

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARI İÇİN SABİT İRTİFA GÜZERGAH
PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ**

**Hazırlayan
Tevfik ERKİN**

**Danışman
Doç. Dr. Selçuk ASLAN**

Yüksek Lisans Tezi

**Kasım 2023
KAYSERİ**

**T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
UÇAK ve UZAY MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İNSANSIZ HAVA
ARAÇLARI İÇİN SABİT İRTİFA GÜZERGAH
PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Hazırlayan
Tevfik ERKİN**

**Danışman
Doç. Dr. Selçuk ASLAN**

**Kasım 2023
KAYSERİ**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK

Bu çalışmadaki tüm bilgilerin, akademik ve etik kurallara uygun bir şekilde elde edildiğini beyan ederim. Aynı zamanda bu kural ve davranışların gerektirdiği gibi, bu çalışmanın özünde olmayan tüm materyal ve sonuçları tam olarak aktardığımı ve referans gösterdiğimi belirtirim.

Tevfik ERKİN

İmza:

“İmmün Plazma Algoritması İle İnsansız Hava Araçları İçin Sabit İrtifa Güzergah Planlama Probleminin Çözülmesi” adlı Yüksek Lisans tezi, Erciyes Üniversitesi Lisansüstü Tez Önerisi ve Tez Yazma Yönergesi’ne uygun olarak hazırlanmıştır.

Tezi Hazırlayan
Tevfik ERKİN

Danışman
Doç. Dr. Selçuk ASLAN

Uçak Mühendisliği ABD Başkanı
Doç. Dr. Selçuk ASLAN

TEŞEKKÜR

"İmmün Plazma Algoritması İle İnsansız Hava Araçları İçin Sabit İrtifa Güzergah Planlama Probleminin Çözülmesi" adlı tez çalışmasının yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde bilgi, tecrübe, destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Selçuk ASLAN'a sonsuz saygı ve minnetlerimi sunarım. Tez sürecim boyunca desteğini esirgemeyen başta Prof. Dr. Tuğrul OKTAY ve Dr. Öğr. Üyesi Melih YILDIZ olmak üzere Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri fakülte hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca yanımda olan ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen babam Faruk ERKİN, annem Ayla ERKİN, eşim Kübra ERKİN, kız kardeşlerim Kübra ERKİN ve Rümeysa ZEYBEK'e teşekkür ederim.

Tezimi "TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB) 2211-Yurt İçi Lisansüstü Burs Programı dahilinde TÜBİTAK 2210-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Yüksek Lisans Burs Programı" kapsamında destekleyen TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Ülkemizin bilimsel gelişimine katkıda bulunmak için tezimi destekleyen TUSAŞ'a ve mentörüm Prof. Dr. Erdal ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

Tevfik ERKİN

Kasım 2023, KAYSERİ

İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN SABİT İRTİFA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

Tevfik ERKİN

Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek Lisans Tezi, KASIM 2023

Danışman : Doç. Dr. Selçuk ASLAN

ÖZET

Askeri amaçla kullanımı yaygın olan ve genel olarak gözlem-keşif için sıklıkla faydalanılan silahlı veya silahsız insansız hava araçlarının (SİHA/İHA) uçuşunu sağlıklı bir şekilde gerçekleştirebilmesi, araca uygun güzergahın belirlenmesi ile mümkün olmaktadır. Takip edilecek rotanın oluşturulabilmesi, uçuşun yapılacağı alan dahil olmak üzere birden fazla parametrenin dikkate alınmasını gerektirmektedir. Karmaşık savaş alanı üzerinde görev yapan bir İHA sisteminin uçuşu için başlangıç ve bitiş noktası arasında yer alan düşman unsurlarından kaçınmanın yanı sıra minimum yakıt tüketimine sahip güzergahın oluşturulması problemin temel amacıdır. Belirli sınırlandırmalar altında en uygun/iyi çözüme ulaşılmaya çalışılması, İHA sistemi için güzergah planlamayı bir optimizasyon problemi haline getirmiştir. Sonsuz çözüm uzayına ve yüksek karmaşıklığa sahip bu problemin klasik türev tabanlı araştırma yöntemleri ile kabul edilebilir süreler içerisinde çözümlenmesi zor veya imkansızdır. Bu amaçla son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanan metasezgisel yöntemler güzergah planlama probleminin çözümü için de kullanılmaya başlanmıştır.

Temelini biyolojik veya kimyasal süreçlerden alan metasezgisel yöntemler, bu süreçlerin barındırdığı zekiliği modelleyerek herhangi bir problemin çözümü için uyarlandıktan sonra kullanılabilir. Koronavirüs pandemisi ile yeniden gündem olan İmmün Plazma tedavi yönteminin içerdiği zekilikten ilham alınarak 2020 yılında Aslan tarafından tanıtılan ve en yeni metasezgisel yöntemler arasında yer alan İmmün Plazma Algoritması kısaca IP veya IPA kullanılarak bir İHA sistemi için sabit irtifada güzergah planlama problemi çalışma kapsamında çözülmeye çalışılmıştır. İlk sonuçlar algoritmanın problem çözümünde başarılı olduğunu göstermiştir. Bunu ispatlamak amacıyla alanında iyi bilinen bazı metasezgisel algoritmalarla karşılaştırmalı bir dizi testler yapılarak önerilen yeni tekniğin performansı ortaya konmuştur.

Bilgisayar donanımlarının iyileşmesiyle işlem güçlerinin artması paralelleştirme

tekniklerinden daha fazla yararlanılmasını olanaklı hale getirmiştir. Paralelleştirme sayesinde çözümü için fazla zamana ihtiyaç duyulan problemler çok daha kısa sürelerde daha kaliteli sonuçlar üretilerek çözülebilmektedir. Bu çalışmada standart IPA kullanımının yanı sıra paralelleştirme tekniklerinden faydalanılarak Çoklu İmmün Plazma Algoritması veya kısaca MULIPA adıyla yeni bir metasezgisel yaklaşım önerilmiş ve güzergah planlama probleminin çözümü için uyarlanarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar bu yeni tekniğin güzergah planlama problemi için güvenilir bir çözücü olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Güzergah Planlama, İnsansız Hava Aracı, İmmün Plazma Algoritması, Paralelleştirme.

SOLVING FIXED ALTITUDE PATH PLANNING PROBLEM FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES WITH IMMUNE PLASMA ALGORITHM

Tevfik ERKİN

Erciyes University, Graduate School of Natural and Applied Sciences

M.Sc. Thesis, NOVEMBER 2023

Supervisor: Assoc. Prof. Selçuk ASLAN

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles or their armed variant, unmanned combat aerial vehicles (UAVs/UCAVs), are mostly used for military surveillance and reconnaissance missions. It is vital to the success of the mission that the optimum flight path is planned before the flight, bearing in mind the various parameters associated with the battlefield and flight conditions. The primary objectives are to achieve the most efficient path between the start and target points by minimizing fuel consumption and avoiding potential threats. Path planning for a UAV has become an optimization problem that requires finding the best possible solution given a set of constraints. The problem has an infinite solution space and high complexity, making it difficult or impossible to solve within acceptable time periods using classical derivative-based search methods. Therefore, metaheuristics - which have gained increasing popularity of late - are employed to solve the path planning problem.

Metaheuristics can be used to solve any problem by imitating the intelligence of biological or chemical processes whose basis is well known. The Immune Plasma or convalescent treatment method which has become popular again after the coronavirus pandemic, has inspired researchers. Hence, one of the most recent metaheuristic algorithms called the Immune Plasma Algorithm, IP or IPA, was introduced by Aslan in 2020 and used in this study to solve the fixed altitude path planning problem for a UAV. Preliminary results show that the algorithm is successful in solving the problem. The performance of the proposed new technique is demonstrated by conducting a series of comparative tests with some well-known metaheuristic algorithms in the path planning.

Parallel computing techniques have gained wider usage owing to enhanced processing capabilities of computers. Through parallelization, intricate issues can be resolved quicker and with improved results. Also this research introduces a new metaheuristic approach called Multi-IPA, or MULIPA for short, as a parallelized variant of standard IPA.

The new technique is experimented in the context of UAV path planning. Experimental results show that the new technique is a feasible and reliable path planning solver.

Keywords: Path Planning, Unmanned Aerial Vehicle, Immune Plasma Algorithm, Parallelization.



İÇİNDEKİLER

İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN SABİT İRTİFA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK SAYFASI	i
YÖNERGEYE UYGUNLUK SAYFASI	ii
KABUL VE ONAY	iii
TEŞEKKÜR	iv
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER	ix
TABLolar LİSTESİ	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ	xiv

GİRİŞ	1
-----------------	---

1. BÖLÜM

İNSANSIZ HAVA ARACI ve GÜZERGAH PLANLAMA

1.1. İnsansız Hava Aracının Sınıflandırılması	7
1.2. Hava Araçlarının Aerodinamiği	12
1.2.1. Referans Sistemler ve Altı Serbestlik Derecesi	12
1.2.2. Döner Kanatlı İHA Temel Uçuş Prensibi	13
1.2.3. Sabit Kanatlı İHA Temel Uçuş Prensibi ve Hareketler	14
1.2.4. Sabit Kanatlı İHA Sistemine Uçuş Boyunca Etkiyen Temel Kuvvetler	15
1.2.5. Manevra Performansı	16
1.2.5.1. Koordineli Yatay Uçuş	17
1.2.5.2. Kararlı Durum Uçuşu	20
1.3. Sabit İrtifada Güzergah Planlama Probleminin Tanımı ve Modellenmesi	20

1.4. İlgili Çalışmalar	26
----------------------------------	----

2. BÖLÜM

İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İHA İÇİN SABİT İRTİFADA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

2.1. İmmün Plazma Tedavi Yöntemi	38
2.1.1. Biyolojik Temeller	41
2.1.2. Başlangıç Çözümlerinin Belirlenmesi	45
2.1.3. Enfeksiyonun Yayılması	46
2.1.4. Donör ve Alıcı Bireylerin Seçilmesi ve Plazma Tedavisinin Uygulanması	47
2.1.5. Donör Bireylerin Bağışıklık Hafızasının Güncellenmesi	50
2.2. İmmün Plazma Algoritması ile Sabit İrtifada GüzergaH Planlama Probleminin Çözümü	51
2.2.1. Sonuç	64

3. BÖLÜM

ÇOK POPÜLASYONLU İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI ile SABİT İRTİFADA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

3.1. Çok Popülasyonlu İmmün Plazma Algoritması	67
3.2. Deneysel Çalışmalar	71
3.2.1. Değişken Popülasyon Sayısının MULIPA Performansına Etkisi . .	72
3.2.2. Değişken Popülasyon Sayısının MULIPA Yürütme Zamanına Etkisi	81
3.2.3. Değişken Popülasyon Büyüklüğünün MULIPA Performansına Etkisi	84
3.2.4. Karşılaştırmalı Çalışmalar	86
3.3. Sonuç	97

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma, Sonuç ve Öneriler	99
KAYNAKLAR	102
EKLER	116
ÖZGEÇMİŞ	117

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1.	Boyuta göre İHA sınıflandırması	9
Tablo 1.2.	Menzil ve dayanaklılığa bağlı İHA sınıflandırması	10
Tablo 1.3.	Ağırlığa göre İHA sınıflandırması	11
Tablo 2.1.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan savaş alanlarının özellikleri	51
Tablo 2.2.	Senaryo-1 için farklı <i>NoD</i> ve <i>NoR</i> değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar	53
Tablo 2.3.	Senaryo-2 için farklı <i>NoD</i> ve <i>NoR</i> değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar	53
Tablo 2.4.	Senaryo-3 için farklı <i>NoD</i> ve <i>NoR</i> değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar	53
Tablo 2.5.	Senaryo-1 için farklı <i>PS</i> ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar . . .	54
Tablo 2.6.	Senaryo-2 için farklı <i>PS</i> ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar . . .	54
Tablo 2.7.	Senaryo-3 için farklı <i>PS</i> ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar . . .	54
Tablo 2.8.	Senaryo-1 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	56
Tablo 2.9.	Senaryo-2 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	57
Tablo 2.10.	Senaryo-3 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	57
Tablo 2.11.	Senaryo-4 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	58
Tablo 2.12.	Senaryo-5 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	60
Tablo 2.13.	Senaryo-5.1 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	61

Tablo 2.14.	En iyi amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma . .	63
Tablo 2.15.	En kötü amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma . .	63
Tablo 2.16.	Ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma . .	63
Tablo 3.1.	Deneyisel çalışmalarda kullanılan savaş alanlarının özellikleri	72
Tablo 3.2.	Senaryo-1 için MULIPA sonuçları	73
Tablo 3.3.	Senaryo-2 için MULIPA sonuçları	74
Tablo 3.4.	Senaryo-3 için MULIPA sonuçları	75
Tablo 3.5.	Senaryo-4 için MULIPA sonuçları	76
Tablo 3.6.	Senaryo-5, D 5, 10, 15 ve 20 için MULIPA sonuçları	77
Tablo 3.7.	Senaryo-5, D 25, 30, 35 ve 40 için MULIPA sonuçları	78
Tablo 3.8.	Senaryo-1 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri	83
Tablo 3.9.	Senaryo-2 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri	84
Tablo 3.10.	Senaryo-3 için MULIPA ve IPA'nın yürütme süreleri	85
Tablo 3.11.	Senaryo-4 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri	86
Tablo 3.12.	D sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 için Senaryo-5 üzerinde elde edilen MULIPA ve IPA yürütme süreleri	87
Tablo 3.13.	D sırasıyla 25, 30, 35 ve 40 için Senaryo-5 üzerinde elde edilen MULIPA ve IPA yürütme süreleri	88
Tablo 3.14.	Senaryo-1 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları	89
Tablo 3.15.	Senaryo-2 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları	89
Tablo 3.16.	Senaryo-3 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları	90
Tablo 3.17.	Senaryo-4 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları	90
Tablo 3.18.	Senaryo-5 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları	91

Tablo 3.19.	Senaryo-1 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	92
Tablo 3.20.	Senaryo-2 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	92
Tablo 3.21.	Senaryo-3 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	92
Tablo 3.22.	Senaryo-4 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma	93
Tablo 3.23.	Senaryo-5 için MULIPA ve IPA, ABC, BA, BAM, ACO, BBO ve DE ile yapılan karşılaştırmalı çalışma sonuçları	94
Tablo 3.24.	Senaryo-5 için MULIPA ve IPA, ABC, BA, BAM, ACO, BBO ve DE ile yapılan karşılaştırmalı çalışma sonuçları	95
Tablo 3.25.	Ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri dikkate alınarak yapılan Wilcoxon testi sonuçları	96
Tablo 3.26.	En iyi amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak yapılan Wilcoxon testi sonuçları	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil G.1.	Çözüm uzayında yer alan yerel ve global optimum değerler	3
Şekil 1.1.	İHA sistemlerinin menzil ve havada kalış süresi, aerodinamik tasarım, iniş türü, irtifa ve havada kalış süresi, ağırlık ve boyut özelliklerine göre sınıflandırılması	11
Şekil 1.2.	Altı serbestlik derecesinin şematik gösterimi	13
Şekil 1.3.	Döner kanatlı İHA platformuna ait sabit gövde referans sistemi ve eylemsiz referans sistemi	13
Şekil 1.4.	Benoulli prensibi	15
Şekil 1.5.	İHA üzerine etkiyen dört temel kuvvet ve etkime yönleri	15
Şekil 1.6.	Sabit kanatlı İHA yunuslama (a), yuvarlanma (b) ve sapma (c) hareketleri	17
Şekil 1.7.	Koordineli yatay uçuşun üstten görünümü (a) ve önden görünümü (b)	18
Şekil 1.8.	Başlangıç-hedef noktalarının ve düşman unsurların gösterimi (a), dikey çizgiler (b), çizgilerin geometrik dönüşümü (c) ve İHA güzergahı için yeniden dönüşümü (d)	21
Şekil 1.9.	λ değeri 0.5'ten büyükken üretilen güzergah (a) ve λ değeri 0.5'ten küçükken üretilen güzergah (b)	24
Şekil 1.10.	Düşman maliyet hesabının şematik gösterimi	25
Şekil 2.1.	İnsan vücudunda yer alan bağışıklık sistemi organları	40
Şekil 2.2.	B hücresinin T hücresi ile farklılaşarak plazma hücrelerinin oluşumunun gösterimi	42
Şekil 2.3.	Antikoru yapısı	43
Şekil 2.4.	Antikor hücrelerinin özel olarak sentezlendikleri antijenlere bağlanması	44
Şekil 2.5.	IP algoritması işlem adımları	45
Şekil 2.6.	Donör ve alıcı bireylerin seçimi	48

Şekil 2.7.	Başlangıç çözümlerinin oluşturulması ve güzergah amaç fonksiyonlarının hesabı (a), alıcı ve donör bireylerin belirlenmesi ve plazma transferinin gerçekleştirilmesi (b) ve tedavi sonrası güzergah kalitesindeki değişim (c)	52
Şekil 2.8.	Senaryo-1 D parametresi 20 (a),30 (b), 50 (c) için , Senaryo-2 D parametresi 20 (d),30 (e), 50 (f) için, Senaryo-3 D parametresi 20 (g), 30 (h), 50 (i) için IPA tarafından bulunan en iyi güzergahlar . . .	55
Şekil 2.9.	Senaryo-4 D parametresi 10 (a),15 (b) ve 20 (c) için IPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	59
Şekil 2.10.	Senaryo-5 D parametresi 10 (a), 15 (b), 20 (c), 25 (d), 30 (e) ve 35 (f) için IPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	62
Şekil 3.1.	D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-1 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	79
Şekil 3.2.	D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-2 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	79
Şekil 3.3.	D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-3 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	79
Şekil 3.4.	D değerinin 20 ve NP değerinin 2 (a), 4 (b) ve 8 (c) olduğu ve D değerinin 30 ve NP değerinin 2 (d), 4 (e) ve 8 (f) olduğu Senaryo-4 için MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar	80
Şekil 3.5.	NP değeri 4 ve D parametresinin sırasıyla 10 (a), 15 (b), 20 (c), 30 (d), 35 (e), 40 (f) olduğu durumda Senaryo-5 için MULIPA tarafından bulunan en kötü ve en iyi güzergahlar	81
Şekil 3.6.	NP değeri 8 ve D parametresinin sırasıyla 10 (a), 15 (b), 20 (c), 30 (d), 35 (e), 40 (f) olduğu durumda Senaryo-5 için MULIPA tarafından bulunan en kötü ve en iyi güzergahlar	82

GİRİŞ

21. yüzyılda ciddi bir hızla artan teknolojik gelişmeler, daha önce yapılamayan veya çok maliyetli olduğu için ertelenen projelerin hayata geçirilmesini olanaklı kılmıştır. Endüstride veya operasyonel alanda kullanıcı kaynaklı hataların önüne geçilmek istenmesi, sürekli ve sabit verimlilikte üretim yada çalışma isteği ve bahsedilen teknolojik gelişmeler insansız uygulamaların farklı alanlarda sıklıkla görülmesinin önünü açmıştır. İnsansız hava araçları (İHA) kontrolünün bir yer istasyonundan veya önceden programlama ile tam otonom bir şekilde gerçekleştirildiği gelişmiş sistemler olarak tanımlanmaktadır [1]. Tam otonom şekilde görev icra edemeyen İHA sistemleri bir yer istasyonu ve operatöre ihtiyaç duyabilir. Özellikle daha hassas ve az hatayla icra edilmek istenen görevlerde kullanılan bu sistemler ilk olarak askeri amaçla tanıtılmıştır [2]. 1849 yılında Avusturya-Venedik savaşında 200 adet pilotsuz ve bomba yüklü balon Venediklilere karşı kullanılmıştır [3]. Bunun yanı sıra benzer şekilde 1862 yılında Birleşik Devletler sivil savaşında da bomba yüklü balonlar kullanılmıştır [2]. Fransız devriminde havadan izleme amacıyla kullanılması, bu araçlardan oldukça farklı bir alanda da faydalanılabileceğini göstermiştir. İHA sistemlerinin uçuş performansı ve kararlılığı üzerinde önemli etkiye sahip olan jiroskop, ilk olarak 1911 yılında Birleşik Devletler’de mucidi olan Elmer Sperry tarafından kullanılmıştır [4]. Çığır açıcı nitelikteki bu çalışma Carl Norden ve Glenn Curtiss isimli bilim adamlarının radyo iletişimi kullanarak kontrol edilebilen hava torpido araştırmaları ile devam ettirilmiştir [5]. İkinci dünya savaşına gelindiğinde Almanya da İHA çalışmalarına dahil olmuş ve bu kapsamda hava torpidoları ve uçan bombalar geliştirmeye başlamıştır [2].

Askeri kullanım amacıyla geliştirilen İHA sistemlerinin bazı özellikleri sivil veya ticari bazı problemlerin çözümü için kullanımlarının önünü açmıştır. Savaş alanında kullanılmak üzere düşman gözetleme kabiliyeti kazandırılan İHA sistemlerinin bu özelliği, trafik kontrol, sınır güvenliği, tarımsal arazilerin denetimi, yangınla mücadele,

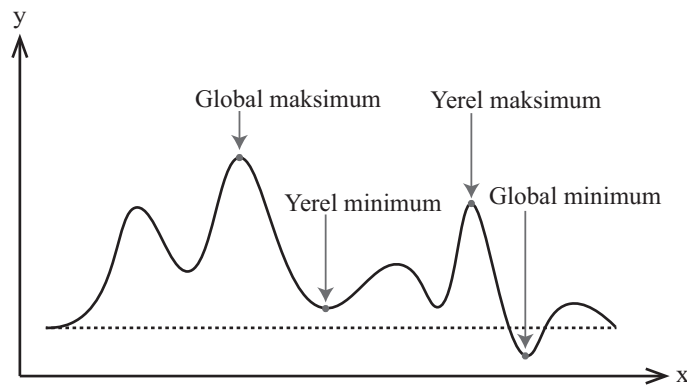
afet sonrası arama kurtarma, haritalama, meteorolojik olay gözlemi gibi birçok probleme çözüm getirmiştir [6–11]. Her ne kadar İHA sistemlerinin kullanımı ilk örneklerine kıyasla oldukça kolaylaşmış olsada, operatör için ciddi eğitim süreci gerekmektedir. Bu durumun ana nedeni, İHA sistemlerinin havada kalış süresini artırarak, görev verimliliğini yükseltip birim zamanda daha fazla iş yapılmasını sağlamaktır. Buna rağmen insan duyularının yetersizliği veya insan hatası kaynaklı sistemler verimsiz kullanılabilir. Bahsedilen hava araçlarını çeşitli sensörlerle donatarak, otonom şekilde görev icra edebilecek kabiliyete getirilmesi sonrası bu sorun büyük ölçüde ortadan kalkmıştır. İHA, görevini en efektif şekilde başarıyla tamamlayabilmek için sahip olduğu sensörlerden gelen anlık verilere en uygun hız, konum, yükseklik ve hareketini ayarlayarak enerji tüketimini optimum değer aralığında tutmaya çalışmaktadır [12]. Kompleks sensör takımları ve gelecek veriyi işlemekle sorumlu bilgisayar sistemleri olmaksızın İHA sisteminin otonom uçuşu, uçuş öncesi güzergahın hesaplanması ile mümkün olabilir. Güzergah, bir hava aracının görev süresince takip edeceği veya etmesi gereken yolun, başlangıç ve bitiş noktalarının yanı sıra uğraması gereken noktalara bağlı tarif edildiği bir kavramdır [13]. Güzergahın, görev kısıtları ve gerekliliklerine uygun, başlangıç ve bitiş noktası arasında en kısa mesafeye sahip olacak şekilde belirlenmesi bir İHA sisteminin görev başarısını etkileyecek önemli unsurlardan biridir [13]. Ancak uygun güzergah ve güzergaha bağlı yolun belirlenmesi, düşman radar ve hava savunma sistemleri, yakıt tüketimi, batarya kullanımı, toplam uçuş mesafesi ve aracın manevra sınırlamalarını dikkate alarak silahlı insansız hava aracı (SİHA) veya İHA güzergah planlama problemi olarakta adlandırılan bir optimizasyon probleminin çözülmesini gerektirir.

Optimizasyon, bir amaç fonksiyonunun (objective function) en küçük (minimization) veya bir kar fonksiyonunun en büyük (maximization) değerine ulaşılmasını sağlayan, parametrelerin belirli sınırlamaları (constraints) sağlayacak şekilde en uygun değerlerinin bulunması işlemi şeklinde tanımlanabilir [14]. Bahsedilen parametre küme veya parametrelerin bulunmasını gerektiren problem ise optimizasyon problemi olarak isimlendirilir [14]. D ilgili optimizasyon probleminin parametre sayısını, yine aynı problemde f ise amaç fonksiyonu olmak üzere problemin herhangi bir çözümü $x = [x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_D]$ ile gösterilebilir. x çözümünün herhangi bir i 'nci elemanı x_i

şeklinde belirtilebilir. Ayrıca, söz konusu çözümün amaç fonksiyon değeri $f(x)$ şeklinde hesaplanmaktadır. Aynı optimizasyon probleminde, n tane eşitlik sınırlaması (equality constraints) varsa bu sınırlamalar $1 \leq i \leq n$ olmak üzere $h_i(x) = 0$ ile gösterilebilir. Aynı optimizasyon probleminde m tane eşitsizlik sınırlaması (unequality constraints) varsa bu sınırlamalar da $1 \leq j \leq m$ olmak şartıyla $g_j(x) \leq 0$ ile ifade edilebilir.

Bir optimizasyon probleminde sınırlamaları sağlayan mümkün tüm çözümlerden oluşan küme problemin uygun çözüm uzayı (feasible solution space, S) olarak isimlendirilir [14]. x^* çözümü, uygun çözüm uzayında tüm x çözümleri için $x^* \in S, \forall x \in S, f(x^*) \leq f(x)$ eşitsizliğini sağlıyorsa x^* çözümüne problemin (minimizasyon problemi) optimum çözümü, global optimum çözümü veya global minimum çözümü denir [14]. Ek olarak, x^* çözümü uygun çözüm uzayında tüm x çözümleri için $x^* \in S, \forall x \in S, f(x^*) \geq f(x)$ şartını sağlıyorsa x^* çözümüne problemin (maksimizasyon problemi) optimum çözümü, global optimum çözümü veya global maksimum çözümü denir [14].

x^* çözümünün $N = \{x | x \in S \text{ ve } \|x - x^*\| < \sigma\}$ şeklinde ifade edilen komşuluğundaki (neighborhood, N) tüm x çözümleri için $f(x^*) \leq f(x)$ eşitsizliği sağlanıyorsa bu çözüm problemin yerel minimumu (local minimum) olarak ifade edilir [14]. Eğer bir x^* çözümü N ile gösterilen bir komşuluğundaki tüm x çözümleri için $f(x^*) \geq f(x)$ eşitsizliğini sağladığı belirlenmişse x^* çözümüne problemin yerel maksimumu (global maksimum) denir [14]. Global ve yerel optimum değerleri arasındaki fark Şekil G.1 ile gösterilmiştir.



Şekil G.1. Çözüm uzayında yer alan yerel ve global optimum değerler

Problem, türüne göre birden fazla sayıda en büyük veya en küçük değeri belirlenmeye çalışılan amaç fonksiyonuna sahip olabilir ve bu nitelikteki problemler literatürde çok amaçlı (multi objective) optimizasyon problemi olarak yer almaktadır [14].

Optimizasyon problemleri tasarım değişkenlerinin veya parametrelerinin sınırlamalı ve herhangi bir sınırlama olmaksızın en iyilenmesine göre sırasıyla sınırlamalı (constrained) optimizasyon problemleri ve sınırlamasız (unconstrained) optimizasyon problemleri olarak sınıflandırılmaktadır. Sınırlamalar ve amaç fonksiyonu ile ilgili fonksiyonların tamamının doğrusal olduğu problemler lineer optimizasyon problemleri, en az bir fonksiyonun doğrusal olmadığı problemler nonlinear optimizasyon problemi olarak isimlendirilir. Bunun yanı sıra tasarım parametrelerinin alabileceği değerler sonsuz uzayda tanımlanmış sürekli değerler ise sürekli (continuous) optimizasyon problemi, ayrık değişkenlerin sıralanması, seçilmesi veya kümelenmesini gerektiren problemler ise ayrık (combinatorial) optimizasyon problemleri olarak adlandırılmaktadır.

Klasik optimizasyon teknikleri, türev bilgilerinin kullanılması prensibine dayalı olarak çalışan yöntemlerdir [15]. En Dik İniş (Steepest Descent), Eşlenik Gradyent (Conjugate Gradient) ve Değiştirilmiş Newton (Modified Newton) yöntemleri türev tabanlı optimizasyon tekniklerinden bazılarıdır. Özellikle amaç fonksiyonunun sürekli ve türevlenebilir olduğu problemlerin çözümünde faydalanan bu yöntemler, her iterasyonda araştırmanın yönünü ve büyüklüğünü belirlemek için amaç fonksiyonunun gradyanına veya türevine başvurarak yerel veya global minimum noktasına yakınsamaya çalışır [15]. Klasik yöntemler çözüm uzayında etkin bir şekilde araştırma yönünü belirleyerek optimum çözüme hızlı yakınsama sağlasa da amaç fonksiyonunun türevlenebilir olmadığı veya hesaplanmasının karmaşık olduğu problemlerde yetersiz kalmakta yada kabul edilebilir süreler içerisinde çözüm sunamamaktadır.

Geçtiğimiz yıllarda mevcut optimizasyon tekniklerinin bahsedilen dezavantajlarını giderebilmek adına yapay zeka teknikleri arasında da yer alan metasezgisel algoritmaların sıklıkla kullanıldığı görülmüştür. Aralarında insanın da bulunduğu canlıların, problem çözme, çıkarım yapma, tahminde bulunma, sebep sonuç ilişkisi kurma, öğrenme gibi bilişsel (cognitive) faaliyetlerinin bilgisayar, matematik ve istatistik bilimlerinden faydalanılarak modellendiği disiplin Yapay Zeka (Artificial Intelligence) olarak tanımlanır. Yapay zeka teknikleri bulanık mantık (fuzzy logic), makine öğrenmesi (machine learning), yapay sinir ağları (neural networks) ve metasezgisel yöntemlerin de yer aldığı zeki optimizasyon veya esnek hesaplama (soft computing) olmak üzere dört başlığa ayrılabilir [16].

Gerçek hayat ya da karmaşık mühendislik problemleri genellikle çok sayıda karar değişkeni yada parametresinin en uygun değerlerinin bulunmasını gerektirir. İlgilenilen problemin karmaşıklığı mümkün olan tüm çözüm veya çözüm kombinasyonlarının araştırılmasını imkansız hale getirmektedir. Metasezgiseller barındırdığı zekilik sayesinde, araştırma uzayında çözümlerin tamamını değerlendirme gereksinimi olmadan, bir çeşit deneme-yanılma yoluyla kabul edilebilir süreler içerisinde optimum veya optimuma yakın sonuçlara ulaşılmasını sağlayan etkili yöntemlerdir [17]. Metasezgisel algoritmaların büyük bölümü detayları iyi bilinen biyolojik-fiziksel süreçler ve süreçler ile ilişkilendirilen adımların referans alınması sonucu tanıtılmıştır. İmmün plazma tedavisinin uygulama adımları dikkatli incelendiğinde bir metasezgisel algoritmanın araştırma ve mevcut çözümlerden faydalanma adımları ile benzerlik gösterdiği anlaşılır. Koronavirüs pandemisi ile birlikte üzerine dikkatleri tekrar toplayan immün veya konvelesan plazma tedavi yaklaşımının temel özelliklerinden faydalanarak yeni bir metasezgisel yöntem olan İmmün Plazma algoritması (Immune Plasma algorithm, IP algoritması veya IPA) 2020 yılında Aslan tarafından literatüre kazandırılmıştır [18]. Bu yeni teknik ilk defa bir tedavi yöntemine ait işlem adımlarını doğrudan modelleyen metasezgisel algoritma olmasının yanı sıra sahip olduğu yerel ve global araştırma yeteneği, farklı türdeki problemlere uyarlanabilir esnek yapısı ve kontrol parametrelerinin adaptif olması sayesinde metasezgisel algoritmalar arasında önemli bir yere ve potansiyele sahip olmuştur. Algoritma son zamanlarda kanal ataması [19], zaman serisi tahmini [20], kablosuz sensör dağıtımı [21], sinyal gürültüsü minimizasyonu [22] ve sinir ağı eğitimi [23] gibi çeşitli problemlerde etkin bir şekilde kullanılsa da literatürde IP algoritmasının avantaj sağlayan özelliklerinden faydalanarak İHA veya SIHA platformları için güzergah planlama problemi üzerine herhangi bir çalışma yapılmadığı görülmüştür. Gerçekleştirilen bu çalışmada İHA ve SIHA sistemleri için güzergah planlama probleminin çözümünde IP algoritmasının standart versiyonundan faydalanmanın yanı sıra algoritmanın temel işlem adımları ve modellediği zekiliğe bağlı kalınarak yeni tekniklerle güncellenmesi ve paralelleştirmeye uygun yapısı sayesinde dağıtık veya paylaşılan hafızalı sistemler için yenilikçi paralel versiyonunun geliştirilmesi hedeflenmektedir.

Tezin Organizasyonu

Bir İHA sistemi için sabit irtifada güzergah planlama probleminin literatüre yeni kazandırılan IP algoritması ile çözülmesine dair gerçekleştirilen tez çalışmasının 1.Bölümünde insansız hava araçlarının türleri, sınıflandırılması, uçuş dinamiği ve bir İHA için manevra performans hesabına dair bilgiler paylaşılmıştır. Bölümün devamında tezin ana teması konumunda bulunan sabit irtifada güzergah planlama problemi tanımlanarak ilgili savaş alanlarının nasıl modellendiği ve amaç fonksiyon değerinin nasıl hesaplandığı açıklanmıştır. Son olarak literatürde daha önce gerçekleştirilen benzer çalışmalara dair özete yer verilmiştir.

2.Bölümde canlılardaki bağışıklık sisteminden, insandaki bağışıklık sistem, organ, hücre ve bunların görevleri hakkında genel bilgi paylaşımı yapılmıştır. İmmün plazma tedavi yönteminin biyolojik temellerinden bahsedildikten sonra IP algoritmasının çalışma prensibine yer verilmiştir. Bu kısımda enfeksiyonun yayılması, donör ve alıcı bireylerin seçilmesi, plazma tedavisinin uygulanması ve donör bireylerin bağışıklık hafızalarının güncellenmesine dair işlem adımları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. IP algoritmasının güzergah planlama problemine uyarlanması ve çözümüne yer verilmiş, değişken kontrol parametrelerinin algoritmanın çalışma performansı üzerine etkisinin yanı sıra iyi bilinen metasezgisel algoritmalarla karşılaştırmalı test sonuçları paylaşılmıştır.

3.Bölümde çoklu veya çok popülasyonlu paralelleştirme tekniğinden bahsedilmiştir. Çoklu popülasyon yönteminin gerekliliği, avantaj ve dezavantajlarına yer verilmiştir. Ayrıca bu yöntemin IPA çalışma prensibi dikkate alınarak göç periyodunun ve göçmen bireyin belirlenmesi ile ilgili yapılan özelleştirmeler ve geliştirilen göç limiti ve popülasyon sayısı parametreleri bu bölümde anlatılmıştır. Geliştirilen yeni teknik sabit irtifada güzergah planlama problemi çözümü için uyarlanmış ve elde edilen sonuçlar algoritmanın standart versiyonu ile alanında iyi bilinen diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılarak bölüm tamamlanmıştır.

Son bölümde IP algoritmasının ve yeni varyantı olan MULIPA tekniğinin güzergah planlama probleminin çözümü için gösterdikleri performansın değerlendirmesi yapılmıştır. Ayrıca çalışmanın literatüre katkısı ve yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

1. BÖLÜM

İNSANSIZ HAVA ARACI ve GÜZERGAH PLANLAMA

Uçuş öncesi uygun güzergahın belirlenmesi hava aracının özelliklerinin anlaşılmasını gerektirmektedir. Bu bölümde İHA sistemlerinin aerodinamik tasarım, iniş türü, irtifa ve dayanıklılık, menzil ve dayanıklılık, ağırlık ve boyut parametrelerine göre sınıflandırılmasına yer verilerek hava araçlarının çeşitliliği gösterilmiş ve özellikleri tanıtılmıştır. Daha sonra İHA sistemlerinin uçuş dinamiklerinden bahsedilerek uçuş boyunca etkiyen kuvvetler, altı serbestlik derecesi ve gerçekleştirdiği hareketler tanımlanmış ve son olarak sabit irtifada dönüş gerçekleştirebilmesi manevra performansı başlığı altında detaylarıyla anlatılmıştır. Senaryo aktif savaş bölgesinde görev yapan bir İHA sistemini ele aldığı için uçuş alanı ve alanın içerdiği düşman unsurları bu bölümde modellenmiştir. Düşman unsurlarının her biri iki boyutlu düzlemde daire şeklinde temsil edilmiştir. Daire çapı düşmanın tespit menzilini ifade ederken ek bir parametre ile bu sistemlerin imha kabiliyeti veya vuruş gücü gösterilmiştir. Amaç fonksiyonu güzergah boyunca yol maliyeti ve düşman unsur maliyetlerinin toplamıyla hesaplanmıştır. Bazı geometrik dönüşümler gerçekleştirilerek bu hesaplamaların daha hızlı ve kolay olması sağlanmıştır. Son olarak bu konu ile ilgili daha önceki çalışmalara yer verilerek 1.Bölüm tamamlanmıştır.

1.1. İnsansız Hava Aracının Sınıflandırılması

İHA sınıflandırması, İHA yeteneklerinin kavranmasına ve yönetilmesine, mevzuata uygunluğa ve odaklanmış araştırma ve geliştirme çabalarına yönelik genel bir bakış sağlamanın yanı sıra farklı İHA platformları arasında birlikte çalışabilirliği kolaylaştıran standartların ve protokollerin de oluşturulmasını mümkün kılmaktadır [24–26]. Ayrıca, İHA sınıflandırması göz önünde bulundurularak, güzergah planlama teknikleri çeşitli

görev senaryolarını, operasyonel ortamları ve İHA yeteneklerini ele alacak şekilde uyarlanabilmektedir [25]. Otonom hava araçları en genel haliyle askeri ve sivil İHA sistemleri olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir. Askeri alanda kullanılan hava aracı sistemlerinin düşman bölgesinde gözlem, keşif ve imha amacıyla kullanılacağı dikkate alındığında yüksek güvenilirlik, hassasiyet, gelişmiş seyrüsefer sistemleri, birden fazla yedekli alt sistem, yüksek yapısal dayanım ve ekstrem koşullarda görev icra edebilme özelliklerini barındırması gereklidir. Sivil amaçla kullanılan İHA sistemleri incelendiğindeyse üretim ve bakım maliyetlerinin düşük olması, kolay ve güvenilir kullanım ile farklı kitlelere hitap etmesi, geniş bir satış pazarına sahip olması beklenmektedir. İHA sistemlerinin üretim ve geliştirme aşamasında dikkate alınması gereken özellikleri arasında görev tanımının yanı sıra, operasyon irtifası, menzil, ağırlık, seyir süresi, kanat tipi ve motor tipi gibi farklı parametreler yer almakta ve karakteristik özellikleri etkilemesi nedeniyle bu sistemler teknik kriterlere göre de sınıflandırılmaktadır [27,28].

Hava araçları kalkış yapabilmek ve havada kalabilmek için farklı konfigürasyonlarla tasarlanmaktadır. Hava dinamiklerinden faydalanma şekline göre, taşıma üretebilmek için özel kanat profiline (airfoil) sahip bir çift kanattan faydalanan sabit kanatlı, kuş veya sinek gibi kanat çırparak uçabilen canlıları taklit ederek tasarlanan ayrıca bu canlıların sahip oldukları özel manevra ve havada asılı kalabilme yeteneklerine sahip çırpın kanatlı hava araçları ve dikey yönde itki üretecek şekilde rotor-pervane kombinasyonu ile dikey iniş-kalkış kabiliyetini barındıran çok rotorlu hava araçları olmak üzere üç farklı kategoride tanımlanabilir [29]. Ayrıca çok rotorlu hava araçları kendi içerisinde rotorların sayısına göre tek rotorlu (monocopter), üç rotorlu (tricopter), dört rotorlu (quadcopter), altı rotorlu (hexacopter) ve sekiz rotorlu (octacopter) olarak tekrar sınıflara ayrılabilir [30]. İniş ve kalkış türüne göre, herhangi bir piste gerek duymadan dikey iniş-kalkış yapabilen (Vertical Takeoff and Landing, VTOL) araçlar ve yatay iniş ve kalkış yapabilen (Horizontal Takeoff and Landing, HTOL) olmak üzere iki farklı hava aracı grubu bulunmaktadır [31]. HTOL araçlar kalkış yapabilmek ve havada asılı kalabilmek için ileri yönde minimum bir seyir hızına sahip olmanın yanı sıra uçuşu başlatmak ve bitirmek için piste ihtiyaç duymaktadır. Fakat genellikle HTOL araçlar VTOL sınıfına ait araçlara göre daha ağır faydalı yükleri taşıyabilmelerine ek olarak daha uzun havada kalış süresi

ve menzile sahip olmalarıyla da ön plana çıkmaktadır [29].

Hava araçlarını kategorize etmek için kullanılabilecek ölçütlerden bir diğeri bu araçların boyutlarıdır. İnsan erişiminin zor olduğu dar bölgelerde uçuşu için geliştirilen, tek bir kişi tarafından kolaylıkla taşınabilen ve bir kuş veya böcek boyutunda olabilen ultra küçük araçlardan, gözetleme veya ağır saldırı için silah sistemleri taşıyarak uzun mesafelerde görev icra edebilen daha büyük araçlara kadar farklı boyutlarda hava araçları bulunmaktadır [32, 33]. Boyutlarına göre İHA sistemleri ultra küçük (ultra small), çok küçük (small), küçük (small), orta (medium) ve büyük (large) olmak üzere beş farklı şekilde sınıflandırılmış ve bu sınıfa ait özellikler Tablo 1.1’de gösterilmiştir [32–34].

Tablo 1.1. Boyuta göre İHA sınıflandırması

Sınıf Adı	İHA Uzunluğu
Ultra Küçük	<7.5 cm
Çok Küçük	7.5-15 cm
Küçük	15-200 cm
Orta	2-10 m
Büyük	>10 m

İHA uçuş performansının analizinde bir aracın yer kontrol merkezinden uçabileceği maksimum mesafeyi belirleyen menzil değeri, uçan bir taşıtın sahip olduğu önemli özelliklerden biri olarak kabul edilmektedir [35]. Bu özellik başta faydalı yükün ağırlığı olmak üzere çeşitli İHA parametrelerine bağlıdır. Performans analizinde kullanılan bir diğer önemli metrik ise, bir hava aracını yeniden şarj etmeden/yakıt ikmali yapmadan uçabileceği maksimum süreyi ifade için kullanılan maksimum uçuş süresi veya havada kalış süresidir [36]. İHA sisteminin uçuş süresi arttıkça ulaşabileceği menzil değeri de artmaktadır. Bu durum, menzil ve havada kalış süresi özelliklerinin birbirleriyle ilişkili olduğunu göstermektedir. Görev gereksinimleri belirlenirken, menzil ve havada kalma süresi göz önünde bulundurularak yeni bir sınıflandırma daha yapılmıştır. Bu sınıflandırma çalışmasında, farklı hava araçları ve özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir [35, 36]. Çok yakın menzilli İHA platformları, özellikle küçük alanlarda serbest uçabilme yetenekleriyle dikkat çekmektedir. Ancak, yüksek havada kalma süresi ve hızlı veri aktarımının önemli olduğu durumlarda kablo ile bir yer istasyonuna bağlı çalışabilen tethered İHA tercih edilmektedir. Keşif ve gözetleme amacıyla kullanılan İHA sistemleri ise farklı uçuş süreleri ve menzillere sahiptir. Yakın ve kısa menzilli İHA platformları genellikle başka bir hava aracından veya yerden fırlatılarak havalandırılırken,

orta menzilli İHA sistemleri geniş ölçekte gözlem/keşif görevlerini başarıyla yerine getirebilmektedir. Bunun yanı sıra, herhangi bir yer istasyonuna fiziksel bir bağlantı gerektirmeyen havada kalış süresi fazla olan İHA platformları uzun süreler boyunca uçuşunu sürdürebilmektedir. Menzil ve havada kalış süresi özellikleri dikkate alınarak yapılan detaylı sınıflandırma çalışmasının özeti ve sınıfların özellikleri Tablo 1.2’de ayrıntılı bir şekilde sunulmuştur [35,36].

Tablo 1.2. Menzil ve dayanıklılığa bağlı İHA sınıflandırması

Sınıf	Maksimum Menzil	Havada Kalış Süresi
Çok Yakın Menzilli	5 km	6 saat
Tethered İHA	10 km	24 saat
Yakın Menzilli	50 km	6 saat
Kısa Menzilli	150 km	12 saat
Orta Menzilli	650 km	12-36 saat
Uzun Havada Kalış Süreli	300 km	36 saat

Bir hava aracının tasarım aşamasında seçilecek motor ve pervane konfigürasyonu, kanat profili, hava alığı tasarımı ve maksimum uçuş hızı gibi bir çok parametre görev yapacağı maksimum irtifaya bağlı bir şekilde belirlenmektedir. Maksimum uçuş irtifası 1000 metre (m) ve altında olan platformlar için düşük irtifa (low altitude), 1000 m - 10000 m aralığı için orta irtifa (medium altitude), 10000 m ve daha yüksek irtifalarda görev icra edebilen hava araçları için yüksek irtifa (high altitude) şeklinde ayırım yapılmıştır [37].

Birbiriyle yakın ilişkili diğer iki parametre ise irtifa (altitude) ve havada kalış süresidir. Maksimum irtifası 15000 m ve havada kalış süresi 24 saatin üzerinde olan sistemler yüksek irtifa uzun havada kalış süreli (High Altitude Long Endurance, HALE) ve 5000 m - 15000 m aralığında görevini 24 saat boyunca gerçekleştirebilen orta irtifa uzun havada kalış süreli (Medium Altitude Long Endurance, MALE) olmak üzere İHA sistemleri iki farklı şekilde kategorize edilmektedir [28].

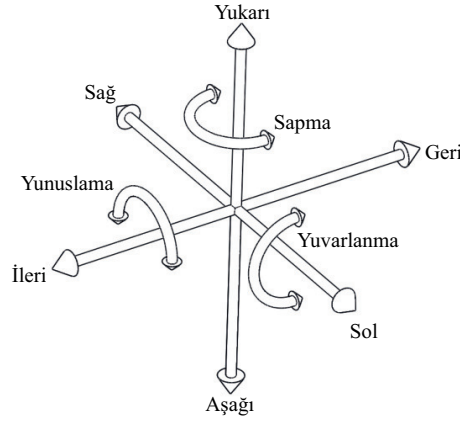
Olumsuz bir durumda görev güvenliğini ve çarpma sırasında üretilen kinetik enerji miktarını doğrudan etkileyen parametrelerden biri insansız hava aracının ağırlığıdır [37]. Bu sistemler her ne kadar içerisinde insan barındırmasa da yerleşim yeri, enerji santralleri veya askeri arazi gibi kritik bölgelerde görev yapmaktadır. Bu bölgelerde aracın düşme ihtimali dikkate alınarak meydana gelebilecek hasarı minimize edebilecek nispeten düşük ağırlıklı araçlar tercih edilebilir. Bu nedenle, bazı araştırmacılar ve kuruluşlar insansız

1.2. Hava Araçlarının Aerodinamiği

İHA sistemleri daha önce bahsedildiği üzere hava dinamiklerinden faydalanma şekline göre çırpın kanat, döner kanat ve sabit kanatlı olarak üç farklı şekilde kategorize edilmekteydi. Çırpın kanatlı sistemler kontrolünün zor olması ve düşük havada kalış süresi gibi çeşitli dezavantajlara rağmen kuş veya sinek gibi doğal sistemlere benzer şekilde uçabilmesi nedeniyle genellikle spesifik görevler için kısıtlı kullanıma sahiptir [40]. Buna karşın insansız hava aracı uygulamalarında kullanım kolaylığı, taşınabilir faydalı yük miktarının fazla oluşu, stabilite ve manevra kabiliyetinin yüksek olması gibi nedenler döner ve sabit kanatlı platformların kullanımının artmasını sağlamıştır [41]. Yapılan bu tez çalışmasında güzergah planlama problemi yaygın kullanıma sahip, sabit ve döner kanatlı İHA sistemleri için ele alınmış ve bu platformların temel uçuş prensibi ve uçuş mekaniği hakkında bazı bilgiler paylaşılmıştır.

1.2.1. Referans Sistemler ve Altı Serbestlik Derecesi

Sabit kanatlı hava araçları manevra yapabilmek için kontrol yüzeylerinden faydalanırken, döner kanatlı sistemler rotorların dönüş hızlarını değiştirerek gerekli manevraları gerçekleştirmektedir. Farklı şekillerde üretilen kuvvetlerin ve bu kuvvetlerin neden olduğu momentlerin İHA üzerindeki etkisinin analiz edilebilmesi için dünya üzerinde sabit olduğu kabul edilen, herhangi bir ivme veya hıza sahip olmadığı varsayılan eylemsiz referans sistemine (inertial fixed frame) ve hava aracının ağırlık merkezinde yer aldığı kabul edilen, hız ve ivmeye sahip olabilen sabit gövde referans sistemine (body fixed frame) gereksinim vardır. [42, 43]. Bu iki eksen takımı kullanılarak aracın sahip olduğu iki farklı temel hareket biçimi olan açısal (angular) ve ötelenmeli (translational) hareketler bağıl olarak incelenebilir. Sabit gövde referans sisteminin boylamsal, yatay ve dikey eksenlerinde gerçekleşen ötelenmeli (linear) hareketler hava aracının üç serbestlik derecesini oluştururken, açısal hareketler bu eksenler etrafında meydana gelen yuvarlanma, yunuslama ve sapma (yalpalama) olmak üzere diğer üç serbestlik derecesini oluşturarak hareketlerin altı serbestlik derecesinde (six degree of freedom, 6-DoF) incelenmesini sağlamaktadır [44, 45]. Şekil 1.2’de hava aracının

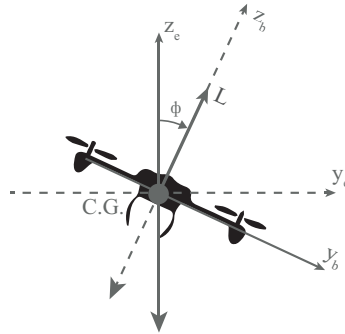


Şekil 1.2. Altı serbestlik derecesinin şematik gösterimi

serbest uzaydaki hareketini tanımlamak için kullanılan ötelenmeli ve açısal yönelimler gösterilmiştir.

1.2.2. Döner Kanatlı İHA Temel Uçuş Prensibi

Döner kanatlı insansız hava araçları taşıma kuvveti oluşturmak ve manevra yapmak için Şekil 1.3'te görüleceği üzere z_b eksenini doğrultusunda yerleştirilen ve bu eksen doğrultusunda pozitif yönlü (yukarı) itki üretebilen pervaneye sahip platformlardır. Döner kanatlı sistemlerin üzerinde etkili olan kuvvetler ve momentler, bu araçların dinamiklerini anlamak ve uçuşunu kontrol etmek için önemlidir. Söz konusu temel kuvvetler arasında yer çekimi yönünde etkiyen ağırlık, pervaneler tarafından üretilen itki, aracın hareket yönüne ters şekilde etkiyen sürüklenme ve ağırlık kuvvetine karşı oluşan ve aracın havada kalmasını sağlayan taşıma kuvveti yer almaktadır [46].



Şekil 1.3. Döner kanatlı İHA platformuna ait sabit gövde referans sistemi ve eylemsiz referans sistemi

Döner kanatlı hava araçlarının dinamiğinde kuvvetlerin yanı sıra momentler de önemli bir

yere sahiptir. Pervanelerin tork ve hızlarındaki değişim sonucunda oluşan momentler, söz konusu sistemlerin boylamsal (longitudinal) ekseninde oluşan yuvarlanma (roll), yanal (lateral) eksen etrafında oluşan yunuslama (pitching) ve son olarak dikey eksen etrafında sapma (yawing) momentinin oluşmasını sağlamaktadır [47].

$$Itki = F = C_T \rho n^2 D_{pervane}^2 \quad (1.1)$$

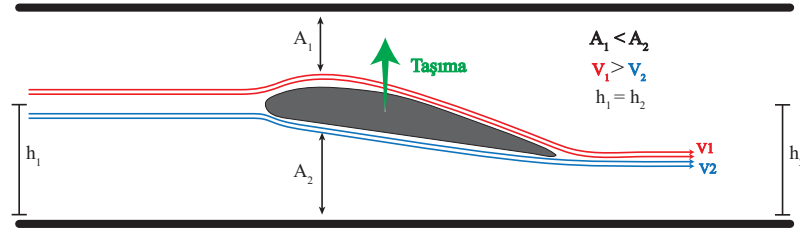
Havada asılı kalabilme, hassas hareket ve güzergah takibi yapabilme potansiyeline sahip bu platformların hareketinin temelinde yer alan itki kuvveti, pervaneye özgü itki katsayısı (C_T), hava yoğunluğu (ρ), rotor dönüş hızı (n) ve pervane çapı ($D_{pervane}$) değişkenlerini kullanarak oluşturulan Eşitlik 1.1 ile hesaplanabilir [48].

1.2.3. Sabit Kanatlı İHA Temel Uçuş Prensibi ve Hareketler

Bernoulli prensibi, bir akışkanın hızı, akışkan tarafından uygulanan basınç ve akışkanın potansiyel enerjisi arasındaki ilişkiyi mekanik enerjinin korunumundan faydalanarak tanımlamaktadır [49, 50]. Bu prensibe göre, akışkanın hızı ile yüzeye uygulanan statik basınç arasında ters bir ilişki bulunur. Akışkanın hızı arttıkça, akışkan tarafından uygulanan statik basınç azalmaktayken bu durumun tam tersi de mümkündür. Sürtünmenin olmadığı varsayımı altında, sıkıştırılamayan, sürekli bir akışkan için enerjinin korunumunun bir ifadesi olan Eşitlik 1.2’de ilk terim akışkanın kinetik enerjisini, ikinci terim potansiyel enerjisini ve üçüncü terim basınç enerjisini veya basıncı (P) nitelemektedir [51]. Eşitlikte yer alan V akışkan hızını, g yerçekimi ivmesini ve h akışkanın yerden yüksekliğini belirtmektedir.

$$\frac{1}{2} \rho V^2 + \rho gh + P = Sabit \quad (1.2)$$

Uçak kanadı Şekil 1.4’te görülen kavisli forma sahip kanat profili sayesinde oluşan taşıma kuvvetinin analizinde önemli bir yere sahip olan Bernoulli prensibi, kanatlarda taşıma kuvvetinin nasıl elde edilebildiğini ve hava aracının stabil bir uçuşu nasıl sürdürebildiğini açıklamaya yardımcı olur. Bernoulli prensibine göre, hava gibi bir akışkan kanat profili üzerinden akarken, kanadın üst yüzeyindeki artan eğriliğin Şekil 1.4’te gösterilen A_1 kesit

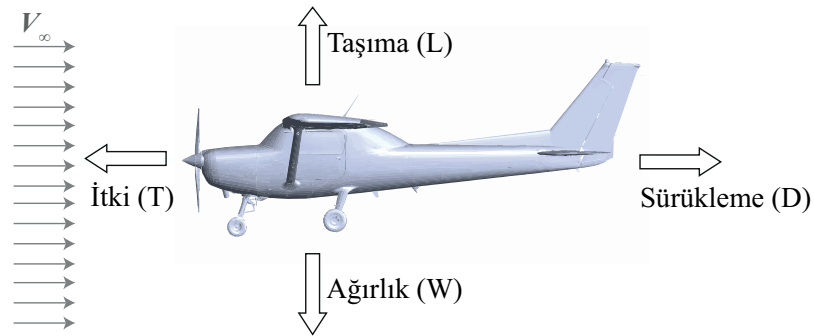


Şekil 1.4. Bernoulli prensibi

alanını daraltması nedeniyle hızlanır. Bununla birlikte, alt yüzeydeki hava akışı nispeten daha yavaş kalır. Bir akış çizgisi (streamline) boyunca mekanik enerjinin korunduğunu ifade eden Eşitlik 1.2 dikkate alınırsa kanadın üstündeki havanın basıncında bir düşüş görülürken, altındaki havanın daha yüksek bir basınca sahip olduğu söylenebilir [52]. Bu basınç farkı, taşıma kuvveti olarak da bilinen ve Şekil 1.4'te görüleceği üzere yukarı yönlü net bir kuvveti oluşturmaktadır. Hava aracı bu kuvvetten faydalanarak uçuşunu sürdürebilmektedir.

1.2.4. Sabit Kanatlı İHA Sistemine Uçuş Boyunca Etkiyen Temel Kuvvetler

İHA sistemleri söz konusu olduğunda, serbest akım çizgisi doğrultusunda ve harekete zıt yönde etkiyen sürüklenme (drag, D), motorlar tarafından aracın hareketini sağlayan itki (thrust, T), özel kanat profili sayesinde serbest akım çizgisine dik olan taşıma (lift, L) ve dünya merkezine doğru etkiyen ağırlık (weight, W) kuvvetleri uçuş dinamiklerini kavramanın ayrılmaz birer parçasıdır [45].



Şekil 1.5. İHA üzerine etkiyen dört temel kuvvet ve etkiye yönleri

Uçağın kanatları veya diğer taşıma yüzeyleri tarafından üretilen taşıma kuvveti, yerçekimine karşı koyan ve İHA sisteminin havada kalmasını sağlayan kuvvettir. Kanat profil şekli, boyutu ve hücum açısı gibi faktörler bu kuvvetin büyüklüğü üzerinde etkili

olan değişkenlerdir. Taşıma kuvveti, hava yoğunluğu (ρ), kanat alanı (S_{kanat}), taşıma katsayısı (C_L) ve kanatlar üzerindeki hava akış hızı, serbest akış hızı veya serbest akım (V_∞) parametrelerini dikkate alarak Eşitlik 1.3'te verilen taşıma denklemi ile hesaplanabilir [53].

$$L = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S_{kanat} C_L \quad (1.3)$$

Diğer yandan sürüklenme, havada seyreden eden aracın hareketine ters yönde etkiyerek yavaşlatma eğiliminde olan direnç olarak tanımlanmaktadır [54]. V_∞ doğrultusuna paralel etkiyen bu kuvvet, hava aracının şekli, boyutu ve yüzey pürüzlülüğü dahil olmak üzere çeşitli faktöre bağlı değişmektedir [54]. Sürüklemenin büyüklüğü hava yoğunluğu, referans alanı, sürüklenme katsayısı ve hava akış hızı gibi parametrelerden faydalanarak Eşitlik 1.4'te gösterilen sürüklenme denklemi ile belirlenebilir. Sürüklemenin en aza indirilmesi, İHA sisteminin hızını ve verimliliğini ayarlamak için gereklidir [55].

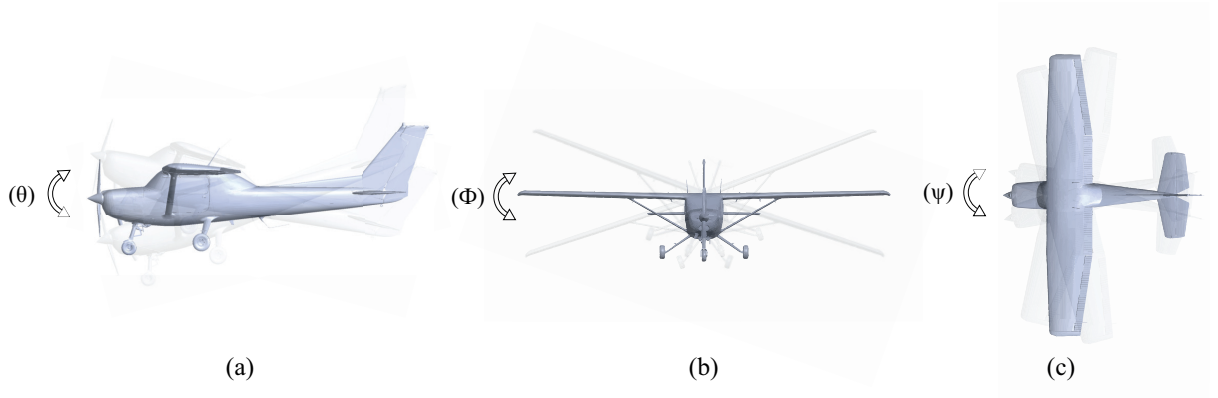
$$D = \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 S_{kanat} C_D \quad (1.4)$$

Taşıma ve sürüklenme kuvvetlerinin detaylı bir şekilde anlaşılması İHA uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Bu kuvvetler kontrol edilerek hava araçlarının manevra kabiliyeti, kararlılığı ve genel uçuş özellikleri geliştirilebilir. Ayrıca, taşıma ve sürüklenme kuvvetleri, itki ve ağırlık gibi diğer kuvvetlerle dengelenerek bu sistemlerin kalkış, iniş ve düz uçuş koşulları dahil olmak üzere birçok uçuş fazı (flight envelopes) düzenlenebilir.

1.2.5. Manevra Performansı

Manevra kabiliyeti, İHA sistemlerinin karmaşık ortamlarda seyretme ve hedeflerine başarıyla ulaşabilmelerini etkileyen kritik bir performans göstergesidir. Sabit kanatlı bir İHA taşımayı sağlayan kanatlara, boylamasına denge ve kararlılığı sağlayan yatay kuyruğa, yanlamasına kararlılığı ve dengeyi sağlayan dikey kuyruğa, taşıma için gereken hıza ulaşılmasını sağlayan ve itki kuvvetini oluşturan bir veya daha fazla sayıda motora, yunuslama hareketini sağlayan ve kontrol yüzeylerinden biri olan elevatöre (elevator), yalpalama veya sapmayı sağlayan dümene (rudder) ve yuvarlanma hareketinin

yapılmasına imkan veren elerona (aileron) sahiptir.



Şekil 1.6. Sabit kanatlı İHA yunuslama (a), yuvarlanma (b) ve sapma (c) hareketleri

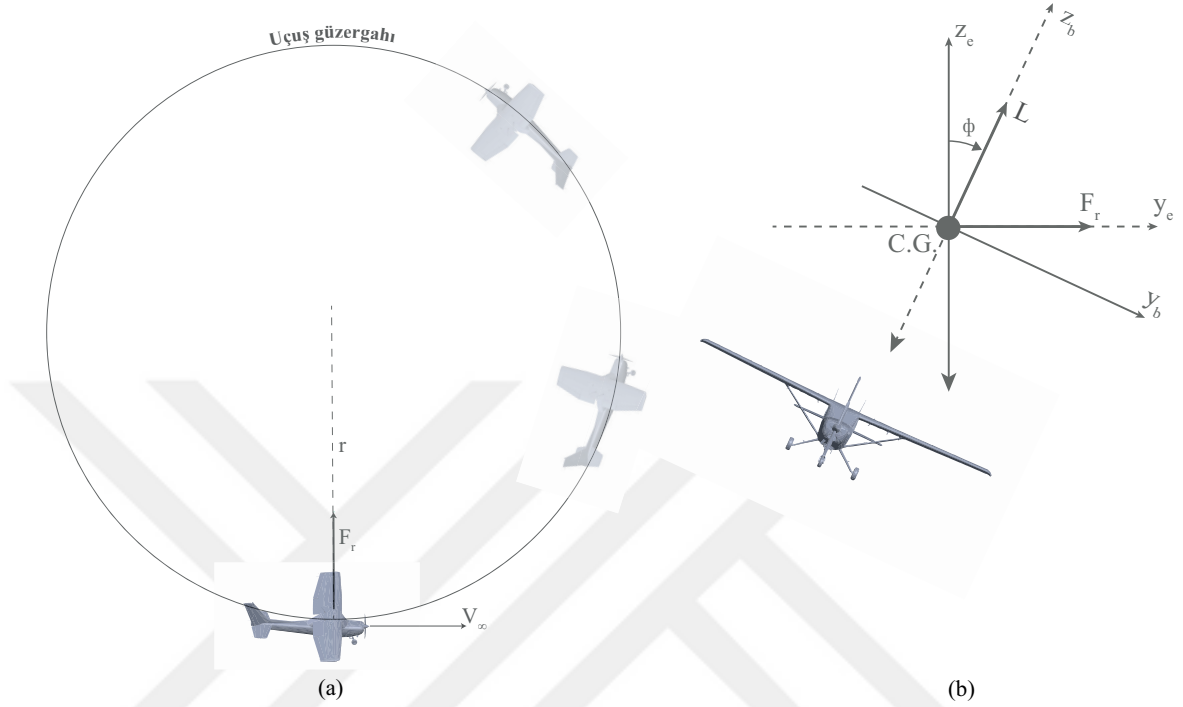
Döner kanatlı veya çok pervaneli (multirotor) araçlar sahip oldukları havada asılı kalabilme yeteneğinin yanı sıra zorlu manevraları ani bir şekilde gerçekleştirebilme özellikleri ile öne çıkmaktadırlar. [56]. Dikey kalkış ve iniş, konumlarını hassas bir şekilde koruyabilme ve hızlı yön değiştirebilme gibi karmaşık hareketleri gerçekleştirebilen bu sistemlerin kendi eksenleri etrafında dönebilme ve havada asılı kalabilme yetenekleri çok yönlü uçuş manevralarını mümkün kılmaktadır [57].

Döner kanatlı araçlar herhangi bir güzergahı sabit kanatlı sistemlere göre daha az hata ile takip edebileceği bu açıklamalardan anlaşılmaktadır. Bu bağlamda sabit kanatlı İHA platformlarının manevra kabiliyetlerinin anlaşılmasına daha fazla ihtiyaç vardır. Ayrıca çalışma kapsamında sabit irtifada güzergah planlama problemi ele alındığı için bu araçların manevra kabiliyetleri içerisinde tırmanma manevrası incelenmeyecek olup sadece yanal manevra ve boylamsal manevraları içeren koordineli yatay uçuş ve kararlı durum uçuşu olmak üzere iki farklı uçuş türü üzerinde durulacaktır.

1.2.5.1. Koordineli Yatay Uçuş

Sabit irtifada gerçekleştirilen dönüşler literatürde koordineli yatay uçuş olarak tanımlanmaktadır. Bu uçuş türünde dönüş boyunca İHA üzerine etkiyen tüm kuvvetlerin dengelendiği kabul edilmektedir. Koordineli uçuş boyunca kuvvetler dengelendiği için Newton tarafından tanımlanan hareket yasalarının ikincisi gereği sistem üzerinde herhangi bir ivme olmayacağından, İHA sabit irtifada ve sabit hızda manevrasını

tamamlayabilecektir. Sabit kanatlı bir İHA sisteminin yatış veya yuvarlanma açısıyla (ϕ) dönmesi Şekil 1.7’de gösterilmiştir.



Şekil 1.7. Koordineli yatay uçuşun üstten görünümü (a) ve önden görünümü (b)

Şekil 1.7’den anlaşılacağı üzere ϕ açısı, eylemsiz referans ekseninin $y_e z_e$ ile sabit gövde referans sisteminin $y_b z_b$ düzlemleri arasında oluşan açığı ifade etmektedir. Taşıma kuvveti sabit gövde referans sisteminin z_b eksenini boyunca pozitif (yukarı) yönlüdür.

Sabit kanatlı hava aracının ϕ açısı kadar düşey z_e eksenini açı yapması Şekil 1.7 (b)’de görüleceği üzere taşıma kuvvet vektöründe aynı ϕ açısına sahip olması anlamına gelmektedir. İrtifa kaybetmeksizin dönüş için bu kuvvet vektörünün z_e düşey eksenindeki bileşeninin büyüklüğü ve ağırlığının yanı sıra yatay y_e eksenindeki kuvvet bileşeni ile merkezkaç kuvveti (F_r) eşit olmalıdır. Bu durum Eşitlik 1.5 ve 1.6 ile ifade edilmiştir.

$$L \cos \phi - W = 0 \quad (1.5)$$

$$L \sin \phi = F_r = m \frac{U^2}{r} \quad (1.6)$$

$$\tan \phi = \frac{1}{g} \frac{U^2}{r} \quad (1.7)$$

İHA ağırlığının, İHA kütlesi (m) ve g olmak üzere mg şeklinde hesaplandığı kabul edilerek Eşitlik 1.5 ve 1.6 birlikte düzenlendiğinde aracın ileri yöndeki hızının (U) ve dönüş yarıçapının (r) yatış açısı ile ilişkisini belirten Eşitlik 1.7 belirlenmiş olur. Buna göre U 'nun artması ve r 'nin azaltılması da ϕ değerinin artmasına neden olmaktadır. Hava aracında bu açının azalması nispeten sert dönüş yaptığının göstergesidir. Böyle bir manevra gerçekleştirilirken üretilen taşıma kuvveti aracın ağırlığından fazladır. Bu durum aracın yapısal sınırlarını zorlayan G-kuvveti olarak da bilinen yükleme faktörünün (n) artmasına neden olmaktadır. Eşitlik 1.8'de görüleceği üzere n , taşıma kuvvetinin ağırlığa oranı olarak tanımlanabilir. Ayrıca daha sonraki bölümde incelenecek kararlı durum uçuşunda hiçbir ekseninde herhangi bir ivme olmadığından bahsedilen n değerinin bire eşit olduğuna dikkat edilmelidir.

$$n = \frac{L}{W} \quad (1.8)$$

Yükleme veya yük faktörü Eşitlik 1.8'de yer alan L/W terimi Eşitlik 1.5 ile güncellenerek sadece yatış açısına bağlı olacak şekilde ifade edilmektedir. Eşitlik 1.9 incelendiğinde yükleme faktörünün sadece yatış açısına bağlı olduğu söylenebilir. Bu sayede sadece ϕ değerine bakılarak hava aracına etkiyecek yapısal yüklerin tahmini mümkün olmaktadır.

$$n = \frac{1}{\cos\phi} = \sec\phi \quad (1.9)$$

$$r = \frac{1}{\tan\phi} \frac{U^2}{g} = \frac{1}{g} \frac{U^2}{\sqrt{n^2 - 1}} \quad (1.10)$$

$$a = \frac{U^2}{r} = g\sqrt{n^2 - 1} \quad (1.11)$$

$$\frac{a}{g} = \sqrt{n^2 - 1} \quad (1.12)$$

Koordineli yatay uçuşta her bir parametre birbiri ile doğrudan ilişkili olduğu Eşitlik 1.10 - 1.12 ile belirtilmiştir. Ayrıca Eşitlik 1.12 incelendiğinde merkezkaç ivmesinin (a) yerçekimi ivmesine olan oranı $n = 1$ için sıfıra eşit olduğuna dolayısıyla bu durumda sistem üzerinde a değişkeninin etkimeyeceğine dikkat edilmelidir.

1.2.5.2. Kararlı Durum Uçuşu

Bir hava aracının tırmanma, alçalma, yalpalama ve yuvarlanma yapmadan gerçekleştirdiği uçuş türü kararlı durum uçuşu olarak adlandırılmaktadır. Teknik olarak bu uçuş hava aracı üzerine etkiyen net kuvvet değerinin ve tüm ivme değerlerinin sıfır olduğu uçuş biçimi olarak tarif edilmektedir [53,58].

$$L = W \quad (1.13)$$

$$T = D \quad (1.14)$$

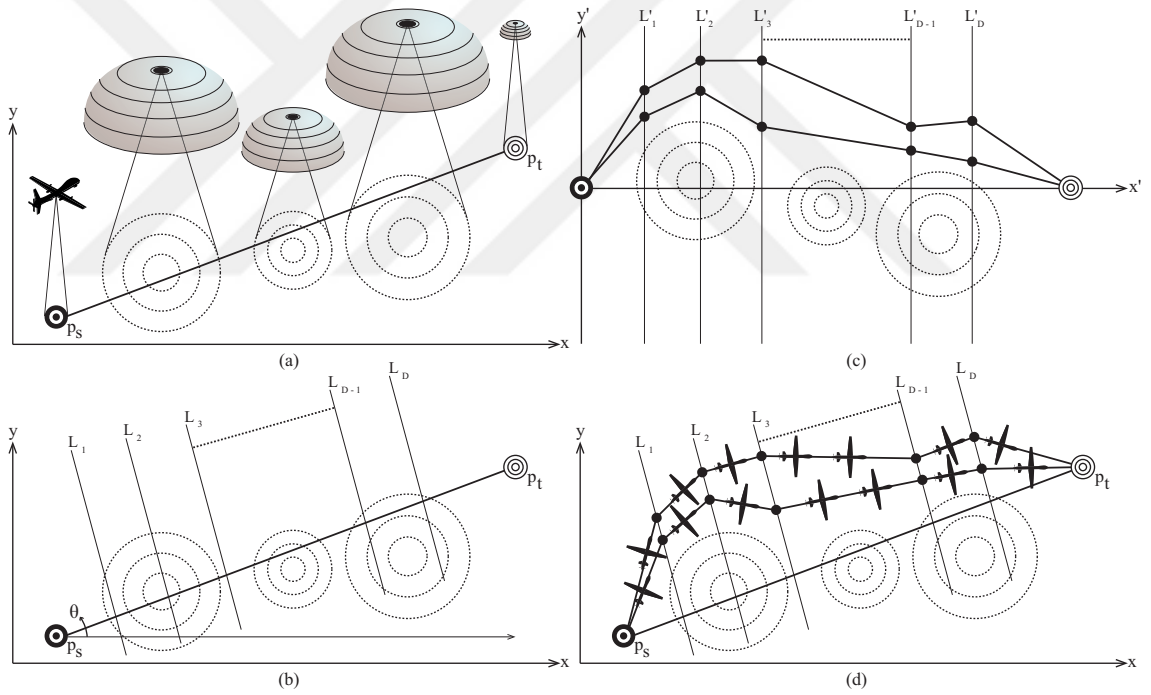
Eşitlik 1.13'te hava aracında üretilen toplam taşıma kuvveti hava aracının uçuş ağırlığına eşittir. Eşitlik 1.14'te ise üretilen toplam itki değeri hava aracına etkiyen toplam sürüklenme kuvvetine eşittir.

1.3. Sabit İrtifada Güzergah Planlama Probleminin Tanımı ve Modellenmesi

Güzergah belirlemenin bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilmesi için görev başarımını maksimize veya minimize edecek bir veya birden fazla etken amaç fonksiyonu içerisinde tanımlanabilir. Problemi IP algoritmasının çözebilmesi, amaç fonksiyonunun ve görev yapılacak arazi modelinin matematiksel formda ifade edilmesiyle mümkündür. Düşman ve yakıt maliyetine bağlı en iyi güzergahın üretilebilmesi için hava aracının görev yapacağı karmaşık arazi modeli ve amaç fonksiyonuna duyulan ihtiyaç ilk olarak Xu vd. tarafından giderilmiştir [59]. Geliştirilen bu model, görev tanımı içerisinde yer alan ve düşman unsurlara ait radar, füze, hava savunma sistemi ve diğer aktif savunma sistemlerini içeren savaş bölgesinde, uçuşa başlangıç noktasından (P_s) başlayarak daha önce tanımlanmış hedef noktasına (P_t) ulaşması beklenen bir İHA sistemi dikkate alınarak önerilmiştir. Uçuş boyunca yakıt tüketimine etki eden faktörler incelendiğinde, gerçekleştirilen manevralar, hava sıcaklığı, hava yoğunluğu, rüzgar hızı ve yönü gibi etkenler, rotanın uzunluğuna kıyasla ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle toplam yakıt tüketiminin sadece güzergah uzunluğuna bağlı değiştiği kabul edilmiştir [59].

Hava savunma sistemleri aynı radar sistemini kullanarak aynı noktalardan hedefi tespit edebilseler de saptanan hedefi vurmadaki etkinlikleri sistemin atış için sahip olduğu

donanımın özelliklerine bağlı değişmektedir. Bu durum göz önüne alındığında sistemlerin etkili olduğu mesafeyi tanımlamak amacıyla etki yarıçapı veya etkili menzil ifadeleri ortaya çıkmıştır [60]. Gerçek hayatta kullanılan savunma ve saldırı sistemlerinin etki alanı Şekil 1.8 (a)'da görüleceği üzere küre formundadır. Fakat sabit irtifada veya iki boyutlu yaklaşımda küre, daire ile temsil edilmektedir. Modelin gerçek sistemlerle benzerliğinin yüksek olması ve elde edilen sonuçların gerçek hayatta kullanılabilir olduğunun gösterimi için model içerisinde yer alan düşman tehditleri daire formunda gösterilmiştir. Buna ek olarak daire genişliği veya çap uzunluğu ilgili düşman unsurunun hedef tespit veya radar menzilini ifade ederken, unsurun vuruş etkinliğini diğer bir ifade ile etkili menzilini belirtmek için düşman unsuru etki katsayısı (t_k) adıyla yeni bir parametre daha tanımlanmıştır. Bu değer her bir düşman unsuru için değişmektedir.



Şekil 1.8. Başlangıç-hedef noktalarının ve düşman unsurların gösterimi (a), dikey çizgiler (b), çizgilerin geometrik dönüşümü (c) ve İHA güzergahı için yeniden dönüşümü (d)

Önerilen modelde optimum güzergahın tespiti için farklı işlem adımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. İlk olarak P_s noktasından P_t noktasına sadece uzunluğa bağlı optimum rotayı temsilen düz bir hat çizilmiştir. Bu, en kısa öklit uzunluğuna, dolayısıyla yapılan kabul nedeniyle en düşük yakıt tüketimine sahip olması beklenen güzergahtır. Toplam mesafe ve yakıt tüketimi açısından optimum güzergah bu şekilde bulunmuş olsada, Şekil 1.8 (a)'da görüleceği üzere güzergahın bazı bölümlerinin düşman

unsurların radar menzili içerisinde kaldığı, dolayısıyla hava aracının tespit edilme ve düşürülme riskini barındırdığı için düşman maliyeti açısından en iyi koşul olarak değerlendirilmemektedir. En kısa güzergah amaç fonksiyonu değeri açısından en iyi sonuç olmasa da oluşturulan bu güzergahtan faydalanarak amaç fonksiyonunu minimize edecek yeni yollar belirlenebilir. Bu doğrultuda, öncelikle uygun geçiş veya durak noktalarının (waypoints) belirlenebilmesi için söz konusu güzergah kendisine dik ve eşit aralığa sahip D adet doğru ile Şekil 1.8 (b)'de olduğu gibi bölünmüştür. Bahsedilen güzergaha dik olan bu doğrular $L = \{L_1, L_2, \dots, L_D\}$ ile gösterilmektedir. Dik doğrular oluşturulduktan sonra nihai güzergahın üretilebilmesi için L kümesindeki her bir doğru üzerinde problemde tanımlanan amaç fonksiyon değerini minimize edecek Şekil 1.8 (c)'de gösterilen örnek noktalara benzer D farklı nokta belirlenmektedir. Başlangıç ve bitiş konumları arasında yer alan bu noktalar, başlangıç ve bitiş noktasını da içeren $P = \{P_s, P_{L_1}, P_{L_2}, \dots, P_{L_D}, P_t\}$ kümesiyle ifade edilmektedir.

Nihai güzergahın oluşturulabilmesi amacıyla durak noktalarını hızlı bir şekilde belirlemek ve işlem yükünü hafifletmek için model karmaşıklığı bazı geometrik yaklaşımlar kullanılarak azaltılabilir. Daha önce bahsedilen ve güzergaha ait noktaları içeren her bir P_{L_k} noktası x_k ve y_k olmak üzere iki boyutlu düzleme ait konum veya nokta bilgisini içermektedir. Uygun seyir güzergahı belirlenirken amaç fonksiyon hesabının tek bir nokta için olması işlem yükünün azalmasına neden olacaktır. Bu amaçla başlangıç ve bitiş konumları arasında çizilen düz hattın, koordinat sisteminin x eksenine ile yaptığı θ açısını sıfırlayacak uygun trigonometrik dönüşüm yapılarak, koordinat sisteminin x eksenine ile çakıştırılmasının yanı sıra P_s noktasının koordinat sisteminin orijinine taşınarak hesaplamaların sadece y_k noktası için yapılabilir olması sağlanmıştır. Eşitlik 1.15 dikkate alınarak yapılan bu dönüşüm sonrası elde edilen yeni koordinat sistemi Şekil 1.8 (c)'de x' ve y' eksen takımı ile gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_k - x_s \\ y_k - y_s \end{bmatrix} \text{ ve } \theta = \arctan \frac{(y_t - y_s)}{(x_t - x_s)} \quad (1.15)$$

Dönüşüm öncesi P kümesini oluşturan birinci nokta $P_1 = (x_1, y_1)$, ikinci nokta $P_2 = (x_2, y_2)$ ve k 'inci nokta $P_k = (x_k, y_k)$ ile belirtilmektedir. Dönüşüm sonrası yeni noktalar kümesinin P' ile belirtilmesinin yanı sıra bu kümeyi oluşturan birinci,

ikinci ve k 'inci noktalar sırasıyla $P'_1 = (x'_1, y'_1)$, $P'_2 = (x'_2, y'_2)$ ve $P'_k = (x'_k, y'_k)$ ile ifade edilmektedir. Daha önce bahsedildiği üzere, L kümesini oluşturan dikey çizgiler başlangıç ve bitiş noktaları arasındaki düz hattı eşit aralıklarla bölümlemekte idi. Düz hattın, dönüşüm sonrası yeni koordinat sisteminin x' eksenine olduğu düşünüldüğünde yeni koordinat sisteminde tanımlanan noktaların x' değerleri $(i|p_s p_t|)/(D+1)$ kullanılarak eşit aralığa sahip olacak şekilde belirlenebilir. Eşitlik incelendiğinde i değeri düz hattı keserek durak noktalarının oluşmasını sağlayan L kümesi eleman sırasını ifade etmektedir. D tane L doğrusu hattı kestiğinde $D + 1$ tane segment oluşturacaktır. Toplam hattın uzunluğu segment sayısına bölünerek ilgilenilen noktanın i değeri ile çarpıldığında, i 'inci noktanın x' değeri bulunabilir. Durak noktalarının y' değeri içinse her bir çizgi üzerinde ilgili amaç fonksiyonu kullanılarak hesaplama ve belirleme işlemleri gerçekleştirilir. Bu sayede işlem yükünde önemli ölçüde azalma sağlanmıştır.

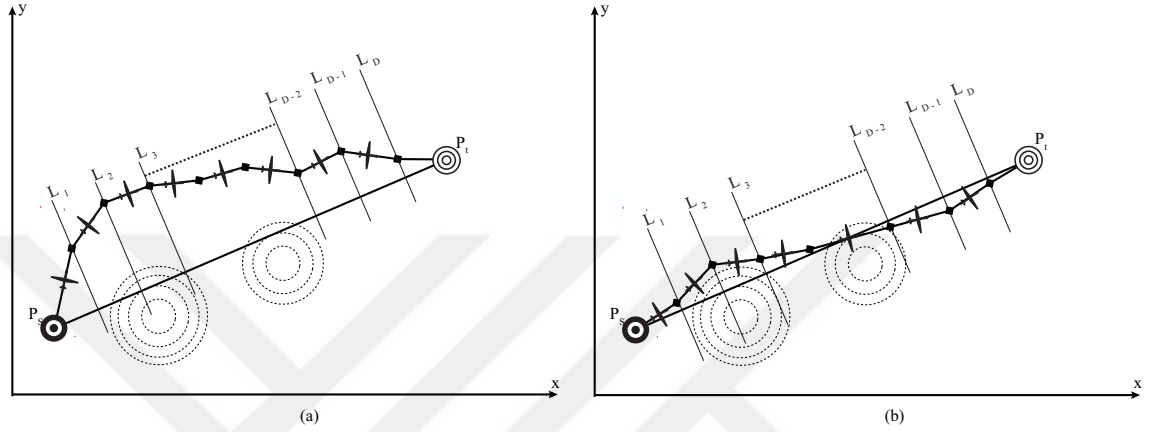
Tanımlanan matematiksel model dikkate alınarak üretilecek güzergahların uygunlukları daha önce bahsedilen ve amaç fonksiyon değerini oluşturan düşman ve yol maliyetleri hesaplanarak değerlendirilmelidir. Eşitlik 1.16'da ifade edildiği şekilde ilgili parametreler hesaplanarak amaç fonksiyon değeri belirlenebilir.

$$J = \lambda J_t + (1 - \lambda) J_f = \lambda \int_0^l w_t dl + (1 - \lambda) \int_0^l w_f dl \quad (1.16)$$

Eşitlik 1.16'da J , dikkate alınan güzergah için düşman unsurları ve yakıt tüketiminin toplam maliyetini, J_t sadece düşman unsurlarının maliyetini, J_f ise aynı güzergahtaki İHA/SİHA sisteminin yakıt maliyetini temsil etmektedir. l belirlenen güzergahın toplam uzunluğu olmak üzere, J_t değeri 0 ile l arasında, l uzunluğuna bağlı değişen w_t integrali hesaplanarak, J_f değeri ise 0 ile l arasında, l uzunluğuna bağlı değişen w_f integrali hesaplanarak belirlenmektedir.

Bahsedilen maliyetlerin amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi ağırlıklandırma katsayısı olarak ifade edilen ve 0 ile 1 arasında değer alabilen λ parametresi ile ayarlanmaktadır. Bu katsayının oluşturulacak güzergahlara etkisi incelendiğinde λ değeri bire yaklaştıkça amaç fonksiyonu üzerindeki düşman maliyetinin etkisi artarken yakıt tüketiminin etkisi azalacaktır. Bu durumda yakıt maliyetine bakılmaksızın Şekil 1.9 (a)'da gösterildiği şekilde düşman unsurlardan uzaklaşan güzergahlar üretilecektir. λ değeri sıfıra

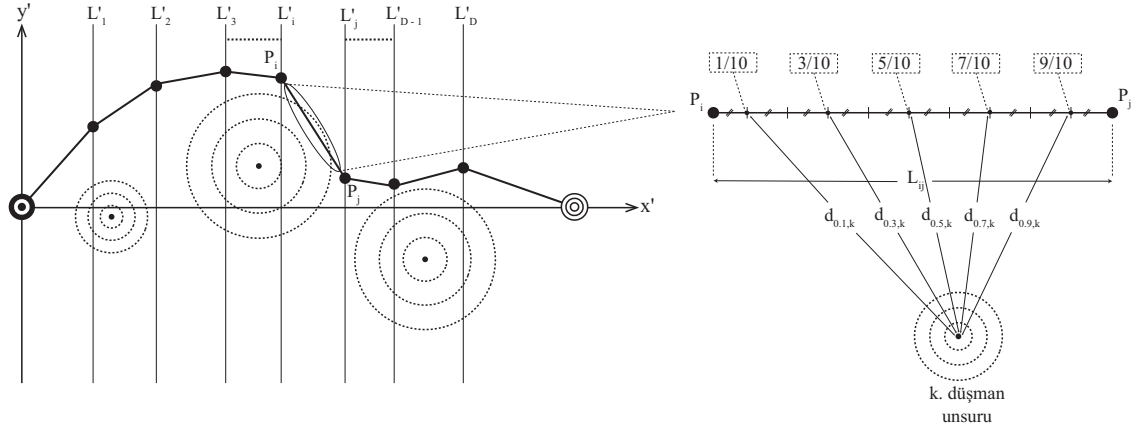
yaklaştıkça amaç fonksiyon değeri üzerinde yakıt tüketiminin, dolayısıyla güzergah uzunluğunun etkisi artarken düşman unsurlarının etkisi azalacaktır. Böyle bir durumda üretilen güzergahların düşman tespit menziline içerisinde oluşu göz ardı edilerek Şekil 1.9 (b)'de görüleceği üzere yeni güzergahlar başlangıç ve bitiş noktası arasında çizilen düz hatta yakın olacaktır.



Şekil 1.9. λ değeri 0.5'ten büyükken üretilen güzergah (a) ve λ değeri 0.5'ten küçükken üretilen güzergah (b)

Yakıt tüketimine etkiyen durumlar dikkate alındığında amaç fonksiyonu belirlenirken bazı basitleştirmeler yapılabilir. Toplam yakıt tüketimini temsil eden J_f değerinin hesaplanmasında güzergah boyunca değişen w_f parametresine 1 gibi sabit bir değer atanması sayesinde toplam yakıt tüketiminin güzergah uzunluğu ile doğru orantılı bir korelasyonu kurulabilir. Bu sayede güzergahın belirlenmesi için gereken işlem süresi ve maliyeti azaltılabilir. Buna karşın toplam düşman maliyetini hesaplamak için daha karmaşık işlem adımları gereklidir. Güzergaha ait bir parçanın/segmentin bir kısmı veya tamamı düşman radar menzili içerisinde kalabilir. Hava aracının düşürülme veya vurulma ihtimali düşman unsurunun merkezine olan uzaklığı ile ters orantılı değişmektedir. Buna bağlı olarak bir İHA/SİHA düşman merkezinden uzaklaştıkça düşürülme ihtimali azalmaktadır. İHA sisteminin oluşturulan güzergahı hatasız takip ettiği kabulüyle düşman maliyeti, oluşturulan rota üzerinden tahmin edilebilir. Güzergah boyunca değişen w_t değeri, nihai güzergahı oluşturan her bir alt güzergah parçasının veya segmentin düşmana olan uzaklığına ve daha önce bahsedilen t_k değerine bağlı olarak Eşitlik 1.18'de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

Bu işlemi basitleştirmek ve daha net bir şekilde açıklayabilmek adına Şekil 1.10'da



Şekil 1.10. Düşman maliyet hesabının şematik gösterimi

görülebileceği üzere, düşman unsuru içerisinde kaldığı tespit edilen güzergaha ait bir parçanın olduğu kabul edilsin. Bu kabulde P kümesinden alınan ve ardışık olan P_i ve P_j noktaları arası mesafe L_{ij} ile belirtilmektedir. P_i ve P_j arası on eşit parçaya ayrılarak birinci, üçüncü, beşinci, yedinci ve dokuzuncu noktalar seçilerek sırasıyla bu noktalar birinci bölme noktası $1/10$, üçüncü bölme noktası $3/10$, beşinci bölme noktası $5/10$, yedinci bölme noktası $7/10$ ve dokuzuncu bölme noktası $9/10$ olarak ifade edilmektedir. Gerçek hayatta bir savunma sistemi tarafından herhangi bir hedef tespit edilmişse diğer savunma sistemleri de tetiklenerek saptanan hedefin imhası için etkinleştirilmektedir. Bu durumu temsilen eğer güzergah bir düşman unsurunun radar menzilinden geçiyorsa hava aracı tüm düşman unsurlarının da hedefi haline geldiği varsayılmakta ve arazide bulunan toplam N_t düşman unsurunun her biri için $J_{t,(ij),k}$ değeri Eşitlik 1.17'den faydalanarak hesaplanmaktadır. $d_{0.1,k}$, $d_{0.3,k}$, $d_{0.5,k}$, $d_{0.7,k}$ ve $d_{0.9,k}$ ise sırasıyla k indeksli düşman unsurunu temsil eden çemberin merkezi ile $1/10, 3/10, 5/10, 7/10$ ve $9/10$ noktaları arasındaki öklid uzaklığına karşılık gelmektedir. Eşitlik 1.18 kullanılarak ilgili alt güzergah parçası için toplam düşman maliyeti bulunabilir.

$$J_{t,(ij),k} = \left(\frac{L_{ij} t_k}{5} \right) \left(\frac{1}{d_{0.1,k}} + \frac{1}{d_{0.3,k}} + \frac{1}{d_{0.5,k}} + \frac{1}{d_{0.7,k}} + \frac{1}{d_{0.9,k}} \right) \quad (1.17)$$

$$J_{t,(ij)} = \frac{L_{ij}}{5} \sum_{k=1}^{N_t} t_k \left(\frac{1}{d_{0.1,k}^4} + \frac{1}{d_{0.3,k}^4} + \frac{1}{d_{0.5,k}^4} + \frac{1}{d_{0.7,k}^4} + \frac{1}{d_{0.9,k}^4} \right) \quad (1.18)$$

Düşman unsurlarının maliyeti ve yakıt tüketim maliyeti hesaplamaları detaylı bir

şekilde incelendiğinde amaç fonksiyonunu oluşturan J_t ve J_f değerlerinin toplamının minimizasyonu göz önünde bulundurularak güvenilir ve düşük maliyetli bir güzergah bulunmaya çalışıldığı anlaşılmaktadır. Amaç fonksiyonuna ait minimum değeri elde edebilmek adına başlangıç ve bitiş noktası arasındaki düz hat L kümesindeki D tane dikey çizgiyle D farklı noktadan bölünmüş ve L kümesini oluşturan doğrular üzerinde optimum güzergahı belirleyen ve P kümesini oluşturan (x, y) değerleri bulunmaya çalışılmıştır. Yapılan dönüşüm işlemleri, kabuller ve basitleştirmeler neticesinde problem hızla çözümlenebilir bir optimizasyon problemi haline gelmiş ve İHA/SİHA için belirlenen kısıtlar ve şartlar altında mevcut çözümler içerisindeki en iyi/uygun güzergahın bulunması sağlanmıştır.

1.4. İlgili Çalışmalar

Güzergah planlama probleminin çözülmesi, dolayısıyla İHA ya da SİHA için bir yolun belirlenmesi, hareket sahası, bu sahada bulunan düşman unsurları, uçuş başlangıç ve hedef pozisyonu, güzergahın oluşturulması ve yolun tarifi ile güzergah ve güzergaha bağlı yolun kalitesinin uygun olarak modellenmesini gerektirir. Modelleme yaklaşımlarından yaygın olarak tercih edilenlerinden biri hareket sahasının eşit yada farklı boyutlu ayrık bölmelere parçalanması, her bölmenin özelliklerinin belirlendikten sonra düğümlerle ifade edilmesi ve düğümlerden faydalanılarak graf yada bölmelere bağlı olarak grid yapıların tanımlanması prensibine dayanmaktadır. Graf yada başka eşdeğer yapılar ile hareket sahasının modellenmesi Dijkstra [61], A* [62], D* [63], D* Lite [64], Voronoi Diagram [65], Artificial Potential Field (APF) [66], Rapidly-Exploring Random Trees (RRT) [67], Tamsayı programlama ve Lineer programlama gibi tekniklerin kullanılmasına olanak sağlamıştır.

Harekat sahasının graf yada grid yapılar kullanılarak modellenmesi iyi bilinen bazı sezgisel veya stokastik metodların güzergah ve dolaylı olarak yol planlama probleminin çözümü amacıyla kullanımına olanak sağlarken, ayrıklaştırma sebebi ile problemin en iyi çözüm yada çözümlerinin oluşturulan graf yada grid yapısı tarafından içerilemeyeceği ihtimali göz ardı edilmemelidir. Düşman unsurlarının merkezlerine ait koordinatlar ve yarıçapları bilinen çemberler, uçuş başlangıç ve hedef pozisyonlarının yine koordinatları bilinen noktalar ile ifadesi güzergah planlama problemi için bir diğer yaygın modelleme

yaklaşımıdır. Bu modelleme yaklaşımında güzergah, uçuş başlangıç ve hedefe karşılık gelen noktalar arasında çizilen referans doğruya dik doğrulardan her doğru üzerinde bir nokta seçilerek belirlenir. Uçuş başlangıç noktası, seçilen noktalar ve hedefi temsil eden noktadan oluşan kümedeki her ardışık iki nokta arasında bir doğru parçası çizilir ve çizilen doğru parçaları birleştirilirse İHA yada SİHA için yol planlanmış olur. Harekat sahasının nokta, doğru ve çemberler kullanılarak geometrik modellendiği durumlarda güzergah planlama probleminin çözümü sürekli uzayda sonsuz nokta içinden düşman unsurları, yakıt veya batarya tüketimi gibi durumların dikkate alınarak seçim yapılmasını gerektirir. Geçtiğimiz yıllarda güzergah planlama probleminde aralarında bulunduğu karmaşık mühendislik ve gerçek hayat problemlerinin çözümü amacıyla metasezgisel algoritmalar başarı ile kullanılmıştır.

Klasik veya nümerik metotlara kıyasla kabul edilebilir süre ve kalitede çözümlere düşük hesaplama maliyetleri ile erişmeyi mümkün hale getiren metasezgisel algoritmaların güzergah planlama probleminin harekat sahasının geometrik modellendiği durumlarda çözümüne ilişkin öncü nitelikli çalışmalardan biri Duan vd. tarafından yapılmıştır [68]. Yapılan bu çalışmada ayrıca bir metasezgisel algoritma olan Karınca Kolonisi Optimizasyon (Ant Colony Optimization, ACO) algoritmasını güzergah planlama problemini çözümlemede kullanarak bir metasezgisel algoritmanın bu problemin çözümü için nasıl uyarlanacağı gösterilmiştir [68]. Bununla birlikte, diğer bir çalışmada Duan vd. Akıllı Su Damlaları (Intelligent Water Drops, IWD) algoritmasını SİHA güzergah planlama için kullanmışlardır [69]. Bir başka çalışmada, Duan vd. ACO ve Diferansiyel Gelişim (Differential Evolution, DE) algoritmalarını birleştirerek hibrit bir yaklaşım ortaya koymuş ve bu yaklaşım ile geliştirdikleri güzergah planlama algoritmasını üç boyutlu bir ortamda çalışan SİHA için test etmişlerdir [70]. Ma ve Lei, Parçacık Sürü Optimizasyon (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritmasının atalet ağırlığına atanan değerleri ikinci dereceden salınım bağlantıları ile ilişkilendirmiş ve ikinci dereceden salınlı PSO (Second Order Oscillating PSO, SOPSO) adıyla yeni bir yöntem sunmuşlardır [71]. Yapılan karşılaştırma sonucunda SOPSO tarafından bulunan güzergahların sadece daha kısa olmakla kalmayıp aynı zamanda düşman unsurlarından da etkin bir şekilde kaçınabildiği gösterilmiştir [71]. Ayrıca Ma ve Lei, Yapay Balık Okulu algoritmasının (Artificial Fish School Algorithm, AFSA) üç farklı varyantını iki

boyutlu SİHA güzergah planlama probleminin çözümü için denemişlerdir [72]. C. Xu vd. kaotik Yapay Arı Kolonisi (Chaotic Artificial Bee Colony, CABC) adını verdikleri güzergah planlayıcısı için kaotik değişkenlerden faydalanarak ABC algoritmasının işçi arılarını mevcut en iyi besin kaynağına yönlendirmiş ve CABC'nin ABC algoritmasına üstünlüğünü görsel olarak kanıtlamışlardır [73].

Y. Zhang vd., ABC algoritmasının güzergah planlama performansını iyileştirmek için bir uygunluk ölçeklendirme (fitness scaling) stratejisi kullanarak besin kaynaklarının ham uygunluk değerlerini dönüştürmüş ve arı aşamalarının (bee phases) gerektirdiği rastgele sayıları üretmek için Lorenz denklemlerini kullanmıştır [74]. Bir başka çalışmada, Y. Zhang vd. PSO algoritması için bir uygunluk ölçeklendirme mekanizmasını dikkate alarak iyi çözümlerin seçilme olasılıklarını artırmıştır [75]. Ayrıca, Zhang vd. PSO algoritmasındaki popülasyon güncelleme denkleminin atalet ağırlığı ve ivme katsayılarını adaptif olarak ayarlamış ve aynı denklemin rastgele katsayılarının değerlerini belirlemek için kaotik rassal sayı üreticinden yararlanmıştır [75]. Tanıtılan bu yeni PSO algoritması Fitness-scaling Adaptive Chaotic PSO (FAC-PSO) olarak adlandırılmış ve bir güzergah planlayıcı olarak kullanılmıştır [75]. P. Li ve Duan, Yerçekimsel Arama algoritması (Gravitational Search Algorithm, GSA) için PSO algoritmasının hafıza ve sosyal bilgi kavramını referans almış ve İHA güzergah planlama problemini çözmedeki etkinliği standart PSO, GSA ve diğer iki GSA tabanlı model ile yapılan karşılaştırmalı test sonuçlarıyla doğrulanmıştır [76]. Fu, PSO algoritmasının her bir parçacığın küçük bir çözüm grubunun en iyi çözümünden güzergah planlamak için faydalanmış ve parçacık hızlarını değiştirdiği bir versiyonunu geliştirmiştir [77].

G.-G. Wang vd. Ateşböceği algoritmasının (Firefly Algorithm, FA) uygun çözümleri arasında yeni bir bilgi paylaşımı yaklaşımı tasarlamış ve Değiştirilmiş Ateşböceği algoritmasını (Modified-FA, MFA) tanıtmışlardır [78]. MFA ile ACO, PSO, DE, Biyocoğrafya Tabanlı Optimizasyon (Biogeography Based Optimization, BBO), Evrimsel stratejiler (Evolution Strategies, ES), Popülasyon Tabanlı Artımlı Öğrenme (Population Based Incremental Learning, PBIL), Genetik algoritma (Genetic Algorithm, GA) ve son olarak GA'nın varyantı olan stud GA (SGA) gibi diğer metasezgisel tabanlı İHA güzergah planlama algoritmaları arasında detaylı bir karşılaştırma çalışması sunulmuştur [78]. G.-G Wang'ın öncülük ettiği çalışmalar MFA ile sınırlı kalmamıştır.

G.-G. Wang vd. DE algoritmasının bazı dinamiklerini Guguk Kuşu Araştırma (Cuckoo Search, CS) algoritması ile birleştirmeye çalışmış ve DE-CS algoritmasını üç boyutlu ortamda SİHA sisteminin görev güzergahlarının planlanması için geliştirmiştir [79]. G. G. Wang vd. Yarasa algoritmasının (Bat Algorithm, BA) çözüm güncelleme prosedürünü DE algoritmasının mutasyon operatörü ile değiştirerek BA with Mutation (BAM) adıyla yeni bir metasezgisel güzergah planlayıcıyı tanıtmışlardır [80]. Bu çalışmada elde edilen SİHA güzergahları, mutasyon operatörünün Yarasa algoritmasının yakınsama hızını artırırken, algoritmanın mevcut güçlü araştırma kabiliyetini de koruduğunu göstermiştir [80]. Wang vd. DE'nin mutasyon operatöründen yararlanarak standart BA'yı güncellemiş ve geliştirilmiş BA (improved BA, IBA) adıyla yeni bir algoritma tanıtmışlardır [81]. Yapılan bu çalışma IBA performansının analiz edilmesi amacıyla SİHA için üç boyutlu ortamda güzergah belirleme testleriyle sonlandırılmıştır [81].

FA'nın güzergah planlama performansını iyileştirmek için C. Liu vd. ateşböceklerinin çekim gücü ile ilgili parametresini adaptif olarak değiştiren yeni bir yöntem uygulamışlardır [82]. W. Zhu ve Duan tarafından BBO algoritması kaos teorisinin yanı sıra avcı-av (predator-prey) konseptiyle de desteklenmiş ve kaotik avcı-av BBO (Chaotic Predator-Prey BBO, CPPBBO) algoritması adıyla güzergah planlama probleminin çözümü için tanıtılmıştır [83]. Çalışma kapsamında maksimum sapma açısı ve maksimum uçuş mesafesi kısıtları altında bir İHA için çeşitli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir [83]. Heidari ve Abbaspour, Kara Delik (Black Hole, BH) algoritmasının yıldızlar ile diğer unsurlar arasındaki haberleşme ilişkisini değiştirmiş ve yapılan değişikliklerin SİHA için güzergah planlama problemi üzerindeki etkilerini araştırmıştır [84]. Tang ve Zhou, Solucan Sürü Optimizasyon (Glowworm Swarm Optimization, GSO) algoritmasına ait konum güncelleme prosedürünü PSO algoritmasından alınan yöntem ile değiştirerek PGSO adında yeni bir algoritma önermişlerdir [85]. Yeni tekniğin performansı güzergah planlama problemi için ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve özellikle durak nokta veya problemin parametre sayısı beş veya on olarak ayarlandığında PGSO'nun test edilen diğer algoritmalara göre daha kaliteli çözümler elde ettiği görülmüştür [85].

G. Yu vd. Öğretme-Öğrenme Tabanlı Optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization, TLBO) algoritmasını iki boyutlu İHA güzergah planlama problemine

uygulamışlar ve TLBO'nun ABC, PSO, DE ve GSO algoritmalarına kıyasla çözüm yetenekleri hakkında bazı önemli sonuçlar elde etmişlerdir [86]. X. Zhang ve Duan, güzergah planlama problemi için toplam seyir uzunluğu, uçuş yüksekliği, dönüş ve süzülme açısı, uçuşa yasak bölgeler, radarlar, füzeler ve hava savunma sistemleri gibi çoklu kısıtlar tanımlamıştır. Karmaşıklığı artan bu problemi çözme amacıyla DE algoritmasını α seviyesi karşılaştırma tabanlı (α level comparison based) kısıt yönetimi tekniği (constraint-handling) ile geliştirerek özelleştirilmiş bir DE algoritması sunmuşlardır [87]. Q. Zhou vd. Kurt Kolonisi Arama (Wolf Colony Search, WCS) algoritmasının lider arama stratejisini Karmaşık Yöntem (Complex Method) yaklaşımı yönetecek şekilde değiştirerek Karmaşık Yöntem tabanlı WCS (Complex Method WCS, CWCS) adı verilen yeni tekniği tanıtmış ve SİHA için güzergah planlayıcısı olarak kullanmışlardır [88]. Duan ve Qiao, Güvercinden İlham Alan Optimizasyon (Pigeon Inspired Optimization, PIO) algoritmasının güzergah planlama problemini çözme yeteneklerini analiz etmiş ve DE algoritmasına karşı üstünlüğünü görsel olarak kanıtlamıştır [89]. B. Li vd. ilk olarak ABC algoritmasında aday çözümler üretmek için kullanılan arıların deneme sayaçlarını kontrol eden Denge-Evrimsel Stratejisini (Balance-Evolution Strategy, BES) geliştirmiş ve BE-ABC algoritmasını tanıtmışlardır. Çalışmalarında üç farklı savaş alanı senaryosu kullanarak SİHA güzergahlarının planlanması için faydalanan BE-ABC algoritması ile standart ABC ve ABC algoritmasının varyantları olan I-ABC ve IF-ABC algoritmaları arasında karşılaştırmalı bir analize yer vermişlerdir [90].

Avcı-av konsepti B. Zhang ve Duan tarafından PIO algoritması ile birleştirilerek Avcı-Av Güvercinden İlham Alan Optimizasyon (Predator-Prey Pigeon-Inspired, PPPIO) yöntemi geliştirilmiştir [91]. Bu çalışmada uçuş için riskli bölgelerin dinamik olarak hareket ettiği test senaryoları hazırlanmış ve bu test ortamlarında PPPIO yöntemi kullanılarak SİHA rotaları planlanmıştır [91]. Yerel optimumlardan kaçınmak için GA'nın hafıza ve mutasyon operatöründen faydalanan PSO algoritmasının araştırma stratejisini kullanarak Yongbo Chen vd. Merkezi Kuvvet Optimizasyon (Central Force Optimization, CFO) algoritmasının yeni bir versiyonunu önermişlerdir [92]. VTOL hava aracı için yapılan güzergah planlama denemelerinde değiştirilmiş CFO'nun standart versiyonunun yanında GA, PSO, FA ve Rastgele Arama (Random Search, RS) yöntemlerine karşı üstünlüğü

gösterilmiştir [92]. Y. Zhou vd. Rüzgar Yönlendirmeli Optimizasyonun (Wind Driven Optimization, WDO) bazı aşamalarını kuantum yönteminden faydalananarak özelleştirmiş ve kuantum WDO (Quantum WDO, QWDO) algoritmasını önermişlerdir [93]. QWDO yönteminin belirlediği SIHA güzergahları, PSO ve BA'nın kuantum destekli varyantları ve WDO, PSO ve DE algoritmalarının standart versiyonları ile bulunan güzergahlarla karşılaştırılmıştır [93].

S. Zhang vd., Gri Kurt Optimizatörünün (Grey Wolf Optimizer, GWO) standart halinin iki boyutlu test senaryoları için İHA güzergahlarının belirlenmesinde sergilediği performansa odaklanmıştır [94]. Çözümün uygunluğu açısından yüksek potansiyelli parçacıkların belirlendiği ve erken yakınsama ile ilgili zorlukların üstesinden gelmek için diğer adayların çıkarıldığı uyarlanabilir duyarlılık karar alanı yöntemi (adaptive sensitivity decision area method) ile PSO algoritmasının güzergah planlama yeteneği Y. Liu vd. tarafından daha da geliştirilmiştir. Önerilen algoritma, PSO, FA ve GA'nın çoklu koşulları dikkate alınarak gerçekleştirilen eşleştirilmiş örneklem (paired-sample) T-testi, yapılan hassas değişikliklerin sağladığı olumlu katkıyı kanıtlamıştır [95]. Buna ek olarak, Y. Liu vd., standart PSO algoritmasının yerel optimumlara takılma ve yavaş yakınsama ile ilgili eksikliklerini Uzaysal Rafine Oylama Mekanizması (Spatial Refined Voting Mechanism, SRVM) ile iyileştirmeye çalışmışlardır [96]. Ayrıca, söz konusu PSO varyantıyla sürü İHA sistemleri için güzergah planlaması yapılırken olası çarpışmaları yeni tanıtılan bir uzaysal-zamansal çarpışma önleme tekniğinden yararlanarak kontrol altına alınmıştır [96]. Kuantum yönteminin kullanıldığı bir diğer çalışma Luo vd. tarafından BA yönteminin çözüm güncelleme ve mutasyon adımlarını geliştirmek amacıyla yapılmıştır [97]. BA çözümlerinin kuantum kodlama ile temsil edildiği bu çalışma sonucunda kuantum kodlama BA (Quantum encoding BA, QBA) olarak bilinen güzergah planlama algoritmasını literatüre kazandırmışlardır [97].

Q. Zhang vd., Toplama Karar Optimizasyonu algoritması (Collection Decision Optimization, CDOA) destekli bir yöntem geliştirerek İHA güzergah planlama problemine çözüm getirmiş ve bu yöntemin etkinliğini çeşitli senaryolarla doğrulamışlardır [98]. Alihodzic vd. iki boyutlu savaş alanları için Fil Sürüsü Optimizasyon (Elephant Herd Optimization, EHO) algoritmasının güzergah planlama problemini çözebilme yeteneğini araştırmışlardır [99]. Ayrıca Alihodzic vd. SIHA

güzergah planlama problemini, ne kadar kısılcım üretileceğini ve faydalanma genliğinin nasıl hesaplanacağını belirlemek için çözümlerin niteliklerinin kullanıldığı Havai Fişek algoritması (Fireworks Algorithm, FWA) tabanlı bir yaklaşımla ele almışlardır [100].

Miao vd. Simpleks yöntemi (Simplex Method, SM) ve Simbiyotik Organizma Arama (Symbiotic Organism Search, SOS) algoritmasının birleştirilmesiyle geliştirdikleri güzergah planlayıcısı hakkında oldukça kapsamlı bir dizi analiz sunmuşlardır [101]. Dolicanin vd. Beyin Fırtınası Optimizasyon (Brain Storm Optimization, BSO) yöntemini bir güzergah planlayıcısı olarak yapılandırmış ve bu yeni algoritmayı test etmek için beş farklı düşman tehdidinin bulunduğu bir savaş alanı kullanmışlardır [102]. Pan vd., Daire Tipi Kaotik Haritanın (Circle-type Chaotic Map) kaotik dizileri yardımıyla CS algoritmasının ölçekleme faktörünü ve kesir olasılığını ayarlayarak geliştirdikleri yeni CS algoritmasının standart CS algoritmasına karşı üstünlüğünü SİHA güzergah planlama problemi üzerinde göstermişlerdir [103]. Pan'ın öncülük ettiği zeki İHA veya SİHA güzergah planlama konusundaki çalışmaları sonraki zamanlarda da devam etmiştir. Pan vd., Balina Optimizasyon algoritmasının (Whale Optimization Algorithm, WOA) avı çevreleme veya arama sürecini, etkenlerin (agents) niteliklerine bağlı olarak kendi kendini ayarlama parametresi ile yeniden modellemiştir [104]. SİHA sistemleri için güzergah planlanması amacıyla farklı karmaşıklığa sahip iki savaş alanı senaryosu kullanılmış ve iyileştirilmiş WOA yönteminin standart haline kıyasla daha nitelikli/uygun güzergahlar elde ettiği anlaşılmıştır [104]. Ayrıca Pan vd. CIPDE ve JADE gibi iki DE versiyonunun avantajlı yönlerini bir araya getirerek CIJADE algoritmasını önermişlerdir [105]. Bu yöntemde, çaprazlama oranı ve ölçekleme faktörü her döngüde veya nesilde bir parametre uyarlama stratejisine (parameter adaption strategy) göre belirlenmiştir [105]. On düşman tehdidinin bulunduğu bir savaş alanı için yapılan bazı testler, CIJADE yönteminin PSO, DE, ABC, JADE ve CIPDE algoritmalarına kıyasla daha iyi performans göstermesine ek olarak problemin parametre sayısı artırıldığında üstünlüğünün daha belirgin hale geldiğini ortaya koymuştur [105].

Lin vd., BA destekli bir güzergah planlayıcı geliştirme aşamasında Yapay Potansiyel Alan (Artificial Potential Field, APF) yardımıyla BA konum güncelleme prosedürünü yeniden düzenlemişlerdir [106]. Ayrıca, optimum başarı oranı stratejisini kullanarak söz konusu algoritmanın atalet ağırlığını iyileştirmenin yanında yerel optimum çözümlerden

kaçınmak için kaos teorisinden yararlanmışlardır [106]. Qu vd., GWO'nun popülasyonu oluşturan bireylerin Pekiştirmeli Öğrenmenin (Reinforcement Learning, RL) eğitim bileşenlerine karşılık geldiğini varsayarak GWO'nun çalışma sürecine RL'yi entegre etmiş ve optimum İHA güzergahlarının belirlenmesi için geliştirilen yeni RLGWO yöntemini tanıtmışlardır [107]. Yeni algoritmanın performansı üç savaş alanı senaryosu kullanılarak incelenmiş ve standart GWO, IGWO, MGWO ve EEGWO gibi varyantları ile karşılaştırılmıştır [107]. GWO algoritması Qu vd. tarafından başka bir çalışmada da kullanılmıştır. Söz konusu çalışmada GWO algoritmasının basitleştirilmiş bir varyantı, üzerinde değişiklik yapılmış bir kommensalizm aşaması kullanan SOS ile hibritleştirilerek HSGWO-MSOS yöntemini önermişlerdir. HSGWO-MSOS, GWO, SOS ve Isıl İşlem (Simulated Annealing, SA) algoritmalarına karşı hem iki hem de üç boyutlu senaryolarla yapılan karşılaştırmalı çalışmalar, yeni önerilen tekniğin daha iyi performans gösterdiğini kanıtlamıştır [108].

Kral Kelebeği optimizasyon (Monarchy Butterfly Optimization, MBO) algoritması, Yi vd. tarafından kuantum operatörlerinin en kötü çözüm kalitesini temsil eden kelebek kümesini iyileştirmekten sorumlu olacağı şekilde yeniden düzenleyerek kuantum tabanlı MBO (Quantum based MBO, QMBO) algoritmasını üç boyutlu bir güzergah planlayıcı olarak sunmuşlardır [109]. Optimum güzergah için çözüm uzayında araştırma yaparken İHA ile ilgili bazı fiziksel kısıtlamaları dikkate alan C. Wu vd., bu kısıtlamaları ABC algoritmasına ait arıların başlangıç fazında kullanmışlardır [110]. Yang Chen vd., her iterasyonda optimum çözüme yakınsamasını garanti edebilmek için Çiçek Tozlaşma algoritmasının (Flower Pollination Algorithm, FPA) küresel-global yenileme sürecini geliştirmişlerdir [111]. Bununla birlikte, algoritmanın erken yakınsamasını önlemek için bir popülasyon yeniden yapılandırma mekanizması eklenmiştir [111]. FPA'nın komşuluk küresel öğrenme tabanlı FPA (Neighborhood Global Learning based FPA, NGFPA) olarak adlandırılan yeni uygulaması, optimum İHA güzergahlarını bulmak için uygulanmış ve sonuçları A*, APF ve RRT gibi bazı iyi bilinen yöntemlerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [111].

H. Zhu vd. ABC, BA, DE, FA, GWO, PSO, WOA, CS, Harmoni Arama (Harmony Search, HS), Örümcek Maymun algoritması (Spider Monkey Algorithm, SMA) ve Kral Kelebek algoritmasının GSMBO adı verilen değiştirilmiş bir varyantının standart

versiyonlarını kullanarak detaylı bir karşılaştırmalı çalışma yapmış ve SMA'nın test edilen diğer yöntemlere kıyasla daha güvenli SİHA güzergahları planlayabildiği sonucuna ulaşmıştır [112]. SMA'nın üstün performansı, H. Zhu vd. için söz konusu algoritmaya dayalı yeni güzergah planlayıcıları geliştirmeleri için ilham vermiştir. SMA, parametre setinin önce bağımsız olarak çözülmesi amacıyla daha küçük alt bileşenlere bölünmesine ve ardından kısmi çözümlerin uygun şekilde birleştirilmesine yardımcı olan bir yöntem olan İşbirlikçi Yardımcı Evrim (Cooperative Co-evolution) ile desteklenerek Zhu vd. tarafından SİHA güzergahları planlanırken kullanılmıştır [113]. SMA tabanlı tekniğin diğer algoritmalara karşı rekabet edebilirliğini kanıtlamak için beş farklı ölçekte yirmi beş senaryo tanımlanmış ve test edilmiştir [113].

X. Zhou vd., BA'nın zayıf olan araştırma yeteneğini ABC algoritması yardımıyla iyileştirmeye çalışmışlardır. Geliştirilmiş BA (Improved BA, IBA) algoritması bu çalışma kapsamında literatüre kazandırılmış ve düşman radarları, füzeler, uçak savarlar ve iklim etkilerinin modellendiği bir senaryoda güzergah planlayıcı olarak test edilmiştir [114]. P. Wu vd. PSO algoritmasındaki rassal katsayıların değerlerini Zaslavskii kaos haritası ile belirleyerek geliştirilmiş kaotik PSO isimli bir güzergah planlama yöntemini önermişlerdir [115]. H. Xu vd. adaptif α stratejisi ve Cauchy mutasyon yöntemini kullanarak Yerçekimi Arama algoritmasının (GSA) kritik bölümlerini yeniden yapılandırmışlardır. Karışık Strateji tabanlı GSA (Mix Strategy based GSA, MSGSA) varyantı, düşman tehditlerini, toplam uçuş uzunluğunu, dönüş açılarını ve uçulması yasak bölgeleri dikkate alarak en uygun İHA güzergahlarını elde etmek için kullanılmıştır [116]. Özellikle İHA sistemleri için güzergah planlamada kullanılacak yeni bir yöntem 2022 yılının başında Jiang vd. tarafından tanıtılmıştır [117]. Standart GWO algoritmasının çalışma prensibini, araştırma sürecinde yerel optimumlardan kaçınmak için iletişim mekanizmasını güncelleme yanında kısıtlamaları yönetmek için ϵ düzeyinde karşılaştırma ile değiştirmişlerdir [117]. Ayrıca, çarpışmadan kaçınmak amacıyla Kısmen Gözlenebilir Markov Karar Süreci (Partially Observable Markov Decision Process) ve Monte-Carlo Ağaç Arama (Monte Carlo Tree Search) algoritmasından yararlanmışlardır [117].

Durak noktalarının sayısının artması güzergahların daha hassas belirlenmesini sağlayabilir. Buna karşın, durak noktalarının veya parametre sayısının artması, güzergah

planlama problemine ekstra zorluk ve hesaplama yükü getirmektedir. Jarray vd., problemin karar değişkenlerini veya parametrelerini bağımsız olarak çözmek için alt gruplara ayırmaya dayanan İşbirlikçi Yardımcı Evrim mekanizmasını paralel GWO algoritmasına entegre ederek söz konusu karmaşıklığın üstesinden gelmeye çalışmıştır [118]. Du vd., Şempanze Optimizasyon algoritmasının (Chimp Optimization Algorithm, ChOA) bazı sorunlu evrelerini Maymun algoritmasının (Monkey Algorithm, MA) matematiksel modellerinden esinlenerek ele almaya çalışmış ve geliştirilmiş ChOA (Improved ChOA, IChOA) olarak adlandırılan algoritmayı literatüre kazandırmışlardır [119]. IChOA'nın performansı, üç boyutlu İHA güzergah planlama problemine ek olarak sayısal değerlendirme fonksiyonları üzerinden incelenmiştir [119]. X. Wang vd. Mayıs Sineği algoritmasının (Mayfly Algorithm, MA) işlem adımlarını güncelleyerek değiştirilmiş MA (modified MA, modMA) yöntemini önermiştir [120]. modMA algoritması tasarlanırken, yerçekimi katsayısı üstel bir atalet ağırlığı stratejisi ile belirlenmiş ve Cauchy tabanlı mutasyon yaklaşımı kullanılarak her bir erkek mayıs sineğinin konumu ayarlanmaya çalışılmıştır [120]. Son olarak, ebeveyn bireylerin uzak bölgelerin adaylarını oluşturmaya izin vermek için çözüm uzayının hiper küplere bölündüğü yatay çaprazlama stratejisini entegre etmişlerdir [120].

Niu vd., SİHA güzergah planlama problemini ele almak için Yapay Ekosistem Optimizasyon algoritmasının (Artificial Environment Optimization, AEO) işlem adımlarını gözden geçirmiş ve Uyarlanabilir Komşuluk Tabanlı Arama (Adaptive Neighborhood based Search) ile geliştirilmiş AEO algoritmasını (NSEAO) önermişlerdir [121]. Bu yöntemde, tüketiciler için komşuluk tanımlamak amacıyla mesafe uygunluğuna dayalı bilgiler kullanılmış ve algoritmanın global araştırma kapasitesine önemli derecede katkı sağlanmıştır [121]. Ayrıca, Niu vd. popülasyon çeşitliliğini koruyan yeni bir ayrıştırma yöntemini de bu çalışmada kullanmışlardır. Hem iki hem de üç boyutlu ortamlarda yapılan deneysel çalışmalar, NSEAO'nun düşman tehditleri, toplam uçuş uzunluğu, dönüş ve tırmanma açıları gibi zorlu koşullar altında Salp Sürü (Salp Swarm Algorithm, SSA), Saten Çardak Kuşu optimizasyon (Stain Bowerbird Optimizer, SBO), Pathfinder (PFA) ve Sinüs-Kosinüs algoritmalarına (Sine-Cosine Algorithm, SCA) ek olarak GAPSO ve CIPSO adlı iki PSO varyantı, GA, MFO, ECTLBO, HSGWOMSOS ve AEO gibi diğer tekniklerden daha kararlı

bir şekilde çalıştığını göstermiştir [121]. MAEO yönteminin güzergah planlamadaki performansını değerlendirmek için oluşturulan, üç boyutlu ve karmaşık beş farklı senaryo üzerinde yapılan deneysel çalışmalar, AEO üzerinde yapılan değişikliklerin araştırma özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. Ayrıca karşılaştırmalı çalışma, MAEO algoritmasının rakipleri olan GA, PSO, GWO, WOA, AEO, HSGWO-MSOS, uyarlanabilir GWO (Adaptive GWO, AGWO) ve geliştirilmiş Şempanze Optimizasyon algoritması (Improved ChOA, IChOA) tabanlı güzergah planlayıcılara göre daha iyi çözümler elde ettiğini ortaya koymuştur [122].

Jia vd. SİHA sisteminin uçuş güzergahını belirlemek amacıyla uygun durak noktalarını çözüm uzayından seçebilmek için Çift Katmanlı Kodlama (Double Layer Coding, DLC) adı verilen yeni bir yaklaşım geliştirmiş ve bunu rotasyon tabanlı PSO (Rotation based PSO, RPSO) olarak bilinen PSO varyantı ile birlikte kullanmışlardır [123]. Arama ve Kurtarma (Search and Rescue, SAR) optimizasyon algoritması, C. Zhang vd. tarafından aday çözüm oluşturma mekanizmasının verimliliğini artırmak için aralığı uyarlamalı olarak ayarlayan sezgisel çaprazlama (heuristic crossover) stratejisi ile birleştirilerek HC-SAR adı ile literatüre kazandırılmıştır [124]. HC-SAR ile SAR, DE, Karınca Aslanı Optimizeri (Ant Lion Optimizer, ALO), Sincap Arama algoritması (Squirrel Search Algorithm, SSA) ve Salp Sürüsü algoritmasına dayalı diğer güzergah planlama yöntemleri arasındaki karşılaştırmalı çalışmalar HC-SAR tekniğinin İHA güzergah planlayıcısı olarak kullanabileceğini göstermiştir [124].

Ait-Saadi vd., Kaotik Akula Optimizasyonu Benzetimli Tavlama (Chaotic Aquila Optimization Simulated Annealing, CAOSA) yöntemini geliştirmek için Aquila Optimizasyonu (Aquila Optimization, AO) algoritması ile SA ve Singer kaotik haritasını (Singer chaotic map) birlikte kullanmış ve bu yöntemi hem iki hem de üç boyutlu İHA güzergah planlama probleminin çözümünde test etmişlerdir [125]. Yol maliyeti ve yürütme zamanı dikkate alınarak yapılan karşılaştırmalı çalışmalar CAOSA yönteminin, SA, PSO, BA, FA, GWO, WOA, AO, SCA ve Yusufçuk algoritmasına (Dragonfly Algorithm, DA) göre daha güçlü bir güzergah planlama algoritması olduğunu göstermiştir [125]. Bir başka GWO tabanlı güzergah planlama yöntemi X. Yu vd. tarafından tanıtılmıştır. Bu yöntemde alfa, beta ve delta kurtlarının özellikleri alfa kurdu etrafında arama yapacak şekilde değiştirilmiş ve omega kurtlarının özellikleri

de en iyi üç kurt etrafında arama yapacak şekilde değiştirilmiştir [126]. Ayrıca, algoritmanın mevcut çözümlerden faydalanma ağırlıklı işlemlerini daha da artırmak için DE algoritması ve derece tabanlı mutasyon (rank based mutation) stratejisinden yararlanmışlardır. Deneysel çalışmalar, yeni tasarlanan DE ile Hibrit GWO (Hybrid GWO, HGWO) algoritmasının, on düşman tehdidinin bulunduğu üç boyutlu bir ortamda İHA güzergahlarını planlarken diğer GWO yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar üretebildiğini göstermiştir [126]. Chowdhury ve De, Ters GWO (Reverse GWO, RGWO) olarak bilinen ve farklı ateşböcekleri ile temsil edilen çözümler arasındaki hareketlerin, ateşböceklerinin lüsiferin değerlerine bakılarak ayarlandığı GWO algoritması tabanlı bir güzergah planlayıcısı tanıtmış ve üç boyutlu dinamik ortamlar için bir dizi deney gerçekleştirmiştir [127].

B. Chen vd. ilk olarak kartezyen koordinat sistemini, uçuş yolu planlanırken İHA'nın açısı ve hızı ile ilgili bazı kısıtlamaların daha net bir şekilde ele alınabildiği küresel koordinat sistemi ile değiştirmiştir [128]. Ayrıca, bazı çözümleri yeni belirlenen bir çözümle değiştirerek popülasyon çeşitliliğini korumak için Kesilmiş Ortalama Stabilizasyon (Truncated Mean Stabilization, TMS) adı verilen yeni bir yöntem tanıtmışlardır. Küresel koordinat sistemi ve TMS yaklaşımını kullanarak güncellenen BA, TMS-SBA olarak adlandırılmış ve dört farklı savaş alanı senaryosunda güzergahların hesaplanmasında kullanılarak performansı analiz edilmiştir [128]. Uçuş güzergahı belirlenirken, İHA veya SİHA sistemlerine ait uçuş davranışlarının (flight attitude) ve hızının daha iyi anlaşılması amacıyla kartezyen koordinat sisteminin küresel koordinat sistemiyle değiştirilmesi sadece bu çalışmayla sınırlı kalmamış, Huang vd. bu yeni yaklaşım ile birlikte PSO ve DE algoritmalarından faydalanarak yeni bir PSO algoritması olan DE ile Adaptif Silindir Vektör PSO (Adaptive Cylinder Vector PSO with DE, ACVDEPSO) tabanlı güzergah planlayıcısını geliştirmişlerdir. ACVDEPSO, Dijital Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model, DEM) haritaları ile oluşturulan üç boyutlu ortamlarda test edilmiştir [129]. ACVDEPSO ve diğer PSO tabanlı algoritmalar arasındaki ayrıntılı karşılaştırmalar, karmaşık durumlar için rakiplerinden daha kaliteli güzergahlar oluşturduğunu doğrulamıştır [129].

2. BÖLÜM

İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI İLE İHA İÇİN SABİT İRTİFADA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜLMESİ

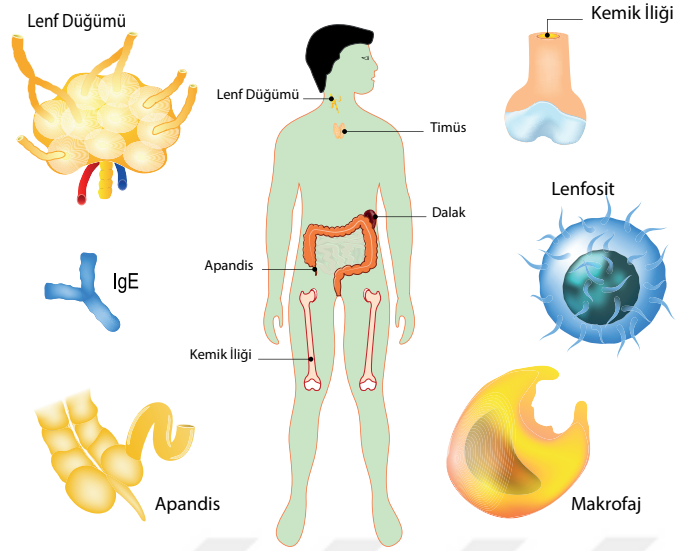
Sezgisel yaklaşımlar, kompleks nümerik ya da ayırık optimizasyon problemlerine, kabul edilebilir kalite ve yürütme zamanlarında çözüm üretebilmek adına klasik optimizasyon ya da arama teknikleri yerine yaygın olarak kullanılmaktadır. Sürü zekası temelli algoritmalar, doğadan esinlenen sezgisel yaklaşımların özellikle böcek ve kuş sürülerinin kolektif problem çözme yeteneklerinin modellenerek geliştirildiği algoritmaları içermektedir ve geçtiğimiz yıllarda pek çok mühendislik probleminin çözümü için kullanılmıştır. Bu bölümde, öncelikle canlılardaki immün sistemlerden ve plazma tedavi yönteminin biyolojik temellerinden bahsedilmiş daha sonra immün plazma tedavi yönteminin barındırdığı zekiliği modelleyen immün plazma algoritması (IP veya IPA) ve algoritmanın işlem adımlarına yer verilmiştir. Son olarak IPA, sabit irtifa güzergah planlama probleminin çözümü için uyarlanarak farklı kontrol parametre değerleri, farklı problem parametre sayısı ve beş farklı savaş alanı senaryosunda alanında iyi bilinen ABC, DE, PSO, BA ve GA gibi bazı metasezgisel tekniklerle karşılaştırmalı çalışma yapılarak sonuçları paylaşılmıştır.

2.1. İmmün Plazma Tedavi Yöntemi

Doğadaki tüm canlı sistemler hastalığa sebep olan ve kendi yaşamlarını tehdit eden patojenlere karşı çeşitli savunma sistemleriyle donatılmıştır [130]. En basit yaşam formu olan tek hücreli canlılarda dahi viral enfeksiyonlara karşı canlıyı koruyacak enzimler sentezlenerek koruma sağlanmaktadır [130]. Canlı sistemlerin gelişmişliği dikkate alındığında sistemi korumak için canlının sahip olduğu savunma donanımı sayısı ve karmaşıklığı bu gelişmişliğe paralel bir şekilde artmaktadır [130, 131]. Canlıyı koruma

görevini üstlenen ve bağışıklık sistemi olarak tanımlanan bu yapı bir canlıyı bakteri, virüs ve kanser gibi yabancı ve zararlı hücrelerden korumak için büyük bir uyum içerisinde çalışan karmaşık hücre, doku ve organ ağından oluşmaktadır [130, 131]. Bağışıklık sisteminin temel görevi antijen olarak da bilinen bu zararlı organizmaları tespit edip etkisiz hale getirmek ve bu organizmalara ait gerekli tanıma bilgisini depolayarak sonraki saldırılar için kolayca tanınabilir hale getirmektir. Antijenlere ait bilginin depolanması sayesinde canlı sistemine girmeye veya zarar vermeye çalışan bu organizmalar hızlı bir şekilde tanınarak gerekli yanıt hızlı bir şekilde verilmekte ve etkisiz hale getirilmektedir.

Bağışıklık sistemi canlıların yaşayışı ve devamlılığı için oldukça önemlidir. Gelişmişlik düzeyi yüksek olan insan vücudunda, bağışıklık sistemi farklı savunma mekanizmalarından oluşsa da temelde doğuştan gelen diğer adıyla doğal bağışıklık sistemi ve sonradan kazanılan veya edinilmiş bağışıklık sistemi olmak üzere iki farklı kategoride değerlendirilebilir [132]. Doğuştan gelen bağışıklık sistemi antijenlere karşı ilk savunma hattını oluşturmakta ve her zaman aktif bir şekilde vücut savunmasında görev almaktadır. Bu sistem içerisinde deri, mukoza gibi fiziksel ve kimyasal engellerin yanı sıra çeşitli antijenleri tanıyabilen ve bunlara gerekli yanıtı verebilen fakat hatırlama yeteneği olmayan makrofajlar, nötrofiller ve doğal öldürücü hücreler gibi canlıya ait yapılar yer almaktadır [132]. Edinilmiş bağışıklık sistemi, doğuştan gelen bağışıklık sisteminin vücuda giren bir antijeni etkisizleştiremediğinde devreye giren özelleşmiş ve daha güçlü bir savunma mekanizmasıdır [133]. Bu sistem kanın beyaz kısmı olarak bilinen bölümünde antijenleri tanıyan ve nötralize edebilen antikorlar üreten B hücrelerini ve vücuttaki zararlı hücreleri tanımlayıp onlara saldırabilen T hücrelerini içerir [133, 134]. Doğuştan gelen bağışıklık sistemi içerisinde yer alan makrofaj ve nötrofil gibi hücrelerin aksine edinilmiş bağışıklık sisteminin hücreleri, antijenleri tanıma ve yanıt vermenin yanı sıra hatırlama yeteneğine de sahiptir. Bu sayede doğuştan gelen bağışıklık sistemi hücrelerine kıyasla antijenlere karşı daha hızlı ve daha etkili bir yanıt verilebilmektedir [133, 134]. Bahsedilen doğal ve edinilmiş bağışıklık sistemi hücrelerini üreten yapılar bağışıklık sisteminin organ düzeyinde savunma mekanizmalarıdır. Şekil 2.1’de görüleceği üzere vücudun farklı noktalarında yer alan bademcikler, lenf bezleri, kemik iliği, lenf düğümleri, dalak ve timüs gibi çok sayıda ve farklı özelliklere sahip yapılar bağışıklık sistemi organlarını meydana getirmektedir.



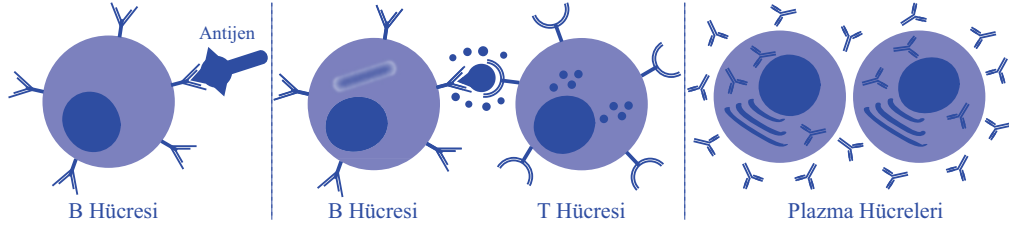
Şekil 2.1. İnsan vücudunda yer alan bağışıklık sistemi organları

Lenfoid yapıları olan bu organlar zararlı mikroorganizmaların taranması, tespit edilmesi ve yok edilmesi için gereken hücrelerin sentezlenmesinden sorumludurlar. Örneğin kemik iliği ve lenf düğümleri B ve T hücrelerinin merkezini oluştururken, dalak ve timüs, makrofaj ve fagositlerin merkezleri konumundadır [133, 134]. Vücudun sahip olduğu savunma mekanizmalarından antikolar, zararlı mikroorganizmaların ve virüslerin neden olduğu belirli bir hastalığı ortadan kaldırmakla görevli hücrelerdir [135]. Antikolar bir hastalıkla savaşarak iyileşme sürecini tamamladıktan sonra tamamen kaybolmaz ve kanın plazma denilen kısmında bulunmaya devam eder. Bahsedilen bu sürecin tamamı sağlıklı bireyler için geçerlidir ve sağlıklı bireyler için işleyiş oldukça farklıdır. Sağlıklı bir birey aynı hastalıktan hızla iyileşirken, sağlıklı bir bireyin iyileşme süreci daha uzun olabilir veya iyileşemeyerek durumu daha kötüye gidebilir. Bu durum her bireyin aynı seviyede bağışıklığa sahip olmadığına en önemli göstergesidir. Bağışıklık sistemi zayıf olan veya iyileşme süreci hızlandırılmak istenen bireyler için iyileşen bireylerin plazma sıvılarından faydalanma fikri ilk olarak difteri hastalığının tedavi edilmesi amacıyla 19.yüzyılda ortaya çıkmıştır [136]. Özellikle çocuklar için önemli sağlık sorunlarından olan difteri çok sayıda can alması nedeniyle tedavisi için çeşitli yöntemler denenmiştir. Hastalığı geçiren bireylerden alınan kanın transferiyle hastalığın şiddetinin azaldığı veya tamamen geçtiği görülmüş ve tarihte ilk kez immün plazma tedavi yöntemi uygulanarak tıp dünyasına konvelesan plazma veya immün plazma transfer yöntemi adıyla yeni bir tedavi yaklaşımı kazandırılmıştır [136, 137]. İmmün plazma transfer tekniği keşfedildiği

zamandan itibaren grip, kızamık ve hepatit gibi tarihi çok eskilere dayanan çeşitli enfeksiyon hastalıklarını tedavi edebilmek amacıyla kullanılmıştır. Bu hastalıkların yanı sıra 2002 yılında görülen SARS, 2012 yılında görülen MERS ve 2013 yılında görülen Ebola salgınları gibi yeni çıkan bir çok salgın hastalığın yayılma hızı ve etkinliğini azaltmanın yanı sıra hastalığa yakalanan bireylerin iyileştirilmesi amacıyla yaygın şekilde bu teknikten faydalanılmıştır [18, 136]. Büyük salgınlarda etkin olarak kullanılan immün plazma tedavi yöntemi son olarak 2019 yılında ortaya çıkan ve tüm dünyayı etkisi altına alarak ciddi can kayıpları yaşatan koronavirüs salgınının başlamasıyla dikkatleri yeniden üzerine toplamıştır. Tedavi yöntemlerinden biri olarak görülen bu yöntemin KOVİD-19 üzerinde etkinliğini araştırabilmek amacıyla klinik testlerine başlanmış, elde edilen olumlu sonuçların yanı sıra diğer salgın hastalıklarda da etkinliği kanıtlanmış bir yöntem olması tekniğin kendisine duyulan güveni artırarak koronavirüs pandemisinin tedavisi için de 2020 yılından itibaren kullanılmaya başlanmıştır [138]. Bu bölümde immün plazma tedavi yöntemine ait biyolojik temeller ve işleyiş prensibi anlatılacak ve bir metasezgisel algoritmanın işlem adımları ile olan benzerliği ortaya konulacaktır.

2.1.1. Biyolojik Temeller

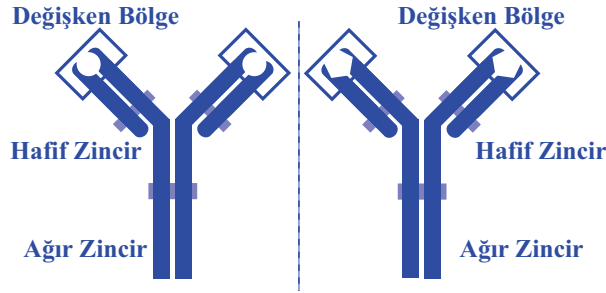
Doğada protein, peptid (amino asit zincir), polisakkarit (basit şeker zincir), lipid veya nükleik asit dahil olmak üzere çeşitli hallerde bulunabilen antijenler parazit, mantar, bakteri veya virüs gibi yabancı bir istilacı veya konak üzerinde enfeksiyona neden olabilen molekül olarak tanımlanabilir [139–141]. Bu yapılar insan üzerinde vücudun ilk savunma hattını oluşturan yüzey engellerini aştığında bağışıklık sistemini uyarmakta ve ilk olarak doğuştan gelen bağışıklık sistemi hücreleri tarafından yok edilmeye çalışılmaktadır. Doğal bağışıklık sistemi hücrelerinin antijeni nötralize etmede başarılı olamaması halinde ilgili antijenler tarafından vücutta bir enfeksiyon tetiklenmektedir. Bu aşamada bağışıklık sistemi, B ve T lenfositlerinin üretilmesinden ve olgunlaşmasından sorumlu olan lenfoid organlarının yardımıyla enfeksiyona neden olan antijenleri aramak ve yok etmek için bir dizi karmaşık savunma prosedürü başlatmaktadır [139–141]. Tüm sistemin edinilmiş bağışıklık tepkisinde ve konak canlıının bağışıklık hafızasının oluşmasında anahtar rol oynayan B ve T lenfositleri bu sürecin ana karakterleridir [139–141]. Timus anlamına gelen ve kısaca T hücreleri olarak adlandırılan edinilmiş



Şekil 2.2. B hücresinin T hücresi ile farklılaşarak plazma hücrelerinin oluşumunun gösterimi

bağışıklık sisteminin kendinden olmayan yapıları tanımada ve yanıt vermesinde etkili olan bu lenfositler timusta olgunlaştıkça, antijenle karşılaşmasından sonra bir T hücresi tarafından sinyal aldığıda antikor üretmekle görevli B hücreleri kemik iliğinde olgunlaşmaya devam etmektedir [139–141]. İnsan vücudunda lenflerde ve kanda dolaşan farklı tipteki B hücreleri, her biri kendine özgü protein yapılı B hücresi reseptörleri ile donatılmıştır ve bu reseptörler sayesinde spesifik bir antijene bağlanabilirler [139–141]. B lenfositleri belirli bir antijene bağlandığında, plazma hücresine dönüşmek, antikor üretebilmek ve bu sayede antijeni nötralize edebilmek amacıyla yardımcı T hücresi veya kısaca Th hücresi olarak ifade edilen bir tür T hücresini çağırır. Yardımcı T hücresi, B lenfositlerinin yakınında, B lenfositlerinin çoğalmasını ve lenfositlerin plazma hücrelerine dönüştürülmesini sağlayan interlökinler ve interferonlar olarak bilinen kimyasalları salgılamaktadır [139–141]. Şekil 2.2, bir B hücresinin spesifik bir antijene nasıl bağlandığını ve yardımcı T hücresi sayesinde plazma hücresine nasıl evrildiğini göstermektedir.

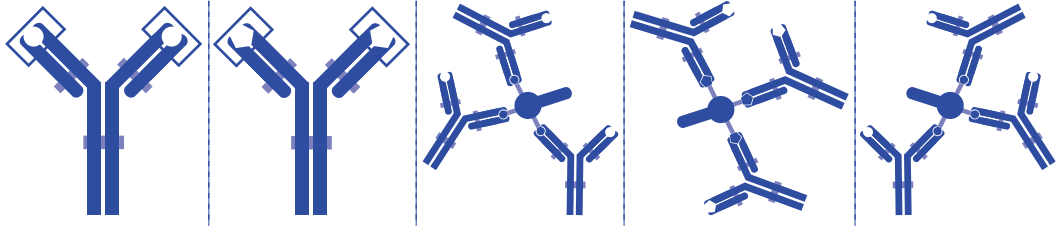
Aktif B hücrelerinden türetilen, büyük miktarlarda antikor üretmekten sorumlu olan ve efektör B lenfositleri olarak da bilinen plazma hücreleri, bağışıklık yanıtında öneme sahip bir tür beyaz kan hücresidir. İmmüoglobulin olarak adlandırılan antikorlar ise ,efektör B hücreleri tarafından üretilen, bakteri ve virüsler gibi istilacı patojenlerin yüzeyindeki spesifik antijenleri tanıyabilen ve bunlara bağlanabilen proteinlerdir [139–141]. Antikor hücrelerinin her biri, iki ağır ve iki hafif polipeptit zincirden oluşmaktadır. Ağır ve hafif zincirler kovalent bağlarla bağlanarak Şekil 2.3'te gösterildiği gibi Y şeklinde bir yapı meydana getirir [139–141]. Bir antikorun zincirleri, farklı bağışıklık sistemi hücrelerinin zarları gibi diğer yapıların bağlanmasından sorumlu olan sabit bölgeden ve belirli bir amino asit setine sahip, antikorların üretildiği ve belirli antijenlerin bağlanmasına yardımcı olan değişken bölge olmak üzere iki farklı bölümden oluşmaktadır



Şekil 2.3. Antikorun yapısı

[139–141]. Şekil 2.4’de iki farklı antikorun sabit ve değişken bölgeleri ve bunların spesifik antijenlerine nasıl bağlandıkları gösterilmektedir.

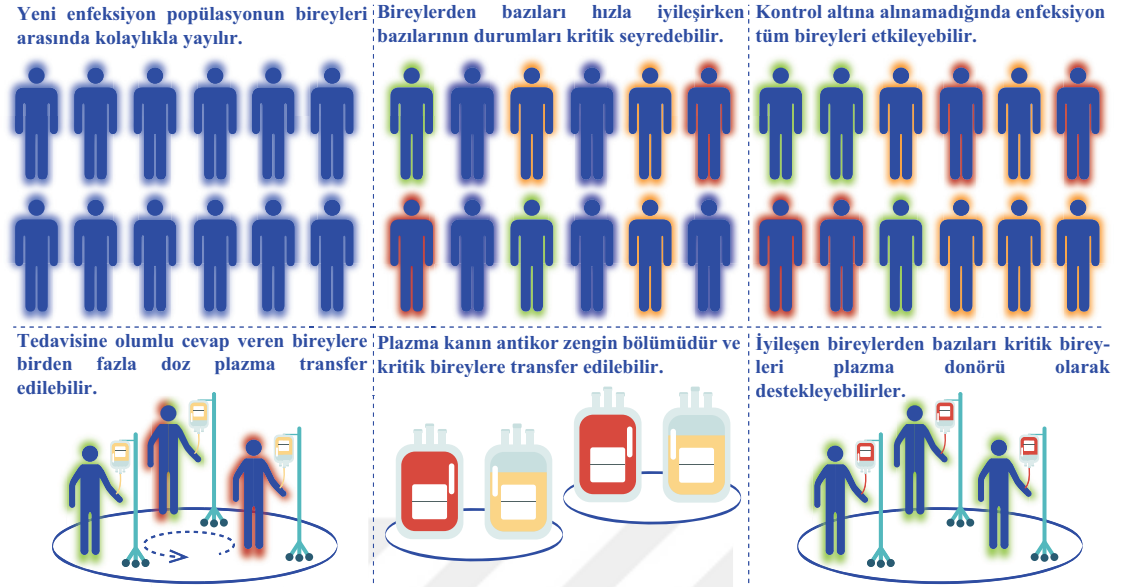
Antikorlar antijene bağlandıktan sonra, antijenin konak hücreleri enfekte etme yeteneğini bloke ederek veya diğer bağışıklık hücreleri tarafından yok edilmesini sağlamak amacıyla işaretleyerek nötralize edebilir. Bu durum plazma hücreleri tarafından üretilen antikorların antijeni yok etmek dışında diğer bağışıklık hücrelerinin antijeni tanınması ve hedef haline getirmesi amacıyla da kullanıldığının göstergesidir [139–142]. Bağışıklık sisteminin hafıza yanıtında da önemli görev üstlenen plazma hücreleri uzun ömürlü bellek hücreleri olarak da bilinen B hücrelerine dönüşebilmekte ve bu özellikleri sayesinde herhangi bir antijeni, canlıyı enfekte etmeden hızlı ve spesifik bir yanıt üreterek etkisizleştirebilmektedir. Bu durum bağışıklık sisteminin aynı patojenin neden olacağı enfeksiyona daha etkili bir yanıt vermesini sağlayarak konak canlının bağışıklık sistemini sonraki saldırılarda daha güçlü kılmakta ve enfeksiyonun neden olduğu etkileri en aza indirgeyerek enfeksiyona dair belirtileri henüz göstermeden kısa süre içerisinde vücudun normal haline dönmesini sağlamaktadır [139–142]. Bağışıklık sistemi tarafından daha önce hiç görülmemiş bir antijene karşı antikor yanıtı birkaç hafta içinde verilmektedir [139–141]. Bir enfeksiyon başladıktan sonra, enfeksiyona neden olan antijene özgü kanda bulunan antikorların sayısı yavaşça yükselir ve yaklaşık on gün civarında en yüksek değerine ulaşır ve bu andan sonra zamanla azalmaya başlar [139–141]. Canlı tamamen iyileşse dahi kandaki antikor seviyesi enfekte olmadan önceki orandan daha yüksektir ve bu durum bağışıklık sisteminin, aynı antijene karşı bir veya üç gün gibi çok daha kısa sürede fazla miktarda ve antijenle bağlanma gücü daha yüksek antikorlar üretebilmesini sağlamaktadır [139–141]. Buna karşın zayıf bağışıklık sistemine sahip veya bağışıklık sistemi hastalığı olan bazı kişiler, yeterli miktarda antikor üretemezler



Şekil 2.4. Antikor hücrelerinin özel olarak sentezlendikleri antijenlere bağlanması

[139–141]. Enfekte birey olarak nitelendirilen bu kişiler için, aynı enfeksiyonu daha önce geçirmiş ve iyileşmiş bireylerden alınan, kanın antikor bakımından zengin kısmı değerli bir kaynak olarak kullanılabilir [143, 144].

İmmün plazma tedavi yöntemi, bahsedilen biyolojik temelleri ve işlem adımları dikkatli bir şekilde incelendiğinde bir metasezgisel algoritmanın çalışma prensibine benzerliği ile öne çıkmaktadır. Enfeksiyonun bireyler arasında yayılması algoritmanın araştırma, iyileşen bireylerden alınan plazmanın kritik bireylere transferi ise algoritmanın mevcut çözümlerden faydalanma adımı ile ilişkilendirilebilir [18]. Konvelasan plazma transfer tedavi yönteminin işlem adımlarını referans olarak yeni bir metasezgisel algoritma Aslan tarafından 2020 yılında İmmün Plazma Algoritması adıyla literatüre kazandırılmıştır [18]. Her biri problemin olası çözümünü temsil eden bireylerden oluşan popülasyonda, gerçek hayatta olduğu gibi, enfeksiyonun yayılımı sonrası bireyler, bağışıklık seviyeleriyle orantılı biçimde enfeksiyona karşı özgün birer yanıt üretmektedir [18]. Benzer olarak IP algoritması çözümün kalitesini problem tanımına uygun bir şekilde oluşturulmuş amaç fonksiyon değeri ile ölçmekte ve elde edilen bu değer gerçek hayattaki bir bireyin sahip olduğu antikor seviyesine bağlı verdiği bağışıklık cevabını temsil etmektedir [18]. Herhangi bir bireyin amaç fonksiyon değeri popülasyondaki diğer bireylerden daha iyiye mevcut birey donör olarak seçilmektedir. Kaliteli veya uygun çözümleri temsil eden donör bireylerden alınan plazma, popülasyondaki durumu kritik diğer bir ifade ile amaç fonksiyon değeri kötü olan hasta bireylerin daha iyi bir duruma gelmesi için kullanılmaktadır. Bu sayede kötü çözümleri temsil eden hasta bireyler iyileşerek çözüm kalitesi yüksek popülasyon veya çözüm kümeleri oluşturulmaktadır. Enfeksiyonun yayılması, alıcı ve donör bireylerin amaç fonksiyon değerine bakılarak belirlenmesi, plazma transfer adımları daha önce belirlenen durdurma kriteri sağlanıncaya kadar devam etmektedir. Şekil 2.5'te immün plazma algoritmasının genel işlem



Şekil 2.5. IP algoritması işlem adımları

adımları yer almaktadır. Bölüm 2.1.2’de başlangıç popülasyonunun oluşturulması, bölüm 2.1.3’te enfeksiyonun popülasyon içinde yayılması bölüm 2.1.4’te sağlık durumu kritik bireylerin donörler aracılığıyla tedavisi ile algoritmanın işlem adımları tüm detaylarıyla anlatılmıştır.

2.1.2. Başlangıç Çözümlerinin Belirlenmesi

İmmün plazma algoritması popülasyon temelli bir algoritma olduğu için herhangi bir problemi çözebilmek adına her biri probleme özgü D farklı parametreye sahip bireylerden oluşan ve toplam birey sayısı PS olan başlangıç popülasyonuna ihtiyaç duymaktadır [18]. Popülasyon içerisinden seçilen k ’inci birey x_k ile gösterilirken bu bireyin D parametresinin j ’inci değerini temsilen x_{kj} notasyonu kullanılmaktadır. k parametresi $\{1, 2, 3, \dots, PS\}$ kümesinden sırayla seçilen bireyi ve j ise $\{1, 2, 3, \dots, D\}$ kümesinden x_k bireyinin sırayla seçilen parametre değerini temsil etmektedir. Bireye ait D kümesindeki her bir parametrenin alt ve üst sınırı bulunmaktadır. Parametre değerleri atanırken alt sınırı ifade eden x_j^{min} ve üst sınırı ifade eden x_j^{max} değer aralığı dikkate alınmaktadır.

$$x_{kj} = x_j^{min} + rand(0,1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (2.1)$$

Eşitlik 2.1’te görüleceği üzere bireyler oluşturulurken alt ve üst sınır değerlerinin dikkate alınmasının yanı sıra rassal bir şekilde arama yapabilmek için $rand(0,1)$ kullanılmakta ve bu sayede D kümesi elemanlarının her birinin değeri 0 ile 1 aralığında stokastik olarak belirlenmektedir [18]. Başlangıç çözümlerinin belirlenmesi ve IP algoritmasının diğer operasyonları için yapılandırılmasına ilişkin adımlar Alg. 2.1’de verilmiştir [18].

Algoritma 2.1 IP algoritmasında başlangıç çözümlerinin üretilmesi

```

1: Assign values to  $PS$ ,  $D$ ,  $NoD$  and  $NoR$  control parameters
2: Set  $x_{best}$  as a  $D$ -dimensional empty vector
3: Select  $t_{max}$  and set  $t_{cr}$  to 0
4: for  $k \leftarrow 1 \dots PS$  do
5:    $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$ 
6:   for  $j \leftarrow 1 \dots D$  do
7:      $x_{kj} \leftarrow$  initialize  $j$ th parameter of  $x_k$  using Eq. (2.1)
8:   end for
9:   if  $k == 1$  then
10:    Set  $x_{best}$  to  $x_k$ 
11:   else
12:     if  $f(x_k) < f(x_{best})$  then
13:       Update  $x_{best}$  with  $x_k$ 
14:     end if
15:   end if
16: end for

```

2.1.3. Enfeksiyonun Yayılması

Bir popülasyonun içerisinde enfeksiyonun yayılması farklı şekillerde olmaktadır. Başlıca yayılma çeşitleri doğrudan temas, dolaylı temas ve solunum ile bulaşma olmak üzere üç ana kategoride incelenebilir. Her bir bulaşma çeşidi, bir popülasyonda enfeksiyonun bireyler arasında yayılmasına etki edebilen farklı özelliklere sahip olsa da belirli bir sürenin sonunda popülasyondaki diğer bireylerin enfekte olması ortak özellik olarak karşımıza çıkmaktadır [145]. İmmün plazma algoritması bu yayılımı modellemek için Eşitlik 2.2’den faydalanmaktadır [18].

$$x_{kj}^{inf} = x_{kj} + rand(-1,1)(x_{kj} - x_{mj}) \quad (2.2)$$

Eşitlik 2.2’de yer alan x_{kj} ve x_{mj} popülasyon içerisinde yer alan sırasıyla k ’ncı ve m ’inci bireyin $\{1, 2, 3, \dots, D\}$ kümesinden rastgele belirlenen j ’inci parametresinin değerini ifade etmektedir. Popülasyon içerisinde k değeri $\{1, 2, 3, \dots, PS\}$ kümesinden

sırayla seçilirken, m rastgele ve k 'dan farklı olacak şekilde belirlenmektedir [18]. x_k bireyinin enfekte olduktan sonraki j 'inci parametresinin değeri x_{kj}^{inf} ile gösterilmektedir. Bireyin enfeksiyon öncesi ve enfeksiyon sonrası bağışıklık yanıtını diğer ifade ile çözüm uygunluğu veya kalitesini ölçebilmek için IP algoritması problem tanımına uygun olarak tanımlanmış amaç fonksiyonundan (f) faylanmakta olduğu daha önce bahsedilmiş idi. Algoritma mevcut çözümlerin sonuçlarını karşılaştırmak için x_k bireyinin enfeksiyon yayılımı öncesi bağışıklık cevabı $f(x_k)$ ile, enfeksiyon yayılımı sonrası aynı bireyin bağışıklık yanıtını $f(x_{kj}^{inf})$ Eşitlik 2.3'te görüleceği şekilde karşılaştırma yapmakta ve k 'ncü bireyin sadece j 'inci parametresinin yeni değerini aç gözlü seçimle belirlemektedir. Enfekte olan veya j 'inci parametresi değişmiş bireyin amaç fonksiyon değeri aynı bireyin enfeksiyon öncesi amaç fonksiyon değerinden küçükse yani bağışıklığı daha yüksekse k 'ncü bireyin j 'inci parametresi enfekte bireyin j 'inci parametresiyle değiştirilir. Eğer bu durum tam tersiyse bireyin bağışıklık hafızası güncellenmez. Bağışıklık hafızası güncellenirken sadece j 'inci parametre üzerinde güncelleme olur veya olmaz, bireyin diğer parametreleri bu değişimden etkilenmemektedir.

$$x_{kj} = \begin{cases} x_{kj}^{inf}, & \text{eger } f(x_k^{inf}) < f(x_k) \\ x_{kj}, & \text{eger } f(x_k^{inf}) \geq f(x_k) \end{cases} \quad (2.3)$$

IP algoritmasında enfeksiyonun yayılması ile ilgili işlem adımları Alg.(2.2)'de verilmiştir [18].

Algoritma 2.2 IP algoritmasında enfeksiyonun yayılması

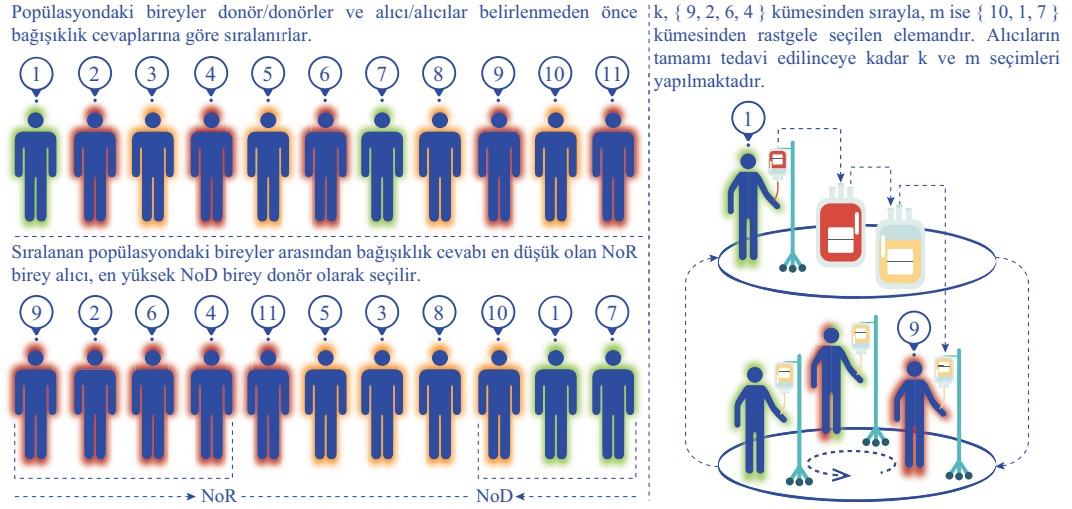
```

1: for  $k \leftarrow 1 \dots PS$  do
2:   if  $t_{cr} < t_{max}$  then
3:      $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$ 
4:      $x_k^{inf} \leftarrow \text{infect } x_k \text{ with } x_m \text{ using Eq. (2.2)}$ 
5:     if  $f(x_k^{inf}) < f(x_k)$  then
6:       Update  $x_k$  with  $x_k^{inf}$  as described in Eq. (2.3)
7:       if  $f(x_k) < f(x_{best})$  then
8:         Update  $x_{best}$  with  $x_k$ 
9:       end if
10:    end if
11:  end if
12: end for

```

2.1.4. Donör ve Alıcı Bireylerin Seçilmesi ve Plazma Tedavisinin Uygulanması

IP algoritmasının araştırma performansını artırabilmek adına stokastik değişimlerin başlangıç çözümlerine uygulanarak çözüm kümesinin çeşitliliğinin artırılmasıyla diğer



Şekil 2.6. Donör ve alıcı bireylerin seçimi

bir ifade ile popülasyon içerisinde yer alan tüm bireylerin enfeksiyonla karşılaşmasıyla popülasyon, algoritmanın faydalandığı plazma transferi için uygulanabilir hale gelmektedir. Bir metasezgisel algoritmanın problem tanımına uygun, kaliteli çözüm üretme performansını artırabilmek için araştırma ve mevcut çözümlerden faydalanma adımları arasında denge kuracak şekilde kontrol parametrelerinin ayarlanması gereklidir. Bu amaçla IP algoritmasında donör birey sayısı (*Number of Donors, NoD*) ve alıcı birey sayısı (*Number of Receivers, NoR*) adı altında iki farklı kontrol parametresinden faydalanılmaktadır [18].

$$x_{kj}^{rcv-p} = x_{kj}^{rcv} + rand(-1, 1)(x_{kj}^{rcv} - x_{mj}^{dnr}) \quad (2.4)$$

Donör bireyleri ve alıcı bireyleri seçebilmek için algoritma popülasyon içerisinde yer alan tüm bireylerin enfeksiyon karşısındaki bağışıklık yanıt seviyesini veya amaç fonksiyon değerlerini karşılaştırmaktadır. Bağışıklık seviyesi en yüksek yani amaç fonksiyon değeri en düşük olan *NoD* sayıdaki bireyi donör olarak belirlerken, bağışıklık seviyesi en düşük olan diğer bir ifadeyle amaç fonksiyon değeri en yüksek olan *NoR* tane bireyi alıcı olarak seçmektedir. Bu işlem Şekil 2.6'de özetlenmiştir. Donör ve alıcı bireylerin belirlenmesiyle birlikte plazma tedavisi Eşitlik 2.4'te tanımlanan matematiksel modele bağlı bir şekilde uygulanmaya başlanmaktadır [18].

Eşitlik 2.4'te x_k^{rcv} *NoR* kümesinden seçilen alıcı bireyi, x_m^{dnr} *NoD* kümesinden rastgele

seçilen m indisli donör bireyi temsil etmektedir. Eşitlikte yer alan k 'inci alıcı bireyin j 'inci parametresinin plazma tedavisi öncesindeki durumu x_{kj}^{rcv} ile ifade edilirken tedavi sonrası aynı bireyin parametre değeri x_{kj}^{rcv-p} ile gösterilmektedir [18]. Bu tanımdan anlaşılacağı üzere ilgili bireyin tedavi öncesi ve tedavi sonrası durumu sırasıyla x_k^{rcv} ve x_k^{rcv-p} ile gösterilmiştir. x_k^{rcv} bireyi ile x_m^{dnr} bireyi arasında ilk doz plazma naklinin gerçekleşmesinin ardından alıcı bireyin bağışıklık seviyesi f amaç fonksiyonu ile ölçülmektedir. Tedavi sonrası bağışıklık cevabı olan $f(x_k^{rcv-p})$ değeri ile tedavi öncesi bireyin bağışıklık yanıtı olan $f(x_k^{rcv})$ karşılaştırılır ve eğer plazma tedavisi uygulanan bireyin amaç fonksiyon değeri bireyin tedavi öncesi amaç fonksiyon değerinden küçükse x_k^{rcv} , x_k^{rcv-p} ile güncellenir ve ikinci doz plazma tedavisine hazırlanılır. Plazma nakline donör birey alıcı bireyin bağışıklık cevabını güçlendirdiği sürece devam edilir [18]. Fakat ilk doz plazma nakli sonucu $f(x_k^{rcv-p})$ değerinin $f(x_k^{rcv})$ değerinden büyük olması yani tedavinin bireyin bağışıklık cevabı üzerinde olumlu etki edememesi durumunda x_k^{rcv} , x_m^{dnr} ile güncellenir ve tedavi bu birey için sonlandırılır [18]. Bu sayede popülasyondaki her bireyin bağışıklık cevabı diğer bir ifade ile çözüm kalitesi veya uygunluğu iyileştirilebilmektedir. IPA için plazma transfer operasyonları Alg.(2.3)'te özetlenmiştir [18].

Algoritma 2.3 IP algoritmasında plazma transfer işlemleri

```

1:  $doseControl[1 \dots NoR], treatmentControl[1 \dots NoR] \leftarrow$  set each element to 1
2:  $dIndexes[1 \dots NoD], rIndexes[1 \dots NoR] \leftarrow$  get the indexes of donors and receivers
3: for  $i \leftarrow 1 \dots NoR$  do
4:    $k \leftarrow rIndexes[i]$  and  $m \leftarrow$  a random element from  $dIndexes$ 
5:    $x_k^{rcv}, x_m^{dnr} \leftarrow$  get the  $k$ th and  $m$ th individuals from the population
6:   while  $treatmentControl[i] == 1$  do
7:     if  $t_{cr} < t_{max}$  then
8:        $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$  and  $x_k^{rcv-p} \leftarrow$  plasma treatment to  $x_k^{rcv}$  with  $x_m^{dnr}$  using Eq. (2.4)
9:       if  $doseControl[i] == 1$  then
10:        if  $f(x_k^{rcv-p}) < f(x_m^{dnr})$  then
11:           $doseControl[i] \leftarrow doseControl[i] + 1$  and update  $x_k^{rcv}$  with  $x_k^{rcv-p}$ 
12:        else
13:          Update  $x_k^{rcv}$  with  $x_m^{dnr}$  and set  $treatmentControl[i]$  to 0
14:        end if
15:      else
16:        if  $f(x_k^{rcv-p}) < f(x_k^{rcv})$  then
17:          Update  $x_k^{rcv}$  with  $x_k^{rcv-p}$ 
18:        else
19:          Set  $treatmentControl[i]$  to 0
20:        end if
21:      end if
22:      Update  $x_{best}$  with  $x_k^{rcv}$  if  $f(x_k^{rcv}) < f(x_{best})$ 
23:    end if
24:  end while
25: end for

```

2.1.5. Donör Bireylerin Bağışıklık Hafızasının Güncellenmesi

Bireyin bağışıklık sistemi daha önce bahsedildiği üzere antijenle karşılaşmasının ardından antikor üreterek bu hastalıkla savaşmanın yanında aynı antijenle bir sonraki karşılaşmada daha hızlı ve spesifik yanıt üretebilmek için uzun süreli bellek hücreleri olan B hücreleri üzerinde ilgili antijene özgü bilgiler saklamaktadır. Ayrıca hastalık sonrası bireyin kanındaki antikor seviyesi gün geçtikçe azalmakta fakat hastalık öncesi miktarından daha yüksek bir seviyedeysen azalışını durdurmaktadır. Bu durum bireyin bağışıklık hafızasının güncellendiğinin göstergesidir. IP algoritmasında alıcı bireylerin hafızası donör bireyler kullanılarak güncellenirken donör bireylerin hafızasının gerçek hayattaki gibi güncellenebilmesi için ek işleme ihtiyaç duyulmaktadır. IP algoritması donör bağışıklık hafızasını güncelleyebilmek için Eşitlik 2.5'ten faydalanmaktadır [18].

$$x_{mj}^{dnr} = x_{mj}^{dnr} + rand(-1, 1)x_{mj}^{dnr} \quad (2.5)$$

Donör hafızası güncellenmesi için algoritmanın anlık iterasyon sayısının maksimum iterasyon sayısına oranı (t_{cr}/t_{max}) ve 0 ile 1 arasında rassal sayı üreticinin sağladığı değer karşılaştırılır. Rassal sayı üreticinden alınan değer iterasyon sayısı oranından küçükse donör bağışıklık hafızası Eşitlik 2.5 dikkate alınarak güncellenir. Tam tersi durumda donör bağışıklık hafızası Eşitlik 2.1'den faydalanılarak yeniden oluşturulur [18]. Bu kısımda anlık iterasyon sayısı olan t_{cr} değerinin maksimum iterasyon sayısı olan t_{max} 'a yaklaştıkça oranın 1'e yaklaşacağına ve rassal sayı üreticinin oluşturacağı değerden büyük olacağına dikkat edilmelidir.

Algoritma 2.4 IP algoritmasında donörler hafızasının kontrolü ve güncellenmesi

```

1: for  $i \leftarrow 1 \dots NoD$  do
2:   if  $t_{cr} < t_{max}$  then
3:      $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$ 
4:      $m \leftarrow dIndices[i]$ 
5:      $x_m^{dnr} \leftarrow$  get the  $m$ th individual from the population
6:     if  $(t_{cr}/t_{max}) < rand(0, 1)$  then
7:       Update  $x_m^{dnr}$  using Eq. (2.1)
8:     else
9:       Update  $x_m^{dnr}$  using Eq. (2.5)
10:    end if
11:    if  $f(x_m^{dnr}) < f(x_{best})$  then
12:      Update  $x_{best}$  with the  $x_m^{dnr}$ 
13:    end if
14:  end if
15: end for

```

Bu durumda iterasyon sayısı arttıkça donör bağışıklık hafızası Eşitlik 2.5 yerine Eşitlik 2.1'den daha fazla yararlanarak güncellenecektir. IP algoritmasının donörlerin bağışıklık hafızası kontrolü amacıyla gerçekleştirdiği işlemler Alg.(2.4)'te özetlenmiştir [18].

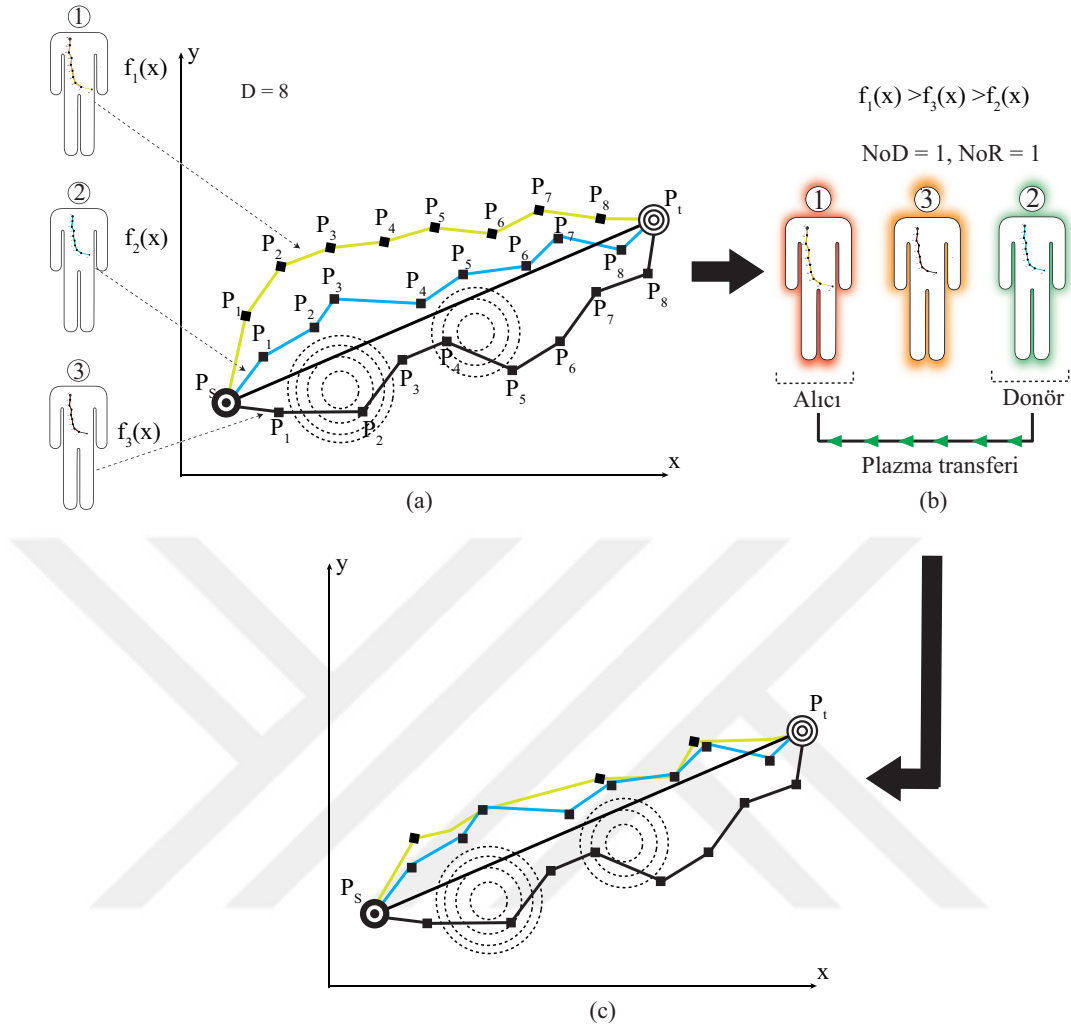
2.2. İmmün Plazma Algoritması ile Sabit İrtifada Güzergah Planlama Probleminin Çözümü

Bu bölümde IP algoritmasının 1.Bölüm'de tanımlanan savaş alanı modeli dikkate alınarak oluşturulan senaryolarda farklı değerlere sahip D ile gösterilen bölümlene nokta sayısı, popülasyondaki birey sayısı veya popülasyon büyüklüğü PS , NoD ve NoR kontrol parametreleri ile bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan savaş alanlarının özellikleri

Snry.	Düşman unsur merkezleri	Düşman unsur yarıçapları
1	(52,52),(32,40),(12,48),(36,26), (80,60),(63,56),(50,42),(30,70)	10,10,8,12, 9,7,10,10
2	(0,200),(200,0),(50,50),(95,95), (150,150),(95,50),(50,95),(140,105),(105,140)	90,90,20,20, 20,20,20,20,20
3	(30,20),(50,15),(65,55),(0,24), (50,80),(75,90),(100,70),(50,36)	10,21,10,17, 27,10,20,11
4	(59,52),(55,80),(27,58),(24,33), (12,48),(70,65),(70,34),(70,30)	10,9,9,9, 12,7,12,10
5	(45,50),(12,40),(32,68),(36,26),(58,80)	10,10,8,12,9
Snry.	Etki katsayıları	Başlangıç ve bitiş noktaları
1	2,10,1,2,3,5,2,4	(11,11)-(75,75)
2	7,7,5,55,6,5,6,5	(0,0)-(200,200)
3	5,5,5,5,5,5,5	(0,0)-(100,100)
4	9,7,3,12,1,5,13,2	(10,15)-(80,75)
5	2,10,1,2,3	(10,10)-(55,100)

IP algoritmasının probleme uygulanması için kurulan analogi Şekil 2.7 üzerinde görsel olarak anlatılmıştır. Buna göre popülasyon büyüklüğü 3, problem parametre sayısı 8, donör ve alıcı birey sayısı 1 olarak belirlenen problem çözümünde, popülasyonda bulunan her bir birey savaş alanında 8 farklı durak veya bölümlene noktasından oluşturulan güzergahı, bireylerin bağışıklık seviyesi ise güzergahın toplam yol ve düşman maliyetine göre hesaplanan amaç fonksiyonunu, donör birey, yol ve düşman maliyeti en düşük olan güzergahı ve durumu kritik birey ise amaç fonksiyon değeri en yüksek güzergahı temsil etmektedir. Algoritma performansının analizi için farklı özelliklerde savaş alanı senaryoları oluşturulmuş ve senaryolara ait düşman unsurlarının sayısı, konumu, yarıçapları ve etki katsayısı değerleri gibi detaylar Tablo 2.1'de verilmiştir. Tablo 2.1'de detayları verilen ilk üç senaryoda IP algoritmasının İHA için en uygun



Şekil 2.7. Başlangıç çözümlerinin oluşturulması ve güzergah amaç fonksiyonlarının hesabı (a), alıcı ve donör bireylerin belirlenmesi ve plazma transferinin gerçekleştirilmesi (b) ve tedavi sonrası güzergah kalitesindeki değişim (c)

güzergahı bulmadaki performansı popülasyon büyüklüğü 30 iken, bölümlere veya durak nokta sayısı sırasıyla 20, 30 ve 50 için Senaryo-1’de maksimum değerlendirme sayısı (evaluation) 30000, Senaryo-2 ve 3 için maksimum değerlendirme sayısı 60000 olarak belirlendikten sonra analiz edilmiştir. IP algoritmasının kontrol parametre değerlerinin üretilen güzergahların kalitesi üzerindeki etkisi ise her bir senaryo için farklı NoD ve NoR parametreleri atanarak incelenmiştir. Savaş alanı senaryolarında farklı D , NoD ve NoR parametreleri kullanılarak oluşturulan her bir kombinasyon için işlemcinin rastgele belirlenen çekirdeklerinde algoritma 50 defa test edilmiştir. Elde edilen amaç fonksiyonunun en iyi, ortalama (ort.) ve standart sapma (std.) değerleri Tablo 2.2 - 2.4’te gösterilmiştir.

Tablo 2.2. Senaryo-1 için farklı NoD ve NoR değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar

D	NoD	NoR								
		1			2			3		
		Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.
20	1	48.2319	48.1616	0.0437	49.0117	48.3179	0.4513	49.8792	48.2602	3.0970
	2	65.9716	65.1394	0.2919	48.3190	48.1836	0.1033	49.2718	48.2809	2.2293
	3	67.7699	65.9759	0.9997	65.5577	64.8491	0.3110	50.0383	48.1873	4.6156
30	1	49.2763	48.6172	0.4705	55.1105	49.2285	5.9986	55.5182	49.6129	6.2791
	2	70.6333	68.6665	0.7774	50.6522	48.8020	3.0313	54.5388	49.6319	6.2856
	3	71.7868	69.9048	0.5546	70.3740	67.2935	1.1929	53.3433	48.5054	5.7887
50	1	59.2210	52.5388	4.9574	75.0557	58.4946	7.2165	72.4613	59.2551	7.5953
	2	72.9559	72.2652	0.5504	64.4036	53.0690	5.8789	73.0317	58.5722	8.1109
	3	73.3316	72.4287	0.7154	73.1198	72.1902	1.0792	68.0509	57.0091	4.5125

Tablo 2.3. Senaryo-2 için farklı NoD ve NoR değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar

D	NoD	NoR								
		1			2			3		
		Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.
20	1	151.8216	151.5070	0.3416	153.5760	151.7239	1.0252	153.8970	151.8493	1.4582
	2	171.2314	167.9893	1.1237	151.9226	151.5094	0.4551	153.4174	151.5258	1.2732
	3	175.7363	172.6559	0.9633	170.4977	167.9327	1.0831	152.3888	151.5089	0.5680
30	1	151.4656	149.7567	1.2959	155.9699	149.8744	2.7777	156.0569	149.8840	2.7201
	2	179.5788	178.0062	0.7989	152.0319	149.7611	1.2527	155.3552	150.2475	2.3366
	3	183.0513	179.2559	1.2475	178.9587	177.4214	0.6590	153.3080	149.8575	2.1567
50	1	157.2868	153.2208	1.6836	163.9039	153.8248	2.6772	164.3140	159.5709	2.8961
	2	187.7034	185.2959	1.0514	159.6111	156.2627	1.4365	163.9979	155.8706	3.1266
	3	192.3584	188.0203	2.0225	187.2086	184.8697	1.8756	161.1845	155.9191	1.9563

Tablo 2.4. Senaryo-3 için farklı NoD ve NoR değerleri ile IP algoritmasının elde ettiği sonuçlar

D	NoD	NoR								
		1			2			3		
		Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.	Ort.	En iyi	Std.
20	1	71.1104	71.1085	0.0015	71.5947	71.1257	1.3828	71.7302	71.1175	1.4012
	2	72.4711	71.7404	0.3209	71.1132	71.1086	0.0061	71.2282	71.1141	0.2042
	3	74.4063	72.0898	0.8540	72.1470	71.7720	0.1799	71.1195	71.1089	0.0152
30	1	71.2047	71.1755	0.0148	74.0925	71.2911	4.0829	74.3455	71.2891	4.1995
	2	76.8241	75.3992	0.7909	71.2295	71.1812	0.0390	71.9757	71.2507	1.6593
	3	78.9388	76.5958	0.7829	76.1202	74.0968	1.0878	71.2699	71.1855	0.0687
50	1	72.5196	71.2839	2.0644	80.8122	72.0051	6.4799	80.5769	72.0393	6.1306
	2	80.9848	79.7659	0.5169	74.6378	71.4043	2.7478	79.8865	72.7232	6.2692
	3	81.4948	80.4115	0.2408	80.8212	79.7699	0.6261	76.2897	71.5116	2.6236

IP algoritmasının PS parametresindeki değişimin üretilen güzergahların kalitesi ve algoritmanın çalışma performansı üzerindeki etkisi testlerin diğer odak noktasını oluşturmaktadır. İlk üç senaryo için popülasyon büyüklüğüne sırasıyla 20, 30, 40, 50, 75 ve 100 değerleri atanarak denemeler yapılmış ve NoD ve NoR parametreleri 1 için her bir D ve PS konfigürasyonu ile algoritma 50 kez çalıştırılmıştır. En iyi, ortalama

Tablo 2.5. Senaryo-1 için farklı PS ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar

D		PS					
		20	30	40	50	75	100
20	Ort.	48.1953	48.2319	48.2720	48.3582	48.6678	49.0673
	En iyi	48.1540	48.1616	48.1852	48.2144	48.3120	48.5058
	Std.	0.0291	0.0437	0.0500	0.0858	0.1492	0.2655
30	Ort.	48.8559	49.2763	49.7266	50.2445	51.8324	54.6005
	En iyi	48.2762	48.6172	48.8068	49.3107	50.1359	51.1387
	Std.	0.4978	0.4705	0.4238	0.5413	0.8447	1.4277
50	Ort.	57.7348	59.2210	62.5364	65.6411	73.3259	82.8569
	En iyi	51.8389	52.5388	55.0364	59.7731	67.3284	70.7021
	Std.	6.7038	4.9574	3.9755	3.2202	2.9251	4.5597

Tablo 2.6. Senaryo-2 için farklı PS ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar

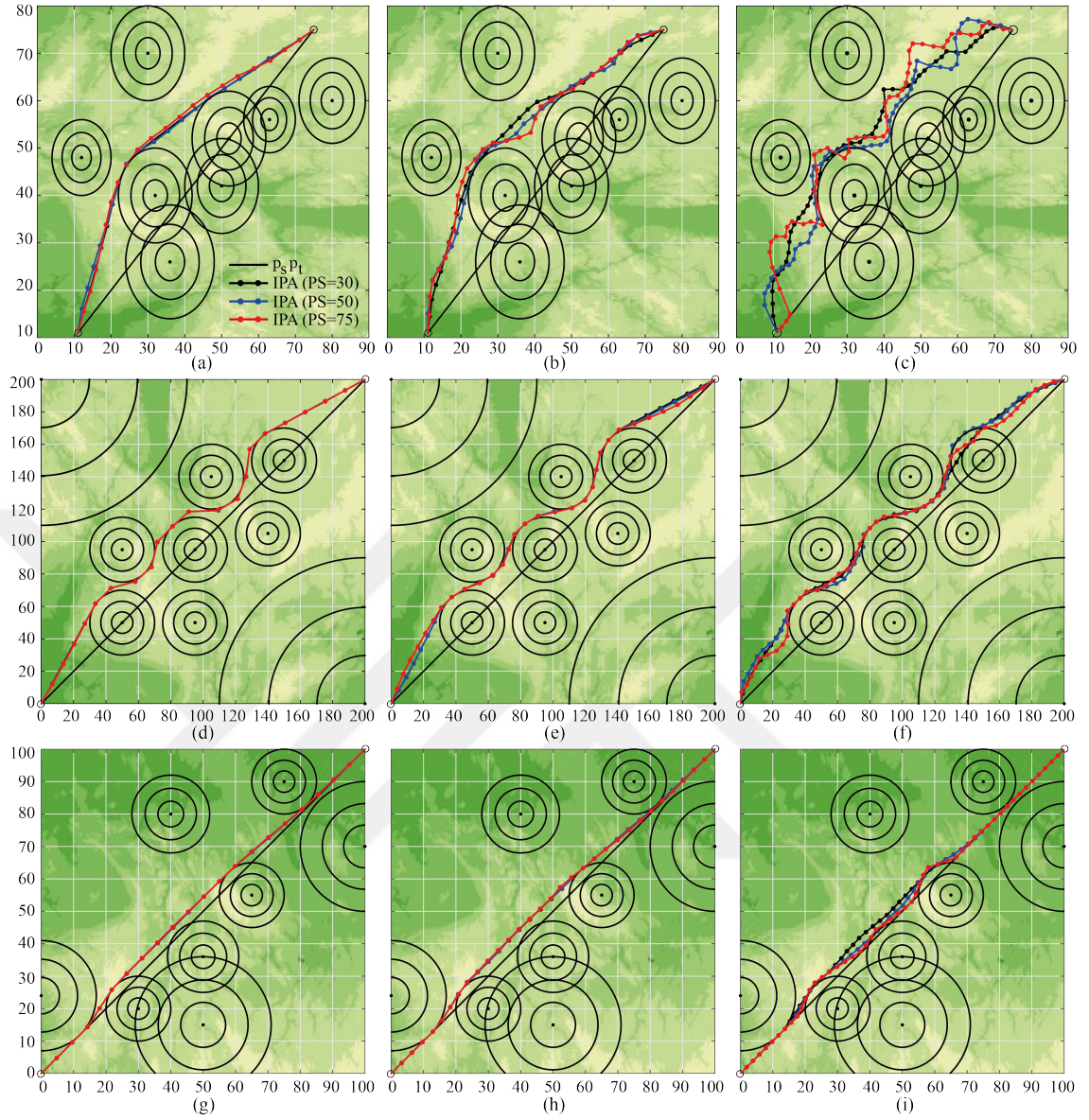
D		PS					
		20	30	40	50	75	100
20	Ort.	151.8954	151.8216	151.8034	151.7399	152.0597	152.2118
	En iyi	151.4947	151.5070	151.5074	151.5079	151.5504	151.6773
	Std.	0.4055	0.3416	0.3161	0.2416	0.4470	0.4915
30	Ort.	150.4253	151.4656	151.4515	151.9439	152.8918	154.4699
	En iyi	149.7274	149.7567	149.8131	149.8381	150.1309	151.7681
	Std.	1.0809	1.2959	1.3542	1.3821	1.4068	1.1615
50	Ort.	156.8027	157.2868	158.8664	159.2972	162.1439	164.3716
	En iyi	152.9837	153.2208	154.9953	153.4853	159.2212	160.8802
	Std.	1.3835	1.6836	1.5020	1.7711	1.1654	1.3426

Tablo 2.7. Senaryo-3 için farklı PS ile IPA tarafından elde edilen sonuçlar

D		PS					
		20	30	40	50	75	100
20	Ort.	71.1098	71.1104	71.1118	71.1147	71.1258	71.1474
	En iyi	71.1084	71.1085	71.1088	71.1090	71.1129	71.1276
	Std.	0.0014	0.0015	0.0055	0.0075	0.0118	0.0128
30	Ort.	71.1857	71.2047	71.2176	71.2556	71.3626	71.5859
	En iyi	71.1738	71.1755	71.1863	71.1831	71.2356	71.3629
	Std.	0.0129	0.0148	0.0249	0.0455	0.0746	0.2072
50	Ort.	71.9346	72.5196	73.3777	73.5816	75.6954	77.5008
	En iyi	71.2039	71.2839	71.4671	71.4354	72.3649	72.8972
	Std.	1.4647	2.0644	2.0500	1.9010	2.1039	2.4940

ve standart sapma değerleri Tablo 2.5 - 2.7'de gösterilmiştir. Sonuçlar analiz edildiğinde en uygun PS değerinin mevcut senaryolar ve konfigürasyonlarda 20 ve 30 aralığında olduğu görülmüştür. Bu durumun temel sebebi ise yüksek PS değerinin algoritmanın daha iyi sonuçlara ulaşmasını sağlayan araştırma adımı için daha az değerlendirme sayısı ayırmasına neden olmasıdır. Değişen PS büyüklüğü karşısında IPA tarafından oluşturulan güzergahlar ilk üç senaryo için görsel olarak Şekil 2.8'de sunulmuştur.

IP algoritmasının güzergah planlama probleminde kabul edilebilir çözümler sunduğunu



Şekil 2.8. Senaryo-1 D parametresi 20 (a), 30 (b), 50 (c) için , Senaryo-2 D parametresi 20 (d), 30 (e), 50 (f) için, Senaryo-3 D parametresi 20 (g), 30 (h), 50 (i) için IPA tarafından bulunan en iyi güzergahlar

doğrulamak için iyi bilinen bazı metasezgisel algoritmalarla aynı senaryolar üzerinde karşılaştırmalar yapılmalıdır. IP yönteminin NoD ve NoR değerleri 1 iken ABC algoritması ve ABC algoritmasının varyantları olan I-ABC, IF-ABC ve BE-ABC algoritmaları ile karşılaştırılmıştır [90]. Algoritmaların aynı koşullar altında çalıştığını doğrulamak amacıyla IPA başlangıç çözümü sayısı 30, maksimum değerlendirme sayısı Senaryo-1 için 30000 ve Senaryo-2, 3 için 60000 olarak belirlenmiştir. Karşılaştırılan metasezgisellerin sıralaması, en iyi amaç fonksiyonu değerlerinin ortalaması dikkate alınarak belirlenmiştir. Bir algoritmanın ortalama sırası, sahip olduğu sıraların

ortalamasını temsil etmektedir. Karşılaştırılan metasezgisel algoritmaların genel sıralarını belirlemek için hesaplanan ortalama sıralar kullanılmıştır. En küçük ortalama sıraya sahip algoritmanın bütün sıralamadaki yeri birdir. Tablo 2.8 - 2.10'da belirtilen ortalama en iyi amaç fonksiyon değerlerine göre 50 bağımsız koşmadan sonra IPA, diğer algoritmalarla karşı ilk üç senaryoda 9 farklı durumda üstünlük sağlamıştır. Bunun yanında, yapılan testler IP algoritmasının bu dokuz durumun sekizinde ABC algoritmasının standart versiyonundan daha iyi olduğu ayrıca BE-ABC varyantından da dokuz testin altısında daha başarılı olduğu görülmüştür. BE-ABC tekniği rakiplerine karşı sadece Senaryo-1 ve Senaryo-2 için problemin parametre sayısı 50 iken ayrıca Senaryo-3 için D değeri 30 iken daha iyi sonuçlar üretebilmiştir. Buna rağmen IP algoritmasının çözüm kalitesini koruduğuna ve ABC tabanlı algoritmalarla karşı Senaryo-1'de durak nokta sayısı 50 ve Senaryo-3'te durak nokta sayısı 30 olmasına rağmen hala en iyi ikinci güzergah planlaması yapabilen teknik olarak öne çıkmaktadır. IP algoritmasının 1. ve 2. olduğu test senaryoları incelenerek algoritmanın plazma tedavi aşamasının problem çözmedeki etkinliği anlaşılabilir. Problem parametre sayısının veya bölümlene nokta sayısının düşük olduğu durumlarda algoritmanın daha kararlı çalıştığı ve daha iyi güzergahlar ürettiği görülmektedir. Bu durumda algoritmanın parametre değerlerinin değişkenlik göstermesi de üretilen güzergahların kalitesini olumlu etkilemiştir. Bölümlene nokta sayısının düşük olması ardışık iki nokta arasındaki güzergaha ait parçanın, nokta sayısının yüksek olduğu durumdakine göre daha uzun olacağı anlaşılmaktadır. Bu sayede IPA, daha az işlem yüküyle hızlı işlem yaparak daha kaliteli ve güvenli yollar oluşturabilmektedir.

Tablo 2.8. Senaryo-1 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

D		IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	48.2319	49.8813	54.3889	49.7975	48.9558
	Std.	0.0437	0.5976	3.6656	0.6393	0.5957
	Sıra	1	4	5	3	2
30	Ort.	49.2763	52.9887	60.4591	51.9396	50.4567
	Std.	0.4705	1.4259	3.2883	1.3434	0.6726
	Sıra	1	4	5	3	2
50	Ort.	59.2210	59.9722	80.1747	59.9569	54.9826
	Std.	4.9574	2.9133	7.7575	2.2149	2.2310
	Sıra	2	4	5	3	1
Ort. Sıra		2.0000	4.3333	5.0000	3.6667	2.3333
Genel Sıra		1	4	5	3	2

İlk üç senaryo kullanılarak IPA, ABC, I-ABC, IF-ABC ve BE-ABC algoritmaları

Tablo 2.9. Senaryo-2 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	151.8216	161.7459	171.6983	160.1839	160.0276
	Std.	0.3416	2.5523	2.1826	0.9241	1.5195
	Sıra	1	4	5	3	2
30	Ort.	151.4656	154.9276	185.7927	153.5837	153.4103
	Std.	1.2959	2.5123	3.7547	0.4925	0.5549
	Sıra	1	4	5	3	2
50	Ort.	157.2868	157.2044	164.9908	157.8147	153.5245
	Std.	1.6836	3.6031	2.8118	1.9058	1.0479
	Sıra	3	2	5	4	1
Ort. Sıra		1.6667	3.3333	5.0000	3.3333	1.6667
Genel Sıra		1	2	5	2	1

Tablo 2.10. Senaryo-3 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	71.1104	73.5090	73.7209	73.0254	72.8889
	Std.	0.0015	0.2486	0.4729	0.1079	0.1403
	Sıra	1	4	5	3	2
30	Ort.	71.2047	73.9346	74.8452	73.6928	70.0789
	Std.	0.0148	1.0134	0.8904	0.4083	0.4634
	Sıra	2	4	5	3	1
50	Ort.	72.5196	78.8720	81.8885	77.4828	75.8906
	Std.	2.0644	3.1422	2.7718	2.0989	1.3950
	Sıra	1	4	5	3	2
Ort. Sıra		1.3333	4.0000	5.0000	3.0000	1.6667
Genel Sıra		1	4	5	4	2

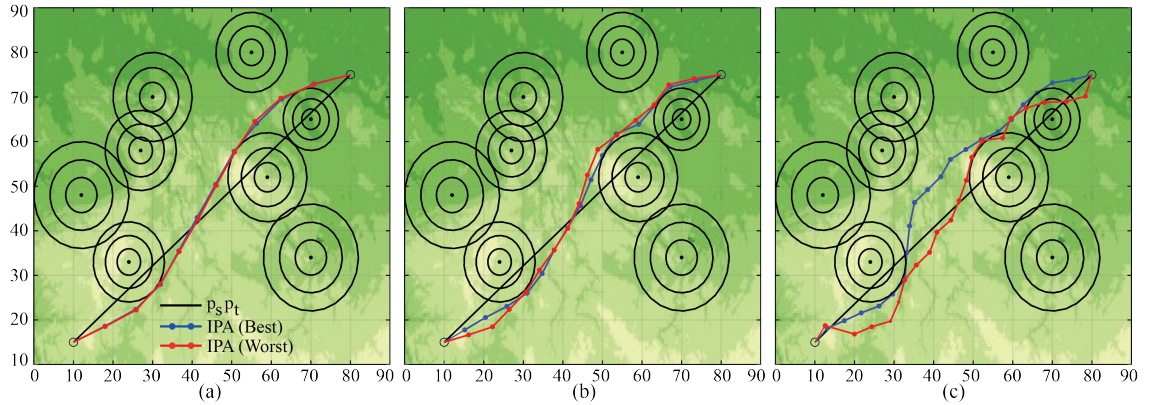
arasında yapılan testlerde IP algoritmasından güzergah planlama probleminin çözümü için umut verici sonuçlar elde edilmiş olsa da algoritmanın kullanılabilirliğinden emin olmak için IPA farklı zorluğa sahip yeni senaryolarda test edilmeli ve alanında iyi bilinen diğer metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmalıdır. Bu amaçla Tablo 2.1’de detayları verilen Senaryo-4 üzerinde IPA ile DE, PSO, BA, WDO, QPOS, QBA ve QWDO algoritmaları arasında yeni bir karşılaştırmalı test gerçekleştirilmiştir [93]. IP algoritmasının performans analizinin yapılabilmesi için testlerin tüm algoritmalar aynı şartlar altındayken tamamlanması gerekmektedir. Bu amaçla IPA parametrelerinden popülasyon büyüklüğü 30 ve durdurma kriteri olan maksimum iterasyon sayısı 60000 olarak belirlenmiştir. Diğer yandan kontrol parametreleri NoD ve NoR değeri 1 olarak belirlenmiş ve D ise artan durak nokta sayısı karşısında algoritmanın ürettiği güzergahların kalitesini görebilmek adına sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 olarak seçilerek teste başlanmıştır [93]. Her bir algoritma 50 defa çalıştırılmış ve Tablo 2.11’de görüleceği

Tablo 2.11. Senaryo-4 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

	D	IPA	DE	PSO	BA	WDO	QPSO	QBA	QWDO
5	En iyi	48.225	51.511	51.512	51.627	53.396	51.522	51.561	51.511
	En kötü	48.238	257.769	259.372	262.626	779.129	258.962	263.016	257.769
	Ort.	48.231	108.450	76.322	217.857	158.636	58.550	224.871	86.066
	Std.	0.0050	-	-	-	-	-	-	-
	Sıra	1	5	3	7	6	2	8	4
10	En iyi	48.020	48.218	48.600	48.310	51.140	48.252	48.303	48.217
	En kötü	48.117	60.652	71.239	63.923	102.904	61.601	66.809	60.569
	Ort.	48.060	51.695	59.626	56.561	66.956	51.287	56.491	52.583
	Std.	0.030	-	-	-	-	-	-	-
	Sıra	1	3	7	6	8	2	5	4
15	En iyi	48.435	47.935	50.434	48.069	57.013	48.018	48.134	47.868
	En kötü	48.975	51.575	59.962	52.765	74.820	51.634	56.006	50.828
	Ort.	48.624	50.073	53.869	50.861	66.955	49.524	50.958	49.503
	Std.	0.163	-	-	-	-	-	-	-
	Sıra	1	4	7	5	8	3	6	2
20	En iyi	48.963	48.126	49.246	48.163	58.430	48.397	48.333	47.807
	En kötü	55.100	52.110	54.246	67.441	75.967	51.307	53.423	49.749
	Ort.	51.376	49.842	51.481	50.901	66.668	49.679	50.071	48.814
	Std.	2.140	-	-	-	-	-	-	-
	Sıra	6	3	7	5	8	2	4	1
Ort. Sıra		2.250	3.750	6.000	5.750	7.500	2.250	5.750	2.750
Genel Sıra		1	4	7	5	8	1	5	3

üzere her bir algoritmanın elde ettiği nihai amaç fonksiyonlarının en iyi, ortalama ve standart sapma değerleri kaydedilmiştir. Testler sonucunda amaç fonksiyonuna ait ortalama değerler incelendiğinde D 5, 10 ve 15 için IPA diğer algoritmalarla karşı çok daha iyi sonuçlar elde etmiş fakat bu değer 20 olduğunda her ne kadar kaliteli güzergah üretse de QWDO az bir farkla birinciliğe gelmiştir. Buna karşın IP algoritması gücünü WDO, PSO ve BA yaklaşımlarının çözüm kapasitesini artırmak için geliştirilen QWDO, QPSO ve QBA yöntemlerinde olduğu gibi ek bir mekanizmadan değil sadece enfeksiyonun yayılması ve plazma tedavisine dair standart matematiksel modellerden aldığına dikkat edilmelidir. IPA tarafında Senaryo-4 üzerinde oluşturulan güzergahların kalitesini ve yol maliyetini minimize etmek için düşman unsurlara oldukça yakın ve teğet şeklinde ürettiği güzergah parçaları Şekil 2.9'da açıkça görülmektedir.

Başka bir karşılaştırmalı test IPA ile ABC, BA, BAM, ACO, BBO, DE, ES, FA, GA, MFA, PBIL, PSO, SGA ve PGSO algoritmaları arasında Tablo 2.1'de detayları verilen Senaryo-5 üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada D parametresinin amaç fonksiyon değerlerine etkisinin daha detaylı analiz edilebilmesi için 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 olmak üzere sekiz farklı değer belirlenmiştir [85]. Algoritmaların bu testte de aynı koşullarda çalışabilmesi objektif bir değerlendirme için gereklidir. Bu nedenle ABC



Şekil 2.9. Senaryo-4 D parametresi 10 (a), 15 (b) ve 20 (c) için IPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar

algoritması için besin kaynağı sayısı 15 ve diğer algoritmaların popülasyon büyüklükleri 30 olarak belirlenmiştir [85]. Her bir metasezgisel tekniğin maksimum değerlendirme sayısı 6000 olacak şekilde ayarlandıktan sonra 100 kez çalıştırılmak üzere işlemci çekirdeklerine rastgele dağıtılmıştır. Önceki testlerde olduğu gibi algoritmalarından elde edilen en iyi, ortalama ve standart sapma değerleri kaydedilerek Tablo 2.12’de sunulmuş ve bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar Şekil 2.10’da gösterilmiştir.

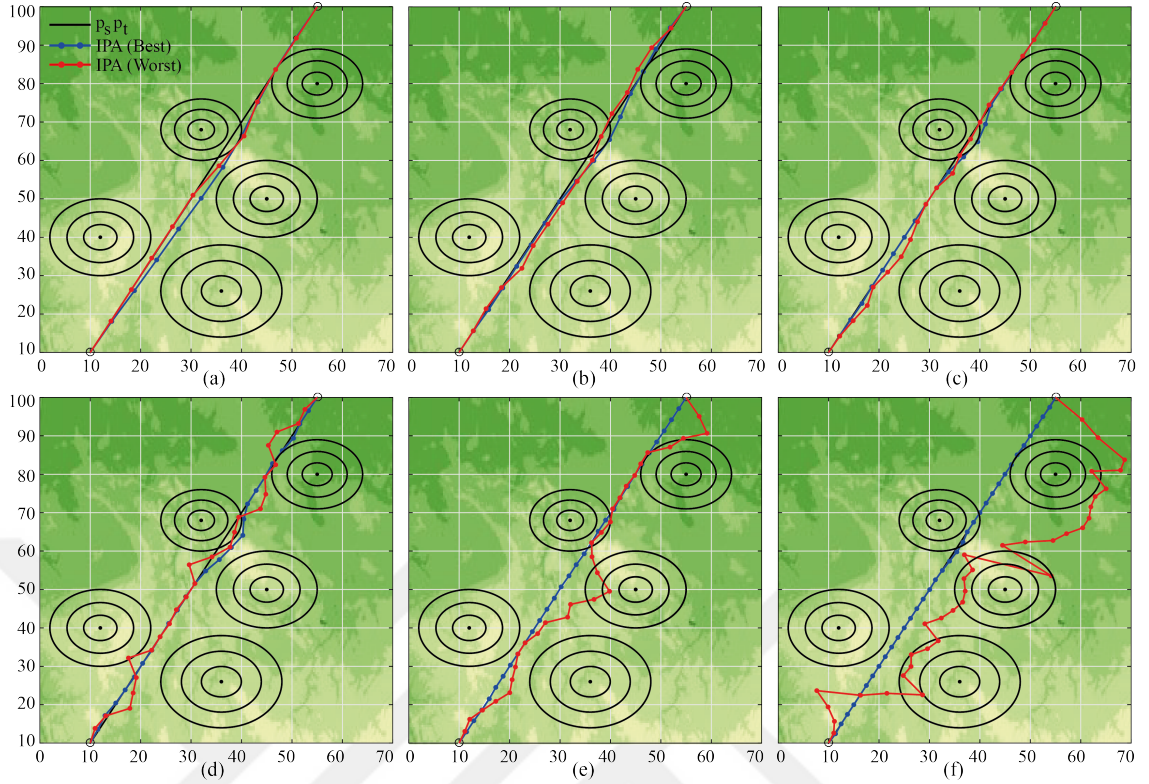
Tablo 2.12 ve 2.13 üzerinde yer alan ortalama amaç fonksiyon değerleri incelendiğinde IPA tüm testler sonucunda sahip olduğu 2.625 ortalamayla diğer algoritmaların tamamını geride bırakarak üstünlüğünü kanıtlamıştır. Değişen D parametresi altında yapılan test sonuçları detaylıca analiz edildiğinde bölümlene nokta sayısı 5 ve 10 için çok az farkla ABC algoritmasının gerisine düşerek ikinci olurken D 15 olduğunda IPA en iyi güzergahı üreterek birinciliği almıştır. D parametresinin 20, 25, 30 ve 40 olduğu durumlarda ise IPA kararlılığını (robustness) korumuş fakat ortalama amaç fonksiyon değerinde 3. sıraya yerleşmiştir. Farklı senaryolarda değişen parametre değerleri altında gerçekleştirilen çalışmalar IP algoritmasının sahip olduğu işlem adımlarının araştırma ve mevcut çözümlerden faydalanma arasında iyi bir denge kurduğunun göstergesidir. Enfeksiyonun bireyler arasında yayılması algoritmanın çözüm uzayını araştırmasına imkan verirken, donör bireyler kullanılarak yürütülen plazma tedavisi sayesinde algoritma iyi çözümlerden faydalanarak bunlar etrafında daha iyi çözümler keşfedebilmektedir. Tüm bu işlemlerin yanında donörlerin bağışıklık hafızasının güncellenmesi algoritmanın yerel optimumlardan kaçınması sağlayarak araştırma performansını iyileştirebilmektedir.

Tablo 2.12. Senaryo-5 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

D		IPA	ABC	BA	BAM	ACO	BBO	DE	ES
5	En iyi	50.384	50.384	60.690	54.357	61.372	60.330	54.357	59.590
	En kötü	50.389	50.385	345.255	60.240	63.320	171.500	62.200	112.260
	Ort.	50.385	50.384	106.483	59.054	61.520	72.730	58.596	80.720
	Std.	0.001	0.001	-	-	-	-	2.160	-
	Sıra	2	1	15	6	11	13	4	14
10	En iyi	50.376	50.371	52.360	51.395	60.228	52.947	51.395	57.420
	En kötü	50.457	50.406	108.738	607.244	68.190	76.820	56.736	123.460
	Ort.	50.398	50.384	69.425	52.707	61.950	57.965	53.104	76.280
	Std.	0.024	0.013	-	-	-	-	2.600	-
	Sıra	2	1	13	8	12	11	9	14
15	En iyi	50.424	50.425	53.075	50.609	58.530	52.557	50.611	58.255
	En kötü	51.219	50.789	85.745	60.192	61.000	90.370	62.580	103.860
	Ort.	50.570	50.591	63.601	51.231	60.260	59.526	52.278	71.860
	Std.	0.193	0.1	-	-	-	-	3.730	-
	Sıra	1	2	13	4	12	11	8	14
20	En iyi	50.495	50.866	52.395	50.467	60.445	54.723	50.510	60.232
	En kötü	51.271	54.672	83.706	53.742	67.180	78.200	64.570	81.450
	Ort.	50.925	52.181	63.630	50.760	66.220	61.880	52.722	70.190
	Std.	0.196	0.994	-	-	-	-	3.710	-
	Sıra	3	4	12	2	13	11	6	14
25	En iyi	50.790	51.911	55.017	50.448	61.549	55.528	50.551	63.369
	En kötü	57.314	57.530	74.926	53.519	62.070	80.330	69.660	83.910
	Ort.	51.678	54.690	64.901	50.709	61.570	64.780	54.408	72.780
	Std.	1.503	1.618	-	-	-	-	4.120	-
	Sıra	3	9	13	1	11	12	7	14
30	En iyi	50.997	54.527	57.247	50.467	63.230	56.607	50.898	65.725
	En kötü	61.565	64.940	80.084	60.285	64.710	78.580	74.120	91.300
	Ort.	51.789	59.805	66.616	51.106	63.950	67.870	59.988	74.780
	Std.	2.275	2.366	-	-	-	-	6.740	-
	Sıra	3	8	12	1	11	13	9	14
35	En iyi	51.005	57.259	57.448	50.479	66.960	63.021	52.537	66.745
	En kötü	96.301	74.095	82.737	58.819	68.720	93.850	84.440	88.760
	Ort.	55.889	66.187	67.703	51.461	68.310	71.560	67.900	76.520
	Std.	12.249	4.298	-	-	-	-	9.150	-
	Sıra	4	9	10	1	12	13	11	14
40	En iyi	51.025	63.269	58.650	50.602	69.795	63.550	54.549	68.231
	En kötü	116.195	86.613	83.263	58.427	77.060	90.700	93.260	96.420
	Ort.	55.994	75.595	69.973	51.876	74.580	74.850	77.620	80.260
	Std.	16.188	5.356	-	-	-	-	10.900	-
	Sıra	3	12	9	1	10	11	13	14
Ort. Sıra		2.625	5.750	12.125	3.000	11.500	11.875	8.375	14.000
Genel Sıra		1	5	13	3	11	12	9	14

Tablo 2.13. Senaryo-5.1 için IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

D		FA	GA	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
5	En iyi	54.359	55.247	54.357	59.763	55.167	55.654	53.380
	En kötü	65.740	61.600	62.419	72.250	66.071	61.200	60.630
	Ort.	58.750	60.470	59.167	66.139	59.906	60.501	53.669
	Std.	3.010	-	2.250	-	2.620	1.560	2.260
	Sıra	5	9	7	12	8	10	3
10	En iyi	51.399	51.607	51.397	83.112	52.207	51.549	50.649
	En kötü	56.710	60.110	53.786	119.250	68.622	56.165	53.330
	Ort.	52.180	52.542	51.574	101.440	57.041	52.279	50.849
	Std.	2.370	-	1.730	-	2.250	1.430	1.870
	Sıra	5	7	4	15	10	6	3
15	En iyi	50.617	50.871	50.612	107.223	52.097	50.807	50.452
	En kötü	94.276	57.447	53.832	189.200	87.320	61.800	55.460
	Ort.	52.822	52.188	50.897	128.250	58.340	51.891	51.516
	Std.	4.250	-	1.340	-	4.010	2.450	1.490
	Sıra	9	7	3	15	10	6	5
20	En iyi	50.463	50.825	50.455	130.152	52.464	50.846	50.657
	En kötü	78.914	59.180	52.028	337.300	78.160	68.950	59.850
	Ort.	53.733	53.090	50.700	185.430	58.248	53.167	52.398
	Std.	7.580	-	1.020	-	6.950	3.990	1.560
	Sıra	9	7	1	15	10	8	5
25	En iyi	50.491	51.242	50.457	159.740	53.738	51.239	50.782
	En kötü	66.452	60.398	53.704	699.600	78.139	65.700	63.160
	Ort.	53.904	53.781	50.999	257.720	60.263	54.157	54.587
	Std.	8.660	-	0.81	-	7.550	4.060	2.380
	Sıra	5	4	2	15	10	6	8
30	En iyi	50.683	51.921	50.516	230.150	53.299	51.617	51.019
	En kötü	65.976	62.718	58.336	2396	93.695	64.710	75.320
	Ort.	54.962	55.008	51.357	395.540	62.385	54.521	56.891
	Std.	9.120	-	1.230	-	8.200	4.110	3.450
	Sıra	5	6	2	15	10	4	7
35	En iyi	51.083	52.311	50.471	270.330	55.503	51.633	54.136
	En kötü	83.887	744.790	55.883	6362	82.833	67.610	71.450
	Ort.	55.996	55.960	51.601	684.660	64.135	55.826	59.744
	Std.	9.550	-	1.650	-	8.650	4.120	4.010
	Sıra	6	5	2	15	8	3	7
40	En iyi	51.523	52.208	50.561	390.620	55.737	52.618	55.092
	En kötü	86.663	72.069	57.724	7103	84.730	67.870	72.650
	Ort.	57.856	57.493	52.198	1169	64.885	57.110	62.420
	Std.	10.430	-	2.380	-	9.410	4.550	4.540
	Sıra	6	5	2	15	8	4	7
Ort. Sıra		6.250	6.250	2.875	14.625	9.250	5.875	5.625
Genel Sıra		7	7	2	15	10	6	4



Şekil 2.10. Senaryo-5 D parametresi 10 (a), 15 (b), 20 (c), 25 (d), 30 (e) ve 35 (f) için IPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar

Senaryo-5 kullanılarak gerçekleştirilen testlerdeki ortalama ve genel sıralama IP algoritmasının güzergah planlamada diğer teknikler karşısındaki genel durumuna dair önemli bilgiler vermektedir. Özellikle IP algoritmasına yakın sonuçlar üreten ve sekiz farklı testin beşinde üstünlük sağlayan MFA ve BAM dikkate alınmalıdır. Bahsedilen algoritmalar çoğu testte IP algoritmasını geçmiş olsa da ortalama başarı sıralamasında gerisinde kalmışlardır. Bu durumun nedenleri arasında BAM ve MFA algoritmalarının D değerinin 5, 10 ve 15 olduğu durumlarda gösterdiği değişken performanstan kaynaklanmaktadır. Söz konusu test konfigürasyonlarında IPA en kötü ikinci sırada yer alırken BAM sekizinci ve MFA yedinci sırada yer almıştır. Testlerin neredeyse yarısında bu algoritmalar IPA algoritmasına karşı daha iyi performans gösterse de, IPA daha kararlı çalıştığı için ortalama ve genel sıralamada en önde yer almıştır.

Tablo 2.12 ve 2.13 standart IP algoritmasının diğer metasezgisel yöntemlerden daha iyi sonuçlar elde ettiğini belirtmektedir. Fakat IPA'nın sağladığı bu üstünlük istatistiksel bir testten faydalanılarak ayrıca doğrulanmalıdır. Wilcoxon işaretli sıralama testi en yaygın kullanılan parametrik olmayan istatistiksel testlerden biridir [18, 146].

Tablo 2.14. En iyi amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma

IPA vs	ABC	BA	BAM	ACO	BBO	DE	ES
Z -val.	1.987	2.660	-0.068	2.660	2.660	1.601	2.660
ρ -val.	0.046	0.007	0.945	0.007	0.007	0.109	0.007
$W+$	2	0	19	0	0	6	0
$W-$	26	36	17	36	36	30	36
Sign.	IPA	IPA	-	IPA	IPA	-	IPA
IPA vs	FA	GA	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
Z -val.	1.009	2.660	-0.068	2.660	2.660	2.660	2.417
ρ -val.	0.312	0.007	0.945	0.007	0.007	0.007	0.015
$W+$	10	0	19	0	0	0	1
$W-$	26	36	17	36	36	36	35
Sign.	-	IPA	-	IPA	IPA	IPA	IPA

Tablo 2.15. En kötü amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma

IPA vs	ABC	BA	BAM	ACO	BBO	DE	ES
Z -val.	-0.402	1.601	-0.068	0.328	0.078	0.737	2.063
ρ -val.	0.687	0.109	0.945	0.742	1.761	0.460	0.039
$W+$	17	6	19	15	5	12	3
$W-$	11	30	17	21	31	24	33
Sign.	-	-	-	-	-	-	IPA
IPA vs	FA	GA	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
Z -val.	0.872	0.328	-0.602	2.660	1.445	0.328	0.328
ρ -val.	0.382	0.742	0.546	0.007	0.148	0.742	0.742
$W+$	11	15	23	0	7	15	15
$W-$	25	21	13	36	29	21	21
Sign.	-	-	-	IPA	-	-	-

Tablo 2.16. Ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerlerini kullanarak IPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan istatistiksel karşılaştırma

IPA vs	ABC	BA	BAM	ACO	BBO	DE	ES
Z -val.	2.063	2.660	-0.328	2.660	2.660	2.660	2.660
ρ -val.	0.039	0.007	0.742	0.007	0.007	0.007	0.007
$W+$	3	0	21	0	0	0	0
$W-$	33	36	15	36	36	36	36
Sign.	IPA	IPA	-	IPA	IPA	IPA	IPA
IPA vs	FA	GA	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
Z -val.	2.660	2.660	-0.328	2.660	2.660	2.417	2.660
ρ -val.	0.007	0.007	0.742	0.007	0.007	0.015	0.007
$W+$	0	0	21	0	0	1	0
$W-$	36	36	15	36	36	35	36
Sign.	IPA	IPA	-	IPA	IPA	IPA	IPA

Bu teste göre karşılaştırılan algoritmalar için ρ olarak ifade edilen anlamlılık düzeyi 0,05'ten küçük bulunursa, bu iki algoritma arasındaki farkın birinin lehine olduğu varsayılır [18, 146]. Aksi takdirde, algoritmalar arasındaki fark, bunlardan biri lehine

istatistiksel bir anlamlılık oluşturmak için yeterli değildir. Wilcoxon işaretli sıralama testi sonuçları en iyi amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak Tablo 2.14'te, en kötü amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak Tablo 2.15'te ve son olarak ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak Tablo 2.16'da sunulmuştur. Söz konusu tabloların tümünde Z değeri test verilerini gösterirken, $W+$ ve $W-$ değerleri sırasıyla IPA'nın diğer algoritmaya göre daha kötü olduğu pozitif sıralamaların toplamına ve IPA'nın diğer algoritmaya göre daha iyi olduğu negatif sıralamaların toplamına karşılık gelmektedir. Tablo 2.14 ve Tablo 2.16'da verilen ρ değerleri, IPA tarafından bulunan çözümlerin genellikle aynı algoritma lehine istatistiksel fark oluşturmak için yeterli olduğunu ifade etmektedir. Özellikle ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri kullanılarak yapılan istatistiksel karşılaştırmada IPA diğer metasezgisellere karşı üstünlüğünü kanıtlarken, Tablo 2.15'teki test sonuçları IPA'nın elde ettiği en kötü çözümlerin kalitesinin en iyi ve ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri bazında yapılan karşılaştırmalarda olduğu gibi istatistiksel olarak kanıtlanmış avantajlarını korumak için yeterli olmadığını göstermektedir. IPA, test edilen rakip algoritmaların çoğuna karşı en kötü çözümlerin niteliklerini dikkate alarak istatistiksel anlamlılığını kanıtlayamasa da, nispeten yüksek bağımsız çalışma sayısı ve hesaplanan ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri, IP algoritmasının umut verici performansını kanıtlamada hala etkili birer göstergedir.

2.2.1. Sonuç

Hava savunma sistemlerini aşma, uzaktan gözlem-keşif ve düşman unsurlarını imha edebilme kabiliyetine sahip olan İHA veya SİHA sistemleri bu ve benzeri özellikleri nedeniyle birçok araştırmacıyı bu araçların farklı yönlerine odaklanmaya ve yeni çalışmalar yapmaya teşvik etmiştir. Bu çalışmada hava aracının görev başarı oranını doğrudan etkileyen güzergah planlama problemi yeni tanıtılan İmmün Plazma algoritması ile çözülmeye çalışılmıştır. Öncelikle IP algoritmasının popülasyon büyüklüğü, alıcı ve donör birey sayısı gibi kontrol parametre değerleri değiştirilerek çalışma performansı incelenmiştir. Bunun yanında farklı savaş alanı modellerinde IPA test edilmiş elde edilen sonuçlar aynı şartlar altında çalışan ve alanında iyi bilinen bazı metasezgisel algoritmalarla karşılaştırılmıştır. IPA ile ABC, ACO, BBO, DE, ES, BA, FA, GA, PBIL, PSO, WDO ve bu algoritmaların varyantları olan I-ABC, IF-ABC, BE-ABC,

QBA, QPSO, QWDO, MFA, BAM, PGSO ve SGA ile yapılan karşılaştırmalı testler IP algortimasının daha kararlı güzergahlar ürettiğini ve bir çok test senaryosunda rakiplerinden üstün olduğunu kanıtlamıştır. Elde edilen bu ümit verici sonuçlar, araştırmacıları IP algoritmasının alıcı-donör seçimi, plazmanın elde edilme ve tedavi yöntemi gibi işlem adımlarını güncelleyerek daha gelişmiş versiyonlarını geliştirmeye teşvik etmektedir. Bunun yanı sıra standart IP algoritması veya varyantlarının güzergah planlama problemini çözüm kapasitesini artırmak için paralelleştirme stratejisi uygulanabilir.



3. BÖLÜM

ÇOK POPÜLASYONLU İMMÜN PLAZMA ALGORİTMASI ile SABİT İRTİFADA GÜZERGAH PLANLAMA PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

Modern bilgi işlem mimarilerinin sunabildiği potansiyelin tamamından faydalanmak üzere geliştirilen paralelleştirme tekniklerinden optimizasyon için kullanılan metasezgisel algoritmaların verimliliğini artırmak amacıyla yararlanılmaktadır. Paralelleştirme, genellikle problemi daha küçük kısımlara bölme veya algoritmanın ele alınan problemi çözmesi için gereken farklı işlem adımlarının eşzamanlı olarak yürütülmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu sayede algoritmanın geniş çözüm kümesine sahip karmaşık problemleri çözebilmesi veya çözüm uzayını daha fazla araştırarak daha kaliteli çözümler bulması sağlanmaktadır. Bu bölümde paralelleştirme stratejilerinden biri olan halka topolojisi (ring topology) kullanılarak IP algoritmasının paralelleştirilmiş versiyonu olan Çoklu-IPA (MULIPA) önerilmiş ve sabit irtifada güzergah planlama problemi için uyarlanarak problem çözümlenmiştir. Önerilen yeni yöntemde standart IP algoritmasının plazma transferi popülasyondaki en iyi birey ile en kritik birey arasında olacak şekilde güncellenmiş, yeni yaklaşım gereği NoD ve NoR parametrelerine ihtiyaç kalmamıştır. Popülasyonların benzer çözümler üretmesini engellemek amacıyla bir popülasyondan en iyi çözüm gönderilmeden önce parametrelerin belirli bir kurala bağlı değiştirilerek göç ettirilmesine dayalı yeni bir teknik uygulanmıştır. Halka topolojisinde göz önünde bulundurulması gereken haberleşme veya senkronizasyon yükünü kontrol altına alabilmek için göç limiti adı verilen ML parametresi tanımlanmıştır. Değişken popülasyon sayısı ve büyüklüğü karşısında algoritmanın çalışma performansı analiz edilmiştir. Son olarak önerilen yeni teknik ile standart IPA, ABC, BA, ACO, BBO, DE, ES, FA, GA, PBIL, PSO ile BAM, MFA, SGA ve PGSO algoritmaları ve bu algoritmaların geliştirilmiş versiyonları ile karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilerek

bölüm tamamlanmıştır.

3.1. Çok Popülasyonlu İmmün Plazma Algoritması

Optimizasyon süreçlerinin verimliliğini ve etkinliğini artırmada etkili birer yöntem olmaları nedeniyle paralelleştirme teknikleri metasezgisel algoritmalar arasında popüler hale gelmiştir. Çoklu veya çok popülasyonlu paralelleştirme, araştırma uzayını birden fazla alt bölgeye bölmekte ve her bölgenin aynı anda farklı çözüm popülasyonlarını kullanarak en iyi çözüme hızlı bir şekilde yakınsamasını sağlamaktadır. Çok popülasyonlu paralelleştirme yaklaşımının tek popülasyonlu yaklaşımlara göre daha kesin ve tutarlı sonuçlar ürettiği kanıtlanmış, buna bağlı olarak da birçok optimizasyon problemi çözümü için ideal bir seçenek haline gelmiştir [147, 148]. Bu yeni yaklaşımın algoritmaların performansını iyileştirebilmesi için çoklu popülasyon tabanlı konfigürasyonun yürütme süresini doğrudan artıran senkronizasyon yükü göz önünde bulundurularak, popülasyonların birbirleriyle bir popülasyon bireyi veya çözümü hakkındaki bazı bilgileri diğer popülasyona aktaracak şekilde haberleşmesi gerekmektedir [147, 148]. Bir metasezgisel algoritmanın genel çalışma prensibi incelendiğinde, o anki aktarma zamanına kadar bulunan en iyi çözümün, başka bir popülasyonun en kötü çözümünü uygun şekilde güncellemesinin optimum sonuca ulaşmada fayda sağlayacağı anlaşılmaktadır [147, 148]. Buna karşın en iyi çözüm ya da onunla ilgili bilginin çözüm kalitesini iyileştirmede yeterli olacağı düşünülse de, komşu popülasyon üzerinde bazı beklenmedik olumsuz etkilere neden olabilmektedir. Popülasyondaki en iyi çözüm, birbirini takip eden iki göç dönemi arasında geliştirilmezse, seçilen göçmen birey tekrar transfer edileceği için komşu popülasyon erken yakınsama veya yetersiz çözüm çeşitliliğinden dolayı dezavantajlı duruma düşebilir. Bu sebeple çok popülasyonlu paralelleştirme algoritmaya entegre edilirken avantaj ve dezavantajları dikkate alınmalıdır. IP algoritması, diğer metasezgisel algoritmalara benzer şekilde, çoklu popülasyon kullanımı ile desteklenerek araştırma performansı ve çözüm kalitesi artırılabilir. Ancak, algoritmanın verimliliği üzerinde olumsuz etkiye sahip olan aynı çözümün göçmen olarak komşu popülasyona aktarılmasını engellemek amacıyla algoritmanın bazı adımlarının özelleştirilmesi gerekmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, IPA standart işleyişinde kritik bireylerin ya da zayıf çözümlerin tedavisi için en iyi

NoD sayısının birey ya da bireylerden faydalanmakta idi. Ayrıca, IPA tedavi adımları, kritik bir bireyin tedavisi tamamlandığında, tedavi edilen bireyin bağışıklık seviyesinin seçilen donörün bağışıklık seviyesinden daha iyi veya en azından eşit olduğunu garanti etmekte idi. IP algoritmasının sahip olduğu bu tedavi yöntemi, tek popülasyon temelli bir uygulama için algoritmanın mevcut çözümlerden faydalanma kabiliyetine önemli ölçüde katkıda bulunurken, daha önce bulunan en iyi bireye benzer veya aynı bireylerin bulunma olasılığını artırabilir. Bu durumun beklenen bir sonucu olarak, aynı bireyin komşu bir popülasyona gönderilme olasılığı, çoklu popülasyon tabanlı yürütmeler için ardışık geçiş dönemleri arasında da artış gösterebilir. IP algoritmasının mevcut tedavi sürecini iyileştirmek ve çoklu popülasyona dayalı uygulamalarda aynı çözümün tekrarlı kullanılma sorununu başarılı bir şekilde çözümleyebilmek amacıyla bir popülasyonun en iyi bireyine ait parametrelerin tamamı sırasıyla Eşitlik (3.1) kullanılarak güncellendikten sonra en kritik bireye aktarılacak plazmanın kaynağı olarak kullanılmaktadır.

$$x_j^{mod-t} = x_j^{best} + rand(-1, 1)x_j^{best} \quad (3.1)$$

Eşitlik (3.1)'de, x^{best} şimdiye kadar bulunan en iyi çözümü temsil ederken x^{mod} ise x^{best} çözümünün değişikliğe uğramış halini ifade etmek için kullanılmaktadır. Burada ayrıca x^{mod} çözümünün başlangıç parametre değerlerinin doğrudan x^{best} çözümünden alındığına özellikle dikkat edilmelidir. $rand(-1, 1)$ her hesaplama için -1 ile 1 arasında rastgele sayı üretici olarak eşitlikte yer almaktadır. Bu üreteç sayesinde -1 ve 1 arasında rastgele bir sayı üretilmesi, x^{best} bireyinin yeni hesaplanan ve x_j^{mod-t} ile gösterilen j 'inci parametresi, x^{best} 'in j 'inci parametresinden daha büyük veya daha küçük bir değere sahip olmasını sağlamaktadır. Bu sayede popülasyonun araştırma yönü ve araştırma adım büyüklüğü daha esnek bir şekilde ani olarak değiştirilebilmektedir. Yeni hesaplanan j 'inci parametre veya x_j^{mod-t} , x^{mod} çözümünün amaç fonksiyon değerini düşürürse, x^{mod} bireyinin j 'inci parametresi ve amaç fonksiyon değeri uygun şekilde değiştirilir ve bir sonraki $j + 1$ 'inci parametre için aynı işlem adımları tekrarlanır. x^{mod} üretilmesi için gerekli işlemler tamamlandığında, alıcının x^{mod} ile tedavisine başlanabilir. Tek popülasyonlu IP algoritmasının standart uygulamasında, NoR kontrol parametresi kaç bireyin tedavi edileceğine karar vermek için kullanılmaktadır. Eğer NoR değeri ikiye eşit veya ikiden büyükse, birden fazla alıcının tedavi edileceği kolayca anlaşılabilmektedir. Buna karşın, alt popülasyon içerisinde birden fazla alıcı bireyin x^{mod} donör bireyi

ile tedavi edilmesi x^{mod} ile aynı olan bireylerin sayısını artırabilir. Göç periyodu veya zamanı geldiğinde popülasyon içerisinde tüm çözümler x^{mod} bireyine benzer veya aynı olduğundan en iyi birey olan x^{mod} bireyinin komşu popülasyonlara gönderilmesi komşu popülasyonlarda da aynı çözümlerin üretilme ihtimalini artırabilir. Bu nedenle çoklu popülasyon yönteminin kullanılmak istenmesi durumunda IP algoritmasının avantaj sağlayan taraflarını korumak amacıyla sadece popülasyon içerisindeki sağlık durumu en kritik bireye x^{mod} ile tedavi uygulanmalıdır. MULIPA için tedavi yönteminin önerilen bu yeni yaklaşımla değiştirilmesi sonucunda IPA, çoklu popülasyonların sunduğu avantajlardan yararlanmak için daha elverişli hale gelmektedir. Ayrıca, tedavi sadece x^{mod} ile en kritik birey için yapıldığından, NoD ve NoR kontrol parametrelerine duyulan ihtiyaç ortadan kalkmaktadır. Aynı popülasyonun en kritik bireyine aktarılan plazmanın kaynağı olarak en iyi bireyin nasıl kullanıldığına ilişkin ayrıntılar Alg. (3.1)'de verilmiştir.

Algoritma 3.1 Çoklu popülasyon temelli IPA algoritmasına ait tedavi adımları

```

1:  $x^{mod} \leftarrow$  get a copy of  $x^{best}$  individual
2: for  $j \leftarrow 1 \dots D$  do
3:   if  $t_{cr} < t_{max}$  then
4:      $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$ 
5:      $x_j^{mod-t} \leftarrow$  calculate the new value of the  $j$ th parameter of  $x^{mod}$  using Eq. (3.1)
6:     if  $f(x^{mod}) \geq f(x^{best})$  then
7:       Convert the  $j$ th parameter of  $x^{mod}$  into its previous value
8:     else
9:       Update  $x^{best}$  with  $x^{mod}$ 
10:    end if
11:  end if
12: end for
13: //A single dose plasma transfer for the most critical individual
14:  $x^{rcv} \leftarrow$  get the most critical individual
15: if  $t_{cr} < t_{max}$  then
16:    $t_{cr} \leftarrow t_{cr} + 1$ 
17:    $x^{rcv-p} \leftarrow$  apply plasma treatment to  $x^{rcv}$  with  $x^{mod}$  using Eq. (2.4)
18:   if  $f(x^{rcv-p}) < f(x^{mod})$  then
19:     Update  $x^{rcv}$  with  $x^{rcv-p}$ 
20:   else
21:     Update  $x_k^{rcv}$  with  $x^{mod}$ 
22:   end if
23: end if

```

Döngü veya iterasyon başına harcanan değerlendirme sayısı dikkate alındığında IP algoritması rakiplerinden ayrılmaktadır. Plazma aktarımı alıcı iyileştiği sürece devam ettiğinden, değerlendirme sayısı veya amaç fonksiyonunu hesaplamak için yapılan çağrı sayısı bir döngü için önceden tahmin edilememektedir. Her ne kadar IPA araştırma ve faydalanma ağırlıklı işlemlerini dinamik olarak ayarlama şansı verse de, çoklu popülasyon ve komşu popülasyonlar arasında bilgi paylaşımı söz konusu olduğunda bu durum bazı ek senkronizasyon yüklerine neden olabilmektedir. Eğer bir komşu popülasyon bir göç periyoduna veya zamanına ulaşırsa, bu popülasyondaki kalan

işlemler daha önce belirlenen diğer popülasyondan gerekli bilgi gönderilinceye kadar durdurulur. En iyi çözümü göndermekle sorumlu olan popülasyon kalan işlemleri tamamlamak için çalıştırılabilir ve durdurma kriteri sağlandığında iletişim ertelenir veya hiç çalıştırılmaz. IP algoritması ile ilgili söz konusu eş zamanlı haberleşme gereksinimini karşılayabilmek için alıcıya verilen doz sayısı yalnızca 1 ile sınırlandırılmış ve bu sayede komşu popülasyonlar arasındaki bilgi paylaşımı kabul edilebilir bir haberleşme yükü ile gerçekleştirilmeye çalışılmıştır.

Popülasyonlar arasındaki iletişimin yönetilebilmesi için öncelikle aralarındaki komşuluk ilişkisinin tanımlanması gerekmektedir. IP algoritmasının çoklu popülasyon tabanlı konfigürasyonu için yapılan modifikasyonlar göz önünde bulundurularak, NP farklı popülasyon içeren ve i 'nci popülasyonun en iyi çözümü $((i \bmod NP) + 1)$ 'inci popülasyona gönderdiği ve bu popülasyonun en kötü bireyiyle değiştirildiği halka tabanlı bir komşuluk topolojisi kullanılmıştır. Algoritmanın popülasyonları arasında kurulan komşuluk topolojisi, iletişimden kaynaklanan yükü kontrol etmek için kullanılmaya uygundur. Bunun yanı sıra, i 'nci popülasyondan gönderilen bir bilginin, doğrudan i 'nci popülasyon ile ilişkili olmasa bile diğer popülasyonlara aktarılabilmesine dikkat edilmelidir.

Çok popülasyonlu IP algoritması için dikkate alınması gereken son aşama, göçlerin ne zaman gerçekleştirileceği ile ilgilidir. Çoklu popülasyon tabanlı metasezgisel yöntemlerde, her popülasyon genellikle en iyi çözümü komşu popülasyona gönderir ve çalışma sonuna kadar önceden belirlenen sayıda iterasyon veya çevrim sayısına ulaşılmasından sonra komşu popülasyondan kendi göçmen bireyini almaya çalışmaktadır [147, 148]. Eğer önceden belirlenmiş iterasyon sayısı veya göç süresi nispeten yüksek seçilirse, popülasyonlar arasındaki bilgi paylaşımı algoritmanın genel performansını iyileştirmek için yeterli olmayabilir. Bu durumun aksine, sıklıkla gerçekleşen göçler nedeniyle alt popülasyonlar çözüm çeşitliliklerini kaybedebilir ve bu popülasyonlar için bazı yakınsama problemleri ortaya çıkarabilir. Çoklu popülasyon tabanlı IP algoritmasında popülasyonlar arası göçün ne zaman başlatılacağı, hangi göç periyodunun kullanılacağı ve popülasyonlar arası göçün ne zaman tamamlanacağı ile ilgili işlemler algoritmanın farklı aşamaları üzerinde yapılan değişiklikler göz önünde bulundurularak yeniden modellenmeye çalışılmıştır. Komşu popülasyonlar arasındaki göç, ilk döngü veya

iterasyon sonunda başlatılır, her döngü tamamlandığında devam eder ve döngü sayacı *göç limiti* (*migration limit*, *ML*) olarak adlandırılan yeni bir kontrol parametresinin değerine ulaştığında bitirilir. IPA popülasyonları arasındaki göçlerin yeni modelde açıklandığı şekilde yönetilmesiyle popülasyonlar nispeten yüksek kaliteye sahip bir dizi çözüm elde etme şansına sahip olur ve bu çözümlerin çevresini daha erken araştırmaya başlayabilir. Bir popülasyondaki nitelikli çözümlerin çevrelerinin araştırılması daha nitelikli bir çözüm adayı ortaya çıkarırsa, bu aday döngü sonunda hızla komşu popülasyona aktarılır ve komşu popülasyondaki bireylerin iyileştirilmesi için kullanılır. Çoklu popülasyonların kullanımı için yukarıda açıklandığı şekilde özelleştirilen IP algoritmasından sonraki bölümlerde Çoklu IP algoritması veya kısaca MULIPA olarak bahsedilmiştir.

3.2. Deneysel Çalışmalar

Çoklu IP algoritmasının performansı birbiriyle ilişkili çeşitli parametreler barındırması nedeniyle farklı test senaryoları ve parametre değerleri altında incelenmelidir. Bu amaçla MULIPA dört farklı başlık altında toplanan deneysel çalışmalarla analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaların ilk bölümünde *ML* ve *NP* değişkenlerine farklı değerler atanarak, bu parametrelerin, MULIPA yönteminin karmaşık savaş senaryolarında ürettiği çözümlerin üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle paralelleştirmenin sağladığı avantajlar arasında yürütme zamanının azaltılması yer aldığından ikinci bölümde çoklu popülasyon yönteminin paralelleştirilen IP algoritmasının yürütme zamanına etkisi analiz edilmiştir. Sabit sayılı alt popülasyon kullanılarak geliştirilen MULIPA yöntemi için alt popülasyon birey sayısının diğer bir ifade ile popülasyon büyüklüğünün mevcut metasezgisel yöntemin ürettiği çözümlerin kalitesi üzerindeki etkisi çalışmanın üçüncü bölümünde incelenmiştir. Dördüncü ve son bölümde ise, kompleks bir savaş alanı senaryosunda güzergah oluşturmak için kullanılan ve alanında iyi bilinen metasezgisel algoritmalar ile önerilen yöntemin karşılaştırması yapılmıştır. Gerçekleştirilen bu karşılaştırmalı çalışma sayesinde MULIPA yönteminin diğer algoritmalara kıyasla üstün olduğu kısımların tespit edilebilmesinin yanı sıra iyileştirilebilir yanlarının da görülmesi sağlanmıştır. Problemin matematiksel tanımında bahsedilen ağırlıklandırma katsayısı olan λ sabiti her bir deneysel ve karşılaştırmalı çalışma için 0.5 olarak belirlenmiştir. Bu durum güzergah oluşturulurken algoritma tarafından minimize edilecek J değerini

Tablo 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan savaş alanlarının özellikleri

Snry.	Düşman unsur merkezleri	Düşman unsur yarıçapları
1	(52,52),(32,40),(12,48),(36,26), (80,60),(63,56),(50,42),(30,70)	10,10,8,12, 9,7,10,10
2	(0,200),(200,0),(50,50),(95,95), (150,150),(95,50),(50,95),(140,105),(105,140)	90,90,20,20, 20,20,20,20,20
3	(30,20),(50,15),(65,55),(0,24), (50,80),(75,90),(100,70),(50,36)	10,21,10,17, 27,10,20,11
4	(59,52),(55,80),(27,58),(24,33), (12,48),(70,65),(70,34),(70,30)	10,9,9,9, 12,7,12,10
5	(45,50),(12,40),(32,68),(36,26),(58,80)	10,10,8,12,9
Snry.	Etki katsayıları	Başlangıç ve bitiş noktaları
1	2,10,1,2,3,5,2,4	(11,11)-(75,75)
2	7,7,5,55,6,5,6,5	(0,0)-(200,200)
3	5,5,5,5,5,5,5	(0,0)-(100,100)
4	9,7,3,12,1,5,13,2	(10,15)-(80,75)
5	2,10,1,2,3	(10,10)-(55,100)

oluşturan düşman ve yakıt maliyetlerinin bu parametre değerine eşit bir şekilde etkidiği anlamına gelmektedir [149–151].

3.2.1. Değişken Popülasyon Sayısının MULIPA Performansına Etkisi

Daha önce bahsedildiği üzere her bir savaş alanı senaryosunda farklı etki alanına diğer bir ifadeyle çap büyüklüğüne ve vuruş etkinliğine sahip düşman unsurları yer almaktadır. Önerilen yeni yöntemin performansı farklı konumlarda yer alan, farklı etki yarıçapına ve farklı vuruş etkinliğine sahip, alan üzerinde farklı sayıda düşman unsuru barındıran ve farklı konumlardaki başlangıç ve bitiş noktaları arasında güzergah planlaması yapılması gereken birbirinden bağımsız beş farklı savaş alanı senaryosu üzerinde test edilmiştir. Her bir senaryoda yer alan düşman unsuru, vuruş etkinliği, etki yarıçapı ve başlangıç-bitiş noktalarına dair Tablo 3.1’de detaylı bilgiler sunulmuştur. Daha tutarlı ve güvenilir güzergahlar üretebilmeyi algoritma için zorlaştırabilmek ve bu sayede performansını ölçebilmek amacıyla ilk üç savaş alanı senaryosunda başlangıç ve bitiş noktası arasında çizilen en kısa güzergahı bölümleyen nokta sayısı, D , sırasıyla 20, 30 ve 50 olarak belirlenmiştir [149].

Önceki bölümlerde değildiği üzere bir metasezgisel algoritmanın yürütmesini durdurmak amacıyla maksimum değerlendirme sayısı (*maximum evaluation number*) veya yakınsama için bir hata oranı belirlenmektedir. Senaryo-1 için maksimum değerlendirme sayısı 30000 iken bu değer Senaryo-2 ve Senaryo-3 için 60000 olarak

Tablo 3.2. Senaryo-1 için MULIPA sonuçları

D		NP=2				NP=4			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
20	Ort.	48.177	48.220	48.207	48.197	48.181	48.182	48.236	48.233
	En iyi	48.151	48.149	48.149	48.149	48.150	48.157	48.153	48.152
	En kötü	48.234	48.316	48.316	48.302	48.224	48.206	48.329	48.366
	Std.	0.024	0.049	0.050	0.040	0.025	0.015	0.056	0.068
30	Ort.	48.406	48.372	48.425	48.494	48.385	48.387	48.345	48.353
	En iyi	48.166	48.190	48.138	48.131	48.140	48.162	48.152	48.147
	En kötü	48.632	48.623	48.755	48.873	48.687	48.636	48.634	48.672
	Std.	0.142	0.141	0.194	0.226	0.172	0.121	0.135	0.144
50	Ort.	49.795	49.415	49.504	50.442	49.535	49.545	49.439	49.594
	En iyi	48.635	48.368	48.592	48.416	48.281	48.456	48.383	48.462
	En kötü	52.533	50.480	50.912	64.815	51.224	50.931	51.855	51.263
	Std.	0.944	0.560	0.6362	3.745	0.637	0.703	0.813	0.717
D		NP=8							
		ML							
		15		25		35		50	
20	Ort.	48.174		48.189		48.203		48.206	
	En iyi	48.150		48.149		48.147		48.149	
	En kötü	48.211		48.231		48.294		48.314	
	Std.	0.016		0.029		0.045		0.050	
30	Ort.	48.340		48.397		48.419		48.403	
	En iyi	48.153		48.169		48.158		48.132	
	En kötü	48.543		48.722		48.770		48.779	
	Std.	0.113		0.140		0.160		0.182	
50	Ort.	49.703		49.521		49.541		49.342	
	En iyi	48.568		48.389		48.724		48.464	
	En kötü	50.706		50.660		50.968		50.415	
	Std.	0.617		0.669		0.549		0.541	

belirlenmiştir [149]. Parallellleştirme işleminde dikkat edilmesi gereken dört parametre arasında yer alan alt popülasyon sayısının üretilen çözümlerin kalitesi üzerindeki etkisinin gözlemlenebilmesi amacıyla NP parametresine 2, 4 ve 8 değerleri atanarak çözümler elde edilmiştir. Son olarak ML parametresinin etkisinin anlaşılabilmesi için bu değişkene 15, 25, 35 ve 50 olmak üzere dört farklı değer atanarak algoritma çalıştırılmıştır.

Problem içerisinde bahsedilen D , NP ve ML değişken değerleri ile ilgili testler için kullanılan Senaryo-1, Senaryo-2 ve Senaryo-3 üzerinde çözüm öncesi PS değeri 30 olarak ayarlanmış ve MULIPA yöntemi ile rastgele çekirdekler kullanılarak her bir senaryo 50 defa çözdürülmüştür. Gerçekleştirilen tekrarlı testlerde her bir senaryo için yürütme sonucu elde edilen amaç fonksiyon değerleri ve en iyi çözümler kaydedilmiştir. 50 çevrim sonucu elde edilen bu değerler kullanılarak en iyi, en kötü, ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri ve standart sapma değerleri Tablo 3.2 - 3.4 aralığında sunulmuştur. Önerilen algoritmanın kararlılığının ölçülebilmesi amacıyla gerçekleştirilen tekrarlı

Tablo 3.3. Senaryo-2 için MULIPA sonuçları

D		NP=2				NP=4			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
20	Ort.	150.854	150.905	150.821	150.896	150.856	150.917	150.906	150.923
	En iyi	150.499	150.518	150.404	150.339	150.538	150.549	150.336	150.472
	En kötü	151.192	151.399	151.180	151.402	151.178	151.397	151.305	151.502
	Std.	0.179	0.232	0.188	0.236	0.181	0.245	0.250	0.221
30	Ort.	149.755	149.857	150.305	150.330	149.759	149.807	150.208	150.114
	En iyi	149.584	149.574	149.574	149.554	149.589	149.599	149.687	149.616
	En kötü	149.951	152.443	152.614	152.536	149.991	150.191	152.505	152.498
	Std.	0.095	0.513	1.127	1.084	0.082	0.145	0.938	0.827
50	Ort.	154.922	154.400	154.876	154.792	154.316	154.592	155.126	155.562
	En iyi	151.821	149.331	152.003	149.369	152.014	151.755	149.247	149.358
	En kötü	158.202	156.838	158.282	158.170	156.813	157.955	158.678	158.562
	Std.	1.924	1.676	2.019	2.072	1.522	2.015	2.273	2.481
D		NP=8				NP=8			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
20	Ort.	150.832	150.871	150.796	150.820	150.832	150.871	150.796	150.820
	En iyi	150.401	150.440	150.473	150.350	150.401	150.440	150.473	150.350
	En kötü	151.240	151.287	151.107	151.278	151.240	151.287	151.107	151.278
	Std.	0.197	0.227	0.160	0.238	0.197	0.227	0.160	0.238
30	Ort.	149.740	149.760	150.177	150.041	149.740	149.760	150.177	150.041
	En iyi	149.637	149.606	149.589	149.548	149.637	149.606	149.589	149.548
	En kötü	149.851	149.870	152.540	152.507	149.851	149.870	152.540	152.507
	Std.	0.054	0.061	0.898	0.831	0.054	0.061	0.898	0.831
50	Ort.	153.984	154.157	154.962	154.525	153.984	154.157	154.962	154.525
	En iyi	149.259	149.296	149.262	149.238	149.259	149.296	149.262	149.238
	En kötü	156.391	156.796	158.681	158.019	156.391	156.796	158.681	158.019
	Std.	2.014	1.737	2.451	2.098	2.014	1.737	2.451	2.098

testler sonucu Senaryo 1-3 için algoritmanın ürettiği sonuçlar arasındaki standart sapma değerlerinin düşük olduğu ve bu senaryolar için MULIPA tekniğinin stabil bir şekilde çalıştığı anlaşılabilmektedir. Bunun yanında, Tablo 3.2-3.4 incelendiğinde NP değerine 8 atanmasıyla üretilen çözümlerin Senaryo-1 ve Senaryo-2 için daha iyi olduğu, Senaryo-3 içinse bu değer 4 ile başlatılmasının gerektiği görülmektedir. MULIPA tarafından NP ve ML değerlerinin sırasıyla 8 ve 15 olduğu durumda bulunan en iyi ve en kötü güzergahlara ait Şekil 3.1'den görüleceği üzere, Senaryo-1 ve Senaryo-2 üzerinde üretilen güzergahlar, Senaryo-3 kullanılarak üretilen en uygun güzergah veya güzergahlara kıyasla daha zorlu manevralar gerektiren bazı optimum güzergahlar içermektedir. Senaryo-1 ve Senaryo-2 için NP parametresine atanan değer nispeten daha büyük seçildiğinde, MULIPA başlangıç çözüm çeşitliliğinin gücünden daha fazla yararlanmaktadır. Bu durum savaş alanı senaryoları üzerinde manevra zorluklarını ortadan kaldıran güzergahlarla araştırmaya başlayabilme olasılığına sahip olmaktadır.

İlk üç senaryo için MULIPA sonuçları analiz edildikten sonra dikkate alınması gereken

Tablo 3.4. Senaryo-3 için MULIPA sonuçları

D		NP=2				NP=4			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
20	Ort.	70.906	70.908	70.909	70.911	70.906	70.906	70.908	70.909
	En iyi	70.905	70.906	70.905	70.905	70.905	70.905	70.905	70.905
	En kötü	70.908	70.910	70.914	70.918	70.907	70.908	70.914	70.914
	Std.	0.001	0.001	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.002
30	Ort.	70.910	70.911	70.911	70.911	70.910	70.909	70.910	70.911
	En iyi	70.903	70.905	70.904	70.902	70.904	70.904	70.906	70.905
	En kötü	70.918	70.918	70.917	70.921	70.917	70.914	70.917	70.918
	Std.	0.003	0.003	0.003	0.004	0.003	0.002	0.003	0.003
50	Ort.	70.955	70.957	70.962	70.958	70.956	70.952	70.955	70.953
	En iyi	70.925	70.921	70.916	70.906	70.914	70.914	70.915	70.913
	En kötü	70.974	70.976	70.983	70.974	70.972	70.973	70.984	70.978
	Std.	0.013	0.014	0.016	0.016	0.012	0.018	0.019	0.017
D		NP=8							
		ML							
		15		25		35		50	
20	Ort.	70.906		70.906		70.908		70.910	
	En iyi	70.905		70.905		70.905		70.906	
	En kötü	70.906		70.907		70.910		70.914	
	Std.	0.001		0.001		0.001		0.002	
30	Ort.	70.909		70.910		70.911		70.910	
	En iyi	70.905		70.906		70.906		70.904	
	En kötü	70.913		70.915		70.919		70.916	
	Std.	0.002		0.002		0.003		0.003	
50	Ort.	70.955		70.959		70.959		70.954	
	En iyi	70.918		70.913		70.923		70.929	
	En kötü	70.983		70.982		70.981		70.974	
	Std.	0.016		0.016		0.015		0.014	

bir diğer önemli durum ise çözümlerin kaliteleri ile NP ve ML parametrelerinin değerleri arasındaki ilişkidir. Doğrudan bir komşuluk belirlenmemiş olsa bile, MULIPA yönteminin popülasyonlar arasındaki iletişim stratejisi bilginin bir popülasyondan diğerine taşınmasına izin verebilir. Eğer ML değeri oldukça büyük belirlenirse, ilk popülasyona ait en iyi çözümü temsil eden göçmen birey, algoritmadaki diğer popülasyonlar aracılığıyla son popülasyona aktarılabilir. Yerel minimum veya minimumlara takılmaya neden olabilecek bir çözüm göçmen birey olarak seçilip komşu popülasyona gönderildiğinde, tekrarlı gerçekleştirilen haberleşmeden dolayı sadece komşu popülasyon değil diğer popülasyonlar da etkilenecektir. Bunun yanı sıra, NP parametresinin de yüksek seçilmesi durumunda, bir popülasyon içerisinde yerel minimum veya minimumların elde edilmesine neden olabilecek bir göçmen çözümün bulunma olasılığı da yükselmektedir. Yeni paralel tekniğin performansını düşüren söz konusu sorunun üstesinden gelebilmek için, özellikle NP parametresinin

Tablo 3.5. Senaryo-4 için MULIPA sonuçları

D		NP=2				NP=4			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
20	Ort.	66.449	66.402	66.432	66.550	66.552	66.493	66.464	66.490
	En iyi	66.282	66.302	66.312	66.297	66.374	66.374	66.353	66.307
	En kötü	66.669	66.730	66.621	66.802	66.752	66.697	66.611	66.984
	Std.	0.143	0.120	0.114	0.115	0.115	0.082	0.077	0.198
30	Ort.	66.949	66.970	67.097	67.150	67.337	66.925	67.389	67.207
	En iyi	66.354	66.493	66.509	66.579	66.556	66.506	66.792	66.392
	En kötü	67.533	67.508	67.965	68.258	67.946	67.380	67.899	68.796
	Std.	0.373	0.323	0.526	0.533	0.329	0.268	0.370	0.730
D		NP=8							
		ML							
		15		25		35		50	
20	Ort.	66.467		66.591		66.413		66.422	
	En iyi	66.271		66.334		66.246		66.305	
	En kötü	66.707		66.860		66.670		66.654	
	Std.	0.128		0.162		0.103		0.106	
30	Ort.	67.214		67.095		67.095		67.054	
	En iyi	66.400		66.379		66.475		66.568	
	En kötü	68.477		67.839		67.719		67.578	
	Std.	0.514		0.443		0.397		0.341	

4 veya 8 olarak belirlendiği çalışma konfigürasyonlarında *ML* parametresi nispeten küçük seçilmelidir. Bütün bunlara rağmen, MULIPA yönteminin *NP* ve *ML* parametreleri arasındaki ilişkiden kaynaklanan olası dezavantajın güncellenen tedavi yaklaşımıyla kısmen giderebileceği göz önünde bulundurulmalıdır. Önerilen yaklaşımda, popülasyondaki diğer bireyleri domine eden en iyi çözüm, en kritik bireyin tedavisi amacıyla donör olarak kullanılmakta ve plazma dozu aktarılmadan önce iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Donörün iyileştirilmesi ile ilgili işlemler bir döngüde yeterli olmasa ve bir sonraki döngü için aynı çözüm donör olarak seçilse bile, plazma transferine başlamadan önce donör tekrar iyileştirilmeye çalışılmaktadır. Değişen *NP* ve *ML* değerleri ile algoritmanın performansının araştırılmasına Senaryo-4 ile devam edilmiştir. MULIPA, Senaryo-4 üzerinde güzergah planlama için test edilirken, bölümlene nokta sayısı 20 ve 30 olarak ayarlanmıştır [151]. Maksimum değerlendirme sayısı 6000 olarak belirlenirken, popülasyon büyüklüğü 30 olarak ayarlanmıştır [151]. İlk üç senaryoda olduğu gibi, *NP* için 2, 4 ve 8 olmak üzere üç farklı değer, *ML* için ise 15, 25, 35 ve 50 olmak üzere dört farklı değer kullanılmıştır. *D*, *NP* ve *ML* parametrelerine ait özgün değerlerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan her bir test senaryosu, MULIPA tarafından rastgele çekirdekler kullanılarak 50 kez çözülmüştür. Her bir 50 bağımsız koşum için yeni yöntem

Tablo 3.6. Senaryo-5, D 5, 10, 15 ve 20 için MULIPA sonuçları

D		$NP=2$				$NP=4$			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
5	Ort.	50.384	50.384	50.384	50.385	50.384	50.384	50.384	50.385
	En iyi	50.384	50.384	50.384	50.385	50.384	50.384	50.384	50.384
	En kötü	50.384	50.385	50.386	50.387	50.384	50.385	50.386	50.388
	Std.	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001
10	Ort.	50.370	50.371	50.370	50.370	50.372	50.372	50.392	50.371
	En iyi	50.368	50.368	50.368	50.368	50.368	50.368	50.369	50.368
	En kötü	50.373	50.376	50.374	50.373	50.377	50.377	50.781	50.376
	Std.	0.001	0.002	0.001	0.001	0.002	0.002	0.089	0.003
15	Ort.	50.375	50.835	50.370	50.373	50.388	50.382	50.742	50.376
	En iyi	50.368	50.366	50.366	50.366	50.367	50.366	50.366	50.367
	En kötü	50.385	53.222	50.376	50.391	50.569	50.416	53.143	50.399
	Std.	0.005	0.973	0.002	0.006	0.043	0.012	0.850	0.009
20	Ort.	50.499	50.437	50.987	50.398	50.399	50.698	50.445	50.755
	En iyi	50.368	50.369	50.367	50.369	50.372	50.372	50.369	50.373
	En kötü	51.342	51.012	53.427	50.504	50.554	55.934	50.956	53.277
	Std.	0.272	0.147	1.163	0.034	0.028	1.090	0.130	0.892
D		$NP=8$							
		ML							
		15	25	35	50				
5	Ort.	50.384	50.384	50.384	50.384				
	En iyi	50.384	50.384	50.384	50.384				
	En kötü	50.384	50.384	50.384	50.386				
	Std.	0.000	0.000	0.000	0.001				
10	Ort.	50.373	50.373	50.370	50.369				
	En iyi	50.368	50.368	50.368	50.368				
	En kötü	50.395	50.419	50.373	50.373				
	Std.	0.007	0.012	0.001	0.001				
15	Ort.	50.429	50.379	50.376	50.552				
	En iyi	50.368	50.368	50.367	50.366				
	En kötü	50.979	50.418	50.392	53.039				
	Std.	0.156	0.011	0.007	0.637				
20	Ort.	50.589	50.910	50.403	50.490				
	En iyi	50.368	50.377	50.368	50.369				
	En kötü	53.029	52.986	50.506	52.107				
	Std.	0.605	0.816	0.034	0.326				

tarafından bulunan en iyi çözüm kaydedilmiş ve daha sonra kaydedilen çözümlerin en iyi, en kötü, ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri ve standart sapmaları Tablo 3.5'te sunulmuştur. Tablo 3.5'te verilen sonuçlar, Senaryo-4 için NP değerinin 8'den küçük seçilmesi gerektiğini belirtmektedir.

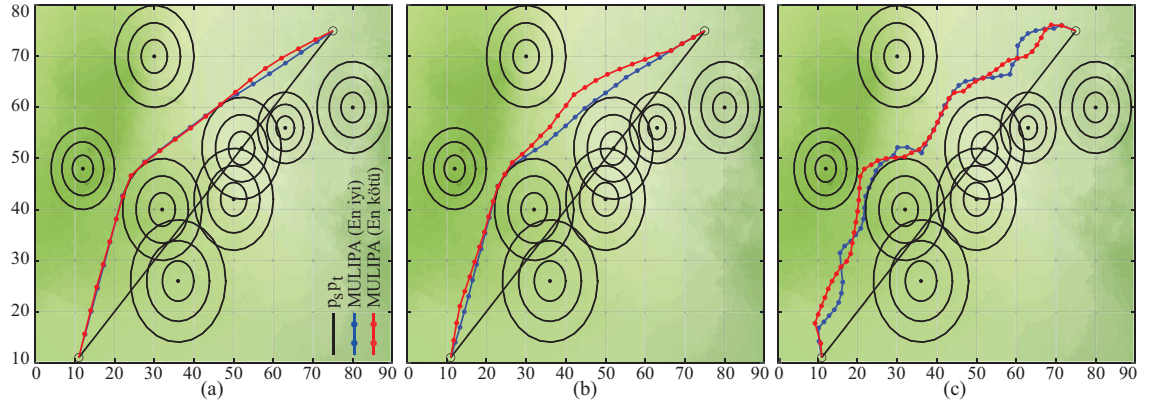
Algoritmanın NP parametresinin 2, 4 ve 8 ve ML değerinin 25 olarak ayarlanmasıyla elde edilen en iyi ve en kötü güzergahların çizildiği Şekil 3.4'te görsel olarak sunulduğu Senaryo-4'ün özellikleri incelendiğinde, Senaryo-3'e benzer bir dizi basit manevra ile daha nitelikli bir güzergah elde edilebildiği ve NP parametresinin daha yüksek

Tablo 3.7. Senaryo-5, D 25, 30, 35 ve 40 için MULIPA sonuçları

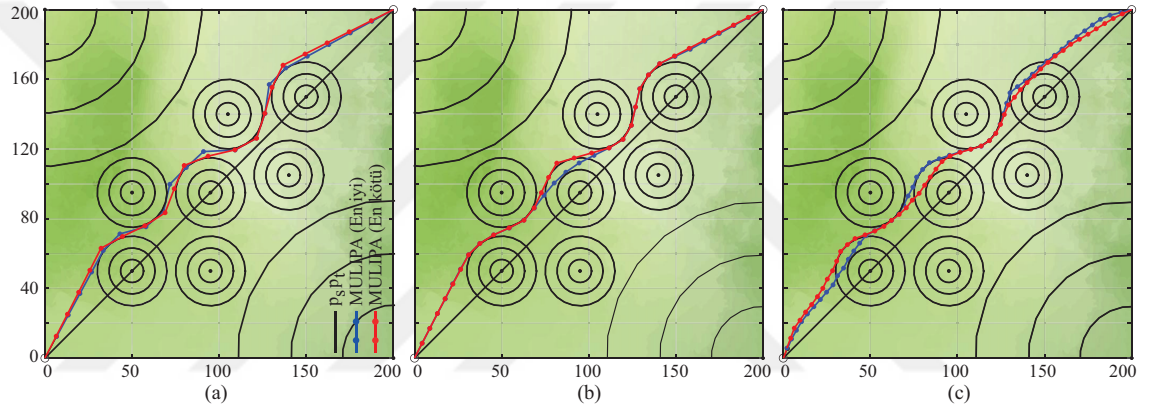
D		NP=2				NP=4			
		ML				ML			
		15	25	35	50	15	25	35	50
25	Ort.	50.832	51.030	50.734	52.086	50.708	50.588	50.700	50.939
	En iyi	50.382	50.382	50.375	50.375	50.370	50.382	50.372	50.401
	En kötü	54.001	58.679	53.193	59.968	53.596	53.713	52.355	53.703
	Std.	0.849	1.181	0.599	2.831	0.706	0.487	0.421	0.907
30	Ort.	51.105	50.853	50.919	50.965	51.398	50.953	50.802	51.472
	En iyi	50.407	50.396	50.374	50.405	50.389	50.384	50.377	50.386
	En kötü	53.601	53.796	53.561	54.317	59.542	53.968	51.902	55.815
	Std.	0.859	0.563	0.815	0.882	2.009	0.840	0.408	1.375
35	Ort.	50.972	50.993	50.968	51.303	51.009	51.007	51.520	50.830
	En iyi	50.422	50.411	50.395	50.403	50.400	50.407	50.404	50.399
	En kötü	51.707	52.682	53.719	54.254	55.209	52.609	57.603	51.619
	Std.	0.352	0.527	0.642	1.011	0.545	0.582	1.547	0.347
40	Ort.	51.418	51.309	51.291	51.660	51.619	51.487	51.568	50.983
	En iyi	50.421	50.425	50.465	50.430	50.429	50.406	50.404	50.423
	En kötü	53.273	54.160	54.012	54.680	55.114	54.349	54.746	51.679
	Std.	0.760	0.785	0.858	1.259	1.353	0.952	1.209	0.348
D		NP=8							
		ML							
		15	25	35	50				
25	Ort.	51.067	51.098	51.018	50.541				
	En iyi	50.383	50.376	50.372	50.373				
	En kötü	53.584	53.830	55.182	51.220				
	Std.	0.880	1.033	1.207	0.246				
30	Ort.	50.764	50.929	51.010	50.811				
	En iyi	50.381	50.395	50.379	50.381				
	En kötü	52.354	52.470	53.872	53.315				
	Std.	0.461	0.550	0.970	0.519				
35	Ort.	50.842	51.398	51.068	51.198				
	En iyi	50.395	50.399	50.427	50.450				
	En kötü	51.988	53.924	53.236	54.063				
	Std.	0.409	0.995	0.525	0.688				
40	Ort.	51.593	51.520	51.520	51.099				
	En iyi	50.482	50.452	50.446	50.421				
	En kötü	55.127	55.626	55.457	52.162				
	Std.	1.202	1.050	1.236	0.427				

değerlerinin nihai çözümlerin kalitesinde belirgin değişiklikler meydana getirmediği görülmektedir.

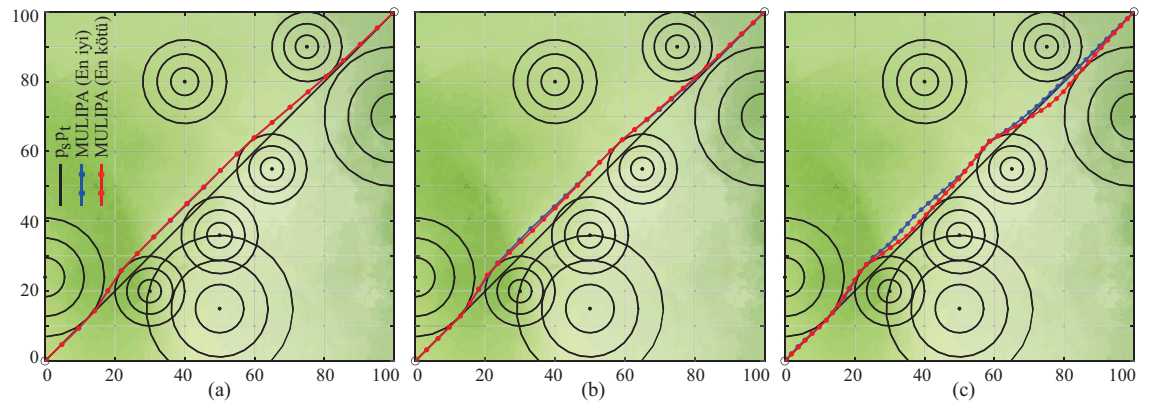
Değişen NP ve ML parametreleri karşısındaki güzergah planlama yeteneğinin analizi Senaryo-5 kullanılarak gerçekleştirilen test çalışmaları ile sonlandırılmıştır. Senaryo-5 üzerinde D parametresi için 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 ve 40 olmak üzere sekiz farklı değer kullanılmıştır. Deneylerde NP parametresine atanacak değer 2, 4 ve 8 olarak belirlenirken, ML parametresine atanacak değerler ise 15, 25, 35 ve 50 olarak seçilmiştir. Senaryo-5 için D , NP ve ML parametrelerine belirtilen değerler atanarak



Şekil 3.1. D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-1 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar

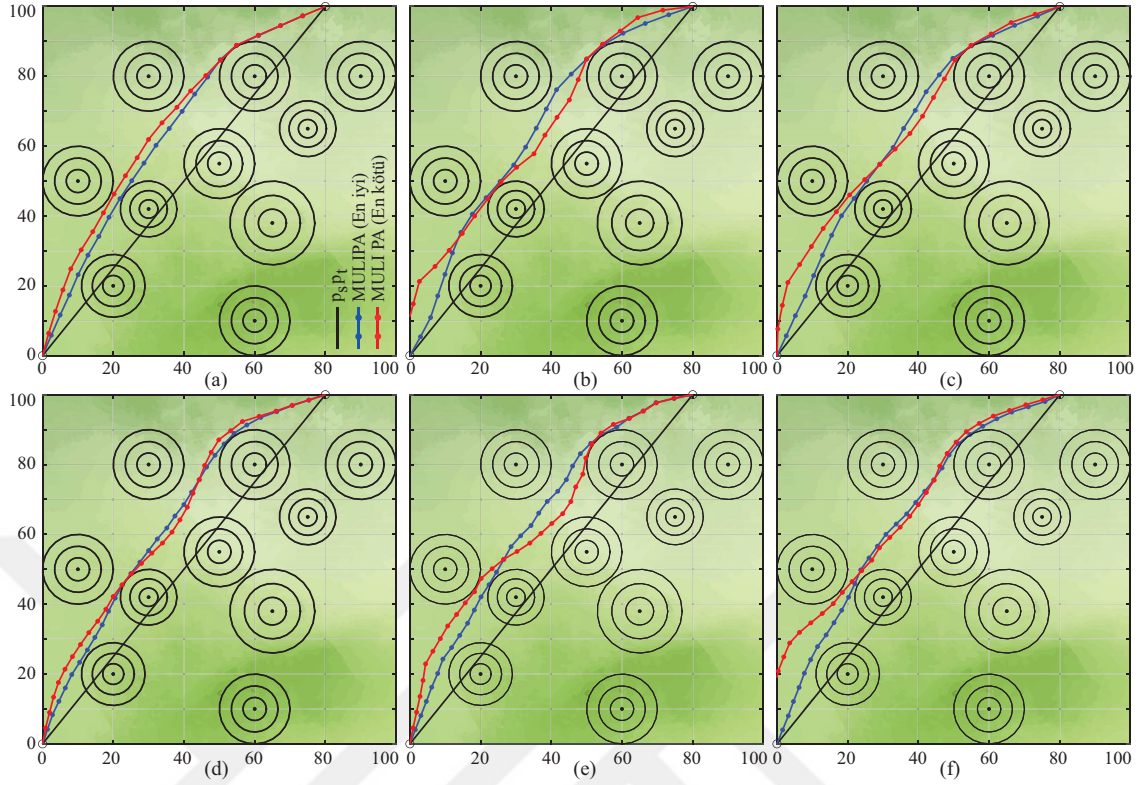


Şekil 3.2. D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-2 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar



Şekil 3.3. D değeri sırasıyla 20 (a), 30 (b) ve 50 (c) için Senaryo-3 üzerinde MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar

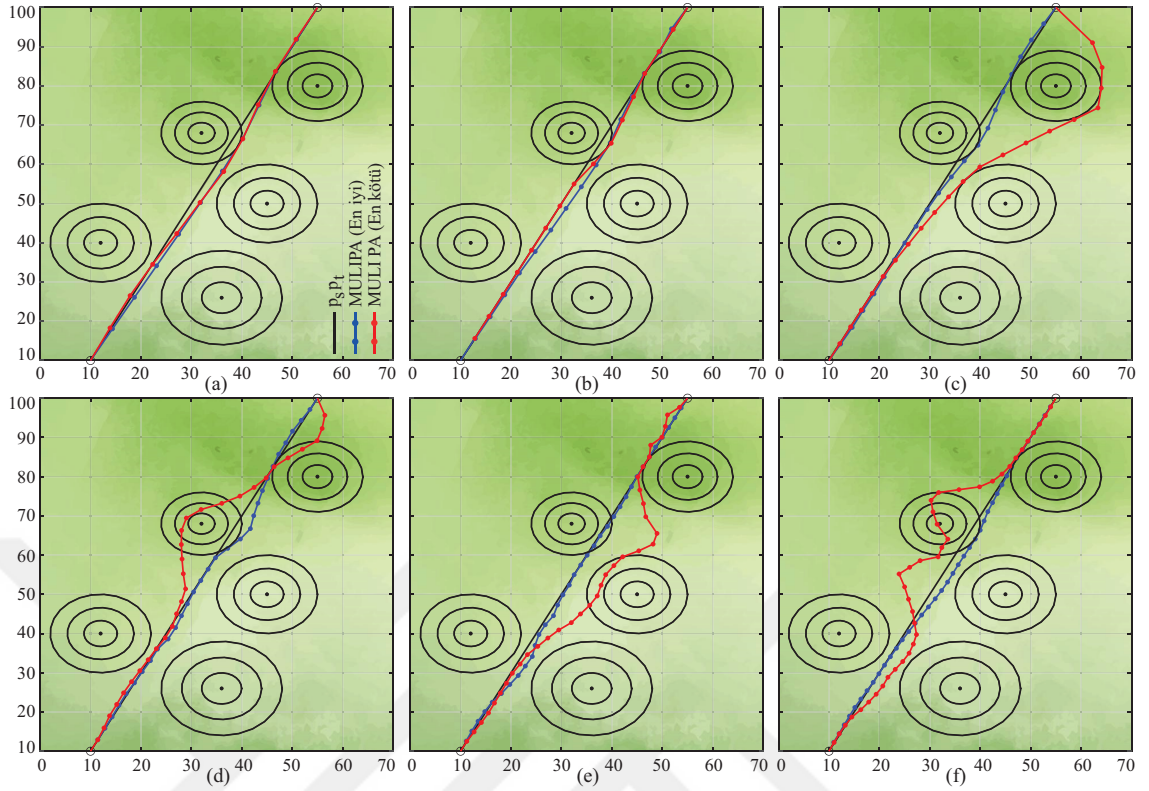
oluşturulan her bir test senaryosu, popülasyon büyüklüğü ve maksimum değerlendirme sayısı sırasıyla 30 ve 6000 olarak ayarlandıktan sonra MULIPA rastgele çekirdeklerde 100 kez çalıştırılmıştır [150]. Her bağımsız çalıştırma için MULIPA tarafından elde edilen en iyi çözüm veya güzergah ve bu çözüme karşılık gelen amaç fonksiyon değerleri



Şekil 3.4. D değerinin 20 ve NP değerinin 2 (a), 4 (b) ve 8 (c) olduğu ve D değerinin 30 ve NP değerinin 2 (d), 4 (e) ve 8 (f) olduğu Senaryo-4 için MULIPA tarafından bulunan en iyi ve en kötü güzergahlar

kaydedilmiştir.

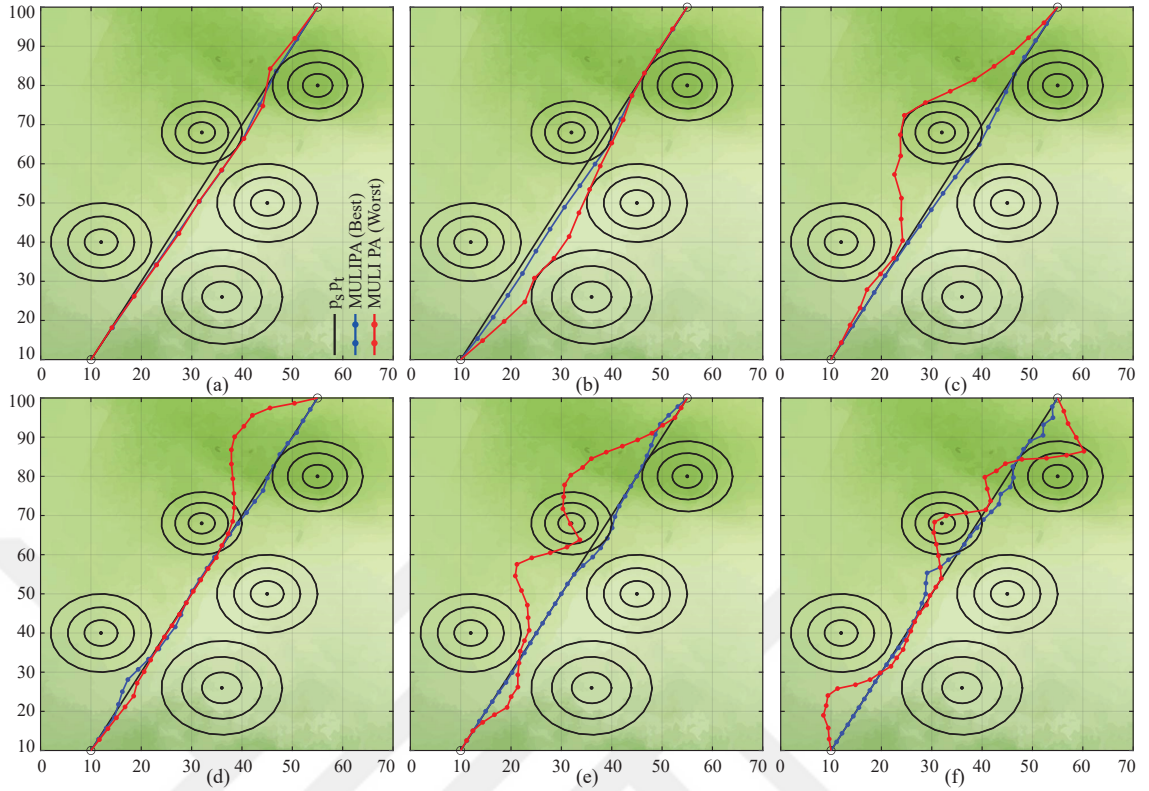
En iyi, en kötü ve ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri ve 100 koşumun standart sapma değerleri belirlenerek Tablo 3.6 ve 3.7’de özetlenmiştir. Tablo 3.6 ve 3.7’de sunulan sonuçlar, güzergah planlama probleminin boyutluluğu veya parametre sayısı ile popülasyon sayısı arasındaki ilişkiyi değerlendirme fırsatı vermektedir. Bu sonuçlara göre, D değeri 5, 10, 15 veya 20 iken, NP parametresi 4 veya daha küçük bir değere ayarlanmalıdır. Buna ek olarak, D 25, 30, 35 veya 40 değerlerine eşitken, NP parametresi 4 veya daha yüksek bir değere ayarlanmalıdır. Bölümleme noktalarının sayısına veya D değerine nispeten daha yüksek değerler atanarak güzergah planlama probleminin zorluğu artırıldığında, algoritma NP değeri ile doğru orantılı artan başlangıç çözüm çeşitliliğinin gücüne daha fazla ihtiyaç duymaktadır. MULIPA tarafından elde edilen en iyi ve en kötü güzergahların ML parametresinin 25 değerine sabitlendiği durumda farklı NP değerleri ile değişimi Senaryo-5 için Şekil 3.5 ve 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.5. NP değeri 4 ve D parametresinin sırasıyla 10 (a), 15 (b), 20 (c), 30 (d), 35 (e), 40 (f) olduğu durumda Senaryo-5 için MULIPA tarafından bulunan en kötü ve en iyi güzergahlar

3.2.2. Değişken Popülasyon Sayısının MULIPA Yürütme Zamanına Etkisi

MULIPA her biri PS tane birey içeren ve optimum güzergahı hesaplaması için bağımsız çekirdeklere veya çözüm birimlerine atanan NP farklı popülasyon kullanmaktadır. Geliştirilen yeni algoritma her bir popülasyonu farklı hesaplama birimlerine atasa da, bir popülasyondaki en iyi bireyin komşu popülasyondaki en kötü bireyle değiştirilmesi için gereken ve komşu popülasyona en iyi bireyin aktarılmasını yöneten iletişim mekanizması ekstra yük getirerek bir koşumun yürütme süresini artırabilir. Eğer bir komşu popülasyon, enfeksiyonun yayılması, donör ve alıcı bireylerin seçimi ve plazma tedavisinin uygulanması ile ilgili temel işlemlere devam ederken başka bir popülasyondan gelen bir göçmeni bekliyorsa, komşu popülasyon ve ilgili hesaplama birimi veya işlemci çekirdeği, göçmen gelene kadar sonraki adımları ertelemek zorundadır. MULIPA, popülasyonları arasındaki iletişimden kaynaklanan yükü analiz etmek için bir önceki bölümde kullanılan beş senaryonun test durumlarıyla ilgili her bir yürütme süresi saniye cinsinden kaydedilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3.8-3.12 aralığında sunulmuştur.



Şekil 3.6. NP değeri 8 ve D parametresinin sırasıyla 10 (a), 15 (b), 20 (c), 30 (d), 35 (e), 40 (f) olduğu durumda Senaryo-5 için MULIPA tarafından bulunan en kötü ve en iyi güzergahlar

Ayrıca IP algoritmasının standart versiyonunun yürütme süreleri de tabloya eklenerek sonuçlar desteklenmiştir. IPA testi için PS değeri 30, NoD ve NoR parametreleri ise 1 olarak ayarlanmıştır. MULIPA ve IPA testleri Intel i5-10500 işlemcili ve Fedora-34 64-bit işletim sistemine sahip bilgisayar üzerinde C programlama dilinden faydalanılarak gerçekleştirilmiştir. MULIPA popülasyonlarını farklı bir çekirdeğe veya hesaplama birimine atamak ve komşu popülasyonlar arasındaki senkronizasyonu sağlayarak göç başarımını artırmak amacıyla POSIX iş parçacığı kütüphanesi kullanılmıştır.

Tablo 3.8-3.13 aralığında paylaşılan sonuçlar NP parametresinin, kullanılan fiziksel çekirdek sayısı olan sekizden küçük olduğu durumlarda MULIPA ile standart IP algoritmasının yürütme sürelerinin çok yakın olduğunu göstermektedir. Alıcı bireye tek doz plazma transferi ile tedavisinin tamamlanması sonrası komşu popülasyonlar arasında duyulan senkronizasyon ihtiyacı önemli ölçüde azalmıştır. Buna karşın, NP parametresine 8 veya daha büyük bir değer atanması paralelleştirme maliyeti, çekirdeklerin hesaplama maliyeti ve komşu popülasyonlar arası göçün gerçekleşmesi için gereken

Tablo 3.8. Senaryo-1 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
20	Ort.	1.007	1.016	1.016	1.043	1.035	1.044	1.057	1.068	1.004
	En iyi	0.993	0.997	1.003	1.017	1.013	1.015	1.022	1.037	0.971
	En kötü	1.033	1.070	1.034	1.115	1.070	1.124	1.170	1.176	1.060
	Std.	0.009	0.019	0.007	0.019	0.017	0.023	0.031	0.034	0.016
30	Ort.	1.563	1.603	1.617	1.646	1.583	1.620	1.675	1.705	1.504
	En iyi	1.542	1.584	1.593	1.625	1.554	1.571	1.549	1.577	1.471
	En kötü	1.660	1.644	1.678	1.695	1.703	1.733	1.715	1.767	1.573
	Std.	0.021	0.014	0.020	0.019	0.029	0.037	0.017	0.033	0.022
50	Ort.	2.684	2.709	2.800	2.866	2.648	2.665	2.716	2.797	2.576
	En iyi	2.606	2.654	2.747	2.813	2.590	2.619	2.669	2.733	2.495
	En kötü	2.855	2.774	2.869	3.087	2.777	2.740	2.789	2.944	2.711
	Std.	0.060	0.025	0.036	0.051	0.041	0.027	0.031	0.045	0.055
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
20	Ort.	1.493		1.500		1.501		1.508		1.004
	En iyi	1.451		1.448		1.451		1.451		0.971
	En kötü	1.566		1.560		1.565		1.569		1.060
	Std.	0.029		0.028		0.020		0.031		0.016
30	Ort.	2.218		2.231		2.269		2.279		1.504
	En iyi	2.167		2.182		2.207		2.220		1.471
	En kötü	2.312		2.302		2.360		2.337		1.573
	Std.	0.033		0.035		0.039		0.030		0.022
50	Ort.	3.772		3.785		3.800		3.842		2.576
	En iyi	3.671		3.709		3.701		3.747		2.495
	En kötü	3.897		3.885		3.950		3.943		2.711
	Std.	0.050		0.053		0.060		0.048		0.055

senkronizasyon maliyetini ciddi şekilde artırarak ihmal edilemez seviyelere getirmektedir.

Bu durum yeni tekniğin bir koşumuna ait yürütme süresinin standart haline göre çok uzun olmasının nedenleri arasındadır. Ele alınan tablolardan çıkarılabilecek diğer bir sonuç da *ML* parametresi ile aynı algoritmanın yürütme süreleri arasındaki ilişkidir. *ML* parametresinin değeri 15'ten 50'ye artarken, MULIPA ortalama yürütme süresi de artmaktadır. *ML* parametresi için daha yüksek değerler seçildiğinde, MULIPA komşu popülasyonlar arasındaki göçleri küçük *ML* parametresi ile çalışan konfigürasyonlara kıyasla daha uzun süre devam ettirir. Her göç, komşu popülasyonlarla eşleşen iş parçacıkları arasında bir senkronizasyon gerektirdiğinden ve algoritmanın sonraki aşamalarına ait bazı işlemler göçmen birey gönderilip alınana kadar ertelendiğinden, MULIPA için bir koşumunu tamamlamak amacıyla geçen süre nispeten daha yüksek

Tablo 3.9. Senaryo-2 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
20	Ort.	2.217	2.245	2.252	2.268	2.265	2.274	2.283	2.289	2.175
	En iyi	2.157	2.206	2.205	2.213	2.242	2.228	2.233	2.233	2.144
	En kötü	2.365	2.386	2.292	2.285	2.302	2.378	2.418	2.432	2.272
	Std.	0.042	0.035	0.022	0.018	0.016	0.035	0.040	0.036	0.024
30	Ort.	3.415	3.446	3.499	3.514	3.476	3.484	3.487	3.524	3.314
	En iyi	3.333	3.361	3.425	3.444	3.390	3.396	3.417	3.463	3.252
	En kötü	3.526	3.537	3.697	3.665	3.543	3.620	3.552	3.594	3.453
	Std.	0.051	0.042	0.057	0.046	0.035	0.044	0.034	0.035	0.037
50	Ort.	5.888	5.931	5.999	6.046	5.863	5.924	6.010	6.054	5.593
	En iyi	5.795	5.830	5.890	5.917	5.771	5.858	5.858	5.910	5.497
	En kötü	6.032	5.998	6.170	6.144	6.101	6.023	6.655	6.077	5.735
	Std.	0.042	0.042	0.054	0.049	0.065	0.045	0.165	0.046	0.071
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
20	Ort.	3.256		3.261		3.271		3.296		2.175
	En iyi	3.163		3.161		3.144		3.156		2.144
	En kötü	3.381		3.362		3.495		3.405		2.272
	Std.	0.050		0.050		0.076		0.049		0.024
30	Ort.	4.899		4.914		5.024		5.108		3.314
	En iyi	4.772		4.770		4.783		4.764		3.252
	En kötü	5.048		5.135		5.303		5.298		3.453
	Std.	0.069		0.080		0.108		0.088		0.037
50	Ort.	8.328		8.457		8.549		8.697		5.593
	En iyi	8.086		8.221		8.377		8.487		5.497
	En kötü	8.536		8.730		8.794		9.424		5.735
	Std.	0.103		0.125		0.111		0.186		0.071

bulunmuştur.

3.2.3. Değişken Popülasyon Büyüklüğünün MULIPA Performansına Etkisi

MULIPA, çözüm için her biri eşit sayıda birey içeren birden fazla popülasyondan yararlanmaktadır. Bir popülasyondaki birey sayısı veya popülasyonun büyüklüğü MULIPA tarafından bulunan güzergahların kalitesini etkileyebilir. Bu nedenle, popülasyon büyüklüğünün nasıl seçilebileceğine karar vermek için bir takım denemelerin yapılması gereklidir. Elde edilen güzergahların niteliklerinin PS parametresi için belirlenen değerlerle değişip değişmediği hakkında bilgi vermek amacıyla, Tablo 3.1'deki tüm senaryolar D ve NP değerleri 30 ve 4, PS değerleri ise 20, 30, 50, 75 ve 100 olarak ayarlanarak yeniden test edilmiştir. Daha önce tamamlanan testlerde olduğu gibi aynı

Tablo 3.10. Senaryo-3 için MULIPA ve IPA'nın yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
20	Ort.	1.987	1.987	1.993	1.994	2.077	2.127	2.143	2.166	1.969
	En iyi	1.963	1.966	1.984	1.971	2.045	2.059	2.090	2.085	1.926
	En kötü	2.101	2.054	2.002	2.113	2.180	2.274	2.331	2.362	2.001
	Std.	0.028	0.026	0.004	0.030	0.034	0.049	0.055	0.081	0.015
30	Ort.	3.100	3.117	3.123	3.137	3.249	3.258	3.267	3.280	2.959
	En iyi	3.073	3.086	3.065	3.114	3.197	3.200	3.190	3.213	2.898
	En kötü	3.166	3.252	3.379	3.186	3.456	3.560	3.566	3.579	3.042
	Std.	0.024	0.032	0.088	0.018	0.049	0.064	0.070	0.084	0.031
50	Ort.	5.169	5.219	5.229	5.253	5.400	5.450	5.475	5.523	4.962
	En iyi	5.126	5.184	5.191	5.208	5.371	5.384	5.405	5.455	4.857
	En kötü	5.275	5.312	5.299	5.323	5.536	5.629	5.568	5.618	5.150
	Std.	0.034	0.029	0.025	0.030	0.030	0.054	0.041	0.038	0.071
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
20	Ort.	2.970		3.054		3.065		3.085		1.969
	En iyi	2.867		2.913		2.969		3.006		1.926
	En kötü	3.224		3.250		3.255		3.206		2.001
	Std.	0.077		0.071		0.067		0.057		0.015
30	Ort.	4.637		4.654		4.657		4.681		2.959
	En iyi	4.534		4.558		4.551		4.556		2.898
	En kötü	4.821		4.823		4.843		4.798		3.042
	Std.	0.067		0.061		0.058		0.056		0.031
50	Ort.	7.816		7.818		7.841		7.874		4.962
	En iyi	7.632		7.619		7.622		7.658		4.857
	En kötü	8.391		8.113		8.124		8.305		5.150
	Std.	0.144		0.130		0.180		0.161		0.071

çalışma şartlarını sağlamak amacıyla ML parametresi için 15, 25, 35 ve 50 değerleri seçilmiştir. Bunun yanı sıra, maksimum değerlendirme sayısı Senaryo-1 için 30000, Senaryo-2 ve Senaryo-3 için 60000 olarak belirlenirken, Senaryo-4 ve Senaryo-5 için bu değer 6000 seçilmiştir. İlk dört senaryo için PS ve ML parametrelerine belirtilen değerler atandıktan sonra MULIPA tarafından 50 bağımsız koşma gerçekleştirilmiştir. Son senaryo içinse PS ve ML parametrelerine daha önce belirtilen değerler atandıktan sonra 100 bağımsız test yapılmıştır.

Tablo 3.14-3.18 aralığında verilen sonuçlar incelendiğinde, MULIPA yönteminin birçok test senaryosunda kararlı performansını koruduğu söylenebilir. Bir metasezgisel yöntemin popülasyon büyüklüğü yüksek seçilirse, problemin çözüm uzayı daha güvenilir bir şekilde taranabilir ve bu sayede algoritma sonraki adımlarına daha nitelikli çözümler

Tablo 3.11. Senaryo-4 için MULIPA ve IPA yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
20	Ort.	0.263	0.274	0.293	0.298	0.270	0.276	0.295	0.328	0.251
	En iyi	0.259	0.268	0.281	0.292	0.260	0.268	0.279	0.299	0.246
	En kötü	0.283	0.285	0.343	0.316	0.316	0.295	0.330	0.381	0.263
	Std.	0.005	0.004	0.012	0.005	0.015	0.007	0.012	0.021	0.004
30	Ort.	0.412	0.442	0.455	0.485	0.424	0.446	0.468	0.496	0.380
	En iyi	0.405	0.434	0.445	0.477	0.407	0.427	0.447	0.478	0.370
	En kötü	0.452	0.460	0.489	0.514	0.477	0.500	0.506	0.533	0.406
	Std.	0.009	0.007	0.008	0.007	0.019	0.019	0.017	0.014	0.008
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
20	Ort.	0.397		0.407		0.408		0.418		0.251
	En iyi	0.372		0.386		0.387		0.382		0.246
	En kötü	0.451		0.445		0.443		0.491		0.263
	Std.	0.016		0.016		0.014		0.027		0.004
30	Ort.	0.603		0.617		0.621		0.631		0.380
	En iyi	0.569		0.577		0.578		0.601		0.370
	En kötü	0.689		0.670		0.670		0.679		0.406
	Std.	0.026		0.025		0.023		0.022		0.008

kümesi ile devam edebilir. Ancak, söz konusu algoritmanın küçük popülasyonla çalıştırılmasına kıyasla döngü veya iterasyon başına daha fazla sayıda değerlendirme tüketilir ve algoritma optimum çözümü veya çözümleri yeterli düzeyde araştırmadan hızlı bir şekilde sonlanır. Deneylerde popülasyon büyüklüğü önemli ölçüde artırılmış olsa da, MULIPA tekniğinin farklı *PS* değerlerine sahip ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri birbirine kıyasla oldukça yakın bulunmuştur. Önerilen yöntemin iletişim mekanizması, bir koşumun başlangıcında nitelikli bireyleri komşular arasında göç ettirerek popülasyonların genel kalitesini iyileştirmektedir. Ayrıca, işlem öncesinde daha da geliştirilmeye çalışılan en iyi bireyden en kritik bireye plazma transferi algoritmanın arama yeteneklerine önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır.

3.2.4. Karşılaştırmalı Çalışmalar

MULIPA tarafından elde edilen güzergahların kalitesi ve validasyonu, metasezgisel temelli diğer güzergah planlama yöntemlerince elde edilen güzergahlarla karşılaştırılarak yapılabilir. Bu amaçla, Senaryo-1, Senaryo-2 veya Senaryo-3 olarak adlandırılan savaş alanlarında MULIPA tarafından bulunan güzergahlar IPA, ABC ve I-ABC,

Tablo 3.12. *D* sırasıyla 5, 10, 15 ve 20 için Senaryo-5 üzerinde elde edilen MULIPA ve IPA yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
5	Ort.	0.034	0.035	0.035	0.036	0.039	0.039	0.039	0.042	0.036
	En iyi	0.032	0.032	0.032	0.033	0.033	0.033	0.033	0.034	0.034
	En kötü	0.047	0.051	0.058	0.050	0.059	0.060	0.062	0.057	0.050
	Std.	0.002	0.003	0.004	0.003	0.006	0.006	0.006	0.006	0.003
10	Ort.	0.077	0.079	0.079	0.080	0.082	0.086	0.087	0.090	0.072
	En iyi	0.070	0.072	0.073	0.075	0.074	0.073	0.074	0.071	0.068
	En kötü	0.110	0.127	0.116	0.107	0.120	0.136	0.137	0.155	0.090
	Std.	0.008	0.009	0.007	0.006	0.008	0.012	0.011	0.014	0.004
15	Ort.	0.117	0.120	0.122	0.127	0.130	0.131	0.133	0.135	0.112
	En iyi	0.109	0.113	0.114	0.120	0.115	0.110	0.116	0.122	0.107
	En kötü	0.165	0.155	0.149	0.156	0.183	0.201	0.171	0.184	0.128
	Std.	0.008	0.008	0.008	0.007	0.014	0.018	0.013	0.013	0.005
20	Ort.	0.157	0.164	0.166	0.175	0.170	0.177	0.179	0.187	0.143
	En iyi	0.149	0.153	0.157	0.166	0.152	0.157	0.163	0.169	0.139
	En kötü	0.227	0.193	0.205	0.202	0.236	0.231	0.230	0.246	0.155
	Std.	0.011	0.009	0.009	0.008	0.019	0.017	0.015	0.016	0.003
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
5	Ort.	0.059		0.058		0.059		0.060		0.036
	En iyi	0.051		0.050		0.048		0.051		0.034
	En kötü	0.111		0.100		0.141		0.092		0.050
	Std.	0.007		0.005		0.010		0.007		0.003
10	Ort.	0.116		0.117		0.117		0.122		0.072
	En iyi	0.104		0.105		0.106		0.107		0.068
	En kötü	0.138		0.142		0.152		0.170		0.090
	Std.	0.007		0.007		0.008		0.011		0.004
15	Ort.	0.181		0.182		0.183		0.185		0.112
	En iyi	0.163		0.158		0.162		0.164		0.107
	En kötü	0.233		0.231		0.250		0.231		0.128
	Std.	0.013		0.014		0.017		0.014		0.005
20	Ort.	0.243		0.247		0.249		0.251		0.143
	En iyi	0.217		0.218		0.215		0.223		0.139
	En kötü	0.322		0.306		0.330		0.304		0.155
	Std.	0.016		0.015		0.020		0.016		0.003

IF-ABC ve BE-ABC algoritmaları gibi geliştirilmiş ABC varyantları tarafından bulunan güzergahlarla karşılaştırılmıştır [149]. MULIPA *NP* ve *ML* parametreleri 4 ve 15 olarak belirlenirken, IPA *NoD* ve *NoR* parametreleri 1 olarak seçilmiştir. Karşılaştırılan güzergah planlama tekniklerine ait çözümlerin aynı koşullar altında elde edilmesini sağlamak için MULIPA ve IP algoritmalarının popülasyon büyüklüğü ile ABC, I-ABC, IF-ABC ve BE-ABC algoritmalarının besin kaynağı sayısı 30 olarak belirlenmiştir [149].

Tablo 3.13. *D* sırasıyla 25, 30, 35 ve 40 için Senaryo-5 üzerinde elde edilen MULIPA ve IPA yürütme süreleri

D		MULIPA								IPA
		NP=2				NP=4				
		ML				ML				
		15	25	35	50	15	25	35	50	
25	Ort.	0.201	0.207	0.216	0.230	0.215	0.220	0.233	0.255	0.183
	En iyi	0.191	0.197	0.206	0.218	0.193	0.201	0.208	0.224	0.178
	En kötü	0.239	0.244	0.294	0.255	0.271	0.279	0.330	0.337	0.204
	Std.	0.009	0.009	0.011	0.008	0.018	0.019	0.022	0.023	0.005
30	Ort.	0.237	0.249	0.260	0.277	0.251	0.264	0.275	0.291	0.219
	En iyi	0.229	0.239	0.249	0.266	0.235	0.246	0.255	0.275	0.214
	En kötü	0.264	0.302	0.296	0.306	0.298	0.336	0.339	0.340	0.256
	Std.	0.008	0.010	0.008	0.008	0.015	0.019	0.017	0.015	0.005
35	Ort.	0.279	0.294	0.310	0.333	0.296	0.315	0.326	0.348	0.256
	En iyi	0.272	0.285	0.298	0.321	0.278	0.290	0.306	0.329	0.249
	En kötü	0.311	0.327	0.334	0.357	0.341	0.417	0.389	0.395	0.271
	Std.	0.007	0.007	0.007	0.008	0.015	0.025	0.018	0.015	0.005
40	Ort.	0.326	0.341	0.361	0.386	0.347	0.364	0.379	0.409	0.285
	En iyi	0.315	0.327	0.347	0.372	0.324	0.342	0.359	0.387	0.278
	En kötü	0.398	0.395	0.396	0.475	0.404	0.439	0.427	0.479	0.303
	Std.	0.012	0.010	0.009	0.013	0.018	0.019	0.016	0.017	0.005
D		MULIPA								IPA
		NP=8								
		ML								
		15		25		35		50		
25	Ort.	0.305		0.307		0.308		0.315		0.183
	En iyi	0.279		0.282		0.282		0.288		0.178
	En kötü	0.366		0.348		0.400		0.361		0.204
	Std.	0.017		0.015		0.019		0.016		0.005
30	Ort.	0.357		0.365		0.367		0.380		0.219
	En iyi	0.332		0.336		0.334		0.351		0.214
	En kötü	0.399		0.419		0.427		0.474		0.256
	Std.	0.018		0.016		0.017		0.020		0.005
35	Ort.	0.421		0.425		0.436		0.445		0.256
	En iyi	0.389		0.397		0.398		0.415		0.249
	En kötü	0.518		0.481		0.503		0.490		0.271
	Std.	0.023		0.019		0.020		0.017		0.005
40	Ort.	0.479		0.486		0.502		0.518		0.285
	En iyi	0.448		0.447		0.461		0.480		0.278
	En kötü	0.597		0.552		0.586		0.626		0.303
	Std.	0.022		0.020		0.026		0.024		0.005

Ayrıca, Senaryo-1 üzerinde gerçekleştirilen test için maksimum değerlendirme sayısı 30000 iken Senaryo-2 ve Senaryo-3 üzerindeki bir test için maksimum değerlendirme sayısı 60000 olarak seçilmiştir [149].

Tablo 3.19-3.21 aralığında verilen ve 50 bağımsız koşum sonrasında hesaplanan ortalama en iyi amaç fonksiyon ve standart sapma değerleri incelendiğinde, MULIPA yönteminin ümit verici performansı açıkça görülmektedir. MULIPA dokuz durumun yedisinde test

Tablo 3.14. Senaryo-1 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları

<i>ML</i>	<i>D</i>		<i>PS</i>				
			20	30	50	75	100
15	30	Ort.	48.3104	48.385	48.516	48.550	48.654
		En iyi	48.147	48.140	48.232	48.183	48.249
		En kötü	48.488	48.687	48.910	49.136	49.075
		Std.	0.101	0.172	0.183	0.288	0.258
25	30	Ort.	48.400	48.387	48.487	48.700	48.699
		En iyi	48.143	48.162	48.167	48.169	48.165
		En kötü	48.829	48.636	49.064	49.325	49.256
		Std.	0.189	0.121	0.257	0.311	0.345
35	30	Ort.	48.404	48.345	48.478	48.536	48.696
		En iyi	48.149	48.152	48.168	48.185	48.176
		En kötü	48.801	48.634	48.980	49.139	49.312
		Std.	0.154	0.135	0.260	0.282	0.263
50	30	Ort.	48.311	48.353	48.479	48.700	48.695
		En iyi	48.162	48.147	48.172	48.179	48.194
		En kötü	48.557	48.672	48.880	49.176	49.318
		Std.	0.105	0.144	0.229	0.316	0.300

Tablo 3.15. Senaryo-2 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları

<i>ML</i>	<i>D</i>		<i>PS</i>				
			20	30	50	75	100
15	30	Ort.	149.754	149.759	149.838	149.816	150.324
		En iyi	149.584	149.589	149.647	149.607	149.619
		En kötü	149.897	149.991	150.087	150.396	152.518
		Std.	0.074	0.082	0.124	0.171	0.923
25	30	Ort.	150.486	149.807	149.759	149.834	150.484
		En iyi	149.556	149.599	149.594	149.566	149.695
		En kötü	152.569	150.191	149.931	150.655	152.616
		Std.	1.218	0.145	0.091	0.233	0.969
35	30	Ort.	150.303	150.208	149.869	149.977	150.161
		En iyi	149.598	149.687	149.681	149.612	149.687
		En kötü	152.567	152.505	150.645	151.802	152.410
		Std.	1.135	0.938	0.201	0.454	0.712
50	30	Ort.	150.312	150.114	149.972	150.058	149.944
		En iyi	149.550	149.616	149.601	149.622	149.605
		En kötü	152.646	152.498	152.550	152.356	152.330
		Std.	1.141	0.827	0.682	0.779	0.478

edilen diğer güzergah planlayıcılardan daha iyi performans gösterip sıralaması 1 olurken, Senaryo-2 için *D* 50 ve Senaryo-3 için *D* 30 iken BE-ABC daha kaliteli çözümler ile önerilen yöntemden daha iyi sonuçlar elde etmiştir. Bununla birlikte, önerilen yeni tekniğin IPA, ABC, I-ABC, IF-ABC algoritmalarından hala üstün olduğu ve *D* 50 iken Senaryo-2 ve *D* 30 iken Senaryo-3 için en iyi ikinci güzergah planlayıcısı olduğu da gözden kaçırılmamalıdır. İlk üç senaryo için MULIPA ve diğer metasezgiseller arasındaki karşılaştırma, bölümlene noktalarının sayısı artarken veya savaş alanlarının

Tablo 3.16. Senaryo-3 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları

<i>ML</i>	<i>D</i>		<i>PS</i>				
			20	30	50	75	100
15	30	Ort.	70.908	70.910	70.911	70.914	70.918
		En iyi	70.905	70.904	70.903	70.905	70.906
		En kötü	70.912	70.917	70.919	70.921	70.928
		Std.	0.002	0.003	0.004	0.004	0.005
25	30	Ort.	70.909	70.909	70.911	70.913	70.917
		En iyi	70.904	70.904	70.904	70.903	70.906
		En kötü	70.914	70.914	70.924	70.919	70.929
		Std.	0.002	0.002	0.004	0.004	0.006
35	30	Ort.	70.910	70.910	70.914	70.916	70.917
		En iyi	70.903	70.906	70.908	70.905	70.904
		En kötü	70.921	70.917	70.925	70.926	70.930
		Std.	0.004	0.003	0.005	0.005	0.007
50	30	Ort.	70.909	70.911	70.913	70.916	70.920
		En iyi	70.903	70.905	70.904	70.907	70.906
		En kötü	70.916	70.918	70.929	70.925	70.937
		Std.	0.002	0.003	0.006	0.005	0.008

Tablo 3.17. Senaryo-4 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları

<i>ML</i>	<i>D</i>		<i>PS</i>				
			20	30	50	75	100
15	30	Ort.	67.205	67.337	67.584	67.829	67.804
		En iyi	66.768	66.556	66.949	66.797	66.997
		En kötü	67.857	67.946	69.070	68.949	68.236
		Std.	0.327	0.329	0.540	0.624	0.359
25	30	Ort.	66.994	66.925	67.376	67.327	68.203
		En iyi	66.537	66.506	66.634	66.937	66.920
		En kötü	67.498	67.380	68.794	68.146	70.587
		Std.	0.264	0.268	0.556	0.298	1.016
35	30	Ort.	66.901	67.389	67.336	67.621	67.771
		En iyi	66.419	66.792	66.811	66.841	66.996
		En kötü	68.010	67.899	68.735	68.827	69.019
		Std.	0.375	0.370	0.611	0.547	0.617
50	30	Ort.	66.948	67.207	67.113	67.796	67.790
		En iyi	66.445	66.392	66.373	66.755	66.962
		En kötü	67.384	68.796	68.015	68.479	68.708
		Std.	0.281	0.730	0.402	0.525	0.563

özellikleri değişirken yol planlayıcılarının belirledikleri güzergahların niteliklerini koruyup korumadıklarını değerlendirme şansı da vermektedir. Tablo 3.19-3.21’de verilen sonuçlardan, MULIPA tarafından bulunan güzergahların ortalama en iyi amaç fonksiyon değerlerinin, test edilen diğer algoritmalara kıyasla özellikle Senaryo-1 ve Senaryo-3 için birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Bölümleme noktalarının sayısı 20 iken 50 olmasına rağmen, MULIPA tutarlı ve umut verici performansını korumaya

Tablo 3.18. Senaryo-5 için dört popülasyonlu MULIPA sonuçları

<i>ML</i>	<i>D</i>		<i>PS</i>				
			20	30	50	75	100
15	30	Ort.	50.745	51.398	51.587	51.439	51.421
		En iyi	50.380	50.389	50.403	50.429	50.444
		En kötü	52.215	59.542	54.125	54.346	55.037
		Std.	0.465	2.009	1.122	1.069	1.021
25	30	Ort.	50.728	50.953	50.892	51.882	51.146
		En iyi	50.389	50.384	50.391	50.410	50.415
		En kötü	51.399	53.968	53.158	55.129	52.305
		Std.	0.332	0.840	0.574	1.560	0.492
35	30	Ort.	50.804	50.802	51.424	51.748	51.776
		En iyi	50.386	50.377	50.387	50.448	50.458
		En kötü	53.308	51.902	53.720	54.364	55.634
		Std.	0.598	0.408	1.077	1.157	1.331
50	30	Ort.	50.743	51.472	50.877	51.257	51.123
		En iyi	50.376	50.386	50.401	50.420	50.391
		En kötü	53.465	55.815	52.213	54.345	52.726
		Std.	0.608	1.375	0.429	0.785	0.639

devam etmekte ve belirlenen güzergahların amaç fonksiyon değerlerindeki değişim çok düşük seviyede kalmaktadır. Popülasyondaki en iyi bireyin plazma kaynağı olarak kullanılmasına dayanan bir yöntemin uygulanması, MULIPA tekniğinin tedavi sürecine belirgin düzeyde katkı sağlamaktadır. Ayrıca, bu yeni yöntemin zekice tasarlanmış göç şeması, bir popülasyonun komşu popülasyondan daha kaliteli çözümler almasına ve sonraki operasyonlar için bu çözümleri hızlı bir şekilde kullanmasına olanak tanımaktadır. Bahsedilen avantajlı tarafların beklenen bir sonucu olarak MULIPA, başlangıç veya hedef noktası, bölümlene noktalarının sayısı, düşman tehditlerinin sayısı, konumları ve yarıçapları açısından savaş alanı özellikleri değişse bile bulunan güzergahların kalitesini korumaktadır.

MULIPA ile diğer metasezgisel yöntemler arasındaki karşılaştırmalı çalışmalara Senaryo-4 ile devam edilmiştir. MULIPA tarafından bulunan *NP* ve *ML* parametrelerinin 4 ve 15 olarak konfigüre edildiği durumdaki güzergahlar standart IPA, ABC, PSO, DE ve CIJADE, JADE ve CIPDE gibi bazı geliştirilmiş DE varyantlarının güzergahları ile karşılaştırılmıştır. Önceki karşılaştırmalı çalışmalarda olduğu gibi, bu çalışmada da IP algoritmasının *NoD* ve *NoR* değerleri 1 olarak belirlenmiştir. Söz konusu güzergah planlayıcılarının ortalama en iyi, en iyi, en kötü amaç fonksiyon değerleri ve standart sapmaları maksimum değerlendirme sayısı 6000 olarak ayarlanarak

Tablo 3.19. Senaryo-1 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		MULIPA	IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	48.181	48.231	49.881	54.388	49.797	48.955
	Std.	0.025	0.043	0.597	3.665	0.639	0.595
	Sıra	1	2	5	6	4	3
30	Ort.	48.385	49.276	52.988	60.459	51.939	50.456
	Std.	0.172	0.470	1.425	3.288	1.343	0.672
	Sıra	1	2	5	6	4	3
50	Ort.	49.535	59.221	59.972	80.174	59.956	54.982
	Std.	0.637	4.957	2.913	7.757	2.214	2.231
	Sıra	1	3	5	6	4	2
Ort. Sıralama		1	2.333	5	6	4	2.666
Genel Sıralama		1	2	5	6	4	3

Tablo 3.20. Senaryo-2 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		MULIPA	IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	150.856	151.821	161.745	171.698	160.183	160.027
	Std.	0.181	0.341	2.552	2.182	0.924	1.519
	Sıra	1	2	5	6	4	3
30	Ort.	149.759	151.465	154.927	185.792	153.583	153.410
	Std.	0.082	1.295	2.512	3.754	0.492	0.554
	Sıra	1	2	5	6	4	3
50	Ort.	154.316	157.286	157.204	164.990	157.814	153.524
	Std.	1.522	1.683	3.603	2.811	1.905	1.047
	Sıra	2	4	3	6	5	1
Ort. Sıralama		1.333	2.666	4.333	6	4.333	2.333
Genel Sıralama		1	3	4	6	4	2

Tablo 3.21. Senaryo-3 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		MULIPA	IPA	ABC	I-ABC	IF-ABC	BE-ABC
20	Ort.	70.906	71.110	73.509	73.720	73.025	72.888
	Std.	0.001	0.001	0.248	0.472	0.107	0.140
	Sıra	1	2	5	6	4	3
30	Ort.	70.910	71.204	73.934	74.845	73.692	70.078
	Std.	0.003	0.014	1.013	0.890	0.408	0.463
	Sıra	2	3	5	6	4	1
50	Ort.	70.956	72.519	78.872	81.888	77.482	75.890
	Std.	0.012	2.064	3.142	2.771	2.098	1.395
	Sıra	1	2	5	6	4	3
Ort. Sıralama		1.333	2.333	5	6	4	2.333
Genel Sıralama		1	2	5	6	4	2

50 bağımsız çalıştırma sonrasında elde edilmiştir [151]. Tablo 3.22’de verilen sonuçlara bakıldığında, önerilen yeni yöntemin yüksek sayıda bölümlene noktası nedeniyle hassas rotalamaya ihtiyaç duyan İHA için daha kararlı güzergahlar belirlediği görülmektedir.

MULIPA, 20 bölümlene noktası içeren test senaryolarında CIJADE, JADE ve CIPDE tabanlı güzergah planlayıcılarının gerisinde kalsa da, söz konusu test için MULIPA ve en iyi güzergah planlayıcısının ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerleri arasındaki fark en iyi güzergah planlayıcısı lehine 0.126 olmuştur . Ancak, bölümlene nokta sayısı %50 artırılıp 30 olarak ayarlandığında, MULIPA yönteminin potansiyeli açığa çıkarak test edilen metasezgisellerden daha iyi performans göstermektedir. Ayrıca, 30 bölümlene noktası içeren test senaryosu için MULIPA ve ikinci en iyi yol planlayıcılarının ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri arasındaki farkın MULIPA lehine 2.960 olduğunu belirtmek gerekmektedir.

Tablo 3.22. Senaryo-4 için MULIPA ve diğer metasezgisel yöntemler arasında yapılan karşılaştırma

<i>D</i>		MULIPA	IPA	CIJADE	PSO	DE	ABC	JADE	CIPDE
20	Ort.	66.552	68.422	66.426	70.794	67.397	67.260	66.524	66.469
	En iyi	66.374	67.747	66.298	67.663	66.730	66.631	66.321	66.331
	En kötü	66.752	68.944	66.646	73.960	72.571	68.184	67.007	66.751
	Std.	0.115	0.395	0.0875	1.869	1.249	0.5129	0.193	0.126
	Sıra	4	7	1	8	6	5	3	2
30	Ort.	67.337	75.561	70.297	78.982	75.197	72.656	70.407	71.033
	En iyi	66.556	74.119	67.622	73.753	71.766	67.845	67.521	68.170
	En kötü	67.946	79.823	75.256	85.561	81.645	76.718	81.631	78.238
	Std.	0.329	1.387	1.813	3.828	2.434	2.147	3.026	2.502
	Sıra	1	7	2	8	6	5	3	4
Ort. Sıralama		2.500	7	1.500	8	6	5	3	3
Genel Sıralama		2	7	1	8	6	5	3	3

MULIPA tekniğinin güzergah planlamadaki performansı ilk dört test senaryosu için en az 20 bölümlene noktası içermektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bu yeni tekniğin, özellikle bu dört senaryo için bölümlene nokta sayısı 20’den fazla olduğu durumlarda daha iyi performans sergilediği anlaşılmıştır. Fakat MULIPA performansının diğer yaklaşımlardan iyi olduğunu ispat edebilmek için Senaryo-5’ten faydalanarak yeni bir karşılaştırmalı çalışma daha yapılmıştır. MULIPA ile karşılaştırılan algoritmalar arasında IPA, ABC, BA, ACO, BBO, DE, ES, FA, GA, PBIL, PSO ile BAM, MFA, SGA ve PGSO gibi bazı yöntemlerin geliştirilmiş versiyonları yer almaktadır. Bu çalışmada MULIPA yönteminin *NP* ve *ML* parametreleri 4 ve 15 olarak ayarlanırken, IP algoritmasının *NoD* ve *NoR* parametreleri 1 olarak konfigüre edilmiştir. Karşılaştırılan algoritmaların sonuçlarını aynı koşullar altında elde ettiklerini garanti etmek için popülasyon büyüklüğü ve maksimum değerlendirme sayısı sırasıyla 30 ve 6000 olarak belirlenmiştir [78, 80, 150]. Birbirinden bağımsız 100 koşum sonrasında

belirlenen ortalama en iyi, en iyi, en kötü amaç fonksiyon ve standart sapma değerleri Tablo 3.23 ve 3.24’te sunulmuştur. Bu tablolar ile verilen sonuçlar, önerilen yöntemin sekiz test durumundan yedisi için on beş rakip algoritmanın tamamından daha iyi performans gösterdiğini ve ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri dikkate alındığında en iyi güzergah planlayıcısı olarak sıralamada yer aldığını ortaya koymaktadır. Sadece 30 bölümlere noktasına sahip test durumu için MULIPA hem BAM hem de MFA yönteminin gerisinde kalmış ve üçüncü sırada yer almıştır.

Tablo 3.23. Senaryo-5 için MULIPA ve IPA, ABC, BA, BAM, ACO, BBO ve DE ile yapılan karşılaştırmalı çalışma sonuçları

D		MULIPA	IPA	ABC	BA	BAM	ACO	BBO	DE
5	Ort.	50.384	50.384	50.384	106.483	59.054	61.520	72.730	58.596
	En iyi	50.384	50.384	50.384	60.690	54.357	61.372	60.330	54.357
	En kötü	50.384	50.385	50.385	345.255	60.240	63.320	171.500	62.200
	Std.	0.000	0.001	0.001	-	-	-	-	2.160
	Sıra	1	1	1	16	7	12	14	5
10	Ort.	50.372	50.398	50.384	69.425	52.707	61.950	57.965	53.104
	En iyi	50.368	50.376	50.371	52.360	51.395	60.228	52.947	51.395
	En kötü	50.377	50.457	50.406	108.738	607.244	68.190	76.820	56.736
	Std.	0.002	0.024	0.013	-	-	-	-	2.600
	Sıra	1	3	2	14	9	13	12	10
15	Ort.	50.388	50.570	50.591	63.601	51.231	60.260	59.526	52.278
	En iyi	50.367	50.424	50.425	53.075	50.609	58.530	52.557	50.611
	En kötü	50.569	51.219	50.789	85.745	60.192	61.000	90.370	62.580
	Std.	0.043	0.193	0.100	-	-	-	-	3.730
	Sıra	1	2	3	14	5	13	12	9
20	Ort.	50.399	50.925	52.181	63.630	50.760	66.220	61.88	52.722
	En iyi	50.372	50.495	50.866	52.395	50.467	60.445	54.723	50.510
	En kötü	50.554	51.271	54.672	83.706	53.742	67.180	78.200	64.570
	Std.	0.028	0.196	0.994	-	-	-	-	3.710
	Sıra	1	4	5	13	3	14	12	7
25	Ort.	50.709	51.678	54.690	64.901	50.709	61.570	64.780	54.408
	En iyi	50.370	50.790	51.911	55.017	50.448	61.549	55.528	50.551
	En kötü	53.596	57.314	57.530	74.926	53.519	62.070	80.330	69.660
	Std.	0.706	1.503	1.618	-	-	-	-	4.120
	Sıra	1	4	10	14	1	12	13	8
30	Ort.	51.398	51.789	59.805	66.616	51.106	63.950	67.870	59.988
	En iyi	50.389	50.997	54.527	57.247	50.467	63.230	56.607	50.898
	En kötü	59.542	61.565	64.940	80.084	60.285	64.710	78.580	74.120
	Std.	2.009	2.275	2.366	-	-	-	-	6.740
	Sıra	3	4	9	13	1	12	14	10
35	Ort.	51.009	55.889	66.187	67.703	51.461	68.310	71.560	67.900
	En iyi	50.400	51.005	57.259	57.448	50.479	66.960	63.021	52.537
	En kötü	55.209	96.301	74.095	82.737	58.819	68.720	93.850	84.440
	Std.	0.545	12.249	4.298	-	-	-	-	9.150
	Sıra	1	5	10	11	2	13	14	12
40	Ort.	51.619	55.994	75.595	69.973	51.876	74.580	74.850	77.620
	En iyi	50.429	51.025	63.269	58.650	50.602	69.795	63.550	54.549
	En kötü	55.114	116.195	86.613	83.263	58.427	77.060	90.700	93.260
	Std.	1.353	16.188	5.356	-	-	-	-	10.900
	Sıra	1	4	13	10	2	11	12	14
Ort. Sıralama		1.250	3.375	6.625	13.125	3.625	12.500	12.875	9.375
Genel Sıralama		1	2	5	14	3	12	13	10

Tablo 3.24. Senaryo-5 için MULIPA ve IPA, ABC, BA, BAM, ACO, BBO ve DE ile yapılan karşılaştırmalı çalışma sonuçları

D		ES	FA	GA	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
5	Ort.	80.720	58.750	60.470	59.167	66.139	59.906	60.501	53.669
	En iyi	59.590	54.359	55.247	54.357	59.763	55.167	55.654	53.380
	En kötü	112.260	65.740	61.600	62.419	72.250	66.071	61.200	60.630
	Std.	-	3.010	-	2.250	-	2.620	1.560	2.260
	Sıra	15	6	10	8	13	9	11	4
10	Ort.	76.280	52.180	52.542	51.574	101.440	57.041	52.279	50.849
	En iyi	57.420	51.399	51.607	51.397	83.112	52.207	51.549	50.649
	En kötü	123.460	56.710	60.110	53.786	119.250	68.622	56.165	53.330
	Std.	-	2.370	-	1.730	-	2.250	1.430	1.870
	Sıra	15	6	8	5	16	11	7	4
15	Ort.	71.860	52.822	52.188	50.897	128.250	58.340	51.891	51.516
	En iyi	58.255	50.617	50.871	50.612	107.223	52.097	50.807	50.452
	En kötü	103.860	94.276	57.447	53.832	189.200	87.320	61.800	55.460
	Std.	-	4.250	-	1.340	-	4.010	2.450	1.490
	Sıra	15	10	8	4	16	11	7	6
20	Ort.	70.190	53.733	53.090	50.700	185.430	58.248	53.167	52.398
	En iyi	60.232	50.463	50.825	50.455	130.152	52.464	50.846	50.657
	En kötü	81.450	78.914	59.180	52.028	337.300	78.160	68.950	59.850
	Std.	-	7.580	-	1.020	-	6.950	3.990	1.560
	Sıra	15	10	8	2	16	11	9	6
25	Ort.	72.780	53.904	53.781	50.999	257.720	60.263	54.157	54.587
	En iyi	63.369	50.491	51.242	50.457	159.740	53.738	51.239	50.782
	En kötü	83.910	66.452	60.398	53.704	699.600	78.139	65.700	63.160
	Std.	-	8.660	-	0.810	-	7.550	4.060	2.380
	Sıra	15	6	5	3	16	11	7	9
30	Ort.	74.780	54.962	55.008	51.357	395.540	62.385	54.521	56.891
	En iyi	65.725	50.683	51.921	50.516	230.150	53.299	51.617	51.019
	En kötü	91.300	65.976	62.718	58.336	2396	93.695	64.710	75.320
	Std.	-	9.120	-	1.230	-	8.200	4.110	3.450
	Sıra	15	6	7	2	16	11	5	8
35	Ort.	76.520	55.996	55.960	51.601	684.660	64.135	55.826	59.744
	En iyi	66.745	51.083	52.311	50.471	270.330	55.503	51.633	54.136
	En kötü	88.76	83.887	74.479	55.883	6362	82.833	67.610	71.450
	Std.	-	9.550	-	1.650	-	8.650	4.120	4.010
	Sıra	15	7	6	2	16	9	4	8
40	Ort.	80.260	57.856	57.493	52.198	1169	64.885	57.110	62.420
	En iyi	68.231	51.523	52.208	50.561	390.620	55.737	52.618	55.092
	En kötü	96.420	86.663	72.069	57.724	7103	84.730	67.870	72.650
	Std.	-	10.430	-	2.380	-	9.410	4.550	4.540
	Sıra	15	7	6	3	16	9	5	8
Ort. Sıralama		15	7.250	7.250	3.625	15.625	10.250	6.875	6.625
Genel Sıralama		15	8	8	3	16	11	7	5

Daha önce de belirtildiği gibi, MULIPA ile önerilen yeni tedavi yaklaşımı, plazma kaynağı olarak en iyi çözümün kullanılmasına ve bu çözümün alıcı için kullanılmadan önce iyileştirilmeye çalışılmasına dayanmaktadır. Bölümleme noktalarının sayısı, takip edilecek güzergahın daha hassas olması amacıyla yüksek seçildiğinde, plazma için daha uygun parametrelerin bulunma olasılığı yöntemin doğası gereği artmakta ve bir alıcının tedavisi daha verimli hale gelmektedir. Bununla birlikte, Senaryo-5 üzerinde

5, 10 ve 15 gibi az sayıda bölümlere noktası belirleyerek en uygun güzergahı bulmayı gerektiren bazı test senaryoları olmasına rağmen MULIPA test edilen tüm metasezgisel yöntemlerden daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Bu yeni yöntemin güzergah planlama probleminin hem düşük hem de yüksek boyutlu konfigürasyonları için gösterdiği umut verici performansın temelinde ise algoritmanın popülasyonları arasındaki özelleştirilmiş göç şeması bulunmaktadır. Popülasyonlardan biri, geliştirilen tedavi şemasının sunduğu olumlu yanlardan faydalanarak nitelikli bir çözüm elde ettiğinde, bu çözümü eğer ML aşılmamışsa hemen komşu popülasyona taşımaktadır. Bu sayede MULIPA popülasyonları arasındaki iletişimin ayarlanması ve yönetilmesiyle, nitelikli plazma bulmakta zorlanan bir popülasyon, komşu popülasyonun daha uygun çözümleriyle desteklenebilmektedir.

Tablo 3.25. Ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri dikkate alınarak yapılan Wilcoxon testi sonuçları

MULIPA vs.	IPA	ABC	BA	BAM	ACO
Z -val.	0.0156	0.0156	0.0078	0.0390	0.0078
ρ -val.	2.4175	2.4175	2.6600	2.0635	2.6600
W -	28	28	36	33	36
W +	0	0	0	3	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA
MULIPA vs.	BBO	DE	ES	FA	GA
Z -val.	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
ρ -val.	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600
W -	36	36	36	36	36
W +	0	0	0	0	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA
MULIPA vs.	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
Z -val.	0.0156	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
ρ -val.	2.4175	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600
W -	35	36	36	36	36
W +	1	0	0	0	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA

MULIPA, Senaryo-5 ile ilgili test senaryolarının büyük bir bölümünde daha iyi çözümler üretmiş ve rakiplerinden daha iyi performans sergilemiştir. Bununla birlikte, güzergah planlayıcılarının ortalama en iyi amaç fonksiyonu değerlerinin birbirine kıyasla oldukça yakın olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. MULIPA tarafından bulunan çözümlerin algoritma lehine istatistiksel bir anlamlılık oluşturmaya yeterli olup olmadığını araştırmak için Wilcoxon işaretli sıralar testi adı verilen parametrik olmayan bir test kullanılmıştır. Wilcoxon işaretli sıralar testi kullanıldığında, ρ olarak temsil edilen anlamlılık düzeyi 0.05 olarak ayarlanmaktadır. MULIPA ile diğer güzergah planlayıcısı arasındaki karşılaştırma

Tablo 3.26. En iyi amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak yapılan Wilcoxon testi sonuçları

MULIPA vs.	IPA	ABC	BA	BAM	ACO
Z -val.	0.0156	0.0156	0.0078	0.0078	0.0078
ρ -val.	2.4175	2.4175	2.6600	2.6600	2.6600
$W-$	28	28	36	36	36
$W+$	0	0	0	0	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA
MULIPA vs.	BBO	DE	ES	FA	GA
Z -val.	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
ρ -val.	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600
$W-$	36	36	36	36	36
$W+$	0	0	0	0	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA
MULIPA vs.	MFA	PBIL	PSO	SGA	PGSO
Z -val.	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078	0.0078
ρ -val.	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600	2.6600
$W-$	36	36	36	36	36
$W+$	0	0	0	0	0
Sign.	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA	MULIPA

için Wilcoxon işaretli sıralar testi ile elde edilen anlamlılık seviyesi bu değerden küçükse, iki güzergah planlayıcısı arasındaki fark MULIPA yönteminin rakibinden istatistiksel olarak daha iyi olduğunu belirtmek için yeterlidir. Aksi takdirde, algoritmaların sonuçları arasındaki fark, algoritmalarından birinin diğerinden istatistiksel olarak daha iyi olduğuna karar vermek için yeterli değildir. Senaryo-5 için ortalama en iyi ve en iyi amaç fonksiyonu değerleri dikkate alınarak MULIPA ve diğer algoritmalar arasındaki karşılaştırmaya ait Wilcoxon işaretli sıralar testi sonuçları Tablo 3.25 ve 3.26 ile verilmiştir. Bu tablolarda test istatistikleri Z ile gösterilirken, MULIPA tekniğinin diğer güzergah planlayıcılarından daha iyi olduğu sıralamaların toplamı $W-$ ile ve diğer güzergah planlayıcılarından daha kötü olduğu sıralamaların toplamı ise $W+$ şeklinde gösterilmiştir. Tablo 3.25 ve 3.26 ile özetlenen test sonuçlarından, önerilen yöntemin Senaryo-5 için on beş güzergah planlayıcısının hepsinden istatistiksel olarak daha iyi İHA güzergahları belirleyebildiği anlaşılmaktadır. Senaryo-5'in bazı durumları için MULIPA ve IPA, BAM veya MFA gibi zorlu rakipleri tarafından bulunan güzergahların nitelikleri arasındaki fark küçük olsa da, Wilcoxon işaretli sıralar testinin sonuçları, söz konusu farklılıkların MULIPA lehine istatistiksel bir anlamlılık oluşturmak için yeterli olduğunu göstermiştir.

3.3. Sonuç

Modern bilgisayar sistemlerinin hesaplama gücü ve eşzamanlı yürütme yetenekleri, araştırmacıların dikkatini metasezgisel algoritmaların performanslarını daha da iyileştirmek için çoklu popülasyonların kullanımına çekmiştir. Bu çalışmada, en yeni ve gelecek vaat eden metasezgisel tekniklerden biri olan IP algoritması veya IPA, çoklu popülasyon tabanlı tasarım yaklaşımının avantajlı yönlerinden faydalanmak için özelleştirilmiş ve Çoklu IP algoritması veya MULIPA olarak adlandırılan yeni bir versiyonu bir İHA güzergah planlama tekniği olarak önerilmiştir. MULIPA tekniğinin çözüm kapasitesinin araştırılması için farklı savaş alanı senaryoları ve popülasyon büyüklüğü, popülasyon sayısı ve göç sıklığının ayrı ayrı belirlendiği çeşitli konfigürasyonlar kullanılarak detaylı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. MULIPA ile ilgili deneysel çalışmalarla elde edilen sonuçlar, standart IP algoritmasına ek olarak ABC, BA, ACO, FA ve PSO gibi iyi bilinen sürü zekası tabanlı algoritmalar, BBO, DE, ES, GA ve PBIL gibi evrimsel algoritmalar ve daha sonra bu algoritmalara ait I-ABC, IF-ABC, BE-ABC, BAM, JADE, CIPDE, CIJADE, MFA, SGA ve PGSO gibi geliştirilmiş varyantların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. MULIPA ve diğer güzergah planlayıcıları arasındaki karşılaştırmalı çalışmalar, MULIPA yönteminin senaryoların büyük bir kısmında daha güvenilir ve verimli güzergahlar bulduğunu göstermiştir. Önerilen teknikle yeniden tasarlanan tedavi şeması, *NoD* ve *NoR* olarak adlandırılan IP algoritmasına özgü kontrol parametrelerinin gerekliliğini ortadan kaldırmakta ve popülasyondan seçilen bireye daha hassas tedavi uygulanabilmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, yeni tekniğin özelleştirilmiş haberleşme şeması, bir popülasyonun komşu popülasyondan en nitelikli bireye anında erişmesine ve kullanmasına izin verirken, ilgili popülasyonları değerlendirmekten sorumlu çekirdeklerin veya iş parçacıklarının senkronizasyon yükünü kabul edilebilir düzeyde tutmaktadır. İlerleyen zamanlarda MULIPA, daha kapsamlı test ortamlarında, popülasyona özel tedavi işlemleri geliştirilerek ve uygulanarak, farklı komşuluk topolojileri ve haberleşme yöntemleri ile optimizasyona ihtiyaç duyulan farklı mühendislik problemlerinin çözümü için güncellenerek performansı analiz edilebilir.

4. BÖLÜM

TARTIŞMA, SONUÇ ve ÖNERİLER

4.1. Tartışma, Sonuç ve Öneriler

Havacılık uygulamalarında gün geçtikçe artan kullanımıyla öne çıkan SİHA/İHA sistemlerinin uçuşu için gereken temel ihtiyaçlar arasında görev güzergahının planlanması yer almaktadır. Bir optimizasyon problemi olarak tanımlanabilen ve detayları 1.Bölüm’de verilen güzergah planlama probleminin IP algoritması ve önerilen yeni varyantı olan MULIPA ile çözülmesi tezin odak noktasını oluşturmaktadır.

Uçuş güzergahının uygunluğunun belirlenmesinde hava aracının özelliklerinin bilinmesi önem arz etmektedir. Günümüzde farklı özellik ve boyutlarda çeşitli görevler için çok sayıda İHA sistemleri kullanılmaktadır. Bu durum ortak veya benzer özelliğe sahip İHA platformlarının sınıflandırılarak ihtiyaç duyulan sistemin, mevcut araçlar içerisinde gereksinimlere uygun ve hızlı belirlenmesini sağlayacağı için yapılan sınıflandırma çalışmalarına yer verilmiştir. Temelde döner kanat ve sabit kanat olmak üzere iki ana başlık altında incelenen İHA sistemlerinin uçuş dinamikleri hakkında bilgi verilerek sabit irtifada manevranın nasıl yapılabileceği açıklanmıştır. IP algoritmasının güzergah planlama problemi için en uygun güzergahı bulabilmesi problemin matematiksel olarak izah edilmesiyle mümkün olmaktadır. Savaş alanında görev yapan bir İHA için güzergah planlaması yapılacağından öncelikle bu arazi bazı yaklaşımlardan faydalanılarak modellenmiştir. Savaş alanında yer alan düşman unsurları daire şeklinde ve bu sistemlerin hedef algılama kabiliyetleri daire çapının büyüklüğü ile gösterilmiştir. Vuruş gücü veya imha kabiliyeti içinse t_k notasyonu ile yeni bir parametre daha tanımlanmıştır. Uygun güzergahın belirlenebilmesi yol boyunca hesaplanan ve amaç fonksiyonunu oluşturan toplam yol ve düşman maliyeti dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu hesaplamayı basitleştirmek ve işlem yükünü azaltmak amacıyla başlangıç ve hedef noktaları arasında

en kısa güzergahı da ifade eden düz bir hat çizilmiş daha sonra geometrik dönüşümden faydalanılarak bu hattın koordinat takımının x eksenine ile çakıştırılması sağlanmıştır. Güzergahın oluşturulabilmesi için gereken noktaları belirlemek amacıyla daha önce çizilen en kısa güzergah problem parametre sayısını da ifade eden D adet farklı noktadan dikey doğrularla bölünmüş ve bu yeni dikey doğrular üzerinde amaç fonksiyon değeri dikkate alınarak çözüm kümesi aranmıştır. Yol maliyetinin güzergah uzunluğu ile doğru orantılı değişeceği kabulü ile amaç fonksiyonun hesaplanması basitleştirilirken, düşman maliyeti için düşman unsurun tespit menzilinde kalması durumuna göre maliyet hesabının değiştiği vurgulanmış ve anlatılmıştır.

IP algoritmasının sabit irtifada İHA için güzergah planlama problemine uygulanmadan önce temel işlem adımlarının anlaşılması gerekmektedir. Bu amaçla immün veya konvelasan plazma yönteminin kısa tarihinden ve biyolojik temellerinden bahsedilmiştir. IP yönteminin temel işlem adımlarından başlangıç popülasyonunun oluşturulması, enfeksiyonunun yayılması, plazma transferinin gerçekleştirilmesi ve donör hafızasının güncellenmesi 2.Bölüm’de detaylarıyla anlatılmıştır. Daha sonra algoritma özellikleri verilen beş farklı savaş alanı üzerinde test edilmiştir. İlk olarak uygun güzergahların oluşturulması üzerinde önemli etkiye sahip olan PS , NoD ve NoR parametrelerine farklı değerler atanarak problem çözülmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde NoD ve NoR değerleri 1, PS 20 ve 30 değerini aldığı en iyi güzergahların oluşturulduğu anlaşılmıştır. Güzergah planlama problemi çözümü için uyarlanan ve içinde ABC, DE, GWO gibi yaygın kullanıma sahip 14 farklı algoritma ile karşılaştırmalı çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda IPA rakip algoritmalara karşı en iyi güzergah planlayıcı olmayı başarmıştır. Bu başarı ayrıca Wicoxon işaretli sıralar testiyle de doğrulanmak istenmiştir. En iyi, en kötü ve ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri referans alınarak yapılan testlerde IPA genel olarak üstünlüğünü kanıtlamıştır.

Algoritmanın çalışma performansını artırmak amacıyla güncel paralelleştirme tekniklerinden çok popülasyonlu paralelleştirme yaklaşımı algoritmaya uyarlanmaya çalışılmıştır. 3.Bölüm’de detayları verilen yeni teknik, Çoklu IP veya kısaca MULIPA olarak tanıtılmıştır. Bu yeni yaklaşımda halka tabanlı komşuluk topolojisi ile popülasyonlar arasındaki haberleşmenin sağlanmasının yanı sıra haberleşme yükü

de yönetilebilmiştir. MULIPA yönteminde standart IP algoritmasının plazma transfer işlemi sadece en iyi birey ile en kötü birey arasında olacak şekilde değiştirilmiştir. Bu durumun beklenen sonucu olarak *NoD* ve *NoR* parametrelerine ihtiyaç kalmamış, bu parametreler yerlerini *ML* ve *NP* değişkenlerine bırakmışlardır. Yeni parametrelerin algoritmanın performansı üzerindeki etkilerini gözlemleyebilmek adına *NP* 2, 4 ve 8 değerleri için test edilmiştir. Çalışma sonucunda her bir senaryo için bu değerlerin özel olarak belirlenmesinin gerektiği anlaşılmıştır. *ML* parametresindeki değişimin etkilerini gözlemlerken de benzer sonuçlara ulaşılmıştır. Parallelleştirmenin temel hedefleri arasında yer alan yürütme zamanının analizi bu yeni parametrelerin üzerinden yapılmıştır. Bu amaçla MULIPA ve standart IP algoritması arasında karşılaştırmalı bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Değişken *PS* değerinin MULIPA üzerindeki etkisi incelenmiş ve genel olarak 20 değeri için daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmiştir. Son olarak MULIPA ile popüler metasezgisel algoritmalar arasında güzergah planlama problemi üzerinde karşılaştırmalı test gerçekleştirilmiştir. Senaryo-1, 2, 3 ve 5 için MULIPA diğer tekniklerden daha iyi güzergah planlarken, Senaryo-4 için genel sıralamada en iyi ikinci güzergah planlayıcısı olsa da durak nokta sayısı artırıldığında birinci sıraya tekrar yerleşmiştir. Senaryo-5 üzerinde gerçekleştirilen test sonuçlarından en iyi, en kötü ve ortalama en iyi amaç fonksiyon değerleri dikkate alınarak yapılan Wilcoxon işaretli sıralar testinde MULIPA rakiplerini geride bırakmayı başarmıştır.

Sabit irtifada güzergah planlama probleminin çözümü ile gerçek hayatta kullanılabilir güzergahlar elde edilmesine karşın özellikle engebeli bir arazide optimum güzergah için değişken irtifaya sahip güzergah/lara ihtiyaç vardır. Bu amaçla problemin üç boyutta ve hava aracının kabiliyetleri dikkate alınarak çözülmesi planlanmaktadır. Ayrıca MULIPA, IP algoritmasının geliştirilebilir olduğunu ve performans iyileştirmesinin yapılabileceğini göstermiştir. İlerleyen çalışmalarda gelişmeye açık olan IP algoritmasının işlem adımları güncellenerek farklı versiyonları önerilebilecektir. Farklı avaş alanı modelleri kullanılarak elde edilen sonuçların gerçek hayatta uygulanabilirliği artırılacaktır.

KAYNAKLAR

1. Kim, J., Kim, S., Ju, C., Son, H.I., 2019. Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications, **IEEE Access**, **7**:105100–105115.
2. Ronconi, G., Batista, T., Merola, V. The Utilization of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for Military Action in Foreign Airspace, **UFRGS Model United Nations**, **2**:137–180,.
3. Palik, M. Nagy, M. Brief history of UAV development, **Repüléstudományi Közlemények**, **31**(1):155–166,.
4. Cook, K. The silent force multiplier: The history and role of UAVs in warfare, **IEEE Aerosp. Conf. Proc.**
5. Keane, J. Carr, S. A brief history of early unmanned aircraft, **Applied Phys. Lab**, **32**(3):558–571,.
6. Jiang, H. Liang, Y. Online Path Planning of Autonomous UAVs for Bearing-Only Standoff Multi-Target Following in Threat Environment, **IEEE Access**, **6**:22531–22544,.
7. Gross, O. The New Way of War: Is There a Duty to Use Drones, **Fla. Law Rev**, **67**, online]. Available:.
8. Iscold, P., Pereira, G., Tôrres, L. Development of a hand-launched small UAV for ground reconnaissance, **IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst**, **46**(1):335–348,.
9. Rumba, R. Nikitenko, A. The wild west of drones: A review on autonomous-UAV traffic-management, 2020 Int. Conf. Unmanned Aircr. Syst. ICUAS 2020, 1317–1322,.
10. Nex, F. Remondino, F. UAV for 3D mapping applications: A review, **Appl. Geomatics**, **6**(1):1–15,.

11. Guo, Y., Liu, C., Coombes, M. Spraying Coverage Path Planning for Agriculture Unmanned Aerial Vehicles, 2021 26th Int. Conf. Autom. Comput. Syst. Intell. through Autom. Comput. ICAC 2021.
12. Huang, Y., Wang, H., Yao, P., 2016. Energy-optimal path planning for solar-powered UAV with tracking moving ground target, **Aerospace Science and Technology**, **53**:241–251.
13. Lin, N., Tang, J., Li, X., Zhao, L. A novel improved bat algorithm in UAV path planning, **Comput. Mater. Contin**, **61**(1):323–344,.
14. Karaboğa, D., 2014. Yapay Zeka Optimizasyon Algoritmaları, Nobel Akademi Yayıncılık.
15. Jin, Y., Wang, H., Sun, C., 2021. Classical Optimization Algorithms, 41–51, Springer International Publishing, Cham.
16. Pham, D. Karaboga, D., 2012. Intelligent optimisation techniques: genetic algorithms, tabu search, simulated annealing and neural networks, Springer Science & Business Media.
17. Gandomi, A.H., Yang, X.S., Talatahari, S., Alavi, A.H., 2013. Metaheuristic applications in structures and infrastructures, Newnes.
18. Aslan, S. Demirci, S., 2020. Immune Plasma Algorithm: A Novel Meta-Heuristic for Optimization Problems, **IEEE Access**, **8**:220227–220245.
19. Kİsa, M., Demirci, S., Arslan, S., Aslan, S., 2021. Solving Channel Assignment Problem in Cognitive Radio Networks with Immune Plasma Algorithm, *2021 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK)*, 818–822, IEEE.
20. Arslan, S., 2022. Solving the problem of time series prediction using immune plasma programming, **Avrupa Bilim Teknol. Derg**, 219–224.
21. Taşdemir, A., Demirci, S., Aslan, S., 2022. Performance Investigation of Immune Plasma Algorithm on Solving Wireless Sensor Deployment Problem, *2022 9th*

International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE), 296–300, IEEE.

22. Aslan, S. Demirci, S., 2022. An improved immune plasma algorithm with a regional pandemic restriction, **Signal, Image and Video Processing**, **16**(8):2093–2101.
23. Ajay, V. Nesasudha, M., 2022. Detection of Attackers in Cognitive Radio Network Using Optimized Neural Networks., **Intelligent Automation & Soft Computing**, **34**(1).
24. Deng, L., Chen, H., Liu, H., Zhang, H., Zhao, Y. Overview of UAV path planning algorithms,” 2021 IEEE Int, **Conf. Electron. Technol. Commun. Information, ICETCI**, 520–523,.
25. Saadi, A., Soukane, A., Meraihi, Y., Gabis, A., Mirjalili, S., Ramdane-Cherif, A. UAV Path Planning Using Optimization Approaches: A Survey, **Arch. Comput. Methods Eng**, **29**(6):4233–4284,.
26. Popovic, M., Hitz, G., Nieto, J., Sa, I., Siegwart, R., Galceran, E. Online Informative Path Planning for Active Classification Using UAVs, *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom*, 5753–5758,.
27. Alghamdi, Y., Munir, A., La, H. Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles, **IEEE Consum. Electron. Mag**, **10**(6):9–20,.
28. Singhal, G., Bansod, B., Mathew, L. Unmanned Aerial Vehicle Classification, Applications and Challenges: A Review, **Nov**.
29. Singhal, G., Bansod, B., Mathew, L., 2018. Unmanned Aerial Vehicle Classification , Applications and Challenges : A Review, **Preprint**, (November):1–19.
30. Alghamdi, Y., Munir, A., La, H.M., 2021. Architecture, Classification, and Applications of Contemporary Unmanned Aerial Vehicles, **IEEE Consumer Electronics Magazine**, **10**(6):9–20.
31. Jyoti Batth, R., 2020. *Classification of Unmanned Aerial vehicles: A Mirror Review*, 408–413.

32. Fahlstrom, P. Gleason, T., 2012. Introduction to UAV Systems, John Wiley and Sons.
33. Hassanalian, M. Abdelkefi, A., 2017. Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, **Progress in Aerospace Sciences**, **91**:99–131.
34. Elmeseiry, N., Alshaer, N., Ismail, T., 2021. A Detailed Survey and Future Directions of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) with Potential Applications, **Aerospace Engineering**.
35. Yaacoub, J.P., Noura, H., Salman, O., Chehab, A., 2020. Security analysis of drones systems: Attacks, limitations, and recommendations, **Internet of Things**, **11**:100218.
36. Watts, A.C., Ambrosia, V.G., Hinkley, E.A., 2012. Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use, **Remote Sensing**, **4**(6):1671–1692.
37. Dalamagkidis, K., Valavanis, K., Piegler, L., 2009. On Integrating Unmanned Aircraft Systems into the National Airspace System.
38. Arjomandi, M., Agostino, S., Mammone, M., Nelson, M., Zhou, T., 2006. Classification of unmanned aerial vehicles, **Report for Mechanical Engineering class, University of Adelaide, Adelaide, Australia**, 1–48.
39. Çoban, S. Oktay, T., 2018. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) According to Engine Type, **Journal of Aviation**, **2**(2):177 – 184.
40. Cheng, C., Wu, J., Zhang, Y., Li, H., Zhou, C., 2020. Aerodynamics and dynamic stability of micro-air-vehicle with four flapping wings in hovering flight, **Advances in Aerodynamics**, **2**(1):1–19.
41. Lee, C., Kim, S., Chu, B., 2021. A survey: Flight mechanism and mechanical structure of the UAV, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, **22**(4):719–743.
42. G, D. Hull and others, Fundamentals of airplane flight mechanics, volume 19, Springer.

43. Professor, M.R., Aircraft Dynamics From Modeling to Simulation.
44. Mohammadi, M., Mohammad Shahri, A., Boroujeni, Z., 2012. Modeling and Adaptive Tracking Control of a Quadrotor UAV, **International Journal of Intelligent Mechatronics and Robotics (IJIMR)**, 2:58–81.
45. Dobrokhodov, V., 2015. Kinematics and Dynamics of Fixed-Wing UAVs, 243–277, Springer Netherlands, Dordrecht.
46. Okazaki, H., Isogai, K., Nakano, H., 2016. Modeling and simulation of motion of a quadcopter in a light wind, *2016 IEEE 59th International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS)*, 1–4.
47. Powers, C., Mellinger, D., Kumar, V., 2015. Quadrotor Kinematics and Dynamics, 307–328, Springer Netherlands, Dordrecht.
48. Jevtić, Đ., Svorcan, J., Radulović, R., 2021. Flight Mechanics, Aerodynamics and Modelling of Quadrotor, *I. Karabegović, Ed., New Technologies, Development and Application IV*, 681–689, Springer International Publishing, Cham.
49. Qin, R. Duan, C. The principle and applications of Bernoulli equation, **J. Phys. Conf. Ser.**, **916**(1):012038,.
50. Oliveira, A.R.E., 2019. History of the Bernoulli Principle, *T. Uhl, Ed., Advances in Mechanism and Machine Science*, 1161–1178, Springer International Publishing, Cham.
51. Speight, J., 2017. Bernoulli's Principle, 77–77.
52. Lindsay, G.A., 1952. Pressure energy and Bernoulli's principle, **American Journal of Physics**, **20**(2):86–88.
53. Anderson, J., 2011. Introduction to Flight, McGraw-Hill Education.
54. Bergmann, D.P., Denzel, J., Pfeifle, O., Notter, S., Fichter, W., Strohmayer, A., 2021. In-flight Lift and Drag Estimation of an Unmanned Propeller-Driven Aircraft, **Aerospace**, **8**(2).

55. Sahwee, Z., Kamal, N.L.M., Hamid, S.A., Norhashim, N., Lott, N., Asri, M.H.M., 2019. Drag Assessment of Vertical Lift Propeller in Forward Flight for Electric Fixed-Wing VTOL Unmanned Aerial Vehicle, **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, **705**(1):012007.
56. Palossi, D., Gomez, A., Draskovic, S., Keller, K., Benini, L., Thiele, L., 2017. *Self-Sustainability in Nano Unmanned Aerial Vehicles: A Blimp Case Study*, 79–88.
57. Verbeke, J. Schutter, J.D., 2018. Experimental maneuverability and agility quantification for rotary unmanned aerial vehicle, **International Journal of Micro Air Vehicles**, **10**(1):3–11.
58. Wang, J., Tan, R., Nie, L., 2022. A Steady-State Flight Control Algorithm Combining Stretching Ratio Coefficient and PID Control for UAVs in Uncertain Environments, **Sustainability**, **14**(22):14678.
59. Xu, C., Duan, H., Liu, F., 2010. Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning, **Aerospace Science and Technology**, **14**(8):535–541.
60. Ding, H., Gao, P., Xiang, X., Lin, H., 2012. Fast range profile simulation using shooting and bouncing ray technique under arbitrary radar signal, *ISAPE2012*, 1008–1011.
61. Asadi, S., Azimirad, V., Eslami, A., Ghanbari, A. A novel global optimal path planning and trajectory method based on adaptive dijkstra-immune approach for mobile robot, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, AIM*, 1093–1098,.
62. Kala, R., Shukla, A., Tiwari, R. Fusion of probabilistic A* algorithm and fuzzy inference system for robotic path planning, **Artificial Intelligence Review**, **33**(4):307–327,.
63. Ferguson, D. Stentz, A. Using interpolation to improve path planning: The Field D* algorithm, **Journal of Field Robotics**, **23**(2):79–101,.

64. Al-Mutib, K., Alsulaiman, M., Emaduddin, M., Ramdane, H., Mattar, E. D*
lite based real-time multi-agent path planning in dynamic environments,
*Proceedings - CIMSIm 2011: 3rd International Conference on Computational
Intelligence, Modelling and Simulation*, 170–174,.
65. Takahashi, O. Schilling, R. Motion Planning in a Plane Using Generalized Voronoi
Diagrams, **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, **5**(2):143–150,.
66. Li, G., Yamashita, A., Asama, H., Tamura, Y. An efficient improved artificial
potential field based regression search method for robot path planning, *2012
IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2012*,
1227–1232,.
67. Kothari, M., Postlethwaite, I., Gu, D. Multi-UAV path planning in obstacle rich
environments using rapidly-exploring random trees, *Proceedings of the IEEE
Conference on Decision and Control*, 3069–3074,.
68. Duan, H., Yu, Y., Zhou, R. UCAV path planning based on Ant Colony Optimization
and satisficing decision algorithm, 2008 IEEE Congress on Evolutionary
Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence, 957–962,.
69. Duan, H., Liu, S., Wu, J. Novel intelligent water drops optimization approach to
single UCAV smooth trajectory planning, **Aerospace Science and Technology**,
13(8):442–449,, doi:.
70. Duan, H., Yu, Y., Zhang, X., Shao, S. Three-dimension path planning for
UCAV using hybrid meta-heuristic ACO-DE algorithm, **Simulation Modelling
Practice and Theory**, **18**(8):1104–1115,.
71. Ma, Q. Lei, X. Application of Improved Particle Swarm Optimization Algorithm
in UCAV Path Planning, *Artificial Intelligence and Computational Intelligence*,
206–214.
72. Ma, Q. Lei, X. Application of artificial fish school algorithm in UCAV
path planning, *2010 IEEE Fifth International Conference on Bio-Inspired
Computing: Theories and Applications (BIC-TA)*, 555–559,.

73. Xu, C., Duan, H., Liu, F. Chaotic artificial bee colony approach to Uninhabited Combat Air Vehicle (UCAV) path planning, **Aerospace Science and Technology**, **14**(8):535–541,, doi:.
74. Zhang, Y., Wu, L., Wang, S. UCAV path planning based on FSCABC, **International journal on information**, **14**:687–692,.
75. Zhang, Y., Wu, L., Wang, S. UCAV path planning by fitness-scaling adaptive chaotic particle swarm optimization, **Mathematical Problems in Engineering**, **2013**.
76. Li, P. Duan, H. Path planning of unmanned aerial vehicle based on improved gravitational search algorithm, **Science China Technological Sciences**, **55**:2712–2719,.
77. Fu, Z.F., Path Planning of UCAV Based on a Modified GeesePSO Algorithm.
78. Wang, G., Guo, L., Duan, H., Liu, L., Wang, H. A modified firefly algorithm for UCAV path planning, **International Journal of Hybrid Information Technology**, **5**(3):123–144,.
79. Wang, G. A hybrid metaheuristic DE/CS algorithm for UCAV three-dimension path planning, **The Scientific World Journal**, **2012**.
80. Wang, G., Guo, L., Duan, H., Liu, L., Wang, H. A bat algorithm with mutation for UCAV path planning, **The Scientific World Journal**, **2012**.
81. Wang, G.G., Chu, H., Mirjalili, S. Three-dimensional path planning for UCAV using an improved bat algorithm, **Aerospace Science and Technology**, **49**:231–238,, doi:.
82. Liu, C., Gao, Z., Zhao, W. A New Path Planning Method Based on Firefly Algorithm, *2012 Fifth International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*, 775–778,.
83. Zhu, W. Duan, H. Chaotic predator–prey biogeography-based optimization approach for UCAV path planning, **Aerospace Science and Technology**, **32**(1):153–161,, doi:.

84. Heidari, A. Abbaspour, R., 2014. Improved black hole algorithm for efficient low observable UCAV path planning in constrained aerospace, **Advances in computer science: an international journal**, 3(3):87–92.
85. Tang, Z. Zhou, Y. A Glowworm Swarm Optimization Algorithm for Uninhabited Combat Air Vehicle Path Planning, **Journal of Intelligent Systems**, 24(1):69–83,.
86. Yu, G., Song, H., Gao, J. Unmanned Aerial Vehicle Path Planning Based On Tlbo Algorithm, **International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems**, 7(3):1310–1325,.
87. Zhang, X. Duan, H. An improved constrained differential evolution algorithm for unmanned aerial vehicle global route planning, **Applied Soft Computing**, 26:270–284,, doi:.
88. Zhou, Q. Chen, X. A Wolf Colony Search Algorithm Based on the Complex Method for Uninhabited Combat Air Vehicle Path Planning, **International Journal of Hybrid Information Technology**, 7:183–200,.
89. Duan, H. Qiao, P. Pigeon-inspired optimization: a new swarm intelligence optimizer for air robot path planning, **International journal of intelligent computing and cybernetics**, 7(1):24–37,.
90. Li, B., Gong, L.G., Yang, W.L. An Improved Artificial Bee Colony Algorithm Based on Balance-Evolution Strategy for Unmanned Combat Aerial Vehicle Path Planning, **TheScientificWorldJournal**, 232704,.
91. Zhang, B. Duan, H. Three-Dimensional Path Planning for Uninhabited Combat Aerial Vehicle Based on Predator-Prey Pigeon-Inspired Optimization in Dynamic Environment, **IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics**, 14(1):97–107,.
92. Chen, Y., Yu, J., Mei, Y., Wang, Y., Su, X. Modified central force optimization (MCFO) algorithm for 3D UAV path planning, **Neurocomputing**, 171:878–888,, doi:.

93. Zhou, Y., Bao, Z., Wang, R., Qiao, S., Zhou, Y. Quantum Wind Driven Optimization for Unmanned Combat Air Vehicle Path Planning, **Applied Sciences**, **5**(4):1457–1483,.
94. Zhang, S., Zhou, Y., Li, Z., Pan, W. Grey Wolf optimizer for unmanned combat aerial vehicle path planning, **Advances in Engineering Software**, **99**:121–136,.
95. Liu, Y., Zhang, X., Guan, X., Delahaye, D. Adaptive sensitivity decision based path planning algorithm for unmanned aerial vehicle with improved particle swarm optimization, **Aerospace Science and Technology**, **58**:92–102,, doi:.
96. LIU, Y., ZHANG, X., ZHANG, Y., GUAN, X. Collision free 4D path planning for multiple UAVs based on spatial refined voting mechanism and PSO approach, **Chinese Journal of Aeronautics**, **32**(6):1504–1519,.
97. Luo, Q., Li, L., Zhou, Y. A quantum encoding bat algorithm for uninhabited combat aerial vehicle path planning, **International Journal of Innovative Computing and Applications**, **8**(3):182–193,.
98. Zhang, Q., Wang, R., Yang, J., Ding, K., Li, Y., Hu, J. Modified collective decision optimization algorithm with application in trajectory planning of UAV, **Applied Intelligence**, **48**.
99. Alihodzic, A., Tuba, E., Capor-Hrosik, R., Dolicanin, E., Tuba, M. Unmanned aerial vehicle path planning problem by adjusted elephant herding optimization, 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), 1–4,.
100. Alihodzic, A., Hasić, D., Selmanovic, E. An Effective Guided Fireworks Algorithm for Solving UCAV Path Planning Problem, *9th International Conference, NMA 2018*, 29–38, Borovets, Bulgaria.
101. Miao, F., Zhou, Y., Luo, Q. A modified symbiotic organisms search algorithm for unmanned combat aerial vehicle route planning problem, **Journal of the Operational Research Society**, **70**(1):21–52,.

102. DOLICANIN, E., Fetahovic, I., Tuba, E., Capor-Hrosik, R., Tuba, M. Unmanned Combat Aerial Vehicle Path Planning by Brain Storm Optimization Algorithm, **Studies in Informatics and Control**, **27**.
103. Pan, J.S., Liu, J.L., Hsiung, S.C. Chaotic Cuckoo Search Algorithm for Solving Unmanned Combat Aerial Vehicle Path Planning Problems, *ICMLC '19: Proceedings of the 2019 11th International Conference on Machine Learning and Computing*, 224–230,.
104. Pan, J., Liu, J., Liu, E. Improved Whale Optimization Algorithm and Its Application to UCAV Path Planning Problem, volume 834, Springer Singapore.
105. Pan, J.S., Liu, N., Chu, S.C. A Hybrid Differential Evolution Algorithm and Its Application in Unmanned Combat Aerial Vehicle Path Planning, **IEEE Access**, **8**:17691–17712,.
106. Tang, X.L.J. A Novel Improved Bat Algorithm in UAV Path Planning, **Computers, Materials & Continua**, **61**(1):323–344,.
107. Qu, C., Gai, W., Zhong, M., Zhang, J. A novel reinforcement learning based grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicles (UAVs) path planning, **Applied Soft Computing**, **89**:106099,, doi:.
108. Qu, C., Gai, W., Zhang, J., Zhong, M. A novel hybrid grey wolf optimizer algorithm for unmanned aerial vehicle (UAV) path planning, **Knowledge-Based Systems**, **194**:105530,, doi:.
109. Yi, J.H., Lu, M., Zhao, X.J. Quantum inspired monarch butterfly optimisation for UCAV path planning navigation problem, **International Journal of Bio-Inspired Computation**, **15**(2):75–89,.
110. Wu, C., Huang, X., Luo, Y., Leng, S., 2020. An improved fast convergent artificial bee colony algorithm for unmanned aerial vehicle path planning in battlefield environment, *2020 IEEE 16th International Conference on Control & Automation (ICCA)*, 360–365, IEEE.

111. Chen, Y., Pi, D., Xu, Y. Neighborhood global learning based flower pollination algorithm and its application to unmanned aerial vehicle path planning, **Expert Systems with Applications**, **170**:114505,, doi:.
112. Zhu, H., Wang, Y., Ma, Z., Li, X. A Comparative Study of Swarm Intelligence Algorithms for UCAV Path-Planning Problems, **Mathematics**, **9**(2).
113. Zhu, H., Wang, Y., Li, X. UCAV Path Planning for Avoiding Obstacles using Cooperative Co-evolution Spider Monkey Optimization, **Knowledge-Based Systems**, **246**:108713,, doi:.
114. Zhou, X., Gao, F., Fang, X., Lan, Z. Improved Bat Algorithm for UAV Path Planning in Three-Dimensional Space, **IEEE Access**, **9**:20100–20116,.
115. Wu, P., Li, T., Song, G. UCAV Path Planning Based on Improved Chaotic Particle Swarm Optimization, 2020 Chinese Automation Congress (CAC, 1069–1073,.
116. Xu, H., Jiang, S., Zhang, A. Path Planning for Unmanned Aerial Vehicle Using a Mix-Strategy-Based Gravitational Search Algorithm, **IEEE Access**, **9**:57033–57045,.
117. Jiang, W., Lyu, Y., Li, Y., Guo, Y., Zhang, W. UAV path planning and collision avoidance in 3D environments based on POMPD and improved grey wolf optimizer, **Aerospace Science and Technology**, **121**:107314,, doi:.
118. Jarray, R., Al-Dhaifallah, M., Rezk, H., Bouallègue, S. Parallel Cooperative Coevolutionary Grey Wolf Optimizer for Path Planning Problem of Unmanned Aerial Vehicles, **Sensors**, **22**(5).
119. Du, N., Deng, W., Luo, Q. Improved chimp optimization algorithm for three-dimensional path planning problem, **Multimedia Tools and Applications**, **81**:1–26,.
120. Wang, X., Pan, J.S., Yang, Q., Kong, L., Snášel, V., Chu, S.C. Modified Mayfly Algorithm for UAV Path Planning, **Drones**, **6**(5).

121. Niu, Y., Yan, X., Wang, Y., Niu, Y. An adaptive neighborhood-based search enhanced artificial ecosystem optimizer for UCAV path planning, **Expert Systems with Applications**, **208**:118047,, doi:.
122. Niu, Y., Yan, X., Wang, Y., Niu, Y. Three-dimensional UCAV path planning using a novel modified artificial ecosystem optimizer, **Expert Systems with Applications**, **217**:119499,, doi:.
123. Jia, Y., Qu, L., Li, X. A double-layer coding model with a rotation-based particle swarm algorithm for unmanned combat aerial vehicle path planning, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, **116**:105410,, doi:.
124. Zhang, C., Zhou, W., Qin, W., Tang, W. A novel UAV path planning approach: Heuristic crossing search and rescue optimization algorithm, **Expert Systems with Applications**, **215**:119243,, doi:.
125. Ait-Saadi, A., Meraihi, Y., Soukane, A., Ramdane-Cherif, A., Gabis, A. A novel hybrid Chaotic Aquila Optimization algorithm with Simulated Annealing for Unmanned Aerial Vehicles path planning, **Computers and Electrical Engineering**, **104**:108461,.
126. Yu, X., Jiang, N., Wang, X., Li, M. A hybrid algorithm based on grey wolf optimizer and differential evolution for UAV path planning, **Expert Systems with Applications**, **215**:119327,, doi:.
127. Chowdhury, A. De, D. RGSO-UAV: Reverse Glowworm Swarm Optimization inspired UAV path-planning in a 3D dynamic environment, **Ad Hoc Networks**, **140**:103068,, doi:.
128. Chen, B., Yang, J., Zhang, H., Yang, M. An Improved Spherical Vector and Truncated Mean Stabilization Based Bat Algorithm for UAV Path Planning, **IEEE Access**, **11**:2396–2409,.
129. Huang, C., Zhou, X., Ran, X., Wang, J., Chen, H., Deng, W. Adaptive cylinder vector particle swarm optimization with differential evolution for UAV path planning, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, **121**:105942,, doi:.

130. Rimer, J., Cohen, I., Friedman, N. Do all creatures possess an acquired immune system of some sort?, **Bioessays**, **36**(3):273–281,.
131. Travis, J., 2009, On the origin of the immune system.
132. Hoebe, K., Janssen, E., Beutler, B., 2004. The interface between innate and adaptive immunity, **Nature immunology**, **5**(10):971–974.
133. Janeway Jr, C.A., Travers, P., Walport, M., Shlomchik, M.J., 2001. Principles of innate and adaptive immunity, *Immunobiology: The Immune System in Health and Disease*. 5th edition, Garland Science.
134. Crotty, S., 2015. A brief history of T cell help to B cells, **Nature Reviews Immunology**, **15**(3):185–189.
135. Davies, D.R. Cohen, G.H., 1996. Interactions of protein antigens with antibodies., **Proceedings of the National Academy of Sciences**, **93**(1):7–12.
136. Marano, G. Convalescent plasma: new evidence for an old therapeutic tool?, **Blood Transfusion**, **14**(2):152,.
137. Waldmann, T.A., 2003. Immunotherapy: past, present and future, **Nature medicine**, **9**(3):269–277.
138. Zhang, B. Treatment With Convalescent Plasma for Critically Ill Patients With Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Infection, **Chest**, **158**(1):9–13,.
139. Dasgupta, D. An Overview of Artificial Immune Systems and Their Applications, D. Dasgupta, Ed:, *Artificial Immune Systems and Their Applications*, 3–21, Springer, Berlin, Heidelberg.
140. Chaplin, D. Overview of the immune response, **Journal of Allergy and Clinical Immunology**, **125**(2, Supplement 2):3– 23,.
141. Delves, P. Roitt, I. The immune system, **New England journal of medicine**, **343**(1):37–49,.

142. Abbas, A., Lichtman, A., Pillai, S. Cellular and molecular immunology, Elsevier Health Sciences.
143. Chen, L., Xiong, J., Bao, L., Shi, Y. Convalescent plasma as a potential therapy for COVID-19, **The Lancet infectious diseases**, **20**(4):398–400,.
144. Harvala, H. Convalescent plasma treatment for SARS-CoV-2 infection: analysis of the first 436 donors in England, 22 April to 12 May 2020, **Eurosurveillance**, **25**(28):2001260,.
145. Convalescent Plasma for Covid-19.
146. Lin, N., Liu, Y., Zhao, L., Wu, D.O., Wang, Y., 2022. An Adaptive UAV Deployment Scheme for Emergency Networking, **IEEE Transactions on Wireless Communications**, **21**(4):2383–2398.
147. Kilic, F., Kaya, Y., Yildirim, S., 2021. A novel multi population based particle swarm optimization for feature selection, **Knowledge-Based Systems**, **219**:106894.
148. Huo, J., Liu, L., Zhang, Y., 2018. An improved multi-cores parallel artificial Bee colony optimization algorithm for parameters calibration of hydrological model, **Future Generation Computer Systems**, **81**:492–504.
149. Li, X., Zhang, J., Yin, M., 2014. Animal migration optimization: an optimization algorithm inspired by animal migration behavior, **Neural Computing and Applications**, **24**(7):1867–1877.
150. Tang, Z. Zhou, Y., 2015. A glowworm swarm optimization algorithm for uninhabited combat air vehicle path planning, **Journal of Intelligent Systems**, **24**(1):69–83.
151. Pan, J.S., Liu, N., Chu, S.C., 2020. A hybrid differential evolution algorithm and its application in unmanned combat aerial vehicle path planning, **IEEE Access**, **8**:17691–17712.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı, Soyadı: Tefvîk ERKİN
Uyruğu: Türkiye (T.C.)

EĞİTİM

Derece	Kurum	Mez.Yılı
Lisans	ERÜ Havacılık ve Uzay Bil. Fakültesi Uçak Müh., KAYSERİ	2021

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Kurum	Görev
2022-Halen	Erciyes Üniversitesi Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi Uçak Müh. Bölümü, KAYSERİ	Araştırma Görevlisi

YAYINLAR

SCI, SSCI, AHCI İndekslerine Giren Dergilerde Yayımlanan Makaleler

- Aslan, S. ve Erkin, T. "An immune plasma algorithm based approach for UCAV path planning." Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences , Cilt 35, Sayı 1 , ss 56-69 (2023).
- Aslan, S. ve Erkin, T. "A multi-population immune plasma algorithm for path planning of unmanned combat aerial vehicle." Advanced Engineering Informatics , Cilt.55 (2023).

Hakemli Kongre/Sempozyumların Bildiri Kitaplarında Yer Alan Yayınlar

- Erkin T. ve Aslan S., "Decision Probability based Immune Plasma Algorithm for Path Planning Problem of Unmanned Aerial Vehicles," 2023 10th International Conference on Recent Advances in Air and Space Technologies (RAST), ss 1-6, (2023).

- Erkin T. Ve Aslan S., "Incremental Donor Approach for Immune Plasma
- Algorithm on Solving Path Planning Problem of UCAV," 2022 International Conference on Artificial Intelligence of Things (ICAIoT), (2022).
- Erkin T. ve Aslan S., "A New Immune Plasma Algorithm Based on
- Levy Flight," 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), (2022).
- Erkin, T. Yıldız M. ve Aslan S., "Lidar Sensör Destekli Dört Rotorlu Hava
- Aracının Modellenmesi ve Simülasyonu," Savunma Sanayii Sempozyumu ve Sergisi '22, (2022).
- Erkin T., Abdo O., Sanli Y., Çelik H. ve Isci H., "Vision-Based Autonomous
- Aerial Refueling," AIAA Science and Technology Forum and Exposition (AIAA SciTech), (2022)
- Abdo O., Erkin T., Çelik H. , "Control system design for autonomous
- formation flight Otonom kol uçuşu için kontrol sistemi tasarımı," 29th IEEE Conference on Signal Processing and Communications Applications (SIU), (2021)