişi.....	99
Şekil 4.51 : Bekleme kalıbına paralel giriş.....	100
Şekil 4.52 : Sekiz şekli kalıbına paralel giriş.....	101
Şekil 4.53 : Daire kalıbına paralel giriş.....	101
Şekil 5.1 : Yatay güdümlenme kontrol sistemi.....	103
Şekil 5.2 : Dikey güdümlenme kontrol sistemi.....	104
Şekil 5.3 : Uçuş planı yürütme yatay güdüm.....	105
Şekil 5.4 : Uçuş planı yürütme dikey güdüm.....	106
Şekil 5.5 : Geliştirilen otopilot ile rüzgârlı ortamda uçuş planı icrası.....	108
Şekil 5.6 : Rüzgârlı ortam için deltaY değeri değişimi.....	108
Şekil 5.7 : Rüzgârlı ortam için deltaX değeri değişimi.....	109
Şekil 5.8 : Rüzgârlı ortam için yalpa açısı komutu değişimi.....	109
Şekil 5.9 : Mevcut otopilot ile altı uçuş noktalı planın icrası.....	110
Şekil 5.10 : Geliştirilen otopilotla rüzgârsız ortamda plan icrası.....	111
Şekil 5.11 : Dokuz uçuş noktalı uçuş izinde konum değişimi.....	112
Şekil 5.12 : Üç boyutlu uçuş planı benzetim senaryosu.....	113
Şekil 5.13 : Üç boyutlu benzetim benzetim senaryosu çıktıları.....	114
Şekil 6.1 : Başlangıç durumu intikal planı (şehir 1 – şehir 15).....	117
Şekil 6.2 : Dinamik intikal planı (şehir 1 – şehir 15).....	118
Şekil 6.3 : Güncellenmiş dinamik intikal planı (şehir 1 – şehir 15).....	119
Şekil 6.4 : Geliştirilen algoritma ile diğer yöntemlerin işlem zamanları.....	121
Şekil A.1 : Aerosim simülatörü blok şeması.....	135
Şekil A.2 : Aerosim simülatörü blok parametreleri.....	136
Şekil A.3 : Aerosim kütüphane bileşenleri.....	137
Şekil A.4 : Aerosim kütüphanesi ağaç yapısı.....	138
Şekil A.5 : Sabit-kanat duruş açıları.....	139
Şekil A.6 : Sabit-kanat kontrol yüzeyleri.....	139
Şekil A.7 : Döner-kanat kontrol yüzeyleri.....	142

## **DİNAMİK ORTAMLAR İÇİN YENİ BİR GERÇEK ZAMANLI EVRİMSEL SEYRÜSEFER PLANLAMA VE GÜDÜMLEME SİSTEMİ**

### **ÖZET**

Gerçek zaman kısıtları altında seyrüsefer planlama, değişken ortam koşullarında hava aracının minimum yakıtla en güvenilir, en kısa yoldan intikali tamamlayabilmesi için gerekli çözümün bulunmasını gerektirir. Enlem, boylam ve yükseklik değerleri ile tanımlanan uçuş noktalarının bazıları arasında, çift yönlü geçiş yolları tanımlıdır. Bu geçiş yollarının uzunluk, güvenlik, yükseklik farkı gibi rastlantısal olarak değişebilen ölçütleri mevcuttur. Problemin en uygun çözümü, tüm amaç fonksiyonlarını birlikte eniyileyen, en kısa, en güvenilir ve düze en yakın rotanın planlanması ve güdümlenmesi ile çevrimiçi olarak çalıştırılmasıdır. Tezde çözüm önerilen rota planlama problemi, uzunluk, yükseklik ve güvenlik ölçütlerini değerlendirdiği için çok amaçlı eniyileme problemidir.

Gerçekleştirilen sistem uçuş planı tasarlama, yakıt planlama ve uçuş planı yürütme alt sistemlerinden oluşmaktadır. Uçuş planı tasarlama alt sisteminde, hava araçlarının, bir intikal başlangıç noktasından hedef noktasına en uygun rotası evrimsel algoritma ile planlanmıştır. Planlama alt sistemi, maliyeti dinamik değişebilen üç farklı kısıtlı çizge yapısını kullanmaktadır. Evrimsel uçuş planlama alt sisteminde geliştirilen genetik algoritmada, tezde özgün olarak seyrüsefer sistemi için tasarlanan çaprazlama, mutasyon ve çevrim kaldırma operatörleri kullanılmıştır. Çaprazlama oranı, mutasyon oranı gibi değerlerin uçuş planlama problemi için en uygun değerleri deneysel çalışmalarla bulunmuştur.

Evrimsel uçuş planlama algoritması ile en uygun uçuş planı bulunduktan sonra bu uçuş planı yakıt planlama alt sistemine gönderilir. Yakıt akış hızına ilişkin regresyon ile bulunan yakıt akış hızı ve toplam yakıt bilgilerine göre uçuş planının mevcut yakıtla icra edilip edilmeyeceğinin analizini yapılır. Eğer uçuş planı için yakıt yeterli ise plan uçuş planı yürütme alt sistemine gönderilir ve planın icrası gerçekleştirilir. Eğer mevcut yakıt yeterli değilse uçuş planlama alt sistemi tarafından farklı bir uçuş planı araştırılır.

Uçuş planı yürütme alt sistemi sağladığı yatay ve dikey güdümlenme fonksiyonlarıyla tüm uçuş bacakları için, istenilen kalkış noktasından bir sonraki varış noktasına planlanan intikali gerçekleştirir. Hava aracının rotasında, istenilen uçuş rotasına göre herhangi bir sapma olduğunda, sapmayla orantılı, hava aracını yatayda ve dikeyde istenilen rotaya sokacak yalpalama ve yunuslama açısı komutları hesaplanır. Güdümlenme alt sisteminde, hava aracının rota değiştirmesi gereken zamanlarda bir sonraki rotaya oturmasını sağlayacak güdümlenme komutları hesaplanmaktadır.



# **A NEW REAL TIME EVOLUTIONARY NAVIGATION PLANNING AND GUIDANCE SYSTEM FOR DYNAMIC ENVIRONMENTS**

## **SUMMARY**

Navigation planning under real time constraints requires finding the necessary solution for the transition of an air vehicle through the most secure and shortest path with minimum fuel consumption with changing environment conditions. There are transition paths between some of the waypoints, which are defined by latitude, longitude and altitude parameters. Constraints apply to these transition paths such as distance, security and altitude, which can change casually. The optimum solution of the problem is expected to optimize all of the objective functions. Finding such a solution is usually difficult due to the dynamically changing constraints. Because usually constraints that are considered in the problem are contradictory and interact adversely with each other. Since the problem considers distance, altitude and security conditions as distinct constraints, it becomes a multi-objective optimization problem. The designed system consists of two subsystems, one of these subsystems is the flight planning subsystem and the other one is the flight plan execution subsystem. In the flight planning subsystem, the most secure, shortest and smoothest flight path transition of the air vehicles from the source waypoint to the target waypoint is planned by an evolutionary method. The flight plan execution subsystem executes the planned flight path from the desired departure waypoint to the next arrival waypoint through the lateral and vertical navigation guidance functions.

Navigation planning can be considered as searching the most convenient flight path from an initial waypoint to a destination waypoint. Generally the aim is to follow the flight path, which provides minimum fuel consumption for the air vehicle. In dynamic environments, constraints change dynamically during flight. This constitutes a special case of dynamic path planning. Dynamic path planning is a problem that is encountered in many fields in different forms. It can be used in vehicle routing systems, military applications, robotics applications and sensor networks for determining the route between two points. Since the main concern of the thesis is about flight planning, the conditions and objectives that are most applicable to the navigation problems are considered. In the thesis, the evolutionary dynamic navigation planning algorithm is developed in order to compensate for deficiencies in the existing approaches. The existing fully dynamic algorithms process unit changes in topology one modification at a time. When there are several modifications occurring in the environment simultaneously, the existing algorithms are quite inefficient because of computation time. The problems are worse in large topologies, where a large number of topology modifications may occur often. The proposed algorithm is designed to respond to the concurrent constraint updates within a shorter time for dynamic environment. The graphs which serve the purpose of representing a waypoint map are dynamic. While the navigation distance and security parameters change, the genetic algorithm plans the most feasible flight path according to the updated conditions. In the city map, each waypoint is defined by

longitude, latitude and altitude parameters. The routes between waypoints have three costs; distance, change of altitude and security. The most secure navigation of the air vehicle is planned and executed with minimum fuel consumption.

Some of the well-known representative methods used for the standard route planning problem are the Dijkstra, Floyd Warshall, A-Star and Bellman Ford algorithms. All of them have been designed to calculate the shortest path between two nodes of a static graph. The effects of the security, distance and altitude difference parameters may be modeled with these classical optimization techniques. However, in a dynamic environment, restarting to find the solution at each graph update increases the time complexity. Moreover, when new waypoints or routes are inserted or some of the existing routes are deleted, the classical algorithms cannot compensate for this situation without restarting the algorithm. The proposed evolutionary method considers multi-objectives and compensates for dynamic conditions by utilizing evolutionary operators and by implementing the problem-specific fitness function. The proposed evolutionary navigation planning approach reduces the number of operations in dynamic environments, because it does not restart the solution at each update, and it trends to extend best-fit individuals into the new generations. Dynamic path planning algorithms such as the algorithms suggested by Frigioni, Franciosa and Ramalingam have been used in dynamic environments. However these algorithms are quite inefficient because of computation time, when several concurrent changes occur in the environment simultaneously. These algorithms fail to reach the actual underlying average solution when the segment costs and conditions change stochastically and continuously. These algorithms run when the costs of the links in the graph are fixed for the course of a single computation. However, in a flight plan scenario, the altitude of the paths and the security of the links may approximately be known. Therefore any algorithm that would be proposed is expected to work with uncertain graphs. The proposed algorithm provides advanced search speed, quality and flexibility in dynamic schemes.

The flight planning subsystem takes latitude, longitude and altitude information of waypoints as an input. Latitude is the angular distance of a point on the earth's surface to the equatorial plane, measured from the center of the sphere. Longitude is a geographic coordinate that specifies the east-west position of a point on the Earth's surface. Altitude is the angular distance, usually in the vertical direction, between a reference datum and a point or object. The longitude and latitude components specify the position of any location on the planet. A flight leg is a route between two combined waypoints. The constraints of the flight leg are defined as a vector which consists of the distance, the security value and the altitude of the flight leg. In the flight planning subsystem we used an evolutionary approach. In the proposed evolutionary approach, in order to represent the routes, variable-length chromosomes are used. Chromosomes are encoded by permutation encoding method. Each gene of a chromosome represents a node on the graph, and all genes show the whole path on the graph. The qualities of the individuals are determined by the fitness function. A general fitness function is developed in order to meet all the constraints. Chromosomes are arranged in decreasing order according to the fitness values. In order to increase the quality of the population, a selection operator which raises the chance of the better fit individuals, is used in the proposed algorithm. The selection operator, forces to search the solution within the determined locations of the search space. For the selection process, the roulette wheel selection technique is used in the proposed algorithm, in order to save the better-fit individuals for the next generation,

and in order to avoid from statistical errors caused by sampling, the roulette wheel selection technique is used for selection. According to the roulette wheel selection technique, the fitness values of all individuals are added. The selection probability of an individual is found by dividing the fitness value to the overall value. During the crossover phase, the genes beyond the crossover site are exchanged between parent chromosomes. Probable crossover sites are the regions where the genes of the parent chromosomes are identical. If the parents have no identical pair of genes, the crossover operator cannot be applied. If there is more than one identical pair of genes, one of the pairs is chosen randomly. Crossover may generate infeasible chromosomes that violate the loop constraint and may form individual chromosomes with cycles. The algorithm runs a post-processing operation and removes the cycles from the individual.

Navigation planning requires a flight plan check against fuel consumption. Minimum fuel consumption is also an important constraint considering two probable objectives; economical gain and extending the range of air vehicle. Flow rate estimation is a known approach in flight planning. Fuel flow can be defined accurately as a function of air temperature, flight altitude, true airspeed and gross weight for each different type of air vehicle. In the designed navigation system, the flight plan is checked for fuel consumption prior to passing the flight plan to the guidance subsystem. The guidance subsystem provides lateral and vertical guidance algorithms that provide passing through the flight legs and desired route in a real-time environment. The lateral guidance function provides roll angle commands to maintain the heading. The vertical guidance function generates an altitude error signal from a reference altitude and provides a pitch angle command, which allows the autopilot to maintain altitude. Real-time flight data is taken from the Aerosim flight simulator. AeroSim simulator provides a complete set of tools for developing nonlinear 6-degree-of-freedom aircraft dynamic models. The parameters like initial position, wind speed, initial velocity, initial altitude, initial engine speed, and sample time can be modified at the beginning of the navigation simulation. Mission execution subsystem uses real-time data provided by Aerosim in order to calculate pitch and bank angle commands that feed the pilot. The guidance subsystem provides pitch, roll and attitude commands based on data from the simulation environment, including attitude, heading, ground speed, altitude and pilot inputs. When a deviation from the flight plan occurs, the pitch and bank angle commands are calculated in order to fit the desired flight leg. Beside this, when the route switching points are reached, these angles are again calculated in order to put the air vehicle in the next flight route.





## 1. GİRİŞ

Çeşitli kısıtların sağlanması gereken bir durumda, bir başlangıç noktasından bir hedef noktasına en etkin hareketin bulunması şeklinde tanımlanan yol planlama problemi, birçok alanda değişik şekillerde karşılaşılan bir problemdir. Bir hava aracının bir uçuş başlangıç noktasından iniş havaalanına kadar bir çizge yapısı üzerinde yönlendirilmesi de bu problemlerden biridir. Yol planlama problemi sanal ortamda iki nokta arasındaki intikali temsil etmektedir ve uygulandığı alana göre çeşitli kısıtlar içerebilmektedir. İki nokta arasındaki intikalin, en az eğimli yolu kullanarak, en az yakıtı sarf ederek, en az teçhizatla veya en kısa mesafeli yolu kullanarak yapılması istenebilir. Uygulamalarda çoğunlukla mesafe ölçütü ile karşılaşılmaktadır. Seçilecek ölçüt uygulama alanına göre farklılık gösterir. En kısa mesafeye sahip yolun bulunması en kısa yol problemi olarak isimlendirilmektedir. Yol planlama problemi için bir yol haritası kullanıldığında, haritada belirtilen yolların yardımıyla bir şehirden diğer şehirlere ara yollar tanımlanır. Yol planlama problemlerinin çözümünde çizgeler için, bağlantılı listeler, ağaçlar, komşuluk matrisler gibi veri yapıları kullanılır [1]. Çizge, matematiksel anlamda, düğümlerden ve bu düğümler arasındaki ilişkiyi gösteren kenarlardan oluşan bir kümedir. Mantıksal ilişki, düğüm ile düğüm veya düğüm ile kenar arasında kurulur.

Standart tek kaynaklı yol planlama problemi için geliştirilen algoritmaların en çok kullanılanları Dijkstra [2], Floyd [3], Yapay Sinir Ağları (YSA) [4], sürü zekâsı [5], Karınca Kolonisi Algoritması (KKA) [6] gibi yöntemlerdir. Uçuş planlaması gibi problemin kısıtlarının gerçek zamanlı olduğu çoklu eniyileme problemlerinde, bu yöntemler yetersiz kalmaktadır. Yoldaki düğüm noktaları arasında, maliyeti dinamik değişebilen güvenlik katsayısı gibi değerlerin bulunması, düğüm veya kenarların eklenip çıkarılması durumunda bu algoritmaların işlem süreleri arttığından performansları düşmektedir. Evrimsel yöntemler ise çok ölçütlü uygunluk fonksiyonu ve seyrüsefer planlamaya ilişkin özgün genetik operatörleri sayesinde, mesafe, güvenlik ve yüksekliği hesaba katabilmekte, dinamik değişen ortam şartları için problemin çözümüne uygun bir yaklaşım sunabilmektedir [7].

Eniyileme, verilen amaç veya amaçlar için belirli kısıtlamaların sağlanarak en uygun çözümün elde edilmesi sürecidir. Eniyileme problemlerinin çözümü için model arayışları sonucunda öncelikle doğrusal ve az sayıda değişkenin kullanıldığı matematiksel modellemeler oluşturulsa da bunun her problem için geçerli olmadığı anlaşılmış ve doğrusal olmayan modellemeye gidilmiştir. Bu noktada, evrim kuramındaki en iyinin korunması ve doğal seçim stratejileri kullanan evrimsel algoritmalar geliştirilmiştir. Evrimsel algoritmalar olan genetik algoritmalar, geleneksel yöntemlerle çözümü zor veya imkânsız olan problemlerin çözümünde sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır. Genetik algoritmalarda optimize edilecek amaç veya amaçlar sanal olarak evrimden geçirilerek olası çözümler kümesinden en iyi çözüm veya çözümler elde edilmeye çalışılır. Tek amaç optimize edilecekse, problem tek-amaçlı eniyilemedir. Eğer birden fazla amaç optimize edilecekse, problem çok-amaçlı olarak formüleleştirilebilir. Tek-amaçlı eniyileme ve çok-amaçlı eniyileme birbirinden farklıdır. Tek-amaçlı eniyilemede en iyi olan tek bir çözüm aranırken, çok-amaçlı eniyilemede tüm amaçlara göre en iyi olan tek bir çözüm mevcut olmayabilir. Bu çalışmada çok amaçlı seyrüsefer planlama ve güdümlenme problemi için çok amacın tek amaca indirgenmesiyle yeni bir çözüm sunulmuştur.

Uzunluk ölçütü, kalkış ve varış noktaları arası yatay mesafenin eniyilemesi için kullanılmıştır. Güvenlik ölçütü, kalkış ve varış noktaları arasında yolların tehditlerden ne kadar uzak olduğunu gösteren askeri güvenlik değerinin eniyilemesi için kullanılmıştır. Yüzdelerle ifade edilen güvenlik parametresinin değerinin sıfıra doğru inişi uçuş bacağındaki tehditlerin arttığı anlamına gelir. Güvenlik parametresi değerinin yüze doğru çıkışı ise uçuş bacağındaki tehditlerin azaldığı anlamına gelir. Yükseklik farkı ölçütü ise kalkış ve varış noktaları arasındaki dikeyde gidilen mesafenin eniyilemesi için kullanılmıştır.

Bu çalışmada dinamik yol planlama sistemlerinde diğer yaklaşımlar kullanıldığında ortaya çıkan eksikliklerin giderilmesi için problem gerçek zaman kısıtları altında evrimsel teknikler ile çözülmüş ve çözümün başarımı diğer algoritmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistemin savunma sanayi alanında atak helikopteri için seyrüsefer planlaması problemindeki uygulamaları gösterilmiş ve uçuş benzetimleri yapılmıştır.

Kalkış, varış ve ara geçiş noktaları çizgeye uyarlanmakta ve şehir haritası oluşturulmaktadır. Nesnenin uçan bir nesne olması durumu için yükseklik değeri de

önem kazanacağından, üç boyutlu şehir haritaları kullanılmıştır. Uçuş irtifası değerine göre hava aracının güvenli sayılabilecek yükseklikte uçuş yapılabilmesi sağlanmıştır. Tam dinamik eniyileme yapıldığından, iki nokta arasındaki yol parçası üzerinde iken koşulların değişimi nedeniyle yeni bir rotaya geçiş yapılması gerektiğinde üzerinde bulunulan noktadan yeni rotanın ilk noktasına çevrimiçi olarak dinamik yönlendirme yapılabilmektedir. Uçuş planında rota değiştirme noktalarında platformun yeteneklerine göre yumuşatmalar sağlanmıştır.

Çizgeyi oluşturan bazı alt düğümlerin gruplanarak alt çizgelerin oluşturulmasına olanak sağlanmıştır. Böylelikle intikalin gerektiğinde noktadan noktaya, gerektiğinde bölgeden noktaya, noktadan bölgeye veya iki bölge arası planlanması sağlanmıştır. Karmaşık, yoğun bir çizge topolojisinde, özellikle bağlantı sayısı fazla ise üzerinden geçilmesi gereken bazı ara noktalar varsa tek bir intikal planı yerine parçalı intikal yapılabilmektedir. Uçuş esnasında çizge üzerindeki bazı noktaların belirli bir mesafe yakınından geçmenin yeterli olacağı durumlar için yaklaşma menzili değeri tanımlanabilmektedir. Geliştirilen uçuş planı koşturma algoritması, uçuş noktasına rota değiştirme mesafesi kadar yakınlaştığında rotayı güncelleyebilme özelliğine sahiptir.

Tez çalışması giriş bölümü ile birlikte yedi bölümden oluşmaktadır. İkinci bölümde sezgisel algoritmalar, evrimsel yöntemler ve genetik algoritmalar anlatılmıştır. Üçüncü bölümde geliştirilen seyrüsefer planlama sistemin alt sistemleri, alt sistemler arası bilgi akışları, evrimsel uçuş planlama alt sistemi ve çok amaçlı uçuş planlama probleminin çözümü için geliştirilen evrimsel algoritma ve operatörleri anlatılmıştır. Bu bölümde çok amaçlı eniyilemede kullanılan uygunluk fonksiyonu detaylı olarak açıklanmıştır. Dördüncü bölümde uçuş planı koşturma alt sisteminde geliştirilen güdümlenme algoritmaları anlatılmıştır. Sistem bir atak helikopterindeki görev planlamada kullanılmak üzere tasarlandığından, atak helikopterine özgü atak ve arama-kurtarma kalıplarını çalıştırabilme özelliğine sahiptir. Beşinci bölümde gerçek zamanlı seyrüsefer verileri üreten Aerosim simülatörü üzerinde, planlanan uçuşun güdümlenme algoritmalarıyla nasıl gerçekleştirildiği anlatılmıştır ve uçuş planı yürütme için örnek senaryolar sunulmuştur. Altıncı bölümde örnek bir şehir haritası için dinamik intikal senaryoları gösterilmiş ve algoritmanın dinamik seyir planlama yöntemi için diğer yöntemlerden daha iyi bir çözümü nasıl sağladığı anlatılmıştır. Son bölüm olan sonuç bölümünde, çalışmada gelinen nokta tekrar gözden geçirilmiş,

tezde geliştirilen seyrüsefer planlama sisteminin diğer yöntemlerle karşılaştırılması yapılmış ve gelecekte bu çalışmanın devamı olarak yapılabilecek çalışmalar sunulmuştur.

## **1.1 Tezin Amacı ve Motivasyon**

Tez çalışmasında dinamik yol planlama probleminin, seyrüsefer planlama problemindeki uygulaması amaçlanmıştır. Enlem, boylam ve yükseklik bilgileri verilen uçuş noktaları için, yine uzunluk ve güvenlik bilgileri verilen uçuş bacaklarının kullanımıyla, kalkış ve varış noktaları arası, en kısa, en düz, en güvenilir yoldan uçuş planlaması ve uçuş planının geliştirilen güdümlene yöntemi ile icra edilmesi amaçlanmıştır.

Standart uçuş planlama probleminin çözümünde karmaşıklığı belirli çeşitli analitik algoritmalar ve sezgisel yöntemler kullanılabilir. Fakat dinamik rota planlama probleminde, uçuş hattı üzerindeki her uçuş bacağının maliyeti farklı olabilir. Bazı uçuş bacakları uzunluk ve yükseklik ölçülerinden dolayı tercih edilmeyeceği gibi, bazı bağlantılar güvenlik nedeniyle kullanılmak istenmeyebilir. Ayrıca uçuş hattı üzerinde uçuş esnasında çevrimiçi olarak bazı bağlantılar kopabilir. Bu durumda çizge ve bağlantılar değişeceğinden, problem verileri yenilenmiş haliyle tekrar çözülmek durumundadır. Dinamik eniyileme probleminin verileri ve girdileri zamanla değiştiğinden, her seferinde çözüme baştan başlamak yerine, bu çalışmada olduğu gibi, sezgisel algoritmanın üretim döngüsü ve amaç fonksiyonu kullanılarak çözüme arama uzayında kalınan noktadan devam edilmesi sağlanabilir.

Bu çalışmada, diğer analitik ve sezgisel yol planlama yaklaşımlar kullanıldığında ortaya çıkan eksikliklerin giderilmesi için, problem gerçek zaman kısıtları altında analitik ve evrimsel yöntemlerin birleşimiyle çözülmüş ve çözümün başarımı diğer algoritmalarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Sistemin savunma sanayi alanında dinamik hava aracı seyir planlama benzetimleri yapılmıştır.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Evrimsel algoritmaların dinamik ortamlarda yol planlama probleminin farklı türlerindeki başarımı üzerine birçok çalışma yapılmıştır. Evrimsel algoritmanın bu ortamlarda nasıl düzgün çalışabildiği üzerine araştırmalar yapılmış olmasına karşın,

evrimsel algoritmanın dinamik ortamlardaki davranışı fazla anlaşılammıştır. Esasında problem, araştırmacıların belirli bir problemin çözümlünü incelerken evrimsel algoritmanın performansı ile ilgilenmeleri, sadece başarımını ve deneysel sonuçlarını raporlamaları, fakat nasıl düzgün çalıştığı ile ilgilenmemeleridir.

Statik, yarı dinamik ve tam dinamik yol planlama problemi ile farklı alanlarda farklı şekillerde karşılaşılmaktadır. Bilgisayar ağlarında, özellikle enerji kısıdı olan kablosuz sensör ağlarında, enerji korunumu sağlamak amacıyla, veri paketlerinin en az sensör kullanılarak hedef noktaya taşınması gerekmektedir. Bu da en kısa mesafeli rotanın bulunması ile mümkündür. Robotların verilen göreve bağı olarak en kısa yol ile hedefe ulaşması, en kısa yol probleminin çözümü ile mümkün olmaktadır. Harp benzetimlerinde özellikle sanal kuvvetlerin üç boyutlu ortamda belli bir hedef noktaya en kısa yolla ulaşımı yine aynı problemin çözümü gerektirmektedir. Strateji oyunlarında, sanal karakterlerin hareketleri ve belli hedef noktalara ulaşım için de yol planlama sistemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Rota planlama problemi ve güdümlene için tasarlanan çözümlerin literatür özeti aşağıda sunulmuştur. Bölüm 1.2.1’de uçuş planlama probleminin çözümü konusunda yapılan çalışmalar, Bölüm 1.2.2’de ise uçuş planı koşturma ve güdümlene ile ilgili literatürdeki çalışmalar tanıtılmıştır.

### **1.2.1 Literatürdeki rota planlama çalışmaları**

Nikolos, insansız hava araçları için üç boyutlu yol planlama çalışması yapmıştır. [8]. Bu çalışmada evrimsel algoritmaları kullanarak, yeryüzü kısıtlarının olduğu, üç boyutlu bir ortamda, istenen özelliklere göre yol eğrisi hesaplanmıştır. Bu çalışmada varılan önemli sonuçlardan biri yolun doğru parçaları şeklinde olmasından ziyade eğri şeklinde olmasının daha iyi sonuçlar ürettiğidir. Tez kapsamında ele alınan uçuş planlama sisteminde, geçiş noktaları ve dönüşler için yumuşatmalarda eğri şeklinde bir rota izlenmektedir, fakat parçalı intikal gereğince uçuş bacakları arasında doğru parçası olarak düşünülen yol parçaları söz konusudur. Bu nedenle Nikolos’un yapmış olduğu çalışma, dinamik rota planlaması probleminin çözümünde yetersiz kalmaktadır.

Sudip Misra, dinamik tek kaynaklı en kısa yol problemi için öğrenen otomata çözümünü geliştirmiştir [9]. Kenar ağırlıklarında güncellemelerin yapıldığı, tek kaynaklı istatistiksel bir çizge topolojisinde en kısa yol bulunmuştur. İşlem yapılan

düğüm, kenar ve her güncelleme için işlem zamanı göz önüne alındığında bu algoritmanın mevcut diğer evrimsel algoritmalarından daha iyi bir çözüm sağladığı deneysel olarak gösterilmiştir. Fakat bu çalışmada çizge yapısından bir uçuş noktasının çıkarılması durumu göz önüne alınmamıştır. Savaş senaryosu durumunda bir atak helikopterin uçuş intikali düşünüldüğünde güvenlik ölçütü nedeniyle bazı uçuş noktalarının çizge yapısından çıkarılması gerekebilmektedir.

Qing Li, gezici robotların yol planlama problemi için evrimsel bir çözüm yöntemi geliştirmiştir [10]. Yol bulmada etkinliği arttırmak için başlangıç nüfusunun üretilmesinde engelden kaçınma algoritması tasarlanmıştır. Gezgin robotların yol planlaması probleminin çözümünde, bilgi tabanlı sezgisel çaprazlama, mutasyon, arıtma ve silme operatörleri probleme özgü tasarlanmıştır. Robotlara özgü olarak hız ve ivme sınırı, minimum dönüş yarıçapı gibi bazı ölçütler değerlendirilmiştir. Bu çalışmada yolun toplam uzunluğu ana ölçüt olarak alınmıştır. Tasarlanan operatörler robotik yol bulma problemine özgü olduğundan, uçuş planlaması ve seyrüsefer senaryoları için yetersiz kalmaktadır.

Jianping Tu, gezgin robotlar için yol planlaması probleminin yeni bir genetik algoritma çözümü önermiştir [11]. İki boyutlu ayrık gride dönüştürülmüş bir ortamda, gezgin robotun, konumu tanımlanan hedefe, yine konumları bilinen engellerin bulunduğu ortamda seyir problemi çözülmüştür. Yol planlaması, robotun hareketindeki hız ve ivme sınırları ve yolun eğrilik derecesi gibi koşullara göre yapılmıştır. Bu çalışmada sabit uzunluklu kromozomlar ile problem çözülmüştür, fakat sabit uzunluklu kromozom, dinamik ortamlar için uygun değildir. Özellikle uçuş intikali gibi, güvenlik ölçütü nedeniyle çizge topolojisindeki uçuş noktası sayısının değiştiği bir problem için, sabit uzunluklu kromozomlarla intikal planlaması yapılamayacağından bu yöntem problemin çözümünde yetersiz kalmaktadır.

Wu Wei, en kısa yol probleminin çözümü için yeni bir genetik algoritma tasarlamıştır [12]. Geliştirilen genetik algoritma hem yönlü hem de yönsüz çizgeler için, karmaşık ağ yapısındaki problemleri çözebilmiştir. Çevrimli yol üreten bireylerin engellenmesi sağlanmıştır. Bu yöntem uygunluk fonksiyonunun tasarımında yolların sadece uzunluk değerlerini göz önüne aldığından, çok kısıtlı ortamlar için kullanılamaz.

Ahmed Elshamli, rastlantısal mobil robot ortamları için yol planlama probleminin çözümüne genetik algoritma yaklaşımı geliştirmiştir [13]. Genetik algoritma planlayıcısında, değişken evrimsel operatörler kullanılmıştır. Problemdeki tüm amaçları bağlamak amacıyla genel bir uygunluk fonksiyonu tasarlanmıştır. Yol planlama probleminin bu türü, imalat ve taşımacılık gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Dinamik ortamı modellemek için belirli bir zaman aşımı süresi dolduğunda ortama yeni bir engel eklenmiştir. Tasarlanan sistemde güvenlik ölçütü nedeniyle bir yol parçasının uygunluğunun azalması, artması gibi durumların çözümü başarılammakta ve sistem üç boyutlu şehir haritası kullanımına olanak sağlamamaktadır. Bu nedenlerle tasarlanan yaklaşım, uçuş intikali probleminin çözümünde kullanılamaz.

Munemoto, kablosuz sensör ağlarda kullanılan, evrimsel bir yönlendirme algoritması geliştirmiştir [14]. Tasarlanan evrimsel algoritmada, sabit uzunluklu kromozomlar ile ortak noktalı rotalarda çaprazlama yapılmıştır. Mutasyon aşamasında, yol üzerinde rastgele seçilen bir düğüm, bağlantılarından biri ile yer değiştirir. Fakat bu yolun uygun olabilmesi için bağlantı noktasından hedefe kadar yeni bir yol planlaması yapılması gerektiğinden maliyetlidir. Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin tasarımı gereği algoritma çok bireyli, büyük nüfuslar için iyi sonuç üretebilir. Fakat gerçek zamanlı sistemlerde algoritma performansı açısından Dijkstra algoritmasına üstünlük sağlayamamıştır.

Liu ve Wang'in çalışmasında, YSA'nın gelişiminde kullanılan en kısa yol problemi için bir algoritma önerilmiştir [15]. Bu algoritmanın tekrar beslemeli sinir ağlarında kullanılması öngörülmüştür. Bu algoritmada yapılan işlem, olasılıklı azalan gürültünün tekrar beslemeli sinir ağlarına eklenmesidir. Ayrıca enerji fonksiyonu değiştirilmiştir. Fakat geliştirilen algoritmada yolun güvenilirliği düşünülmemiş ve uçuş sistemi için gerekli irtifa ve yakıt eniyilemesi yapılmamıştır.

Gen ve Lin'in çalışmasında, en kısa yol probleminin çözümü için rastgele anahtar tabanlı şifreleme ile yeni yol üretme kullanan bir genetik algoritma yaklaşımı sunulmuştur [16]. Ayrıca aritmetik çaprazlama, mutasyon ve geçiş operatörü aracılığıyla bir birleşik algoritma geliştirilmiştir. En kısa yol problemi için yapılan sayısal analiz sonucu elde edilen veriler, önerilen rastgele anahtar tabanlı genetik algoritma yaklaşımının daha yüksek arama kapasitesine sahip olduğunu ve hesaplama zamanını geliştirdiğini göstermiştir.

Lin, Gen ve Cheng'in çalışmasında, OSPF metodundaki en kısa yol problemi için genetik algoritma yaklaşımı sunulmuştur [17]. Önerilen yöntem, ağda bir yol bulabilmek için öncelik tabanlı şifreleme metodunu kullanmıştır. Paketler kaynaktan hedefe doğru bir protokol aracılığıyla ağ yolları üzerinden gönderilmektedir. Ağda paket yönlendirme probleminin çözümü için tasarlandığından seyrüsefer planlama probleminin çözümünde yetersiz kalmaktadır.

Cai, Kloks ve Wong tarafından yapılan çalışmada farklı bekleme zamanları için en kısa yol probleminin çözümü araştırılmıştır [18]. Rastgele bekleme zamanı, sıfır bekleme zamanı, sınırlandırılmış bekleme zamanı olmak üzere üç tane değişik durum incelenmiştir ve sahte polinom algoritmaları bu üç durum için önerilmiştir. Geliştirilen algoritma kenarların güvenlik değerlerini değerlendirmedikten seyrüsefer planlama için uygun değildir.

Orda ve Rom tarafından yapılan çalışmada yol maliyetleri ve zamana bağlı gecikmeler göz önüne alınarak en kısa yol probleminin çözümü için bir algoritma geliştirilmiştir [19]. Geliştirilen algoritma düğüm eklenmesi ve düğüm silinmesi durumları için çözüm üretmediğinden seyrüsefer planlama için uygun değildir.

Cooke ve Halsey tarafından yapılan çalışmada, Bellman algoritması düzenlenerek iki düğüm arasındaki en kısa yol problemi araştırılmıştır [20]. Planlama aşamasındaki algoritmanın, tezde geliştirilen yönteme göre işlem karmaşıklığı daha fazla olduğundan dinamik rota planlama için etkin değildir.

Chabrier'in çalışmasında araç yönlendirme problemi için kullanılan sütun oluşturma modelinde giriş düzeyde en kısa yol probleminin çözümü için bir yaklaşım sunulmuştur [21]. Arama ağacı yapısında daha az sınırlama ve budama elde edilmiştir. Geliştirilen sistemde yakıt eniyilemesi ve yakıt analizi yapılmadığından uçuş planı çalıştırmada kullanılamaz.

Çınar'ın çalışmasında, otonom bir robotun laboratuvar ortamında gezinebilmesi için bir yöntem geliştirilmiştir [22]. Robotun ziyaret edeceği noktalar ve bu noktalar arasındaki bağlantı ve mesafeler bilindiğinde, A-Star algoritması kullanılarak robotun izleyeceği yol planlanmıştır. Robotun planlanan yolu takip etmesi ve yolda çıkabilecek engelleri aşması için potansiyel alan yaklaşımı kullanılarak robotun hareketi planlanmıştır. Potansiyel alan yöntemleri, planlanan yolun takibini ve yerleri önceden bilinmeyen engellerden sakınmayı sağlamıştır. Bu çalışmada geliştirilen



yöntemin, robotik yol planlama için tasarlanmış olması nedeniyle, seyrüsefer planlamasında kullanılan yükseklik farkı ve güvenlik ölçütlerini değerlendirmemektedir.

Dener ve arkadaşlarının çalışmasında, en kısa yol probleminin çözümü için, GA tabanlı bir algoritma geliştirilmiştir [23]. Geliştirilen algoritma zamana bağlı dinamik değişen yol maliyetlerine sahip bir çizge üzerinde en kısa yol probleminin çözümü için uygulanmıştır. Gerçek bir uygulama olması için bir bölgenin trafik akışı modellenmiştir. Geliştirilen algoritmayla elde edilen sonuçlar literatürde yer alan Dijkstra ve Wook algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçlarından geliştirilen algoritmanın zamana bağlı dinamik değişen yol maliyetleri kullanıldığında daha kısa sürede, daha düşük maliyetli bir yol bulunduğunu göstermiştir. Bu algoritma, kenar ağırlıklarının istatistiksel değiştiği durumlar için çözüm sunamamaktadır.

Dinamik intikal planlama probleminin bilinen üç çözümü; Ramalingam Reps [24], Franciosa [25], ve Frigioni çözümleridir [26]. Tam dinamik tek kaynaklı en kısa yol probleminin ilk çözümlerinden biri olan Ramalingam Reps dinamik değişimlerde çözüme baştan başlamadan sonuç üretebilmektedir [24]. Çizgeye yeni bağlantı ekleme ve bağlantı silme işlemlerinde bağlantının uzunluk değeri güncellenmektedir. Yeni eklenen bağlantı için uzunluk değeri sonsuzdan tanımlı bir değere çekilir, silinen bağlantıların uzunluk değerleri sonsuza eşitlenerek çözüme devam edilebilir. Fakat Ramalingam Reps yöntemi sadece yolun uzunluğunu hesaba katarak işlem yaptığı için seyrüsefer planlamasında kullanılamaz, sadece tek kaynaklı en kısa yol problemi için Dijkstra'nın uyarlanmış bir hali olarak düşünülebilir.

Franciosa tarafından geliştirilen çözüm kullanılamaz hale gelen bir düğümün daha sonra sisteme tekrar eklenebilme durumunu gözetmemiştir [25]. Franciosa yöntemi yarı dinamik bir algoritma olduğu için tam dinamik seyrüsefer planlamasında yetersiz kalır.

Frigioni yönteminde de bağlantı değerlerindeki her artış veya düşüş durumu için, bu değişiklikten etkilenen düğüm noktalarının kaynaktan uzunluğu hesaplanarak işleme devam edilir [26]. Frigioni yöntemi de Ramalingam Reps'e benzer şekilde uçuş planlaması için özelleşmediğinden sadece klasik dinamik en kısa yol çözümünde kullanılabilir.

Mevcut dinamik yol planlama algoritmaları, topolojideki eş zamanlı değişimlere duyarlı değildir, yani herhangi bir anda sadece tek bir değişim olan durumlarda başarılı olarak çalışmaktadır, fakat çevrede eş zamanlı birçok değişim olduğunda bu algoritmalar çözüm üretememektedir. Kenar ağırlıklarının istatistiksel olarak ve sürekli değiştiği senaryolar için mevcut algoritmaların başarımı iyi değildir. Büyük topolojilerde, düğüm ve bağlantı sayılarının çok olduğu ağlarda, eş zamanlı birçok değişikliğin olduğu durumlarda, zaman ölçütü de var ise mevcut algoritmaların kullanımını uygun değildir.

Bu ve benzeri senaryolar, dinamik algoritmaların koşmasını gerektiren ortamlar olduğundan mevcut çözümler sınırlı olarak kullanılabilir. Reel ağırlıklı bir çizge topolojisi için, birden fazla bağlantıdaki maliyet değerlerinin aynı anda istatistiksel olarak değiştiği durumlar için, her değişiklikte baştan çözüm yapmaya başlamadan sonuç üretebilen dinamik bir algoritma yoktur.

Tezde özgün olarak tasarlanan evrimsel uçuş planlama alt sisteminin bilimsel katkıları şunlardır;

- Eş zamanlı maliyet değişimlerinin olduğu dinamik ortamlar için mevcut planlama algoritmalarına göre daha etkindir.
- Geliştirilen evrimsel algoritmanın, çaprazlama, mutasyon, çevrim temizleme, seçim operatörleri ve uygunluk fonksiyonu seyrüsefer planlama probleminin gereksinimlerine göre özgün olarak tasarlanmıştır.
- Tezde geliştirilen uçuş planlama algoritmasında, güvenlik, uçuş yolu uzunluğu ve uçuş yolu üzerindeki dikey seyir değişimi değerlendirilerek hava aracı için en uygun rota bulunmuştur.
- Çizge yapısında üzerinden geçilmek istenen ara noktaların verildiği bir durumda parçalı intikal planlaması yapılabilmektedir.

### **1.2.2 Literatürdeki güdümlenme ve insansız hava aracı çalışmaları**

Boskovic tarafından yapılan çalışmada, insansız hava araçlarında akıllı karar verme mimarisi üç ana katmana ayrılmaktadır [27]. İlk katmanda yer alan çalışmalar uçuş sırasında oluşabilecek hataların en aza indirilmesini ve giderilmesini hedefler. İkinci katmandaki çalışmalar havacılık alanındadır. Bu çalışmaların ana hedefi uçağın üç boyutlu uzayda anlık hareketlerini planlamaktır. Üçüncü katmanda yer alan

çalışmalar ise otonom güzergâh planlama üzerinedir. Ancak, geliştirilen model, atak helikopterinin göreve özel uçuş kalıpları ile ilgili bir seyrüsefer çözümü sağlamamaktadır.

Wu, Campbell, Duncan ve Merz tarafından yapılan çalışmada, İHA'ların sivil amaçlarla kullanılabilmesini sağlayacak gerçek zamanlı ve çok ölçütlü güzergâh planlama yaklaşımı sunulmuştur [28]. Ancak bu çalışmada uçuş noktalarına tahmini varış süreleri ve zaman bazlı seyrüseferde tanımlanan gerekli yer hızı hesaplamaları yapılmamıştır. Ayrıca emniyet irtifaları ve emniyetli uçuş bölgeleri göz önüne alınmamıştır.

Qi üç boyutlu ortamda insansız hava araçları için sezgisel bir yol planlama sistemi geliştirmiştir [29]. Fakat çalışmada rota irtifa ayrımları, rüzgâr hızı etkisi gibi faktörler düşünülmemiştir.

Kim'in geliştirdiği otonom insansız hava aracı yol planlama sisteminde gerçek zaman kısıtları dikkate alınarak eniyileme yapılmıştır [30]. Modelde yakıt eniyilemesi yapılmamıştır. Ayrıca model, rüzgâr hızı etkileri, uçuş planından paralel sapma ve göreve özel uçuş kalıplarının icrası konularında yetersiz kalmıştır.

Pfeiffer, tehdit bölgelerinin varlığında, insansız hava araçları için istatistiksel bir yol planlama yöntemi geliştirmiştir [31]. Hedefe belli bir sürede gidilmek istendiğinde tehdit bölgeleri tanımlanabilmektedir. Geliştirilen modelde intikal haritasında yeni uçuş noktası ekleme ve düğüm silme işlemleri için çözüm sunulmamıştır.

Hasırcıoğlu ve arkadaşlarının çalışmasında, geliştirilen üç boyutlu sentetik arazi insansız hava araçlarının rota planlamasında kullanılmıştır [32]. Geliştirilen çevrimdışı planlayıcı, genetik algoritma ve sezgisel teknikleri kullanmaktadır. Çevrimdışı çok amaçlı rota planlaması, belirtilen tehdit bölgelerinden uzaklaşılabilmesini, kısıtlı arazinin üzerinde minimum ve maksimum mesafeler içinde kalınabilmesini sağlamaktadır. Manevralar B-Spline eğrisi tekniği kullanılarak yapılmıştır. Atak helikopterine özgün bir çözüm sağlamadığından göreve özel uçuş kalıplarının icrası yapılmamıştır.

Pakkan ve Ermiş'in çalışmasında, insansız hava araçlarının olası hedeflere çevrimdışı olarak görev planlanmasının, daha hızlı ve daha etkin şekilde yapılabilmesine yardımcı olabilecek genetik algoritma tabanlı bir çözüm yöntemi geliştirilmiştir [33]. Önerilen yeni genetik her bir İHA için uygun rotayı hesaplamaktadır. Çalışmada

rüzgâr hızı etkisi göz önüne alınmamış ve yakıt analizi yapılmamıştır. Ayrıca emniyet irtifaları ve emniyetli uçuş bölgeleri göz önüne alınmamıştır.

Tulum ve arkadaşlarının çalışmasında, insansız hava araçları için etmen tabanlı rota planlama yapılmıştır [34]. İki nokta arasında engellerden sıyrılarak hedefe ulaşılması amaçlanmıştır. Planlama aşamasında çok kriterli A\* algoritması kullanılmıştır. A\* algoritmasının işlem karmaşıklığı en kötü durum için  $O(N \cdot \log(N))$ 'dir. Statik ortamlar için performans açısından iyi bir sezgisel yöntem olmasına karşın, çok ölçütlü dinamik maliyetli uçuş bacakları için tezde geliştirilen yönteme göre işlem süresi daha fazla olduğundan etkin değildir.

Arıca ve arkadaşlarının çalışmasında, birden fazla sayıda İHA alt sistemleri modellenmiştir [35]. İHA alt sistemlerinden iletişim modülü, yükseklik-ölçer, GPS, radar, yakıt-ölçer vb. birçok alt sistem çeşitli ayrıntı seviyeleri ile modellenmiştir. İHA ile bir gemi arasındaki iletişim ile ilgili hususlar ön plan çıktığından özellikle iletişim modülü üzerinde çalışılmıştır. Geliştirilen modelde çok kısıtlı eniyileme yoktur, bu nedenle tezde çözümü yapılan tam dinamik çok kısıtlı rota planlaması için çözüm sağlamamaktadır.

Cicibaş ve arkadaşlarının çalışmasında, orta irtifalarda uçuş ve uzun havada kalış imkânına sahip insansız hava araçları için çok kriterli güzergâh planlama modeli geliştirilmiştir [36]. Önerilen modelde, insansız hava araçlarının uçuş kabiliyetleri, temel havacılık kuralları ve ortam dinamikleri dikkate alınarak, insansız hava araçları için, yakıt tüketimi ve mesafe açısından en uygun güzergâhlar planlanabilmektedir. Ayrıca model, uçuş öncesi ve uçuş esnasında güzergâh planlamalarının yapılabilmesine imkân tanımaktadır. Bu çalışmanın diğer güzergâh planlama çalışmalarından farkı, probleme özgü ortam faktörlerini de içine alan daha fazla sayıda planlama ölçütünün dikkate alınmasıdır. Arama algoritması olarak A\* algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada yatay ve dikey güdümlenme yapılmamıştır.

Bayraktar ve arkadaşlarının çalışmasında, bulanık mantık tabanlı otonom iniş gerçekleştirebilen bir İHA sistemi için simülasyon tasarımı değerlendirilmiştir [37]. İHA sisteminin, otonom iniş görevini yerine getirebilmesi için, gerekli görev bilgisayarı modellenmiştir. Çalışmanın amacı, otonom iniş esnasında karşılaşılabilecek hata durumlarında sistem operatörünün davranışlarının geliştirilmesi ve benzetim ortamında başarısının ölçülebilmesi için bir simülasyon ortamı sağlamaktır. Geliştirilen

simülâtör farklı tipte İHA sistemlerini modelleyebilecek nitelikte geliştirilmiştir. Fakat çalışmada uçuşun tüm evrelerini kapsayacak yetenekler geliştirilmemiştir.

Gencer ve arkadaşlarının çalışmasında insansız hava araçlarının rota planlaması için bir karar destek sistemi geliştirilmiştir [38]. Hava araçları için önemli bir faktör olan rüzgâr etkisi programa girilerek planlamaya dâhil edilebilmektedir. Çalışmadaki uçuş planlamaları dinamik değildir. Yani yapılan bir plan uygulanmakta iken ortaya çıkan yeni hedefler planlamaya dâhil edilememektedir. Bu çalışmada İHA'nın uçuş irtifaları planlamaya dâhil edilmemiştir.

Tezde özgün olarak tasarlanan güdümlenme alt sisteminin bilimsel katkıları şunlardır;

- Uçuş planı koşturma aşamasından önce, Sikorsky S70-A atak helikopterine özgü bir yakıt analizi gerçekleştirilmektedir.
- Geliştirilen yatay ve dikey güdüm algoritmaları ile istenen rotadan ve irtifadan mümkün olan en az sapma ile uçuş planının icrası sağlanmıştır.
- Güdümlenme alt sisteminde kullanılan altı serbestlik dereceli hava aracı dinamik modelinin değiştirilebilmesine olanak sağlanarak değişik sabit ve döner kanat platformları için çözüm üretebilmektedir.
- Yatay ve dikey güdümlenme algoritmaları ile normal uçuş planının dışında atak helikopteri için göreve özgü uçuş kalıpları ve arama kurtarma kalıplarının icrası gerçekleştirilebilmektedir.
- Güdümlenme algoritmalarının doğrulanmasında kullanılan Aerosim simülâtöründe rüzgâr hızı, yönü, uçuşa başlangıç noktası, başlangıç yer hızı ve başlangıç irtifası bilgilerinin değişimi ile farklı ortam şartları için en uygun çözümün üretilmesi sağlanmıştır.
- Geliştirilen güdümlenme algoritmalarında uçuş noktası değişimlerinde ve dönüşlerde platformun yeteneklerine göre yönlendirme yapılmıştır.



## 2. GENETİK ALGORİTMALAR

Çözüm uzayının çok büyük olduğu problemler için en iyi çözümün bulunması uzun zaman almaktadır. Bu nedenle, bu tür problemler için en iyiye yakın çözüm veren sezgisel tekniklerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Doğada var olan sistemleri ve olayları temel alarak oluşturulan eniyileme yöntemleri “sezgisel yöntemler” olarak isimlendirilir. Dinamik rota planlama gibi NP-karmaşık türü problemler için tasarlanan yöntemlerin birçoğu en iyiye veren çözüm metotları yerine sezgisel algoritmaların geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Sezgisel teknikler, makul zamanda iyi bir çözüme ulaşmak için problemdeki bilgiyi kullanırlar. Sezgisel teknikler, çözüm kurucu ve çözüm iyileştirici olmak üzere iki ayrı sınıfta incelenmektedirler. Çözüm kurucular çeşitli kuralları kullanarak problem için bir çözüm elde ederken çözüm iyileştiriciler, elde edilen bir başlangıç çözümünü bitirme koşulu sağlanıncaya kadar adım adım iyileştirmeye çalışırlar. Bilinen çözüm iyileştirici sezgiseller, bir problem için global en iyiye bulmada çok başarılı değildirler. Son yıllarda çözüm iyileştirici sezgisel teknikler sınıfında bulunan ve global en iyiye bulmada başarılı olan yeni teknikler geliştirilmiştir.

Meta, modern veya diğer adıyla ileri sezgisel yöntemler, tüm çözüm alanı yerine, en elverişli bölgelerinin detaylı aranmasını gerçekleştirmeye dayalı yöntemlerdir. Bazı araştırmacılara göre ileri sezgisel yöntemlerle üretilen çözümlerin kalitesi, klasik sezgisellerle elde edilenlere göre daha iyidir. İleri sezgisel teknikler, klasik sezgisel tekniklere göre performans üstünlüğü sağlamasına rağmen daha çok işlem gerektirmektedir. Cordeau ve arkadaşları, iyi bir sezgisel algoritmanın amaçlarını doğruluk, hız, basitlik ve esneklik olmak üzere dört başlık altında toplamışlardır [39]. Son dönemde yoğun olarak uygulama alanı bulan ileri sezgisel yöntemler aşağıda listelenmiştir;

1. Tavlama Benzetimi (TB): Bu algoritma, bir metalin soğuyarak ve donarak minimum enerjili kristal yapısına dönüşmesi ile daha genel bir sistemde minimumun araştırılması arasındaki benzerlikten yararlanır. TB'nin diğer yöntemlerle karşılaştırıldığında gözlemlenen en önemli avantajı, yerel

minimumdan kurtulabilme yeteneğidir. Yaklaşım, sadece amaç fonksiyonundaki iyileştirmelere bağlı olmayan, aynı zamanda bazı kötüleşmeleri de kabul eden bir rastlantı arama stratejisini benimser. Söz konusu aramada, ulaşılan yeni pozisyonda eğer amaç fonksiyonunda kötüleşme varsa bir kabul olasılığına bağlı olarak bu yeni noktaya gidilir veya bir önceki pozisyona geri dönülür.

2. Yasaklı (tabu) arama (YA): Bu algoritmada temel yaklaşım, son çözüme götüren adımın, dairesel hareketler yaratmasını engellemek için bir sonraki döngüde tekrarın yasaklanması veya cezalandırılmasıdır. Yasaklı arama yöntemi, kısmen benzer olaylarda rastlantılı işlemler gerçekleştirirken insan davranışının tutarsızlığa eğilimli olmasından esinlenmiştir. Algoritma, yerel minimuma doğru hareket ederek başlar. Daha önce yapılmış hareketlere tekrar dönüş yapmayı engellemek için yöntem, bir veya daha fazla tabu listesi tutar. Başlangıçta hedef, çözüm uzayında kaba araştırma yapmaktır. Aday konumlar belirlendikçe arama yerel en iyi çözümü üretmeye odaklanır.
3. Genetik Algoritma (GA): Genetik algoritmalar tüm sezgisel yaklaşımlar gibi rastlantısal aramaya dayanmaktadır. Bu tip algoritmalar temel olarak evrimsel sistemin doğal işleyişini, canlandırabilecek şekilde biçimlendirilmiştir. Bunların başında ilk kez Charles Darwin tarafından ortaya atılan en uygun olanın hayatta kalabilmesi prensibi gelmektedir. Zayıf bireyler, yeni bireyleri ya çok az üretebilecek kadar yaşarlar ya da hiç yeni bireyler oluşturmadan ölürlür. Ancak, daha güçlü olanlar daha uzun süre hayatta kalacaklarından, çok daha fazla yeni birey üretecek ve kendine benzer özelliklere sahip evlatları olacaktır. Başlangıçta rastlantı olarak belirlenmiş bireylerden bir toplum oluşturulur. Daha sonra birey çiftleri fonksiyon eniyilemesindeki performanslarına bağlı olarak bu havuzdan seçilir. Oluşan çocuklar ebeveynlerin yerini alırlar ve yeni bir nesil oluşur. Genetik algoritmalar nüfus boyutu, kuşak sayısı gibi bazı parametreler için araştırmacılara esnek kullanım imkânı vermesinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca, paralel algoritmaların kullanıldığı çözümlerde, işlem zamanında önemli kazanımlar elde edilmektedir.



4. Karınca Kolonisi Algoritması (KKA): KKA, karıncaların beslenme davranışlarından esinlenmiştir. Birçok karınca türünde, karıncalar yemek kaynağına gidip gelirler ve yere feromon denilen bir madde bırakırlar. Diğer karıncalar, feromonun varlığını algılayarak feromon yoğunluğuna göre hareket ederler. Böylece bir yoldaki mevcut feromon artar veya azalır. Kısa bir yol üzerinde karıncalar daha sık gidip geldiğinden, daha fazla feromon izi bırakırlar. Öte yandan uzun yollar üzerindeki feromon azalacağından, koloninin diğer karıncaları tarafından da takip edilmezler.
5. Yapay Sinir Ağları (YSA): YSA, beyin gibi biyolojik bir sinir sisteminden etkilenilerek ortaya atılmış olan bir bilgi işleme modelidir. Bu modelin en önemli parçası yeni bir bilgiyi işleme yapısıdır. Herhangi bir problemi çözmek için, çok yüksek sayıdaki birbiriyle etkileşimli parçacıklar ahenk içinde çalışarak bütünlük oluşturur. Yapay sinir ağlarının önemli unsurlarından bir tanesi de öğrenme sürecidir. Biyolojik sistemlerde öğrenme, nöronlar arasındaki sinaptik bağlantıların düzenlenmesi ve biçimlenmesi şeklinde gözlemlenmektedir. Benzer yaklaşım söz konusu YSA için de geçerlidir.
6. Parçacık Sürü Eniyilemesi (PSE): PSE, kuş sürülerinin davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir istatistiksel eniyileme tekniğidir. Algoritma, potansiyel çözümlerin oluşturduğu bir kümenin, belirli bir problemin uygun çözümüne yaklaşmak için evrime uğradığı nesil temelli bir algoritmadır. Bir eniyileme tekniği olarak amacı, belirli bir çözüm uzayında tanımlanmış bir fonksiyonun global en iyi noktasını bulmaktır.

## 2.1 Genetik Algoritmanın Özellikleri

Genetik algoritmalar, problemlere tek bir çözüm üretmek yerine farklı çözümlerden oluşan bir çözüm kümesi üretir. Böylelikle, arama uzayında aynı anda birçok nokta değerlendirilmekte ve sonuçta bütünsel çözüme ulaşma olasılığı yükselmektedir. Çözüm kümesindeki çözümler birbirinden tamamen bağımsızdır. Her biri çok boyutlu uzay üzerinde bir vektördür. Doğal adaptasyondan esinlenen GA'nın basit olarak iskeleti:

a) Bireyin bulunduğu ortamda hayatta kalmak için, kendi kendisini değiştirerek ortama uygun hale gelmesi,

b) Bu adaptasyon boyunca, yeni üretilecek nesillere, bu özellikler ile birlikte mümkün olabilecek daha çok değişim aktarılarak, bireylerin daha uyumlu hale getirilmesi olarak özetlenebilir.

Doğada geçerli olan en iyinin yaşaması kuralına dayanarak iyileşen çözümler üretir. İyinin ne olduğunu belirleyen bir uygunluk fonksiyonu ve yeni çözümler üretmek için yeniden kopyalama, değiştirme gibi operatörleri kullanır. Genetik algoritmaların bir diğer önemli özelliği de bir grup çözümle uğraşmasıdır. Bu sayede çok sayıda çözümün içinden iyileri seçilip kötülerini elenebilir. Genetik algoritmalarda çözümün uygunluğu onun seçilme şansını artırır ancak bunu garanti etmez. Seçim ilk grubun oluşturulması gibi rastgeledir, ancak bu rastgele seçimde seçilme olasılıklarını çözümlerin uygunluğu belirler. Genetik algoritmalar problemlerin çözümü için evrimsel süreci bilgisayar ortamında taklit ederler. Problem için olası pek çok çözümü temsil eden küme genetik algoritma terminolojisinde nüfus adını alır. Nüfuslar, kromozom veya birey adı verilen sayı dizilerinden oluşur. Birey içindeki her bir elemana gen adı verilir. Nüfustaki bireyler evrimsel süreç içinde genetik algoritma işlemcileri tarafından belirlenirler.

Problemin bireyler içindeki gösterimi problemden probleme farklılık gösterir. Genetik algoritmaların problemin çözümündeki başarısına karar vermedeki en önemli faktör, problemin çözümünü temsil eden bireylerin gösterimidir. Nüfus içindeki her bireyin problem için çözüm olup olmayacağına karar veren bir uygunluk fonksiyonu vardır. Uygunluk fonksiyonundan dönen değere göre yüksek değere sahip olan bireylere çoğalmaları için fırsat verilir. Bu bireyler çaprazlama işlemi sonunda çocuk adı verilen yeni bireyler üretirler. Çocuk kendisini meydana getiren ebeveynlerin özelliklerini taşır. Yeni bireyler üretilirken düşük uygunluk değerine sahip bireyler daha az seçileceğinden bu bireyler bir süre sonra nüfus dışında bırakılırlar. Yeni nüfus, bir önceki nüfusta yer alan uygunluğu yüksek bireylerin bir araya gelip çoğalmalarıyla oluşur. Böylelikle, pek çok nesil aracılığıyla iyi özellikler nüfus içerisinde yayılırlar ve genetik işlemler aracılığıyla da diğer iyi özelliklerle birleşirler [40]. Uygunluk değeri yüksek olan ne kadar çok birey bir araya gelip, yeni bireyler oluşturursa arama uzayı içerisinde o kadar iyi bir çalışma alanı elde edilir. Probleme ait en iyi çözümün bulunabilmesi için:

- Bireylerin gösterimi doğru bir şekilde yapılmalıdır.
- Uygunluk fonksiyonu etkin bir şekilde oluşturulmalıdır.
- Doğru genetik işlemciler seçilmelidir.

Genetik algoritmalar, yeni bir nesil oluşturabilmek için üç aşamadan geçer:

- Eski nesildeki her bir bireyin uygunluk değerini hesaplama.
- Bireyleri, uygunluk değerini göz önüne alarak kullanılarak seçme.
- Seçilen bireyleri, çaprazlama, mutasyon operatörlerini kullanarak uyuşturma.

Algoritmik bakış açısından bu aşamalar, mevcut çözümleri yerel olarak değiştirip birleştirmek olarak görülebilir. Genetik algoritmalar, başlangıçta bilinmeyen bir arama uzayından topladığı bilgileri yığıp, daha sonraki aramaları alt arama uzaylarına yönlendirmek için kullanılır.

Genetik algoritmalar, optimize edilecek parametreleri kodlar ve parametreler üzerinde değil, bu kodlar üzerinde işlem yapar. Bu kodlamanın amacı, orijinal eniyileme problemini birleşimsel bir probleme çevirmektir. Genetik algoritmalar, araç rotalama problemi (ARP), gezgin satıcı problemi (GSP) ve Çinli postacı problemi (ÇPP) gibi NP karmaşıklık sınıfına ait eniyileme problemlerinin çözümünde kabul edilebilir sonuçlar elde etmek için kullanılırlar. Evrimsel algoritmaları cazip kılan özelliklerinin bazıları şunlardır:

i) Öğrenme: Evrimsel algoritma, global arama tekniklerinde yaygınca kullanılır. Mevcut performans ölçütlerini kullanarak verilen bir arama uzayında, arama uzayını genişletme ve en iyiyi arama özelliklerini kullanma yeteneğine sahiptir. Bu özelliklerini çaprazlama, mutasyon ve üretim gibi genetik operatörlerle kullanarak öğrenme yeteneğine sahiptir.

ii) Genetik kod yapısı: Evrimsel algoritma doğrudan parametrelerle değil, kodlanmış parametre dizisiyle çalışır. Böylelikle kullanıcıya problemleri bir değişken eniyileme problemi gibi çözmesine imkân verir.

iii) Çözümlerin uygunluğu: Pek çok gerçek dünya probleminin, çok modellilik ve doğrusal olmama gibi özellikleri vardır. Geleneksel arama teknikleri böyle arama uzaylarında yetersiz kalır. Evrimsel algoritma ise böyle karmaşık arama uzaylarında en iyiye yakın çözümler bulma yeteneğine sahiptir.

## 2.2 Genetik Algoritma Operatörleri

Genetik algoritmanın temel operatörleri şunlardır:

**1. Seçim:** Toplum içerisinde en uygun değer için bazı seçim operatörleri kullanılarak seçilmesidir. Bu operatör yardımıyla birey kromozomu bir sonraki nüfusa katkı sağlaması için kopya edilir. Bu kopyalama işi kromozomun genlerine bağlı olarak bulunan uygunluk fonksiyonu değerine göre yapılır. Her nesilde bu operatör iyi bireyleri seçerek eşleşme havuzuna atar. Yeniden üretim işlemi seçim operatörleri yardımıyla yapılabilir. Bunlardan literatürde yaygın olarak kullanılanlar:

a) Rulet Teker Seçimi (RTS): Rulet seçiminde kromozomlar uyumluluk fonksiyonuna göre bir rulet etrafına gruplanır. Uygunluk fonksiyonu herhangi bir ölçüde uyan bireylerin seçilmesi için kullanılır. Bu rulet üzerinden rastgele bir birey seçilir. Daha büyük alana sahip bireyin seçilme şansı daha fazla olacaktır. Kromozomlar, istatistiksel yöntemler kullanılarak kendi uygunluk fonksiyonu değerinin toplam uygunluk değerine oranları ölçüsünde seçilirler.

b) Turnuva Seçimi (TS): Kural dâhilinde iki kromozom toplum içerisinde seçilerek uygunluk fonksiyonu büyük olan kromozom eşleşme havuzuna gönderilir, diğeri ise havuzun içine tekrar bırakılır. Bu işleme yeni toplum büyüklüğü dolduruluncaya kadar devam edilir. Bu yöntemin avantajı herhangi bir kromozomun süreç sırasında kaybedilme olasılığının rulet tekeri seçim tekniğine göre daha az olmasıdır.

c) Sıralı Seçim (SS): Bu yöntemde en kötü uygunlukta olan bireye 1 değeri verilir, ondan daha iyi olana 2, daha iyisine 3 değeri verilerek devam edilir. Bir bireyin seçilme olasılığı, o bireye verilen değerin tüm bireylere verilen değerler toplamına oranı kadardır. Amaç düşük uygunlukta bireylere de seçilme şansı tanımaktır, ancak bu durum çözümün daha geç yakınsamasına neden olabilir.

**2. Çaprazlama:** Eşleşmiş ebeveynler arasındaki kromozomların yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir. Eşleşmiş ebeveynlerin ortaya çıkarmış oldukları çocuklar ebeveynlerinin karmaşık kromozomlarını taşırlar. Eşleşme havuzu seçildikten sonra, bu operatör devreye girer. Bu operatör rastlantısal olarak eşleşme havuzundan kromozomları seçer. Kromozomların cinsiyeti, farklılığı veya benzerliği bu durumda önemli değildir. Çaprazlama sayısı çaprazlama olasılığına göre yapılır.

Çaprazlama olasılığı, çaprazlamanın hangi sıklıkta yapılacağını belirtir. Eğer hiç çaprazlama yapılmaz ise (çaprazlama olasılığı %0) yeni bireyler eski bireylerin aynısı olur ama bu yeni kuşağın eskisiyle aynı olduğu anlamına gelmez. Eğer bu oran %100 olursa yeni bireyler tamamıyla çaprazlama ile elde edilir. Çaprazlama eski bireylerden iyi taraflar alınarak elde edilen yeni bireylerin daha iyi olması umuduyla yapılır. Eğer çaprazlama yapılmayacaksa seçilen iki kromozom aynen gelecek kuşak için kopyalanır. Eğer çaprazlama uygulanacaksa, seçilen iki kromozom gelişigüzel bir noktadan kesilip iki kromozomun kesilen noktalarından itibaren genler yer değiştirir. Yer değiştiren bu kromozomlar potansiyel olarak yeni çocuk olmaya elverişlidir. Örneğin, 1000 ve 01110 zincirlerinin çaprazlama için seçildiğini kabul edelim. Gelişigüzel ayırtma noktası da 3 olsun. Bu durumda çaprazlama sonunda yeni kromozomlar ise 10010 ve 01100 olacaktır.

100   00	→	10010
011   10		01100

**3. Mutasyon:** Bazı iyi kromozomlar çaprazlama ve seçim aşamasında kaybedilmiş olabilir. Bu durumda yeni bireyin genlerinin rastgele değiştirilmesiyle kaybedilmiş iyi bir kromozom kurtarılabilir. Aşağıda orijinal bireylerdeki koyu ile gösterilmiş genler mutasyona uğramıştır.

Orijinal Birey 1100011000011110

Değişmiş Birey 11**1**00111**0**0011110

Mutasyon olasılığı, mutasyonun hangi sıklıkta yapılacağını belirler. Mutasyon olmaz ise yeni birey çaprazlama veya kopyalama sonrasında olduğu gibi kalır. Eğer mutasyon olur ise yeni bireyin bir kısmı değiştirilmiş olur. Eğer bu oran %100 olursa kuşak içindeki bireyler tamamen değişir, %0 olursa hiç değişmeden kalır.

### 2.3 Genetik Algoritma Kontrol Parametreleri

GA tekniği, çaprazlama ve mutasyon olasılığından başka parametreler de içerir. Bunların en önemlilerinden biri de nesil büyüklüğüdür. Bu parametre popülasyon içinde kaç adet kromozom olduğunu söyler. Eğer kromozom sayısı az olursa, GA, çözüm aranan uzayın ancak bir kısmını gezebilir ve çaprazlama için fazla bir seçeneği yoktur. Kromozom sayısı çok fazla olursa GA çok yavaş çalışır.

Araştırmalar belli bir noktadan sonra nesil boyutunu artırmanın bir yararı olmadığını göstermiştir.

Yeni bireyler uyumluluğa göre veya rastgele olarak seçilebilir. Yeni bireylerin tamamen rastgele seçilme durumunda yakınsama zorlaşabilir. Tüm bireyler uyumluluğa göre seçildiğinde ise yeni kuşak içinde bölgesel yakınsamalar olabilir. Bu sorunların üstesinden gelmek için belli bir oranda uyumluluk seçimi, belli bir oranda da rastgele seçim yapılabilir. Bu oran kuşak farkı ile ifade edilir.

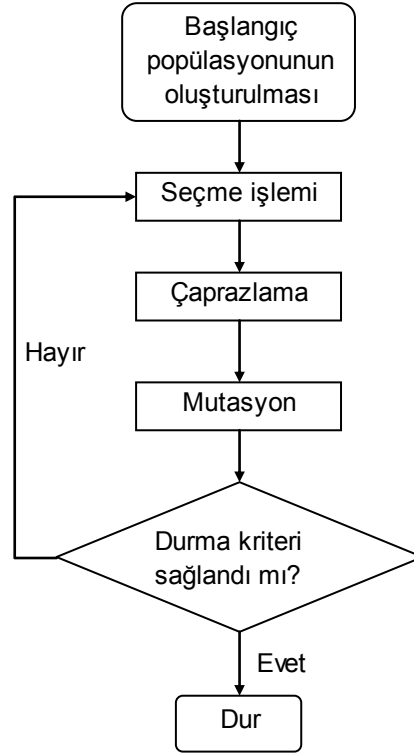
Eski kuşacı yenilemenin çeşitli yöntemleri mevcuttur. Kuşaksal stratejide, mevcut nesildeki kromozomlar tamamen yavrular ile yer değiştirir. Popülasyonun en iyi kromozomu da yenilendiğinden dolayı bir sonraki kuşaca aktarılamaz ve bu yüzden bu strateji en uygun stratejisiyle beraber kullanılmaktadır. En uygun stratejisinde, popülasyondaki en iyi kromozomlar hiçbir zaman yenilenmemektedir, bundan dolayı çoğalma için en iyi çözüm her zaman elverişlidir. Denge durumu stratejisinde ise, her kuşakta yalnızca birkaç kromozom yenilenmektedir.

Genetik algoritma parametrelerini saptamak için kullanılan iki temel teknik vardır; parametre ayarlama ve parametre düzenleme [41]. Parametre ayarlama, parametrelere değerleri algoritma çalıştırılmaya başlamadan önce atanır ve algoritma sonlanıncaya kadar bu değerler sabit kalır. Parametre düzenlemede ise parametreler algoritma çalışmaya başlamadan önce ilklendirilir, algoritmanın çalışması sırasında güncellenir. Bu güncellemeler bazı gerekirci kurallara göre, popülasyondan alınan geri beslemelere göre olabileceği gibi, tamamen evrimsel algoritmanın kendisi tarafından gerçekleştiriliyor olabilir.

## **2.4 Genetik Algoritmanın İşlem Adımları**

Genetik algoritma işlem adımları Şekil 2.1'deki akış şemasında gösterilmiştir.

İlk adımda, olası çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu oluşturulur. Bu adıma toplumda bulunacak birey sayısını belirleyerek başlanmaktadır. Birey sayısı seçiminde yapılan işlemlerin karmaşıklığı ve aramanın derinliği önemlidir. Toplum bu işlemde sonra rastgele oluşturulur.



**Şekil 2.1** : Basit genetik algoritma işlem adımları.

İkinci adımda, uygunluk fonksiyonu işletilerek kromozomların uygunluklarının bulunur. Uygunluk fonksiyonu, genetik algoritmanın beynini oluşturmaktadır. Genetik algoritmada probleme özel çalışan tek kısım bu fonksiyondur. Uygunluk fonksiyonu kromozomları problemin parametreleri haline getirerek onların bir bakıma şifresini çözmektedir. Daha sonra bu parametrelere göre hesaplamayı yaparak kromozomların uygunluğunu bulur. Çoğu zaman genetik algoritmanın başarısı bu fonksiyonun verimli ve hassas olmasına bağlı olmaktadır.

Üçüncü adımda, kromozomlar eşlenerek, yeniden kopyalama ve değiştirme operatörleri uygulanır. Bu sayede yeni bir toplum oluşturulur. Kromozomların eşlenmesi kromozomların uygunluk değerlerine göre yapılır.

Dördüncü adımda, yeni kromozomlara yer açmak için eski kromozomlar ortadan kaldırılır. Beşinci adımda tüm kromozomların uygunlukları tekrar hesaplanır. Altıncı adımda durma şartı kontrol edilir. Durma şartı sağlanmamışsa, üçüncü adıma dönülerek yeni nesile geçilir. Durma şartı sağlanmışsa algoritma sonlanır. O ana kadar bulunmuş en yüksek uygunluğa sahip kromozom çıktı olarak verilir. Toplumların hesaplanması sırasında en iyi bireyler saklandığı için o ana kadar bulunmuş en iyi çözüm çözümdür.

## 2.5 Genetik Algoritmaların Güçlü Yönleri

Genetik algoritmalar, klasik yöntemlerle çözümü elde edilemeyen karmaşık problemlere, en iyi ya da en iyiye yakın sonuçların, hızlı bir şekilde elde edilmesi için kullanılabilen kolay uygulanabilir, güçlü bir eniyileme tekniğidir. Genetik algoritmalar, gerçek hayatta karşımıza çıkan pek çok problemde olduğu gibi, aşağıdaki özelliklerden bir veya daha fazlasına sahip olup klasik yöntemlerle çözülmesi güç olan problemlerin çözümünde kullanılabilir.

- Çok geniş bir çözüm uzayı
- Birden fazla optimum noktası
- Amaç fonksiyonunun türevinin alınmıyor olması
- Amaç fonksiyonundaki süreksizlikler
- Verilerin doğrusal olmaması
- Verilerde önemli oranda hata payı olması
- Verilerin istikrarsız olması

Genetik algoritmaların en iyi ya da en iyiye yakın sonuçlara ulaşabilme özelliği ve gücü seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerin kullanılmasından gelmektedir. Seçim işleminde performansı daha iyi olan bireylerin seçilme şansı yüksek olsa da bütün bireylerin seçilme şansı mevcuttur. Bu da çözüm uzayının araştırılması sürecinin daha geniş bir alanda sürdürülmesiyle ilk bakışta çözüm için uygun görülmeyen çözüm alanlarının daha detaylı araştırılması sonucunda çok daha iyi sonuçlara ulaşılabilmesine imkân sağlamaktadır.

Genetik algoritmalarının diğer eniyileme tekniklerinin aksine yerel minimumlarda takılıp kalma ihtimali çok daha azdır. Bunun sebebi seçim, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinin rastgele olarak gerçekleştiriliyor olmasıdır.

Genetik algoritmaların çözüme oldukça hızlı ulaşabilmesi çalışmalarının doğrudan ve dolaylı paralellik içermesi sayesinde. Doğrudan paralellik genetik işlemlerin aynı anda bütün bir popülasyona uygulanması nedeniyle çözüm uzayının paralel bir şekilde araştırılması demektir. Dolaylı paralellik ise bir bireyin performansının değerlendirilmesinde amaç fonksiyonu kullanılırken bireyin tüm genlerinin aynı anda değerlendiriliyor olması demektir. Bu paralellikler çözüm uzayının farklı



bölgelerinin aynı anda araştırılmasını sağlayarak büyük bir verimlilik sağlamış olurlar.

Küçük değişikliklerle farklı problemlere kolaylıkla uygulanabilen esnek bir yöntem olması genetik algoritmaların cazibesini arttırmaktadır. Hazırlanmış olan bir genetik algoritma programının yeni bir probleme uyarlanabilmesi için çoğu zaman problemin uygun şekilde kodlanması ve uygunluk fonksiyonunun doğru bir şekilde formüle edilmesi yeterlidir. Ayrıca, çözülecek problemle ilgili özel bilgiler genetik algoritma tarafından kolaylıkla kullanılabilir ve genetik algoritmalar başka yöntemlerle beraber kullanılabilirler. Genetik algoritmalar şu alanlarda etkili ve kullanışlıdır;

- Arama uzayının büyük ve karmaşık olduğu alanlarda
- Mevcut bilgiyle sınırlı arama uzayında çözümün zor olduğu alanlarda
- Problemin belirli bir matematiksel modelle ifade edilemediği alanlarda
- Geleneksel eniyileme yöntemlerinden istenen sonucun alınmadığı alanlarda

## **2.6 Genetik Algoritmaların Zayıf Yönleri**

Genetik algoritmaların bir önceki bölümde anlatılan avantajları yanında, belli bir probleme uygulanmasında karşılaşılan tasarım zorlukları ile çözüme ulaşmada yaşanabilecek güçlükler nedeniyle bazı dezavantajları vardır. Kullanılan kodlama sistemi, seçim, çaprazlama ve mutasyon yöntemleri, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları gibi parametrelerin belirlenmesinin, genetik algoritmaların hızı ve sonuca ulaşma yeteneği üzerinde çok önemli bir etkisi vardır. Ancak, bu parametrelerin belirlenmesinde her probleme uygulanabilecek genel kurallar mevcut değildir ve bu parametrelerin doğru olarak belirlenmesi imkânsız olmasa da oldukça zor bir konudur. Bu nedenle, bu seçimlerin problem özelliklerine en uygun olacak şekilde yapılmasına çalışılmalı ve daha iyi çözümlere ulaşabilmek için bu tercihler de optimize edilmelidir. Ayrıca uygunluk fonksiyonunu belirlemek, özellikle çok kısıtlı eniyileme problemleri için zor olabilir.

Genetik algoritmaların en önemli kısıdı, en uygun sonuca ulaşma garantisinin olmamasıdır. Özellikle, klasik yöntemlerle çözümü elde edilemeyen problemler söz konusu olduğunda elde edilen sonucun en uygun olup olmadığını belirlemek güçtür. Genetik algoritmalar en iyi çözüme ulaşmadan genelde yerel en iyi olan bir çözüme

yakınsayabilir. Buna erken yakınsama denilmektedir. Ayrıca çok kısıtlı ve yüksek düzeyde doğrusal olmayan problemlerde ise hiç yakınsamayabilir. Genetik algoritmaların yakınsamaması yukarıda bahsedilen parametreler için uygun değerlerin seçilmemesine bağlı olabileceğinden, problem için uygun değerlerin seçilmesiyle bu sorun ortadan kaldırılabilir. Ancak, problemin özelliklerinden kaynaklanan yakınsamama durumlarında yapılacak pek bir şey olmayabilir.

Genetik algoritmanın zayıf noktalarından bir değeri de özellikle statik ortamlar için, yani maliyetlerin dinamik değişmediği çizge topolojileri için işlemci zamanının diğer algoritmalara göre fazla olmasıdır.

## **2.7 Genetik Algoritma Uygulama Alanları**

Genetik algoritmalar parametre ve sistem tanılama, kontrol sistemleri, robot uygulamaları, görüntü ve ses tanıma, mühendislik tasarımları, planlama, yapay zekâ uygulamaları, uzman sistemler, fonksiyon ve birleşimsel eniyileme problemleri, ağ tasarım problemleri, yol bulma problemleri, sosyal ve ekonomik planlama problemleri için başarılı sonuçlar vermektedir [42].

Genetik algoritmalar çok yaygın alanlarda çeşitli problemlere uygulandığında dikkat çekici sonuçlar vermiştir. Belli bir dereceye kadar modifiye edilmiş genetik algoritmalar, son yıllarda dinamik problemlerin çözümünde daha sık kullanılır hale gelmiştir [43]. Genetik algoritmaların yaygın olarak kullanıldığı alanlardan biri, belirli ve özel görevler için gerekli olan bilgisayar programlarını geliştirmedir. Ayrıca, diğer hesaplama gerektiren yapıların tasarımı için de kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak, bilgisayar çipleri tasarımı, ders programı hazırlanması ve ağların çizelgelenmesi verilebilir. GA, robot sensörlerinde, yapay sinir ağlarında, VLSI yonga tasarımı ve protein yapısal analizinde kullanılır.

Ekonomik modellerin geliştirilmesinde ve işleminde kullanılır. Mesela seralarda salatalık yetiştirilmesinde iklim kontrolünü yapabilmek ve optimal sıcaklığın nasıl yayılmasını belirlemek için GA yöntemi kullanılmıştır.

Evrimsel programlama kavramlarına bağlı olarak geliştirilecek olan evrimsel yol planlama ve seyir kontrolü yaklaşımı, genel, esnek ve uyumsal bir yöntem olarak tasarlanabilir [44]. Evrimsel algoritmadaki planlama süreci bütünleştirilerek farklı eniyileme ölçütlerinin tanımlanmasına ve dinamik olarak değişmesine, probleme

özgü alan bilgisinin çözüme dâhil edilmesine ve yüksek planlama etkinliği ile zamanla konumu değişen engellerin kontrol altında tutulmasına olanak sağlanabilir.

Genetik algoritmalarla paralel ve dağıtık sistem tasarımı da mümkündür [45]. Genetik algoritmaların bağımsız parçaları paralel çalışan işlemcilerle dağıtılsa işlem süresinde bir kısalma mümkün olacaktır. Nüfus dağıtıldığından ve bireyler arası iletişim sınırlı olduğundan, elde edilen işlem standart genetik algoritmadan farklıdır.

Genetik algoritmalar; başta üretim ve işlemler olmak üzere finans ve pazarlama gibi işletmelerin fonksiyonel alanlardaki birçok farklı problemin çözümü için kullanılmaktadır. Genetik algoritmaların özellikle, kaynak tahsisi, iş atölyesi çizelgelemesi, makine parça gruplaması ve bilgisayar ağ tasarımı gibi çeşitli alanlarda uygulamaları mevcuttur [46]. Evrimsel algoritmaların yol bulma problemlerine uygulandığı bazı alanlar şunlardır:

- Ağ dolaşımı [14]: Ağ üzerinden iletilen veri paketlerinin en az gecikme ile hedeflerine varması amaçlanmıştır.
- Taşımacılık problemleri [47]: Taşımacılık alanında maliyeti azaltmak probleminin çözümü hedeflenmiştir.
- Mobil robot yol planlaması [48]: Mobil bir robotun içinde hareket edeceği alan için, bir çarpışmadan sakınma modeli oluşturulmuştur
- WDM (Dalga Boyu Bölmeli Çoğullama) [49]: WDM optik ağlarında aynı anda pek çok hedefe verinin ağda en kısa yolu izleyerek ulaşması amaçlanmıştır.
- Hava araçlarına ilişkin sensörlerin görev planlaması ve dinamik kaynak tahsis edilmesi [50]: Havacılıkta kullanılan sensörlerin, hazırlık ve birbirlerine uzaklık durumlarına göre en verimli şekilde kullanılması için çalışma yapılmıştır.
- Fabrika inşaatlarında ürün istasyonlarının yerlerinin belirlenmesi [51]: Hammadde işleme maliyetlerinin azaltılması amaçlanmıştır.



### 3. EVRİMSEL UÇUŞ PLANLAMA ALTSİSTEMİ

Seyir planlama probleminin en basit halinde seyrüsefer haritası üzerindeki uçuş noktaları düğüm noktalarıyla temsil edilir. Uçuş bacakları ise düğüm noktaları arası bağlantılar olarak gösterilir. Amaç çizgedeki iki düğüm noktası arası, yani kaynak ve hedef noktaları arası en kısa yolun bulunmasıdır. Problemin statik ortamlardaki hali için Floyd, Dijkstra gibi karmaşıklığı belirli algoritmalar kullanılabilir. Floyd, Dijkstra ve diğer analitik yaklaşımların dinamik ortamlar için işlem karmaşıklığı yüksektir ve değişken ortamlarda bu algoritmalar tercih edilmezler. Dinamik ortamlarda yol üzerindeki düğüm noktalarının sayısı ve düğümler arası bağlantıların maliyetleri zamana bağlı olarak değişebilir. Yeni bağlantılar ve yeni düğüm noktaları oluşabileceği gibi mevcut düğüm noktaları da zamanla yok olabilir. Bu durumda çizge ve uçuş bacakları değişebildiğinden, problem verilerin yenilenmiş haliyle tekrar çözülmek durumundadır.

Dinamik modelde önemli olan algoritmanın herhangi bir zaman için çalıştırılabilir olmasıdır. Diğer bir ifade ile çözüm süreci herhangi bir anda durdurulabilir olmalı ve kabul edilebilir bir çözüm önerebilmelidir. Dinamik durum, problem yapısı olarak statik durumdan çok farklıdır ve değişik çözümlerine ihtiyaç duyar. Buna rağmen, dinamik problemi çözenin yollarından biri de, her yeni durum için statik durumun yeniden çözülmesidir. Ancak, dinamik durumda tüm hedeflerin değişmesi pek olası olmadığı gibi, değişikliğin bir önceki statik durumdaki hedeflerin çoğunu hâlâ geçerli kılacak olması nedeniyle bu durum etkin olmayacaktır [52]. Bu sebeple, dinamik durum için işlem zamanı daha az olan ve kısa sürede sonuca ulaştıracak çözümler aranır. Özellikle kısıtların istatistiksel olarak değiştiği rota planlama tarzı problemlerin çözümünde sezgisel teknikler sonuca daha kısa sürede yakınsamayı sağlar.

Tez kapsamında ele alınan atak helikopterin ve İHA'ların sınırlı havada kalış kapasiteleri ve bu sürede gözetlenecek hedef miktarları dikkate alındığında istenilen kısa sürede en iyi rotanın bulunması imkânsız olabilir. Bu sebeple, harekâtı etkilemeyecek bir sürede rota çözümlerinin değerlendirilerek en iyi olmasa da kabul

edilebilir iyi bir çözümün bulunması gerekmektedir. Dinamik ortamlarda kısıtlı süre içerisinde kabul edilebilir en iyi ve en güvenilir yolun bulunması için tez çalışmasında geliştirilen evrimsel algoritma yaklaşımı çözümü kullanılmalıdır.

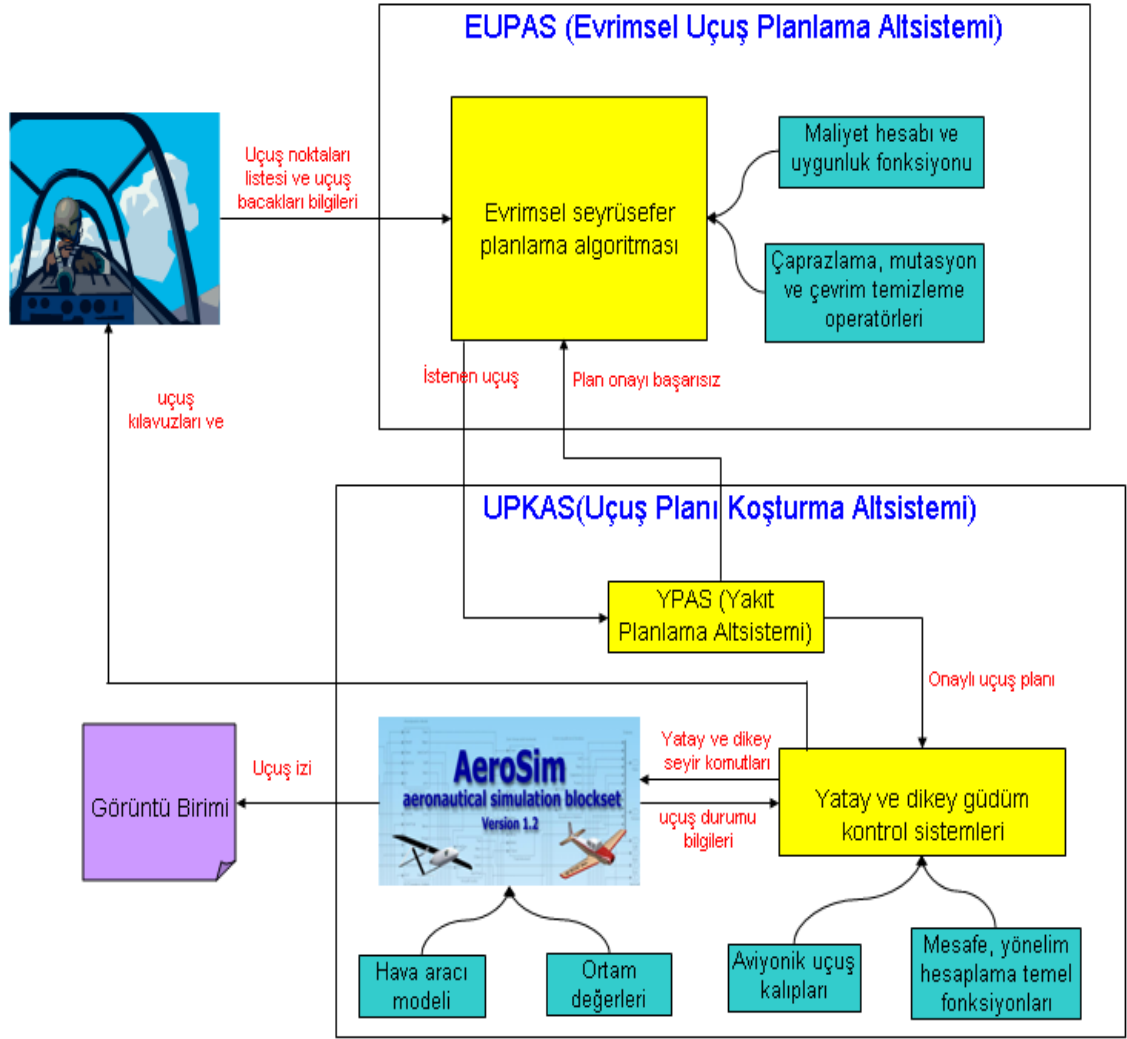
Dinamik yol planlama sistemlerinde genetik algoritmanın tüm arama uzayını taramasına olanak sağlayabilmek için değişken boyutlu kromozomlar kullanılmaktadır [53]. Gen sayısının fazla ya da az olması bireyin iyi bir çözüm olduğunu göstermez. Bireylerin uygunluk fonksiyonu ile hesaplanan uygunluk değeri önemlidir. Uygunluk değeri yüksek bireyler yaşatılır, uygunluk değeri düşük olan bireyler nüfustan atılır.

Yol planlama tarzı sıralama gösteriminin kullanıldığı problemlerin çözümünde tasarlanan evrimsel operatörler, standart genetik algoritma operatörlerine göre farklılık gösterir [54]. Çaprazlama için iki çözüm adayının en az bir ortak noktası bulunması gerekmektedir. Çaprazlama sonrası boyutu ebeveynlerinden farklı olan çocuk kromozomlar oluşur. Mutasyon operatörü de rastgele gen değişimi ile yapılamaz, tek bir genin değişimi yerine mutasyon noktasından hedefe kadar olan rotanın tamamı güncellenmelidir [55].

### **3.1 Evrimsel Seyrüsefer Sistemi Bileşenleri**

Tez kapsamında tasarlanan seyrüsefer sistemi, uçuş planlama ve uçuş planı koşturma alt sistemlerinden oluşmaktadır. Uçuş planlama alt sistemi, hava aracını bir kalkış noktasından istenen varış noktasına uçuş noktaları üzerinden yönlendirir. Seyrüsefer planlama probleminde uçuş noktaları arasındaki uçuş bacakları için uzunluk, güvenlik ve uçuş bacağına oluşturan noktalar arası yükseklik farkı ölçütleri hesaba katılmıştır. Uçuş planı koşturma alt sistemi ise uçuş planlama alt sisteminin ürettiği uçuş planını işlemek için gerekli yatay ve dikey güdüm algoritmalarını sağlar, yakıt planlamasına ilişkin hesaplamaları gerçekleştirerek hava aracının istenen uçuş bacaklarından geçerek rotasını tamamlamasında kılavuzluk yapar. Uçuş planı koşturma alt sistemindeki yatay ve dikey güdüm algoritmalarının doğrulamasında Aerosim isimli uçuş simülatörü kullanılmıştır. Konum, hız, platform parametreleri ve diğer gerçek zamanlı uçuş verileri Aerosim tarafından hesaplanmaktadır. Uçuş planı koşturma alt sistemi gerçek zamanlı veriyi işleyerek yalpa açısı ve yunuslama açısı komutlarını üretir. Bu yalpa ve yunus açıları hava aracının yatayda istenen rotaya oturtulmasını ve dikeyde istenen yüksekliğe sokulmasını sağlar. Sistemin blok

diyagramı ve alt sistemler arasındaki bilgi akışı Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



**Şekil 3.1 :** Sistem bileşenleri ve alt sistemler arası bilgi akışı.

Evrimsel seyrüsefer planlama algoritması ile girdi olarak verilen uçuş noktaları ve uçuş bacakları için en iyi uçuş planı bulunduğundan sonra bu uçuş planı yakıt planlama alt sistemine gönderilir. Yakıt planlama alt sistemi uçuş planı koşturma alt sisteminin bir parçasıdır ve yakıt akış hızına ilişkin regresyon ile bulunan yakıt akış hızı ve toplam yakıt bilgilerine göre uçuş planlama alt sisteminin hesapladığı uçuş planının mevcut yakıtle icra edilip edilemeyeceğine karar verir. Eğer uçuş planı için yakıt yeterli ise uçuş planı uçuş planı koşturma alt sistemine gönderilir ve planın icrası gerçekleştirilir. Eğer mevcut yakıt yeterli değilse uçuş planlama alt sistemi tarafından farklı bir uçuş planı araştırılır. Eğer yakıt tankındaki yakıt miktarı istenen kalkış noktasından varış noktasına gidiş için hiçbir şekilde yeterli değilse mevcut yakıtle gidilebilecek en yakın uçuş noktasına intikal için gerekli planlama yapılır.

### 3.2 Çok Amaçlı Karar Verme

Seyrüsefer planlama problemi kısıtlardan da anlaşılacağı gibi birden fazla parametreye bağlıdır. Amaç fonksiyonu sayısının arttırılması, dolayısıyla pratikteki problemleri daha gerçekçi şekilde ele alma gayretleri "Çok Amaçlı Karar Verme" (ÇAKV) bilimini ortaya çıkarmıştır. Çok amaçlı karar verme sisteminin ölçülebilen özelliklerini belirleyen parametreler, en iyi sonuçları verecek karar değerlerini belirleyen değişkenlerden, sistemin eniyilenecek performans ölçütünden ve sistemin özelliklerini ve sınırlarını belirleyen kısıtlardan oluşmaktadır.

$$\text{Amaç fonksiyonu: } z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

$$\text{Kısıtlar: } g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = B_1$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) < B_2$$

.

.

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) < B_m$$

Burada  $n$  değişken sayısını,  $m$  kısıt sayısını,  $x$  karar değişkenleri vektörünü,  $f$  fonksiyonu maksimize ya da minimize edilecek amaç fonksiyonunu,  $g_i$  ise kısıt fonksiyonlarını göstermektedir. Kısıt sayısında herhangi bir sınır bulunmamaktadır. Kısıtların hepsi birlikte bir uygun çözüm bölgesi belirlerler. Optimal çözüm değeri veya değerleri bu bölgeye ait bir değer olmaktadır. Kısıtlar sınırlayıcı şartların ifadeleridir. Karar değişkenleri olarak nitelendirilen fonksiyon değişkenlerinin kısıtların tümünü sağlayan ve amaç fonksiyonunu optimize eden sayısal değerlerini bulmak amaçlanmıştır. Problemin en uygun çözümü, tüm karar değişkenleri için amaç fonksiyonunu eniyileyen çözümdür. Böyle bir çözüme ulaşmak göz önüne alınan değerlendirme ölçütlerinin birbiri ile çelişkili ve ters yönde etkileşimli olduğu durumlarda karmaşılaşır. Örneğin tezde çözümü yapılan seyrüsefer planlama için karar değişkenleri uçuş bacaklarının uzunluk, güvenlik ve yükseklik farkı değerleridir. Kısıt fonksiyonları uzunluk, güvenlik ve yükseklik farkı parametreleri için sınır değerleridir. Amaç fonksiyonu ise yakıt eniyilemesidir ve bu fonksiyon karar değişkenleri olan uzunluk, güvenlik ve yükseklik farkı parametrelerinin eniyilemesiyle elde edilir. Daha kısa bir uçuş planı daha az güvenli olabileceğinden veya daha güvenli bir uçuş planı yükseklik farkı fazla olabileceğinden tercih



edilmeyebilir. Her bir parametre için en uygun olan çözümlerin belirli bir şekilde karar vericinin tercihlerini de dikkate alarak uzlaştırılması amaçlanır. Sonuçta ulaşılan çözüme de tek-amaçlı karar problemlerindeki en uygun çözüm yerine "En iyi uzlaşık çözüm" (EUÇ) denilmelidir. Karar vericinin tercihleri problemin çözümü sırasında değişik şekillerde göz önüne alınabilir. Bu tercihleri, yukarıda ana hatlarıyla tanıtilan ÇAKV probleminin çözümü sırasında farklı şekillerde ele alan birçok yöntem geliştirilmiştir.

- Karar vericiden açıkça bilgi istemeyen yöntemler
- Karar vericiden başlangıçta bilgi isteyen yöntemler
- Karar vericiden karar esnasında ardışık olarak bilgi isteyen yöntemler.
- Karar vericiden bilgiyi sonradan isteyen yöntemler

Tez kapsamında geliştirilen algoritma, karar vericiden karar esnasında ardışık olarak bilgi isteyen yöntemler sınıfına girmektedir. Çok amaçlı karar verme problemlerinin çözümünde en yaygın kullanılan sezgisel teknikler Markov Karar Süreci (MDP) ve evrimsel stratejilerdir.

### **3.2.1 Markov karar süreçleri ile uçuş planlama**

Markov süreci belirsizlik unsuru içeren bir süreçtir ve sürecin gelecekteki davranışı yalnızca şimdiki durumdan etkilenir, önceki durumlara bağlı değildir. Bunun sebebi şartlı olasılığın sadece bir önceki zamana bağlı olmasıdır. Markov özelliği gösteren bir stokastik süreçteki rassal değişkenlere ait değerlere durum denmektedir. Markov sürecinde durumlar ayrıktır, yani biri olduğu anda diğer durum oluşamaz. Süreç zincire ait durumlardan herhangi birinden başlayarak ardışık olarak tekrar aynı duruma veya diğer durumlardan birine hareket eder. Her bir harekete adım denir. Markov sürecini simgeleyen modellerin kurulabilmesi için, incelenen sistemin içinde bulunabileceği farklı durumların ve bu durumların birbirlerine geçiş ihtimallerinin bilinmesi gerekir.

Sistemin  $t$  zamanındaki  $i$  durumundan,  $t+1$  zamanındaki  $j$  durumuna geçişinin olasılığını  $P_{ij}$  ifade etmektedir.  $P_{ij}$ 'ler markov zincirinde geçiş olasılıkları olarak adlandırılır.  $P_{ij}$  geçiş olasılığı tek adımlı geçiş olasılığıdır. Bütün geçiş olasılıklarının ifade edildiği matrise ise geçiş matrisi denir ve rota planlama problemi için her uçuş noktası için bir sonraki uçuş noktasına geçiş için bağlı tüm uçuş bacakları geçiş

matrisinde ayrı bir elemanla ifade edilmelidir. Eğer bir  $i$  durumundan herhangi bir adımda  $j$  durumuna geçilebiliyorsa,  $j$  durumu  $i$  durumu için ulaşılabilir. Her iki durumdan birbirlerine geçiş varsa bu takdirde iki durum haberleşendir.

Bir karar sürecinde rassallık türlü şekillerde ortaya çıkabilir. Bazen durumlar arası geçişler rassal nitelikte olurken, bazen de durumlara karşılık gelen getiriler rassal nitelikte olabilmekte; çözümlerde yapılması gereken işlemler de bunlara bağlı olarak değişmektedir. Bunun yanı sıra, durumlar arası geçiş olasılıklarının Markov zinciri özelliği taşıması halinde bu tür problemler MDP başlığı altında incelenmekte ve çözümü de buna uygun olarak yapılmaktadır. Markov zincirinin her uygun durumunda alternatif hareketlerden biri seçilerek karar verilir. Seçilen bu hareket geçiş olasılıklarını değiştirerek o dönemdeki ve bir sonraki dönemde oluşacak maliyet veya getiriyi de etkiler.

Markov karar sürecinde; karar alan, içinde bulunulan durumu gözlemler, bu duruma dayanarak karar alıcı, karar anında bir hareket seçer. Seçilen hareket iki sonuç doğurur; karar alıcı hemen bir fayda kazanır veya bir maliyetle karşılaşılabilir ve bir sonraki sistem durumunda, hareketin seçilmesiyle beliren olasılık dağılımına göre sistem yeni bir duruma girer. Her sistem durumunda karar alıcı benzer bir problemle tekrar karşılaşır ve benzer bir çözüm üretir. Markov karar sürecinin bileşenleri şunlardır:

- Karar anlarının oluşturduğu küme
- Durumların kümesi
- Mevcut hareketlerin kümesi
- Fayda veya maliyete bağlı durumlar ve hareketler kümesi
- Geçiş olasılıklarına bağlı durumlar ve hareketler kümesi

Her karar anında sistem bir  $s$  durumundadır, mümkün tüm durumların kümesi  $S$  ile gösterilir. Karar verici,  $t$  karar anında,  $s$  durumunda olan sistemi gözlemleyerek,  $s$  durumunda seçilebilmeye müsait olan  $A_s$  hareketlerinden bir  $a$  hareketini seçer. Burada  $A$  tüm hareketleri,  $A_s$  ise  $s$  durumunda seçilebilecek hareketleri gösterir.  $A_s$  ve  $s$ 'nin zamandan bağımsız olduğu yani zamanla değişmediği varsayılır.

Tez kapsamında çözüm önerilen seyrüsefer planlama sistemine Markov Karar Süreci yaklaşımı ile bakıldığında pilot tarafından tanımlanan uçuş noktaları sürecin

durumları olur. Durum, sistemi tanımlayan bir parametre veya parametreler kümesidir. Eğer seyrüsefer planlama örneğindeki gibi, sistemin durumu zamana bağlı olarak değişiyorsa, sistem bir dinamik sistemdir. Markov Karar Süreci'nde sistem bir durumdan diğerine rasgele geçer.

$$S=\{wp_1, wp_2, \dots, wp_n\}$$

Seyrüsefer planlama sisteminde üzerinden geçilen nokta sistemin şimdiki durumunu oluşturur. Uçuş noktaları arası geçiş yolları olarak düşünülebilecek uçuş bacakları ise eylemler kümesini oluşturur. Örneğin çizge tam bağlı bir çizge ise eylemler kümesi şu şekildedir;

$$A=\{leg_{12}, leg_{13}, \dots, leg_{1n}, leg_{23}, leg_{24} \dots, leg_{2n}, \dots, leg_{n-1n}\}$$

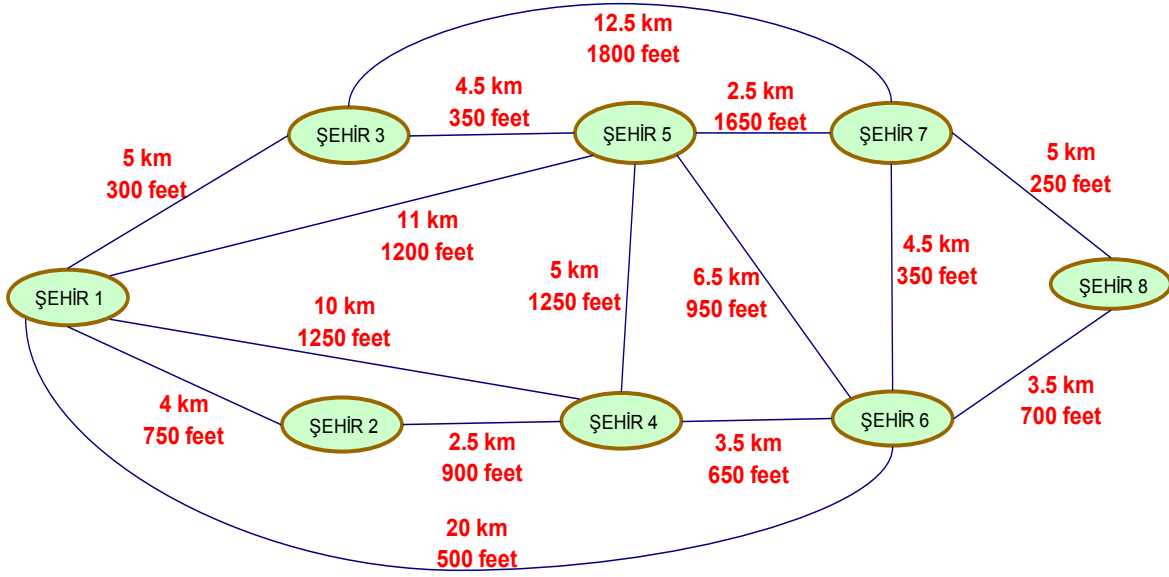
Eylemler kümesindeki her bir elemanın askeri güvenlik, uçuş menzili ve uçuş yüksekliği gibi parametreleri bulunmaktadır. Problemin içindeki eylemler, ödüller, maliyetler ve geçiş olasılıkları, sistemin mevcut durumuna ve o an gerçekleştirilen eyleme bağlıdır.

Seyrüsefer planlama problemi için geçiş olasılıkları, karar değişkeninin seçilen uygun bir istatistiksel dağılıma göre modellenmesiyle hesaplanmaktadır. Uçuş bacağına  $P_{ij}^{(n)}$  şartlı ihtimaline ait olmak üzere, n. adımda sistem j durumunda  $x_n = j$  iken, (n-1). adımda  $x_{n-1} = i$  de sistem i durumunda olmalıdır.

$P_{ij}^{(n)} = P[x_n = j / x_{n-1} = i]$  ifadesi sistemin  $x_{n-1} = i$  durumunda iken  $x_n = j$  durumuna geçme ihtimali olarak açıklanabilir. M durumlu Markov Zincirini tanımlamak için her i durumu ve n zamanına ait diğer j durumuna geçiş yapma ihtimalini  $P_{ij}^{(n)}$ ,  $1 \leq i, j \leq M$ ,  $n = 0, 1, 2, \dots$  olmak üzere belirlemek gerekir. Geçiş ihtimali şu şartları sağlamalıdır;

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 ; 1 \leq i, j \leq M \text{ için ve } \sum_{j=1}^M P_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, M$$

Rüzgâr enerjisine dayalı yol planlama problemine ilişkin Al-Sabban'ın çalışmasında uçuş süresinin en yüksek dereceye çıkarılması ve güç tüketiminin en düşük düzeye indirgenmesinde rüzgâr enerjisinden istifade edilmiştir [56]. Değişken hızlı ve değişken yönlü rüzgâr koşullarında en uygun yolun bulunmasında Markov Karar Süreci uygulanmış ve değişken rüzgâr hızının tahmini ve yolların geçiş olasılıklarının bulunması için Gauss dağılımı kullanılmıştır.

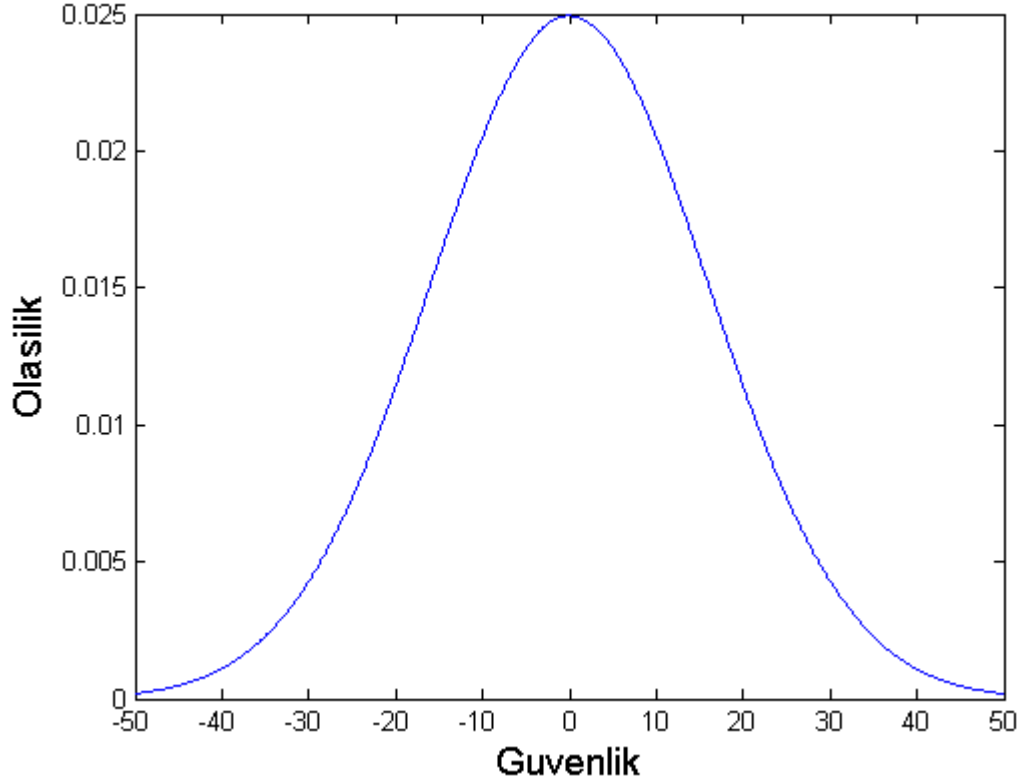


Şekil 3.2 : Sekiz düğümlü şehir haritası.

Tez kapsamında ele alınan seyrüsefer planlama probleminin MDP ile çözümünde geçiş olasılıkları askeri güvenlik fonksiyonunun normal dağılımı ile hesaplanır. Şekil 3.2’de gösterilen sekiz düğümlü şehir haritası kullanılarak intikal planlaması yapılmıştır. Aralarında yol bulunan şehirlerarası çift yönlü uçuş hattı tanımlıdır. Şehirlerarası mesafe ve yükseklik farkı değerleri şekilde gösterilmiştir. Geçiş olasılıklarının hesabı için kullanılan dağılımın güvenlik değeri değişkenine göre olasılık yoğunluk fonksiyonu Denklem 3.1’deki gibidir. [%0..%100] aralığında değişen güvenlik değerinin normal dağılımında, en yüksek güvenlik değeri 50, en düşük güvenlik değeri -50 ile ifade edilmiştir. Bu şekilde dağılımın simetrik bir grafiğe sahip olması sağlanmıştır. Dağılım fonksiyonu Denklem 3.2’deki gibidir. Durumlar arası geçiş olasılıkları Şekil 3.3’de gösterilen normal dağılım eğrisine göre belirlenmiştir.

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}; -50 < x < 50 \quad (3.1)$$

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-50}^x e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (3.2)$$



**Şekil 3.3 :** Durumlar arası geçiş olasılıkları.

Ödül fonksiyonu güvenlik, menzil ve irtifa değerlerine göre hesaplanır. Ödül fonksiyonu, bir durumdan diğerine geçince sistemin aldığı anlık ödülü belirlemek için kullanılır. Her geçişin ödülü uçuş bacağı için aşağıdaki denkleme göre hesaplanır. Denklemdaki *sec* uçuş bacağının güvenliğini, *dist* km cinsinden uçuş bacağının uzunluğunu, *alt* feet cinsinden uçuş bacağındaki irtifa farkını göstermektedir.

$$Ra(s_i, j) = (3 * sec) + (100 - (alt/9000) * 100) + 2 * (100 - (dist/100) * 100) \quad (3.3)$$

Uçuş bacağı ekleme / silme, uçuş noktası ekleme / silme işlemlerinin uygulandığı, yol maliyetlerinin dinamik değiştiği durumlar için yukarıda anlatılan parametreler ile MDP uygulanabilmektedir. MDP bütün geçişler ve eylemler için olasılık ve ödül değerlerini hesaplamakta, tüm arama uzayını değerlendirerek çözüm yapmaktadır. Sikorsky S-70A atak helikopterin maksimum menzilin 460 km ve havada kalış süresinin sabit kanat hava araçlarına göre çok az olduğu düşünüldüğünde, istenilen kısa sürede en iyi rotanın bulunması imkânsızdır. En iyi olmasa bile kabul edilebilir iyi bir çözümün bulunması gerekmektedir. Bu da tüm çözüm uzayının değil, bu uzayda yer alan bazı çözümlerin değerlendirilmesi anlamına gelir. Markov süreci her karar anında yani

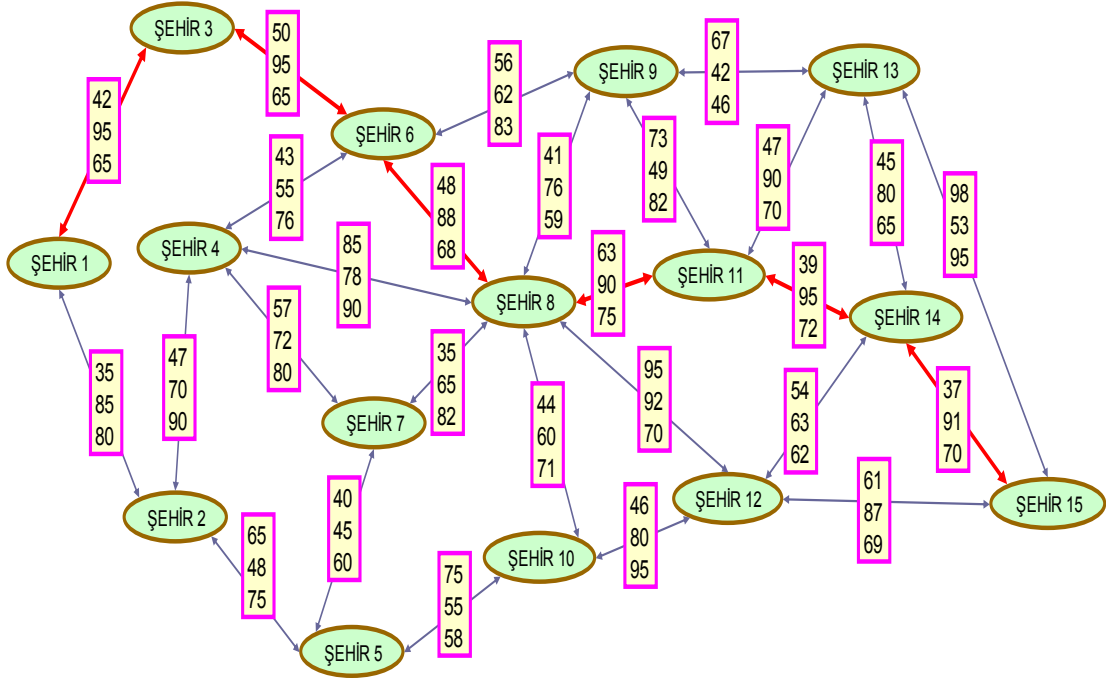
her uçuş noktasına varışta tüm çözüm uzayı üzerinde işlem yaptığından dolayı uçuş kritik bir sistem için istenen bir yöntem değildir. İşlem karmaşıklığı olarak değerlendirildiğinde MDP ile seyrüsefer planlama,  $a$  eylem sayısını ve  $s$  durum sayısını göstermek üzere  $O(a*s^2)$  mertebesindedir [57]. Geliştirilen evrimsel seyrüsefer algoritmasının işlem karmaşıklığı  $O(s*\log(s))$  mertebesinde olduğundan seyrüsefer planlama probleminin çözümünde MDY'ye göre daha etkindir.

### 3.3 Uçuş Planlama Sisteminde Çizge Kuramı

Çizge kuramı, bir olay ve ifadenin düğüm ve çizgiler kullanılarak gösterilmesi biçimidir. Çizgeler birçok uygulama alanında ve uygulama modellerinde sık kullanılmaktadır. Günümüzde birçok örnek çizgelere benzetilebilir ve çizge yapısı temel alınarak örneklenebilir. Bağlantı noktaları bulunan ve aralarında yol bağlamında bir şey bulunan her tür uygulama çizge yapısına yaklaştırılabilir [58].

Çizge yapısındaki her düğümden diğer düğümlerin hepsine bir yol varsa o çizge bağlıdır. Eğer bir çizge çevrim içermiyorsa ve bağlı ise o çizgeye ağaç denebilir. Çizge yapısı içerisindeki iki düğüm arası bir kenarla iliştilerebiliyorsa, o iki kenar komşudur denir. Bu durumda kenar  $k=\{a_i, a_j\}$  şeklinde gösterilir ve  $a_i$  ve  $a_j$  bu kenarın uç noktalarıdır denir. Çizge yapısında kenarlar değer alabilir, bu değerler çizgenin yapısına katılabilir. Bir çizge üzerindeki kenarların değerleri eşit değilse ve her biri farklı bir maliyet değeri alabiliyorsa bu tip çizgelere maliyetli çizge denir. Çizge yapısındaki kenarlar yön bilgisine sahipse bu tür çizgelere yönlü çizge denir.

Köşelerin düğüm (D), kenarların ise ayrıt (A) olarak tanımlandığı çizgenin matematiksel olarak ifadesi  $G = (D, A)$  şeklindedir. Bir çizgede köşeler nokta şeklinde, kenarlar ise çizgi şeklinde gösterilir. Bir çizgenin büyüklüğü, o çizgedeki düğüm sayısına eşittir. Bir düğümün derecesi de o düğüme giren ve çıkan kenarların toplamına eşittir. Çizgeler özelliklerine göre altıya ayrılmaktadır. Bunları; ağırlık ve yön bilgisinin olmadığı basit çizge, yön bilgisinin olduğu yönlü çizge, kenarların sayısal olarak değerlendirildiği maliyetli çizge, her düğümün diğerine doğrudan bağlantısının olduğu tamamlanmış çizge, tüm düğümlerin derecelerinin eşit olduğu düzenli çizge ve hiçbir kenarın birbirini kesmediği düzlemsel çizge olarak sıralamak mümkündür. Dünya üzerinde bir bölgedeki uçuş noktası haritası çizge veri modeli şekline uyarlanabilir. Nitekim çizge veri modelinin kullanıldığı alanlardan birisi de bir yerleşim yerinin çizge veri modeli şeklinde modellenmesidir [59].



Şekil 3.4 : Uçuş intikali rota haritası.

Gerçekleştirilen sistem uçuş planı tasarlama ve yürütme olmak üzere iki alt sistemden oluşmaktadır. Uçuş planı tasarlama alt sisteminde Şekil 3.4’de uçuş planlama alt sistemi için, 15 uçuş noktalı, örnek bir rota haritası gösterilmiştir. Rota haritasında şehirlerarası her bağlantı uzunluk, güvenlik, yükseklik farkı olmak üzere üç değerden oluşan bir vektörle temsil edilmektedir. Uçuş planlaması yapıldığı için, şehirlerarası yolun yüksekliği de dikkate alınmakta ve üç boyutlu şehir haritası topolojisinde çözüm yapılmaktadır.

### 3.4 Tasarlanan Evrimsel Seyrüsefer Algoritması ve Operatörleri

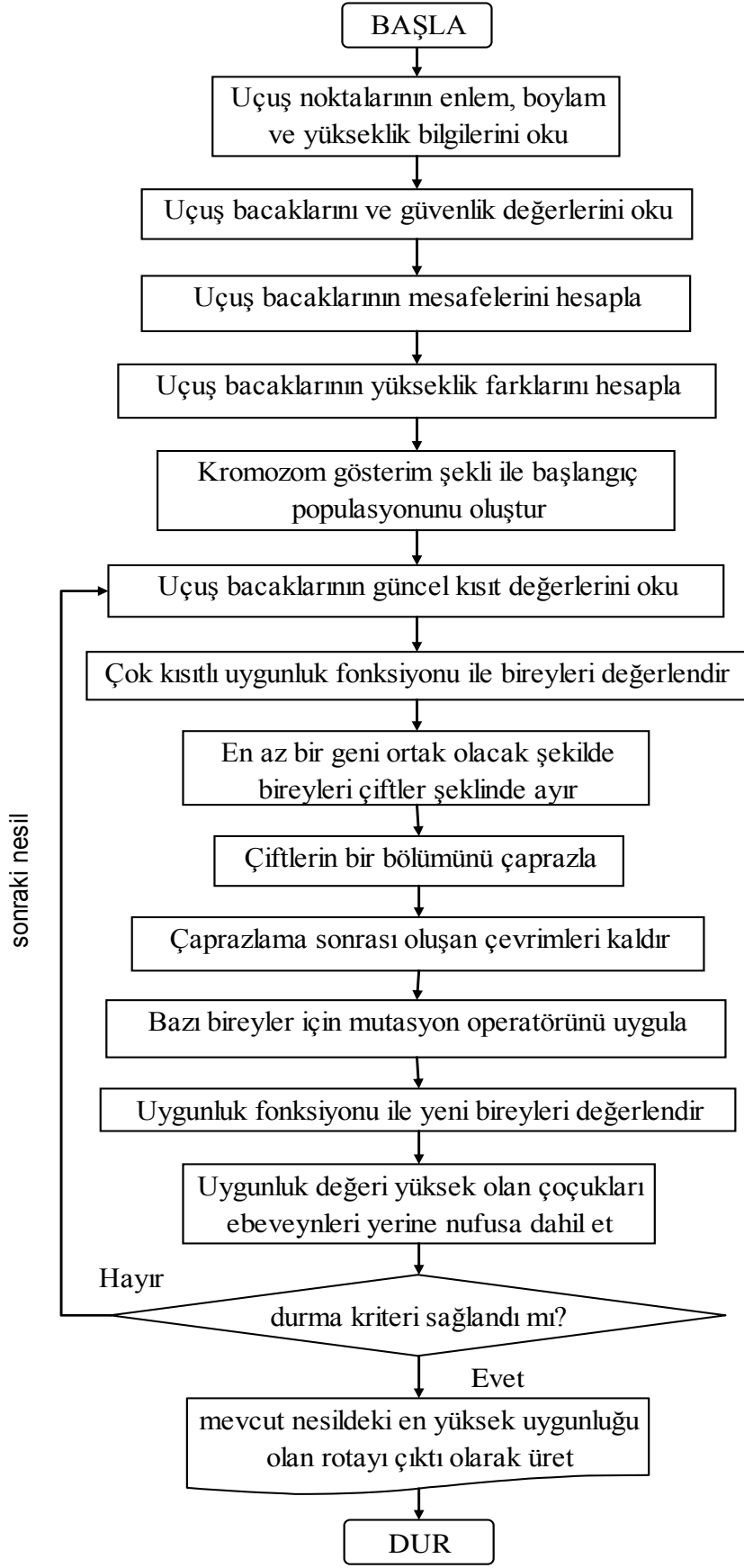
Tez kapsamında geliştirilen rota planlama sisteminde evrimsel hesaplama teknikleri kullanılmıştır. Evrimsel hesaplama bir optimizasyon işlemidir. Amacı hayatta kalacak bireylerin yeteneklerini geliştirmektir. Evrimsel hesaplama, bir arama işleminde doğal seçimin benzetimidir. Evrimsel hesaplamanın ana elemanları evrim stratejileri, evrimsel programlama, genetik algoritmalar ve genetik programlamadır [60]. Bu tekniklerin her biri doğal değerlendirmedeki gözlemlenen süreci taklit eder. GA’lar genel olarak evrimsel hesaplama alanındaki en yaygın kullanılan teknik olarak düşünülebilir. Genetik algoritma, evrimsel hesaplama tekniğinin bir parçası, evrimsel hesaplama ise yapay zekânın bir dalıdır. Herhangi bir problemin genetik

algoritma ile çözümleri, mümkün olan çözümleri sanal olarak evrimden geçirerek yapılmaktadır [61]. Genetik algoritma, rastlantısal arama tekniklerini kullanarak çözüm bulmaya çalışan, parametre kodlama esasına dayanan bir tekniktir [62]. Genetik algoritmalar mümkün olan çözümlerin bir nüfusu üzerinde işlem yapan, istatistiksel arama algoritmalarıdır [63]. Geleneksel programlama teknikleriyle çözülmesi zor olan sınıflandırma ve çok boyutlu eniyileme problemleri, daha kolay ve hızlı olarak çözüme ulaştırılmaktadır [64].

Evrimsel algoritmanın seyrüsefer planlama amacıyla kullanılmasında, her birey başlangıç noktasından bitiş noktasına olan bir rotayı göstermektedir ve kromozom ile kodlanarak gösterilir. Geliştirilen sezgisel yöntemde yolların temsili için değişken uzunluklu kromozomlar kullanılmıştır. Kromozomun ilk geni başlangıç noktası, son geni de bitiş noktasını göstermektedir. Kromozomlar permutasyon kodlama ile kodlanırlar. Her kromozom, rotada üzerinden geçilen düğümlerin numaralarından oluşan bir tamsayı dizisi şeklindedir. Evrimsel uçuş planlama alt sisteminin işleyişi Şekil 3.5'deki akış şemasında gösterilmiştir. Bireylerin kromozomlarla temsili gerçekleştirildikten sonra başlangıç nüfusu oluşturulur. Dinamik ortam şartlarının güncel hali alınarak, Denklem 3.5'de formülü verilen uygunluk fonksiyonu ile başlangıç nüfustaki bireyler değerlendirilir. Bireyler ebeveyn seçimi aşamasında çiftlere ayrılır ve bazı ikililer için çaprazlama yapılır. Çaprazlama aşaması sonrası çevrim içeren yollardaki çevrimler kaldırılır. Bazı bireyler için mutasyon yapılarak çeşitlilik sağlanır. Mutasyon sonucu, ebeveyn ve çocuk kromozomlar uygunluk fonksiyonu ile değerlendirilir, uygunluk değeri yüksek olan bireyler yaşatılır, diğerleri elenir. Bu çevrim birey benzerliği şartı sağlanıncaya kadar sürdürülür [65].

Uçuş planlama sisteminde ilk nüfus, rastlantısal olarak oluşturulur. Nüfustaki birey sayısı nesiller boyunca sabit kalan ve genetik algoritmanın çalışmasına etki eden önemli bir faktördür. İlk nüfustaki bireyler rastlantısal olarak üretildiğinden dolayı, herhangi bir veya birden fazla düğüm üzerinde çevrimler oluşabilir. Kullanılan genetik algoritma yaklaşımında bireylerde oluşan çevrimler kaldırılmaktadır, çünkü bu çevrimler oluştuğu anda kaldırılmazlarsa, çaprazlama sonucu bozuk bireylerin oluşmasına neden olabilirler [66]. Bireylerin kalitesi ve sonuca yakınlığı uygunluk fonksiyonu ile belirlenir. Tüm objektifleri bağlamak amacıyla genel bir uygunluk fonksiyonu tasarlanmıştır.





Şekil 3.5 : Uçuş planlama alt sistemi işlem adımları.

Sonlanma kriteri, genetik algoritmanın sonuca ulaşma süresini ve sonuca yakınsanmasını etkileyen önemli bir parametredir. Bu kriter, belli bir nesil üretme sayısı olabileceği gibi bireylerin belli bir oranda birbirine benzeşmesi veya neslin en başarılı bireyinin bir önceki neslin en başarılı bireyine eşit olması, yani uygunluk değeri açısından iyileşme kaydedilememesi gibi bir koşul da olabilir. Simülasyon aşamasında farklı sonlanma kriterleri kullanılarak, sonlanma kriterinin genetik algoritmanın çalışması üzerindeki etkisi belirlenmiştir. Sonlanma kriteri sağlanıncaya kadar ortaya çıkan en yüksek uygunluk değerli bireyin ifade ettiği rota çözümü verir. Bu problem için kullanılan sonlanma kriteri birey benzerliğidir. Tezde geliştirilen evrimsel yöntem ile kısıtlı zaman içerisinde kabul edilebilir en iyi çözüm bulunmaktadır. Yatay ve dikey seyrüsefer ve güdümlenme gibi gerçek zamanlı sistemler için milisaniye bazında bir işlem süresi bile çok önemlidir.

Uçuş planı tasarlama evresinde başlangıçta uçuş noktalarının enlem, boylam ve yükseklik değerleri ve maliyeti dinamik değişebilen üç farklı kısıtlı çizge yapısındaki rota parçası vektörü okunmaktadır. Çok kısıtlı eniyileme problemi için kısıtlar [uzunluk, güvenlik, yükseklik farkı] şeklinde üçlü bir vektör olarak düşünülebilir. Bir uçuş bacağı için km cinsinden uzunluğu  $d(x)$ , yüzdelik değer cinsinden askeri güvenlik parametresini  $s(x)$ , feet cinsinden yükseklik farkını  $f(x)$  olarak düşünülürse eniyileme fonksiyonunun kısıtları şu şekildedir:

$$\mathbf{max}[s(x)+(100-((f(x)/9000)*100))+(100-((d(x)/100 \text{ km})*100))] \quad (3.4)$$

Her  $x$  için;  $0 < d(x) < 100 \text{ km}$ ,  $0 < s(x) < 100$ ,  $0 < f(x) < 9000 \text{ feet}$

Evrimsel yöntemin bireyleri değerlendirmek için kullandığı amaç fonksiyonu,  $u(x)$ , Denklem 3.5'deki gibidir. Denklemdeki  $ubs$  çizgedeki toplam uçuş bacağı sayısını,  $s$  uçuş bacağının güvenliğini,  $d$  kilometre cinsinden uçuş bacağının uzunluğunu,  $f$  feet cinsinden uçuş bacağındaki irtifa farkını göstermektedir. Tüm uçuş bacakları için bu hesaplamalar yapılır ve elde edilen değerler toplanarak bireyin uygunluğu hesaplanır.

$$\mathbf{u(x)} = \sum_{i=1}^{ubs} \left( \begin{array}{l} A*s+B*[100-((f/9000 \text{ feet})*100)] \\ +C*[100-((d/100 \text{ km})*100)] \end{array} \right) \quad (3.5)$$

Tez kapsamında ele alınan platform olan Sikorsky S70-A atak helikopterinin azami uçuş yüksekliği 19000 feet, azami menzili de 460 km'dir. Platformun yetenekleri

doğrultusunda, iki uçuş noktası arası maksimum mesafe 54 nm = 100 km olarak alınmıştır. İki uçuş noktası arası maksimum irtifa farkı ise 9000 feet = 2743 metre olarak alınmıştır. Eğer pilotun tanımladığı uçuş bacakları maksimum mesafe ve maksimum yükseklik kısıtlarından herhangi birini sağlamıyorsa uçuş bacağı üzerinde geçici ara noktalar hesaplanır ve planlama bu noktalara göre yapılır. Örneğin 200 km uzunluğunda bir uçuş bacağı tanımlanmış ise bu uçuş bacağının tam ortasında geçici bir uçuş noktası oluşturulur. Benzer şekilde yükseklik farkı 5486 feet olan bir uçuş bacağı tanımlı ise bu uçuş bacağının dikey rotasında tam ortada geçici bir ara uçuş noktası oluşturulur.

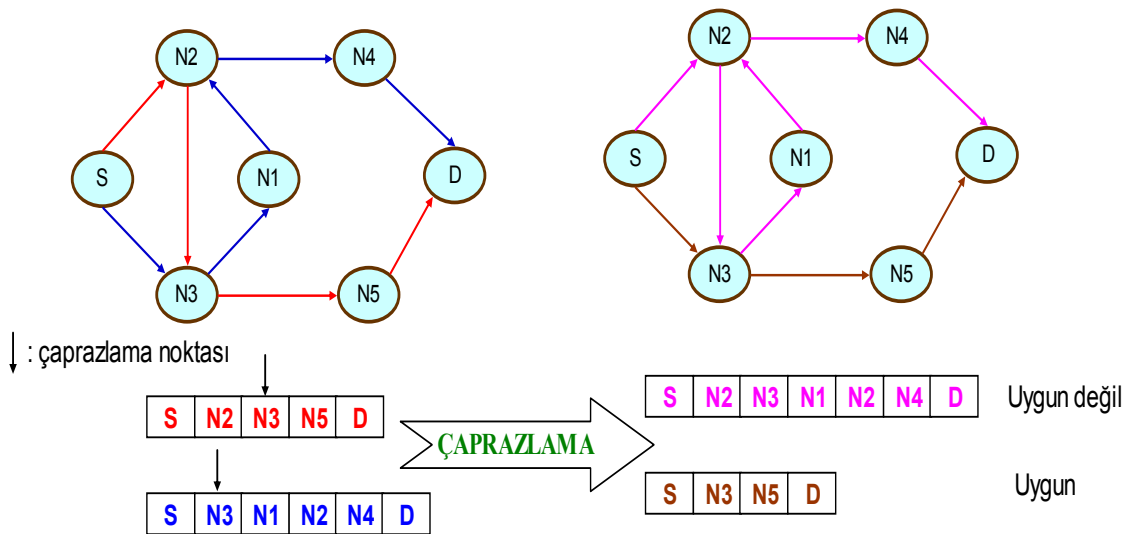
Uygunluk fonksiyonunun tasarımında tüm kısıtlar yüzdelerle çevrilerek aynı ölçüğe getirilmiştir. Güvenlik parametresi zaten yüzdelerle bir değer olduğundan herhangi bir çevrim yapılmasına gerek yoktur. Uygunluk fonksiyonunda yükseklik farkı ve mesafe parametreleri için bir normalizasyon yapılmış ve bu değerler yüzdelerle aralığa getirilmiştir. A katsayısı güvenlik parametresinin önem derecesini, B katsayısı yükseklik farkı parametresinin önem derecesini, C katsayısı ise yol mesafesi parametresinin önem derecesini göstermektedir. Katsayıların uygunluk fonksiyonu için seçilen değerleri ve önerilen değer aralıkları Çizelge 3.1’de gösterilmiştir. Önerilen değerlerin hesaplanmasında güvenlik ölçütü yüksek öncelikli olarak değerlendirilmiştir. Önerilen değerler kullanıldığında, güvenlik değerindeki %1 azalma, 1.5 km yol uzunluğu düşüşü ile dengelenebilir. Güvenlik değerindeki %1 azalma, 270 feet’lik irtifa farkı düşüşü ile dengelenebilir. Yol uzunluğu değerindeki 1 km’lik artış 180 feet’lik irtifa farkı düşüşü ile dengelenebilmektedir.

**Çizelge 3.1 : Uygunluk fonksiyonu katsayı değerleri.**

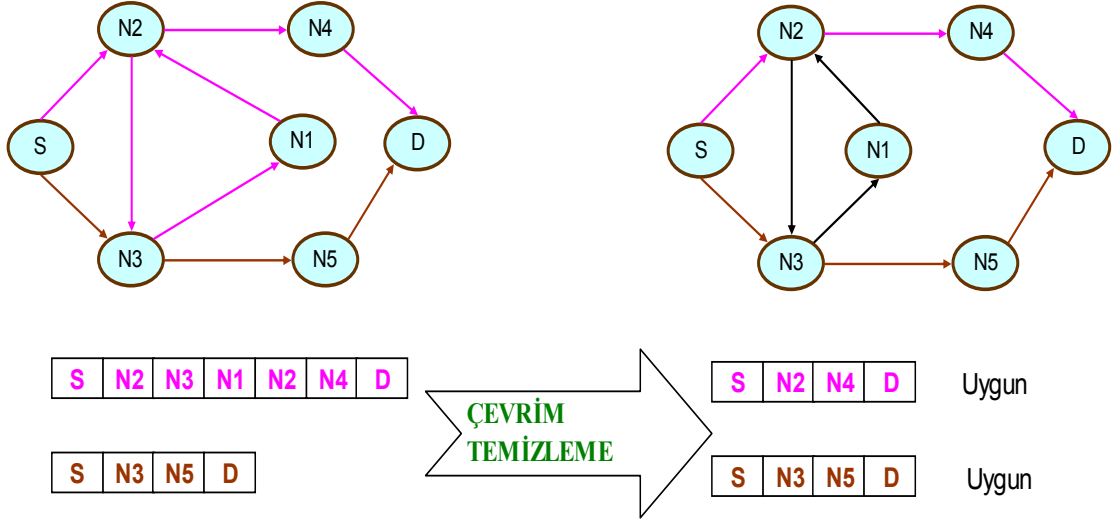
Katsayı	Önerilen değer	Önerilen değer aralığı
A (güvenlik parametresi katsayısı)	3	[1 – 5]
B (uzunluk parametresi katsayısı)	1	[0.5 – 1.5]
C (irtifa farkı parametresi katsayısı)	2	[0.75 – 3.25]

Ayrıca ölçeklendirme işleminden sonra yine de pilota kısıtların herhangi birine öncelik verebilmesi imkânının sağlanması için A, B, C katsayılarını dinamik olarak değiştirilebilme imkânı sağlanmıştır. Örneğin planlama alt sisteminin bulunduğu optimum plan yakıt analizinden geçemediyse uzunluk kısıdının ağırlığı artırılarak yakıt analizinden geçebilecek farklı bir plan araştırılabilir.

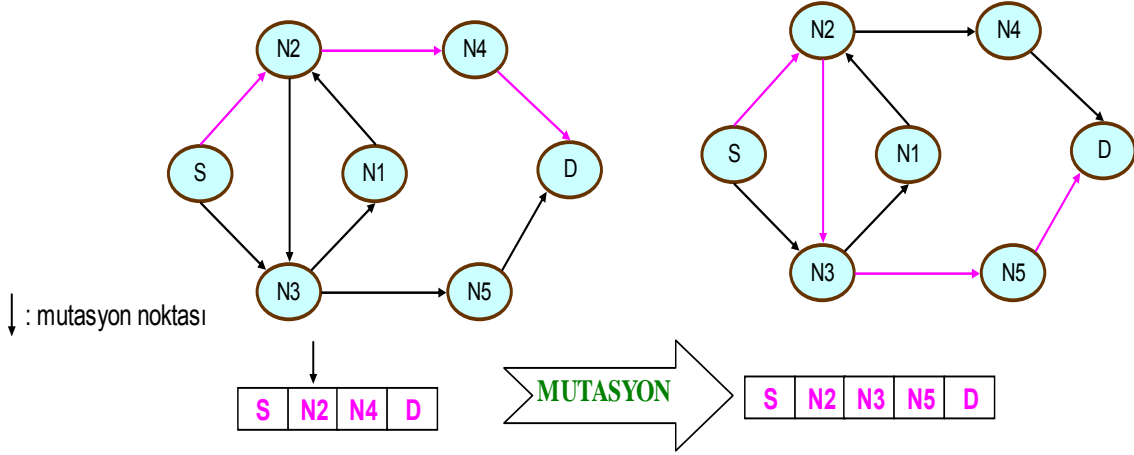
Bireye ait kromozomun uygunluk değeri, rotayı oluşturan her bağlantının uzunluk, güvenlik ve yükseklik farkı değerleri kullanılarak bulunur ve bu değer rotayı oluşturan bağlantı sayısına bölünür. Kromozomlar uygunluk değerlerine göre azalan sıra ile sıralanırlar. Nüfusun toplam kalitesini arttırmak için uygunluk değeri yüksek kromozomların bir sonraki neslin gen havuzuna alınma şansını yükselten bir seçim operatörü kullanılır. Seçim operatörü sonucun araştırılmasını, çözüm uzayının belirli bölgelerinde yoğunlaştırır. Önerilen algoritmada, sonraki nesil için, en iyi kromozomların korunması ve örneklemeden kaynaklanacak istatistiksel hataların önlenmesi amacıyla rulet tekeri isimli seçim tekniği kullanılmıştır. Rulet tekeri tekniğine göre topluluktaki tüm bireylerin uygunluk değerleri toplanır. Bir bireyin seçilme olasılığı, uygunluk değerinin bu toplam değere oranı kadardır. Çaprazlama aşamasında, çaprazlama bölgesinden sonraki genler, ebeveyn kromozomlar arasında takas edilir. Çaprazlama noktaları iki kromozomdaki genlerin aynı olduğu noktadır. Geliştirilen algoritmada iki kromozom ancak ortak gene sahipse çaprazlanabilir. Çaprazlama işlemi sonucu tekrarlı genler içeren çevrimler oluşabilir. Çevrimler varsa algoritma bu çevrimleri temizler ve kromozomu kısaltır. Mutasyon nüfustaki genetik çeşitliliği artırır ve aday kromozomun genlerini değiştirerek bölgesel en iyi çözümlere takılma durumunu engeller. En kısa yol probleminde bir kromozomun herhangi bir geni değiştirdiğinde kromozom geçerliliğini yitirebilir. Bu nedenle tek bir gen değişimi için bir dizi gen değiştirilerek kromozomun uygunluğu korunur. Örnek çaprazlama işlemi Şekil 3.6'da, çevrim temizleme işlemi Şekil 3.7'de, örnek bir mutasyon işlemi Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6 : Çaprazlama operatörü.



Şekil 3.7 : Çevrim temizleme operatörü.

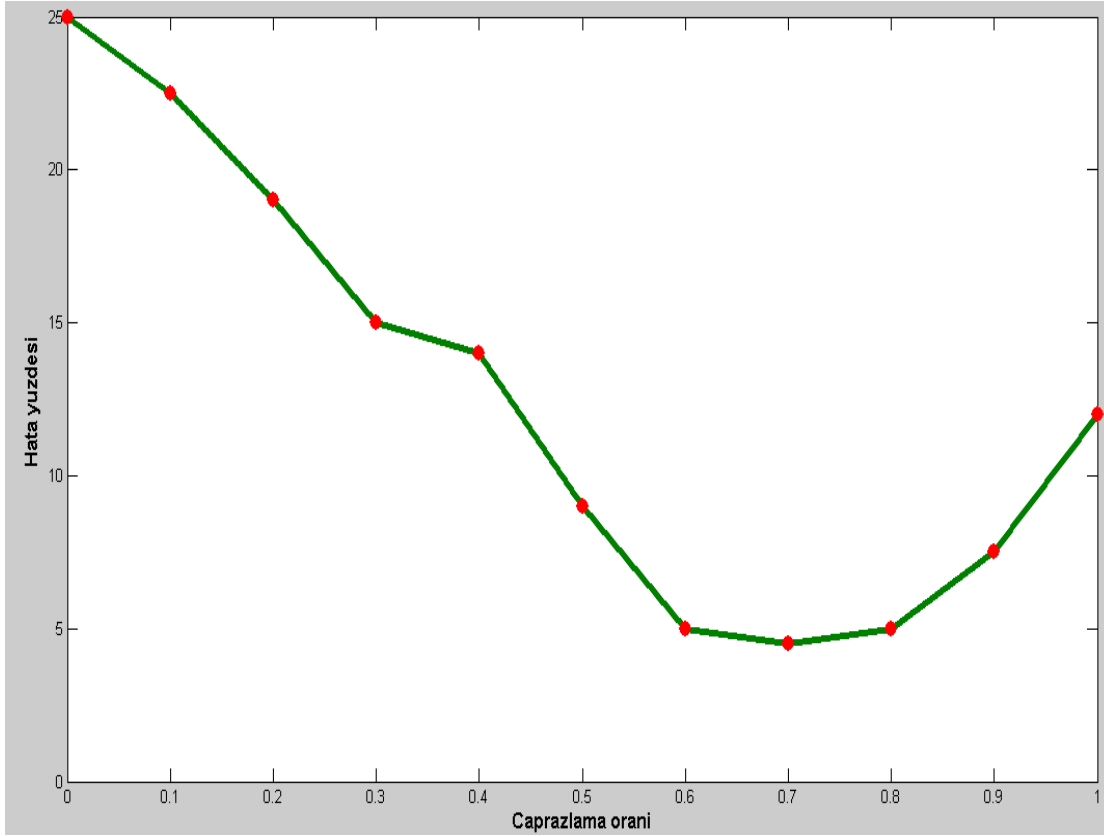


Şekil 3.8 : Mutasyon operatörü.

Bu çalışmada kullanılan çaprazlama yöntemi, klasik çaprazlama yöntemlerinden farklıdır. Bu yöntem iki kromozom arasında rotanın bir bölümünün takas edilmesi esasına dayanır. Bunun için çaprazlama yapılacak iki bireye ilişkin rotaların ortak noktalarından herhangi biri seçilir ve ilk çocuk için, seçilen noktaya kadar olan rota ilk ebeveynden, seçilen noktadan sonraki rota ikinci ebeveynden alınır. İkinci çocuk birey için ise ortak noktaya kadar olan rota ikinci ebeveynden, ortak noktadan sonraki rota ilk ebeveynden alınır. Böylece iki yeni rotayı temsil eden iki çocuk birey elde edilmiş olur. Başlangıç popülasyonunda rotalarının bir bölümü ortak olan bireyler üretilir, her düğümün en az iki bireyde bulunması garanti edildiğinden bireyler çaprazlama operatörünün uygulanmasına uygun olarak seçilmiştir.

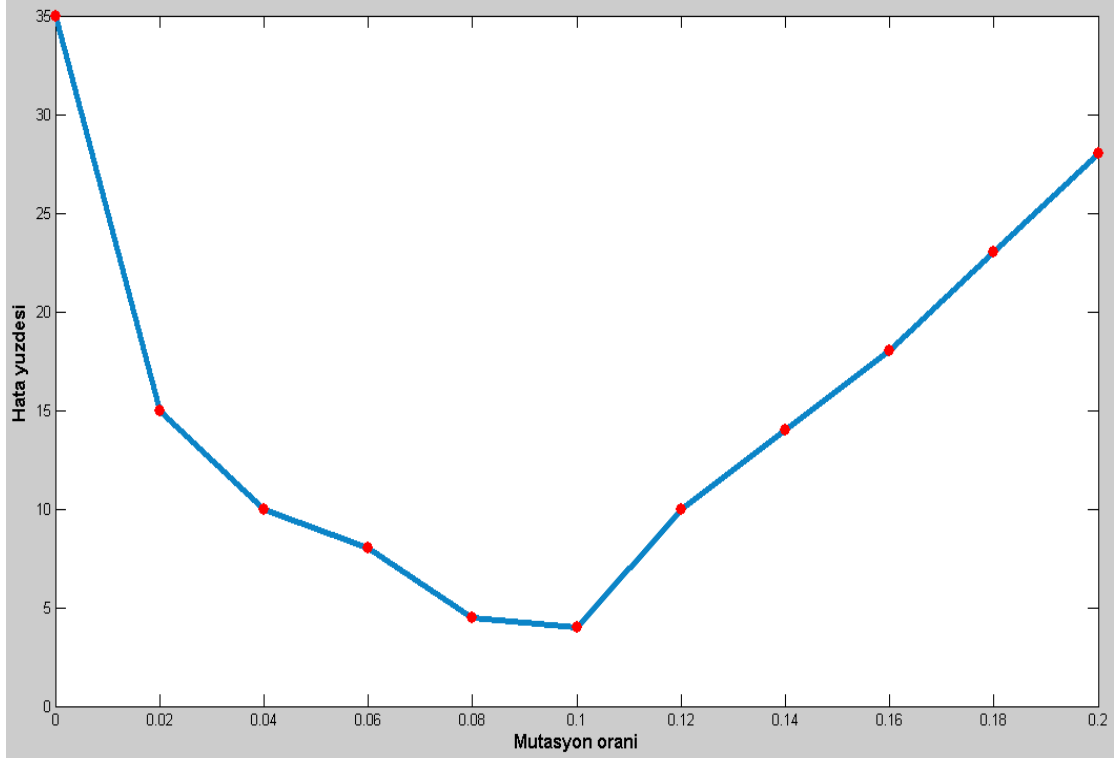
50 uçuş noktalı, 250 bağlantı içeren bir çizge için simülasyonlar 1000 kez tekrarlanarak çaprazlama oranına göre sapmalar hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da

gösterilen grafikte X eksenini çaprazlama oranını, Y eksenini de ilgili çaprazlama oranı için nesil içindeki uygunluk değeri en yüksek olan bireyin gerçek sonuca uzaklığını gösteren sapma yüzdesi değeridir. Nüfustaki birey sayısı olarak  $N = 20$  seçilmiştir. Çaprazlama oranı için, denemeler sonucu en uygun değer %70 olarak belirlenmiştir.



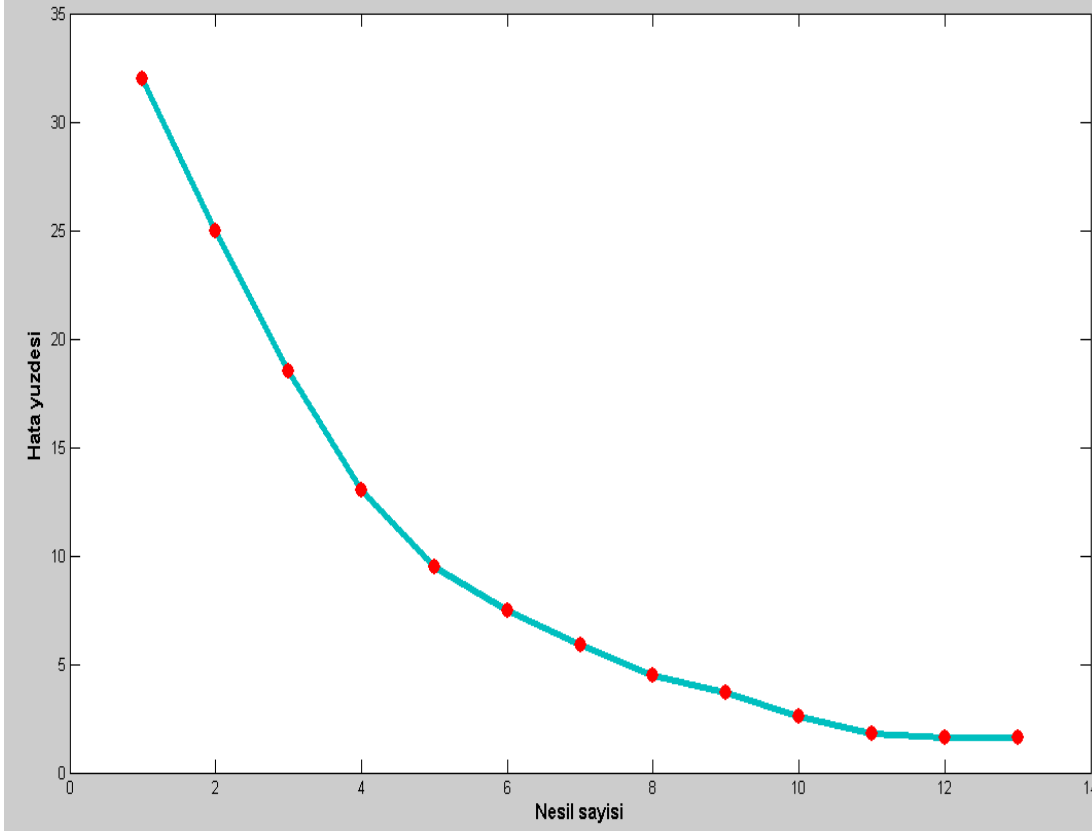
**Şekil 3.9 :** Çaprazlama oranına göre hata yüzdesi değişimi.

50 uçuş noktalı, 250 bağlantı içeren farklı bir çizge için simülasyonlar 1000 kez tekrarlanarak mutasyon oranına göre sapmalar hesaplanmıştır. Şekil 3.10'da gösterilen grafikte X eksenini mutasyon oranını, Y eksenini de ilgili mutasyon oranı için nesil içindeki uygunluk değeri en yüksek olan bireyin gerçek sonuca uzaklığını gösteren sapma yüzdesi değeridir. Nüfustaki birey sayısı olarak  $N = 20$  seçilmiştir. Mutasyon oranı için, denemeler sonucu en uygun değer %10 olarak belirlenmiştir.



**Şekil 3.10 :** Mutasyon oranına göre hata yüzdesi değişimi.

Geliştirilen evrimsel algoritmada, nesiller ilerledikçe uygunluk değeri daha yüksek, çözüme daha yakın bireyler nüfusta yayılır. 50 uçuş noktalı, 250 bağlantı içeren bir çizge için deneyler 1000 kez tekrarlandıktan sonra ortalama alınarak bulunan nesiller boyu sapma değerleri Şekil 3.11'deki grafikte gösterilmiştir. X eksenini nesil sayısını, Y eksenini de nesil içindeki uygunluk değeri en yüksek olan bireyin gerçek sonuca uzaklığını gösteren sapma yüzdesi değeridir. Bu örnek için nüfustaki birey sayısı  $N=30$  olarak seçilmiştir. Her nesilde çözüme en yakın bireyin gösterilmesi için yapılan deneylerde çaprazlama oranı %70 ve mutasyon oranı %10 olarak kullanılmıştır. Her nesilde çözüme daha çok yaklaşım sağlanmaktadır, fakat birey benzerliği sağlandıktan sonra nesiller arasındaki birey uygunlukları birbirine yaklaşmaktadır. Geliştirdiğimiz evrimsel algoritma birey benzerliğini durma ölçütü olarak kullandığından bu ölçüt sağlandığında sonlandırılmaktadır.



**Şekil 3.11 :** Evrimsel algoritma hata oranı ile nesil sayısı ilişkisi.

Popülasyondaki birey sayısı, genetik algoritmanın çalışma hızına ve bulduğu sonucun gerçek çözüme yakınlığına etki edecek çok önemli bir parametredir. Simülasyon aşamasında bu parametrenin değeri değiştirilerek genetik algoritmanın başarımı üzerindeki etkisi belirlenmiştir.

Geliştirilen evrimsel seyrüsefer planlama algoritmasında evrimsel algoritmanın parametreleri uçuş simülasyonları ile bulunmuştur. Problemin çözümünde kullanılan evrimsel algoritma operatörleri şunlardır;

- Sonlanma kriteri : birey benzerliği (%95)
- Popülasyon boyu : kenar sayısı ile orantılı
- Kromozom boyu : değişken uzunluklu
- Çaprazlama oranı : %70
- Mutasyon oranı : %10
- Gösterim yöntemi : permutasyon kodlama
- Seçim yöntemi : rulet tekeri yöntemi



### 3.5 Yakıt Planlama Regresyonu

Hava aracı için bulunan uçuş planını gerçekleştirmek için gereken yakıt miktarını gösteren fonksiyon  $y(x)$  ve yakıt tankında ölçülen yakıt miktarı  $Y$  ise,  $y(x) < Y$  şartı sağlanmalıdır. S70-A Sikorsky atak helikopterine ilişkin gerçek uçuş verileri ve ortam koşulları kullanılarak alınan veri kümesine göre regresyon analizi yapılmış ve uygun yakıt akış hızı denklemleri bulunmuştur. Yakıt akış hızı tahmini için regresyon yöntemiyle bulunan formüller aşağıdaki gibidir. Formüllerde yakıt akış hızı  $fr$ , sıcaklık  $T$ , yükseklik  $h$ , hava hızı  $V$ , ağırlık  $g$  ile ifade edilmiştir.

Sıcaklık  $\leq 0$  durumu için:

$$fr = - 66.7 + 0.5817*T - 0.9395*h^{1/2} + 17.3483*V^{1/2} + 5.8181*g^{1/2} \quad (3.6)$$

Sıcaklık  $> 0$  durumu için:

$$fr = - 147.77 + 0.4257*T - 0.7765*h^{1/2} + 13.651*V^{1/2} + 6.9755*g^{1/2} \quad (3.7)$$

Geliştirilen regresyon analizi ile hesaplanan tahmini yakıt akış hızı bilgisi ile uçuş planlama alt sistemi tarafından bulunan en iyi uçuş planındaki toplam uçuş menzilinün tamamlanıp tamamlanamayacağı bulunur. S70-A Sikorsky helikopterinin ortalama uçuş hızı pilot tarafından ayarlanabilir durumdadır. Geliştirilen yakıt analizi algoritması uçuş planı üzerindeki her uçuş bacağı için uçuş bacağı için sıcaklık, yükseklik, hava hızı ve ağırlık değerlerine göre her bir uçuş bacağı için ayrı ayrı hesaplanan yakıt akış hızına göre görevin tamamlanabilme durumu analiz edilir. Regresyon ile her bir uçuş bacağı için ayrı ayrı hesaplanan yakıt akış hızı değerleri uçuş bacağının uzunluk ve yer hızı değerine göre hesaplanan tahmini uçuş süresi ile çarpılır. Bu çarpım değerleri toplanarak uçuş planının icrası için gerekli yakıt miktarı hesaplanır. Eğer uçuş planı alt sisteminin çok kısıtlı eniyileme ile ürettiği uçuş planının gerektirdiği toplam yakıt mevcut yakıttan fazla ise alternatif uçuş planı bulunur. Eğer hiçbir şekilde mevcut yakıtla tamamlanacak bir uçuş planı bulunamıyorsa en güvenilir, en kısa, en düz uçuş rotasında hava aracının gidebileceği uçuş noktasına kadar gidebilmesi için gerekli uçuş planı üretilir ve uçuş planı çalıştırma alt sistemine giridi olarak verilir. Şekil 3.12'de Sikorsky S-70A helikopteri için sıcaklık, yükseklik, hız ve ağırlık kısıtlarına göre değişen gerçek yakıt akış hızı değerleri ve regresyonla tahmini olarak hesaplanan yakıt akış hızı değerleri ve

regresyon analizinin hata yüzdesi gösterilmiştir.

SICAKLIK (Derece)	YÜKSEKLİK (Feet)	HAVA HIZI (Knots)	TOPLAM AĞIRLIK (LB)	GERÇEK YAKIT AKIŞ HIZI (LB / sa)	DENKLEMLE BULUNAN YAKIT AKIŞ HIZI (LB / sa)	DENKLEM HATA YÜZDESİ
-30	0	40	6000	480	476,2309712	0,785214334
-30	0	120	10000	685	687,6937049	0,393241589
-30	2000	40	7000	475	470,3243358	0,984350357
-30	2000	40	8000	500	503,9338498	0,786769952
-30	4000	40	7000	450	452,9208559	0,649079082
-30	4000	40	8000	482	486,5303698	0,939910752
-30	6000	40	10000	531	534,599526	0,677876834
-30	8000	40	6000	392	392,1995366	0,050902194
-30	8000	40	10000	523	523,3414485	0,065286514
-30	10000	120	6000	465	462,601793	0,515743437
-30	12000	40	9000	477	474,5992441	0,503303114
-15	0	40	6000	484	484,9564712	0,197618016
-15	0	120	9000	665	666,5626345	0,234982636
-15	2000	40	10000	577	574,0826658	0,505603853
-15	2000	120	9000	623	624,5469172	0,248301321
-15	4000	40	7000	458	461,6463559	0,796147569
-15	6000	40	10000	546	543,325026	0,48992198
-15	8000	120	6000	485	481,2458584	0,774049809
0	2000	40	7000	488	487,7753358	0,046037745
0	2000	40	10000	585	582,8081658	0,374672519
0	4000	40	7000	473	470,3718559	0,555633009
0	4000	40	10000	569	565,4046858	0,631865408
0	6000	40	6000	419	420,9086141	0,455516496
0	6000	40	9000	527	522,1939556	0,911962879
15	2000	120	9000	631	635,1738115	0,661459828
15	4000	40	10000	596	593,3830326	0,439088487
15	6000	40	6000	427	425,1156799	0,441292754
15	6000	120	10000	646	645,5484813	0,069894538
15	8000	120	6000	481	479,0135479	0,412983805
15	10000	120	9000	592	592,2499472	0,042220812
30	2000	40	8000	538	540,5102561	0,466590347
30	2000	120	10000	673	677,355277	0,647143679
30	4000	120	10000	665	662,9712406	0,305076603
30	6000	40	6000	431	431,5011799	0,116283049
30	8000	40	8000	508	505,7841204	0,436196776

**Şekil 3.12 :** Sikorsky S-70A helikopteri için örneklenen yakıt akış hızı bilgileri.

Gerçek yakıt akış hızı verileri, Sikorsky S70-A helikopteri teknik el kitabındaki yakıt akış hızı grafikleri okunarak örneklendirilmiştir [67].

### 3.6 Evrimsel Algoritmanın Uçuş Planlama Sistemindeki Yenilikleri

Klasik eniyileme teknikleri ile güvenlik ve uzunluk gibi yolun maliyetini etkileyen kısıtların çözüme etkisi modellenabilir. Fakat atak helikopterin dinamik ortamda uçuş planlamasının yapılması gibi kısıtların sürekli değişebildiği problemlerde çözüme yeniden başlanması işlem süresini uzatacağından klasik teknikler uygun değildir. Statik çizgelerde çözüm üretmede etkin Dijkstra, Floyd, A-Star benzeri gerekirci algoritmalar dinamik çizgeler için çözüm üretemeyeceğinden bu durumlarda en kısa ve en güvenilir yolun bulunması için evrimsel algoritma gibi

sezgiye dayalı yaklaşımlar kullanılır. Evrimsel algoritmalar intikal probleminin durağan senaryolarında işlem sayısını azaltmaz, bu nedenle statik intikal senaryoları için fazla tercih edilmezler. Fakat intikal senaryosunun dinamik ve çizgedeki bağlantıların maliyetini belirleyen kısıtların değişken olduğu durumda evrimsel yöntemler çözüme baştan başlamadan en iyiye yakınsama özelliğine sahiptir. Kısıtlı süre içerisinde, kabul edilebilir en iyi çözümlerin arandığı problemlerde genetik algoritmayı çekici hale getiren en temel özellik, doğal olarak paralel arama yapmasıdır. Tez çalışmasında tasarlanan uçuş planlama alt sistemi ile dinamik kısıt değişimlerinde mevcut çözümün korunarak arama uzayında kalınan noktadan çözüme devam edilmesi sağlanmıştır. Planlama alt sisteminde çizge düğüm noktaları arasındaki kenarlar için üç kısıtlı maliyet vektörleri kullanılmış ve çok parametrelili maliyet hesabı uygunluk fonksiyonu tasarlanmıştır. Evrimsel algoritmada değişken uzunluklu kromozomlar kullanılarak arama uzayının tümünün kapsanması sağlanmıştır. Seyrüsefer planlama için özgün çaprazlama, mutasyon ve çevrim kaldırma operatörleri tasarlanmıştır. Çaprazlama oranı, mutasyon oranı gibi değerlerin uçuş planlama problemi için uygun değerlerinin bulunması sağlanmıştır.

Geliştirilen algoritma başlangıç ve hedef düğümleri arasında parçalı intikal yapabilmekte, büyük bir intikali küçük alt parçalara ayırarak planlayabilmektedir. Karmaşık ve yoğun bir çizge yapısı için, özellikle bağlantı sayısı fazla ise ve geçilmesi gereken bazı ara noktalar biliniyorsa tek bir intikal planı yerine parçalı intikal yapılabilir.

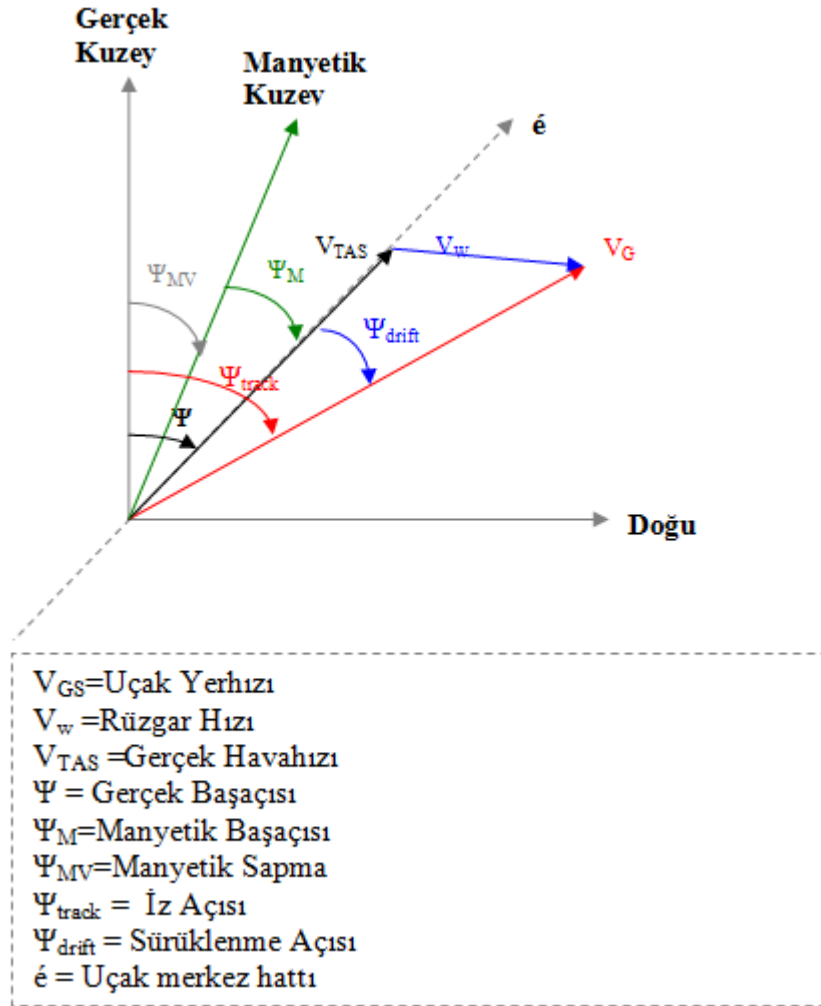


#### 4. SEYRÜSEFER VE GÜDÜMLEME ALGORİTMALARI

Hava araçlarının icadıyla beraber hava sahası terimi de önem kazanarak, devletler topraklarının üzerindeki alanlarda amaçsız uçuşları engellemeye çalıştılar. Bu dönemdeki en önemli sorun da uçuş süresi boyunca pilotların kaybolmamak için yerlerini belirlemesiydi. Uçuşun belli bir amacı olması gerektiği de hesaba katılırsa, seyrüsefer, yani yer ve hızın tespiti kavramının önemi daha da açığa çıkmış olur. Hava araçlarının ilk pilotaj dönemlerinde, yön bulmak gerçekten zordu. Uçaklarda hız ölçümü için anemometre, yükseklik ölçümü için barometre ve yön tayini içinde yüzyıllardır denizcilikte kullanılmış eski pusula sistemi kullanılmaktaydı. Hızın vektörel değişimi hesaplanabilirse, bazı entegral hesaplarıyla yer değişimi bulunabilir. Eğer başlangıç pozisyonu da bilinir ise hava aracının zamana bağlı koordinatları elde edilmiş olunur. Fakat hava araçları denizciliktekine oranla çok daha yüksek hız ve ivmeyle hareket ettiği için bu işlemi, sadece kontrolü elinde tutan pilota bırakmak yanlış olurdu. Bu sebepten yardımcı bir pilota ihtiyaç duyuluyordu. Bu iki pilotun uyumu eski zamanların seyrüsefer mantığını oluşturuyordu. Daha sonra 1920'lerde aydınlatma yeteneklerinin de gelişmesiyle özellikle posta uçaklarına yardımcı olmak için Amerika'nın belirli yerlerine rotalarını belirten aydınlatma kuleleri kuruldu. Bu sistemin ötekinden pek de bir farkı olmayıp yine pilotun gözlemine bağlı bir sistemdi. Daha sonra gelişen anten teknolojisiyle uçaklara pilotun yanı sıra sensör de denilen harici gözler takılmaya başlandı. Bu gözler yerdeki radyo dalgalarını saçan kuleleri kullanarak yer bulmaya yardımcı olmaya başlamıştı. Bu sensörler kuleden aldığı bilgiyi kullanarak çeşitli göstergelerle pilota aktarıyordu.

Hava seyrüseferi, bir uçağın bir noktaya yöneltmesi ve her an bulunduğu yerin bilinmesi sanatıdır. Tüm seyrüsefer yardımcı cihazları, hava taşıtlarına temel olarak pozisyon bilgisi sağlarlar. Buna göre, bir hava taşıtının pozisyonunun belirlenebilmesi için açılış bilgisine ihtiyaç vardır. Bütün bu bilgiler seyrüsefer yardımcı cihazlarıyla sağlanır. Seyrüseferin esaslarını anlamak için seyrüsefer kapsamında bulunan bazı terimleri bilmek gerekmektedir. Bir hava seyrüseferi için

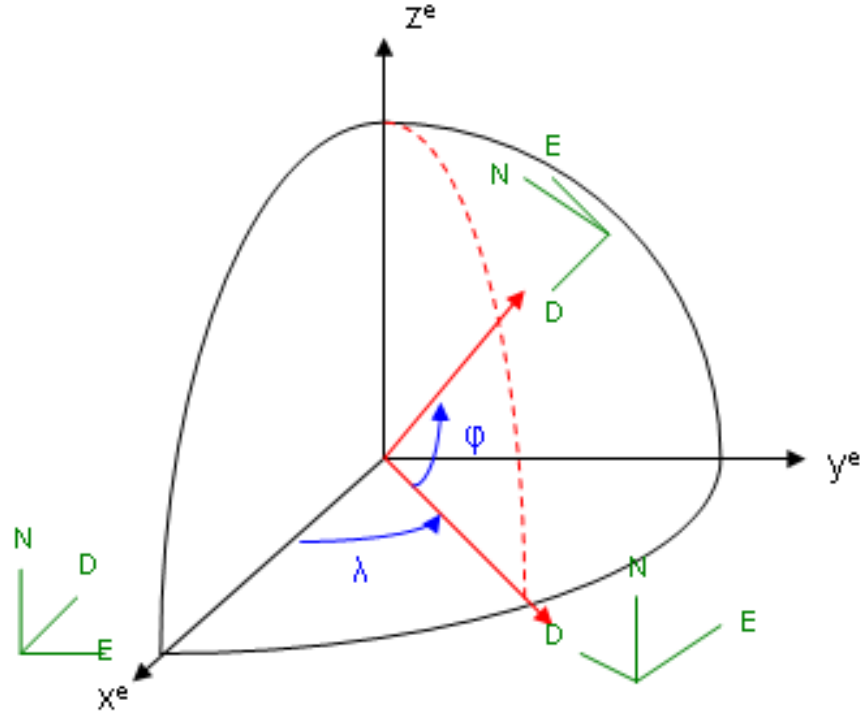
kullanılan asli referanslar; pozisyon, istikamet, mesafe ve zamandır. Pozisyon, tespit veya ifadesi koordinatlarla tarif edilen bir noktadır. Pozisyon, daima tanımlanabilecek bir yeri ifade eder. İstikamet, aralarında mesafe referansı olmaksızın uzaydaki bir noktanın diğerine göre pozisyonudur. İstikamet kendi başına bir açı değildir. Fakat çoğu zaman bir referans istikametinden açısal mesafe olarak ölçülür. Mesafe, iki nokta arasındaki uzaysal bir ayırım olup, onları birleştiren hattın ölçülmesiyle elde edilir. Mil, metre, yarda vb. ile ifade edilir. Zaman, birçok yolla ifade edilir, fakat seyrüseferde günü, saati geçen aralıklardır. Seyrüsefer ve güdümlenme algoritmalarında kullanılan açılar ve hız ilişkileri aşağıdaki Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : Seyrüsefer açı ve hız tanımları.

Coğrafi koordinat sistemi, dünya üzerindeki herhangi bir yeri topografik bir nokta olarak tanımlamayı sağlayabilen bir koordinat sistemidir. Yeryüzünün tümünün veya bir parçasının fiziksel şeklini belirlemek için, önceden tanımlanmış bir koordinat

sisteminde koordinatı bilinen noktalara gerek vardır. Koordinat eksenleri Şekil 4.2'de gösterilmiştir [68].



Şekil 4.2 : Koordinat eksenleri.

Genel olarak iki temel koordinat sistemi mevcuttur. Üzerinde ölçü yapılan nokta koordinatlarının yeryüzü ile birlikte döndüğü koordinat sistemine Yer Merkezli Yer Sabit (ECEF) koordinat sistemi denmektedir. ECEF koordinat sisteminin merkezi yerin kitle merkezi ile çakışmıştır. X ve Y eksenleri yer ile birlikte dönmekte, böylece uzayda sabit doğrultular tanımlanamamaktadırlar. Diğer taraftan, yeryüzündeki sabit bir noktanın ECEF sistemindeki koordinatları sürekli sabit olacaktır. ECEF koordinat sisteminin temel amacı, yeryüzünde GPS ölçüsü yapan ve bunun sonucunda zamana bağlı koordinat elde eden kullanıcının ulaşabileceği uygun bir referans sistemi oluşturmaktır. ECEF dünya ile birlikte döner.  $z^e$  dünyanın kutup eksenidir.  $x^e$  eksenleri Greenwich meridyeni ile ekvator düzleminin kesişimi doğrultusundadır.  $y^e$ ,  $x^e$  ve  $z^e$  eksenlerine diktir. Seyir eksenleri seyir bilgisinin tanımlandığı eksenlerdir. Bu eksenler kuzey, doğu ve aşağı yönde tanımlanmıştır. Aracın hızı ve yönelimi seyir eksenlerine göre tanımlanır.

Yerel Jeodezik Koordinat Sisteminin (LGS) başlangıç noktası GPS alıcı antenin üzerine kurulduğu noktadır. ECEF den LGS sistemine dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir. Aşağıdaki matriste sinüs "s", kosinüs "c", enlem " $\Phi$ ", boylam " $\lambda$ "

ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} -s\varphi & 0 & c\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -c\varphi & 0 & -s\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c\lambda & s\lambda & 0 \\ -s\lambda & c\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s\varphi c\lambda & -s\varphi s\lambda & c\varphi \\ -s\lambda & c\lambda & 0 \\ -c\varphi c\lambda & -c\varphi s\lambda & -s\varphi \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Tezde geliştirilen özgün güdümlenme sistemleri ile hava aracının rotasında, istenilen uçuş rotasına göre herhangi bir sapma olduğunda, sapmayla orantılı, hava aracını yatayda yeniden o rotaya sokacak yalpa açısı komutu hesaplanır. Ayrıca hava aracının rota değiştirmesi gereken zamanlarda da, bir sonraki rotaya oturmasını sağlayacak yalpa komutunun hesaplanması gerekmektedir. Hava aracının alçalma, yükselme, iniş, kalkış ve istenen irtifada uçuşunun sağlanması için dikeyde yunuslama açısı komutu hesabı yapılmaktadır. Böylece yatay ve dikeyde gerçek zamanlı olarak bir geri besleme ile hava aracının istenilen uçuş planına göre istenilen uçuşu sağlaması ve uçuş hattında tutulması sağlanmaktadır.

Tez kapsamında uçuş senaryoları ile çalışma yapıldığı için yatay ve dikey güdümlenme algoritmaları ayrı ayrı incelenip elde edilen sonuçlar birleştirilmiştir.

#### 4.1 Yatay Seyir Hesaplamaları

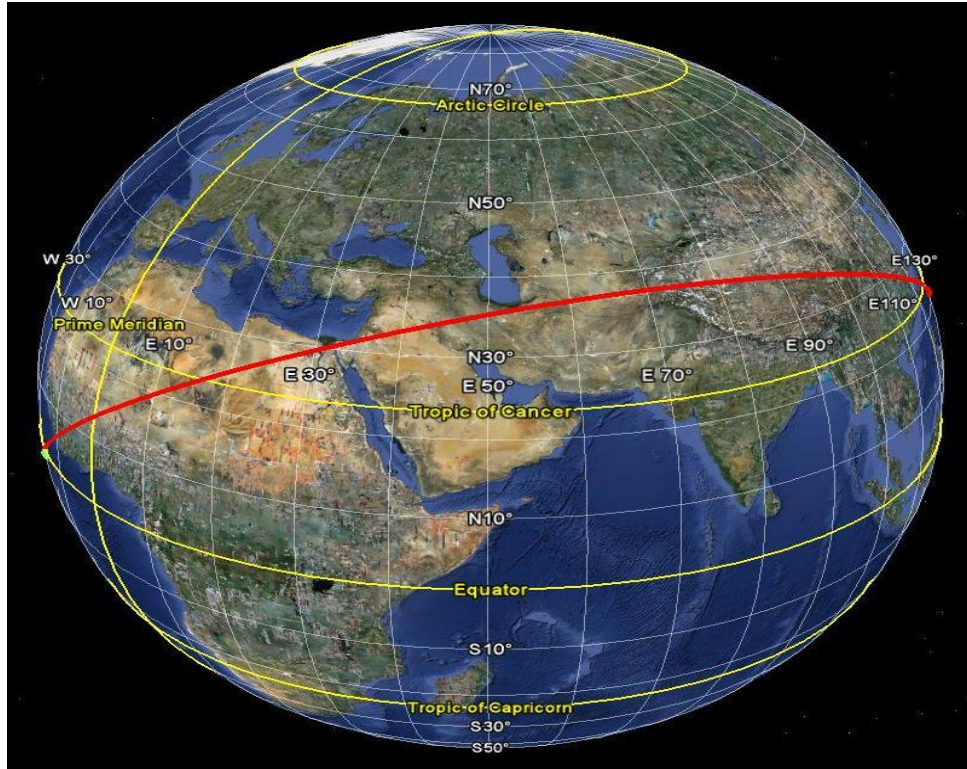
Hava araçlarının yatay seyrüsefer yapmasını sağlayan oto pilot işlevidir. Yatış açısını ayarlayarak hava aracını rotaya oturtmak için kullanılır. Yatay seyrüseferin en temel hesaplamaları mesafe ve yönelim hesabıdır. Uzaklık ve yönelim hesabı fonksiyonunda kullanılan denklemler, Williams'ın havacılık hesaplamaları ve formüllerini yayınladığı kitabından alınmıştır [68]. İz açısı farkı, uçuş hattına dik mesafe, yatay ve dikey sapma mesafeleri, yalpalama açısı düzeltmesi hesaplamaları özgün olarak geliştirilmiştir ve bu hesaplamalarda Williams'ın kitabından alınan büyük daire mesafesi, koordinat ve kesişim noktası formülleri, kullanılmıştır. Yatay seyrüsefer bu temel fonksiyonlara ek olarak uçuş planından paralel sapma ve zaman temelli seyir planlaması fonksiyonlarını da içerir.

##### 4.1.1 Uzaklık ve yönelim hesaplama

Bu fonksiyon, büyük daire yaklaşımıyla, koordinatları bilinen iki nokta ( $P_1$ ,  $P_2$ ) arasındaki mesafeyi ve kuzeyle yönelimini hesaplar. Büyük daire, merkezi daire merkezinden geçen ve küre üzerindeki çizilebilecek en geniş dairedir. Düzlem

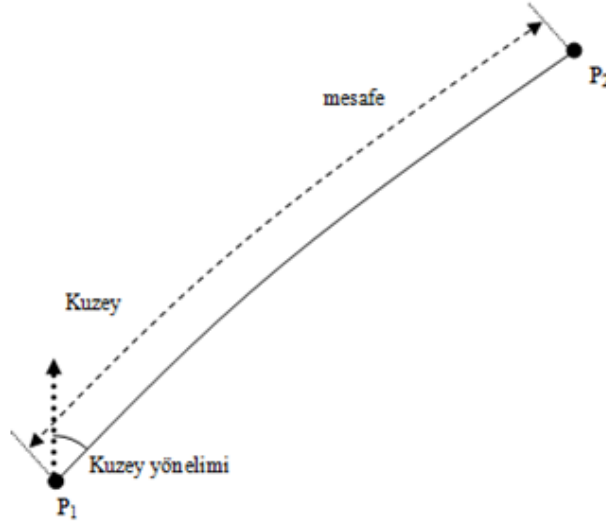


üzerinde iki nokta arasındaki en kısa mesafe iki noktayı birleştiren doğru parçasıdır. Küre üzerinde ise iki nokta arasındaki en kısa mesafe bu iki noktadan geçen büyük daire yayıdır. Yer üzerindeki iki noktayı birleştiren büyük daire yayı üzerinde yapılan seyre de büyük daire seyri denilmektedir. Aslen bir düzlem olmayan dünyanın, bir düzlem olan haritada gösterilmesinden kaynaklanan, iki nokta arasındaki en kısa mesafenin bir çizgi olarak değil de bir eğri olarak gösterilmesinden yola çıkılmıştır. Yeryüzü üzerindeki iki nokta arasındaki en kısa mesafe iki noktadan da geçen büyük daire üzerindeki, sınırları bu iki nokta olan yayın uzunluğudur. Uzun mesafe uçuşlarda uçuş planı, bu yay parçasına en yakın olabilecek şekilde bir rota ile yapılır. Dünya üzerindeki iki nokta arasındaki kuş uçuşu mesafe Şekil 4.3'deki gibidir [68].



**Şekil 4.3 : Büyük daire mesafesi.**

Büyük daire seyri için, Şekil 4.4'de görüldüğü gibi, koordinatları verilen iki uçuş noktası arasındaki uçuş mesafesi hesaplanır. Kuş uçuşu uzaklık ölçümünde yükselti, engebe gibi faktörlerin etkisi yoktur. Çünkü uzunluk ölçümü havadan ve en kısa mesafe olacak şekilde hesaplanır.



**Şekil 4.4 :** İki uçuş noktası arasındaki mesafe ve yönelim.

Fonksiyonun girdi ve çıktıları, aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

Girdiler:

$L_1, \lambda_1$ :  $P_1$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

$L_2, \lambda_2$ :  $P_2$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

Çıktılar:

$dist_{12}$ :  $P_1$  noktasından  $P_2$  noktasına olan mesafe (radyan)

$\psi_{12}$ :  $P_1 P_2$  hattının  $P_1$  noktasındaki kuzey yönelimi (radyan)

$\psi_{21}$ :  $P_1 P_2$  hattının  $P_2$  noktasındaki kuzey yönelimi (radyan)

Bu fonksiyon mesafeyi radyan olarak hesaplar. Mesafeyi uzunluk birimine çevirmek için bulunan değer dünyanın yarıçapı ile çarpılır. Dünyanın WGS-84 elipsoit modeline göre majör yarıçapı 6378.137 km'dir.  $P_1$  ve  $P_2$  noktalarının ECEF koordinat sistemindeki birim pozisyon vektörleri aşağıdaki denklemlerde gösterildiği gibi hesaplanır ve vektörlerin iç çarpımları alınır. Böylece bu pozisyon vektörleri arasındaki açı ve iki nokta arasındaki mesafe hesaplanabilir. Yönelim açısı da benzer bir mantıkla aşağıda gösterilen ifadeler kullanılarak bulunur. İfadelerde yer alan  $P_n(i)$  ifadesi  $P_n$  vektörünün  $i$ 'nci bileşenini göstermektedir. Yani  $P_n(1)$  x eksenine doğrultusundaki bileşenin,  $P_n(2)$  y eksenine doğrultusundaki bileşenin,  $P_n(3)$  z eksenine doğrultusundaki bileşenin değerini ifade etmektedir.

$$P_1 = \cos(L_1) * \cos(\lambda_1) * i + \cos(L_1) * \sin(\lambda_1) * j + \sin(L_1) * k \quad (4.2)$$

$$P_2 = \cos(L_2) * \cos(\lambda_2) * i + \cos(L_2) * \sin(\lambda_2) * j + \sin(L_2) * k \quad (4.3)$$

$$\text{dist}_{12} = \tan^{-1} \left( \frac{|P_1 \times P_2|}{P_1 \times P_2} \right) \quad (4.4)$$

$$\eta_{P_1 P_2} = \frac{P_1 \times P_2}{|P_1 \times P_2|} \quad \eta_{P_2 P_1} = \frac{P_2 \times P_1}{|P_2 \times P_1|} \quad (4.5)$$

$$\psi_{12} = \tan^{-1} \left( \frac{-\eta_{P_1 P_2}(3)}{P_1(1) * \eta_{P_1 P_2}(2) - P_1(2) * \eta_{P_1 P_2}(1)} \right) \quad (4.6)$$

$$\psi_{21} = \tan^{-1} \left( \frac{-\eta_{P_2 P_1}(3)}{P_2(1) * \eta_{P_2 P_1}(2) - P_2(2) * \eta_{P_2 P_1}(1)} \right) \quad (4.7)$$

#### 4.1.2 Koordinat hesaplama

Bu fonksiyon, koordinatları verilmiş bir nokta, bu noktanın başka bir noktaya olan mesafesi ve kuzey yönelimi girdilerinden, diğer noktanın koordinatlarını hesaplar. Fonksiyonun tanımı, girdileri ve çıktıları aşağıda verildiği gibidir.

Girdiler:

$L_1, \lambda_1$ :  $P_1$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

$\text{dist}_{12}$ :  $P_1$  noktasından  $P_2$  noktasına olan mesafe (radyan)

$\psi_{12}$ :  $P_1 P_2$  hattının  $P_1$  noktasındaki kuzey yönelimi (radyan)

Çıktılar:

$L_2, \lambda_2$ :  $P_2$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

İlk olarak  $\psi_{12}$  doğrultusunda, büyük daire mesafesine teğet birim vektör aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$U_{\psi} = - (\sin(L_1) \cos(\lambda_1) \cos(\psi_{12}) - \sin(\lambda_1) \sin(\psi_{12})) i \\ - (\sin(L_1) \sin(\lambda_1) \cos(\psi_{12}) - \cos(\lambda_1) \sin(\psi_{12})) j \\ + \cos(L_1) \cos(\psi_{12}) k \quad (4.8)$$

Pozisyon ve birim vektörleri istenilen mesafe kadar aşağıdaki formül kullanılarak

döndürüldüğünde yeni noktanın pozisyon vektörü elde edilmiş olur.

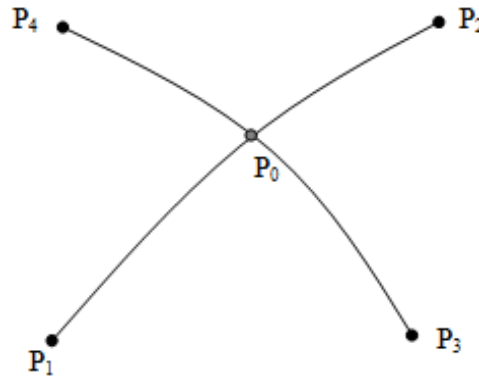
$$P_2 = \cos(\text{dist}_{12})P_1 + \sin(\text{dist}_{12}) * U_\psi \quad (4.9)$$

$$L_2 = \tan^{-1} \left( \frac{P_2(3)}{\sqrt{1 - (P_2(3))^2}} \right) \quad (4.10)$$

$$\lambda_2 = \tan^{-1} \left( \frac{P_2(2)}{P_2(1)} \right) \quad (4.11)$$

### 4.1.3 Kesişim noktası koordinatlarını hesaplama

Bu fonksiyonda, koordinatları girilmiş olan dört noktadan, Şekil 4.5’de gösterildiği gibi iki hat oluşturulur ve eğer bu hatlar kesişiyorsa, kesiştikleri noktanın koordinatları hesaplanır.



Şekil 4.5 : Kesişim noktası.

Girdiler:

$L_1, \lambda_1$ :  $P_1$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

$L_2, \lambda_2$ :  $P_2$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

$L_3, \lambda_3$ :  $P_3$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

$L_4, \lambda_4$ :  $P_4$  noktasının enlem (radyan) ve boylam (radyan) değerleri

Çıktılar:

$L_0, \lambda_0$ :  $P_1P_2$  hattı ile  $P_3P_4$  hatlarının kesiştiği noktanın enlem boylam değerleri

Öncelikle  $P_1 P_2$  ve  $P_3 P_4$  noktalarının oluşturduğu büyük daire yüzeylerini tanımlayan normal vektörler hesaplanır.

$$\eta_{P_1P_2} = P_1 \times P_2 \quad \eta_{P_3P_4} = P_3 \times P_4 \quad (4.12)$$

Bu büyük daire yüzeyleri, tanımlandıkları kürenin yüzeyinde iki noktada kesişirler ve bu noktaların pozisyon vektörleri aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$P_{01} = \frac{\eta_{P_1P_2} \times \eta_{P_3P_4}}{|\eta_{P_1P_2} \times \eta_{P_3P_4}|} \quad P_{02} = \frac{\eta_{P_3P_4} \times \eta_{P_1P_2}}{|\eta_{P_3P_4} \times \eta_{P_1P_2}|} \quad (4.13)$$

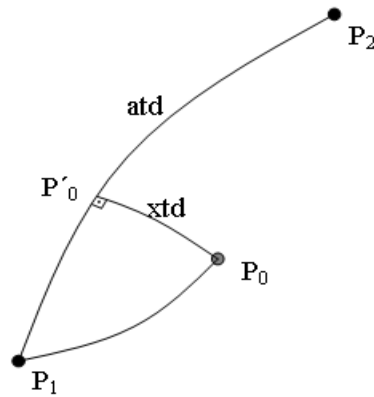
Bu noktalardan hangisinin aranan nokta olduğunu bulmak için, başlangıç noktaları olan  $P_1$  ve  $P_3$ 'den  $P_2$  ve  $P_4$ 'e olan mesafe ve kuzey yönelimi değerleri hesaplanır. Ayrıca başlangıç noktalarının, doğruluğu test edilecek kesişme noktasına olan mesafesi ve kuzey yönelimi de hesaplanarak aşağıdaki denklemde yerine koyulur. Kesişen hatlar için kesişim noktası enlem ve boylam değerleri alttaki formüllerdeki gibi hesaplanır.

$$L_0 = \arctan(P_{01}(3), \sqrt{1 - P_{01}(3)^2}) \quad (4.14)$$

$$\lambda_0 = \arctan(P_{01}(2), P_{01}(1)) \quad (4.15)$$

#### 4.1.4 Yatay sapma mesafesi hesaplama

Bu fonksiyon, hava aracının uçuş hattından yatay sapma mesafesini hesaplamak için kullanılmaktadır. Uçuş hattına dik mesafe olarak da adlandırılan bu uzaklık, diğer güdüm algoritmalarında kullanılır. Şekil 4.6'da gösterilen atd İz Mesafesi, xtd ise Geçiş İzi Mesafesidir.



Şekil 4.6 : Yatay sapma mesafesi.

Fonksiyonun girdi ve çıktıları aşağıda görüldüğü gibidir.

Girdiler:

$L_1, \lambda_1$ :  $P_1$  noktasının enlem ve boylam değerleri (radyan)

$L_2, \lambda_2$ :  $P_2$  noktasının enlem ve boylam değerleri (radyan)

$L_0, \lambda_0$ : Hava aracının bulunduğu noktanın ( $P_0$ ) enlem ve boylam değerleri

Çıktılar:

xtd: Hava aracının  $P_1P_2$  uçuş hattına dik mesafesi

atd: Hava aracı ile  $P_2$  noktası arasındaki mesafenin  $P_1P_2$  uçuş hattı doğrultusundaki bileşeni

Pozisyon vektörlerinden yola çıkılarak xtd ve atd mesafelerinin hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Pozisyon vektörleri ve hattın başlangıç noktasındaki kuzey yönelimi ve mesafesi hesaplandıktan sonra, büyük daire hattına dik ve hat doğrultusundaki birim vektörler ( $UV_{normal}$ ,  $UV_{along}$ ) aşağıdaki ifadeler kullanılarak bulunmuştur.

$$\begin{aligned} UV_{normal} = & \cos(\lambda_1)\sin(L_1)\sin(\psi_{12}) - \sin(\lambda_1)\cos(\psi_{12}) * i \\ & + \sin(\lambda_1)\sin(L_1)\sin(\psi_{12}) + \cos(\lambda_1)\cos(\psi_{12}) * j \\ & - \cos(L_1)\sin(\psi_{12}) * k \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} UV_{along} = & -\cos(\lambda_1)\sin(L_1)\cos(\psi_{12}) - \sin(\lambda_1)\sin(\psi_{12})i \\ & - \sin(\lambda_1)\sin(L_1)\cos(\psi_{12}) + \cos(\lambda_1)\sin(\psi_{12})j \\ & + \cos(L_1)\cos(\psi_{12})k \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$xtd = R(P_0 \times UV_{normal}) \quad (4.18)$$

$$atd = \left( \text{dist}_{12} - \tan^{-1} \left( \frac{P_0 \times UV_{along}}{|P_0 \times UV_{along}|} \right) \right) R \quad (4.19)$$

#### 4.1.5 Zaman bazlı seyrüsefer

Bir uçuş noktasına varış zamanı girilerek zaman bazlı seyrüsefer tanımlanabilmektedir. Aktif uçuş noktası için zaman bazlı seyrüsefer tanımlanmışsa istenilen zamanda gidilen noktaya varış için seçilmesi gereken yere göre hız değeri

hesaplanır. Ayrıca anlık yer hızı değerine göre gidilen noktaya varış için dinamik olarak Tahmini Varış Süresi (ETA) ve Tahmini Varış Zamanı (TTG) hesabı yapılmaktadır. ETA üzerinde uçulan uçuş etabı için, yer hızının uçuş hattı doğrultusundaki bileşeninden, uçuş planında yer alan diğer uçuş etapları için direk yer hızından hesaplanır. TTG ise sistem saatine ETA'nın eklenmesi ile hesaplanır.

Fonksiyonun girdi ve çıktıları aşağıda görüldüğü gibidir.

Girdiler:

$lat_0, long_0$ : Hava aracının bulunduğu noktanın enlem ve boylam değerleri

$lat_1, long_1$ : Zaman bazlı seyrüsefer tanımlanan noktanın enlem ve boylamı

$V_{GS\_E}, V_{GS\_N}$ : Anlık yer hızının doğu ve kuzey yöndeki bileşenleri

ivs: Bir sonraki uçuş noktası için istenen varış süresi

Çıktılar:

tvs: Bir sonraki uçuş noktasına tahmini varış süresi

rgs: Bir sonraki uçuş noktasına istenen sürede ulaşmak için gerekli yer hızı

Fonksiyon içinde ilk olarak büyük daire yaklaşımıyla, platformun o anda bulunduğu nokta ile zamanlanmış seyrüsefer gerçekleştirilmek istenen nokta arasındaki mesafe hesaplanır. Daha sonra yer hızının kuzey ve doğu bileşenlerinin bileşkesi ( $V_{GS\_E}$  ve  $V_{GS\_N}$ ) ve iz açısı farkı ile yer hızı değeri hesaplanır. Zaman bazlı seyrüsefer yapılmak istenen noktanın mesafesi yer hızına bölünerek tahmini varış süresi bulunur. ETA ile sistem saatinin (T) toplamı ile TTG hesaplanır. İstenen varış saati bilgisi girilmiş ise uçuş noktaları arası mesafe zaman farkına oranlanarak anlık gerekli yer hızı (RGS) değeri hesaplanır. Uçuş simülasyonu esnasında gerçek zamanlı olarak RGS değeri hesaplanır, çünkü hava aracı hareket ettikçe mesafe ve hız değerleri değişmektedir.

$$\text{dist} = \text{acos}(\sin(lat1)\sin(lat0) + \cos(lat1)\cos(lat0)\cos(long1 - long0)) \quad (4.20)$$

$$\Psi_{\text{track}} = \tan^{-1}\left(\frac{V_{GS\_E}}{V_{GS\_N}}\right) \quad \Psi_{\text{track\_diff}} = \Psi_{\text{desired\_track}} - \Psi_{\text{track}} \quad (4.21)$$

$$V_{GS-LEG} = (V_{GS-N}^2 + V_{GS-E}^2)^{1/2} \cos(\psi_{track\_diff}) \quad (4.22)$$

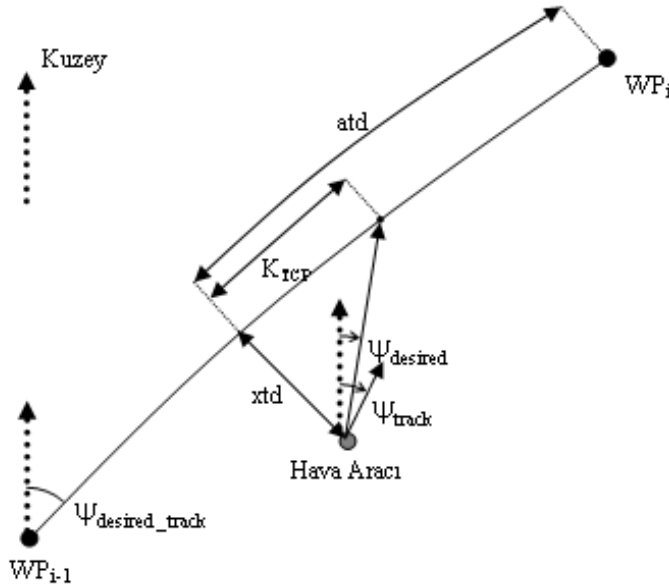
$$ETA = \frac{dist}{V_{GS-LEG}} * 3600 \quad (4.23)$$

$$TTG = ETA + T \quad (4.24)$$

$$time\_dif = T - ivs \quad RGS = dist / time\_dif \quad (4.25)$$

#### 4.1.6 Yalpa açısı komutu hesaplama

Bu fonksiyon, hava aracını yatayda istenen rotaya oturtmakta kullanılır. Bunun için ilk olarak hava aracının gerçekte rota üzerinde bulunması gereken noktadan  $K_{TCP}$  kadar ilerlenir ve hava aracının rotaya gireceği nokta belirlenir. Bu noktanın koordinatları Bölüm 4.1.2’de anlatılan fonksiyonla bulunur. Hava aracını bu noktaya birleştiren hattın kuzeyle yaptığı açı ise bölüm 4.1.1’de anlatılan fonksiyon kullanılarak hesaplanır. Bu açı istenilen kuzey yönelimi olarak adlandırılır. Yatay uçuş hattına oturtma algoritmasında hesaplanan açı değerleri Şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Yatay uçuş hattına oturtma.



$$\text{CutPointDistance} = \text{atd} - K_{\text{TCP}} \quad (4.26)$$

$$[\text{CutLat}, \text{CutLon}] = \text{F\_KoordinatlarıHesapla}(\text{PreWPLatitude}, \text{PreWPLongitude}, \Psi_{\text{desired\_track}}, \text{CutPointDistance}) \quad (4.27)$$

$$[\text{TempDistance}, \Psi_{\text{desired}}, \text{TempBearing}] = \text{F\_YonelimMesafeHesapla}(\text{Latitude}, \text{Longitude}, \text{CutLat}, \text{CutLon}) \quad (4.28)$$

Hava aracının iz açısı hesaplanır ve iz açısının istenilen kuzey yöneliminden farkı alınır, bulunan açı değeri  $-\pi$ ,  $\pi$  aralığına getirilir ve istenilen yatay dönme hızı komutu hesaplanır.

$$\Psi_{\text{track}} = \tan^{-1} \left( \frac{V_{\text{GS\_E}}}{V_{\text{GS\_N}}} \right) \quad (4.29)$$

$$\Psi_{\text{error}} = \Psi_{\text{desired}} - \Psi_{\text{track}} \quad (4.30)$$

İstenilen yatay dönme hızı komutu 4.31 numaralı denklemde gösterildiği gibi hesaplanır. Formülde kullanılan  $f_{d\_lat}$  parametresinin değerine, çeşitli senaryoların benzetimleri ile karar verilmiştir.

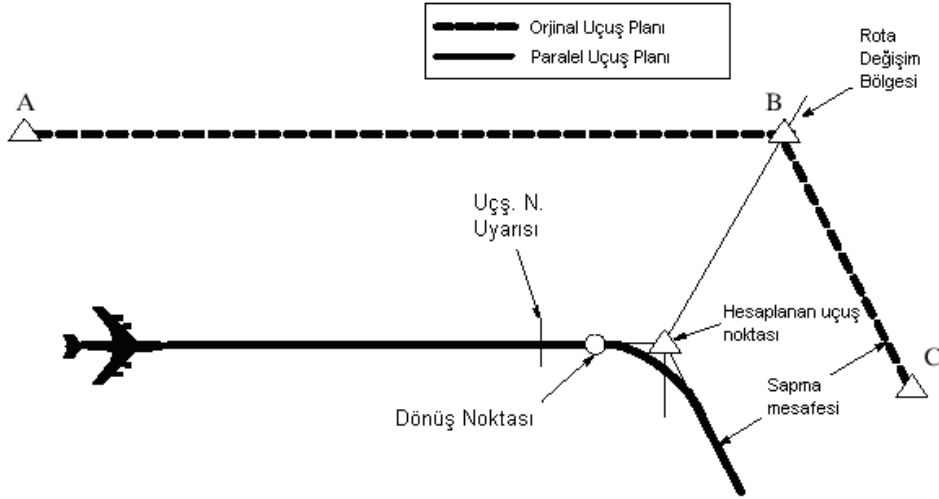
$$\Psi_{\text{comm}} = (2\pi f_{d\_lat}) \Psi_{\text{error}} \quad (4.31)$$

İstenilen yalpa açısı değeri ile istenilen yatay dönme hızı arasındaki ilişki, koordineli dönüş yapabilmek için gereken formül kullanılarak elde edilir.

$$\phi_{\text{comm}} = \tan^{-1} \left( \frac{(V_{\text{GS\_N}}^2 + V_{\text{GS\_E}}^2)^{1/2} \times \Psi_{\text{comm}}}{g} \right) \quad (4.32)$$

#### 4.1.7 Uçuş planından paralel sapma fonksiyonu

Uçuş planında sağa veya sola paralel sapma yapmak istendiğinde sapma mesafesi ve yönü giriş değeri olarak girilir. Sapma sonucu yeni uçuş planını oluşturan ve paralel sapma aktifleştirildiğinde hesaplanan uçuş noktaları, Şekil 4.8'de gösterildiği gibidir.



**Şekil 4.8 :** Paralel sapmalı uçuş planı örneği.

İlk ve son uçuş noktaları sadece bir uçuş hattıyla ilişkili olduğu için o uçuş noktalarının istenilen sapma sonrası yeni hali, Bölüm 4.1.1’de verilen yönelim ve mesafe hesaplama fonksiyonları ile bulunur. Uçuş planının ara noktaları için sağdaki uçuş hattına ve solundaki uçuş hattına göre iki dik izdüşümü bulunur. Eğer izdüşüm noktaları kesişiyorsa kesişim noktası alınır. Eğer izdüşümler çizildiğinde açık bir boşluk oluşuyorsa hatların uzantılarının kesişimine göre iki durum söz konusudur. Kesişim noktası ile orijinal uçuş noktası arası mesafe yani diyagonal uzunluğu ile planın sapma mesafesi arasındaki orana bakılır. Bu oran  $\sqrt{2}$ ’den küçük ise hatların uzantılarının kesişim noktası alınır. Bu oran  $\sqrt{2}$ ’den büyük ise diyagonal üzerinde sapma mesafesi kadar uzaklıktaki nokta alınır.

Aşağıdaki iki analizde bu  $\sqrt{2}$  oranının ifadesi ortaya konmuştur. Birinci analizde hatların kesişim noktası üzerinden yönlendirme yapılırken, ikinci analizde ise oluşan köşegen üzerindeki noktadan yönlendirme yapılmıştır.

### **1. Analiz**

#### *Orjinal Uçuş Planı Noktaları Konumları*

- A ( N 36.0000 , E 26.0000 )  
 B ( N 36.0000 , E 28. 0000 )  
 C ( N 34. 0000 , E 30. 0000 )

#### *15 nm sola Sapmış Uçuş Planı Noktaları Konumları*

- A’ ( N 35.7500 , E 25.9968 )

B1' ( N 35.7500 , E 27.9968 )

B2' ( N 35.8433 , E 27.7595 )

A'B1'∩B2'C' ( N 35.7511 , E 27.8549 ) (A'B1' ve B2'C' Kesişim noktası)

C' ( N 33.8433 , E 29.7653 )

*15 nm sağa Sapmış Uçuş Planı Noktaları Konumları*

A' ( N 36.2500 , E 26.0032 )

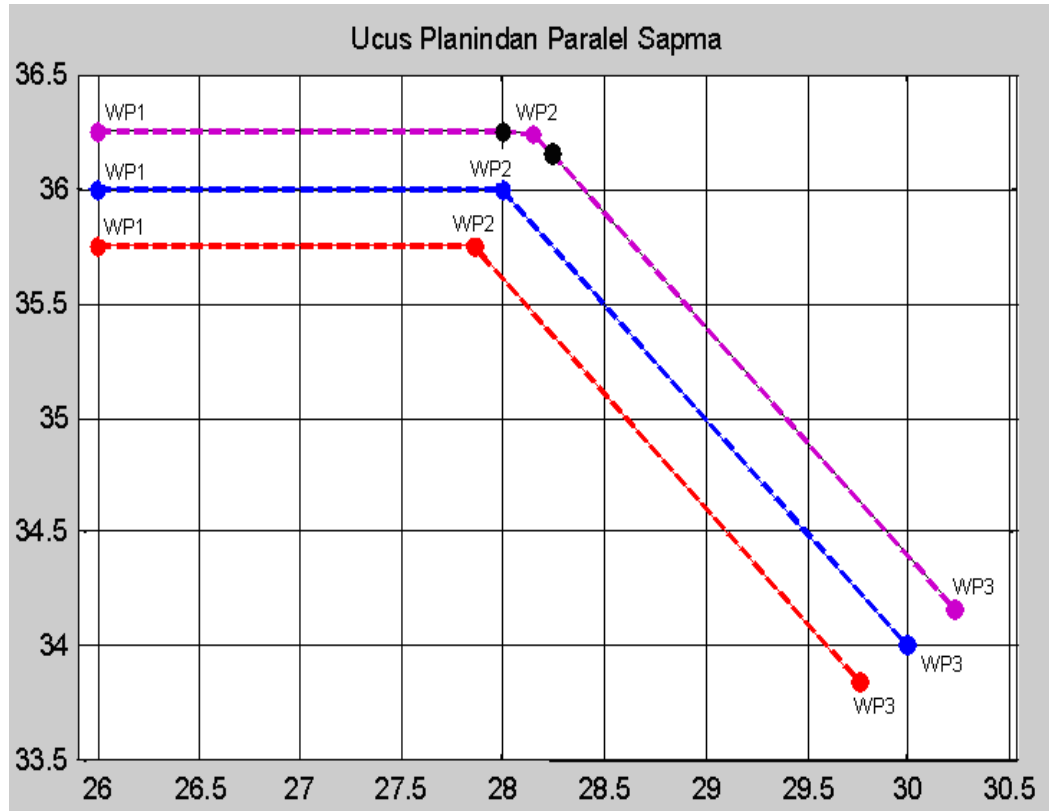
B1' ( N 36.2500 , E 28.0032 )

B2' ( N 36.1563 , E 28.2415 )

A'B1'∩B2'C' ( N 36.2487 , E 28.1461 ) (A'B1' ve B2'C' Kesişim noktası)

C' ( N 34.1563 , E 30.2356 )

Birinci analizde paralel sapma fonksiyonları ile hesaplanan uçuş noktaları Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Hatların kesişim noktası ile paralel sapma.

B(N36,E28) ve A'B1'∩B2'C'(N35.7511,E27.8549) noktaları arası uzaklık 16.528 nm, kaydırma mesafesi de 15 nm olduğu için:

$16.528 / 15 = 1,1018 < 1,4$  olduğundan hatların kesişim noktası alınır.

## **2.Analiz**

### *Orijinal Uçuş Planı Noktaları Konumları*

A ( N 35. 0000, E 29. 0000 )

B ( N 38. 0000 , E 32. 0000 )

C ( N 35. 0000 , E 36. 0000 )

### *25 nm sola Sapmış Uçuş Planı Noktaları Konumları*

A' ( N 34.7332, E 29.3901 )

B1' ( N 37.7332 , E 32.4054 )

B2' ( N 37.7007 , E 31.6329 )

A'B1'∩B2'C' ( N 37.4013 , E 32.0562 ) (A'B1' ve B2'C' Kesişim noktası)

C' ( N 34.7007 , E 35.6467 )

### *25 nm sağa Sapmış Uçuş Planı Noktaları Konumları*

A' ( N 35,2655, E 28.6073 )

B1' ( N 38.2654 , E 31.5917 )

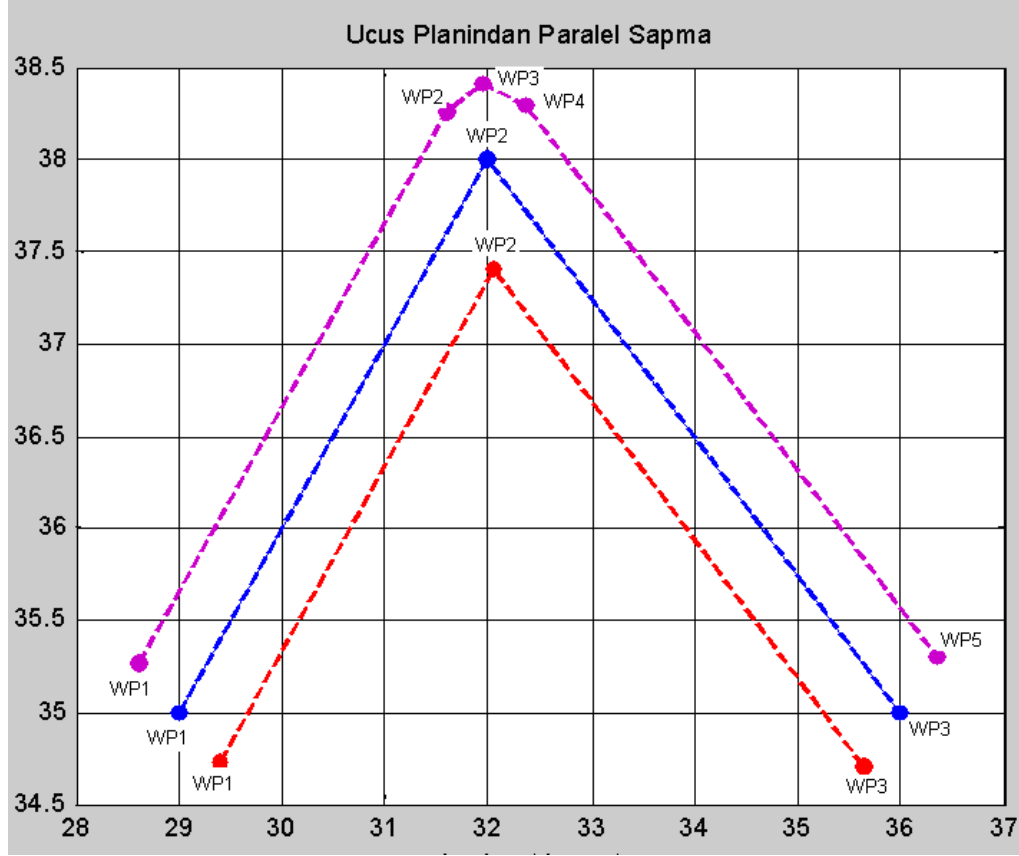
B2' ( N 38.2982 , E 32.3701 )

A'B1'∩B2'C' ( N 38.5983 , E 31.9428 ) (A'B1' ve B2'C' Kesişim noktası)

C' ( N 35.2982 , E 36.3559 )

Köşegen ( N 38.4155, E 31.9604 )

İkinci analiz için paralel sapma fonksiyonları ile hesaplanan yeni uçuş noktalarının konumları Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



**Şekil 4.10** : Köşegen uzantısındaki nokta ile paralel sapma.

B(N38.0000,E32.0000) ve A'B1'∩B2'C'(N38.5983,E31.9428) noktaları arası uzaklık 36 nm, kaydırma mesafesi de 25 nm olduğu için:

$36 / 25 = 1.44 > 1.4$  olduğundan köşegen üzerindeki 25 nm uzaklıktaki nokta alınır.

Paralel sapma, uçuş planlarına uygulanacağı için ve uçuş planlarının uçuş noktası sayısı değişken olduğu için yazılımda paralel sapmaya ilişkin fonksiyon uçuş noktası sayısını ve noktaların konumlarını parametre olarak alır ve istenilen mesafe ve açı kadar sapsmış hallerini hesaplayıp döndürür.

#### 4.2 Dikey Seyir Hesaplamaları

Hava aracının dikey seyrüsefer yapmasını sağlayan oto pilot işlevidir. Tırmanma, seyir yüksekliği tutma ve alçalma gibi işlemleri otomatik olarak yapar. Hava aracının dikeyde istenilen yükseklikte uçuşunu sağlamak için kullanılacak güdüm hesaplamaları ve fonksiyonlarını içerir. Dikey seyir, altimetre kaynakları, harici uçuş hattı referansları veya bunların birleşimini kullanarak dikey uçuş profilinde uçuş operasyonu yapılmasına olanak sağlayan seyrüsefer yöntemidir.

### 4.2.1 Dikey sapma mesafesi hesaplama

Dikey sapma mesafesi, hava aracının hat üzerinde bulunması gereken yükseklik ile o anda bulunduğu yükseklik arasındaki farktır. Eğer alçalma tavan noktası veya yükselme taban noktasına henüz ulaşılmamışsa, dikey sapma mesafesinde hesaplanan  $h_{\text{desired}}$  değeri uçuş planında bir önceki uçuş noktasının yüksekliği olan  $h_{\text{TO}}$  noktasınıniki ile aynı alınır. Eğer bu noktalardan birine ulaşılmışsa, istenen yükseklik değeri aşağıda gösterilen formül kullanılarak hesaplanır.

$$h_{\text{desired}} = h_{\text{FROM}} + (\text{track\_dist} - \text{atd}) * \tan(\gamma_{\text{PA}}) \quad (4.33)$$

$$\Delta h = h - h_{\text{desired}} \quad (4.34)$$

Fonksiyonun girdi ve çıktıları aşağıda görüldüğü gibidir.

Girdiler:

$\gamma_{\text{PA}}$  : Dikey rota açısı (radyan)

$h_{\text{TO}}$  : Gidilecek yol noktası yüksekliği

$h_{\text{FROM}}$  : Geline yol noktası yüksekliği

$h$ : Hava aracının bulunduğu konumdaki anlık uçuş yüksekliği

$\text{atd}$ : Hava aracı ve gidilen nokta arasındaki mesafenin uçuş hattı doğrultusundaki bileşeni

$\text{track\_dist}$ : Geline noktadan gidilen noktaya olan mesafe

Çıktılar:

$\Delta h$  : Dikey sapma mesafesi

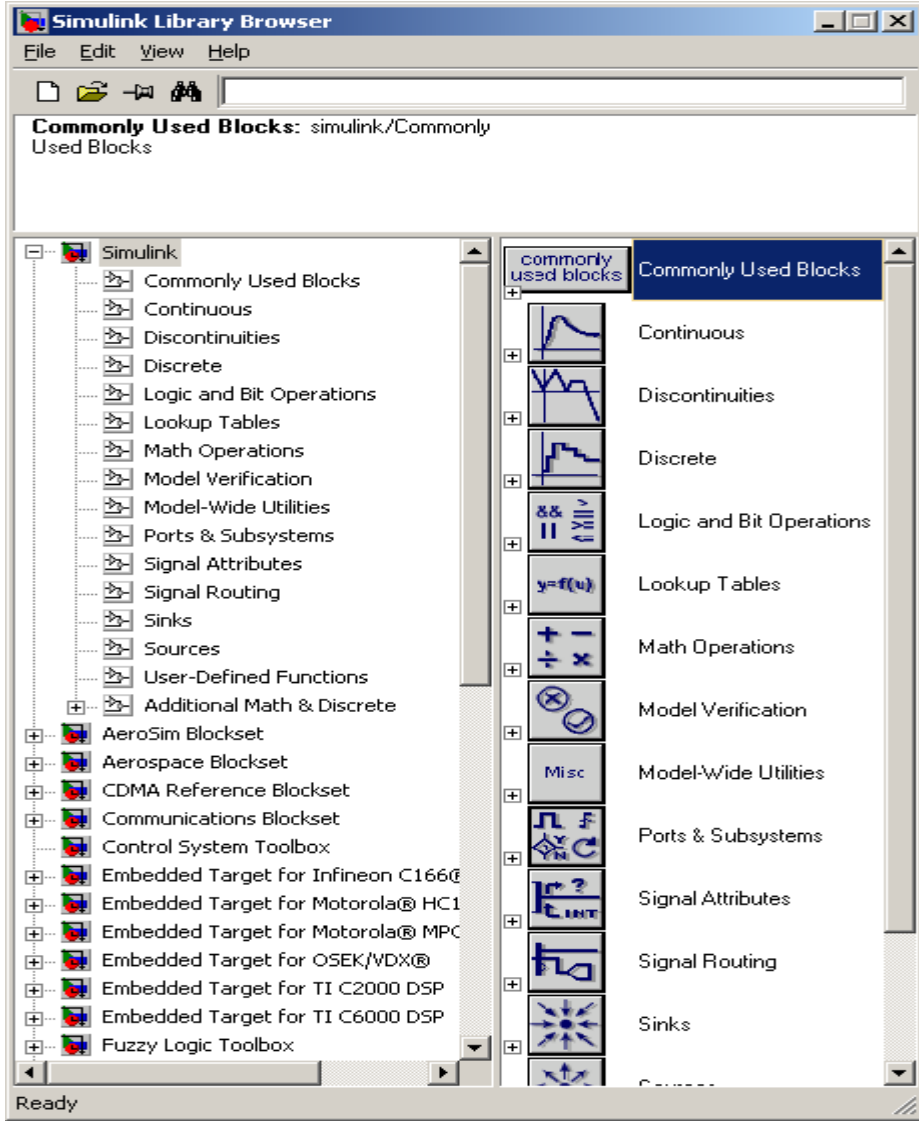
Dikey seyir güdüm fonksiyonunun gerçekleştirilmesinde genel amaçlı yönlendirme, koordinat, uzunluk, yönelim hesaplama ve dikey sapma mesafesi fonksiyonundan yararlanılmıştır. Bu fonksiyonun ürettiği sonuca göre hava aracı için alçalma / yükselme komutu üretilerek hava aracının istenilen yükseklikte uçuşu sağlanır.

### 4.3 Matlab Simulink Modelleri

Simulink karmaşık sistemleri tasarlama ve benzetim yapma olanağı vermektedir.

Mühendislik sistemlerinde simülasyonun önemi gün geçtikçe artmaktadır. Sistemlerin tasarımında büyük oranda bilgisayar simülasyonları kullanılmakta, mümkün olduğunda tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu da prototiplere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük oranda düşmesini sağlamaktadır.

Simulink, MATLAB ile birlikte bütünleşik olarak çalışan bir benzetim ortamıdır. Sürekli zamanlı ve ayrık zamanlı sistemleri veya her ikisini de içeren hibrid sistemleri desteklemektedir. İçinde birçok alt sistemi blok olarak barındırdığından sürükle bırak yöntemiyle, birçok sistemi birkaç dakikada kurarak simule edilebilir ve değişik durumlardaki cevabını test edebilir. Bunun için Simulink zengin bir blok kütüphanesi sunmaktadır. Kullanımı Electronics Workbench'e benzer şekilde blokların yerleştirilip birbirine bağlanması şeklindedir. Simulink'i çalıştırınca ekrana Şekil 4.11'de gösterilen simulink kütüphanesi gelecektir. Simülasyon yaparken kullanılacak bloklar kategorilere ayrılmış biçimde burada bulunmaktadır.



Şekil 4.11 : Simulink kütüphanesi ağaç yapısı.

Her bir blok sürekli zamanda ya da ayrık zamanda çıkış veren temel bir dinamik sistemi ifade eder. Hatlar blokların giriş ve çıkışları arasındaki bağlantıları gösterir. Blok diyagramdaki her bir blok belirli bir tip bloğun örneğidir. Bloğun tipi, bloğun giriş ve çıkışları, durumları ve zaman arasındaki bağıntıyı belirler. Bloklar Simulink'in nasıl simule edileceğini bildiği temel dinamik sistemleri temsil eder. Bloklar programlama dillerinde kullanılan fonksiyonlara benzetilebilir. Her bir dinamik sistem için yazılmış hazır fonksiyonlardır. Tasarımcı bu hazır fonksiyonları kullanarak sistemi tasarlar.

Uçuş planı koşturma alt sisteminde verilen uçuş koşullarında hava aracını yatayda istenilen rotaya ve dikeyde istenilen yüksekliğe oturtan güdüm algoritmaları Simulink'te tasarlanmıştır. Ayrıca daire kalıbı, merdiven kalıbı, sekiz şekli kalıbı, bekleme kalıbı gibi aviyonik uçuş kalıpları için de simulink modelleri tasarlanmıştır.



Yatay ve dikey güdüm algoritmalarının simulink modelleri Bölüm 5’de, aviyonik uçuş kalıplarına özgü simulink modelleri Bölüm 4.4’de detaylı olarak anlatılmıştır.

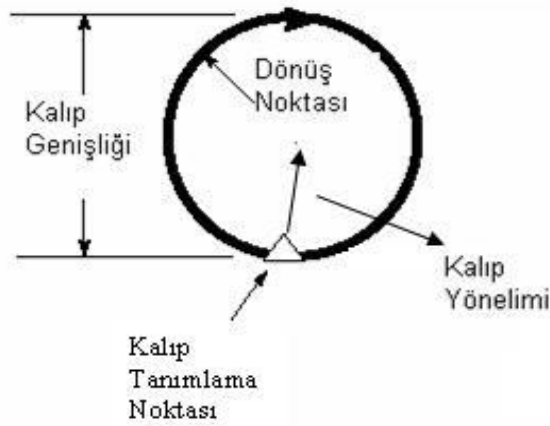
#### 4.4 Temel Uçuş Kalıpları

Hava aracı için normal uçuş planı dışında, göreve özel uçuş kalıplarının takip edilmesi gerekebilir. Bir arama kurtarma ve atak helikopteri için bu kalıplar temel olarak daire kalıbı, rastgele kapalı kalıp, merdiven kalıbı, genişleyen kare kalıbı, bekleme kalıbı ve sekiz şekli kalıbıdır. Uçuş kalıpları uçuş planında pilotun istediği herhangi bir veya birkaç uçuş noktası için tanımlanabilir. Görev icrasında uçuş kalıbı tanımlanan uçuş noktasına gelindiğinde uçuş planı modundan çıkılarak istenen kalıp işletilir. Kalıbın icrası tamamlandığında uçuş planına kalınan uçuş noktasından devam edilir.

##### 4.4.1 Daire kalıbının gerçekleşmesi

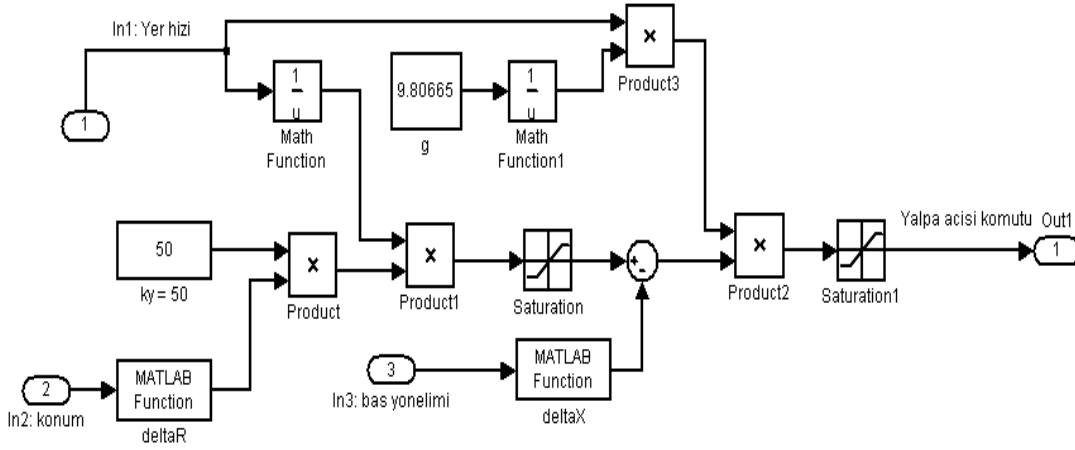
Daire kalıbı, hava aracının istenilen yönde ve genişlikte, istenen yarıçaplı daire yörüngesini izlemesi ile gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.12’de gösterilen parametreler ile tanımlanır.

- Kalıp tanımlama noktası: Kalıba giriş noktasıdır.
- Kalıbın yönü: KTN ile merkez hattının oluşturduğu rota.
- Kalıbın genişliği: Kalıbın iç ve dış dönüş noktaları arasındaki uzaklık.
- Başlangıç dönüş yönü: Kalıp giriş noktasından sonra takip edilecek yönü belirtir.



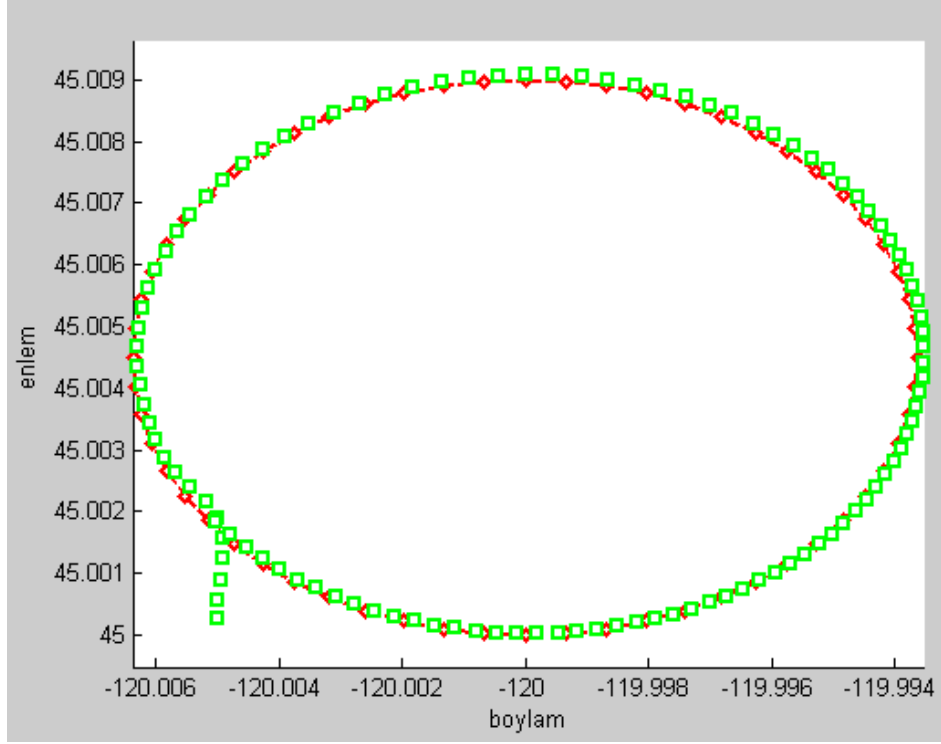
Şekil 4.12 : Daire kalıbı parametreleri.

Bu algoritmada hava aracının dairesel bir rota izleyebilmesi için gerekli olan yalpa açısı komutu, iz açısı farkı ve hava aracının yer hızı kullanılarak bulunmaktadır. Yalpa açısı komutu uçuş esnasında yer hızı bilgisi değıştikçe sürekli hesaplanmaktadır. Algoritma AeroSim simütörüyü çeşitli giriş parametreleriyle rüzgârlı ve rüzgârsız ortam için ayrı ayrı denenmiş ve simülasyon sonuçları oluşturulmuştur. Kullanılan daire kalıbı hatta tutma algoritması Şekil 4.13'deki blok şemasında gösterilmiştir.



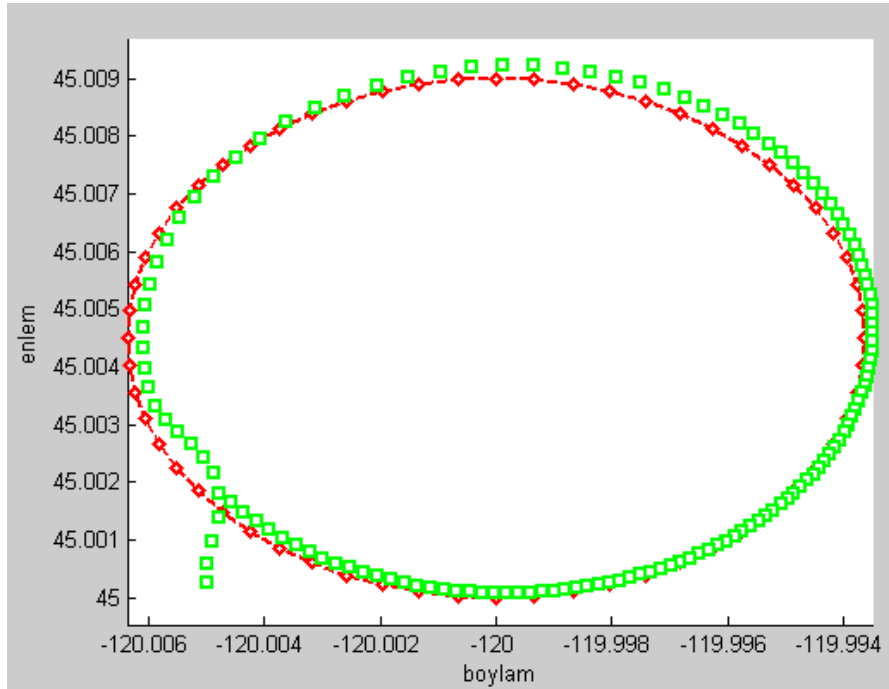
Şekil 4.13 : Daire kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.

[N45 W120.0255] pozisyonundan, 25 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, 20 knot rüzgârın estiğı bir ortamda daire kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45 W120] pozisyonunda bulunan 500 metre yarıçaplı, sağ dönüş yönlü (saat yönünde), 500 metre yarıçaplı daire kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.14'de görüldüğü gibidir. Şekilde kırmızı hat daire kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere 20 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı daire hattını mümkün olan en az sapma ile takip edebilmiştir.



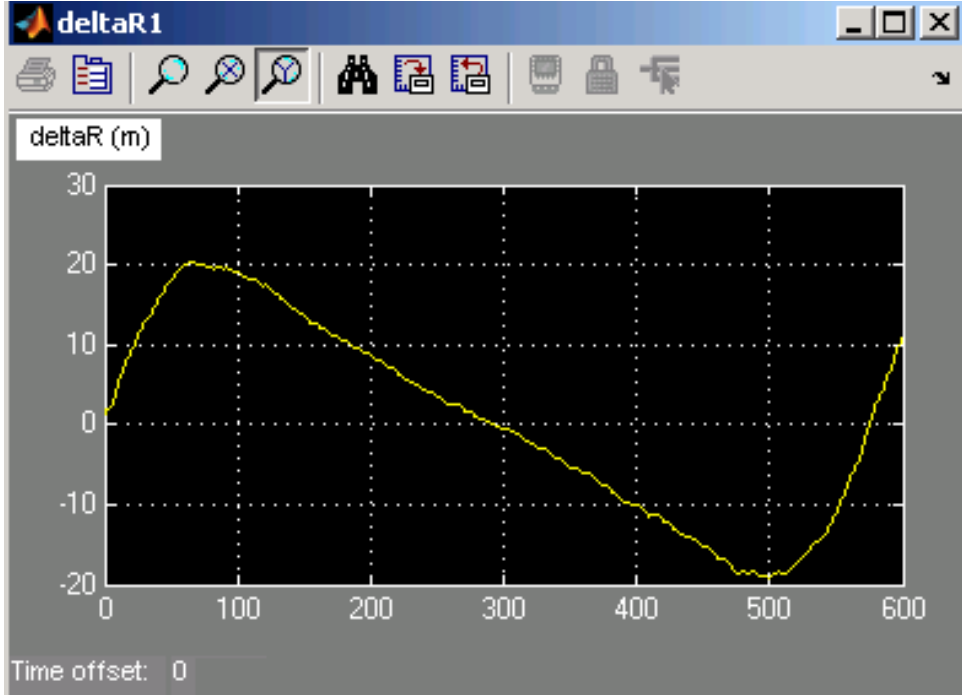
**Şekil 4.14 :** Geliştirilen güdüleme sistemi ile örnek daire kalıbı uçuş izi.

Şekil 4.15’de Aerosim simülâtörü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam ve uçuş şartlarında, yine 20 knot rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen daire kalıbı uçuş izi görülmektedir. Şekil 4.14 ile Şekil 4.15’e karşılaştırmalı olarak bakıldığında geliştirilen güdüleme sisteminin mevcut otopilot modülüne göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir.

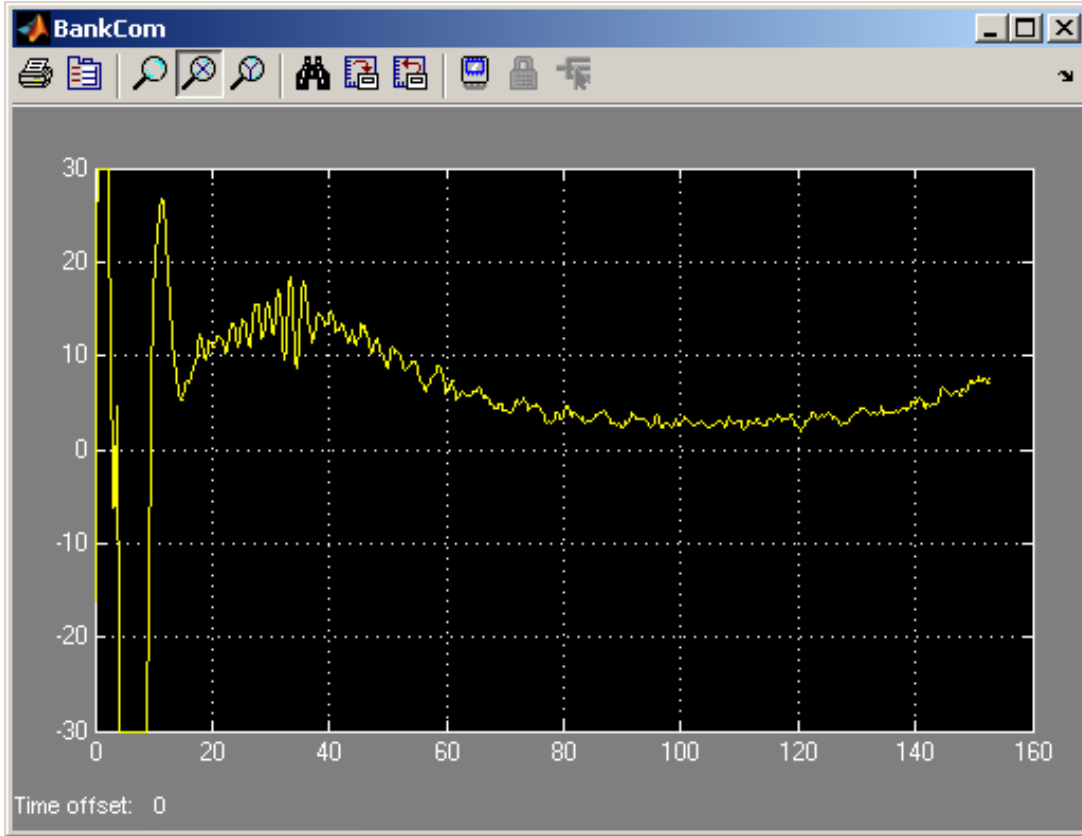


**Şekil 4.15 :** Mevcut güdüleme sistemi ile daire kalıbı örnek uçuş izi.

Örnek daire kalıbı simülasyonu için geliştirilen algoritmanın yarıçap hatası değişimi Şekil 4.16’da, geliştirilen güdümlüme algoritmasıyla hesaplanan yalpa açısı komutu değişimi de Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

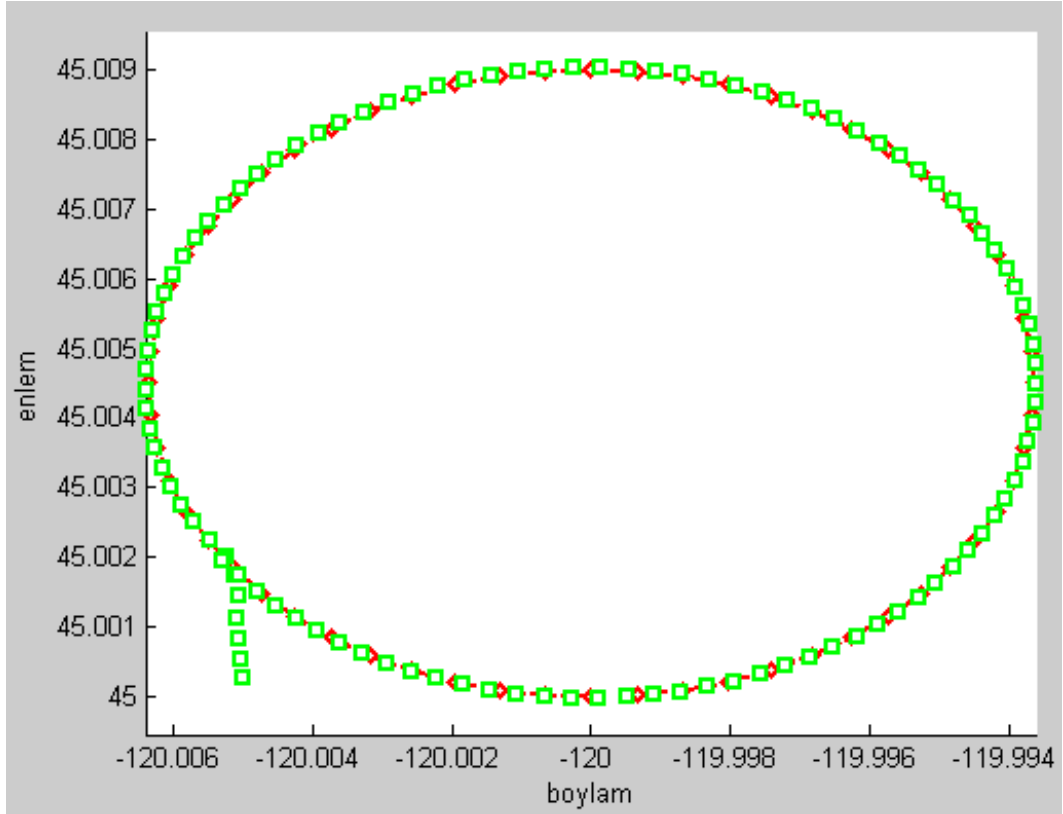


Şekil 4.16 : Daire kalıbı örnek simülasyon için yarıçap hatası.



Şekil 4.17 : Daire kalıbı örnek simülasyon için yalpa açısı komutu.

[N45 W120.0255] pozisyonundan, 25 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda, kalıp tanımlama noktası [N45 W120] pozisyonunda bulunan 500 metre yarıçaplı, sağ dönüş yönlü (saat yönünde), 500 metre yarıçaplı daire kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.18’de görüldüğü gibidir. Şekilde kırmızı hat daire kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen hat da tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır.



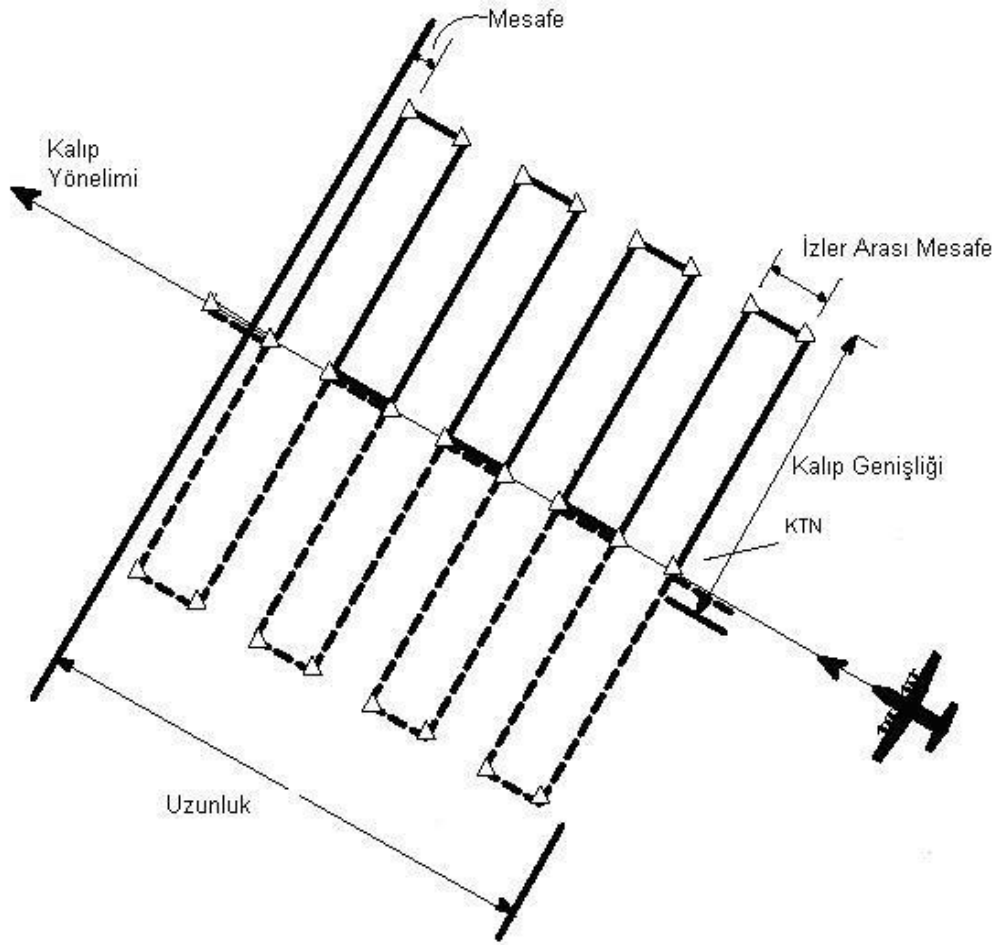
Şekil 4.18 : Daire kalıbı rüzgârsız ortam örnek simülasyonu için uçuş izi.

#### 4.4.2 Merdiven kalıbının gerçekleştirilmesi

Merdiven kalıbı, kalıp tanımlama noktasına göre sağ veya sol yönlü oluşturulabilen, kalıp genişliği ve yüksekliği kullanıcı tarafından belirlenen kalıp türüdür. Şekil 4.19’da gösterilen parametreler ile tanımlanır.

- Kalıp tanımlama noktası: Kalıba giriş noktasıdır
- Kalıp yönelimi: Kalıbın merkez çizgisine paralel KTN’ye doğru olan rotayı ifade eder
- Kalıp başlangıç dönüş yönü: Başlangıç dönüş yönü kalıba giriş yönünü gösterir. “sağ” veya “sol”

- Kalıp ofset yönü: Ofset yönü kalıbın KTN'sinin kalıbın merkez noktasına göre yerini gösterir. “sağ” veya “sol”
- Kalıp izler arası mesafesi: Kalıp uzunluğu yönündeki her bir uçuş bacağı, kalıp sınırını geçmediği müddetçe, bu mesafe kadar olmaktadır.
- Kalıp uzunluğu: Yatayda kalıbın sınırlarını tanımlar.
- Kalıp genişliği: Dikeyde kalıbın sınırlarını tanımlar.

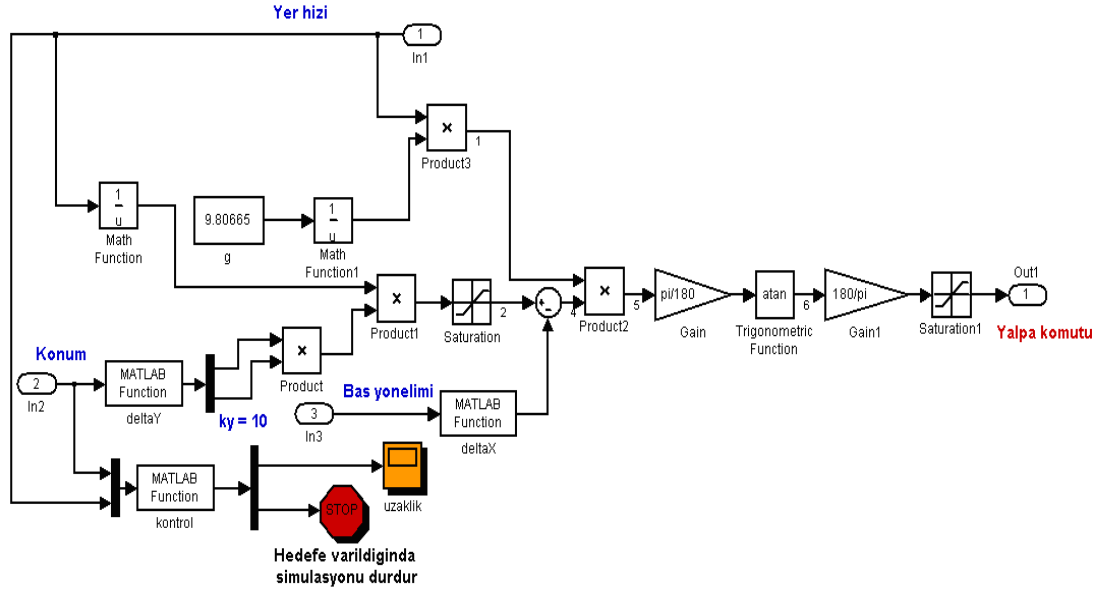


**Şekil 4.19** : Merdiven kalıbı parametreleri.

Bu algoritmada kalıp genişliği, kalıp uzunluğu ve kalıp yönelimi kullanılarak kalıp sınır noktaları hesaplanır. KTN'den itibaren kalıp yönüne uygun olarak merdiven kalıbının oluşturulabilmesi için üzerinden uçulması gereken noktalar, kalıp izler arası mesafesi kullanılarak kalıp sınırlarına ulaşıncaya kadar yinelemeli olarak hesaplanır.

Merdiven kalıbı icrası için tasarlanan algoritmada hava aracının merdiven rotasını

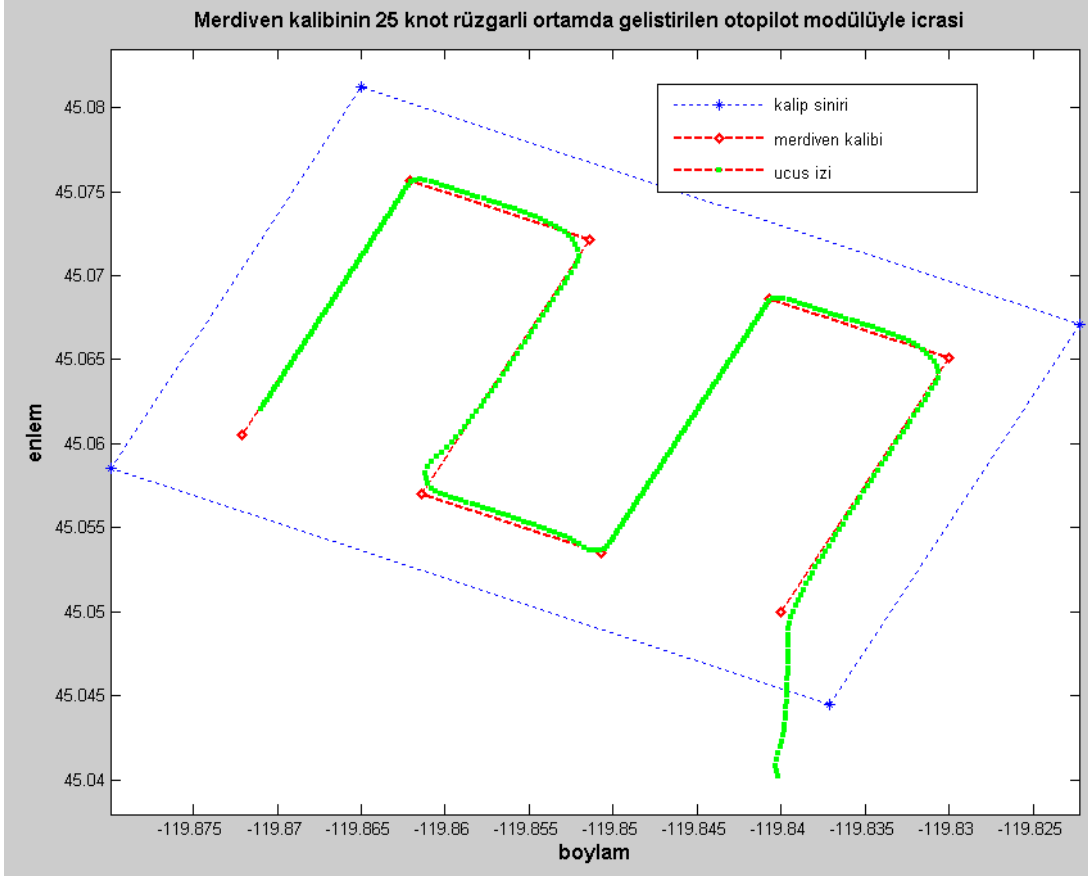
izleyebilmesi için gerekli olan yalpa açısı komutu, iz açısı farkı ve hava aracının yer hızı kullanılarak bulunmaktadır. Yalpa açısı komutu uçuş esnasında konum, yer hızı, duruş açıları gibi uçuş bilgileri değıştikçe yeniden hesaplanmaktadır. Algoritma AeroSim simülatöründe, çeşitli giriş parametreleriyle rüzgârlı ve rüzgârsız ortam için ayrı ayrı denenmiş ve simüstasyon sonuçları oluşturulmuştur. Merdiven kalıbı için hatta tutma algoritması Şekil 4.20'deki blok şemasında gösterilmiştir. Merdiven kalıbı için  $ky = 10$  değeri katsayı olarak kullanılmıştır.



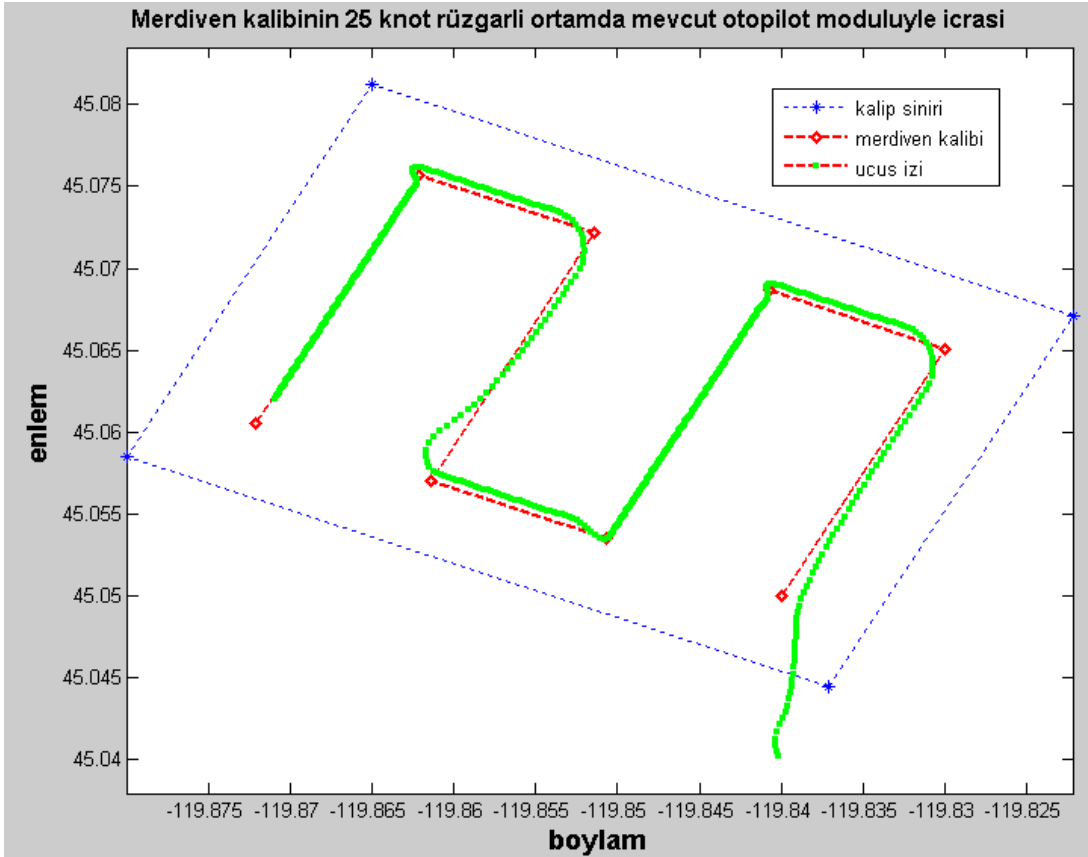
Şekil 4.20 : Merdiven kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.

[N45.04 W119.84] pozisyonundan, 40 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, 25 knot hızlı rüzgârın estiği ortamda merdiven kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 1.5 nm genişlikli, 2 nm uzunluklu, 0.5 nm izler arası mesafesine sahip, sol dönüş yönlü merdiven kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.21'de görüldüğü gibidir. Şekilde kırmızı hat merdiven kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere 25 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı merdiven hattını mümkün olan en az sapma ile takip edebilmiştir.

Şekil 4.22'de Aerosim simülatörü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam ve uçuş şartlarında, yine 25 knot rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen uçuş izi görülmektedir. Şekil 4.21 ile Şekil 4.22'ye karşılaştırmalı olarak bakıldığında geliştirilen güdümlenme sisteminin, merdiven kalıbı için mevcut otopilota göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir.



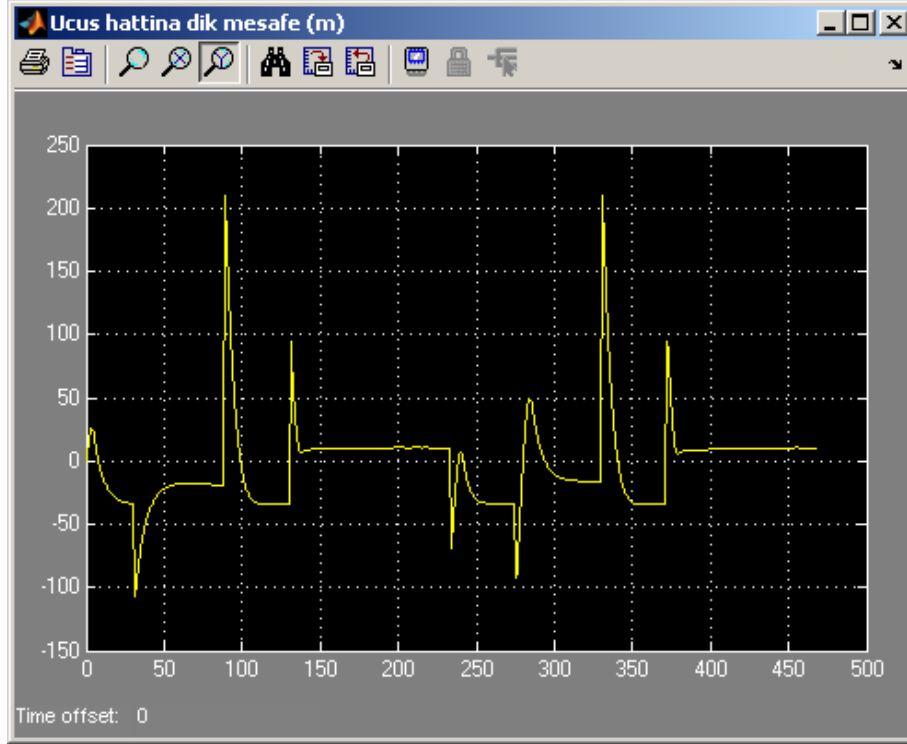
Şekil 4.21 : Geliştirilen güdümlenme sistemi ile örnek merdiven kalıbı uçuş izi.



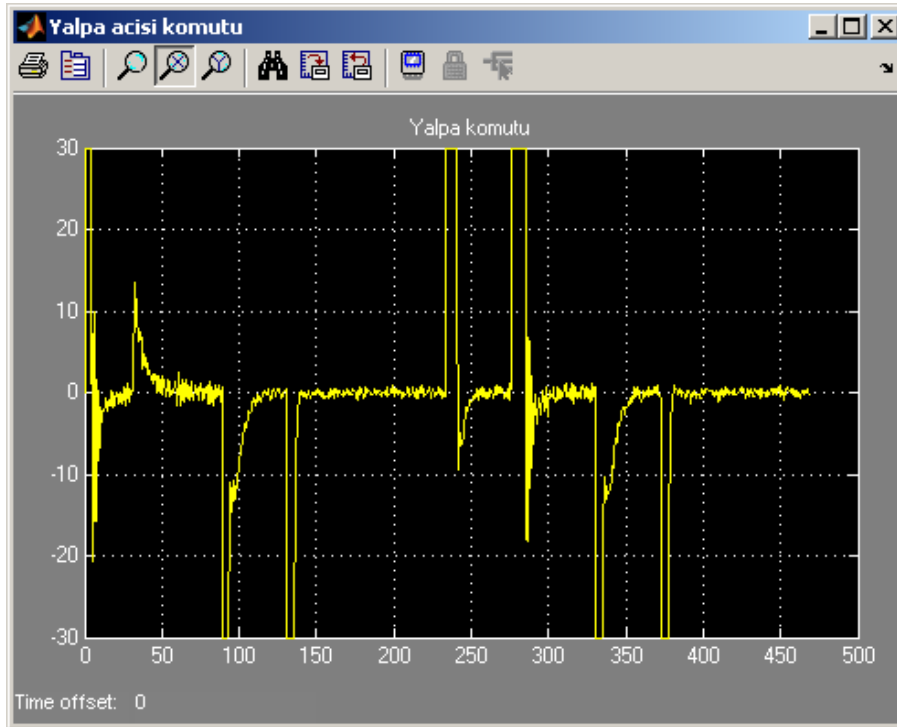
Şekil 4.22 : Mevcut güdümlenme sistemi ile örnek merdiven kalıbı uçuş izi.



Örnek merdiven kalıbı simülasyonu için geliştirilen algoritmanın uçuş hattına dik mesafe değeri değişimi Şekil 4.23’de, geliştirilen güdümlenme algoritmasıyla hesaplanan yalpa açısı komutu değişimi de Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

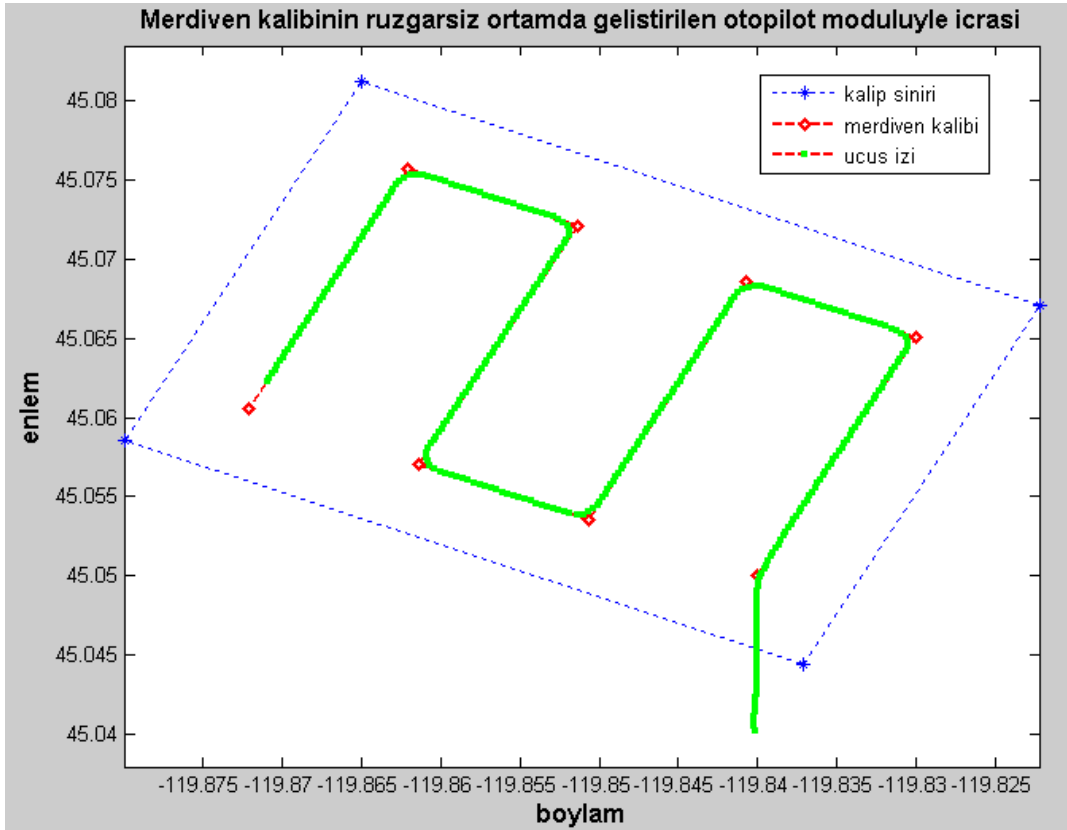


Şekil 4.23 : Merdiven kalıbı örnek benzetim için deltaY değeri değişimi.



Şekil 4.24 : Merdiven kalıbı örnek benzetim için yalpa açısı komutu.

[N45.04 W119.84] pozisyonundan, 40 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda merdiven kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 1.5 nm genişlikli, 2 nm uzunluklu, 0.5 nm izler arası mesafesine sahip, sol dönüş yönlü merdiven kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.25’de görüldüğü gibidir. Şekilde mavi noktalı hat kalıp sınırları, kırmızı hat merdiven kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır. Sadece merdivenin köşe noktalarında ve rota değiştirme durumlarındaki dönüşler için yumuşatmalar yapılmıştır.



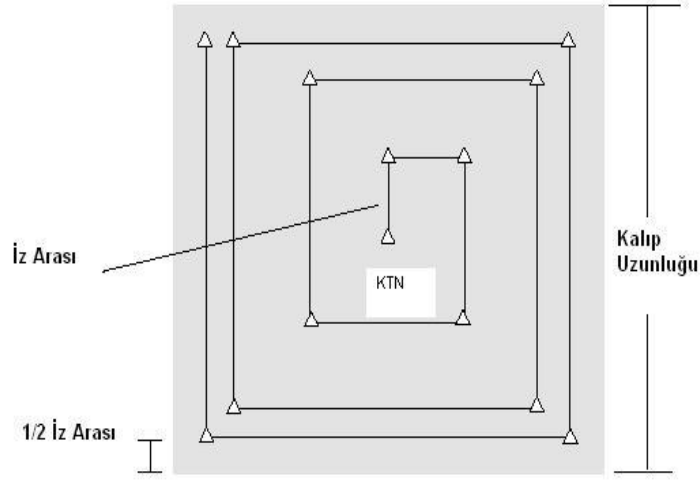
Şekil 4.25 : Merdiven kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.

#### 4.4.3 Genişleyen kare kalıbının gerçekleşmesi

Genişleyen kare kalıbı, kalıp tanımlama noktasına göre sağ veya sol yönlü oluşturulabilen, kalıp tarama alanı içerisinde genişleyen kareler şeklinde uçuş hatlarının tanımlanmasını ve hava aracının bu noktalardan geçiş yaparak kareler çizmesini sağlayan kalıp türüdür. Şekil 4.26’da gösterilen parametreler ile tanımlanır.

- Kalıp tanımlama noktası: Kalıba giriş noktasıdır

- Kalıp yönelimi: Kalıbın merkez çizgisine paralel KTN'ye doğru olan rotayı ifade eder
- Kalıp dönüş yönü: Kalıba giriş yönünü gösterir. “sağ” veya “sol”
- Kalıp izler arası mesafesi: Uçuş bacaklarının uzunlukları izler arası mesafe ile başlamakta olup, katları ile devam etmektedir. Birbirini takip eden uçuş bacakları arası 90 derecedir.
- Kalıp uzunluğu: Yatayda kalıbın sınırlarını tanımlar.

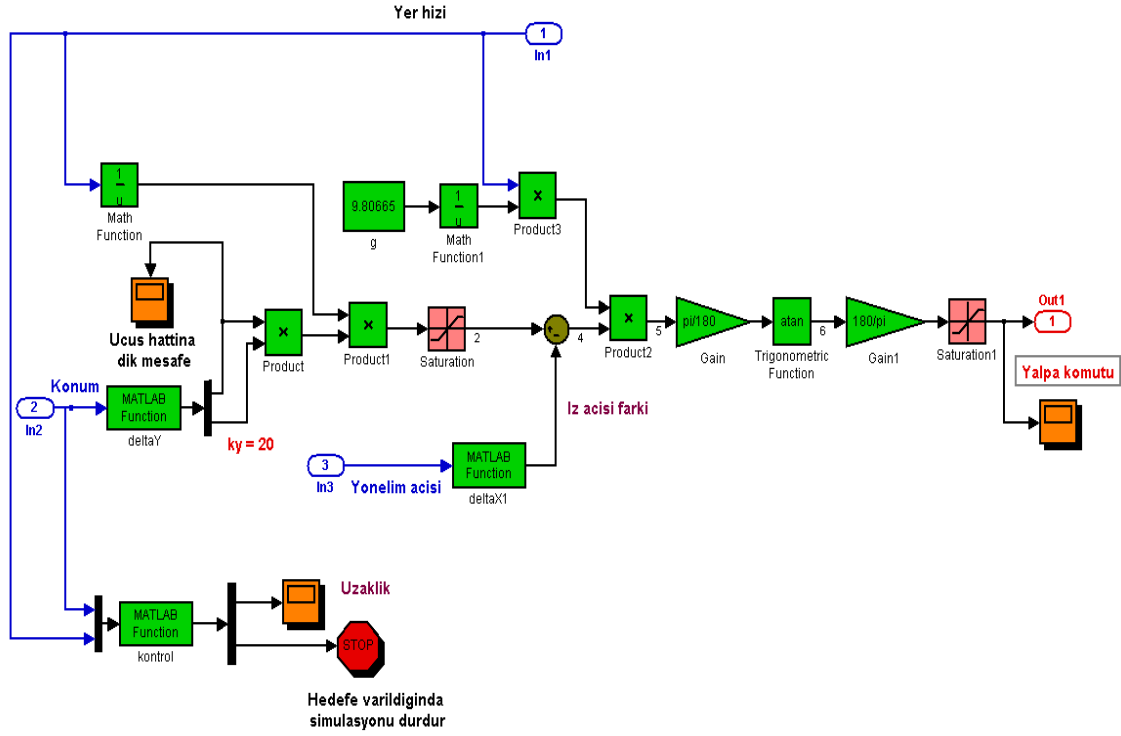


**Şekil 4.26 :** Genişleyen kare kalıbı parametreleri.

Bu algorithmada kullanıcı tarafından tanımlanmış olan kalıp genişliği, kalıp uzunluğu ve kalıp yönelimi kullanılarak genişleyen kare kalıbının sınırları hesaplanır. KTN'den itibaren kalıp yönüne uygun olarak genişleyen kare kalıbının oluşturulabilmesi için üzerinden uçulması gereken noktalar, Kalıp İzler Arası Mesafesi kullanılarak kalıp sınırlarına ulaşıncaya kadar hesaplanmaktadır. KTN'den başlanılarak son noktaya ulaşıncaya kadar, geçiş noktası mesafelerine ulaşıldıkça bir sonraki nokta bulunup, o noktaya nasıl ulaşılabileceğine ilişkin güdüm hesapları yapılır ve duruş açıları düzeltmeleri bulunur.

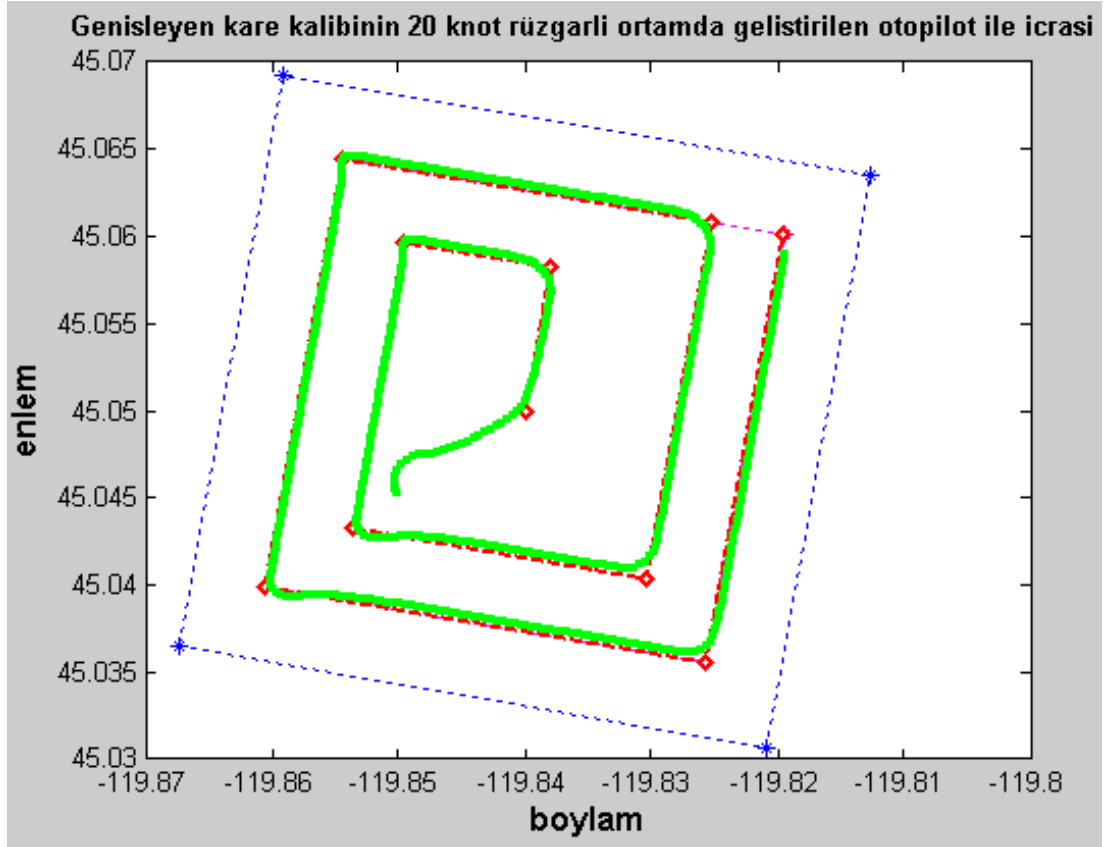
Genişleyen kare kalıbı icrası için tasarlanan algorithmada hava aracının istenen kare rotayı izleyebilmesi için gerekli olan yalpa açısı komutu, iz açısı farkı ve hava aracının yer hızı kullanılarak bulunmaktadır. Yalpa açısı komutu uçuş esnasında konum, yer hızı, duruş açıları gibi uçuş bilgileri değişikçe yeniden hesaplanmaktadır. Algoritma AeroSim simülatörüyle çeşitli giriş parametreleriyle rüzgârlı ve rüzgârsız ortam için ayrı ayrı denenmiş ve benzetim sonuçları

oluşturulmuştur. Genişleyen kare kalıbı için hatta tutma algoritması Şekil 4.27'deki blok şemasında gösterilmiştir. Genişleyen kare kalıbı için  $k_y = 20$  değeri katsayı olarak kullanılmıştır.

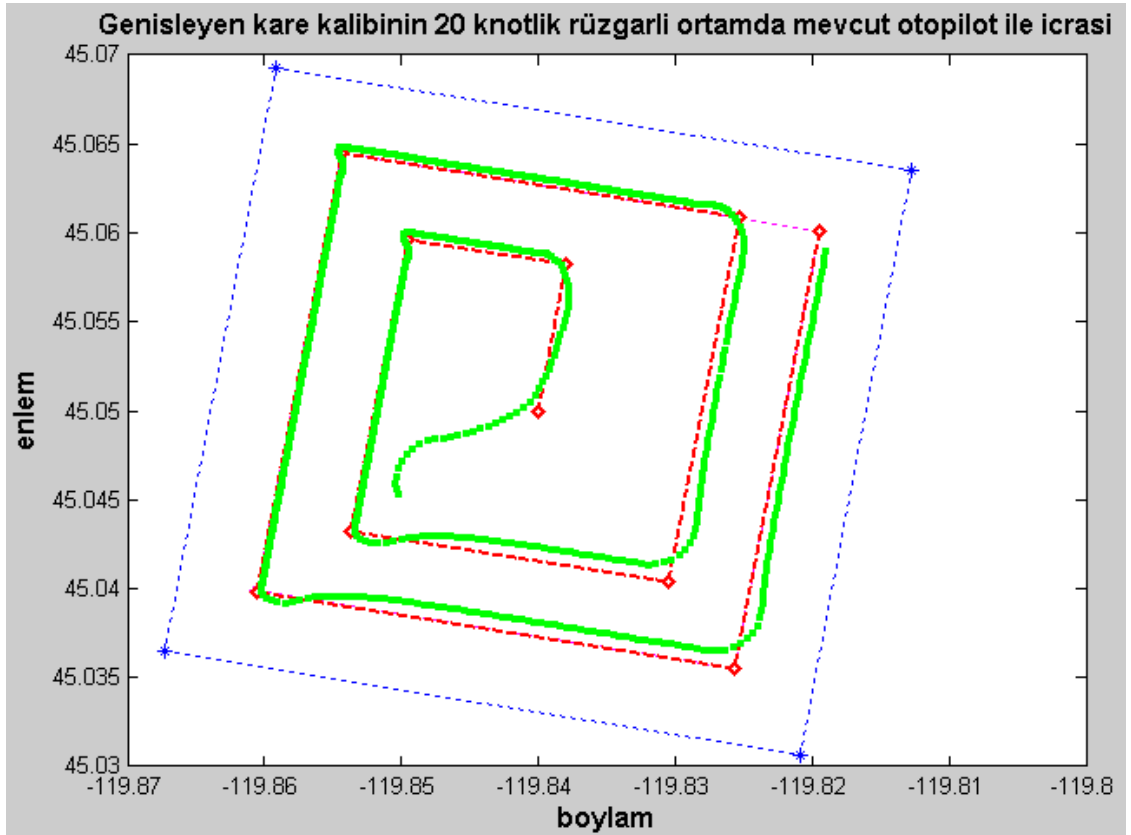


Şekil 4.27 : Genişleyen kare kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.

[N45.045 W119.85] pozisyonundan, 50 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, 20 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir ortamda genişleyen kare kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 2 nm uzunluklu, 0.5 nm izler arası mesafesine sahip, sol dönüş yönlü genişleyen kare kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.28'de görüldüğü gibidir. Şekildeki kırmızı hat genişleyen kare kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Mavi hat kalıp sınırlarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere 20 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı genişleyen kare hattını mümkün olan en az sapma ile takip edebilmiştir. Şekil 4.29'da Aerosim simülatörü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam ve uçuş şartlarında, yine 20 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen uçuş izi görülmektedir. Şekil 4.28 ile Şekil 4.29'a karşılaştırmalı olarak bakıldığında geliştirilen güdüleme sisteminin, genişleyen kare kalıbı için mevcut otopilota göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir.

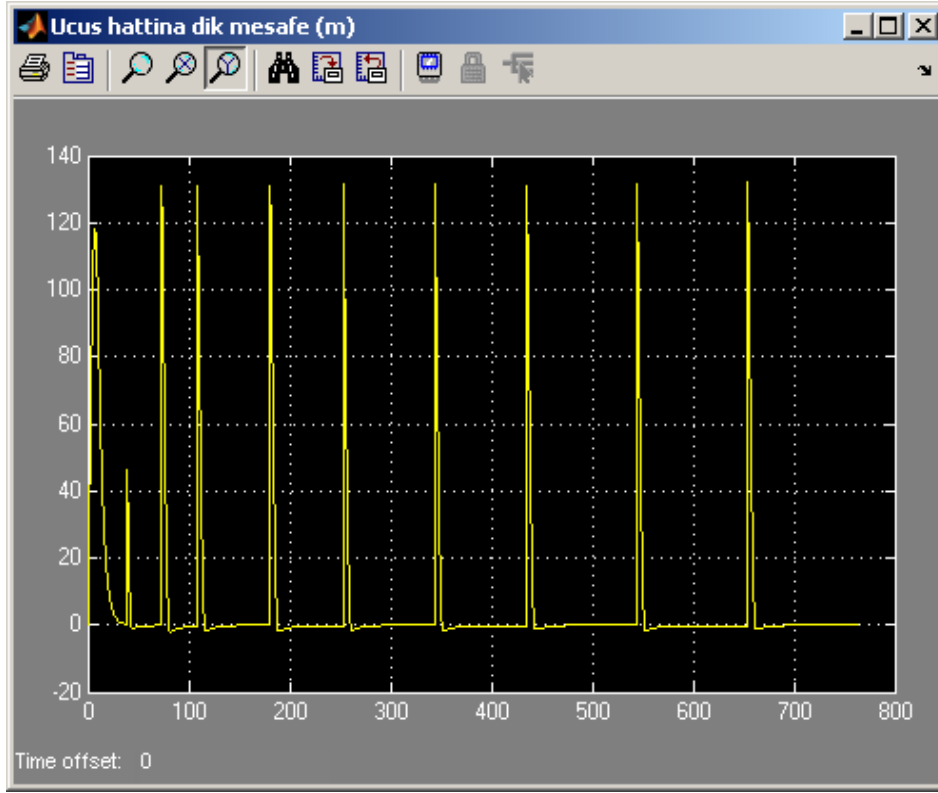


**Şekil 4.28 :** Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda genişleyen kare uçuş izi.

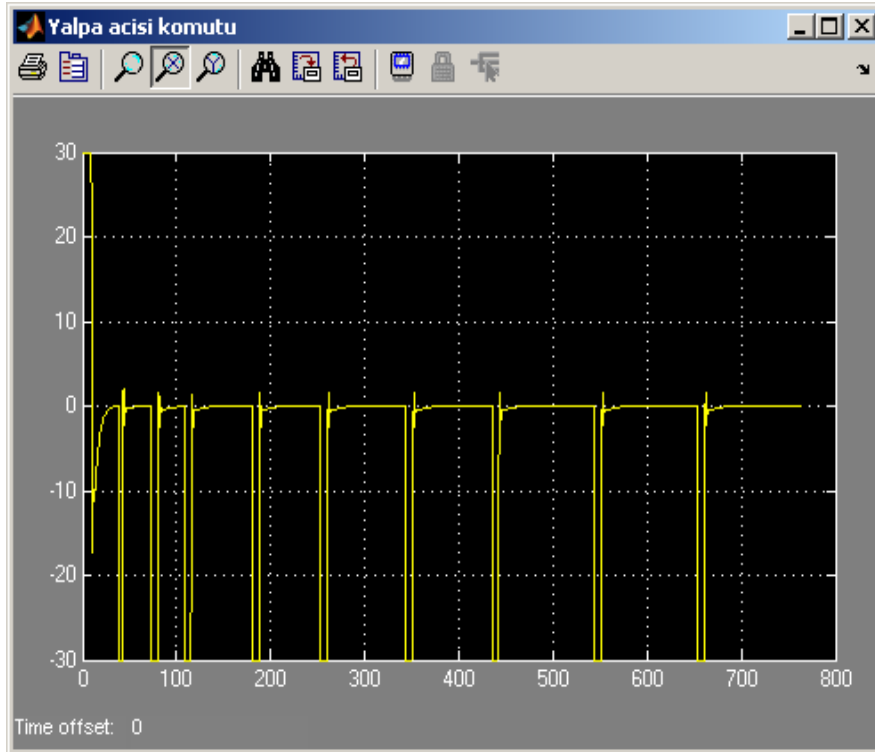


**Şekil 4.29 :** Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda genişleyen kare uçuş izi.

Rüzgârlı ortamda genişleyen kare kalıbı simülasyonu için geliştirilen algoritmanın uçuş hattına dik mesafe değeri değişimi Şekil 4.30'da, hesaplanan yalpa açısı komutu değişimi de Şekil 4.31'de gösterilmiştir.

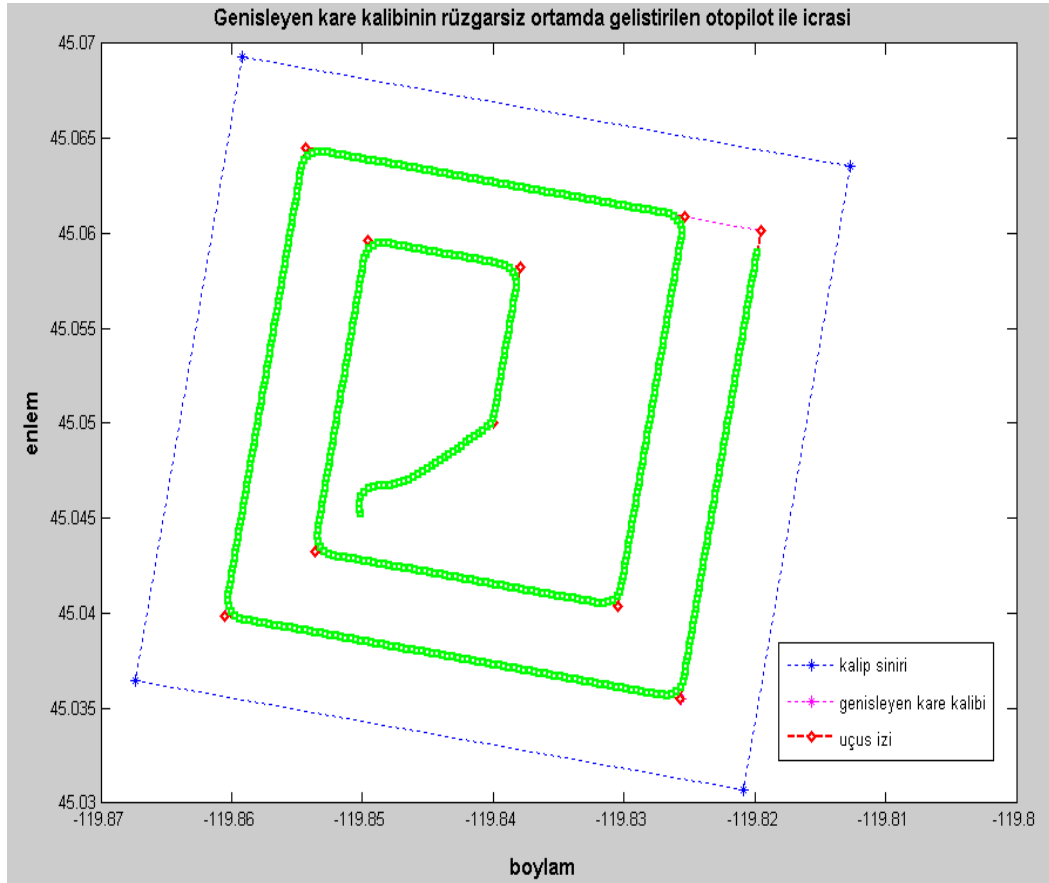


Şekil 4.30 : Genişleyen kare rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değişimi.



Şekil 4.31 : Genişleyen kare rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.

[N45.045 W119.85] pozisyonundan, 50 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda genişleyen kare kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 2 nm uzunluklu, 0.5 nm izler arası mesafesine sahip, sol dönüş yönlü genişleyen kare kalıbının geliştirilen otopilot ile icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.32’de görüldüğü gibidir. Şekilde kırmızı hat genişleyen kare kalıbı hattı, yeşil ile gösterilen ise tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Mavi hat kalıp sınırlarını göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır. Sadece karelerin köşe noktalarında dönüşler için hava aracının dinamiğine ve teknik özelliklerine uygun yumuşatmalar yapılmıştır.

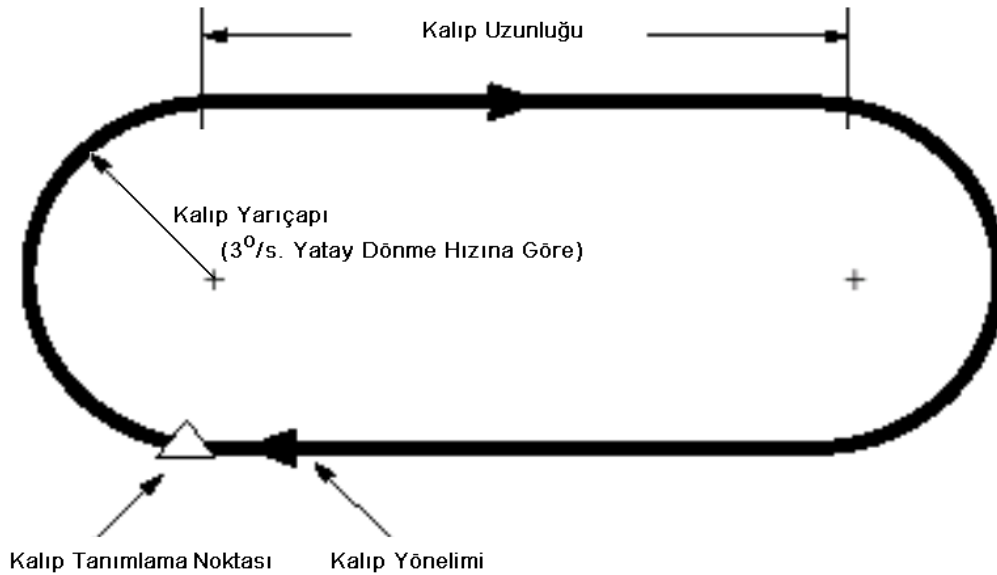


Şekil 4.32 : Genişleyen kare kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.

#### 4.4.4 Bekleme kalıbının gerçekleşmesi

Bekleme kalıbı, kalıp tanımlama noktasına göre sağ veya sol yönlü oluşturulabilen, tek bir uçuş noktası etrafında oluşturulabilen, hava aracının uçuş noktası etrafında yörünge çizmesini sağlayan kalıp türüdür. Bekleme kalıbı, Şekil 4.33’de gösterilen parametrelerle tanımlanır.

- Kalıp yönelimi: Kalıbının ortasından geçen kalıba paralel hattın kuzey ile yapmış olduğu yönelim açısıdır.
- Kalıp uzunluğu: Kalıbın üzerindeki dönme noktaları arasındaki mesafedir.
- Dönme yönü: Kalıp üzerinde soldan sağa ya da sağdan sola dönüleceğini belirtir.



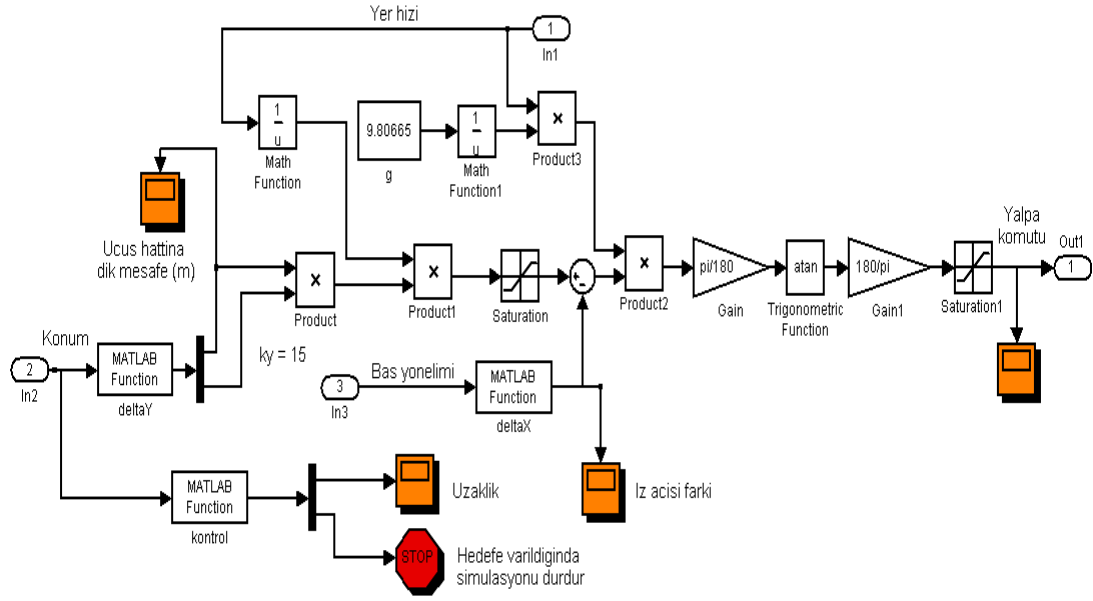
**Şekil 4.33** : Bekleme kalıbı parametreleri.

Bekleme kalıbının icrasına, kalıp tanımlama noktası ilk defa geçildikten ve kalıba giriş gerçekleştirildikten sonra başlanır. Kalıbın icrası, verilen kalıp değişkenlerine göre hesaplanmış kalıp dönüş noktaları dikkate alınarak yapılır. Eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası düz bir hat oluşturuyorsa, bu hat üzerinde kalınacak şekilde, eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası bir çember oluşturuyorsa, bu çember üzerinde kalınacak şekilde, yalpa açısı komutları üretilir ve kalıbın icra edilmesi sağlanır. Yalpa açısı komutu, hava aracının yapabileceği en yüksek yalpa açısı değerinden daha yüksek ise, yalpa açısı komutu en yüksek değere eşitlenir ve buna uygun dönüş yarıçapı ve kalıp genişliği hesaplanır.

Bekleme kalıbı icrası için tasarlanan yöntemde, hava aracının istenen nokta çevresinde tur atabilmesi için gerekli olan yalpa açısı komutu, iz açısı farkı ve hava aracının bekleme kalıbı hattın dik mesafesi kullanılarak bulunmaktadır. Yalpa açısı komutu, uçuş esnasında konum, yer hızı, duruş açıları gibi uçuş bilgileri değiştiğinde yeniden hesaplanmaktadır.

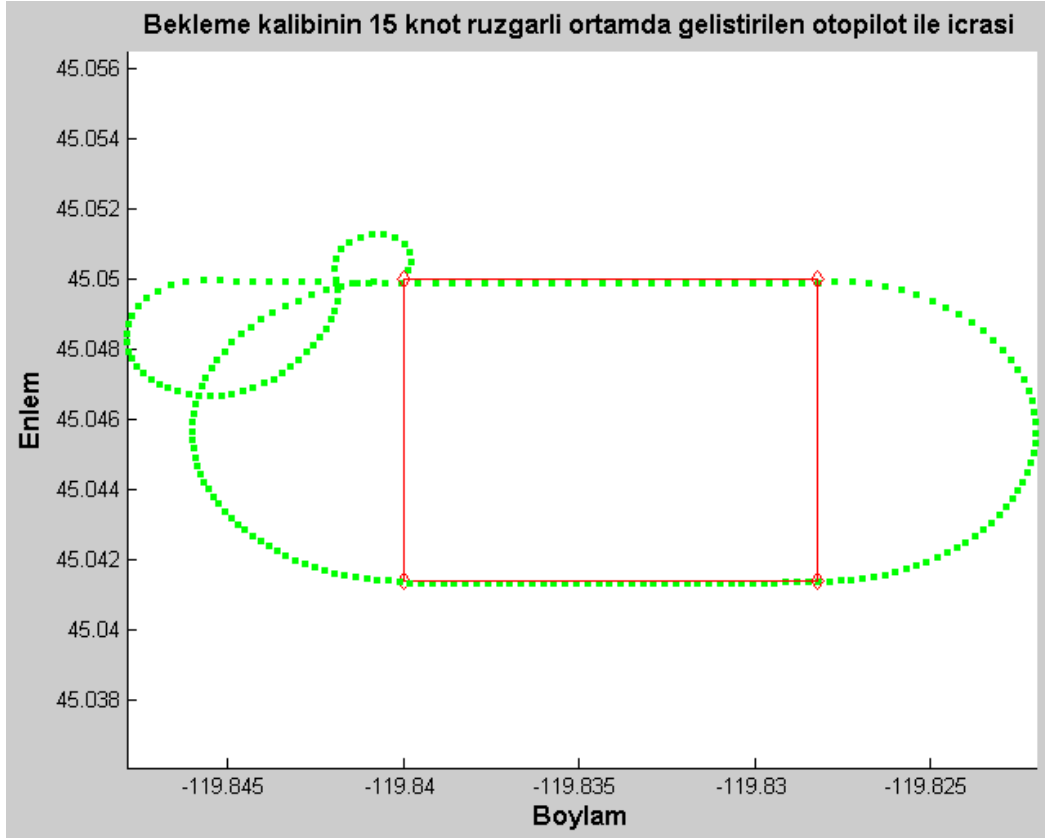


Algoritma AeroSim simülatorüyle çeşitli giriş parametreleriyle rüzgârlı ve rüzgârsız ortam için ayrı ayrı denenmiş ve benzetim sonuçları oluşturulmuştur. Bekleme kalıbı için hatta tutma algoritması Şekil 4.34'deki blok şemasında gösterilmiştir. Uçuş hattına dik mesafe değerinin yalpa açısı komutu hesabında önem derecesini gösteren  $ky$  katsayısı simülasyonlarla hesaplanmıştır. Bekleme kalıbı için  $ky = 15$  değeri katsayı olarak kullanılmıştır.

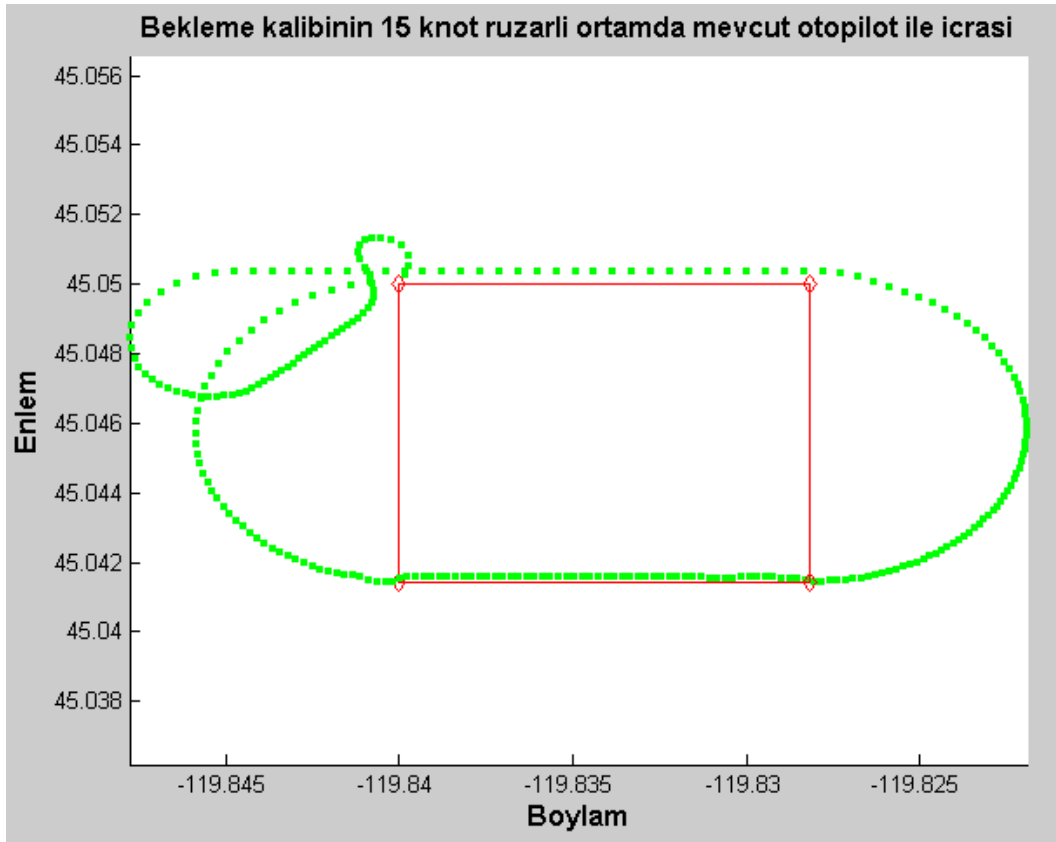


Şekil 4.34 : Bekleme kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.

[N45.05 W119.84] pozisyonundaki uçuş başlangıç noktasından, 25 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, 15 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir ortamda bekleme kalıbı benzetimi yapılmıştır. KTN'si [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 0.5 nm uzunluklu, doksan derece yönelimli, sağ dönüş yönlü bekleme kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.35'de görüldüğü gibidir. Şekildeki kırmızı hat bekleme kalıbı köşe noktaları hattını, yeşil ile gösterilen hat ise tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere 15 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı bekleme hattını rotadan çok az saparak takip edebilmiştir. Şekil 4.36'da Aerosim simülatorü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam ve uçuş şartlarında, yine 15 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen uçuş izi görülmektedir. Şekil 4.35 ve Şekil 4.36'ya karşılaştırmalı olarak bakıldığında geliştirilen güdüleme sisteminin, bekleme kalıbı için mevcut otopilota göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir. Mevcut otopilot modülü kullanıldığında şekillerden görüldüğü üzere bekleme kalıbı rotasından sapmalar artmaktadır.

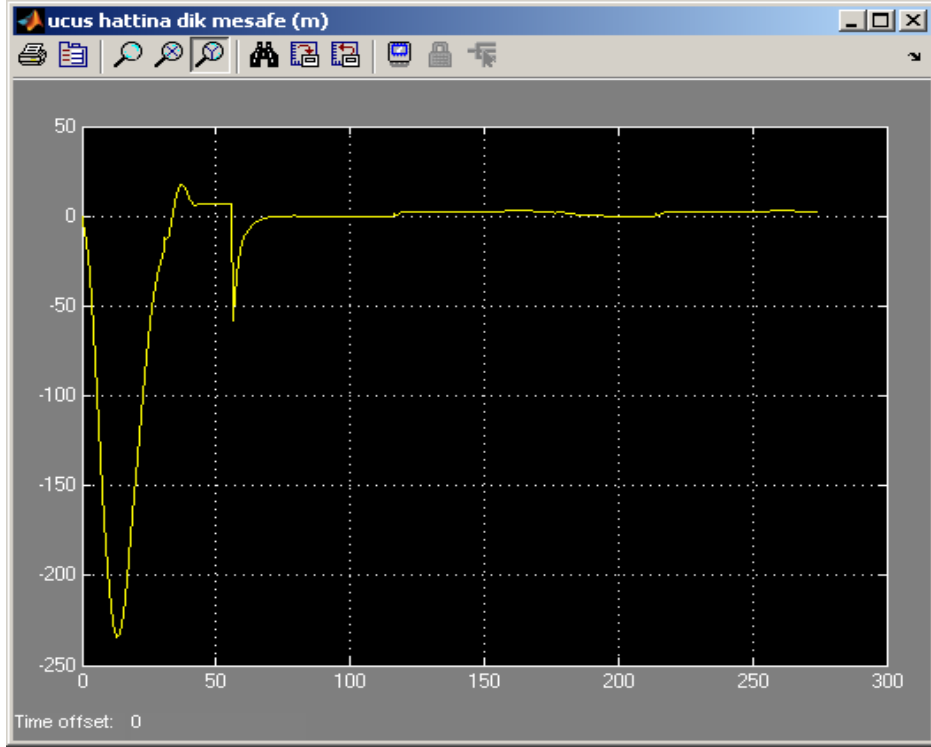


**Şekil 4.35 :** Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.

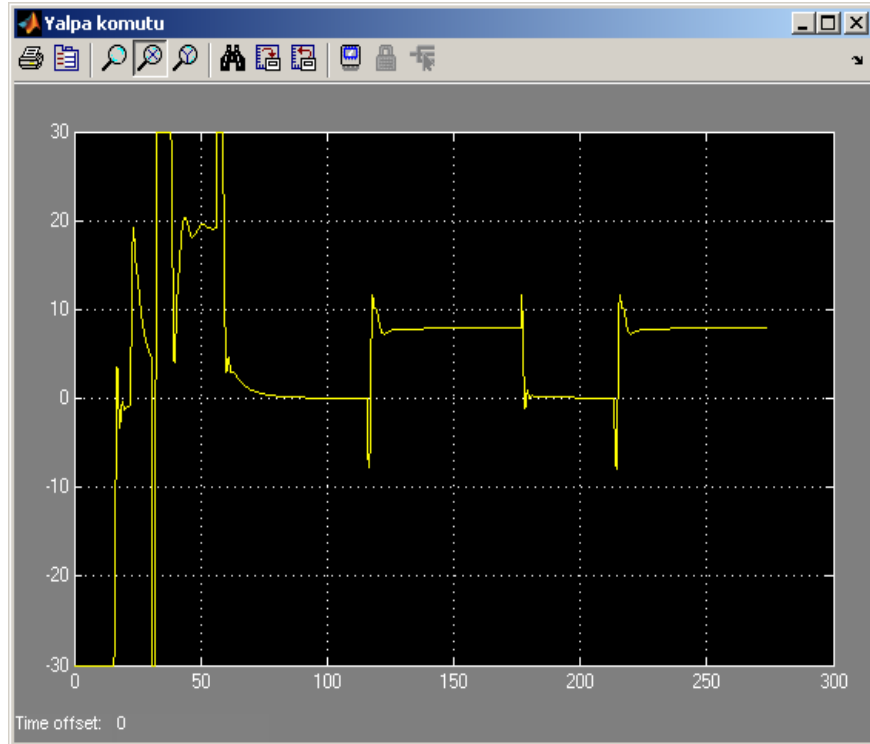


**Şekil 4.36 :** Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.

15 knot rüzgârlı ortamda bekleme simülasyonu için tezde özgün olarak geliştirilen algoritman ile elde edilen uçuş hattına dik mesafe değeri değişimi Şekil 4.37’de, geliştirilen özgün güdüleme algoritmasıyla hesaplanan yalpa komutu değişimi Şekil 4.38’de gösterilmiştir.

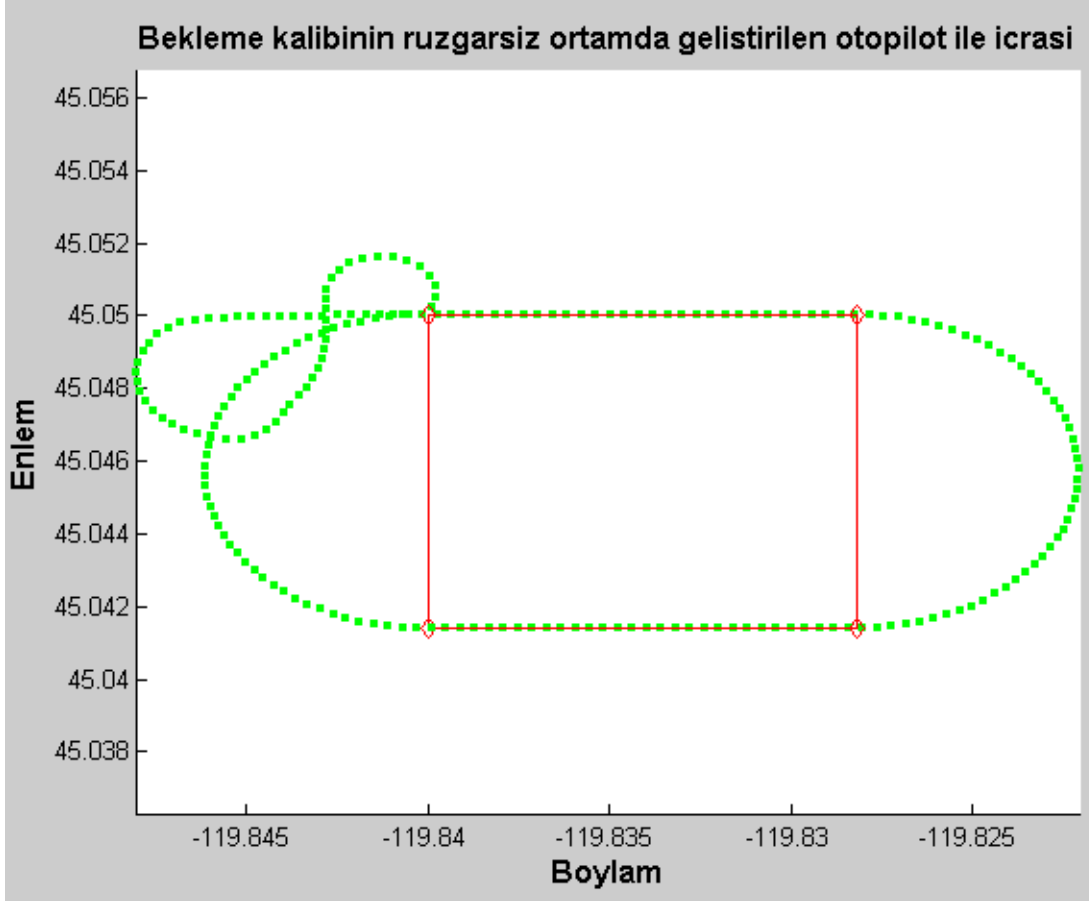


Şekil 4.37 : Bekleme kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değışimi.



Şekil 4.38 : Bekleme kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.

[N45.05 W119.84] koordinatlı ilk konum noktasından, 25 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda, KTN'si [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 0.5 nm uzunluklu, sağ dönüş yönlü bekleme kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.39'da görüldüğü gibidir. Şekilde kırmızı hat bekleme kalıbı köşe noktalarını, yeşil ile gösterilen hat ise tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen bekleme kalıbı uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır.



Şekil 4.39 : Bekleme kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.

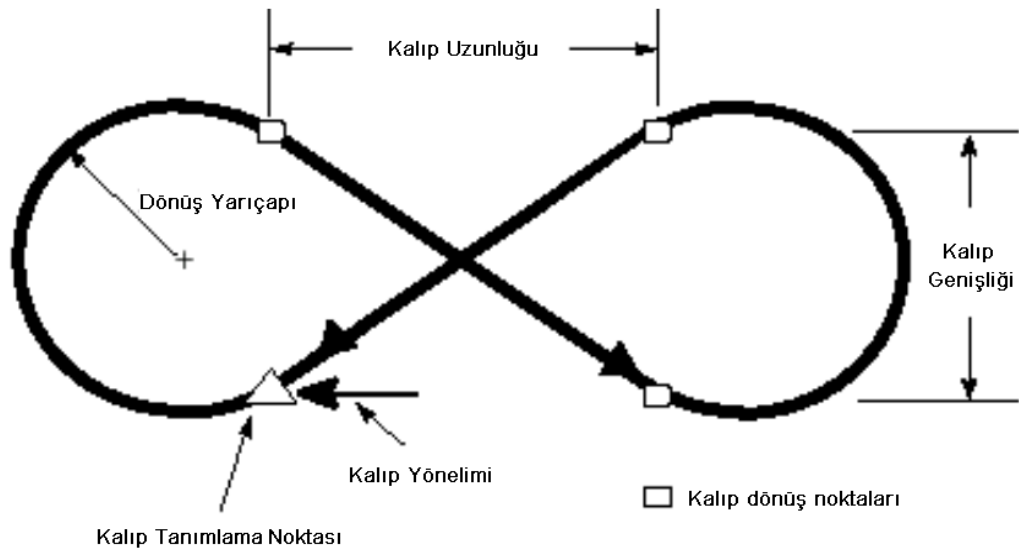
#### 4.4.5 Sekiz şekli kalıbının gerçekleşmesi

Sekiz şekli kalıbı, icrasına, kalıp tanımlama noktası üzerinden ilk defa geçildiğinde başlanılan, kalıp tanımlama noktasına göre sağ veya sol dönüş yönlü oluşturulabilen, kalıp tarama alanı içerisinde hava aracının sekiz rakamı şekli çizecek şekilde seyir yapmasını sağlayan kalıp türüdür. Şekil 4.40'da gösterilen parametreler ile tanımlanır.

- Kalıp tanımlama noktası: Kalıba giriş noktasıdır.
- Kalıp yönelimi: Kalıbının ortasından geçen kalıba paralel hattın kuzey ile

yapmış olduğu yönelim açısıdır.

- Kalıp genişliği: Kalıbın üzerindeki dönme noktaları arasındaki genişlemesine mesafedir.
- Kalıp uzunluğu: Kalıbın üzerindeki dönme noktaları arasındaki uzunlamasına mesafedir.
- Dönme yönü: Kalıp üzerinde soldan sağa ya da sağdan sola dönüleceğini belirtir.

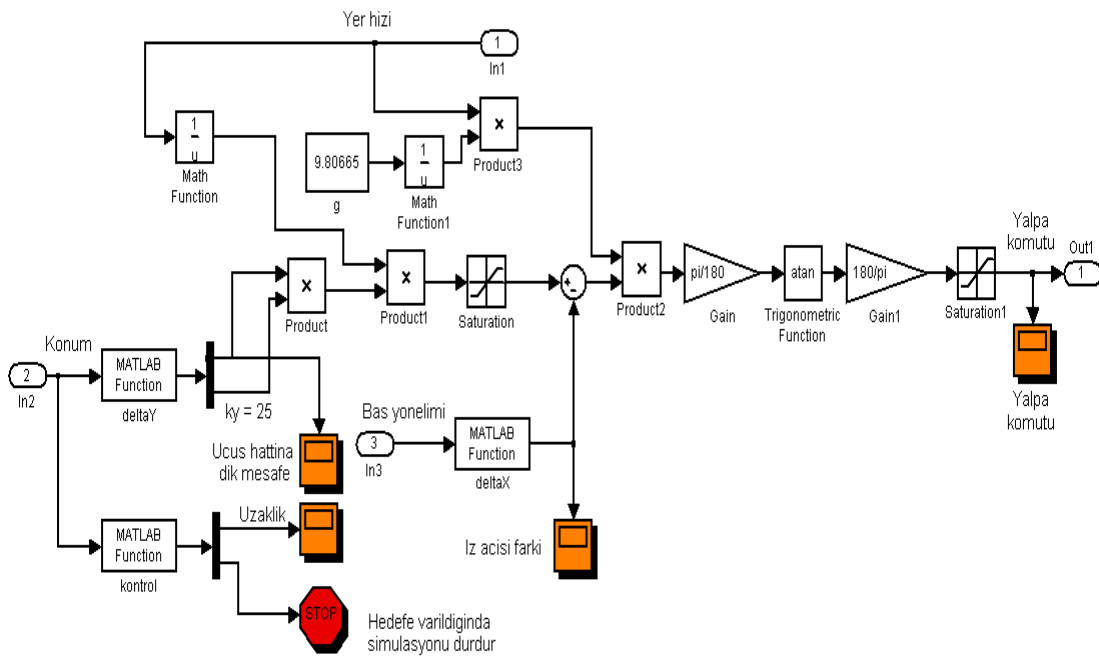


**Şekil 4.40** : Sekiz şekli kalıbı parametreleri.

Kalıbın icrası, verilen kalıp değişkenlerine göre hesaplanmış kalıp dönüş noktaları dikkate alınarak yapılır. Eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası düz bir hat oluşturuyorsa, bu hat üzerinde kalınacak şekilde, eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası bir çember oluşturuyorsa, bu çember üzerinde kalınacak şekilde, yalpa açısı komutları üretilir ve kalıbın icra edilmesi sağlanır. Eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası düz bir hat oluşturuyorsa, bu hat üzerinde kalınacak şekilde, iz açısı ile istenilen hattın kuzey yönelimi farkı bulunur, buna göre yalpa açısı komutu üretilir. Eğer üzerinden geçilen kalıp dönüş noktası ve bir sonraki kalıp noktası bir çember oluşturuyorsa, bu çember üzerinde kalınacak şekilde, yalpa açısı komutları üretilir.

Sekiz şekli kalıbı icrası için tasarlanan yöntemde, hava aracının istenen nokta çevresinde tur atabilmesi için gerekli olan yalpa açısı komutu, iz açısı farkı ve hava

aracının bekleme kalıbı hattın dik mesafesi kullanılarak bulunmaktadır. Yalpa açısı komutu, uçuş esnasında konum, yer hızı, duruş açıları gibi uçuş bilgileri değişikçe yinelemeli olarak hesaplanmaktadır. Sekiz şekli kalıbı için geliştirilen güdümlenme algoritması, AeroSim simülatörüyle çeşitli giriş parametreleriyle rüzgârlı ve rüzgârsız ortam için ayrı ayrı denenmiş ve simülasyon sonuçları oluşturulmuştur. Sekiz şekli kalıbı için hatta tutma algoritması Şekil 4.41'deki blok şemasında gösterilmiştir. Uçuş hattına dik mesafe değerinin yalpa açısı komutu hesabında önem derecesini gösteren  $ky$  katsayısı simülasyonlarla hesaplanmıştır. Sekiz şekli kalıbı için  $ky$  sabiti  $ky = 25$  olarak kullanılmıştır.

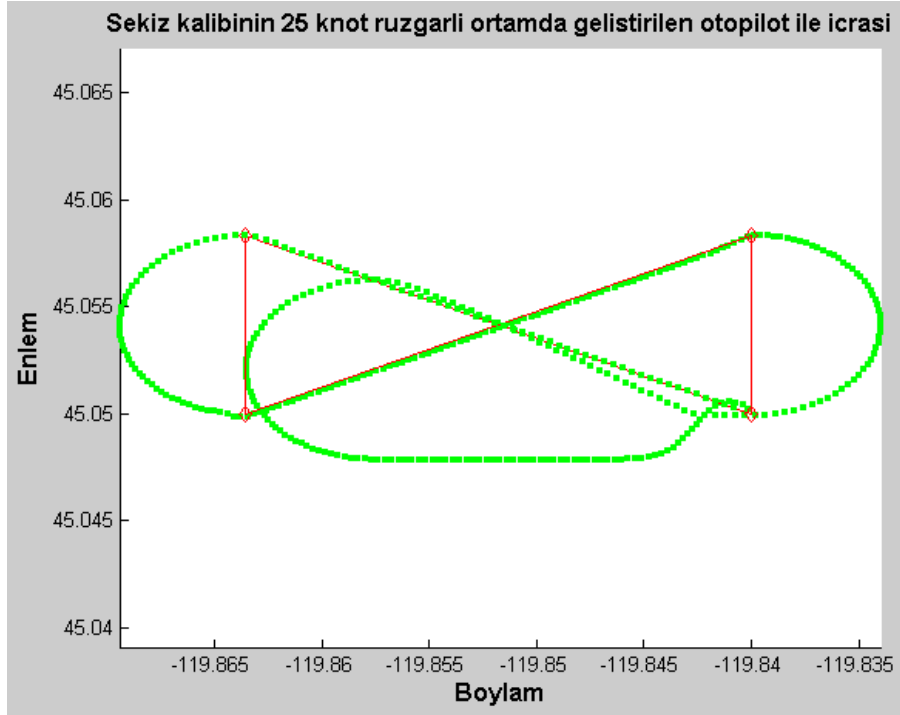


**Şekil 4.41 :** Sekiz şekli kalıbı hatta tutma algoritması blok şeması.

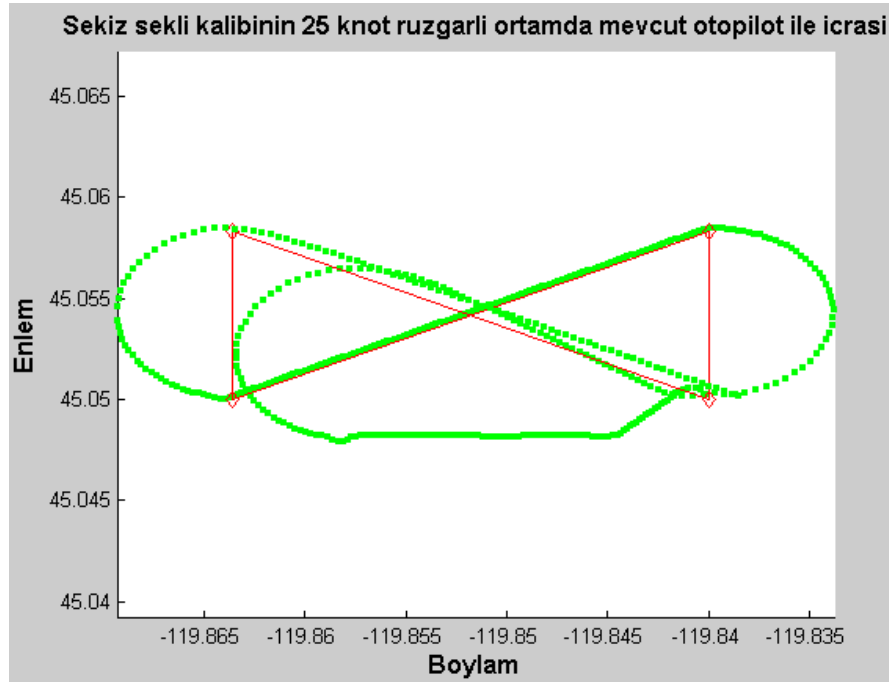
[N45.05 W119.84] pozisyonundaki uçuş başlangıç noktasından, 40 m/sn ilk yer hızı ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, 25 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir ortamda sekiz şekli kalıbı benzetimi yapılmıştır. KTN'si [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 1 nm uzunluklu, 0.5 nm genişlikli, sol dönüş yönlü sekiz şekli kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.42'de görüldüğü gibidir. Şekildeki kırmızı hat sekiz şekli kalıbı köşe noktaları hattını, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere 25 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı sekiz şekli hattını rotadan çok az saparak takip edebilmiştir.

Şekil 4.43'de Aerosim simülatörü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam

ve uçuş şartlarında, yine 25 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen uçuş izi görülmektedir. Şekil 4.42 ve Şekil 4.43'e karşılaştırmalı olarak bakıldığında geliştirilen güdümlenme sisteminin, sekiz şekli kalıbı için mevcut otopilota göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir.



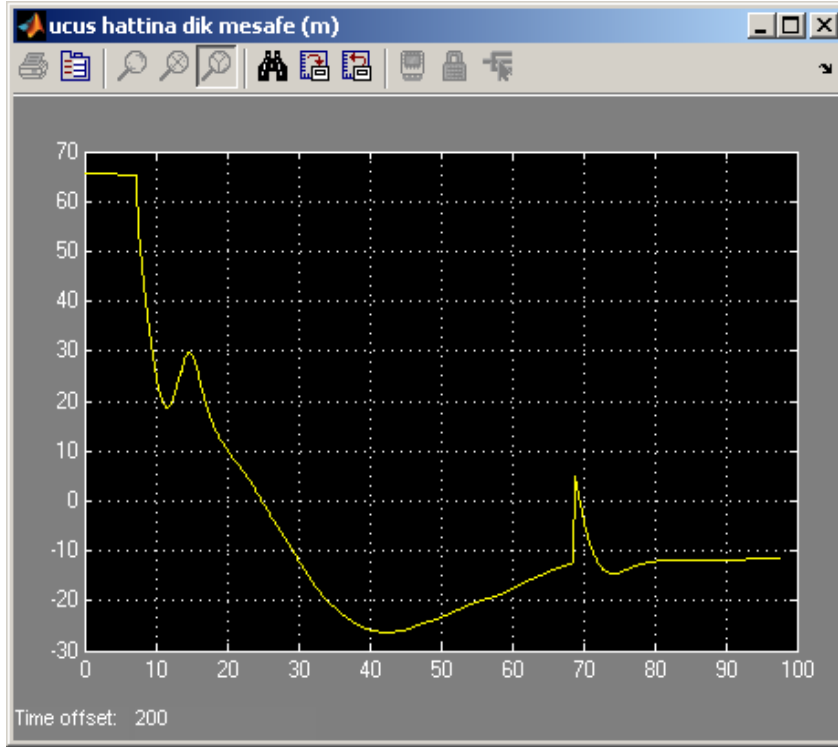
Şekil 4.42 : Geliştirilen otopilotla rüzgârlı ortamda sekiz şekli kalıbı uçuş izi.



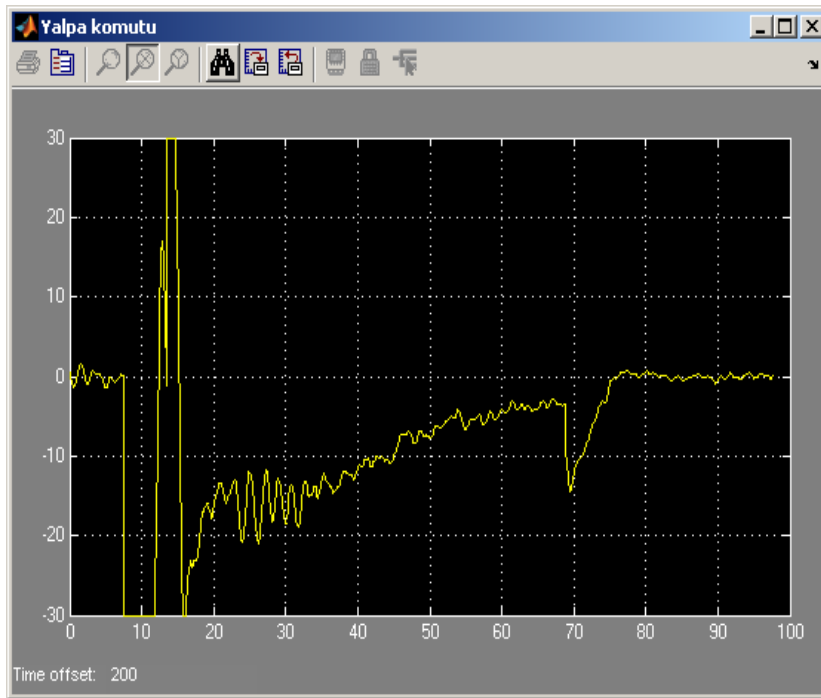
Şekil 4.43 : Mevcut otopilotla rüzgârlı ortamda bekleme kalıbı uçuş izi.

25 knot rüzgârlı ortamda sekiz şekli kalıbı icrası için tezde özgün olarak geliştirilen

algoritma ile elde edilen uçuş hattına dik mesafe değeri değişimi Şekil 4.44’de, geliştirilen özgün güdüleme algoritmasıyla hesaplanan yalpa komutu değişimi Şekil 4.45’de gösterilmiştir.



Şekil 4.44 : Sekiz kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için deltaY değışımi.

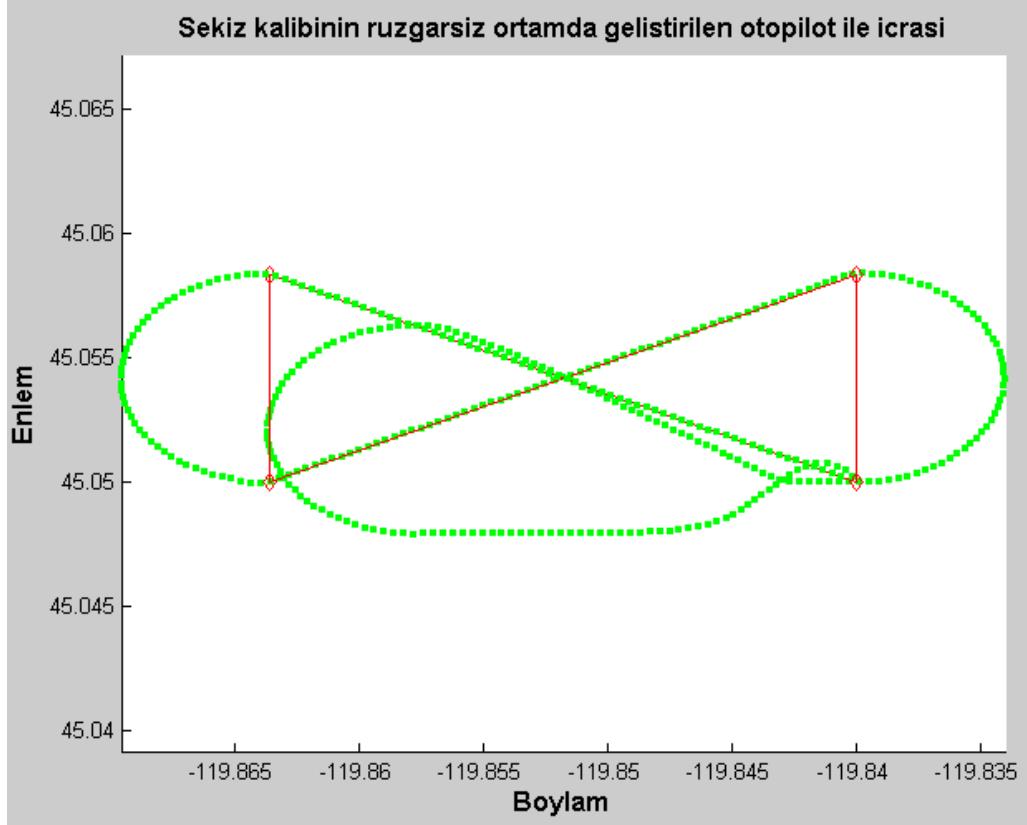


Şekil 4.45 : Sekiz kalıbı rüzgârlı ortam benzetimi için yalpa komutu.

[N45.05 W119.84] pozisyonundaki uçuş başlangıç noktasından, 40 m/sn ilk yer hızı



ile uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda sekiz kalıbı benzetimi yapılmıştır. Kalıp tanımlama noktası [N45.05 W119.84] pozisyonunda bulunan, 1 nm uzunluklu, 0.5 nm genişlikli, sol dönüş yönlü sekiz şekli kalıbının icrasındaki uçuş izi, Şekil 4.46'da görüldüğü gibidir. Şekildeki kırmızı hat sekiz şekli kalıbı köşe noktaları hattını, yeşil ile gösterilen hat tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen sekiz şekli kalıbı uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır.



Şekil 4.46 : Sekiz kalıbı rüzgârsız ortam için uçuş izi.

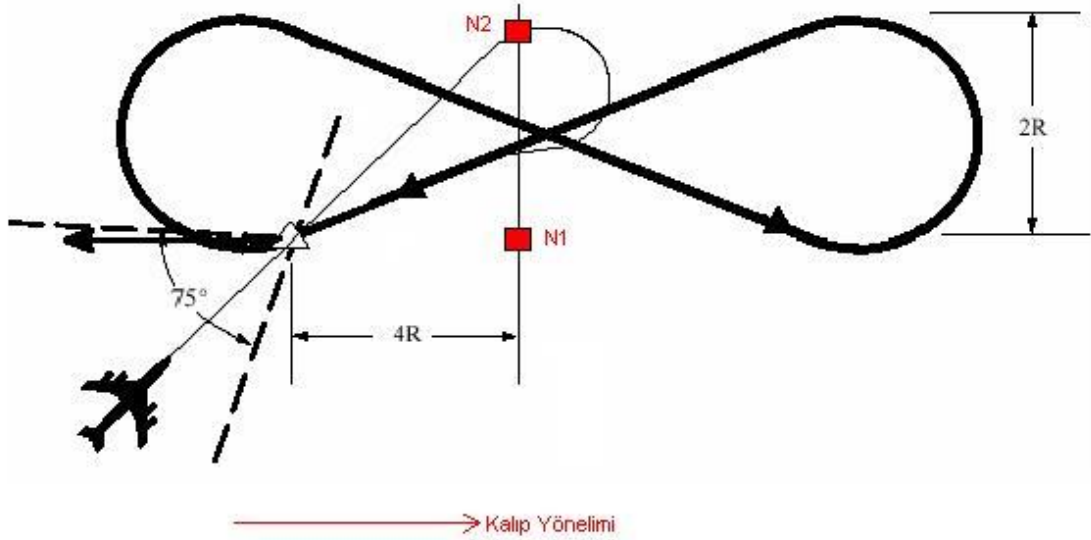
#### 4.4.6 Uçuş kalıplarına girişler

Hava aracının KTN'deki iz açısına, kalıp yönelimine ve kalıp dönüş yönüne bağlı olarak kalıba girebilmesi için farklı giriş prosedürleri uygulanır. Hava aracının iz açısı ile kalıp yönelimi arasındaki fark iz açısı farkı (İAF) olarak tanımlanmaktadır. İAF'nin durumuna göre kalıba giriş şekilleri şunlardır;

- ✓  $-110^\circ < \text{İAF} < 70^\circ$  ise Doğrudan giriş algoritması uygulanır.
- ✓  $-185^\circ < \text{İAF} < -110^\circ$  ise Damla girişi algoritması uygulanır.
- ✓  $70^\circ < \text{İAF} < 175^\circ$  ise Paralel giriş algoritması uygulanır.

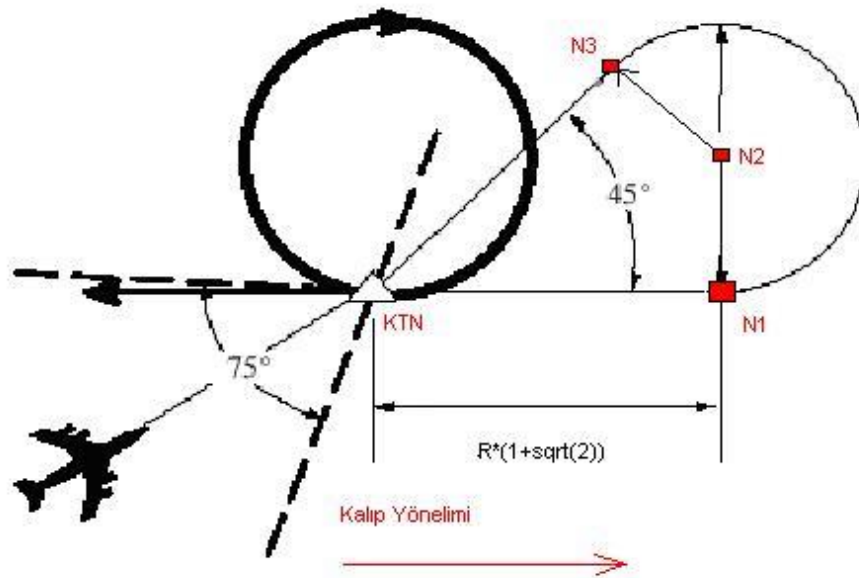


Sekiz şekli kalıbına damla girişi Şekil 4.49’da gösterilmiştir. Rotanın  $-110^\circ$  ve  $-185^\circ$  arasındaki değişiminde gerçekleşir. Şekilde gösterildiği gibi kalıp tanımlama noktası geçildikten sonra kalıp yönelimiyle  $45^\circ$  açı yapılarak yeni rota yakalanır.



Şekil 4.49 : Sekiz şekli kalıbına damla girişi.

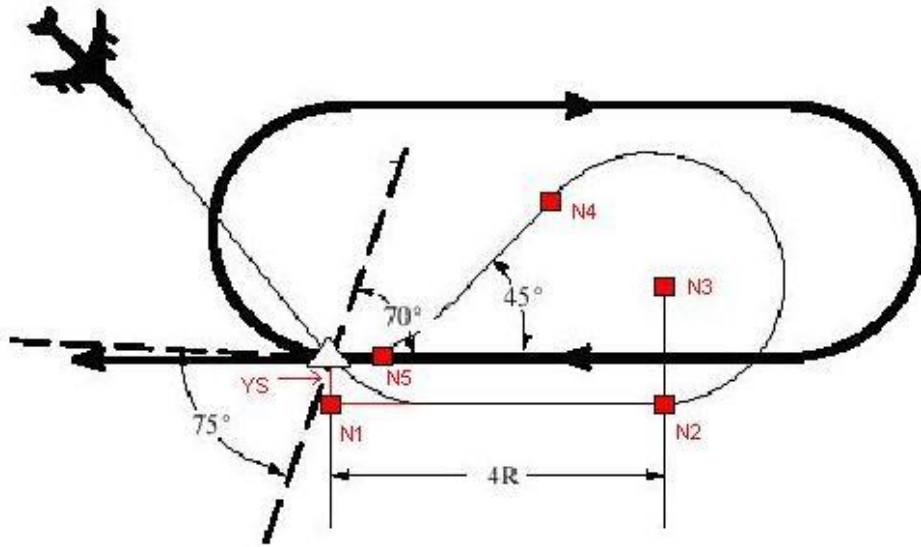
Daire kalıbına damla girişi, rotanın  $-110^\circ$  ve  $-185^\circ$  arasındaki değişiminde gerçekleşir. Şekil 4.50’de gösterildiği gibi kalıp tanımlama noktası geçildikten sonra kalıp yönelimiyle  $45^\circ$  açı yapılarak yeni rota yakalanır.



Şekil 4.50 : Daire kalıbı damla girişi.

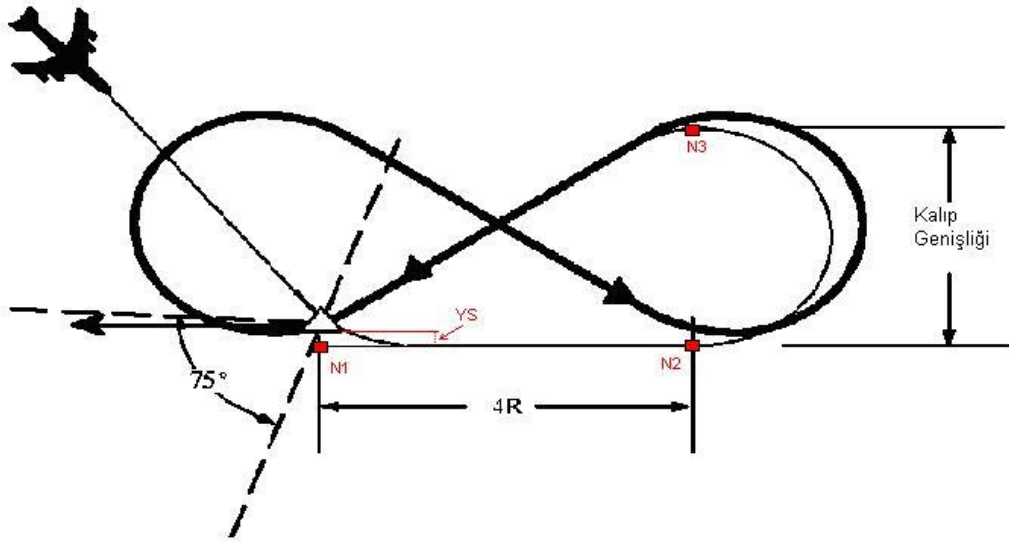
Kalıp yönelimi ile  $45^\circ$  açı yapılarak yeni rotanın yakalanabilmesi için gerekli olan Nokta3 geometrik hesaplama ile bulunmuştur. KTN'den kalıba girmiş olan hava aracı Nokta3'e yönlendirilir. Nokta3 geçildikten sonra Nokta1'e varılması için daire kalıbı algoritması çağrılır ve gerekli olan yalpa komutu üretilir. Nokta1'e gelince ise daire kalıbı algoritmasından çıkılır ve KTN'ye yönlendirme yapılır.

Bekleme kalıbına paralel giriş Şekil 4.51'de gösterilmektedir.  $70^\circ$  ve  $175^\circ$  derecelik yol açısı değişiklikleri için paralel giriş uygulanır. Bu girişte bekleme kalıbı tanımlama noktası geçildikten sonra paralel bir rotaya girecek kalıp boyu kadar ilerledikten sonra rotaya girmek için gerekli dönüş yapılır. KTN'yi geçen hava aracının yapacağı yatay sapma hesaplanır. Yatay sapma hesabında bulunan yalpa komutu burada kullanılır. Nokta1'e gelindikten sonra Nokta2'ye yönlendirme yapılır. Nokta2 geçildikten sonra Nokta4'e varılması için daire kalıbı algoritması çağrılır ve gerekli olan yalpa komutu üretilir. Nokta4'e gelince ise daire kalıbı algoritmasından çıkılır ve Nokta5'e yönlendirme yapılır.



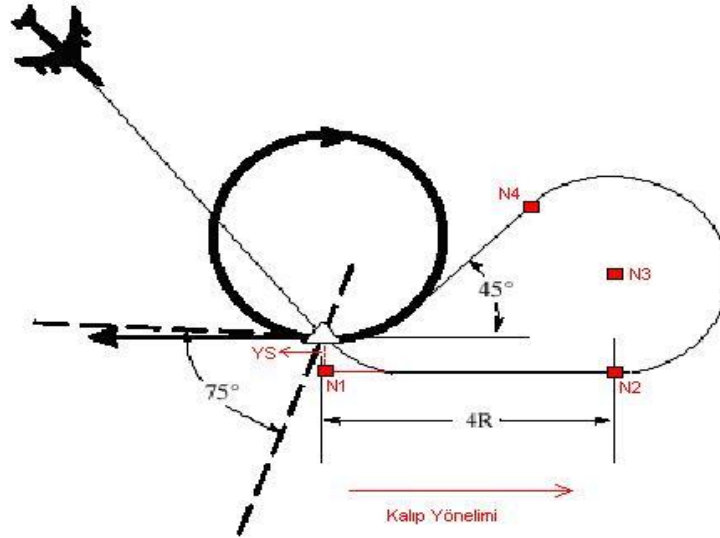
Şekil 4.51 : Bekleme kalıbına paralel giriş.

Bekleme kalıbına paralel giriş Şekil 4.52'de gösterilmektedir. Rotanın  $70^\circ$  ve  $175^\circ$  arasında değişiminde gerçekleşir. Kalıp tanımlama noktası geçildikten sonra otomatik olarak belli bir ofset değeri uçağın hızı, rotası ve rüzgâr hesaba katılarak bulunur.



Şekil 4.52 : Sekiz Şekli kalıbına paralel giriş.

Daire kalıbına paralel giriş Şekil 4.53’de gösterilmektedir. KTN’yi geçen hava aracının yapacağı yatay sapma hesaplanır. Yatay sapma hesabında bulunan yalpa komutu burada kullanılır. Nokta1’e gelindikten sonra Nokta2’ye yönlendirme yapılır. Nokta2 geçildikten sonra Nokta4’e varılması için daire kalıbı algoritması çağrılır ve gerekli olan yalpa komutu üretilir.

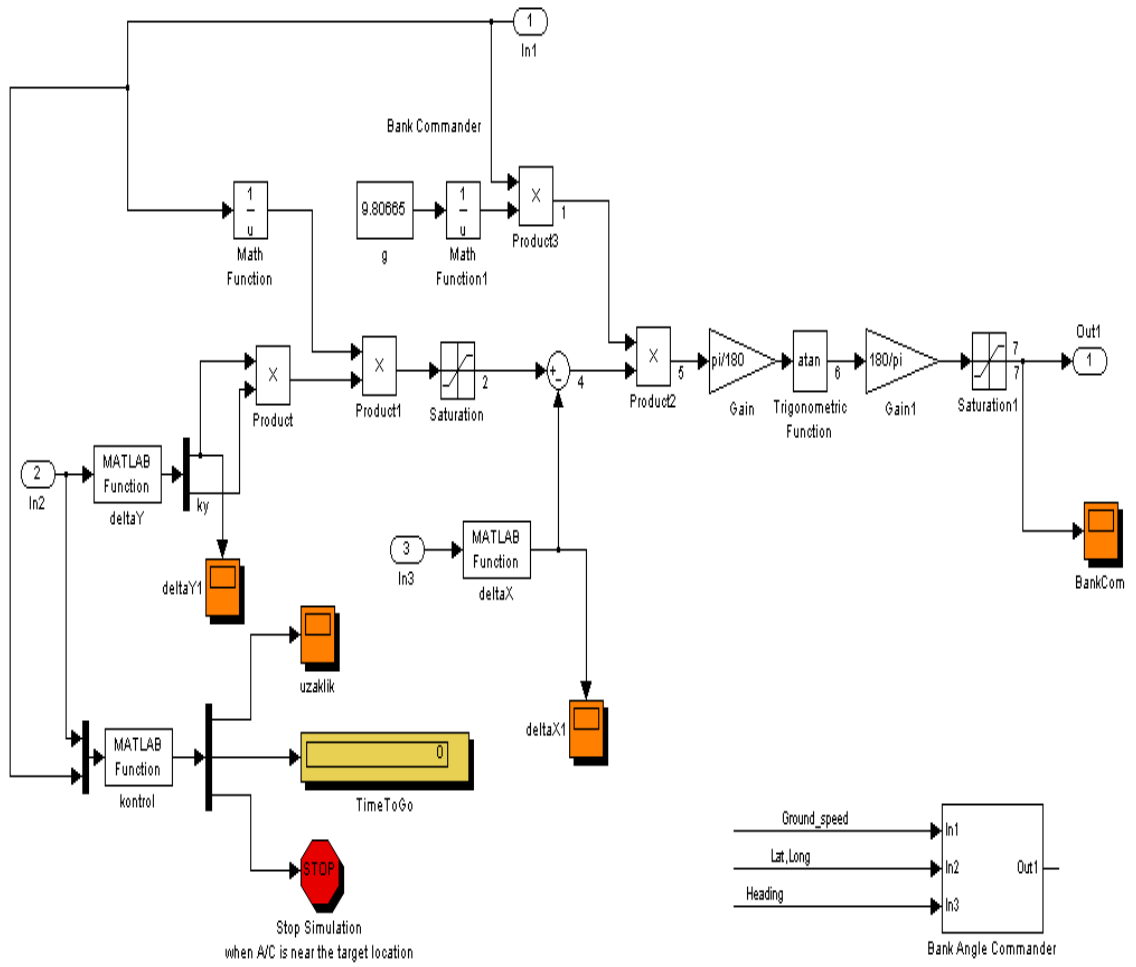


Şekil 4.53 : Daire kalıbına paralel giriş.

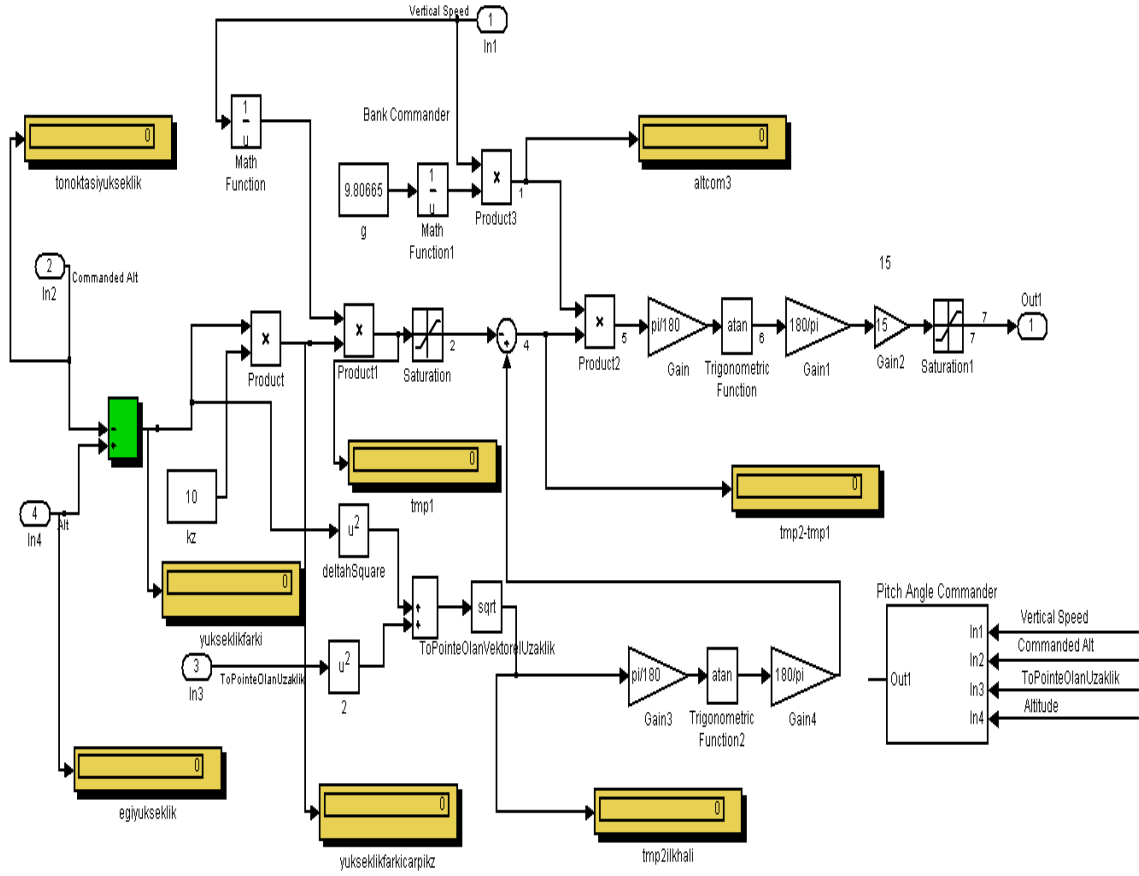


## 5. UÇUŞ PLANI YÜRÜTME ALTSİSTEMİ

Hava aracını sapma durumunda rotaya oturtmak için kullanılan yalpalama açısı ve yunuslama açısı komutları Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilen kontrol sistemleriyle hesaplanır. Yalpa açısı ve yunus açısı komutlarındaki  $k_y$  ve  $k_z$  katsayıları farklı uçuş benzetimlerinin koşturulması ile bulunmuştur.



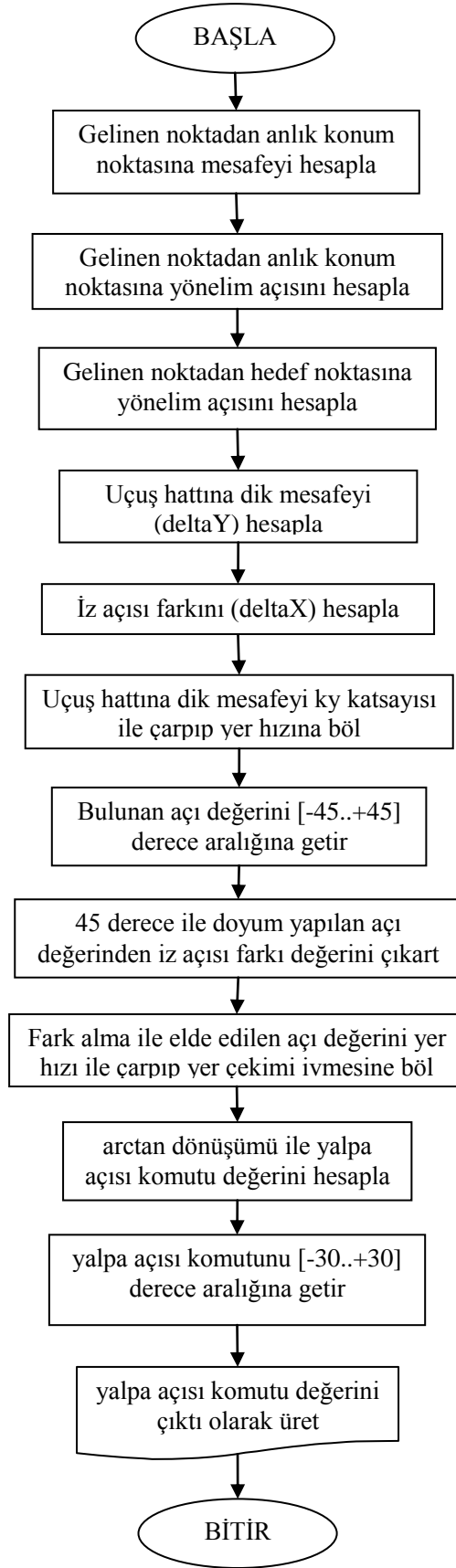
Şekil 5.1 : Yatay güdüleme kontrol sistemi.



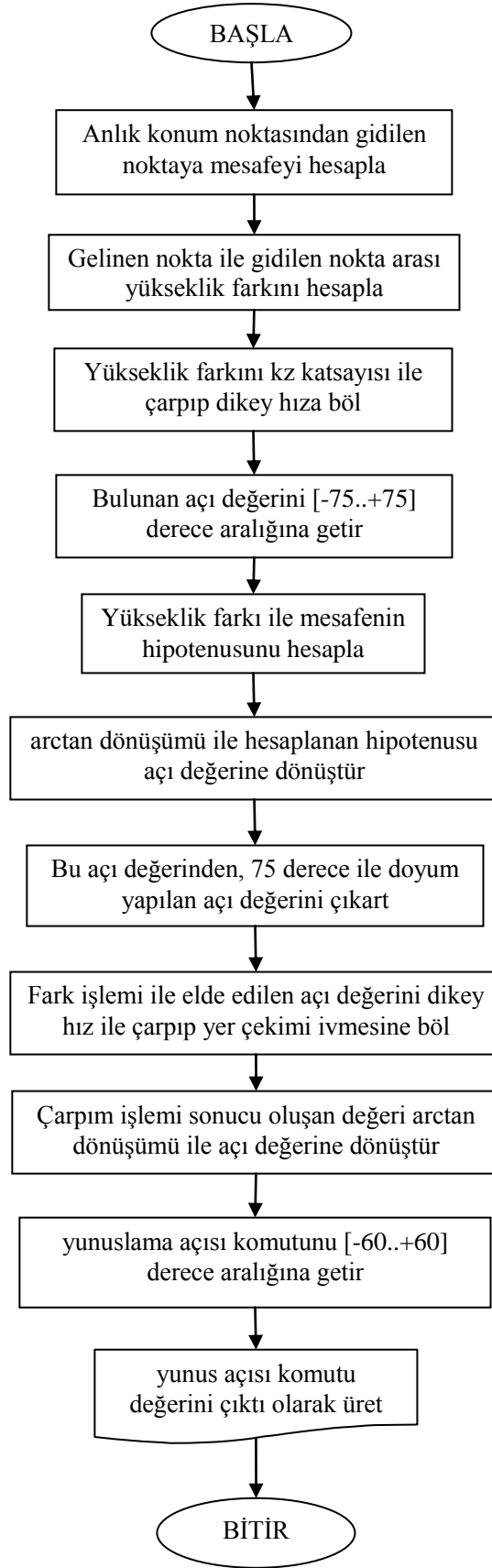
Şekil 5.2 : Dikey güdümlenme kontrol sistemi.

Oto pilot sisteminde seyrüsefer sensörlerinden elde edilen konum, hız, yön, duruş açıları gibi bilgiler ışığında hava aracının yatayda ve dikeyde istediği rotada ilerleyebilmesi için güdümlenme yapılmalıdır. Hava aracının rotasında, istenilen uçuş rotasına göre herhangi bir sapma olduğunda, sapmayla orantılı, hava aracını yatayda yeniden o rotaya sokacak yalpa açısı komutu hesaplanır. Hava aracının rota değiştirmesi gereken zamanlarda da, bir sonraki rotaya oturmasını sağlayacak yalpa komutunun hesaplanması gerekmektedir. Ayrıca hava aracının alçalma, yükselme, iniş, kalkış ve istenen irtifada uçuşunun sağlanması için dikeyde yunuslama açısı komutu hesabı yapılmaktadır. Böylece yatay ve dikeyde gerçek zamanlı olarak bir geri besleme ile hava aracının istenilen uçuş planına göre istenilen uçuşu sağlaması ve uçuş hattında tutulması sağlanmaktadır. Seyrüsefer ve güdümlenme sistemleri hava aracını kullanıcının istediği uçuş noktalarından geçerek hedefe intikal ettirir. Bu çalışmada insansız hava aracı için temel oluşturacak olan yatay ve dikey güdümlenme kontrol sistemleri özgün olarak tasarlanmıştır. Hava aracını istenilen uçuş rotasına oturmada kullanılan yatay güdümlenme algoritması işlem akışı Şekil 5.3’de, dikey güdümlenme algoritması işlem akışı Şekil 5.4’de gösterilmiştir.





Şekil 5.3 : Uçuş planı yürütme yatay güdüm.



Şekil 5.4 : Uçuş planı yürütme dikey güdüm.

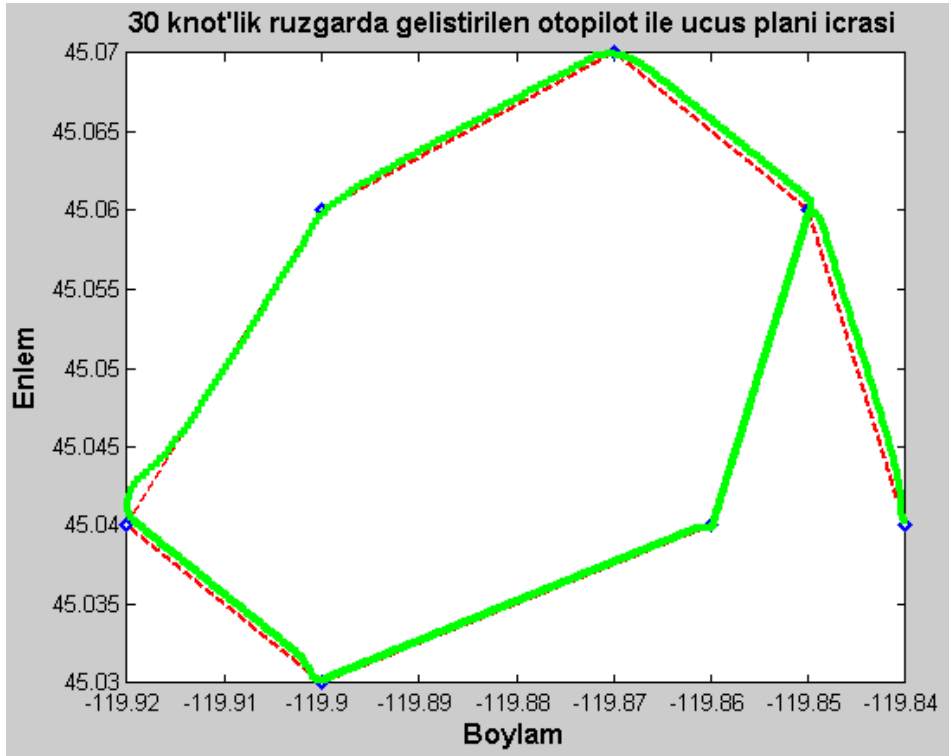
## 5.1 İki Boyutlu Uçuş Benzetimi

Yükseklikleri eşit, konum değerleri farklı altı noktalı örnek senaryoda, enlem ve boylamları Çizelge 5.1’de verilen uçuş noktalarından oluşan uçuş planının çalıştırılması esnasında tasarlanan yürütme alt sisteminde elde edilen sonuç gösterilmiştir. Hava aracı 30 knot hızındaki rüzgâr koşulu altında, planlama alt sistemi ile bulunan uçuş planını Şekil 5.5’deki uçuş izi ile izlemektedir. Altı uçuş noktasından oluşan uçuş planının icrası için koşturulan simülasyonda uçuş başlangıç noktası koordinatları; enlem  $45^{\circ} 04' 47''$  ve boylam  $19^{\circ} 84' 06''$ , başlangıç yer hızı 70 m/s, başlangıç irtifası 1985 metredir.

**Çizelge 5.1 :** Altı noktalı uçuş planı için uçuş noktaları listesi.

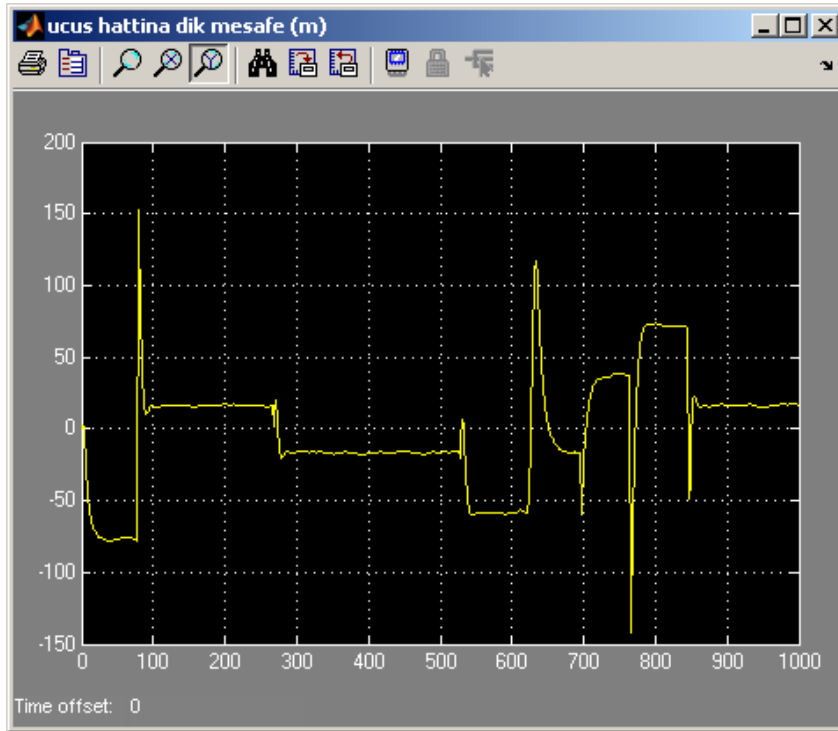
WP No	Enlem [°]	Boylam [°]	İrtifa [m.]
1	45.0600	33.0351	1985
2	45.0400	33.1524	1985
3	45.0300	33.3635	1985
4	45.0400	33.5050	1985
5	45.0600	33.2701	1985
6	45.0700	33.2706	1985

Şekil 5.5’deki kırmızı hat uçuş planının istenen uçuş izi, yeşil ile gösterilen hat ise tezde tasarlanan yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere 30 knot hızındaki rüzgâra rağmen hava aracı altı noktadan oluşan uçuş planını rotadan çok az saparak takip edebilmiştir.

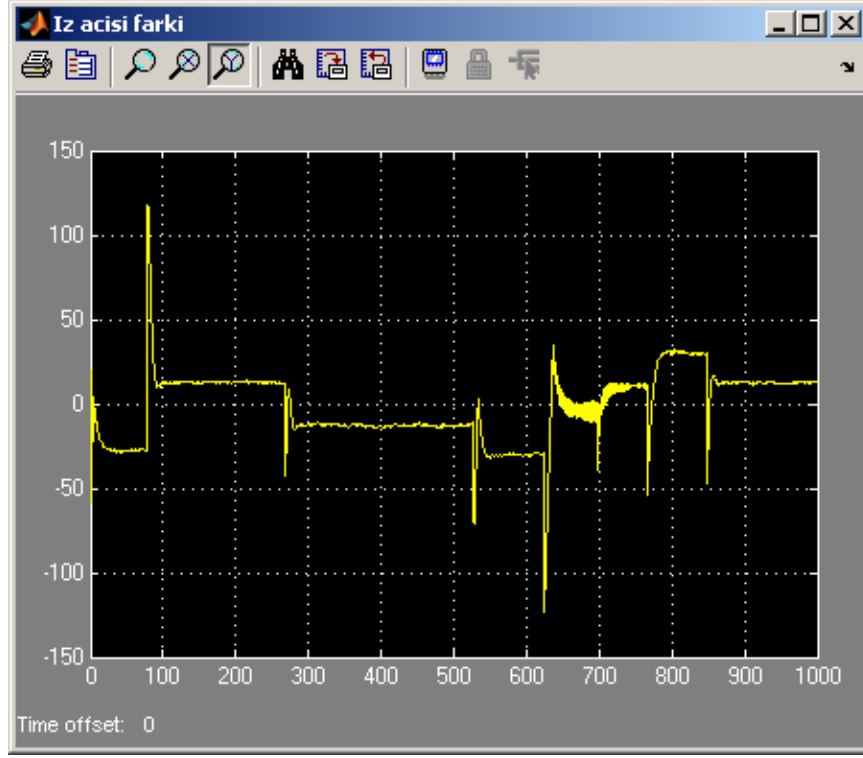


Şekil 5.5 : Geliştirilen otopilot ile rüzgârlı ortamda uçuş planı icrası.

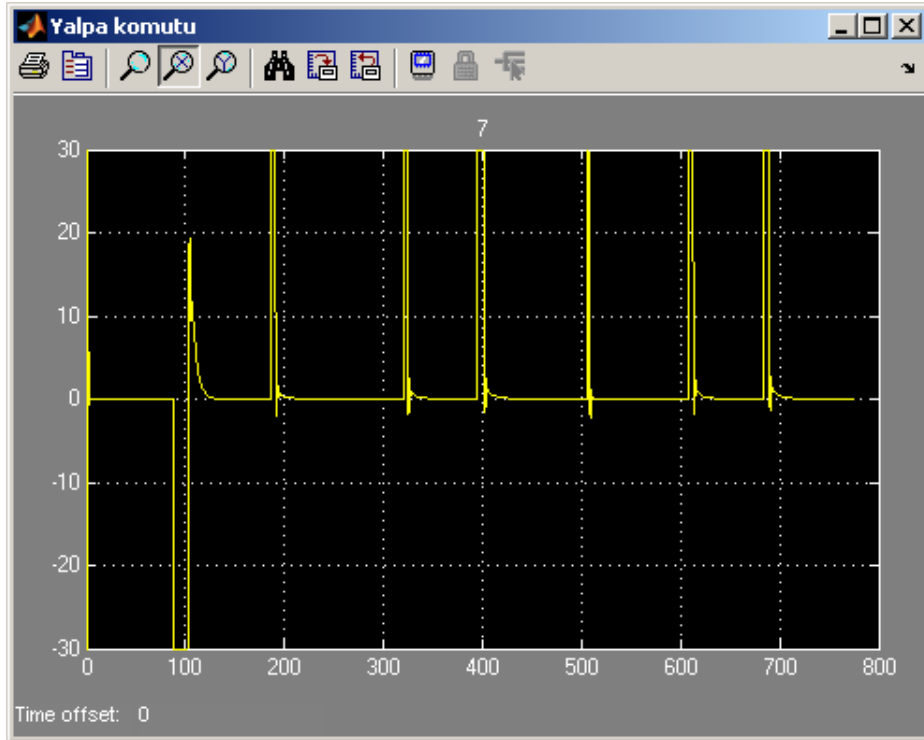
30 knot rüzgârlı ortamda, altı noktalı uçuş planının icrası için tezde özgün olarak geliştirilen algoritmanın uçuş hattına dik mesafe değeri değişimi 5.6'da, iz açısı farkı değişimi Şekil 5.7'de, geliştirilen özgün güdüleme algoritmasıyla hesaplanan yalpa komutu değişimi Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : Rüzgârlı ortam için delta Y değeri değişimi.



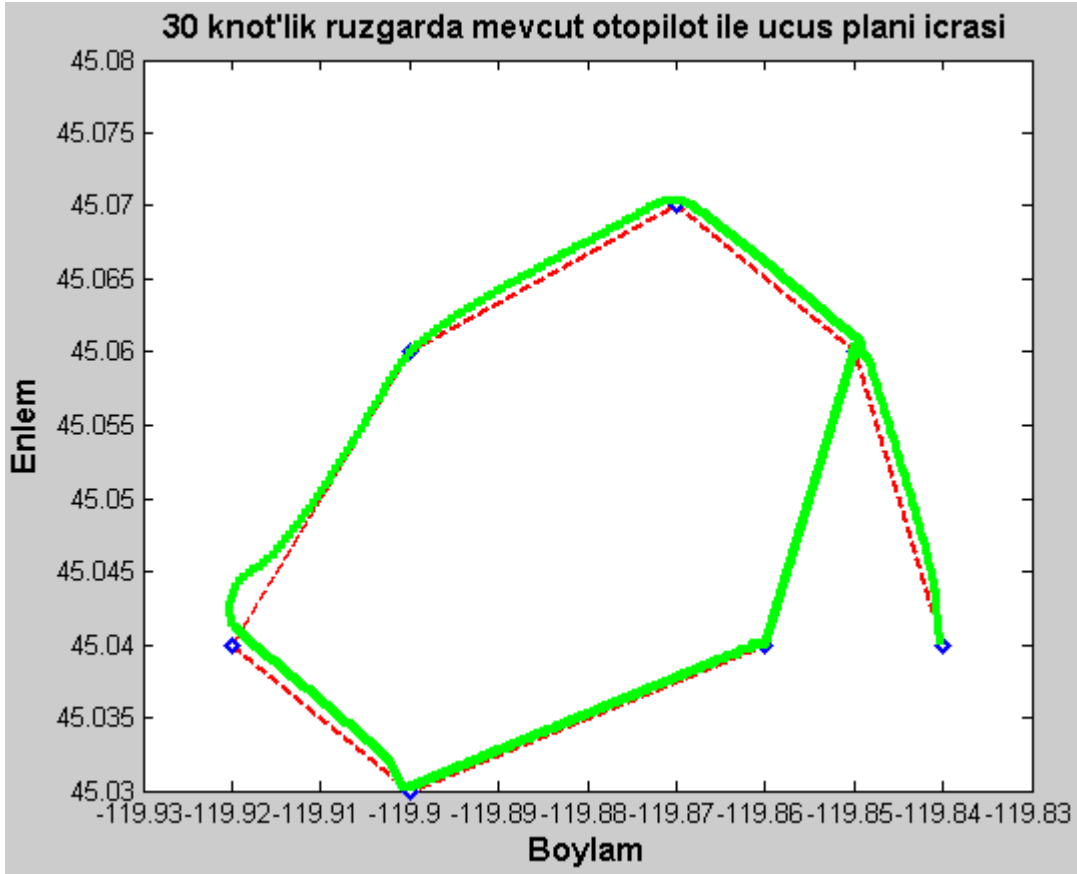
Şekil 5.7 : Rüzgârlı ortam için deltaX değeri değişimi.



Şekil 5.8 : Rüzgârlı ortam için yalpa açısı komutu değişimi.

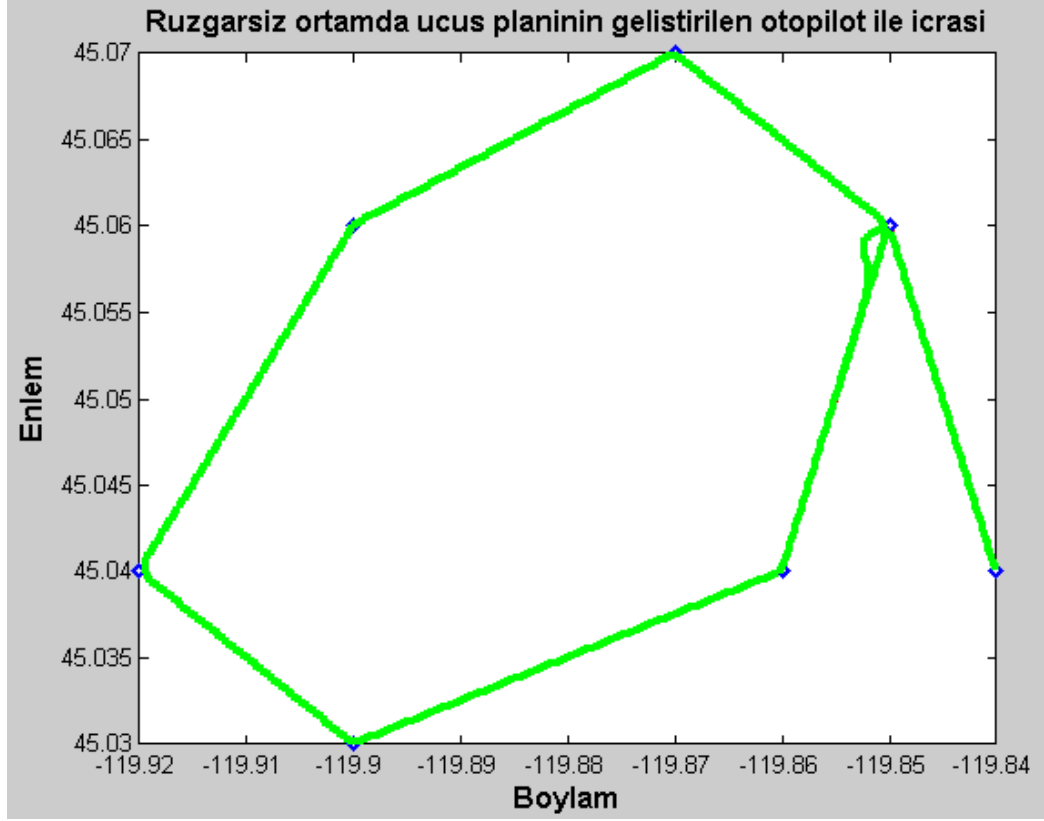
Şekil 5.9'da Aerosim simülatörü üzerindeki mevcut otopilot modülü ile aynı ortam ve uçuş şartlarında, yine 30 knot şiddetindeki rüzgârın estiği bir senaryo için üretilen uçuş izi görülmektedir. Şekil 5.5 ve Şekil 5.9'a karşılaştırmalı olarak bakıldığında

geliştirilen güdüleme sisteminin, altı uçuş noktalı uçuş planının icrası için mevcut otopilota göre daha düzgün bir uçuş izinin üretilmesini sağladığı görülmektedir. Mevcut otopilot modülü kullanıldığında şekillerden görüldüğü üzere uçuş planında rotadan sapmalar artmaktadır.



Şekil 5.9 : Mevcut otopilot ile altı uçuş noktalı planın icrası.

[N45.04 W119.84] pozisyonundaki uçuş başlangıç noktasından, 70 m/sn ilk yer hızı ile 1985 metre yükseklikten uçuşa başlayan bir hava aracı için, rüzgârsız ortamda, Çizelge 5.1'de listelenen altı noktadan oluşan uçuş planının icrasındaki uçuş izi, Şekil 5.10'da görüldüğü gibidir. Şekildeki kırmızı hat uçuş planının istenen uçuş izi, yeşil ile gösterilen hat özgün yalpalama ve yunuslama açısı komutlarına göre izlenen uçuş izidir. Şekilden de görüldüğü üzere rüzgârsız ortamdaki uçuş izi istenen uçuş planı uçuş izi ile birebir aynı çıkmıştır.



**Şekil 5.10 :** Geliştirilen otopilotla rüzgârsız ortamda plan icrası.

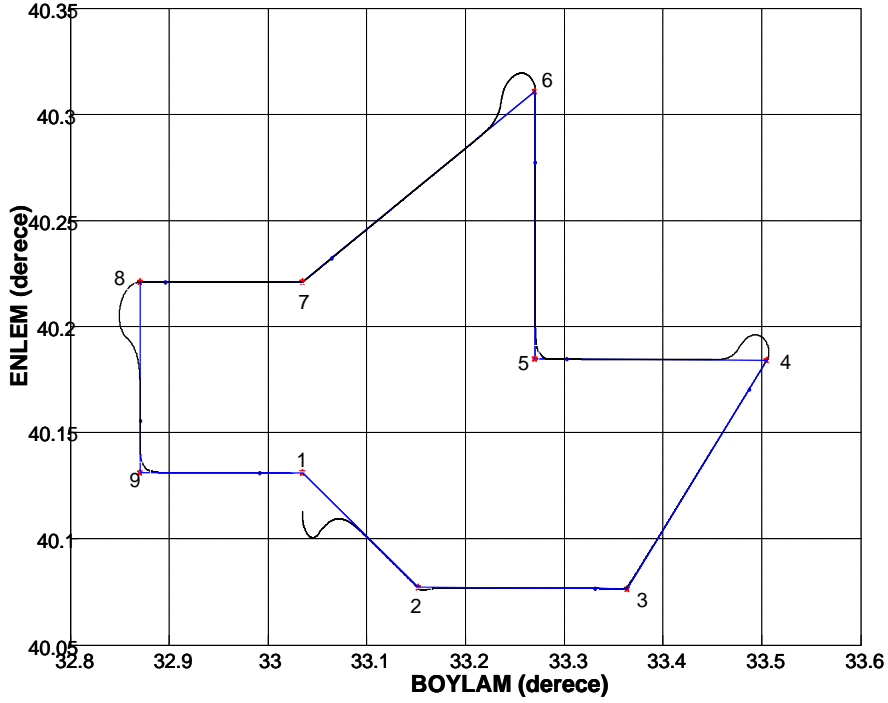
## 5.2 Üç Boyutlu Uçuş Benzetimi

Uçuş planı yürütme alt sisteminde kullanılan uçuş izi uçuş noktalarının enlem, boylam ve yükseklikleri ile oluşturulur. Çizelge 5.2’de dokuz uçuş noktasından oluşan örnek bir uçuş planı için konum ve irtifa değerleri gösterilmiştir.

**Çizelge 5.2 :** Dokuz noktalı uçuş planı için uçuş noktaları listesi.

WP No	Enlem [°]	Boylam [°]	İrtifa [m.]
1	40.1310	33.0351	1985.7
2	40.0768	33.1524	1985.7
3	40.0764	33.3635	2985.7
4	40.1840	33.5050	3985.7
5	40.1847	33.2701	4985.7
6	40.3109	33.2706	5985.7
7	40.2211	33.0352	4985.7
8	40.2210	32.8706	3985.7
9	40.1309	32.8708	2985.7

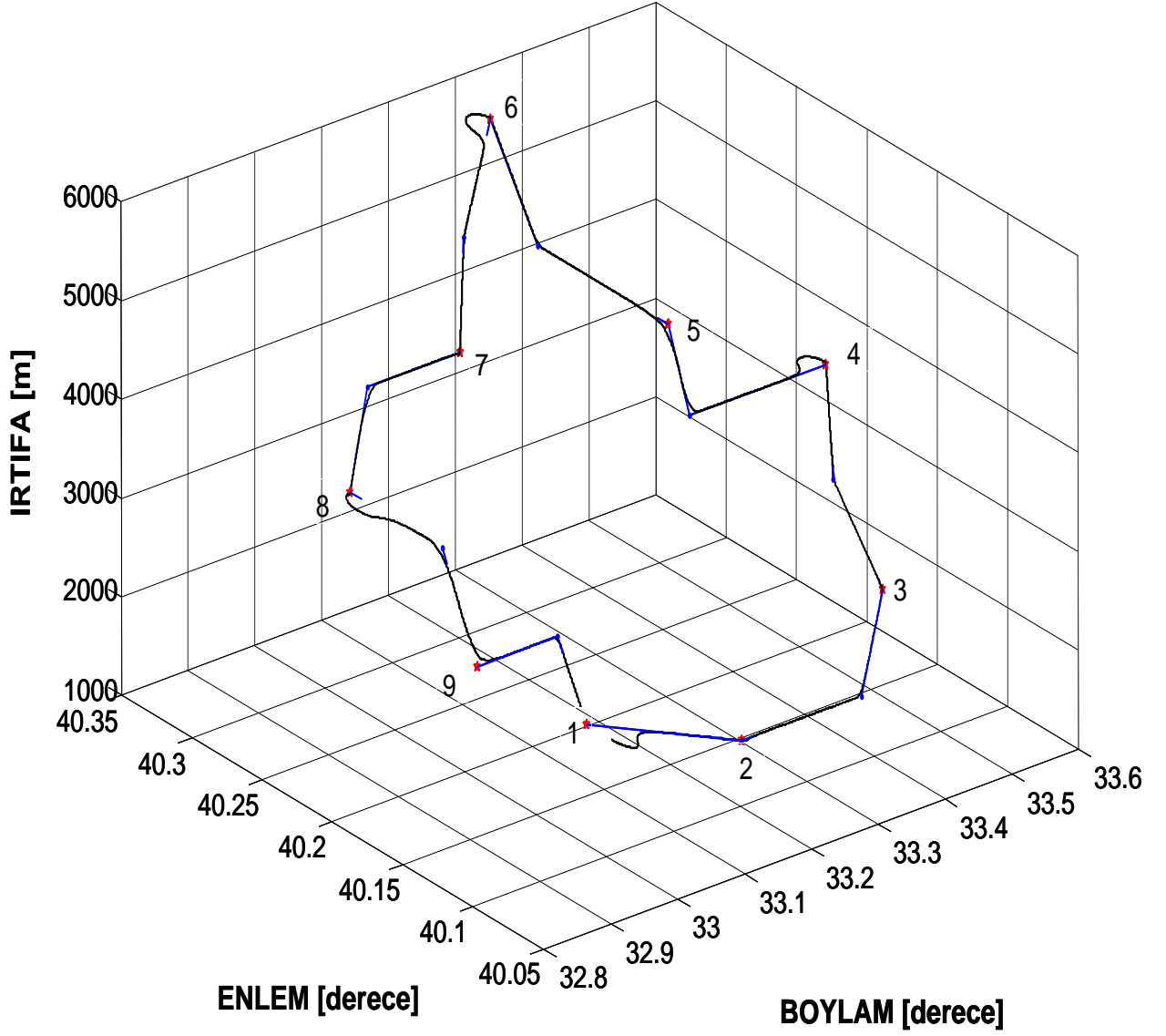
Şekil 5.11'deki uçuş izinde görüldüğü gibi, bilgileri Çizelge 5.2'de verilen uçuş noktalarıyla elde edilen çizge yapısı üzerinde, EUPAS alt sisteminin bulduğu uçuş planı çalıştırılır.



Şekil 5.11 : Dokuz uçuş noktalı uçuş izinde konum değişimi.

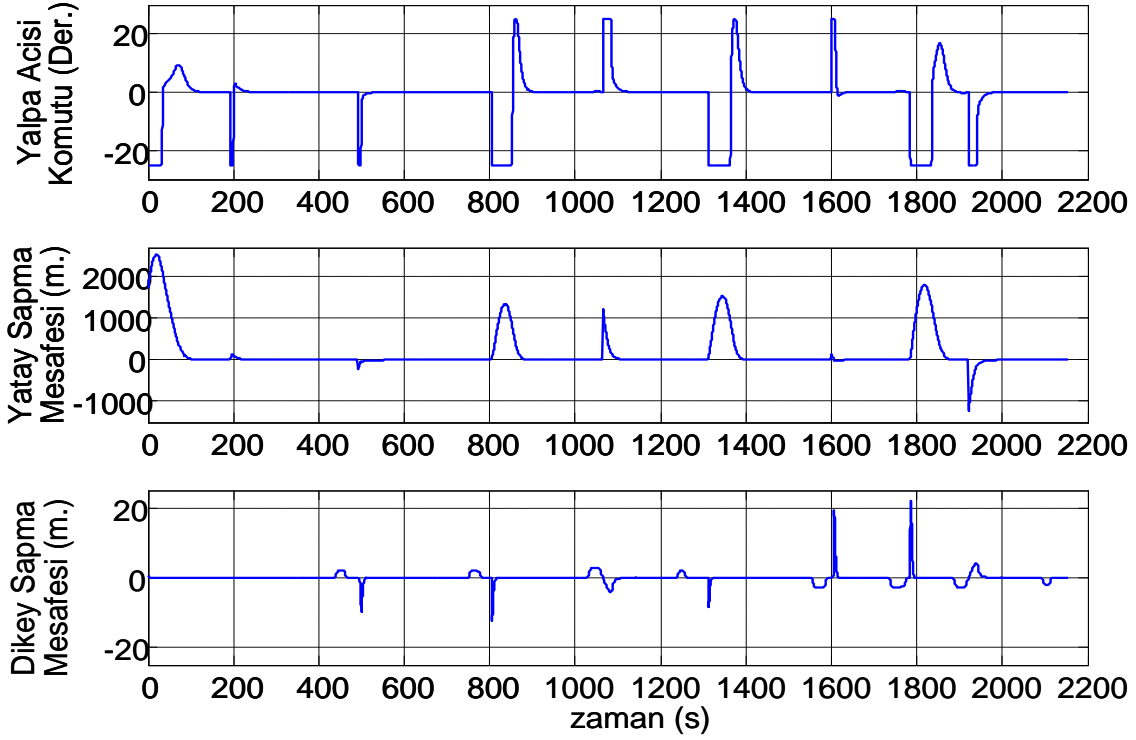
Bu örnek senaryoda hava aracı “ileri” yönde [N 10 m/s, E 10 m/s] esen, 14.14 m/s hızındaki rüzgâr koşullarında planlama alt sisteminde bulunan uçuş planını izlemektedir. Uçuş başlangıç noktası enlem  $40^{\circ} 06' 47''$  ve Boylam  $33^{\circ} 02' 06''$ , başlangıç yer hızı 70 m/s, başlangıç irtifası 1985 metredir. Geliştirilen algoritma ile elde edilen üç boyutlu uçuş izi Şekil 5.12'de gösterilmiştir.





Şekil 5.12 : Üç boyutlu uçuş planı benzetim senaryosu.

Üç boyutlu uçuş planı çalıştırma senaryosunda yalpalama düzeltmesi, yatay sapma mesafesi ve dikey sapma mesafesi geliştirilen güdümlenme algoritmalarıyla özgün olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.13’de bu bilgilerin benzetim sırasında zaman göre değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : Üç boyutlu benzetim senaryosu çıktıları.

### 5.3 Uçuş Planı Koşurma Alt Sisteminin Getirdiği Yenilikler

Güdümlenme Sistemi, Uçuş Yönetim Sistemi'nin en önemli alt sistemidir. Uçuş Yönetim Sistemi (FMS) bir uçağın seyrüsefer ve uçuş ile ilgili tüm fonksiyonlarını yerine getirmesine yardımcı olan bir bilgisayar sistemidir. FMS ile uçak üzerindeki elektrik-elektronik teçhizatının verdiği bilgilerin hepsini bilgisayar sistemi vasıtasıyla tek bir ekran üzerinde toplamak mümkündür. Bu sayede pilotun iş yükü azalır ve yüksek doğrulukta bilgi transferi sağlanmış olur. Önceleri pilotlar, haritalara, performans dokümanlarına, kartlara, tablolara veya seyrüsefer ile performans hesap cetveline başvururken, günümüzde ise FMS ile ilgili tüm bu bilgiler bilgisayara yüklenir, tüm gerekli hesaplamalar yapılır ve son olarak yol boyunca yapılması gerekli tüm manevralar yerine getirilir. Ayrıca en ekonomik hız, irtifa değerleri, bunlara uygun performans bilgileri, kalan yakıt miktarı ve seyrüsefer bilgileri sağlanır. Bu çalışmada FMS'in otopilot bileşeni için, hava aracını uçuş planının çalıştırılması esnasında pilotun istediği rotaya sokacak yatay ve dikey yönlendirme algoritmaları özgün olarak tasarlanmıştır. Tezde geliştirilen uçuş planı koşurma alt sistemi ile yatay güdümlenme, dikey güdümlenme yöntemleri ve atak helikopterinde göreve ilişkin gerekli uçuş kalıplarının icrası sağlanmıştır.

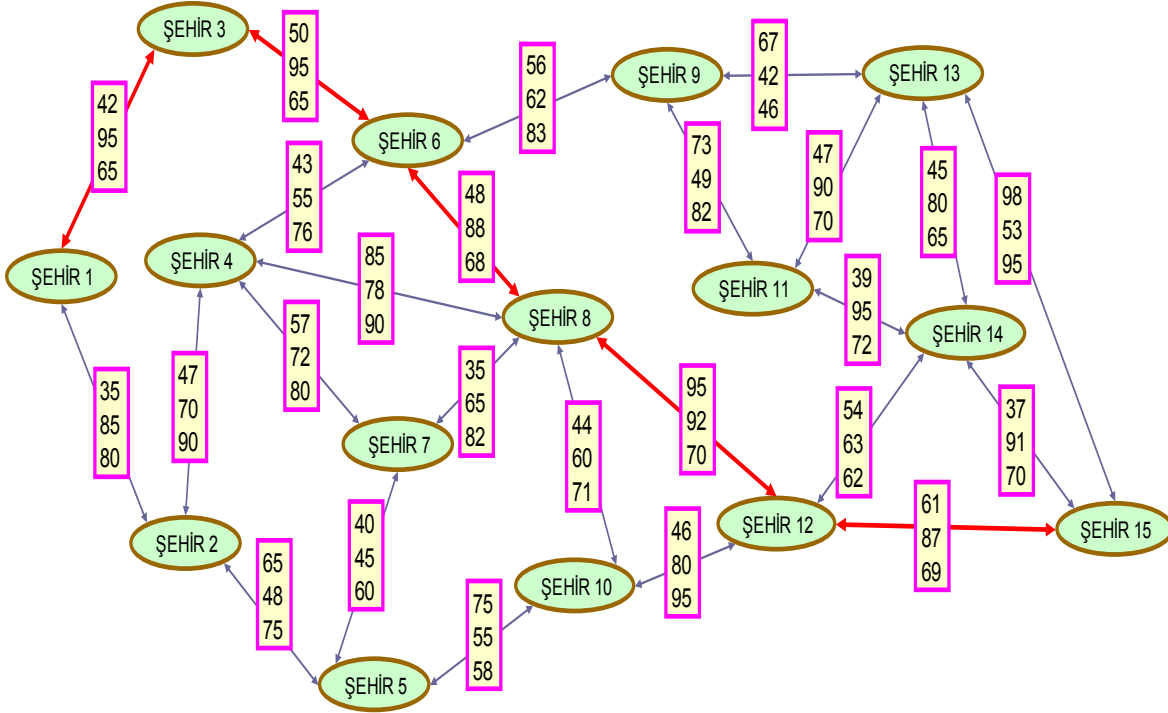
Uçuş noktası değişim yönetimi yapılarak uçuş planı veya kalıpların icrası sırasında geçilen uçuş noktalarının kontrolü sağlanmış, böylelikle rota değişimlerinde yeni rotaya göre güdüm kılavuzları ve açı düzeltmeleri hesaplanmıştır. Uçuş planındaki tüm uçuş noktaları üzerinden geçildiğinde uçuş planı koşturma algoritması sonlandırılmaktadır.

Hava aracının rotadan sapmayacak şekilde istenen yönelimde, istenen uçuş yüksekliğindeki hareketi sağlanmıştır. UPKAS alt sistemi, farklı rüzgâr hızı koşullarında çalışabilecek ve Aerosim simülatörü üzerinden rüzgâr hızı ve yönü değiştirildiğinde yeni rüzgâr koşullarına göre çözüm üretecek şekilde tasarlanmıştır. Hava aracı için dönüş manevralarında platformun yeteneklerine göre gerekli yumuşatmalar ve dönüşler sağlanmıştır. Yaklaşma mesafesinin istenildiğinde sistem kullanıcısı tarafından güncellenmesine olanak sağlanarak, uçuş noktası değişim yönetimi yapılmıştır. Kullanıcının kendi belirlediği uçuş noktalarına istenen sürede ulaşabilmesi için gerekli yer hızı komutu hesaplanmıştır.



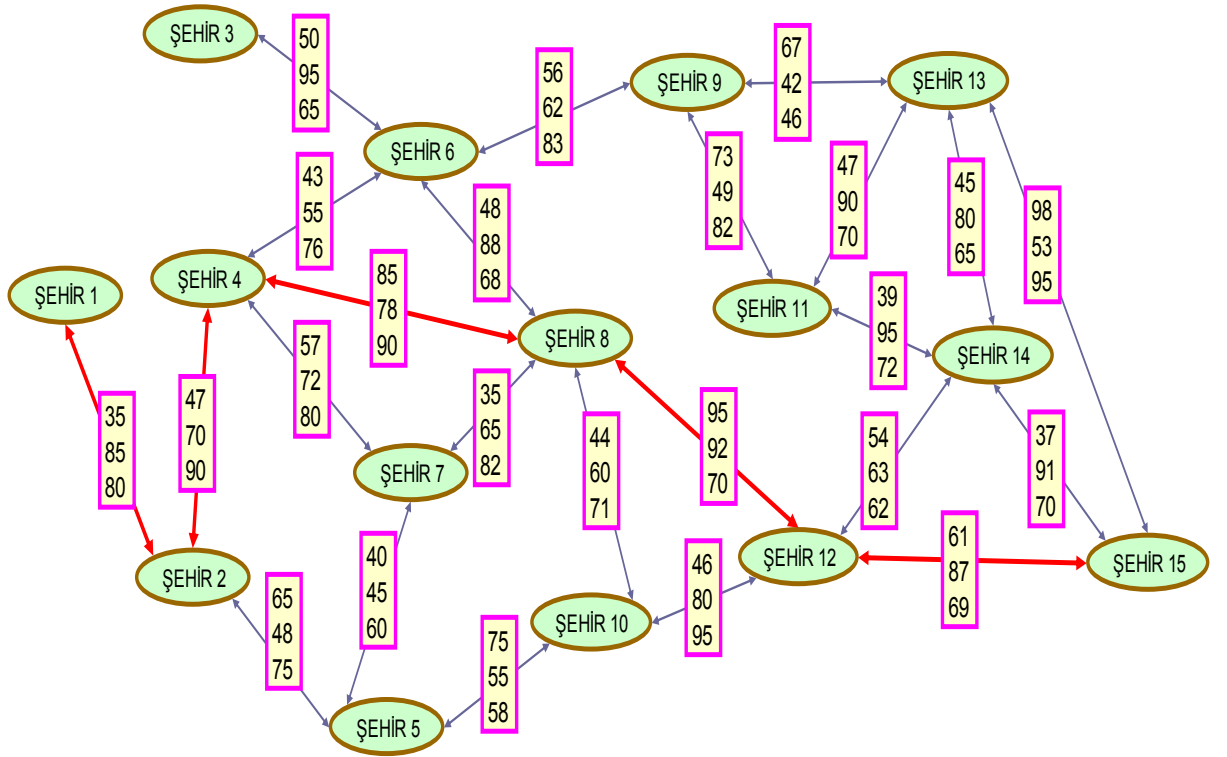


üzerindeki uçuş bacalarının güvenlik, uzunluk, yükseklik farkı değerlerini değerlendirmekte ve en uygun, en güvenilir, en kısa uçuşu planlamaktadır.



Şekil 6.2 : Dinamik intikal planı (şehir 1 – şehir 15).

Sistem bu durumda çözüm üretirken dinamik olarak Şehir 1 – Şehir 3 arasındaki hava sahası uçuş trafiğine kapandığında, algoritmanın önerdiği yeni intikal planı Şekil 6.3’de gösterilmiştir. Algoritma Şehir 8 üzerinden geçilerek, düz ve güvenilir bir yoldan intikal planı önermektedir. Şehir 4 – Şehir 8 arası bağlantı güvenlik değeri ve uzunluk açısından uygun bir yol olduğu için Şehir 4 – Şehir 6 – Şehir 8 dolaşımı yerine alternatif bir rota olan Şehir 4 – Şehir 8 bağlantısı yeni rotada önerilmiştir. Sistem şartlar dinamik olarak değiştiğinde çözüme baştan başlamadan çözüme yakınsamaktadır, diğer analitik yaklaşımlar şartların değişiminde çözüm için kullandıkları matris değiştiğinden tüm hesapları tekrarlamaktadır. Bu özellik geliştirilen algoritmanın önemli bir yeniliğidir. Evrimsel yöntemler probleme özgü amaç fonksiyonu ve üretim döngüsü operatörlerini kullanarak dinamik ortamda sonuca yakınsama özelliğine sahiptir [69].



Şekil 6.3 : Güncellenmiş dinamik intikal planı (şehir 1 – şehir 15).

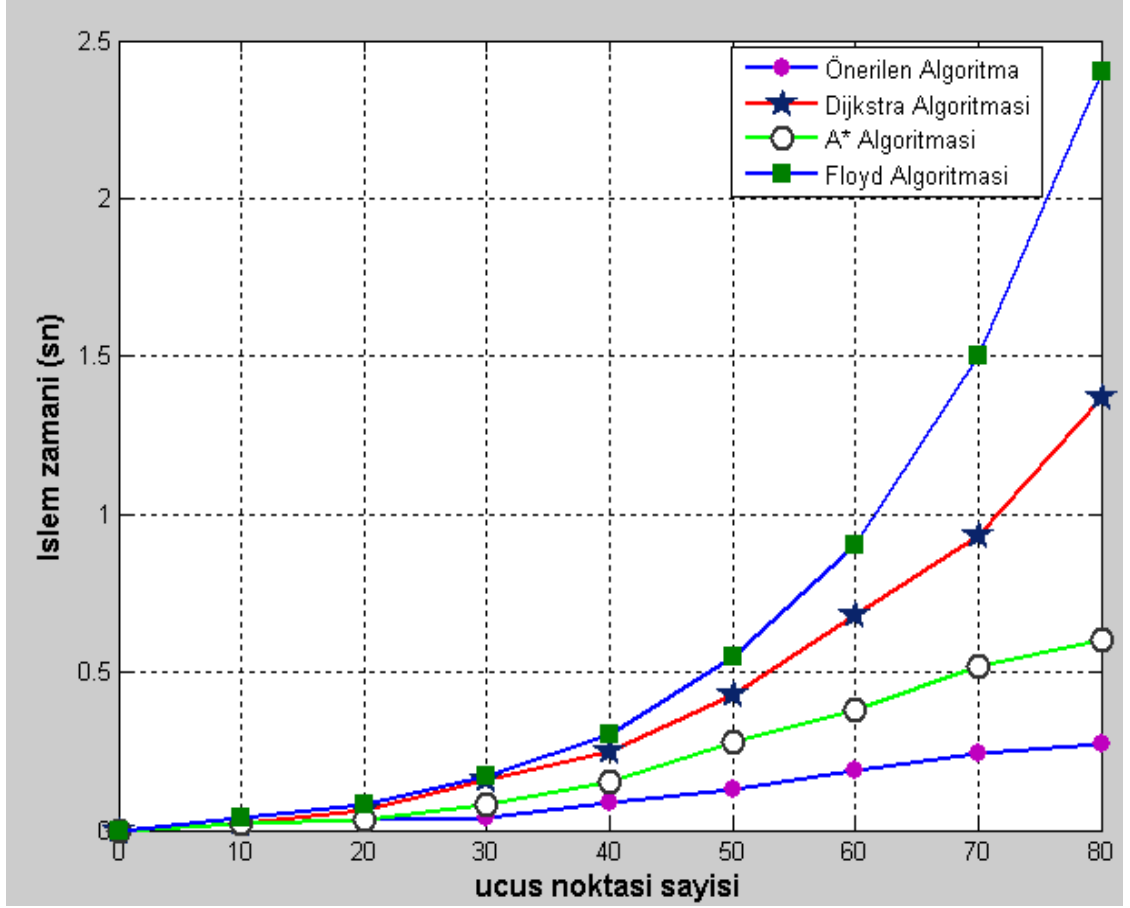
Kısıtlar değiştiğinde önceki çözümün bir parçasının aynen korunacağı her zaman garanti edilemeyebilir. Sistemde eş zamanlı olarak birden fazla değişiklik aynı anda gerçekleşebileceğinden geliştirilen algoritmanın asıl kazanımı yeni duruma göre uygunluğu yüksek çıkan bireylerin nüfusa yayılmasını sağlamaktır [70]. Evrimsel algoritmalar intikal probleminin durağan senaryolarında işlem sayısını azaltmaz, bu nedenle statik intikal senaryoları için fazla tercih edilmezler. Fakat intikal senaryosu dinamik ve çizgedeki bağlantıların maliyetini belirleyen kısıtlar değişken olduğu durumda evrimsel yöntemler çözüme baştan başlamadan en iyiye yakınsama özelliğine sahiptir. Askeri intikal, görev kritik bir problem olduğu için gerçek zamanlı bir sistem olarak düşünülebilir, savaş senaryosu gibi kısıtların değiştiği ortamlarda en iyi çözüme kabul edilebilir bir sürede yakınsanması amaçlanmıştır. Sikorsky S-70A atak helikopterin maksimum menzilin 460 km ve havada kalış süresinin saatler mertebesinde olduğu düşünüldüğünde, istenilen kısa sürede en iyi rotanın bulunması imkânsız olabilir. En iyi olmasa bile kabul edilebilir iyi bir çözümün bulunması gerekmektedir. Bu da tüm çözüm uzayının değil, bu uzayda yer alan bazı çözümlerin değerlendirilmesi anlamına gelir.

## 6.2 Geliştirilen Planlama Algoritmasının Performansı

Dinamik yol planlama probleminin çözümünde, matris kullanarak çözüm yapan Dijkstra, Floyd, A-Star algoritmaları gibi geleneksel yöntemlerde, çizgeye yeni düğümlerin ve bağlantıların eklenmesi veya çıkarılması durumunda yine matris değişeceği için, işlem zamanı artar. [71, 72]. Algoritmanın hesap süresi performansı Dijkstra algoritması ile karşılaştırmalı olarak ölçülmüş ve ölçüm sonucu Şekil 6.4’de gösterilmiştir. Bu ölçüm için farklı sayıda uçuş noktalarından oluşan şehir haritaları kullanılmıştır. Öncelikle bağlı bir çizge oluşturulmuş, uçuş bacaklarının maliyetleri tanımlanmış ve kalkış varış noktaları seçilmiştir. Deneysel kısıtların değişimi, uçuş bacağı kopması ve yeni uçuş bağlantısı eklenmesi gibi değişikliklerden sonra tekrarlanmıştır. Deneysel aynı topolojide, uçuş noktası sayısı sabit olmak şartıyla 1000 farklı çizge için tekrarlanmıştır. Çizge yapısında bağlantı eklenmesi, bağlantı kopması veya bağlantı maliyetlerinin değişmesi durumlarında, evrimsel yöntem çözüme en baştan başlamadığı için Dijkstra algoritmasına göre daha kısa sürede çözüm üretebilmiştir. Uçuş noktası sayısı arttığında aday çözüm ve birey sayısı artacağından evrimsel algoritmanın çözüme yakınsama süresi kazancı doğal olarak artmaktadır. Özellikle yoğun bağlantılı çizgeler için algoritma işlem karmaşıklığı ve hesaplama süresinde önemli ölçüde iyileştirme sağlamıştır.

Benzer şekilde yine farklı sayıda uçuş noktalarından oluşan şehir haritaları kullanılarak Floyd ve A\* algoritmaları ile işlem zamanı karşılaştırması yapılmıştır. Şekil 6.4’deki işlem süresi değerleri, dinamik maliyet değişimleri durumunda her topoloji için deneylerin 1000 defa tekrarlanmasıyla oluşan ortalama değerlerdir. Şekilden de görüldüğü gibi geliştirilen planlama algoritması özellikle uçuş noktası ve uçuş bacağı sayısının fazla olduğu çizgeler için Floyd ve A\* algoritmalarına göre önemli bir performans iyileştirmesi sağlamıştır.





Şekil 6.4 : Geliştirilen algoritma ile diğer yöntemlerin işlem zamanları.

Geliştirilen algoritmanın en kötü durum için asimptotik işlem karmaşıklığı ölçülmüş ve diğer çözüm yaklaşımları ile karşılaştırılmıştır. İşlem karmaşıklığı karşılaştırma sonuçları Çizelge 6.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.1 : Asimptotik işlem karmaşıklıkları.

Algoritma	İşlem Karmaşıklığı
Dijkstra (basit döngü ile)	$O(V^2)$
Dijkstra (ikili yığın ile)	$O((V+E)*\log(V))$
Dijkstra (fibonacci yığın ile)	$O(V+E*\log(V))$
Floyd	$O(V^3)$
A-Star	$O(V*\log(E))$
Bellman Ford	$O(V*E)$
Johnson	$O(V^2*\log(V)+V*E)$
Önerilen GA	$O(V*\log(E))$

Önerilen yöntem asimptotik karmaşıklık olarak bakıldığında Dijkstra, Floyd, Bellman Ford ve Johnson algoritmalarına üstünlük sağlamaktadır. Karmaşıklığı diğer bir sezgisel yol planlama yöntemi olan A-Star algoritması ile aynı mertebededir. Fakat Şekil 6.4'den görülebileceği üzere, tezde geliştirilen evrimsel planlama yöntemi, işlem zamanı olarak A-Star algoritmasına üstünlük sağlamıştır.

## 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Klasik eniyileme problemlerinden biri olan seyir planlama problemi, üzerinde uzun yıllardır çalışma yapılan bir problemdir. Bu problemin çözümü için değişik yöntemler kullanılmıştır, Çizge kuramı temelli Dijkstra ve Floyd algoritmaları en bilinen yöntemlerdir. Floyd ve Dijkstra gibi geleneksel popüler algoritmalar, en kısa yol probleminin basit hali için etkindir, fakat ortam şartlarının çalışma zamanında dinamik değiştiği tam dinamik yol planlama problemleri için pek uygun değildir. Statik durum için tercih edilen Dijkstra, Floyd benzeri çözümler, dinamik ortam için her maliyet değişiminde hesaplamalara baştan başladıkları için tercih edilmezler. Dinamik yol planlama probleminin çözümünde, matris kullanarak çözüm yapan Dijkstra, Floyd algoritmaları benzeri yöntemlerde, çizgeye yeni düğümlerin ve bağlantıların eklenmesi veya çıkarılması durumunda yine matris değişeceği için, işlem zamanı önemli ölçüde artmaktadır. Geliştirilen evrimsel sistemin tam dinamik bir seyir planlama sistemi için diğer yöntemlerden daha az işlem zamanıyla uçuş planlaması yapabildiği gösterilmiştir.

İntikal problemi, savunma sanayi uygulamalarında önemli bir problemdir. Özellikle gerçek zamanlı çalışan bir uçuş sistemi için algoritma performansı ve işlem karmaşıklığı çok önemlidir. Tez kapsamında ele alınan problemde, enlem boylam ve yükseklikleri verilen uçuş noktaları ve maliyetleri verilen uçuş bacakları için istenen kalkış noktasından varış noktasına olan seyrüsefer planlaması yeni bir evrimsel algoritma ile yapılmıştır. Verilen rota haritasında belirli uçuş bacakları uzunluk ve yükseklik ölçülerinden dolayı tercih edileceği gibi, belirli bağlantılar emniyet açısından kullanılmak istenmeyebilir. Ayrıca uçuş hattı üzerinde, hava sahasının uçuş trafiğine kapanması nedeniyle dinamik olarak bazı bağlantılar kopabilir.

Evrimsel uçuş planlama alt sisteminde geliştirilen genetik algoritmada özgün olarak tasarlanan çaprazlama, mutasyon ve çevrim kaldırma operatörleri kullanılmıştır. Çaprazlama oranı, mutasyon oranı gibi değerlerin uçuş planlama problemi için en uygun değerleri de deneysel çalışmalarla bulunmuştur. Ayrıca bu çalışmada, çevrimli yol üreten bireylerin engellenmesi de sağlanmıştır. Kromozomların genleri, nüfus

ilkendirme, çaprazlama ve mutasyon gibi süreçlerde bozulmamaya ve uygun olmayan kromozomları oluşturmamaya zorlanmıştır.

Evrimsel uçuş planlama alt sisteminde hava aracının en uygun rotası bulunduğundan sonra bu rotanın icrası da uçuş planı koşturma alt sisteminde gerçekleştirilmiştir. Yakıt planlaması yapıldıktan sonra hava arasındaki mevcut yakıtla icra edilebilecek uçuş planı için, gerçek zamanlı uçuş verileri, uçuş durumu bilgileri, ilk konum ve rüzgâr hızı gibi veriler için yatay ve dikey güdümlene hesaplamaları yapılır. Geliştirilen yatay güdümlene, dikey güdümlene yöntemleri ve atak helikopterinde göreve ilişkin gerekli uçuş kalıplarının gerçekleşmesi için tasarlanan tüm algoritmalar özgündür. Böylelikle bir hava aracı için sadece uçuş planlaması yapılmakla kalmamış, uçuş planının icrası için gerekli komutların üretilmesi ve rüzgâr, aerodinamik koşullar, vb. ortam şartları nedeniyle istenen rotadan sapan hava aracının rotaya oturtulması sağlanmıştır. Uçuş planı koşturma alt sisteminde bir uçuş noktasından geçildiğinde uçuş planındaki bir sonraki noktaya yönlendirme yapılması sağlanmıştır, tüm uçuş noktaları üzerinden geçildiğinde uçuş planı koşturma algoritması sonlandırılmaktadır.

Geliştirilen sezgisel seyir planlama yaklaşımı, seyir planlama senaryoları dâhilindeki en güvenli, en kısa yol problemlerinin çözülmesinde kullanılmıştır. Statik ve dinamik ortamlar için ayrı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Simülasyonlarda hava aracı için uçuş intikalleri ve seyrüsefer algoritmaları planlanmıştır. Gerçekleştirilen sistem uçuş planı tasarlama ve yürütme olmak üzere iki alt sisteme bölünmüştür. Problem çözümünde tasarlanan planlama alt sistemi, maliyeti dinamik değişebilen üç farklı kısıtlı çizge yapısını kullanmaktadır. Tasarlanan uçuş planları uçuş planı yürütme algoritmasıyla çevrimiçi olarak dinamik ortam koşullarında test edilmiştir. Hava aracının istenen yönelimde, istenen uçuş yüksekliğindeki hareketini sağlaması için yazılan fonksiyonlar Matlab Simulink ortamında kontrol sistemiyle Aerosim simülatörü ile entegre edilerek test edilmiştir. Geliştirilen evrimsel planlama ve gerçek zamanlı uçuş planı koşturma alt sistemleriyle hava aracının minimum yakıtla en güvenilir yoldan uçuş rotası çizilmiş ve rotayı düzgün takip edebilmesi için gerekli yönlendirme algoritmaları sağlanmıştır.

Sonraki çalışmalarda sensör aktüatör ara yüzlerinin eklenmesi ile oto pilot modülü de geliştirilerek bir uçuş kontrol sistemi gerçekleştirilebilir. Problem çok kısıtlı eniyileme probleminde uygunluk fonksiyonuyla çok kısıtlı tek kısıda indirgeyerek

özülmüştür. Vektör Değerlendirmeli Genetik Algoritma, Hücrelendirilmiş Pareto Genetik Algoritması, Bastırılmamış Sınıflandırmalı Genetik Algoritma, Kuvvet Pareto Evrimsel Algoritma gibi çok amaçlı evrimsel algoritmaların uçuş planlama problemi için kullanılması üzerine çalışmalar yapılabilir. Ayrıca geliştirilecek yeni yöntemde, uçuş bacakları için farklı rüzgâr koşullarının tanımlanması durumunda uçuş planlama algoritmasının rüzgâr hızının da işleme katılması sağlanabilir.



## KAYNAKLAR

- [1] **Li, T. Y. ve Chen, J.** (1998). Incremental 3D Collision Detection with Hierarchical Data Structures. *Proc. ACM Symp. on Virtual Reality Software and Technology*, 139-144. Taipei, Taiwan.
- [2] **Johnson, D. B.** (1973). A Note on Dijkstra's Shortest Path Algorithm. *Journal of the Association for Computing Machinery*, Vol. 20, 385-388.
- [3] **Hougardy, S.** (2010). The Floyd-Warshall Algorithm on Graphs with Negative Cycles. *Information Processing Letters 110*, Vol. 8, 279-281.
- [4] **Tsankova, D.** (2011). Neural Networks Based Path Planning. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara - Journal of Engineering*, Vol. 9, 283-286. Timisoara, Romania.
- [5] **Deng, Y. ve Tong, H.** (2011). Dynamic Shortest Path Algorithm in Stochastic Traffic Networks Using PSO Based on Fluid Neural Network. *Journal of Intelligent Learning Systems and Applications*, Vol. 3, 11-16.
- [6] **Liu, S., Mao, L. ve Yu, J.** (2006). Path Planning Based on Ant Colony Algorithm and Distributed Local Navigation for Multi-Robot Systems. *Proc. IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation*, 1733-1738. Luoyang, China.
- [7] **Deb, K., Thiele, L., Laumanns, M. ve Zitzler, E.** (2004). Scalable Test Problems for Evolutionary Multi-objective Optimization. *Evolutionary Computation Based Multi-Criteria Optimization: Theoretical Advances and Applications*, 105-145.
- [8] **Nikolas, I. K., Valavanis, K. P., Tsourveloudis, N. C. ve Kostaras, A. N.** (2003). Evolutionary Algorithm Based Offline / Online Path Planner for UAV Navigation. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, Vol. 33, No. 6, 898-912.
- [9] **Misra, S. ve Oommen, B. J.** (2005). Dynamic Algorithms for the Shortest Path Routing Problem: Learning Automata-Based Solutions. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 35, 1179-1192.
- [10] **Li, Q., Zhang, W. ve Yin, Y.** (2006). An Improved Genetic Algorithm of Optimum Path Planning For Mobile Robots. *Proc. 6th IEEE Int. Conf. Intelligent Systems Design and Applications*, 637-642.
- [11] **Tu, J. ve Yang, S. X.** (2003). Genetic Algorithm Based Path Planning for a Mobile Robot. *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics And Automation*, Vol. 1, 1221-1226.
- [12] **Wu, W. ve Ruan, Q.** (2004). A Gene-constrained Genetic Algorithm for Solving Shortest Path Problem. *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Signal Processing*, 2510-2513. Beijing.

- [13] **Elshamli, A., Abdullah, H. ve Areibi, S.** (2004). Genetic Algorithm for Dynamic Path Planning. *Proceedings of the Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 677-680.
- [14] **Munemoto, M., Takai, Y. ve Sato, Y.** (1998). A Migration Scheme for the Genetic Adaptive Routing Algorithm. *IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics*, 2774-2779.
- [15] **Liu, W. ve Wang, L. P.** (2009). Solving the Shortest Path Routing Problem Using Noisy Hopfield Neural Networks. *WRI International Conference on Communications and Mobile Computing*, 299-302.
- [16] **Gen, M. ve Lin, L.** (2006). A New Approach for Shortest Path Routing Problem by Random Key-Based GA. *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Vol. 2, 1411-1412.
- [17] **Lin, L., Gen, M. ve Cheng, R. W.** (2004). Priority-Based Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem in OSPF. *Proceedings of the Third International Conference on Information and Management Sciences*, Vol. 3, 411-418.
- [18] **Cai, X., Kloks, T. ve Wong, C. K.** (1997). Time-Varying Shortest Path Problems with Constraints. *Networks*, 29, 141-149.
- [19] **Orda, A. ve Rom, R.** (1991). Minimum Weight Paths in Time-Dependent Networks. *Networks*, 21, 295-319.
- [20] **Cooke, K. L. ve Halsey, E.** (1996). The Shortest Route Through a Network with Time-Dependent Internodal Transit Times. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, Vol. 14, 493-498.
- [21] **Chabrier, A.** (2006). Vehicle Routing Problem with Elementary Shortest Path Based Column Generation. *Computers & Operations Research*, Vol. 33, 2972-2990.
- [22] **Çınar, E., Parlaktuna, O. ve Yazıcı, A.** (2007). Robot Navigasyonunda Potansiyel Alan Metodlarının Karşılaştırılması ve İç Ortamlarda Uygulanması. *12. Elektrik-Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Ulusal Kongresi*, 603-608. Eskişehir.
- [23] **Dener, M., Akcayol, A., Toklu, S. ve Bay, Ö.** (2011). Zamana Bağlı Dinamik En Kısa Yol Problemi İçin Genetik Algoritma Tabanlı Yeni Bir Algoritma. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Dergisi*, Cilt. 26, 915-928.
- [24] **Ramalingam, G. ve Reps, T.** (1996). On the Computational Complexity of Dynamic Graph Problems. *Theoretical Computer Science*, Vol. 158, No. 1, 233-277.
- [25] **Franciosa, P. G., Frigioni, D. ve Giaccio, R.** (1997). Semi-Dynamic Shortest Paths and Breadth First Search in Digraphs. *Proceedings of STACS, Lecture Notes in Computer Science*, 33-46.
- [26] **Frigioni, D., Marchetti, A. ve Nanni, U.** (2000). Fully Dynamic Algorithms for Maintaining Shortest Paths Trees. *Journal of Algorithms*, Vol. 34, 251-281.



- [27] **Boskovic, J. D., Prasanth, R. ve Mehra, R. K.** (2002). A Multilayer Control Architecture for Unmanned Aerial Vehicles. *American Control Conference*, Vol.3, 1825-1830.
- [28] **Wu, P., Campbell, P. Y., Duncan A. ve Merz, T.** (2009). On-Board Multi-Objective Mission Planning for Unmanned Aerial Vehicles. *IEEE Aerospace Conference*, 1-10. Montana.
- [29] **Qi, Z., Shao, Z., Ping, Y. S. Hiot, L. M. ve Leong, Y. K.** (2010). An Improved Heuristic Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment. *Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 258-261.
- [30] **Kim, Y., Gu, D. W. ve Postlethwaite, I.** (2008). Real-Time Path Planning With Limited Information For Autonomous Unmanned Air Vehicles. *Automatica*, 44, 696-712.
- [31] **Pfeiffer, B., Batta, R., Klamroth, K. ve Nagi, R.** (2007). Path Planning for UAVs in the Presence of Threat Zones Using Probabilistic Modelling. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 43, 278-283.
- [32] **Hasircioglu, I., Topcuoglu, H. R. ve Ermiş, M.** (2008). 3-D Path Planning for the Navigation of Unmanned Aerial Vehicles by Using Evolutionary Algorithms. *Proc. of the Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 1499-1506. Atlanta.
- [33] **Pakkan, B. ve Ermiş, M.** (2010). İnsansız Hava Araçlarının Genetik Algoritma Yöntemiyle Çoklu Hedeflere Planlanması. *Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi*, 4, 77-84.
- [34] **Tulum, K., Durak, U. ve İder, S.** (2009). Situation Aware UAV Mission Route Planning. *IEEE Aerospace Conference*, 1-12.
- [35] **Arıca, N., Cicibaş, H. ve Demir, K. A.** (2012). İnsansız Hava Araçları İçin Çok Kriterli Güzergâh Planlama Modeli. *The Journal of Defense Sciences*, Vol. 11, No.1, 251-270.
- [36] **Cicibaş, H., Demir, K. A., Gunal, M. ve Arıca, N.** (2012). A Simulation Model For Analysing Unmanned Aerial Vehicle Flight Paths. *24th European Modeling & Simulation Symposium (EMSS)*, 543-549.
- [37] **Bayraktar, O., Özdemir, F., Çetin, Ö. ve Yılmaz, G.** (2012). İnsansız Hava Araçları İçin Otonom İniş Sistemi Simülatörü Tasarımı. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 5, 1-8.
- [38] **Gencer, C., Aydoğan, K. E. ve Kocabaş, S.** (2009). İnsansız Hava Araçlarının Rota Planlaması İçin Bir Karar Destek Sistemi. *Kara Harp Okulu Savunma Bilimleri Dergisi*, Vol. 8, 59-73.
- [39] **Cordeau, J. F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J. Y. ve Semet, F.** (2002). A Guide To Vehicle Routing Heuristics. *Journal of the Operational Research Society*, Vol. 53, No. 5, 512-522.
- [40] **Yang, S., Cheng, H. ve Wang, F.** (2010). Genetic Algorithms with Immigrants and Memory Schemes for Dynamic Shortest Path Routing Problems in Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 40, No. 1, 52-63.

- [41] **Deb, K. ve Agrawal, S.** (1998). Understanding Interactions among Genetic Algorithm Parameters. *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol. 5, 265-286.
- [42] **Ross, P. ve Corne, D.** (1994). Applications of Genetic Algorithms. *AISB Quarterly on Evolutionary Computation*, 23-30.
- [43] **Uyar, S. ve Harmanci, A. E.** (2002). Preserving Diversity Through Diploidy and Meiosis for Improved Genetic Algorithm Performance in Dynamic Environments. *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Information Systems*, 314-323.
- [44] **Khatib, O.** (1986). Real-Time Obstacles Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 5 90-98.
- [45] **Back, T., Fogel, D. B. ve Michalewicz, Z.** (1997). *Handbook of Evolutionary Computation*. London: Oxford Univ. Pres.
- [46] **Karr, C. L. ve Freeman, M. L.** (1999). *Industrial Applications of Genetic Algorithms*. USA: CRC Press.
- [47] **Fu, L., Sun, D. ve Rilett, L. R.** (2006). Heuristic Shortest Path Algorithms for Transportation Applications. *State of the Art. Computers & Operations Research*, Vol. 33, 3324-3343.
- [48] **Xin, D., Hua, C. ve Wei, K. G.** (2005). Neural Network and Genetic Algorithm Based Global Path Planning in a Static Environment. *Journal of Zhejiang University Science*, Vol. 6, 549-554.
- [49] **Siregar, J., Zhang, Y. ve Takagi, H.** (2005). Optimal Multicast Routing Using Genetic Algorithm for WDM Optical Networks. *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 88, 219-226.
- [50] **Ridder, J. P. ve HandUber, J. C.** (2005). Mission Planning for Joint Suppression of Enemy Air Defenses Using a Genetic Algorithm. *Proceedings of the 2005 Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, 1929-1936.
- [51] **Jawahar, N. ve Balaji, A. N.** (2009). A Genetic Algorithm for the Two Stage Supply Chain Distribution Problem Associated with a Fixed Charge. *European Journal of Operational Research*, Vol. 194, 496-537.
- [52] **Zucker, M., Kuffner, J. ve Branicky, M.** (2007). Multipartite RRTs for Rapid Replanning in Dynamic Environments. *Proc. of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 1603-1609.
- [53] **Tamilselvi, D., Shalinie, S. ve Hariharasudan, M.** (2011). Optimal Path Selection for Mobile Robot Navigation. *IJCSI International Journal of Computer Science Issues*, Vol. 8, No. 4, 433-440.
- [54] **Behzadi, S. ve Alesheikh, A.** (2008). Developing a Genetic Algorithm for Solving Shortest Path Problem. *WSEAS International Conference on Urban Planning and Transportation*, 28-32. Heraklion.
- [55] **Wu, W. ve Ruan, Q.** (2004). A Gene-constrained Genetic Algorithm for Solving Shortest Path Problem. *Proceedings of the 7th Int. Conf. on Signal Processing*, 2510-2513. Beijing.

- [56] **Al-Sabban, W. H., Gonzalez, L. F. ve Smith, R. N.** (2013). Wind-Energy based Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles Using Markov Decision Processes. *IEEE International Conference on Robotics and Automation ICRA 2013*, pp. 84-90.
- [57] **Chang, H., Fu, M., Hu, J. ve Marcus, S.** (2007). Simulation-based Algorithms for Markov Decision Processes. *Communications in Information and Systems*, 1-15. Springer-Verlag.
- [58] **Zivkovic, Z., Bakker, B. ve Kröse, B.** (2006). Hierarchical Map Building and Planning Based on Graph Partitioning. *Proc. of the IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, 803-809.
- [59] **Kruskal, J. B.** (1956). On the Shortest Spanning Subtree of a Graph and the Traveling Salesman Problem. *Proceedings of the American Mathematics Society*, Vol. 7, 48-50.
- [60] **Zitzler, E. ve Thiele, L.** (1999). Multiobjective Evolutionary Algorithms: A Comparative Case Study and the Strength Pareto Approach. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, 257-271.
- [61] **Watanabe, K., Kiguchi, K., Izumi, K. ve Kunitake, Y.** (1999). Path Planning for an Omnidirectional Mobile Manipulator by Evolutionary Computation. *Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems, Third International Conference*, 135-140.
- [62] **Siriwardene, N. R. ve Perera, B. J.** (2006). Selection of Genetic Algorithm Operators for Urban Drainage Model Parameter Optimization. *Mathematical and Computer Modelling*, Vol. 44, 415-429.
- [63] **Goldberg, D.** (1989). *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Boston: Wesley Longman Publishing.
- [64] **Chambers, L.** (1999). *Practical Handbook of Genetic Algorithms*, New York: CRC Press.
- [65] **Harik, G., Cantu-Paz, E. ve Goldberg D.** (1999). The Gambler's Ruin Problem, Genetic Algorithms, and the Sizing of Populations. *Evolutionary Computation*. Vol. 7, 231-253.
- [66] **Ahn, C. H. ve Ramakhrisna, R.S.,** (2002). A Genetic Algorithm for Shortest Path Routing Problem and the Sizing of Populations. *IEEE Trans Evolutionary Computation*, Vol. 6, 566-579.
- [67] **TM 1-70-28D-10,** (2002). *Operators Manual for Sikorsky S70-A Helicopter 28D Glass Cockpit Helicopter*.
- [68] **Williams, R.** (1998). *Geometry of Navigation*. Chichester-Eng: Horwood Publishing Limited.
- [69] **Deb, K., Thiele, L., Laumanns, M. ve Zitzler, E.** (2005). Scalable Test Problems for Evolutionary Multiobjective Optimization. *Evolutionary Multiobjective Optimization Theoretical Advances and Applications*, 105-145. U.S.A.
- [70] **Morrison, R. W.** (2004). *Designing Evolutionary Algorithms for Dynamic Environments*. Berlin: Springer-Verlag.

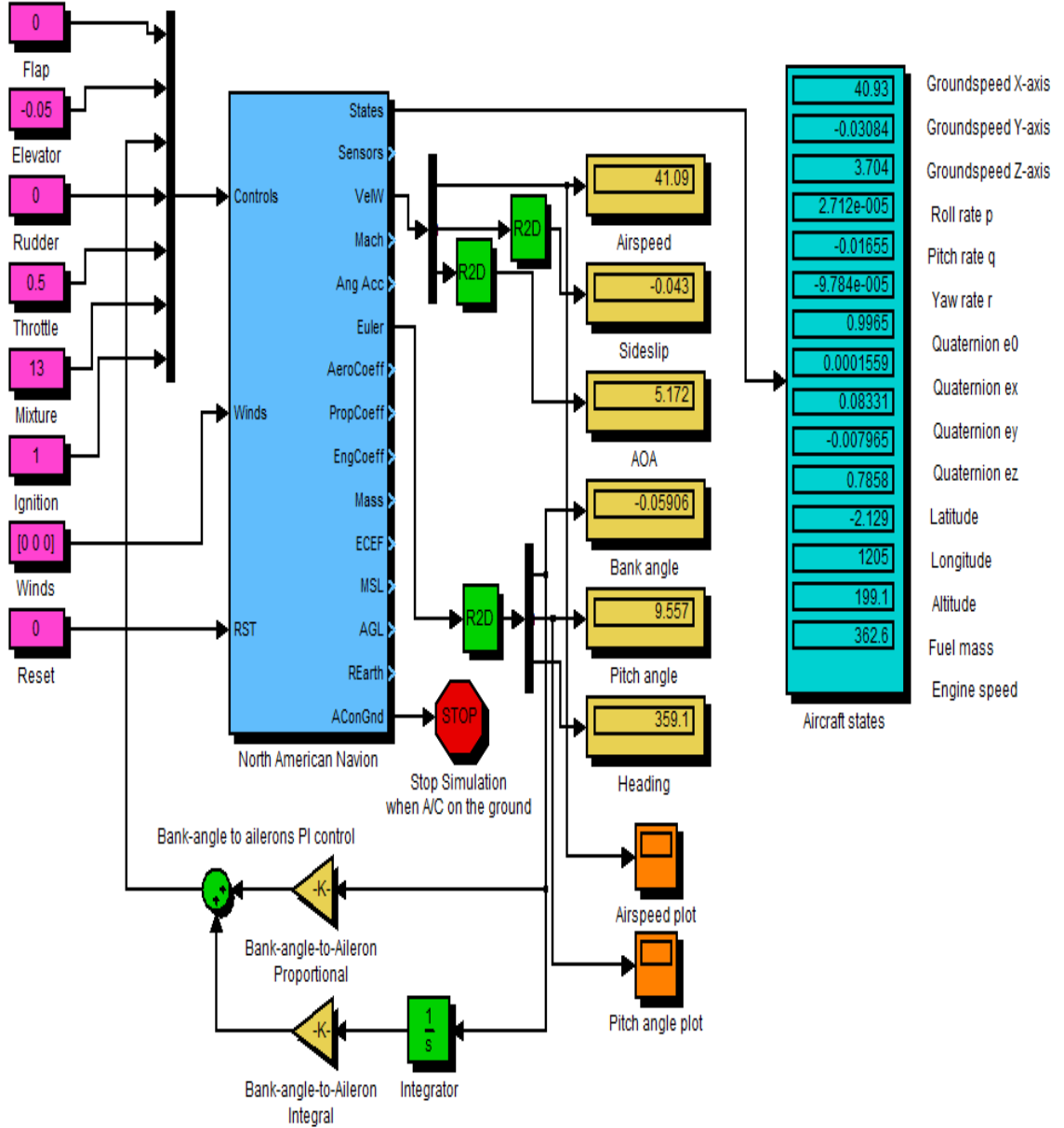
- [71] **Hatzakis, I. ve Wallace, D.**, (2006). Dynamic Multi-Objective Optimization with Evolutionary Algorithms: A Forward-Looking Approach. *Proceedings of the 8th annual conference on Genetic and Evolutionary Computation GECCO 2006*, 1201-1208.
- [72] **Bosman, P. A. N.** (2005). Learning, Anticipation and Time-Deception in Evolutionary Online Dynamic Optimization. *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation GECCO 2005*, 39-47.

## **EKLER**

**EK A:** Aerosim Simulatörü ve Hava Aracı Kontrol Yüzeyleri

## **EK A: Aerosim Simulatörü ve Hava Aracı Kontrol Yüzeyleri**

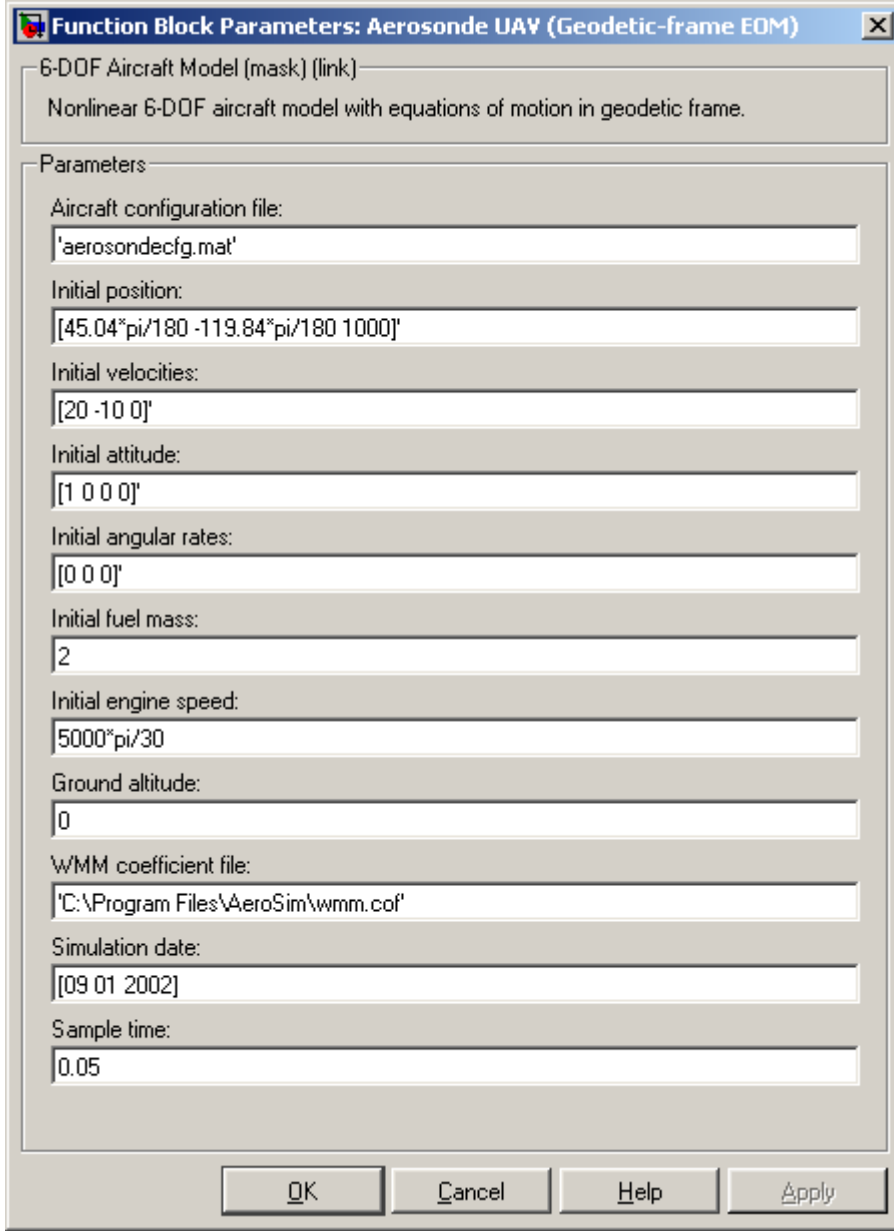
Uçuş planlama alt sistemi tarafından üretilen uçuş planının icra edilmesi aşamasında uçuş planı yürütme alt sistemi gerekli seyrüsefer ve güdüm fonksiyonlarını sağlar. Uçuş planı yürütme alt sistemi, Matlab / Simulink'de geliştirilen, 6 serbestlik dereceli uçak modellerinin tasarımında kullanılan Aerosim kütüphanesi ile test edilmiştir. Simülasyon kapsamındaki uçuş benzetim sistemi MATLAB Simulink ortamında yer alan Aerosim Blok Set kapsamında bulunan Aerosonde dinamik uçuş modeli vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir [26]. Aerosim blok seti dâhilinde yer alan ve altı serbestlik dereceli uçuş denklemlerine dayalı olarak Aerosonde İHA platformu için modellenmiş yapıdan faydalanılmaktadır. Aerosim uçuş modeli, model dinamik olarak kontrol yüzeylerindeki değişimleri aerodinamik kurallar çerçevesinde modelleyebilmekte ve verilen komutlara istinaden platformun dinamik değişimlerini geri besleyebilmektedir. Hava aracının uçuş planındaki tüm uçuş bacakları için kalkış noktasından hedef noktasına kadar intikalinin benzetimi yapılmıştır. Geliştirilen yatay ve dikey güdüm algoritmaları ile rüzgâr ve diğer aerodinamik koşullarından dolayı veya pilotun yanlış yönlendirmesinden kaynaklı olarak rotasından çıkan helikopter, orijinal uçuş planında izlemesi gereken rotaya oturtulmuş ve hava aracının dönüşleri yapabilmesi için gerekli yumuşatmalar gerçekleştirilmiştir. Hava aracının yatay ve dikey hareketini kontrol eden güdüm algoritmaları Şekil 2.2'de blok diyagramı ve içyapısı gösterilen Aerosim simulatörü ortamında test edilmiştir.



Şekil A.1 : Aerosim simülâtörü blok şeması.

Sanal ortamda seyrüsefer benzetimini gerçekleştirmek için Aerosim uçuş simülâtörü kullanılmıştır. Bu sayede hava platformunun bozucu etkilere maruz kalmasına rağmen istenilen pozisyonu sağlaması için gerekli olan parametreleri sanal ortamda elde edilebilmektedir. Açık kaynak kodlu olduğu için ve gelişmiş bir seyrüsefer simülâtörü olduğu için Aerosim simülâtörü kullanılmıştır. Ayrıca Aerosim'in sağladığı ara yüzler aracılığıyla farklı rüzgâr hızları için seyir yapılması sağlanmakta, bu sayede tasarlanan yatay ve dikey güdüm algoritmalarının farklı rüzgâr koşullarında istenen sonucu ürettiği ve hava aracını istenilen rotaya oturttuğu gözlemlenebilmektedir. Ayrıca ilk pozisyon ve uçuş başlangıç noktası da değiştirilebilmektedir ve böylece uçuş planına istenilen kalkış noktasından rotalama

yapılmaktadır. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi ilk konum, başlangıç yer hızı, başlangıç yönelim bilgileri, örnekleme zaman aralığı, yükseklik bilgileri değiştirilebilmektedir.

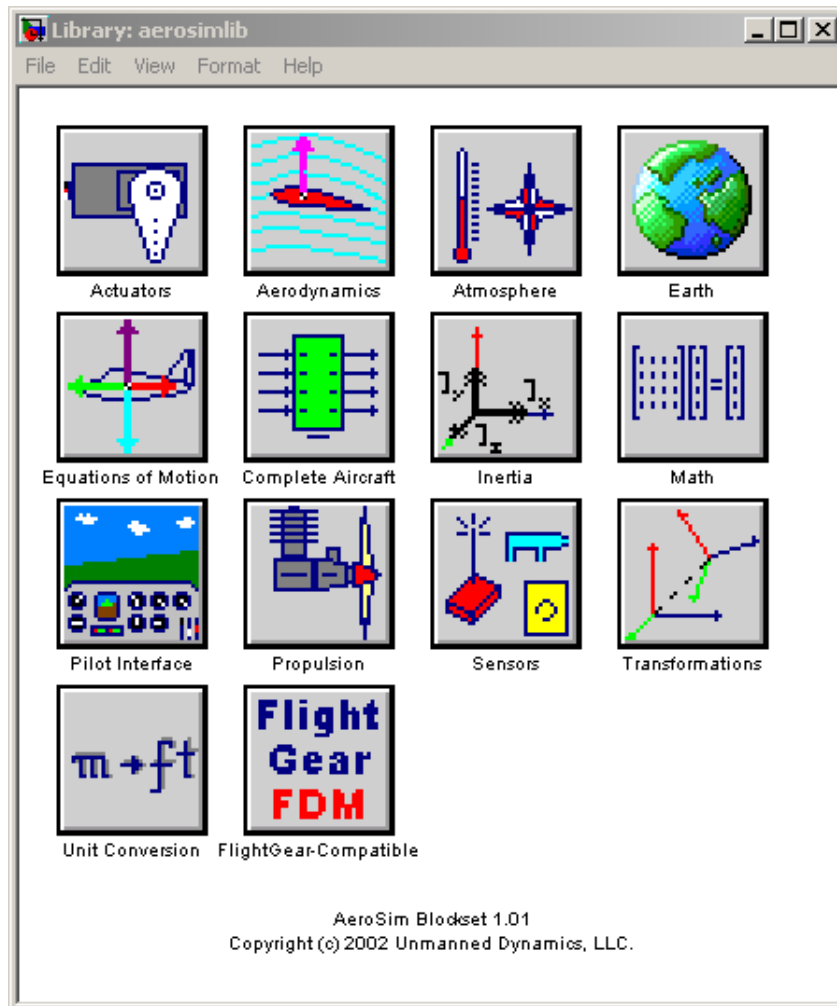


Şekil A.2 : Aerosim simülatorü blok parametreleri.

Aerosim uçuş simülatorü lineer olmayan 6 serbestlik dereceli hava aracı dinamik modelinin hızlı gelişimi için gerekli araç kümesini sağlamaktadır. Dinamik bloklara ek olarak, parametrelerle güncellenebilen tam bir uçak modelini içermektedir. Aerosim bloklar kümesinin bileşenleri Matlab Simulink bloklarıyla oluşturulmuştur. Kütüphane FlightGear isimli uçuş simülatorünün yapılandırma dosyaları ile de kullanılabilir. FlightGear xml tabanlı değişik formattaki uçuş dinamiği modellerini desteklemektedir. Matlab programı Aerosim uçuş modelini kullanıcı tarafından verilen uçuş koşullarına göre dengeler ve uçuş durumu için lineer bir model elde

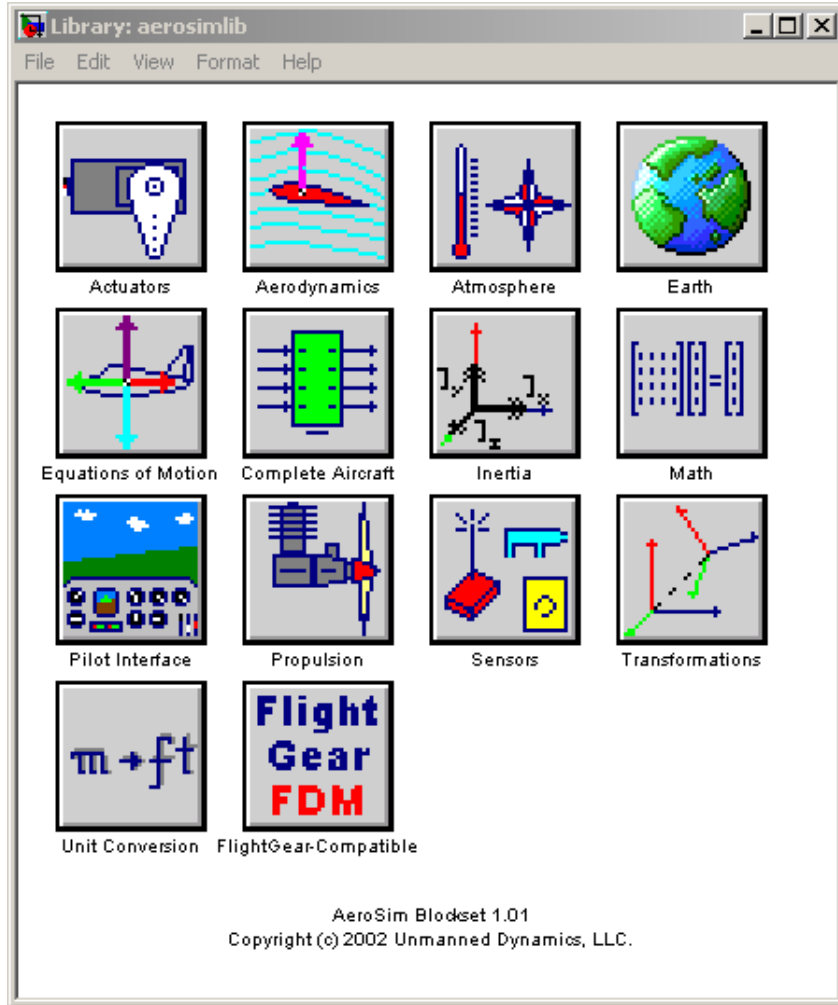


edilmesini sağlar. Aerosim Matlab 6 ve üzeri sürümlerde, Simulink 4 ve sonrası sürümlerinde çalışmaktadır. Gelişmiş matris işlemleri kullanıldığı için Matlab 5 ve öncesi sürümlerinde çalıştırılmaz. Şekil 2.4'de gösterilen Aerosim kütüphane bileşenleri, uçuş dinamiği modellerinin tasarımında kullanılan yaklaşık yüz blok sağlamaktadır. Bu bloklar lineer olmayan hareket denklemleri, lineer aerodinamik, piston motoru, hava aracı atalet parametreleri, atmosfer ve dünya modelleri, sensör ve hareket elemanları, yönetme kolu girişi gibi pilot ara yüzlerini içermektedir. Kütüphane Aerosim bloklarıyla tasarlanmış komple uçak modellerinin kullanımını sağlar.



Şekil A.3 : Aerosim kütüphane bileşenleri.

Matlab Simulink aracından çalıştırılan Aerosim Kütüphanesi Şekil 2.5'de gösterilen ağaç yapısına benzemektedir.



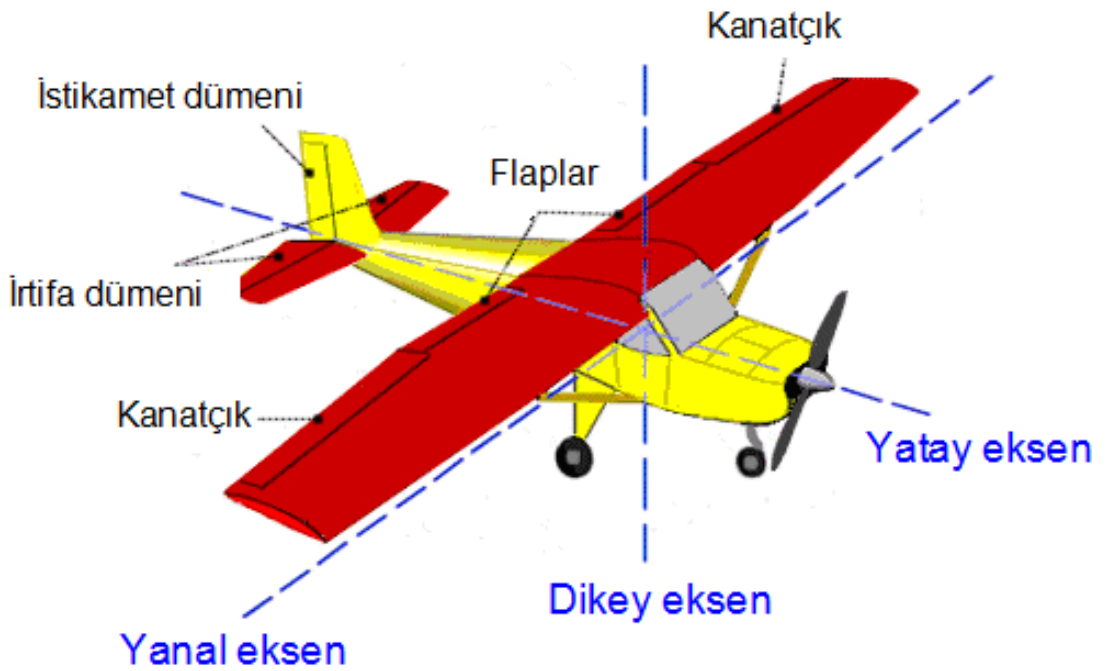
Şekil A.4 : Aerosim kütüphanesi ağaç yapısı.

Sabit kanatlı bir uçak için temel kontrol yüzeyleri, bu yüzeylerin akışa karşı durup onu bozması ve böylece yüksek basınçlı bir bölge oluşturma prensibiyle çalışırlar. Kontrol yüzeylerinin çalıştığı durumlarda uçağın iki zıt tarafındaki basınç simetrisi bozulur ve bu da hareketi sağlar. Kanatçıklar (aileron) kanat uçlarının firar kenarına yerleştirilirler ve birbirlerine zıt yönde çalışırlar. Pilot, kumanda kolunu sola eğdiğinde soldaki yatırgeç kalkar, sağdaki yatırgeç ise iner. Yatırgeçler sıfır konuma gelmediği müddetçe uçak yuvarlanma hareketi yapmaya devam eder. İrtifa dümeni (elevator) yatay dengeleyici art kenarına dengeleyicinin çeşidine göre bir ya da karşılıklı iki adet yerleştirilir. Pilot kumanda kolunu geriye çektiğinde irtifa dümeni yukarı hareket eder. Bu da yatay dengeleyici üzerinde bir yüksek basınç bölgesi oluşturur ve uçak burun yukarı moment elde eder. Bu moment uçağın burnunu kaldırır. Kumanda kolu ileri itildiğinde ise tersi gerçekleşir. İrtifa dümeni sıfır konuma gelmediği müddetçe uçak yunuslama hareketine devam eder. İstikâmet dümeni (rudder), genellikle kuyruğun art kenarına yerleştirilir. Pilot sol pedala

bastığında yüzgeç sola döner ve yüzgeç üzerinde bir yüksek basınç bölgesi oluşur. Yüzgeç sıfır seviyeye gelmedikçe uçak sapma hareketine devam eder. Sabit kanat bir hava aracının duruş açıları Şekil A.5’de, sabit-kanat kontrol yüzeyleri ise Şekil A.6’da görüldüğü gibidir.



Şekil A.5 : Sabit-kanat duruş açıları.



Şekil A.6 : Sabit-kanat kontrol yüzeyleri.

Yatay eksen, uçağın burnundan kuyruğuna doğru uzanan hayali eksendir. Bu eksendeki hareketi kanatçıklar kontrol eder. Bir aileron yukarı hareket ettiğinde diğeri aşağı doğru hareket eder. Bu kumanda sonucu uçağın sağ aileronu yukarı hareket ederek sağ kanattaki kaldırma kuvvetini azaltır, sol aileronu aşağı hareket ederek kaldırma kuvvetini arttırır. Buna bağlı olarak da sağ kanat aşağı sol kanat ise yukarı hareket eder. Sola yatışta ise bunun tersi olur.

Yanal eksen ise uçağın bir kanat ucundan diğerkanat ucuna olan hayali eksendir. İrtifa dümeni ile kontrol edilir. Uçağın burnu bu eksende aşağı yukarı hareket eder. Vericinin sağ kolunu aşağı doğru çektiğinizde kuyruktaki elevatör yukarı doğru hareket eder. Bunun sonucunda kuyruktaki kaldırma kuvveti azalır ve uçağın kuyruğu aşağı dolayısıyla burnu yukarı hareket eder.

Dikey eksen uçağın ortasındaki dikey hayali eksendir. İstikamet dümeni tarafından kontrol edilir. Uçağın burnunu sağa sola hareket ettirir. Vericinin sol kolunu sağa hareket ettirdiğinizde rudder sağa hareket eder. Bunun sonucunda rudderin sağ tarafındaki kuvvet artar, kuyruk sola doğru itilir bunun sonucunda ise uçağın burnunu sağa doğru çevirir. Sola dönüşte bunun tersidir. Aynı zamanda yerde iken kuyruk tekeri ya da burun tekerine kontrol ederek yerde uçağın kontrolünü sağlar.

Helikopterlerin üst kısımlarında ana rotor veya pal diye tabir edilen büyük pervaneler mevcuttur. Bu pervaneler bir çeşit kanattır ve hızla döndürüldüklerinde kaldırma kuvveti oluştururlar. Bu kuvvet sayesinde yukarı doğru hareket etme kabiliyeti elde edilir. Helikopterin, yukarı, aşağı ve havada asılı kalma manevraları bu pervanelerin dönüş hızı ve açıları değiştirilerek kontrol edilir. Pervanelerin dönüş hızı ve açısı arttıkça yukarı yönde hareket başlar, azaldıkça tam tersi olur. Pervanelerin dönüşü esnasında dönüş yönünün aksine bir kuvvet oluşur. Bu yüzden helikopterin gövdesi pervanenin döndüğü yönün tersine dönmeye çalışır. Bu istenmeyen durumu engellemek için helikopterlerin kuyruklarında kuyruk rotoru olarak adlandırılan bir pervane daha mevcuttur. Bu pervane kuyruğun sabit kalmasını sağlar. Pervane iki veya dört parçalıdır. Parçaların her biri çok daha kısa, dar ve ince olmakla beraber, bir uçak kanadının geometrisine sahiptirler. Uçağın kanadı sadece, uçak hareket halinde iken işlev görür ve kabaca, karşıdan gelen havayı aşağıya doğru yönlendirip, uçağı yukarı doğru kaldırır. Helikopterin kanatları, araç dururken de dönebildiklerinden dolayı, havanın içerisinde hareket halindedir. Dolayısıyla, ana pervane helikopteri olduğu yerde havalandırabilir. Uyguladığı kaldırma kuvveti,

dönme hızına ve kanatların açısı ayarına bağlıdır. Fakat aracın ayak çubuklarının yerle teması kesildiği anda, gövde pervanesinin tersi yönde dönmeye başlayacaktır. Çünkü motor ana pervaneye aktardığı torku helikopterin gövdesine sırt vererek sağlamakta ve ana pervaneyi bir yönde döndürürken, gövdeyi de bunun tersi yönde döndürmeye çalışmaktadır. Yerle aradaki sürtünme ortadan kalkmış olduğundan, gövde dönmeye başlar. Kuyruk pervanesinin işlevi, gövdenin bu dönme eğilime karşı koymaktır. Kuyruk pervanesi yere dikey bir düzlemde dönmekte olduğundan, sağladığı kaldırma kuvveti yatay düzlemde olup, kendi dönme ekseninin doğrultusundadır. Yani helikopterin kuyruğunu, dönme yönüne bağlı olarak, kendi dönme eksenine doğrultusundaki bir veya diğer yöne doğru itebilir. Uyguladığı kuvvetin büyüklüğü, kanatlarının açısı ayarına bağlıdır. Pilot bu açığı, gövdenin dönmesi duracak şekilde ayarlar. Ayarı baştan tam tutturmak güç olduğundan, helikopterler çoğu kez, sağa sola bir miktar döne döne havalanırlar.

Uçak ve helikopterde kaldırma kuvvetini oluşturan prensipler aynıdır. Uçakta kanat bu görevi üstlenirken helikopterde ise bu görevden paller sorumludur. Temel olarak kaldırma kuvveti kanat ve pallerin airfoil adı verilen özel aerodinamik şekliyle oluşur. Aynı zaman kesitinde kanat altından ve üstünden geçen hava akımlarının kat edeceği mesafe farklı olduğu için üstten geçen hava daha hızlı, altından geçen hava daha yavaş hareket etmek zorunda kalır. Bunun sonucu olarak kanat üzerinden geçen hava kat edeceği yüzey nedeni ile daha hızlı hareket eder, daha hızlı hareket eden hava da daha az basınç oluşturur. Aynı şekilde kanat altından geçen hava, daha az yüzey kat edeceğinden daha yavaş hareket edip daha yüksek basınç oluşturur. İki yüzeyde oluşan bu basınç farkından dolayı kanat üzerinde kuvvetli basınçtan az basınca doğru yani aşağıdan yukarıya doğru bir kaldırma kuvveti oluşur. İşte bu kaldırma kuvveti hem helikopterde hem de uçakta havalanmayı sağlayan temel kuvvettir.

Uçakta hava akımı, motorların oluşturduğu ileriye doğru hareketin sonucunda oluşurken, helikopter de ise bu akım pallerin dönüşünden oluşur. Kanatın veya pallerin hava ile oluşturduğu açı oranında, kanatın üstünden geçen hava hızlanacağından kaldırma kuvveti daha artar. Helikopterdeki diğer bir konu da ana pallerin hızla dönmesiyle oluşan ters yönde dönme kuvveti ile kendi etrafında dönme etkisidir. Buna Yaw hareketi denir. Bu dönme etkisini engellemek için kuyruk pervanesi kullanılır. Kuyruk pervanesinin oluşturduğu ters kuvvet dönme

helikopterin dönme hareketini engeller. Ayrıca kuyruk pervanesinin oluşturduğu kuvvet artırılarak veya azaltılarak helikopterin sola veya sağa dönmesi de sağlanır.

Helikopterler dikey olarak kalkış ve iniş yapabilir ve havada sabit olarak tutunabilirler. Helikopter ve uçakların uçuş prensipleri aslında aynıdır. Uçaklarda tutunma kuvveti elde edebilmek için uçak hava içinde hareket ettirilir. Ancak kanat, uçak gövdesine bağlı olduğu için sabit bir yapıdadır. Fakat helikopterlerde kanat sabit değil, hareketlidir. Yani helikopterlerde taşıma kuvveti elde edebilmek için döner kanat yani pervane kullanılır. Pervane iki ya da daha fazla palden meydana gelir. Pervane palinin profili uçak kanadının profili ile aynıdır. Helikopterin motoru palleri döndürür. Paller hava içinde hareket ettikleri için üst yüzeylerinde alçak basınç, alt yüzeylerinde ise, yüksek basınç oluşur. Bu basınç farkı taşıma kuvvetini meydana getirir. Pallerin devir sayısının ve hücum açısının (pallerin havayı karşılama açısı) artması ile bu taşıma kuvvetinin büyüklüğü de artar. Tersine bir durumda ise azalır. Taşıma kuvveti helikopterin ağırlığına eşit olduğunda helikopter havada sabit olarak tutunur. Büyük olduğunda dikey olarak yükselir. Daha az olduğunda ise, dikey olarak alçalır. Pervanenin dönme düzlemi eğildiğinde, yani pervanenin oluşturduğu taşıma kuvvetinin yönü değiştirildiğinde, helikopter ileri - geri ve sağa - sola doğru hareket eder. Böylece helikopterin hava içinde hareket etmesi sağlanır. Pervane sürekli döndüğü için (gövde üzerinde yarattığı moment nedeniyle) helikopterin gövdesini de döndürmeye çalışır. Bunu engellemek için helikopterin kuyruğunda daha küçük olan bir pervane daha kullanılır. Kuyruktaki pervane gövde üzerindeki dönme momentini sönmümler. Ayrıca sönmümler miktarı değiştirilerek gövdenin dönüşü de sağlanabilir. Döner kanat bir hava aracı için kontrol yüzeyleri Şekil A.7'deki gibidir.



**Şekil A.7 : Döner-kanat kontrol yüzeyleri.**

Ana pallerin sağa veya sola aılandırılmasıyla helikopterin sağa veya sola gitmesini sağlanır. Palin birinin açısı artarken diğerinin açısı azalır. Kuyruk pervaneleri helikopterin burnunu sağa ya da sola çevrilmesini sağlar. Bu işlemi kuyruk pervanelerinin açısını değiştirerek gerçekleştirir. Ana pallerin açısı ne veya arkaya doğru değiştirerek helikopterin ileri veya geri gitmesi sağlanır. Palin birinin açısı artarken diğerinin açısı azalır. Ana pallerin yukarı veya aşağı olarak açılarının birlikte değiştirilmesi ile helikopterin alçalmasını veya yükselmesini sağlar.

Helikopter, uçuşa dikey başlama, tek bir noktanın yukarısında asılı durma, yavaş uçma ve geriye doğru uçma özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılır. Helikopterlerde sabit kanatlar bulunmadığı için, aerodinamik önemli bir tasarım unsuru değildir. Yapımda daha çok yük hacimlerini, sabit ağırlığı ve helikopterin dengesini en uygun düzeyde tutmaya önem verilir.





## ÖZGEÇMİŞ



**Ad Soyad:** Ferhat Uçan

**Doğum Yeri ve Tarihi:** İstanbul – 18.10.1979

**Adres:** Acıbadem mah. Yıldız sok. No:2 D:16, 34718, Kadıköy / İST

**E-Posta:** ferhat.ucan@tubitak.gov.tr

**Lisans:** Yıldız Teknik Üniversitesi Bilgisayar Bilimleri Mühendisliği (1997 - 2002)

**Yüksek Lisans:** İstanbul Teknik Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği (2002 - 2004)

**Mesleki Deneyim ve Ödüller:** TÜBİTAK BİLGEM Bilişim Teknolojileri Enstitüsü (Başuzman Araştırmacı) (2003 Nisan - Halen)

### Yayın ve Patent Listesi:

- **Uçan F.**, Altılar T., “Using Genetic Algorithms for Navigation Planning In Dynamic Environments”, Hindawi Publishing Corporation, Applied Computational Intelligence and Soft Computing, Volume 2012, doi:10.1155/2012/560184, (2012).
- **Uçan F.**, Altılar T., “Gerçek Zaman Kısıtları Altında Seyrüsefer Planlamaya Yeni Bir Yaklaşım”, Savunma Bilimleri Dergisi, Mayıs 2012, 11 (1), 119-132, (2012).
- **Uçan F.**, Altılar T., “Navigation and Guidance Planning For Air Vehicles”, ICTAI 2008, 20th IEEE Int'l Conference on Tools with Artificial Intelligence, (2008).
- **Uçan F.**, Altılar T., “Yüksek Kısıtlı Dinamik Askeri İntikal Planlama Problemine Sezgisel Çözüm Yaklaşımı”, SAVTEK 2008 4. Savunma Teknolojileri Kongresi, (2008).
- **Uçan F.**, “Evrimsel Eniyileme Yöntemi İle Dinamik Rota Planlama”, Hava Harp Okulu Endüstri Mühendisliği Karar Destek Sistemleri Sempozyumu, (2008).
- **Uçan F.**, Altılar T., “A Heuristic Approach to Military Transition Problem”, ISCIS 2008, 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences, (2008).
- **Uçan F.**, Kaplan G., Çaputcu R., Hakkıdır M., Arar Ö., “Taktiksel En Kısa Yol Problemlerinin Genetik Algoritma Yaklaşımı İle Çözümü”, USMOS 2007 İkinci Ulusal Savunma Uygulamaları Modelleme ve Simülasyon Konferansı, (2007).

