

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**SÜRÜ HALİNDE HAREKET EDEN İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN
ÇOK AMAÇLI YOL PLANLAMASI VE TOPLANMA OPTİMİZASYONU**

Anıl Ulaş KOÇAK

ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2020**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SÜRÜ HALİNDE HAREKET EDEN İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ÇOK AMAÇLI YOL PLANLAMASI VE TOPLANMA OPTİMİZASYONU

Anıl Ulaş KOÇAK

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ökkeş Tolga ALTINÖZ

Yapılan araştırmalar, İnsansız Hava Araçları (İHA)'nın kullanım alanlarının gün geçtikçe genişlediğini ve gelecekte de birçok ihtiyaca çözüm üretebileceğini göstermektedir. Ayrıca, birden fazla koordineli hareket eden İHA'nın, tekil kullanılan İHA'lara göre, karmaşık görevleri daha etkin şekilde yerine getirebileceğini gösteren çalışmalar yürütülmektedir. İHA'ların kabiliyetleri, faydalı yük kapasitesi, depolanan enerji miktarı ve sensör teknolojisi gibi sınırlar nedeniyle fiziksel olarak kısıtlanmaktadır. Bu durum da İHA'ların hedef bölgeye kısa yol üzerinden gitmesi gerekliliğini oluşturmaktadır. Bu tez çalışmasında bu problem, tekil veya çoklu hareket eden İHA'ların otonom yol planlama kabiliyetini arttırabilmek amacıyla, iki türlü ele alınmaktadır. İlk olarak, tek bir İHA'nın hedefe otonom planlanan optimal yol üzerinden gitmesi problemi ele alınmıştır. Ardından, sürü halinde koordineli hareket eden İHA'ların hedef bölgede toplanması problemi ele alınmıştır. Bu amaçla, 2 ve 3 boyutlu farklı zorluktaki haritalarda, hareket planlama problemlerinde sıkça kullanılan HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı ve OYH algoritmalarıyla İHA'ların yol planlama ve toplanma benzetimi yapılmıştır. Sonrasında, elde edilen yollar, yol uzunluğu, manevra büyüklüğü, enerji ve maksimum dönüş açısı amaç fonksiyonlarını minimum maliyetlendirilerek çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) çalışması yürütülmüştür. ÇAO çalışmalarında, BSGA-II ve ATÇAEA evrimsel algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen her iki algoritma sonuçları, Hiper-Hacim (HHM) ve boşluklama (BM) metrikleri kullanılarak karşılaştırılmıştır. Sonuçlar analiz edildiğinde, planlanan yol ve toplanma rotalarının iyileştirildiği gözlemlenmiştir.

Temmuz 2020, 102 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Çok amaçlı optimizasyon, Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma, Baskılanmayan Sıralama Genetik Algoritması, yol planlaması, hareket planlaması, Hızla tarayan rastgele ağaç algoritması, Olasılıksal yol haritası, toplanma, çok amaçlı toplanma optimizasyonu, çok amaçlı yol planlama optimizasyonu

ABSTRACT

Master Thesis

MULTI-OBJECTIVE PATH PLANNING AND FLOCKING OPTIMIZATION FOR SWARM OF UAVS

Anıl Ulaş KOÇAK

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ökkeş Tolga ALTINÖZ

Research shows the usage areas of Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are expanding day by day and may produce solutions for many needs in the future. In addition, studies showing that UAV, which acts in more than one coordinated manner, can perform complex tasks more effectively than UAVs that are used individually. However, the capabilities of UAVs are physically limited due to limits such as payload capacity, the amount of stored energy and sensor technology. This causes necessity for UAVs to reach to the target area over short path. In this thesis, this problem is handled in two ways in order to increase the autonomous path planning ability of single or swarm UAVs. Firstly, the problem of a single UAV reaching the target through an autonomously planned optimal path have been addressed. Then, the same problem has been considered for swarm of UAVs. For this case, flocking causes collisions between UAVs, which is also dealt with. For this purpose, path planning and flocking simulations of UAVs have been made with RRT, RRT*, RRT*-Smart and PRM algorithms using 2D and 3D environments. The multi-objective optimization (MOO) has been adapted and to construct cost functions path length, maneuver, energy and sharpest maneuver have been utilized. NSGA-II and MOEA/D evolutionary algorithms have been used in MOO implementations as novel approaches. The results of both algorithms have been compared using well accepted Hypervolume and Spacing metrics. Analysis of results produced improvements on planned path and flocking routes.

July 2020, 102 pages

Key Words: Multi objective optimization, multi objective evolutionary algorithm based on decomposition, non dominated sorting algorithm-II, path planning, motion planning, rapidly-exploring random trees, probabilistic road map, flocking optimization, path planning optimization

ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR

Yüksek lisans çalışmasını yapılan çalışmanın akademik tarafı kadar, çalışmayı yürütenlerin gerek sosyal gerek kişisel birçok zeminde kendine edinimler sağladığı kapsayıcı bir çalışma olarak görüyorum. Ancak sürecin bütünü göz önünde bulundurduğumuzda, termodinamiğin 1.yasasında yer alan enerjinin korunumu analojisiyle, edinilen bunca kazanımın karşılığında feragat etmemiz gereken değerlerimiz de ortaya çıkıyor. Hayatı engellerle dolu bir yol olarak tasvir edersek, zaman zaman karşımıza çıkan engellerle, bilimsel çalışmaların doğasında olan aksaklıkların bazen eş zamanlı gerçekleşmesi, çalışmayı yürütenlerin önünde birçok zorluk hatta sınav olarak belirebiliyor. Kırılganlığın çok hassas bir zeminde olduğu bu dönemlerde benden desteklerini hiç esirgemeyen, inancımı kaybettiğim anda dahi gerek danışman rolüyle gerekse ağabey rolüyle yanımda olan Sayın Doç. Dr. Ökkeş Tolga ALTINÖZ'e samimi duygularıyla teşekkür ederim. Ayrıca, profesyonel iş hayatının gerekliliğini yerine getirirken, bazen de getiremezken bana göstermiş olduğu tolerans nedeniyle Sayın Mazhar Gökhan ÖZKESER'e, ne zaman bir yerlerde takıldığımı hissetse maddi ve manevi desteğini esirgemeyen Sayın Mert HASANOĞLU'na, çalışmaya henüz hiç başlamamışken dahi aktardıkları hayat tecrübeleri vasıtasıyla bana kattıkları vizyon, çalışma boyunca ortaya koydukları koşulsuz destek ve itici güç için Sayın Enes AYKURT ve Gün DEMİRBAŞ'a, çalışma perspektifini kapsamlı şekilde bana aktarmaya çalışan Sayın Fırat Cevher YILMAZ'a, en kötü zamanlarda sağladığı donanım desteği sayesinde deneylerimi gerçekleştirdiğim Sayın Özgür KOÇAK'a ve çocukluğumdan süren tüm eğitim hayatımda beni koşulsuz destekleyen başta annem olmak üzere tüm aileme içtenlikle teşekkür ederim.

Anıl Ulaş KOÇAK

Ankara, Temmuz 2020

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI	
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Araştırması	4
2. KURAMSAL TEMELLER.....	11
3. KULLANILAN MATERYALLER VE YÖNTEM	13
3.1 Algoritmalar, Metrikler ve Amaç Fonksiyonları	13
3.1.1 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları	13
3.1.2 Olasılıksal Yol Haritası Algoritması	16
3.1.3 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II	17
3.1.4 Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma	21
3.1.5 Metrikler	24
3.1.6 Amaç fonksiyonlarının belirlenmesi.....	27
3.2 Deney Çalışmaları	33
3.2.1 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları ile yol planlaması.....	37
3.2.2 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları ile 3 Boyutta yol planlaması ..	38
3.2.3 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ile 3 boyutta CAO	39
3.2.4 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile yol planlama ..	40
3.2.5 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile yol planlaması CAO	42
3.2.6 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile toplanma planlaması.....	44
3.2.7 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile toplanma CAO.....	46
3.2.8 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma planlaması.....	49
3.2.9 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma CAO	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DENEYSEL SONUÇLAR	53
4.1 Yol planlama Sonuçları	53
4.2 Toplanma Sonuçları.....	60
4.2.1 Sınırlandırılmamış güzergahta toplanma sonuçları	61
4.2.2 Sınırlandırılmış güzergahta toplanma sonuçları	65
4.3 HTRA ve OYH Karşılaştırma Analizi	68
4.4 Yol Planlama Optimizasyonu Sonuçları	70
4.5 Toplanma Optimizasyonu Sonuçları.....	78
4.5.1 Sınırlandırılmış güzergahta toplanma optimizasyonu sonuçları.....	86
4.6 BSGA-II ile ATÇAEA Karşılaştırma Analizi	91
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	94
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ.....	102

KISALTMALAR DİZİNİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AF	Amaç Fonksiyonu
AR-GE	Araştırma-Geliştirme
ATÇAEA	Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma
BM	Boşluklama Metriği / Spacing Metric
BSGA-II	Baskılanmayan Sıralama Genetik Algoritması-II
ÇAO	Çok Amaçlı Optimizasyon
GA	Genetik Algoritma / Genetic Algorithm
HHM	Hiper-Hacim Metriği / Hyper Volume Metric
HTRA	Hızla Tarayan Rastgele Ağaçlar
HTRA*	Hızla Tarayan Rastgele Ağaçlar Yıldız
HTRA*A	Hızla Tarayan Rastgele Ağaçlar Yıldız-Akıllı
HP	Hareket Planlama
İHA	İnsansız Hava Aracı / Unmanned Air Vehicle
MOAE/D	Multi Objective Algorithm Evolutionary based on Decomposition
MORRF*	Multi Objective Rapidly Exploring Random Forest Star
MP	Hareket Planlama / Motion Planning
OYH	Olasılıksal Yol Haritası / Probabilistic Road Map
PC	Pareto Cephesi/Pareto Front
TO	Toplanma Optimizasyon / Flocking Optimization
YPO	Yol Planlama Optimizasyonu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Yıllara göre İHA yatırımları (Aviation International News, 2019)	2
Şekil 2.1 Pareto Cephesi	12
Şekil 3.1 HTRA ağaç genişleme süreci.....	13
Şekil 3.2 Üçgen eşitsizliği.....	15
Şekil 3.3 BSGA-II algoritması akış şeması	18
Şekil 3.4 ATÇAEA algoritması akış şeması	24
Şekil 3.5 Hiper hacim metriği hesaplama görseli	25
Şekil 3.6 Boşluklama metriği di mesafesi gösterimi.....	27
Şekil 3.7 2 Boyutta manevra açısı.....	28
Şekil 3.8 3 Boyutta manevra açısı.....	31
Şekil 3.9 2 Boyutlu deney haritaları.....	35
Şekil 3.10 3 Boyutlu deney haritasının 3 farklı açıdan görünümü.....	36
Şekil 3.11 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı yol planlaması deney haritası	37
Şekil 3.12 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı ile 3 boyutta yol planlaması haritası	38
Şekil 3.13 HTRA ve OYH ile yol planlaması için kullanılan haritalar	41
Şekil 3.14 1 numaralı ÇAO'da kullanılan HTRA ile planlanan yollar	43
Şekil 3.15 2 numaralı ÇAO'da kullanılan HTRA ile planlanan yol	44
Şekil 3.16 HTRA ve OYH ile toplanma için başlangıç ve hedef noktası gösterimi.....	45
Şekil 3.17 1 numaralı ÇAO yapılan HTRA toplanma güzergahı sonuçları	48
Şekil 3.18 2 numaralı ÇAO yapılan HTRA toplanma güzergahı.....	49
Şekil 3.19 HTRA ve OYH ile toplanma için başlangıç, hedef noktası ve sınır bölgelerinin gösterimi	50
Şekil 3.20 ÇAO yapılan sınırlandırılmış bölgedeki HTRA toplanma güzergahı sonuçları	52
Şekil 4.1 HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı ile yol planlama sonucu	53
Şekil 4.2 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı yol planlama zaman karşılaştırması.....	55
Şekil 4.3 HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı ile 3 boyutta yol planlama sonucu	56
Şekil 4.4 HTRA ile 5 haritada yapılan yol planlama sonuçları.....	57
Şekil 4.5 OYH ile 5 haritada yapılan yol planlama sonuçları.....	59
Şekil 4.6 HTRA ile yapılan toplanma sonuçları	61

Şekil 4.7 OYH ile yapılan toplanma sonuçları	63
Şekil 4.8 HTRA ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları	65
Şekil 4.9 OYH ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları.....	67
Şekil 4.10 3 boyutta BSGA-II ile yapılan deney sonuçları.....	71
Şekil 4.11 BSGA-II ile yapılan yol planlama deney sonuçları	72
Şekil 4.12 BSGA-II ile yol optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları	73
Şekil 4.13 ATÇAEA ile yapılan yol planlama deney sonuçları.....	75
Şekil 4.14 ATÇAEA ile yol optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları.....	76
Şekil 4.15 BSGA-II ile 2 numaralı yol planlama ÇAO	77
Şekil 4.16 ATÇAEA ile 2 numaralı yol planlama ÇAO.....	78
Şekil 4.17 BSGA-II ile yapılan 1 numaralı toplanma deney sonuçları.....	79
Şekil 4.18 BSGA-II ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları.....	80
Şekil 4.19 ATÇAEA ile 1 numaralı toplanma deneyi sonuçları.....	82
Şekil 4.20 ATÇAEA ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları.....	83
Şekil 4.21 BSGA-II ile 2 numaralı toplanma planlama ÇAO.....	84
Şekil 4.22 ATÇAEA ile 2 numaralı toplanma planlama ÇAO	85
Şekil 4.23 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma ÇAO sonuçları.....	86
Şekil 4.24 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahtaki toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları	87
Şekil 4.25 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma deneyi sonuçları	89
Şekil 4.26 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahtaki toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı yol planlama sonuç karşılaştırması	54
Çizelge 4.2 HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı 3boyutta yol planlama karşılaştırması...	56
Çizelge 4.3 HTRA Yol planlaması maliyet tablosu	58
Çizelge 4.4 OYH Yol planlaması maliyet tablosu	60
Çizelge 4.5 HTRA toplanma planlaması maliyet tablosu	62
Çizelge 4.6 OYH ile elde edilen toplanma planlaması maliyet tablosu	64
Çizelge 4.7 HTRA ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma planlaması maliyet tablosu	66
Çizelge 4.8 OYH ile elde edilen sınırlandırılmış toplanma planlaması maliyet tablosu	68
Çizelge 4.9 HTRA ile OYH'nin deney sonuçlarına göre karşılaştırılması	70
Çizelge 4.10 3 boyutta BSGA-II optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları	72
Çizelge 4.11 BSGA-II yol optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları	74
Çizelge 4.12 ATÇAEA yol optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları	77
Çizelge 4.13 BSGA-II ve ATÇAEA ile 2 numaralı CAO'nun HH ve boşluklama sonuçları	78
Çizelge 4.14 BSGA-II ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu HH ve boşluklama sonuçları	81
Çizelge 4.15 ATÇAEA ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu HH ve boşluklama sonuçları	84
Çizelge 4.16 BSGA-II ve ATÇAEA ile 2 numaralı toplanma CAO deneyi HH ve boşluklama sonuçları	85
Çizelge 4.17 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan toplanma optimizasyonunun hiper hacim ve boşluklama sonuçları	88
Çizelge 4.18 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan toplanma optimizasyonunun hiper hacim ve boşluklama sonuçları	91
Çizelge 4.19 BSGA-II ile ATÇAEA toplanma optimizasyonu başarı kıyaslaması	93

1. GİRİŞ

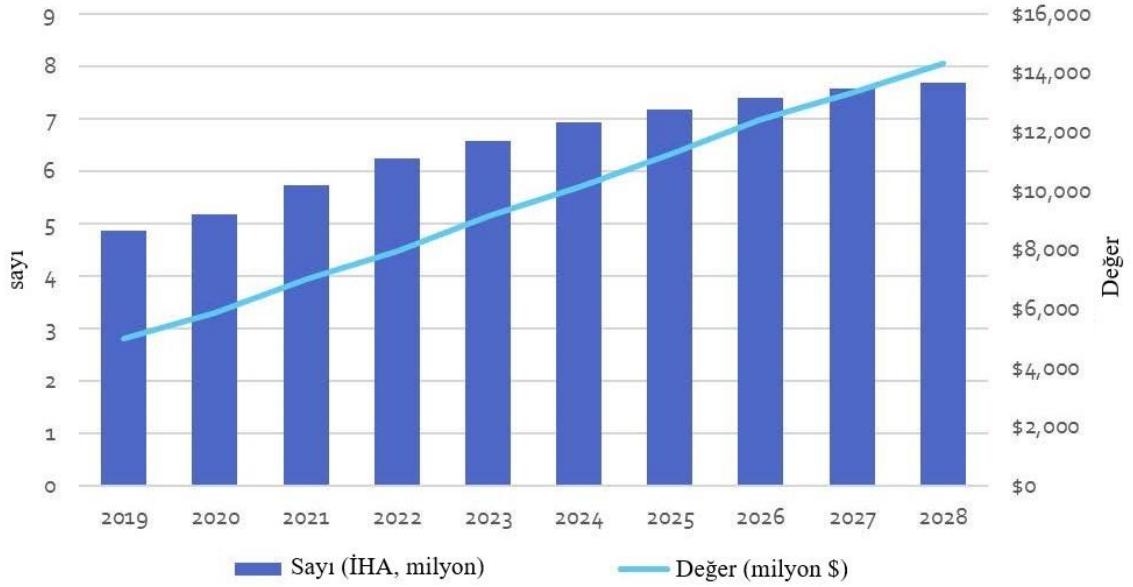
İnsansız araçlar, üzerinde fizyolojik olarak insan yer almadan radyo frekansı vasıtasıyla uzaktan kumanda edilebilen veya kendi kendini kontrol etme kabiliyeti olan araçlara verilen genel bir isimdir. İHA (İnsansız Hava Aracı / Unmanned Aerial Vehicle-UAV) ise temel tanımıyla, operatörü bir bilgisayar sistemi ile yer değiştirilmiş ve uzaktan kablosuz kontrol mekanizmasına sahip hava aracıdır (Austin, 2011).

Genel olarak, insansız hava araçları için drone, İHA sistemleri ve radyo frekansı ile uzaktan kontrol edilebilen hava aracı gibi farklı isimlendirmeler yaygın şekilde kullanılmaktadır. Kullanılan farklı isimlendirmeler kavramsal problem ve karışıklıklara neden olmaktadır. Bu karışıklıkları çözümleyebilmek için isimlendirmelerin kronolojik sürecini anlamak gerekmektedir. İlk olarak 1936 yılında, Amerika Birleşik Devletleri (ABD) Deniz kuvvetleri tarafından, İngiltere Hava Kuvvetleri'nin kullandığı hedef uçak görevinde kullandığı insansız hava aracı Quenn Bee (kraliçe arı)'den esinlenerek ortaya konulan hedef uçak projesinin ismi olarak Drone (erkek arı) kelimesi kullanılmıştır. Daha sonra kullanımın yaygınlaşmasıyla, dünya genelindeki benzer amaçla yürütülen tüm hedef projelerinde ve İHA sistemlerinin genelinde de aynı isimlendirme ile kullanılmaya başlanmıştır. Ancak, teknolojisinin ilk yıllarında askeri amaçla üretilen Drone'ların, özellikle sivil insanlara karşı yapılan askeri saldırılarla doğrudan ilişkisinin olması nedeniyle, 20. Yüzyılın sonlarına doğru kullanımın artmasıyla, Drone ismi benimsenemeyerek değiştirilmesi ihtiyacı oluşmuştur. Bu amaçla, ilk olarak 1990'lu yılların başında ABD'de kullanılmaya başlanan bu insansız araçlar, insansız araç sektörünün ve teknolojisinin gelişmesiyle, Drone ismi yerine İnsansız hava aracı veya İnsansız hava aracı sistemi adıyla anılmaya başlanmıştır (Karaağaç, 2016).

20. Yüzyılın sonundan itibaren İHA'lar insanoğlunun hayatında sivil ve askeri alanda sıkça yer bulmaktadır. Askeri amaçla temel olarak keşif, gözetleme ve saldırı amacıyla kullanılan İHA'lar, sivil alanda da haritalama, film çekimi, zirai gözlem ve ilaçlama, tarla ürünü rekolte ölçümü, yangın gözlem ve söndürme, kargo taşımacılığı, doğal afet sonucu arama ve kurtarma faaliyetleri yürütülmesi, şehir suç oranının takibi, istihbarat,

bitkisel ortam gözlemi, hava kirliliğinin tespiti, kentsel dönüşüm çalışmaları, doğal felaketlerin gözlenmesi, tarihi ve arkeolojik çalışmalar, doğal yaşam alanı gözlemi, görsel basın kullanımı gibi pek çok alanda yer alarak önemini pekiştirmektedir.

Gün geçtikçe insanoğlu ile entegrasyon kapsamı ve hızı artan İHA'lar için birçok ülke İHA ile ilgili AR-GE çalışmalarına yatırımlarını arttırarak insansız sistemlere otonom kabiliyet katmayı, böylece hayat standartlarını arttırmayı ve ülkelerine stratejik kazanç sağlamayı amaçlamaktadır. Yıllara göre tahmini sivil kullanım amacıyla üretilecek İHA'ların sayısı ve pazar büyüklüğü Şekil 1.1'de verilmiştir.



Şekil 1.1 Yıllara göre İHA yatırımları (Aviation International News, 2019)

Artan yatırımlar ile gelişen İHA araştırma-geliştirme faaliyet hacmi, İHA'ların kullanım alanlarındaki daha çok probleme çözüm getirerek bir çok alanda ihtiyaçları karşılaması beklenmektedir. Yakın gelecekte, İHA'ların yüksek otonom kabiliyeti ile insansız deniz araçları ve insansız kara araçları gibi diğer otonom sistemlerle ortak hareket ederek karmaşık görevleri yerine getirmeleri beklenmektedir. Ancak İHA'ların kabiliyetleri mevcut sensor limitleri ve yük kapasiteleri nedeniyle sınırlanmış durumdadır. Bu fiziksel sınırların aşılması, İHA'ların kullanımını yaygınlaştırmak ve zorlu şartlardaki

görev başarımını sağlamak için birden fazla İHA'nın beraber çalışarak görevlerini kısa zamanda tamamlaması ve görev başarısızlık oranının düşürülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Mishra vd, 2014).

İHA'ların koordinasyonlu toplu hareketi de doğada sürü halinde hareket eden canlıların sahip olduğu sürü zekası gözlemlerine benzetilmekte, elde edilen bu gözlemler sürü zekâsının askeri alandan birçok sivil alana kadar kullanımı amaçlanan İHA'ların karmaşık problemlerin çözümünde kullanılabileceğini ve doğal yaşam içgüdülerinin bu teknolojilerin temeli olabileceğini ortaya koymaktadır (Bonebau vd. 1999). Garnier vd.'nin (2007) "Sürü Zekâsının Biyolojik Temelleri" adlı çalışmasında tek bir kontrol merkezinden bilgi paylaşımı olmadan kolektif olarak hareket edebilen böceklerin yaşam modeli baz alınarak İHA'ların da koordineli hareket ederek karmaşık ve farklı görevleri sürü hareketiyle yerine getirebileceği vurgulanmaktadır. Birçok akademik çalışma Darwin'in (1859) Galapagos adalarında elde ettiği gözlemlerle dünyaya yeni bir bakış açısı kazandırması gibi doğal yaşam gözleminde esinlenmiştir (Holland 1995; Dorigo 1992; Kennedy ve Eberhart, 1995; Bonebau vd. 1999).

Diğer taraftan, İHA'ların otonom hareket etmesi üzerine çalışmalar birbirinden hiyerarşik olarak ayrılabilir (Boskovic vd. 2002). Bu çalışmalar, Boskovic vd.'nin (2002) çalışmasında yer alan İHA'ların Akıllı Karar Verme Mimarisi (UAV's Intelligence Decision Making Architecture) ile birbirinden bağımsız şekilde gruplama yapılabilir. Çalışmadaki mimari hiyerarşi, 4 ana katman grubundan oluşmaktadır. İlk katmanda yer alan çalışmalar, uçuş esnasında oluşabilecek hataların mümkünse giderilmesi, mümkün değil ise en aza indirilmesini hedeflemektedir. İkinci katmandaki çalışmalar ise İHA'nın 3 boyutlu uzaydaki anlık hareket planlarını yapmaktır. Üçüncü katmanda yer alan çalışmalar ise çevrimiçi ve çevrim dışı otonom yol planlaması üzerinedir. Bu katmandaki çalışmaların amacı başlangıç ve hedef noktaları arasında İHA'yı yönlendirerek görev etkinliğini arttırmaktır. Son katmandaki çalışmalar ise İHA'nın görev amaçları ve kısıtları, İHA'nın hareketini etkileyebilecek diğer unsurların hareketleri ve farklı durumlara bağlı oluşan verilerin toplanmasına istinaden daha üst seviyede yapılan planlamalara yöneliktir.

İHA'ların otonom şekilde insanoğlu yaşam ekosistemine entegrasyonu, mevcut insanlı yapılarla çarpışmadan hareket edebilme ve belirlenen sınırlar içerisinde operasyonel faaliyet yürütebilme gibi hareket temelli yetenekleriyle doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda tez kapsamında, Boskovic vd.'nin (2002) otonom İHA'lar için oluşturduğu Akıllı Karar Verme Mimarisinin 3. Katmanında yer alan otonom yol planlama üzerine çalışmalar yürütülecektir.

Bu tez çalışmasının en temel amacı, bir ve birden fazla İHA'nın fiziki engellerle dolu haritalarda belirli bir hedefe varış ve belirli bir bölgede toplanma güzergahının çıkarılması, ardından çıkarılan bu güzergahların optimize edilerek İHA'ların varış bölgesine güvenli şekilde ulaşabileceğinin gösterilmesidir. Burada güvenden kasıt her bir İHA'nın birbirlerinin yolları üzerinde kesişim olmadan varış noktasına ulaşmasıdır. Çalışma kapsamında 2 ve 3 boyutlu farklı zorluk derecelerinde haritalar oluşturulmuş olup, tek İHA için yol planlaması ve birden fazla İHA'yı için belirli kısıt altında bir bölgede toplamak amacıyla HTRA ve OYH algoritmaları kullanılmıştır. Elde edilen bu yollar, daha sonra BSGA-II ve ATÇAEA çok amaçlı optimizasyon (ÇAO) algoritmalarıyla minimum yol - manevra açısı ve enerji - maksimum manevra büyüklüğü amaçlarıyla optimize edilerek iyileştirilmeye çalışılmıştır. Elde edilen sonuçlar Hiper Hacim (Hypervolume) ve Boşluklama (Spacing) ÇAO metrikleriyle ölçütlendirilerek, analiz edilip paylaşılmıştır.

1.1 Literatür Araştırması

Optimizasyon çalışmalarının motivasyonu bir problem çözüm uzayındaki en iyi çözümün bulunması olarak düşünülebilir. En iyi çözümün bulunmasında bakılan kriter sayısına göre problem tek veya çok amaçlı optimizasyon problemine dönüşebilir. Tek amaçlı optimizasyon problemlerinde en uygun çözüm, diğer çözümlerle karşılaştırıldığında sayısal olarak en büyük veya en küçük olan değerdir. Diğer taraftan amaç sayısı arttıkça, farklı amaçların sayısal olarak doğrudan karşılaştırılması mümkün değildir. Bu yüzden, en iyi tanımı kriterlere bağlı olarak yapılabilmektedir. En iyi arayışı, mühendislik, ekonomi, finans vb. gibi birçok disiplinde yer almaktadır. Ancak, farklı alanlarda farklı kriterlere bağlı olarak tanımlanabilmektedir. Çok amaçlı

optimizasyonda optimal (en iyi) çözüm tanımlaması, ilk olarak ekonomi alanında çalışmalar yürüten F.Y. Edgeworth (1881) tarafından alım ve satım kararlarının verilmesi problemine ilişkin yapılmıştır. Daha sonra inşaat mühendisi olan ve matematiksel olarak ekonomi alanındaki problemleri analiz eden ilk kişi olarak V. Pareto (1896)'nın ortaya koyduğu en iyi tanımı büyük bir kabul görmüştür (De Weck 2004). Bu tanımlamaya göre, bir ÇAO probleminin çözümünün optimal olabilmesi için, o çözümün herhangi bir amaç değerini kötüleştirmeden diğer amaç değerlerini iyileştirememesi gerekmektedir. Daha sonra bu tanımlama, Edgeworth-Pareto optimum veya Pareto optimum isimleriyle kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulan küme Pareto Kümesi olarak isimlendirilmiştir. Pareto kümesiyle amaç uzayında oluşturulan eğriye de Pareto cephesi (PC) ismi verilmiştir. Pareto cephesi genelde problemin en küçük değer arama veya en büyük değer arama problemi olmasına bağlı dışbükey ya da içbükey şekilde olabilir.

Evrimsel algoritmalar (EA) doğadaki evrim basamaklarından esinlenilerek oluşturulan yöntemlerdir. Bu yöntemler, problemin bir çözümü yerine çözüm aday kümesi oluşturarak başarılı sonuç elde etmeye çalışır. En yaygın kullanılan EA'dan biri olarak Genetik Algoritma (GA) (Holland 1975) gösterilebilir. Daha sonra, ÇAO çalışmalarının gelişmesiyle EA tabanlı ÇAO algoritmaları ortaya çıkmıştır. Schaffer (1985) tarafından önerilen VEGA algoritması GA tabanlı ilk ÇAO algoritmasıdır. Goldberg (1989) tarafından önerilen baskılanmayan sıralama (*nondominated sorting*) yöntemi ÇAO alanına yeni bir bakış açısı kazandırmış ve bu alandaki çalışmaların hızlanmasına neden olmuştur. Goldberg'in (1989) önerdiği yöntemle göre türetilen çözüm adaylarının birbirlerine göre baskınlığı değerlendirilip, bu değerlendirme sonucu türetilen yeni jenerasyon çözümü sıralamaya alınır. Bu yöntemden faydalanarak 90'lı yıllarda bir çok ÇAO algoritması geliştirilmiştir. Bu algoritmalarından en yaygınları MOGA (*Multi-Objective Genetic Algorithm*) (Fonseca & Fleming, 1993) algoritması ve NSGA (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm*) (Srinivas ve Deb, 1994) algoritmasıdır.

21. yüzyılın başlamasıyla beraber ÇAO çalışmalarında ortaya atılan Elitizm ya da elitist algoritma kavramının bu alandaki çalışmalarda büyük bir etkisi olmuştur. Kısaca elitizm, her yeni jenerasyon öncesi popülasyonda bulunan belirli sayıdaki en iyi

bireylerin değerleri değiştirilmeyerek korunması anlamına gelmektedir. Korunan bu değerler sadece yeni oluşturulan jenerasyonla karşılaştırılır. Böylece, zm adaylarının Pareto optimum çözüme yakınsaması sağlanmış olur. 2000’li yılların başında geniş popülasyonlarda yüksek işlem gücü ihtiyaı ve elitizm eksikliği nedeniyle BSGA (Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritma) eleştirilere maruz kalmıştır. Deb (2002) nerdiği BSGA-II algoritmasıyla BSGA algoritmasının bu eksikliklerini gidererek etkinliğini arttırmıştır. BSGA-II basitliği ve etkinliği nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

Günümüze kadar olan daha sonraki dönemde birçok yöntem nerilmesine rağmen, bu yöntemler arasındaki en önemli algoritmalarından birisi ATÇAEA (Dağılım Tabanlı okamalı Evrimsel Algoritma, *Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition*) algoritmasıdır (Zhang ve Li 2007). ATÇAEA algoritmasında optimizasyon yapılacak problem alt parçalara bölünerek kkk problemler oluşturulur ve genel zm bu kkk problemlerin zmne yakınsar. Böylece, kompleks ve zor problemlerin hızlıca üzülmesi sağlanmış olur. ATÇAEA etkinliği ve hızı sayesinde 2009 yılında düzenlenen CEC 2009 MOEA yarışmasını kazanmıştır. (Zhang vd. 2009). ATÇAEA’nin bu başarısı yöntemin farklı problemlere özgü ATÇAEA tabanlı yeni algoritmaların geliştirilmesine neden olmuştur. Arama algoritması DE (Differential Evolution) entegre edilen ATÇAEA-DE (Li ve Zhang 2008), iki çaprazlama operatörü kullanılarak nerilen ATÇAEA -DRA (Khan ve Zhang 2010) ve gelişmiş genetik operatörü ile yeni jenerasyonlar türeten ATÇAEA-GO (Ding & Wang, 2013) bu duruma örnek gösterilebilir.

Evrimsel ÇAO çalışmalarının başlangıcından beri yeni algoritmalar geliştirilirken, algoritmaların ve ÇAO çalışmalarının değerlendirilebilmesinde kullanılan metrikler de geliştirilmektedir. Geliştirilen bu performans metrikleri, PC’ye yakınsamayı ölçen (r. hata oranı, referans noktasından uzaklığı), bilinen PC’nin etrafına dağılımını ölçen (r. Yayılma-Spread, Boşluklama) ve bu yaklaşımın kombinasyonu olan metrikler (Hiper Hacim, R-Metriği) olarak 3 farklı amaca göre ayrılmıştır (Deb 2011). Daha sonra bu metrikler kullanılarak ÇAO algoritmalarında iyileştirmeler yapılıp, yeni yöntemler önerilmiştir. Bu yöntemlerden birkaç tanesi Hiper Hacim tabanlı HyPE, (Bader ve

Ziltzler 2011) ve SMS-EMOA (Beume vd. 2007) algoritmaları ve Hiper Hacim seçim kriteri olarak kullanan çok amaçlı EA (Emmerich, Beume, & Naujoks, 2005) algoritmasıdır.

Yol planlama, başlangıç noktasından varış noktasına kadar engellere çarpmadan bir optimal yol arama çalışması olarak adlandırılabilir. Yol planlama problemi, çözmeye çalışıldığı problemin karmaşık yapısı gereği “*NP-Hard*” olarak sınıflanmaktadır (Canny 1988). Bu çalışmalar genellikle tek bir amacı göz önünde bulundurmaktadır. Bu amaçlar en kısa yol uzunluğu, en kısa görev zamanı, en fazla bilgi toplama, harcanan toplam enerji vb. olabilmektedir. Örneğin, Ding vd. (2010)’in çalışmasında, bir grup İHA’nın, kara araçlarından oluşan konvoyu koruması amaçlanmıştır. Diğer bir çalışmada Goel (2018), İHA’nın dinamik engellerle dolu 3 boyutlu bir ortamda en kısa yol üzerinden hedef noktasına ulaşmasını amaçlamıştır. Tek amaç üzerinden yürütülen çalışmaların doğrudan gerçek dünyadaki İHA hareket planlamalarına uygulanması mümkün değildir. Bu planlamaların görev süresi, yakıt verimliliği, dönüş kabiliyeti gibi birden fazla kriter dikkate alınarak yapılması gerekmektedir. Bu yüzden son yıllarda yapılan araştırmalar çok amaçlı planlama yapılmasına yoğunlaşmaktadır (Rudnick-Cohen vd. 2015) (Hao vd. 2017) (Monwar vd. 2018) (Ren vd.2019).

Sezgisel algoritmaların hızlı yol bulma ve EA’nın tek bir çözüm yerine çeşitliliği yüksek çözümler ortaya çıkarabilme kabiliyetleri nedeniyle, karmaşık ve geniş ortamdaki çok amaçlı yol planlama probleminin çözümünde genellikle sezgisel ve evrimsel algoritmalar beraber kullanılmaktadır. Bu yaklaşımda, sezgisel algoritmalar, optimal yol adaylarını meydana getirecek evrimsel algoritmalar için uygun ilk yol bulur. Daha sonra EA, bu yolu genetik operatörler ile çeşitlendirerek amaç fonksiyonlarına göre pareto optimal çözüm kümesi oluşturur. Literatür incelendiğinde, EA’lar için iki farklı yaklaşımla, çevrimdışı (offline) yol planlama problemi için, pareto optimal çözüm elde edildiği görülmektedir. Yaklaşımlardan ilki, amaç fonksiyonlarını ağırlıklandırarak tek amaca indirgemek ve bu amaca göre çözümler arası skalar karşılaştırma yapıp, pareto optimal çözüm adaylarını belirlemektir. Diğeri ise, her bir amaç fonksiyonuna göre çözüm adaylarının maliyetlerinin belirlenmesi ve bu maliyetlerin skalar olarak kıyaslanması sonucu pareto optimal çözüm kümesinin belirlenmesidir (Tao vd. 2014).

İHA için 3 boyutta çevrimdışı yol planlama problemine çözüm arayan çalışma (Mittal ve Deb 2007), iki farklı senaryoda gerçekleştirilmiştir. 1-) İHA'nın hedefe ulaşması esnasında herhangi bir kısıt olmaması. 2-) İHA'nın hedefe ilerlerken önceden belirlenmiş noktalardan zorunlu olarak geçmesi. Başlangıç ve hedef arasında kavisli (geniş manevralı) ilk yol planlamasında B-spline fonksiyonu kullanılmıştır. Daha sonra B-spline doğrusunun kontrol noktaları, BSGA-II algoritmasının karar değişkenleri olarak belirlenmiştir. En kısa ve en güvenli yol amaçlarına göre optimizasyon yapıp, kullanıcının seçimine bırakılacak Pareto optimal yollar elde edilmiştir.

Problemin birçok kriter göz önünde bulundurularak çözülmesine yönelik GA tabanlı önerilen diğer bir çalışmada (Ahmed ve Deb 2013) optimal yollar, başlangıç noktasından hedefe kadar her bir zaman diliminde 1 kare hareket edilebilen ızgara sistemiyle (grid) oluşturulmuş tam sayı kodlama yapısı (integer-coded genes) kullanılarak temsil edilmektedir. Belirlenen bu yollar, öncelikle, BSGA-II ile minimum yol uzunluğu, maksimum güvenlik (minimum hasar alma) ve minimum manevra (smoothness) amaçlarıyla iyileştirilmiştir. Hiper hacim metriği ile sonuçlar analiz edildiğinde, çapraşıklık operatörünün 3 ve daha büyük boyutlarda yeterli olmadığı ve yöntemin uygun sonuç elde edemediği tespit edilmiştir. Daha sonra, yöntem güncellenerek sadece yol uzunluğu ve güvenlik kriterleri amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş olup, manevra Pareto optimal çözüm kümesinden yapılan seçimin kriteri olarak kullanılmıştır. Böylece, çalışmanın başarılı sonuçlar ortaya koyduğu belirlenmiştir.

Ren (2019) kentsel bölgede İHA'nın kısa yoldan güvenli şekilde hedefe ulaşmasını amacıyla yürüttüğü çalışmada, Dijkstra'nın çizgi kuramı tabanlı yol planlama modeline sezgisel hesaplama eklenerek ortaya konulan A* (Hart vd. 1968) algoritmasını, optimal hale getirilecek ilk yolu bulmak için kullanmaktadır. Daha sonra BSGA-II (Deb vd. 2002) ÇAO algoritmasının çözümlerin çeşitlendirilmesi amacıyla ortaya koyduğu aynı rütbedeki çözümler arası çapraşıklık mesafesini, çözümlerin rütbelerini dikkate almadan, etrafındaki k adet nokta arasındaki mesafelerin ortalamalarını alarak hesaplamaktadır.

Ancak, literatüre bakıldığında, optimal yol planlama probleminin etkin ATÇAEA algoritmasıyla çözülmesine yönelik önerilen tek yöntem, Yi vd. (2015)'nin, HTRA* (Karaman ve Frazzoli 2010) ve ATÇAEA (Zhang ve Li 2007) algoritmalarının birleştirilmesiyle ortaya koyduğu MORRF* algoritmasıdır. Hibrid model algoritma, “Rewire” fonksiyonu gereği asimptotik optimal çözüm kabiliyeti olan sezgisel HTRA* algoritması ile referans ağaçlar ve alt problem ağaçlar kümesi olmak üzeri iki ağaç yapısı oluşturmaktadır. Ardından, yol uzunluğu ve toplanan veri miktarı amaç fonksiyonlarını ATÇAEA (Zhang ve Li 2007)'nin Tchebycheff yaklaşımıyla alt problemlere bölerek pareto optimal çözüm kümesi elde etmektedir.

Sonuç olarak, İHA'lar için çok amaçlı yol planlaması problemine, önerilen BSGA-II ve ATÇAEA yöntemleriyle çözüm bulunabileceği yapılan araştırma sonucu anlaşılmıştır. Ayrıca, sezgisel algoritmalar kullanılarak bulunan yolun optimal hale getirilmesi üzerine çalışmalar yürütülse de HTRA algoritmasının kullanıldığı çalışma bulunamamıştır. Ayrıca, ayrışma yaklaşımı olarak Zhang ve Li (2007)'nin önerdiği Ceza tabanlı sınır kesişme (PBI) yaklaşımının, yol planlama ve toplanma problemlerinde kullanıldığı bir çalışmaya literatürde rastlanmamıştır. Bu tez çalışması ile, tek veya sürü halinde hareket eden İHA'ların minimum yol uzunluğu ve manevra ile;

1. 2 ve 3 boyutta HTRA algoritması ile bulunan yolun BSGA-II ile optimal hale getirilerek,
2. 2 boyutta HTRA algoritmasıyla bulunan yolun ATÇAEA ile optimal hale getirilerek
3. ATÇAEA algoritmasının ayrışma yaklaşımı olarak Ceza tabanlı sınır kesişmesi (PBI) kullanılarak,

yol veya toplanma güzergahı planlanabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Son zamanlarda gelişen teknolojinin etkisiyle, işlem gücü artmış olup, işlemcilerin paralel işlem yetenekleri sayesinde bir yaklaşım birden fazla probleme aynı anda uygulanabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, birden fazla İHA' için yapılan toplanma

planlamaları, tek bir İHA için yapılan yol planlama çalışması yaklaşımına hesaplama yükü az olan bir uzaklık kriteri eklenerek yapılmaktadır. Yaklaşım detayları, Bölüm 3'deki kullanılan algoritma ve deney anlatımlarında paylaşılmıştır.

Bölüm 2'de tez çalışmasının esas motivasyonu olan yol planlama ve planlanan yolların CAO algoritmalarıyla optimize edilmesi problemi anlatılmaktadır. Bölüm 3'de ise, tez kapsamında uygulanan yol planlama algoritmaları, CAO yöntemleri, CAO sonuçlarını değerlendirilebilmesi için kullanılan metrikler, CAO deneylerinde kullanılan amaç fonksiyon tanımlamaları ve deney çalışmalarının detaylı anlatımına yer verilmiştir. Deney bölümünde kullanılan donanım bilgisi, oluşturulan haritalara detayları ve izlenen deney adımlarına da bu bölümde yer verilmiştir. Bölüm 4'de ise, deneylerin sonuçları, bu sonuçların kullanılan değerlendirme ölçütleriyle analizi ve analiz sonuçlarına göre yapılan karşılaştırmalar paylaşılmıştır. Son bölüm olarak Bölüm 5'de de elde edilen bulgular ve çözümlerin metrik sonuçları değerlendirilmiş, gelecekte yapılabilecek çalışmalara dair önerilerde bulunulmuştur.

2. KURAMSAL TEMELLER

Tez kapsamında, sezgisel algoritma ile bir İHA için planlanan yolun ve birden fazla İHA için planlanan sınırlandırılmış ve sınırlandırılmamış toplanma güzergahlarının 2 kriter dikkate alınarak optimal hale getirilmesi problemi ele alınmaktadır. Sınırlandırılmamış toplanma güzergahları, birden fazla İHA için rastgele oluşturulan güzergahların kesişmesi problemine optimizasyon esnasında bu kesişmeleri ortadan kaldırmaya yönelik çözüm aramaktadır. Sınırlandırılmış güzergahlarda ise kesişmelerin oluşması planlama esnasında engellenerek optimizasyon sırasında sadece bu güzergahların belirlenen kriterlere yönelik iyileştirilmesi problemine çözüm aranmaktadır. Bu bölümde de yol planlama ve optimizasyon problemlerinin genel anlatımına yer verilecektir.

Boşlukların ve engellerin olduğu bir ortamda, önceden belirlenen başlangıç ve hedef noktaları arasında sonsuz noktadan geçen farklı yol bulunabilir. Yol planlama, belirlenen amaçlar ile planlanan optimal yolu bulmak olarak tanımlanmaktadır (Ren vd. 2019). Burada amaçlar, en kısa bulma, en güvenli yol kullanma, en az manevra ile hedefe ulaşma vb. olabilir. Bu tez çalışmasında, en kısa ve en az toplam manevra (1) ve en az enerji ve en keskin manevranın minimizasyonu (2) olmak üzere 2 farklı deney seti ile optimal planlanan yolun bulunması amaçlanmaktadır. V , $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$ noktalarından oluşan küme ve $\forall v \in R^2$ olsun. Yol p , v_b başlangıç noktasından v_h hedef noktasına kadar sıralanan $\{v_b, \dots, v_h\}$ kümesinden oluşmaktadır İHA için başlangıç ile hedef arası birçok elverişli yol bulunabilir. Ancak, İHA'nın belirlenen kriterlere göre minimum maliyetle belirlediği yolu optimal yol olarak seçmesi beklenmektedir. Bu nedenle problem, çok amaçlı optimizasyon problemine dönüşmektedir. ÇAO genel formülü Denklem 2.1'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \min_p F(p) \\ G_i(p) &\leq 0, i = 1, \dots, t \\ H_j(p) &= 0, j = 1, \dots, m \\ p_k^L &\leq p_k \leq p_k^U, k=1, \dots, n \end{aligned} \tag{2.1}$$

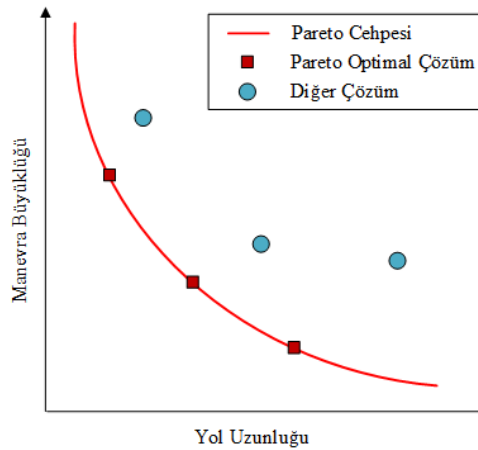
$f(p)$, p yolunun amaç vektörü olmak üzere, j 'inci amaç fonksiyon için toplam maliyeti $f_j(p)$ olsun. $F(p)$, $\{f_j(p), f_{j+1}(p), \dots, f_K(p)\}$ kümesini temsil etmektedir ($j \in [1, K]$, K toplam amaç fonksiyon sayısı). Bu çalışmada yol uzunluğu ve manevra büyüklüğü olarak toplam 2 amaç fonksiyonu yer almaktadır ($K = 2$). CAO problemlerinde çözüm adayları arasında tüm amaçlara göre maliyeti en az (minimizasyon problemi için) çözüm kümesi, Pareto-optimal çözümleri içerir.

$$\begin{aligned} f_j(p) &\leq f_j(q), \forall j \in [1, K] \\ \exists i \in [1, K], f_i(p) &< f_i(q) \end{aligned} \quad (2.2)$$

p ve q yolları için Denklem 2.2'de verilen şartlar sağlanırsa p 'nin q 'yu baskıladığı kabul edilir ve $p < q$ ile gösterilir. Eğer p 'yi baskılayan herhangi bir çözüm bulunamaz ise p baskılanamayan çözüm olarak (Pareto-optimal çözüm) adlandırılır.

$$\forall p \in P, P \subseteq Q, \nexists x \in Q, x < p \quad (2.3)$$

Eğer P ve Q kümeleri için Denklem 2.3'deki şartlar sağlanıyorsa, P Pareto optimal küme olarak adlandırılır. P Pareto kümesi ve Pareto cephesinin amaç uzayındaki gösterimi Şekil 2.1 Pareto Cephesi verilmiştir.



Şekil 2.1 Pareto Cephesi

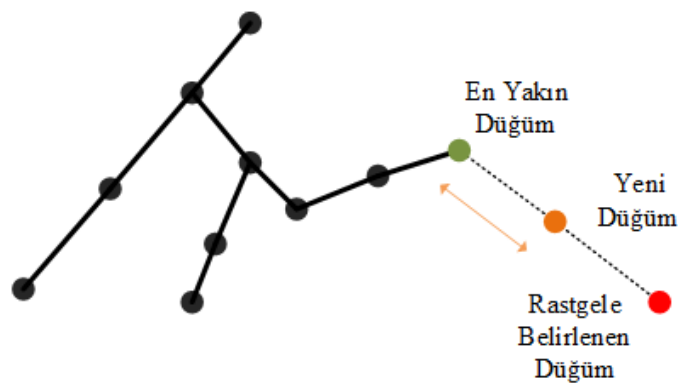
3. KULLANILAN MATERYALLER VE YÖNTEM

Bu bölümde, tez kapsamında yapılan çalışmalarda, kullanılan yol planlama algoritmaları, CAO algoritmaları, CAO algoritmalarını değerlendirebilmek için kullanılan metrikler paylaşılmıştır. Ardından, gerçekleştirilen deneylere ilişkin detaylı bir anlatım yapılmış olup, benzetim ortamı ve kullanılan haritalar hakkında bilgilere de bu bölümde yer verilmiştir.

3.1 Algoritmalar, Metrikler ve Amaç Fonksiyonları

3.1.1 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları

Mekanik bir sistemin kontrol edilebilen serbestlik açısı, kümülatif fiziksel serbestlik açısından düşük ise, sistem holonomik olmayan (non-holonomic) sistem olarak adlandırılabilir (www.robotikpedia.com 2020). HTRA (LaValle, 1998), yüksek boyutlu, holonomik olmayan problemleri çözebilmesi ve çözüme hızlı yakınsaması nedeniyle yaygın olarak kullanılan örnekleme tabanlı planlama algoritmalarından bir tanesi olarak görülmektedir (Noreen, 2016). HTRA algoritması temel olarak problem uzayından rastgele örnekleme yaparak bir ağaç yapısı oluşturmakta, her örneklemede genişleyen bu ağaç yapısı ile çözüme yönlendirilerek en uygun çözümü aramaktadır.



Şekil 3.1 HTRA ağaç genişleme süreci

HTRA algoritması, örnekleme, yakın nokta arama, yönlendirme, yeni noktanın geçerliliği kontrol etme ve noktayı ağaca ekleyerek genişleme olarak 5 adet adımdan oluşmaktadır.

Ağacın ilk noktası olarak başlangıç noktası ağaca eklenir. Örneklem adımlarında çözüm uzayının sınırları içerisinde engel bulunmayan bölgelerde rastgele nokta üretilir. Üretilen bu yeni noktaya önceden belirlenmiş en fazla ρ kadar uzaklıktaki en yakın nokta ağaç içerisinde bulunur. Eğer yeni nokta ile en yakın nokta arasındaki mesafe tanımlanan maksimum adım büyüklüğünden fazla ise bu iki nokta arasında oluşan doğrunun doğrultusunda maksimum adım büyüklüğü mesafede yeni bir nokta üretilir. Mesafe daha az ise rastgele üretilen nokta yeni nokta kabul edilir. Yeni nokta ile en yakın komşu noktanın arasında oluşturulan doğrunun engeller ile kesişimi kontrol edilip, yeni nokta ağaca eklenir. Şekil 3.1’de HTRA ağacının genişleme sürecine ilişkin görsel paylaşılmıştır.

HTRA algoritmasıyla hızlı bir çözüm elde edebilmesine rağmen, en uygun çözüm elde edilememektedir. Karaman vd. (2010) HTRA’nin bu eksikliğini gidermek için metoda eklemeler yaparak HTRA* ismiyle yeni bir varyasyon ortaya çıkarmıştır. HTRA* methodu, HTRA adımlarını kapsamakla birlikte, HTRA’ye ağaç noktalarının yeniden bağlanması ve en iyi komşu seçimi olarak 2 yeni adım eklemiştir.

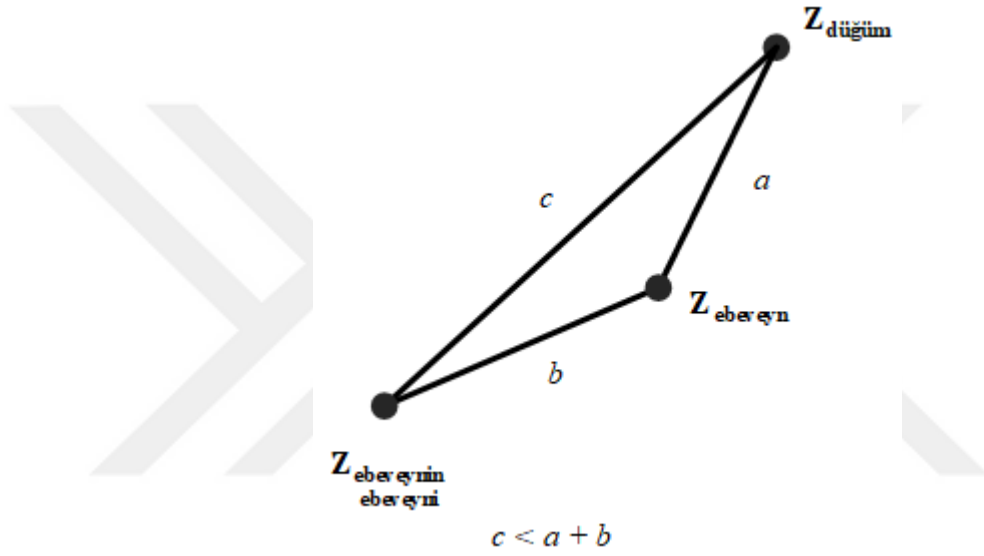
HTRA*’da yeni noktanın en iyi komşu aramasında iterasyonu bağlı dinamik olarak değişen bir arama uzaklığı kullanılmaktadır. Arama uzaklığı formülü Denklem 3.1’de verilmiştir.

$$k = \gamma \left(\frac{\log(n)}{n} \right)^{\frac{1}{d}} \quad (3.1)$$

Maksimum arama uzaklığı yarı çapı k ile ifade edilmiştir. γ ise ortama bağlı planlama sabiti olarak simgelenmiştir. d arama uzayı boyutudur. Yeni noktanın bağlanacağı ve en kısa toplam yola sahip nokta k mesafesinden daha kısa uzaklıktaki noktalar arasından seçilir (En iyi ebeveyn seçimi). Ardından yeni noktanın komşuluğundaki diğer noktaların yeni nokta üzerinden gidilmesi halinde daha kısa yola sahip olup olmayacağına bakılan yeniden bağlanma adımına geçilir. Yeni adımın komşularına

kestirme bir yol sağlaması halinde ağaçta komşuların ebeveyn noktaları yeni bulunan olarak güncellenir.

Nasir vd. (2013) ise HTRA* algoritmasının en uygun çözüme yakınsama oranını arttırma motivasyonu ile HTRA*-Akıllı algoritmasını ortaya çıkarmıştır. HTRA*-Akıllı, genel olarak HTRA*'ın özelliklerini barındırırken akıllı örnekleme ve yol optimizasyonu adında 2 yeni adım eklemesi yapmıştır.



Şekil 3.2 Üçgen eşitsizliği

Yöntem, ilk çözümü bulana kadar HTRA* ile aynı akışta devam etmektedir. İlk bulunan yol, öncelikle yol optimizasyonu adı verilen adıma sokularak, yol içerisinde bulunan artık bağlantı noktaları çözüm kümesinden çıkarılmaktadır. Artık bağlantı noktası ($Z_{ebeveyn}$), Şekil 3.2 Üçgen eşitsizliği’de verilen üçgen eşitsizliği ile gösterilmektedir. Eğer bulunan yolun başlangıç ve hedef arasındaki herhangi iki noktası birbirine doğrudan bağlanabiliyor ve arasında başka bir nokta kalıyorsa, kalan nokta artık nokta olarak belirlenip planlanan yoldan çıkarılmaktadır. Ardından, planlanan yol, fener (beacon) adı verilen çözüm kabul edilmekte ve akıllı örneklemeler fener çözümlerinin komşuluğunda yapılmaktadır.

$$Eğilim\ oranı = \left(\frac{n}{z_{free}} \right) * B \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de fener komşuluğunda akıllı örneklemenin yapılması sıklığını belirleyen dinamik eğilim oranı formülü paylaşılmıştır. Ancak, sabit bir eğilim oranı belirlemek de mümkündür. n , bulunulan iterasyon sayısını temsil ederken, kullanıcı tarafından belirlenen B problem uzayına uygun kat sayıyı temsil etmektedir. z_{free} ise geçerli bulunan nokta sayısını temsil etmektedir. Akıllı örnekleme sıklığının artması, çözümün bulunan fener çevresinde rastgele örnekleme göre daha sık aranması anlamına gelmektedir. Böylece, çözüm uzayının geniş çerçevede taranması ve dolayısıyla mutlak minimuma yakınsama ihtimali düşmektedir.

3.1.2 Olasılıksal Yol Haritası Algoritması

Kavraki vd. (1996) tarafından önerilen OYH algoritması, temel olarak rastgele örneklemeyle statik bir ortamda başlangıç noktasından hedef noktasına engellere takılmadan hareket planlaması yapılması amacını taşımaktadır. Algoritma, öğrenme ve sorgu fazı olmak üzere 2 ana aşamadan meydana gelmektedir.

Öğrenme fazı, inşa ve genişleme adımı olarak 2 aşamadan oluşmaktadır. İnşa aşamasında rastgele üretilen noktaların çözüm uzayına eşit dağılımı sağlanırken, genişleme aşamasında inşa aşamasında yayılım yoğunluğunun az olduğu bölgedeki zor noktaların komşuluklarında yeni noktalar üretilmesi sağlanır. Zor nokta, az olasılıkla seçilen noktayı temsil etmektedir. Noktaların zorlukları inşa adımı belirlenir. N adet nokta arasından c noktasının seçilme ihtimali Denklem 3.3’de verilmiştir.

$$Pr(c\ noktasının\ seçilmesi) = w(c) \quad (3.3)$$

$w(c)$ ’nin büyüklüğü ile c noktasının zorluğu belirlenmektedir. Noktalar rastgele belirlendikten sonra lokal planlayıcı ile birbirlerine inşa aşamasında bağlanmaktadır.

İnşa aşamasının sonunda her bir noktanın başarısız bağlanma oranı ($r_f(c)$) Denklem 3.4'deki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$r_f(c) = \frac{f(c)}{n(c) + 1} \quad (3.4)$$

$n(c)$, lokal planlayıcının c noktasını diğer noktalara bağlamak için yaptığı toplam deneme sayısını belirtirken, $f(c)$ ise bu denemelerin kaç tanesinde başarısız olduğunu simgelemektedir. Genişleme adımının başlangıcında her bir noktanın başarısız bağlanma oranıyla doğru orantılı zorluk derecesi belirlenmektedir.

$$w(c) = \frac{r_f(c)}{\sum_{a \in N} r_f(a)} \quad (3.5)$$

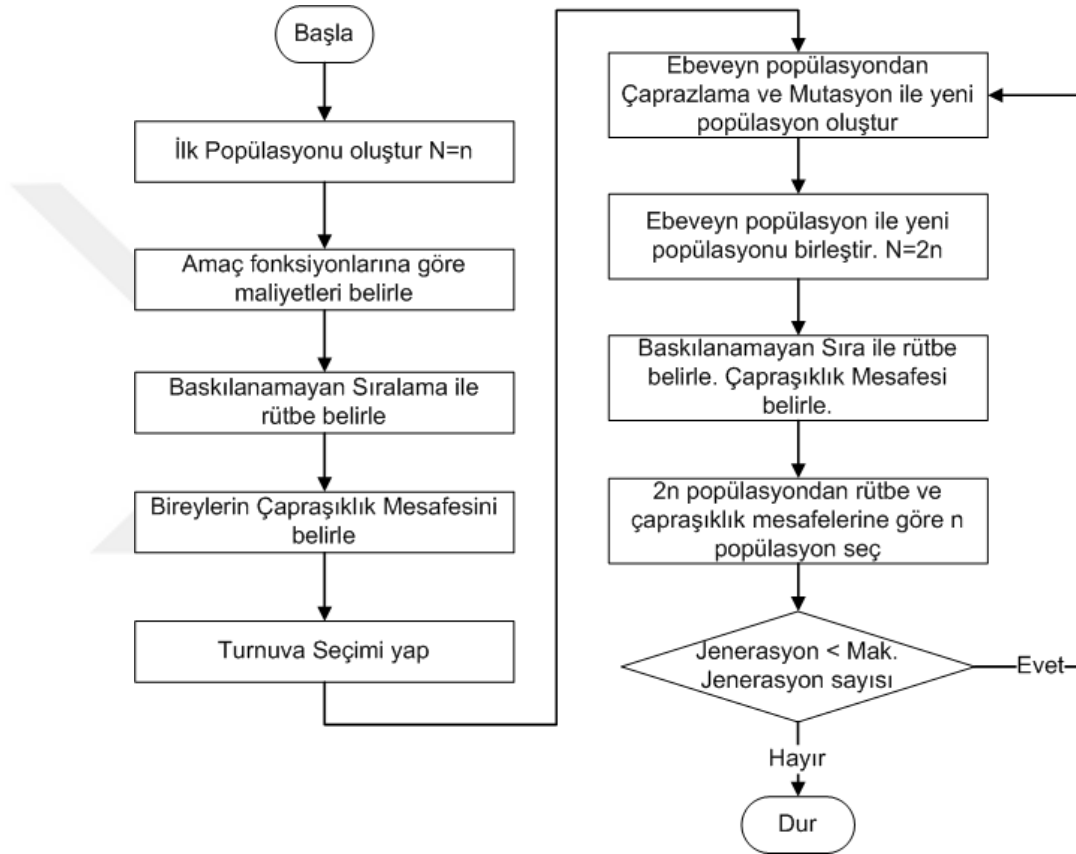
Ardından, toplam olasılık 1 olacak şekilde $w(c)$ değerleri normalize edilmektedir. Zorluk değerlendirme nihai formülü Denklem 3.5'de paylaşılmıştır.

OYH'in sorgu fazında ise, inşa fazında bağlanan noktalar kümesine başlangıç ve hedef noktası da eklenip, bu iki noktayı bağlayan en kısa yol bulunmaktadır. Eğer bulunamazsa, ihtiyaç duyulan nokta sayısını arttırmak gerekmektedir. Bu yüzden öğrenme fazındaki inşa ya da genişleme aşamasına geri dönülebilmektedir.

3.1.3 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II

1994 yılında önerilen BSGA algoritması (Srinivas ve Deb 1994), elitizm barındırmamaktadır. Bu yüzden, popülasyondaki en iyi çözümler her jenerasyonda yenilenmektedir. Baskılanamayan sıralama fonksiyonu çözüm adayı olan yeni jenerasyon ile popülasyondaki tüm çözümleri karşılaştırarak çözüm adayının baskılanıp baskılanmadığına karar vermektedir. Bu durum, özellikle geniş popülasyonla ihtiyaç duyulan yüksek komplekslikteki problemlerde çok fazla işlem gücü ihtiyacını doğurmaktadır. İşlem gücü ihtiyacının artması da algoritmanın hızını oldukça

yavaşlatmaktadır. Algoritmanın bir diğer eksikliği önceden belirlenen parametre değerine göre dağılımın sağlanıyor olmasıdır. Bu parametre değerinin probleme özgü dinamik olarak hesaplanması gerekmektedir. Bu durum da algoritmayı kullanan araştırmacılara fazladan yük getirmektedir. Bu nedenlerden dolayı, NSGA algoritmasının (Srinivas ve Deb 1994) yeni bir versiyonu olarak önerilen EA tabanlı ÇAO algoritması BSGA-II (Deb vd. 2002) önerilmiştir.



Şekil 3.3 BSGA-II algoritması akış şeması

Burada BSGA-II algoritması, minimizasyon (en küçük değer arama) problemleri temel alınarak anlatılmıştır. Algoritma maksimasyon (en büyük değer arama) problemlerinde baskılanamayan sıralama fonksiyonu terslenerek uygulanır. Şekil 3.3’de BSGA-II algoritmasının akış şeması paylaşılmıştır.

Algoritma ilk aşamada popülasyon genişliği kadar çözüm uzayında rastgele popülasyon üretir. Elde edilen popülasyondaki her bir çözüm adayının önceden belirlenen amaç

fonksiyonlarına göre maliyetleri (amaç fonksiyon değeri) hesaplanır. Bu maliyetlere göre baskılanamayan sıralama (non-dominated sorting) yapılır. Bu sıralamada her bir çözümün amaç fonksiyon değerleri, diğer çözüm adaylarının amaç fonksiyon değerleri ile skalar olarak karşılaştırılır. Bu karşılaştırma sonucu, eğer bir çözümün maliyet değerleri diğer bir çözümün maliyetlerinden az ise, az olan çözümün diğer çözümü baskıladığı kabul edilir (en küçük değer arama problemleri için geçerli). Popülasyonun hiçbir bireyi tarafından baskılanamayan çözüm kümesi baskılanamayan çözüm kümesini oluşturur. Baskılanamayan çözüm kümesine öncül derecesi olarak en yüksek rütbe (rank, fitness) olan 1 rütbe değeri ataması yapılır. Rütbesi 1 olan çözüm kümesinin herhangi bir elemanına baskılanan ama diğer çözümler tarafından baskılanamayan çözüm kümesine rütbe değeri 2 olarak atama yapılır. Bu rütbe ataması popülasyondaki tüm bireylerin rütbesi belirlenene kadar artarak devam eder.

Daha sonra, popülasyondaki bireylerin çapraşıklık mesafesi (crowding distance) hesaplanır. Çapraşıklık mesafesi hesaplaması aynı öncül rütbede olan çözüm kümesi içerisinde yapılır. Öncelikle, bir maliyete göre çözüm kümesindeki elemanlar skalar olarak sıralanır. Bu sıralama sonucu en büyük ve en küçük değere sahip çözümlerin çapraşıklık mesafesi sonsuz kabul edilerek seçilmesi sağlanır.

$$I[i]_{mesafe} = I[i]_{mesafe} + \frac{I[i+1].m - I[i-1].m}{f_m^{max} - f_m^{min}} \quad (3.6)$$

Sıralanan çözüm kümesindeki diğer çözümlerin mesafe hesaplamaları formülü Denklem 3.6'da paylaşılmaktadır. I çözüm kümesini, i çözümü, m ise amaç fonksiyonunu simgelemektedir. Her bir çözümün ilgili amaç fonksiyonundaki çapraşıklık değeri, iki en yakın komşuluğundaki çözümlerin amaç fonksiyon değer farklarının amaç fonksiyonu sınır değerleri farkına oranıyla hesaplanır. Çözümün nihai çapraşıklık değeri her bir amaç fonksiyonundaki çapraşıklık değer toplanarak hesaplanmaktadır.

Rütbe ve çapraşıklık değerlerinin belirlenmesinden sonra popülasyondan ebeveyn (parent) kromozomlarının seçildiği safhaya geçilir. Seçim istenilen kromozom sayısına ulaşıncaya kadar, öncelikli olarak en düşük rütbeli yani en kaliteli çözümler seçilerek

yapılır. Popülasyonun belirlenen sayıya ulaşmaması halinde, düşük rütbeden büyük rütbeğe doğru popülasyona diğer çözüm adayları kabul edilir. Ancak, aynı rütbedeki iki çözüm arasında karar verilmesi gerekirse çapraşıklık mesafesi büyük olan çözüm tercih edilir. Bu karşılaştırmaya “crowded-comparison” denilir. Bu şekilde, bir sonraki jenerasyona en iyi çözümlerin korunarak aktarılması ise BSGA-II’nin elitist bir EA olduğunu göstermektedir. Daha sonra, ebeveyn popülasyondan çaprazlama ve mutasyon yöntemleriyle yeni aday (child) kromozomlar elde edilir.

$$\begin{aligned} c_{i,k} &= \frac{1}{2} [(1 - \beta_k)p_{i,k} + (1 + \beta_k)p_{i+1,k}] \\ c_{i+1,k} &= \frac{1}{2} [(1 + \beta_k)p_{i,k} + (1 - \beta_k)p_{i+1,k}] \end{aligned} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7’de çaprazlama evresi (SBX -Simulated Binary Crossover) değişim formülü verilmiştir. $c_{i,k}$ ifadesi i. çocuğun k. karar değişkenini (decision variable), $p_{i,k}$ ise seçilen ebeveyni simgelemektedir. β_k ise rastgele üretilen sayıyı temsil etmektedir. β_k ’nın dağılımı ise Denklem 3.8’de gösterilmiştir. u ifadesi, eşit dağılımda ve (0,1) aralığında rastgele üretilen sayıyı, η ise çaprazlama dağılım indeksini simgelemektedir.

$$\beta(u) = (2u)^{\frac{1}{(\eta+1)}} \quad (3.8)$$

Denklem 3.9’da mutasyon evresinin polinomal dağılım formülü verilmiştir.

$$\zeta_k = \begin{cases} (2r_k)^{\frac{1}{\eta_k+1}} - 1, & r_k < 0.5 \text{ ise,} \\ 1 - [2(1 - r_k)]^{\frac{1}{\eta_k+1}}, & r_k \geq 0.5 \end{cases} \quad (3.9)$$

ζ_k simgesi ile dağılım ifade edilmektedir. r_k eşit dağılım ve (0,1) sınırları içerisinde değer alan rastgele bir sayıyı, η_k ise mutasyon indeksini simgelemektedir.

Son olarak, elde edilen çocuk kromozomlarla ebeveynler birleştirilerek güncel popülasyon oluşturulur. Güncel popülasyonun tekrar rütbe ataması ve çapraşıklık

mesafe hesaplaması yapılarak yeni döngü başlatılmış olunur. Döngüye belirlenen kriter yerine getirilene kadar devam edilir.

3.1.4 Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma

ÇAO problemlerinde Pareto-optimal çözüm, tüm amaç fonksiyonlarının birleştirilmesiyle oluşan skalar optimizasyon probleminin çözümü olabilir. Aynı zamanda, Pareto-optimal çözüme yakınsamak için problem, skalar amaç optimizasyonu alt problemlerine bölünebilir. Bu bakış açısıyla önerilen ATÇAEA (*Ayrılma tabanlı çok amaçlı evrimsel algoritma/ Multi objective evolutionary algorithm based on decomposition*) (Zhang ve Li 2007), çok amaçlı optimizasyon problemlerini sayısal olarak karşılaştırılabilir alt optimizasyon problemlerine bölerek ve böldüğü her bir alt problemi sadece ilgili alt problemin komşuluğundaki birkaç alt problemden edindiği bilgilerle optimize ederek, skalar optimizasyon yöntemlerinin etkinlik ve hız avantajını kullanmayı amaçlamaktadır. Böylece, yüksek boyutlu karmaşık problemlerin çözümünde ihtiyaç duyulan yüksek işlem gücü ve zaman ihtiyacının azaltılması öngörülmektedir. ATÇAEA bir çok birleştirme (aggregation yada decomposition) yaklaşımı ile kullanılabilir. Aşağıda PC yakınsamasını skalar optimizasyon problemlerine dönüştürebilecek 3 farklı birleştirme yaklaşımı anlatılmaktadır.

Ağırlıklandırılmış toplama yaklaşımı (Weighted Sum Approach) farklı amaçların dışbükey birleştirilmesini ele almaktadır. $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_m)^T$ ağırlık vektörü olsun, $\lambda_i \geq 0$ $i = 1, \dots, m$ 'e kadar tüm amaçları temsil etmektedir. Ağırlık normalizasyonu, $\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1$ matematiksel ifadesi ile sağlanmaktadır.

$$\min g^{ws}(x|\lambda) = \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x) , \quad x \in \Omega \quad (3.10)$$

Denklem 3.10'da x pareto optimal çözüm arayışı formülasyonu paylaşılmıştır. Ağırlıklandırılmış toplam yaklaşımı en büyük değer arama problemlerinde doğrudan

kullanılabilse de en küçük değer arama problemlerinde kullanılabilmesi için yaklaşıma ek farklı teknik yaklaşımlar yapmak gerekmektedir.

Önerilen algoritmada kullanılan diğer bir birleştirme fonksiyonu, Tchebycheff yaklaşımıdır. Yaklaşım formülü Denklem 3.11’de paylaşılmıştır.

$$\min g^{te}(x|\lambda, z^*) = \max_{1 \leq i \leq m} \{\lambda_i |f_i(x) - z_i^*|\} \quad x \in \Omega \quad (3.11)$$

$i = 1, \dots, m$ ‘e kadar amaç fonksiyonunu ve $z^* = (z_1^*, \dots, z_m^*)^T$ referans noktasını temsil etmek üzere her bir $z_i^* = \max\{f_i(x) | x \in \Omega\}$ formülü ile hesaplanır. Farklı ağırlık vektörü λ ’a göre bulunan pareto optimal çözümler problemin Pareto-optimal çözüm kümesini oluşturmaktadır. Bu yaklaşım yönteminin zayıf yönü, birleştirme fonksiyonunun sürekli ÇAO problemleri için uygun olmamasıdır. Ancak, birleştirme fonksiyonunun türev hesaplamasının kullanılmadığı çalışmalarda bu eksikliğin etkisi gözlenmemektedir.

Önerilen yöntem ile ele alınmış 3. birleştirme fonksiyonu sınır kesişmesi yaklaşımıdır (Boundary Intersection-BI). Sınır kesişme yaklaşım yöntemi olarak (Das ve Dennis, 1998) ve (Messac vd. 2003) yöntemleri örnek gösterilebilir. Bu yöntemler sürekli ÇAO problemlerinde kullanılmak üzere önerilmiştir. Bu yöntemlerin amacı sınır hattı ile bir doğru kümesinin geometrik olarak kesişim noktalarının bulunmasıdır. Eğer bu doğrular eşit şekilde dağılmışsa kesişim noktalarının PC’ye iyi bir yayılım göstermesi beklenebilir. ATÇAEA’da referans noktasından çıkan doğrular kullanılmaktadır. Denklem 3.12’de skalar optimizasyon alt problem formülü verilmiştir.

$$\begin{aligned} \min g^{bi}(x|\lambda, z^*) &= d \\ F(x) - z^* &= d\lambda, \quad x \in \Omega \end{aligned} \quad (3.12)$$

λ ve z^* sırasıyla ağırlık vektörünü ve referans noktasını ifade etmektedir. Bu formül ile $F(x)$ ’in referans noktasından geçen ve λ istikametindeki doğru üzerinde olacağı garanti

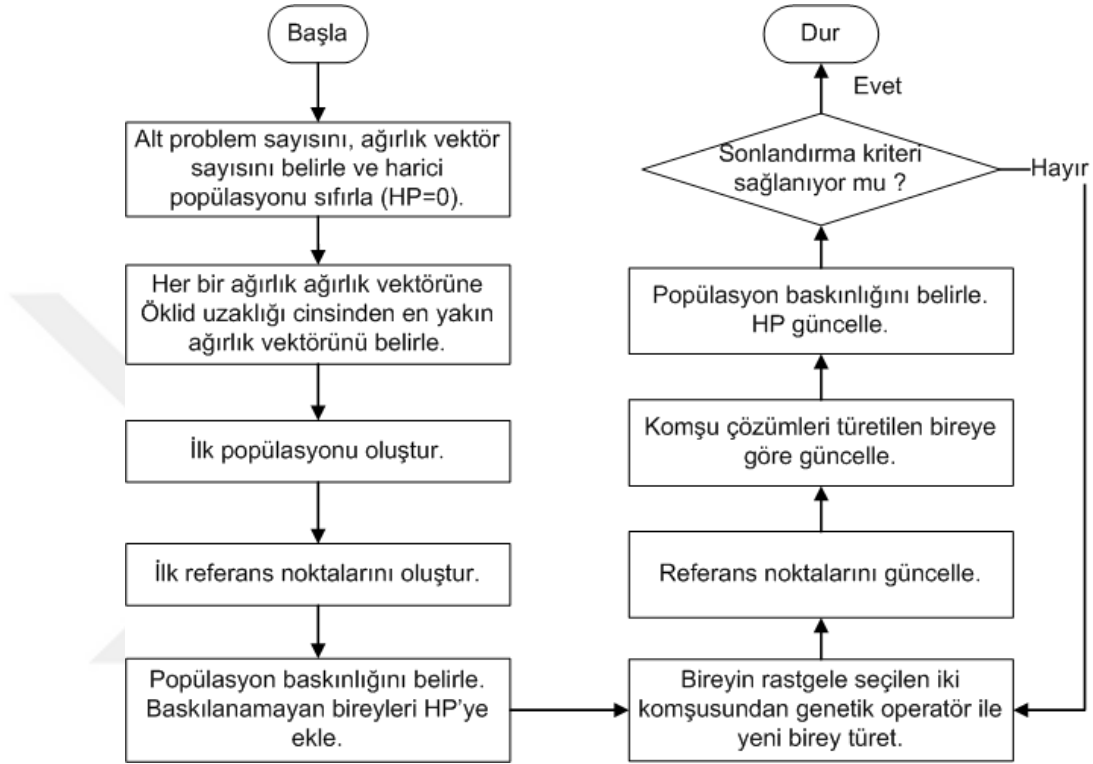
altına alınmaktadır. Farklı ağırlık vektörleriyle olabildiğince çözümün referans noktasına yakınsaması amaçlanmaktadır. Diğer taraftan bu yöntem, $F(x) - z^* = d\lambda$ eşitlik kısıtını sağlamak zorundadır. Ancak, dağılımın tek bir çözüme yakınsaması riski oluşmaktadır. Bu zorunluluk ile başa çıkabilmek adına sınır kesişim yaklaşımına ek olarak ceza yöntemi kullanılmaktadır. Böylece birbirinden farklı çözümlerin eşit olarak PC'ye yakınsaması amaçlanmaktadır. Bu yöntemce ceza tabanlı sınır kesişimi (penalty-based boundary intersection-PBI) yaklaşımı adı verilmiştir. Denklem 3.13'de ilgili yöntem paylaşılmaktadır.

$$\min g^{bip}(x|\lambda, z^*) = d_1 + \theta d_2, x \in \Omega$$

$$d_1 = \frac{\|(F(x) - z^*)^T \lambda\|}{\|\lambda\|}, d_2 = \|F(x) - (z^* + d_1 \lambda)\| \quad (3.13)$$

$\theta > 0$ olmak üzere ceza parametresini ifade etmektedir. Ceza parametresinin çok büyük veya çok küçük seçilimi algoritmanın performansını oldukça düşürmektedir. ATÇAEA'nın akış şeması Şekil 3.4'de verilmektedir. Algoritma akışı diğer EA'larda olduğu gibi öncelikle ilklendirme adımıyla başlamaktadır. Bu adımda, oluşturulacak alt problem sayısı ve her bir vektörün komşuluğundaki ağırlık vektör sayısı belirlenmektedir. Algoritma sonucu çözüm olarak sunulacak harici popülasyon sayısı sıfırlanmaktadır. Ardından, İlk jenerasyon üyeleri belirlenen sınırlar değerlerde rastgele üretilen sayılara göre oluşturulmaktadır. Daha sonra ilk jenerasyonun amaç fonksiyon maliyetlerini göz önüne alarak referans noktaları ve ilk harici popülasyon bireyleri belirlenmektedir. Popülasyondaki her bir bireyin rastgele seçilen iki komşusundan genetik operatörler kullanılarak yeni çözüm adayı meydana getirilmektedir. Oluşturulan yeni bireyin amaç fonksiyon değeri referans noktasından küçük ise, (en büyük değer arama problemi için büyük şartı aranır) bu değer ilgili alt problemin yeni referans nokta değeri olarak atanmaktadır. Ardından, komşuluğundaki her bir alt problemin yeni bireye göre yukarıda anlatılan 3 birleştirme fonksiyonu yaklaşımından bir tanesi kullanılarak, ayrışma maliyeti hesaplanmaktadır. Eğer ayrışma maliyeti, alt problemin mevcut popülasyondaki ayrışma maliyetinden az ise, yeni birey popülasyona eklenmektedir. Tüm popülasyon bu sıralama ile güncellendikten sonra, popülasyonun baskınlığı ölçülür. Yeni bireylerin önceki popülasyonda her alan bireyleri baskılaması veya

mevcut bireylerin yeni bireyi baskılaması halinde baskılanan bireyler harici popülasyondan silinir. Baskılanamayan bireylerden oluşan harici popülasyonun güncellenmesi ile sonlandırma şartlarının oluşup oluşmamasına bağlı olarak döngü tekrar edilir ya da sonlandırılır.

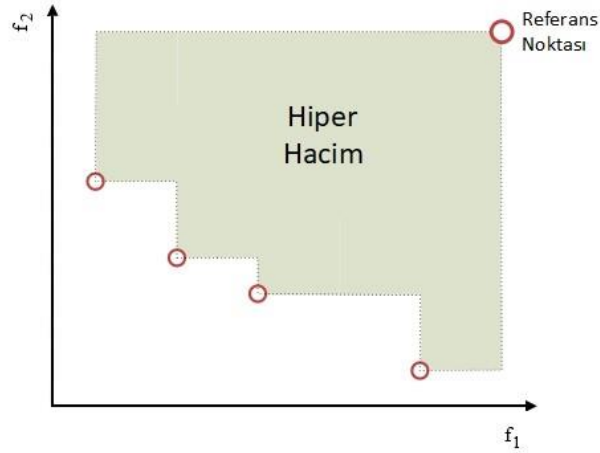


Şekil 3.4 ATÇAEA algoritması akış şeması

3.1.5 Metrikler

ÇAO algoritmalarının kullanımının yaygınlaşmasıyla, ÇAO problemlerinde performans ölçümü önemli hale gelmiştir. ÇAO çalışmalarında optimizasyon sonucunu değerlendirebilmek için geliştirilen performans metrikleri, PC'ye yakınsamayı ölçen (ör. hata oranı, referans noktasından uzaklığı), bilinen PC'nin etrafına dağılımını ölçen (ör. Spread, spacing) ve bu iki yaklaşımın kombinasyonu olan metrikler (HyperVolume, R-Metrics) olarak 3 farklı amaca göre ayrılmıştır (Deb, 2011). Aşağıda tez kapsamında kullanılan ÇAO algoritmalarının sonuçlarını değerlendirmek için kullanılan metrikler anlatılmıştır.

Zitzler (1999)'in doktora tezinde önerdiği, S-metrik olarak da adlandırılan Hiper Hacim metriği ÇAO çalışmaları yürüten araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılan etkili birçok amaçlı evrimsel algoritma değerlendirme yöntemidir.



Şekil 3.5 Hiper hacim metriği hesaplama görseli

Hiper Hacim değerlemesi yapılabilmesi için öncelikle ÇAO sonucu oluşan bir pareto-optimal bir çözüm kümesine ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.5 **Hiper hacim metriği hesaplama görseli**'deki görselde kırmızı dairelerle (referans noktası hariç) pareto-optimal bir çözüm kümesi gösterilmektedir. Daha sonra, bu noktalara göreceli olarak uzak mesafe bir referans noktası belirlenir. Referans noktasının seçilmesi önemli bir aşamadır. Çünkü, referans noktasının PC'ye çok uzak seçilmesi Hiper Hacim değerinin hassasiyetini azaltmakta, dolayısıyla Hiper Hacim metriğine göre iki farklı ÇAO algoritmasının karşılaştırılması zorlaşmaktadır. Referans noktası seçilirken tüm pareto-optimal çözümleri barındıran kümenin en büyük (en küçük değer arama problemi için) değerine yakın bir nokta belirlenmelidir. Ardından bu referans noktası ile pareto-optimal çözüm kümesi arasında kalan alan hesaplaması, çözümün Hiper Hacim değerini belirler. Denklem 3.14'de Hiper Hacim hesaplama formülü paylaşılmıştır. i , n çözüm kümesindeki çözümleri ifade etmektedir. v_i ise referans noktası ve her bir çözüm noktasının köşe kabul edildiği hiperküpe temsil etmektedir. Bu hiperküplerin hacimleri toplamı ise Hiper Hacimi değerini vermektedir.

$$HH = hacim\left(\bigcup_{i=1}^n v_i\right) \quad (3.14)$$

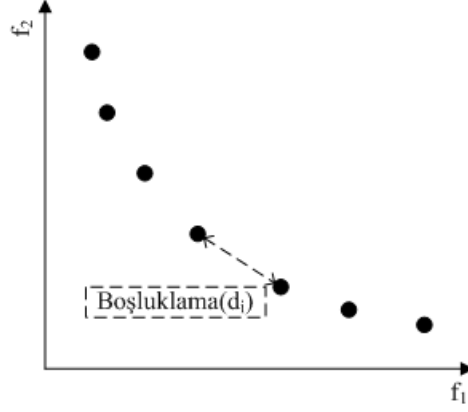
Hiper hacim hesaplaması basit olmasına rağmen, çözümün optimal çözüme ne kadar yakınsadığını ve optimal çözümün etrafına ne kadar yayıldığını gösteren bir metriktir. Özellikle yöntem karşılaştırmalarında kullanılmaktadır. CAO problem sonucu 2 farklı CAO algoritmasından elde edilen çözümlerin karşılaştırılması yapılırken, hiper hacim değeri büyük olan algoritma, o problem özelinde daha başarılı addedilir.

Tez çalışması kapsamında kullanılan bir diğer metrik ise Schott (1995)'un önerdiği Boşluklama (spacing) metriğidir. Denklem 3.15'de ardışık çözümler arasındaki mesafe ile elde edilen Boşluklama hesaplaması gösterilmektedir.

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (3.15)$$

$$d_i = \min_{k \in nI, k \neq i} \sum_{j=1}^m |f_j^i - f_j^k|, \bar{d} = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{n}$$

d_i , i 'inci çözüm ile son baskılanamayan çözüm kümesindeki çözümler arasındaki her bir amaç fonksiyon değeri için mutlak farklarının toplamının en küçük değerini gösteren mesafedir. d_i Şekil 3.6'da gösterilmiştir. $\bar{d}$ ise, d_i mesafelerinin ortalamasını ifade etmektedir. S boşluklama değeri, farklı i çözümleri için hesaplanan d_i mesafesinin ortalamadan sapmalarının kareler ortalamasının kareköküdür. Diğer bir tanımlama ile d_i 'nin standart sapma değeridir.



Şekil 3.6 Boşluklama metriği d_i mesafesi gösterimi

Boşluklama metriğinin amacı, çözümün optimal çözümün etrafına yayılmasını değerlendirmektir. Çözümlerin eşit şekilde PC'ye dağıldığı bir çözüm kümesinin Boşuklama değerinin küçük olması beklenmektedir. Boşuklama değeri küçük olan baskılanamayan çözüm kümesi, problem özelinde daha başarılı addedilir.

3.1.6 Amaç fonksiyonlarının belirlenmesi

Tez kapsamında kullanılan haritalarda, başlangıç noktasını ve hedef bölgesini doğrudan bağlayan bir yol bulmak, haritada var olan engeller nedeniyle mümkün değildir. Bu nedenle, planlanan yollar ve toplanma güzergahları en az 3 noktadan meydana gelen bağlantı noktaları kümesinden oluşmaktadır. Aşağıda belirtilen tüm hesaplamalar minimum 3 bağlantı noktası varoluşu var sayımıyla yapılmıştır. İki nokta arasındaki mesafe, 2 ve 3 boyutta Denklem 3.16'da verilen Öklid uzaklığı formülü ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}, (x, y) \in R^2 \quad (3.16)$$

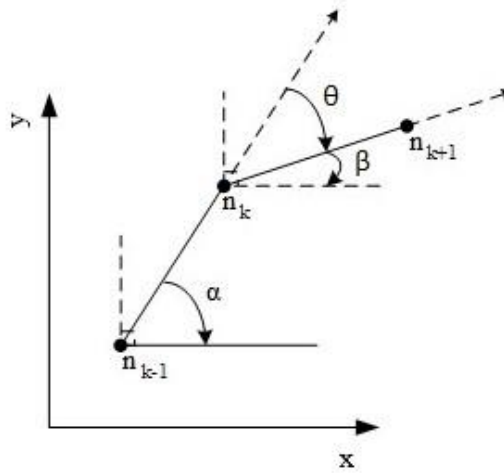
$$\Delta d = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}, (x, y, z) \in R^3$$

Toplam yol uzunluğu ise İHA'nın başlangıç noktasından varış noktasına kadar (başlangıç ve varış noktası dahil) üzerinden geçtiği tüm bağlantı noktaları arasındaki Öklid mesafelerin toplamına eşittir. Toplam Yol uzunluğu formülü Denklem 3.17'de

verilmiştir. Denklemden yer alan D ifadesi toplam yol uzunluğunu, T ifadesi ise toplam bağlantı nokta sayısını simgelemektedir. Δd_k ifadesi, bulunan yolun k 'inci noktası ile $k + 1$ 'inci noktası arasındaki mesafeyi belirlemektedir.

$$\Delta d_k = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}$$

$$D = \sum_{k=1, k \in Z^+}^{T-1} \Delta d_k \quad (3.17)$$



Şekil 3.7 2 Boyutta manevra açısı

Şekil 3.7'de 2 boyutta manevra açıları gösterilmiştir. Geliş açısı, İHA'nın hareketi esnasında üzerinden geçtiği nokta ile bir önceki bağlantı noktası arası çizilen doğrunun 2 boyutlu analitik düzlemde yer alan yatay (x) eksen ile yaptığı açıya denilmiştir. Geliş açısı (α) formülü Denklem 3.18'de paylaşılmıştır. x_k ve y_k ifadeleri, bulunan yolun k 'inci noktasının analitik düzlemdeki sırasıyla x ve y eksen değerlerini simgelemektedir.

$$\alpha = \left| \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) \right|$$

$$a: R \rightarrow R, \alpha = \begin{cases} a, y_k - y_{k-1} \geq 0 \text{ ve } x_k - x_{k-1} \geq 0 \text{ ise,} \\ 2\pi - a, y_k - y_{k-1} < 0 \text{ ve } x_k - x_{k-1} \geq 0 \text{ ise,} \\ \pi + a, y_k - y_{k-1} \leq 0 \text{ ve } x_k - x_{k-1} < 0 \text{ ise,} \\ \pi - a, y_k - y_{k-1} \geq 0 \text{ ve } x_k - x_{k-1} < 0, \text{ aksi halde} \end{cases} \quad (3.18)$$

Gidiş açısı, İHA'nın hareketi esnasında üzerinden geçtiği nokta ile bir sonraki bağlantı noktası arası çizilen doğrunun 2 boyutlu analitik düzlemde yer alan yatay (x) eksen ile yaptığı açıya denilmiştir. Gidiş açısı (β) formülü Denklem 3.19'de paylaşılmıştır.

$$\beta = \left| \tan^{-1} \left(\frac{y_k - y_{k-1}}{x_k - x_{k-1}} \right) \right|$$

$$\beta: R \rightarrow R, \alpha = \begin{cases} \beta, y_{k+1} - y_k \geq 0 \text{ ve } x_{k+1} - x_k \geq 0 \text{ ise,} \\ 2\pi - \beta, y_{k+1} - y_k < 0 \text{ ve } x_{k+1} - x_k \geq 0 \text{ ise,} \\ \pi + \beta, y_{k+1} - y_k \leq 0 \text{ ve } x_{k+1} - x_k < 0 \text{ ise,} \\ \pi - \beta, y_{k+1} - y_k \geq 0 \text{ ve } x_{k+1} - x_k < 0 \text{ aksi halde} \end{cases} \quad (3.19)$$

Bu çalışmada manevra, İHA'nın planlanan yol üzerinde hareket ederken yönünü değiştirmek için iki boyutlu düzlemde geliş doğrultusu (geliş açısı) ve gidiş doğrultusu (gidiş açısı) arasındaki açı farkından oluşan büyüklüğe verilen isimdir. Manevra büyüklüğü formülü Denklem 3.20'da verilmiştir. Formülde manevra büyüklüğü θ ifadesi ile gösterilmiştir.

$$\theta = |\alpha - \beta|, \theta = \begin{cases} 2\pi - \theta, \theta > \pi \text{ ise,} \\ \theta, \text{aksi halde} \end{cases} \quad (3.20)$$

Toplam manevra büyüklüğü ise, İHA'nın başlangıç noktasından varış noktasına kadar (başlangıç ve varış noktası hariç) üzerinden geçtiği tüm bağlantı noktalarında yaptığı manevra büyüklükleri toplamına eşittir. Hesaplama İHA'nın başlangıç noktasından ikinci bağlantı noktasına hareketi öncesi doğrultusunu değiştirmede, doğrudan ikinci Noktaya hareket edecekmiş gibi yönlendirilerek harekete başladığı kabul edilmiştir. Bu yüzden, toplam manevra hesaplamaları ikinci noktadan itibaren yapılmaktadır. Toplam manevra hesaplama formülü Denklem 3.21'de paylaşılmıştır.

$$\theta = \sum_{k=2, k=k+1}^{T-1} \theta_k \quad (3.21)$$

Formüldeki θ ifadesi, her noktadaki manevraların toplamından oluşan toplam manevra açı büyüklüğünü simgelemektedir. Çalışmanın yol planlaması optimizasyonu

kapsamında, CAO algoritmalarında 1 numaralı deneylerde kullanılmak üzere 2 tane amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Denklem 3.22’de f_1 ile simgelenen 1 numaralı amaç fonksiyonunu ve Denklem 3.23’da yer alan f_2 ifadesi 2 numaralı amaç fonksiyonunu belirtmektedir.

$$f_1(X) = \min \sum_{k=1}^{T-1} \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}, X_k: \{(x, y) | x, y \in R\} \quad (3.22)$$

$$f_2(X) = \min \sum_{k=2, k=k+1}^{T-1} \theta_k \quad (3.23)$$

Toplanma çalışmalarındaki 1 numaralı deneylerde de aynı harita üzerinde 4 adet İHA’nın farklı başlangıç noktalarından başlamalarına rağmen aynı hedef bölgesine yol planlamaları beklenmektedir. Bu durum da yollarının kesişmesi ihtimalini doğurmaktadır. Yollarının kesişmesi istenmeyen bir durum kabul edilmektedir. Bu yüzden, kesişmeyi cezalandırmak amacıyla yol planlaması optimizasyonundaki amaç fonksiyonlarına 1000 kat ağırlıklandırılmış kesişme bedeli eklenerek 2 adet amaç fonksiyonu oluşturulmuştur. Oluşturulan amaç fonksiyonları Denklem 3.24 ve Denklem 3.25 gösterilmektedir.

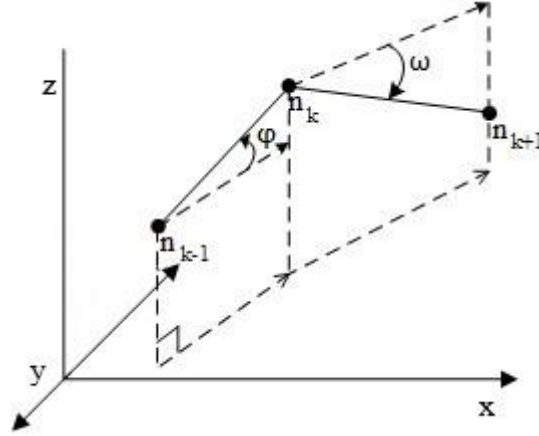
$$f_1(X) = \min \left(\left(\sum_{k=1}^{T-1} \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2} \right) + (I * 1000) \right), \quad (3.24)$$

$$f_2(X) = \min \left(\left(\sum_{k=2, k=k+1}^{T-1} \theta_k \right) + (I * 1000) \right) \quad (3.25)$$

Her bir İHA için planlanan yolun diğer İHA yollarıyla kesiştiği nokta sayısı, her nokta bir defa hesaba katılacak şekilde sayılmaktadır. Yukarıdaki denklemde kullanılan I ifadesi, toplam kesişim noktası sayısını ifade etmektedir. Denklem 3.26’de 3 boyutlu çalışmalardaki toplam yol uzunluğu formülü verilmiştir.

$$\Delta d_k = \sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2 + (z_{k+1} - z_k)^2}$$

$$D = \sum_{k=1, k \in Z^+}^{T-1} \Delta d_k \quad (3.26)$$



Şekil 3.8 3 Boyutta manevra açısı

Şekil 3.8’de İHA’nın 3 boyutlu ortamdaki manevra hareketi gösterilmiştir. İHA’nın 3 boyutlu uzaydaki +z ve -z eksenlerinde yaptığı aşağı ve yukarı yönlü hareket irtifa değişimini belirtmektedir. İHA’nın mevcut konumu ve bir sonraki bağlantı noktası arasındaki doğru ile xy düzleminde oluşturduğu iz düşüm doğrusu arasındaki açı irtifa açısı olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.8’de ω ve ϕ ifadeleri ile irtifa açıları gösterilmektedir. ω ve ϕ irtifa açıları Denklem 3.27’deki eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$\omega \text{ ve } \phi = \left| \tan^{-1} \left(\frac{z_k - z_{k-1}}{\sqrt{(x_{k+1} - x_k)^2 + (y_{k+1} - y_k)^2}} \right) \right| \quad (3.27)$$

3 Boyutlu uzaydaki her bir bağlantı noktasına ait irtifa manevrası açısı büyüklüğü formülü Denklem 3.28’de paylaşılmıştır.

$$\sigma = |\phi - \omega| \quad (3.28)$$

Her bir bağlantı noktasının toplam manevra büyüklüğü hesaplaması ise, Denklem 3.19, Denklem 3.20 ve Denklem 3.21’de verilen 2 boyuttaki manevra büyüklüğü ile Denklem 3.28’de verilen irtifa açısı büyüklüğü toplanarak bulunmakta olup, ilgili formül Denklem 3.29’de verilmiştir.

$$\Psi = \theta + \sigma \quad (3.29)$$

3 boyutta planlanan yolun toplam manevra büyüklüğü hesaplaması, Denklem 3.30'da verilmiştir. Hesaplamalarda, İHA'nın başlangıç noktasına ulaşımındaki irtifası göz ardı edilmiştir ve harekete doğrudan başlangıçtaki irtifada başladığı kabul edilmiştir.

$$\theta = \sum_{k=2, k=k+1}^{T-1} \Psi_k \quad (3.30)$$

3 boyutlu konfigürasyonlardaki optimizasyon çalışmalarında da Denklem 3.22 ve Denklem 3.23'de verilen amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Belirtilen denklemlerde yer alan Denklem 3.17 ve Denklem 3.21 yerine sırasıyla Denklem 3.26 ve 3.30 koyularak hesaplanmıştır.

Tez kapsamında 2 boyutta yol planlama ve toplanma optimizasyonu için uygulanan bir diğer deneyde kullanılan amaç fonksiyonları, enerji ve maksimum dönüş açısının (en keskin manevranın) en aza indirilmesi olarak belirlenmiştir. Sırasıyla Denklem 3.31'de minimum enerji, Denklem 3.32'de minimum dönüş açısı amaç fonksiyonları paylaşılmıştır.

$$f_1 = \min\left(\frac{D}{V} * c\right) \quad (3.31)$$

f_1 ile gösterilen amaç fonksiyonundaki D , Denklem 3.17'deki toplam yol uzunluğu ifadesini belirtmektedir. V İHA'nın hızını, c ise İHA'nın birim zamanda harcadığı kilogram cinsinden yakıt miktarını simgelemektedir. V ve c tez çalışmalarında sabit olarak belirlenmiştir.

$$f_2 = \min(\max(\theta)) \quad (3.32)$$

f_2 ile gösterilen 2 numaralı amaç fonksiyonunda θ , İHA'nın başlangıç noktasından hedefe kadar hareketinde, yaptığı her bir manevranın büyüklüğünü ifade etmektedir. Bu amaç fonksiyonu ile İHA'nın yol boyunca yaptığı tüm manevralar arasından en büyüğünün en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. 4 adet İHA için toplanma çalışmasındaki 2 numaralı deneyde ise, 2 amaç için toplam maliyet hesaplaması yapılırken her bir İHA'nın f_1 ve f_2 maliyetleri ayrı ayrı hesaplanıp aynı cinsten maliyetler toplanarak f_1 ve f_2 amaç fonksiyon değerleri elde edilmektedir.

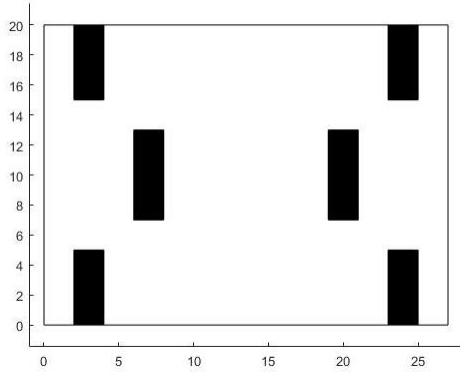
3.2 Deney Çalışmaları

Aşağıda deney çalışması esnasında izlenen adımlar, maddeler halinde özetlenmiştir. Maddelerde aksi belirtilmediği durumda, deneyler 2 boyutta ve sırasıyla yürütülmüştür. Her bir maddeye ilişkin detay bilgiler ilerleyen alt başlıklarda paylaşılmıştır.

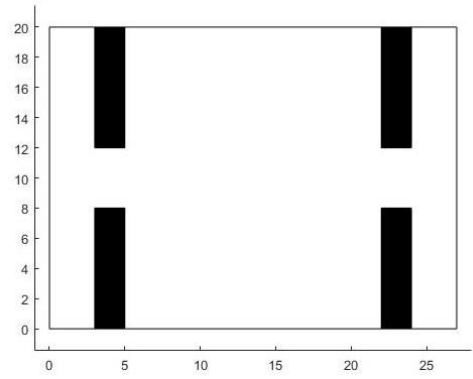
- HTRA, HTRA * ve HTRA *-Akıllı algoritmaları ile bir İHA için yol planlaması
- 3 Boyutta HTRA, HTRA * ve HTRA *-Akıllı algoritmaları ile bir İHA için yol planlaması
- BSGA-II algoritmasıyla HTRA sonucu planlanan 3 boyutlu yolun optimizasyonu
- HTRA ve OYH algoritmalarıyla yol planlaması
- BSGA-II ve ATÇAEA algoritmalarıyla HTRA sonucu planlanan yolun optimizasyonu
- HTRA ve OYH algoritmalarıyla 4 adet İHA için toplanma planlaması
- BSGA-II ve ATÇAEA algoritmalarıyla HTRA sonucu planlanan toplanma güzergahlarının optimizasyonu
- HTRA ve OYH algoritmalarıyla 4 adet İHA için sınırlandırılmış güzergahta toplanma planlaması
- BSGA-II ve ATÇAEA algoritmalarıyla sınırlandırılmış güzergahta HTRA sonucu planlanan toplanma güzergahlarının optimizasyonu

Yukarıda sıralanan deneyler birbirinden bağımsız şekilde 30 kere tekrar edilmiştir. Bağımsızlığın sağlanabilmesi için, MATLAB programında kullanılan rastgele sayı üreticinin referans değeri her döngü başında rastgele şekilde değiştirilmiştir.

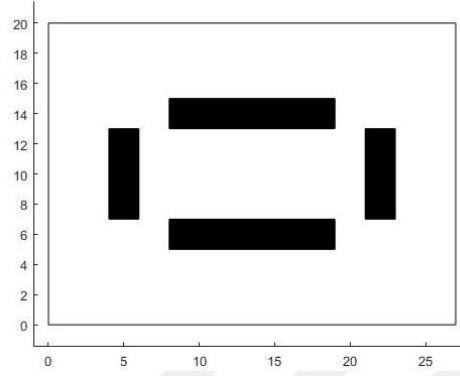
Tez kapsamında kullanılan haritalar Şekil 3.9'da ve Şekil 3.10'da paylaşılmıştır. Bu çalışmada 2 boyutlu 5 adet ve 3 boyutlu 1 adet harita kullanılmıştır. Oluşturulan haritalarda 1 engelleri, 0 ise engel olmayan alanları göstermektedir. 2 Boyutlu 1, 2, 3 ve 4 numaralı haritaların yatay ve dikey eksen uzunlukları sırasıyla 27 ve 20 birimdir. Diğer taraftan 2 boyutlu 5 numaralı haritanın yatay ve dikey uzunlukları eşit belirlenerek 20 birim olarak seçilmiştir. Harita boyutlarının problem çözümü açısından kayda değer bir önemi olmamakla beraber daha büyük haritalar daha yüksek işlem gücü ve zaman gerektireceği için belirtilen boyutlar tercih edilmiştir. Verilen haritalarda, haritanın dışında yer alan ince siyah çizgi ile gösterilen çerçeve, haritanın sınırlarını belirtmektedir. Haritaların içerisinde yer alan siyah renkteki dikey ve/veya yatay sütunlar, 2 boyutta oluşturulan sabit engelleri simgelemektedir. Harita 1, diğer haritalara göre farklı başlangıç noktalarından merkezde belirlenecek varış bölgesine toplanma hareketinin yapılabilmesi için, birden fazla manevra yapması ihtiyacı düşünülerek tasarlanmıştır. Harita 2'nin tasarımındaki amaç, 4 uçtan başlayan ve harita merkezindeki bir bölgeye varmaları gereken yol planlamalarında İHA'ların ortak bir giriş ağzından geçmeye zorlanması ve bu şartlar altında deney sonuçlarının gözlenmesidir. Harita 3, bir numaralı harita ile benzer şekilde ayrı yollar bulunabilecek biçimde; fakat yatay engellerin deneye etkisinin de gözlemlenebilmesi amacıyla oluşturulmuştur. Harita 4'de ise, engellerin toplam yüzey alanının toplam harita alanına oranı diğer haritalara göre yüksek tutularak ve engeller arası boşluklar dar bırakılarak yol planlamasına bu şartların etkisinin gözlemlenmesi amaçlanmaktadır. 5 numaralı harita ve haritada bulunan engeller diğer haritalardan farklı olarak simetrik yapıdadır. Bu harita, 4 köşeden başlayıp merkezde toplanmayı amaçlayan İHA'ların güzergahlarının optimize edilmesini zorlaştırmak amacıyla tasarlanmıştır. 3 Boyutlu harita ise, 4 numaralı harita temel alınarak, 3 boyutlu dünyadaki farklı jeolojik veya yapısal engelleri benzetebilmesi için ve engeller asimetrik olacak şekilde farklı yüksekliklerde oluşturulmuştur. Böylece gerçeğe yakın bir deney çalışması yapılması amaçlanmaktadır.



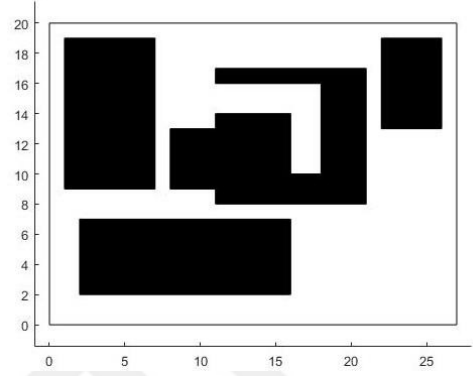
a-) Harita -1



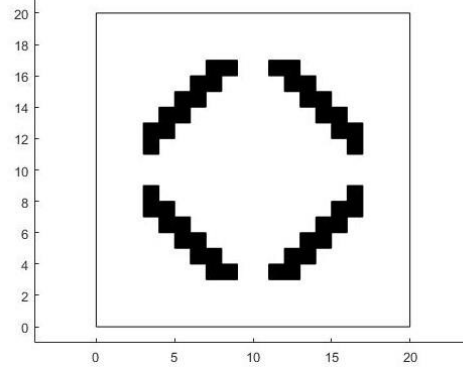
b-) Harita -2



c-) Harita -3

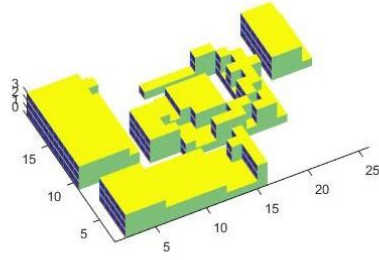


d-) Harita -4

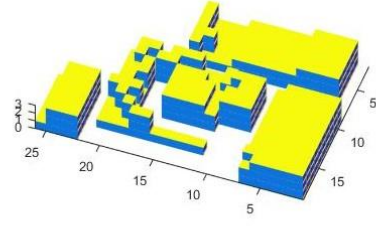


e-) Harita -5

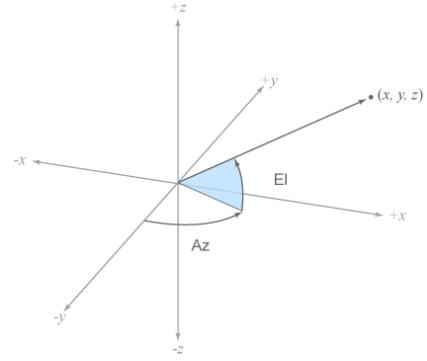
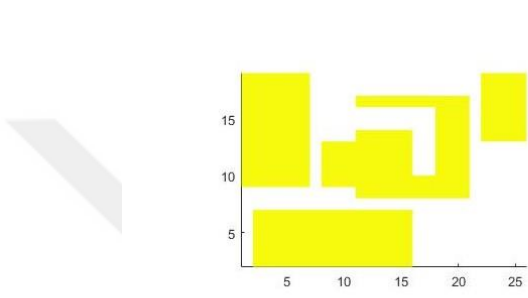
Şekil 3.9 2 Boyutlu deney haritaları



a-) Az: -27° El: 47° görünümü



b-) Az: -90° El: 90° görünümü



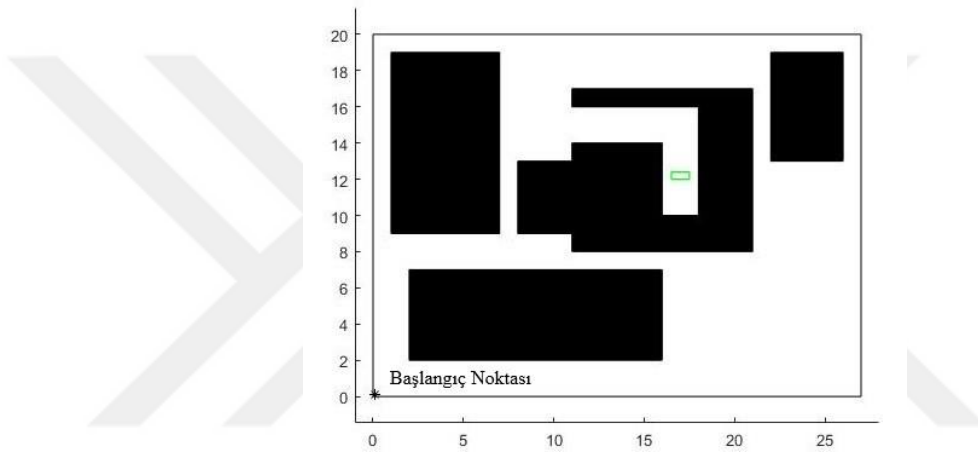
c-) Az: -160° El: 47° görünümü

Şekil 3.10 3 Boyutlu deney haritasının 3 farklı açıdan görünümü

Deneylerde, yeşil renkte ve dikdörtgen geometride verilen alanlar hedef bölgeyi belirtmektedir. Başlangıç noktası olarak yıldız ("*") simgesi kullanılmıştır. Birden fazla İHA toplanması deneylerinde kullanılan başlangıç nokta simgeleri renklere göre ayrılmaktadır. Bu yüzden, toplanma deneylerinde kullanılan renk belirteçlerinden, deneylerin anlatıldığı bölümde bahsedilmektedir.

3.2.1 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları ile yol planlaması

Bu bölümde, HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı algoritmaları ile yapılan yol planlama çalışması detaylı şekilde anlatılmıştır. Şekil 3.911’de, bu deneyde kullanılan İHA’nın hedef bölgesi yeşil dikdörtgen bölge ile ve başlangıç noktası yıldız (*) ile gösterilmektedir. Deneyde, diğer deneylerden farklı olarak, kullanılan algoritmaların hedefe erişme hızı ve çözüm kabiliyeti daha hassas gözlemlenebilmesi amacıyla hedef bölge daha küçük ve dar yol üzerinden ulaşılabilir şekilde seçilmiştir.



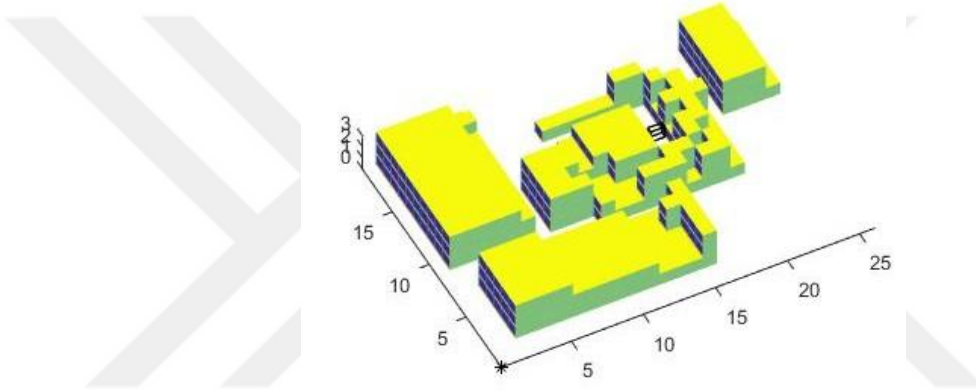
Şekil 3.11 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı yol planlaması deney haritası

İHA’nın başlangıç noktası (0.1,0.1) olarak belirlenmiştir. Hedef ise, sol alt köşe (16.5,12), sol üst köşe (16.5,12.4), sağ üst köşe (17.5,12.4) ve sağ alt köşe (17.5,12) olmak üzere dikdörtgen geometride belirlenmiştir. HTRA algoritmasında parametre değeri olarak maksimum adım büyüklüğü 1, maksimum komşu nokta uzaklığı 10 ve toplam iterasyon sayısı ise 3000 belirlenmiştir. HTRA* algoritmasında maksimum adım büyüklüğü ve toplam iterasyon sayısı HTRA ile aynı sırasıyla 1 ve 3000 olarak belirlenmiştir. Gamma (γ) değeri ise 5 olarak seçilmiştir. HTRA*-Akıllı algoritmasında ise, maksimum adım büyüklüğü 1, toplam iterasyon sayısı 3000, Gamma (γ) 5, Eğilim oranı (BiasingRatio) 2 ve Akıllı örnekleme yarı çapı 2 olarak belirlenmiştir. HTRA*-Akıllı algoritması ve HTRA* algoritmaları HTRA’dan türeyen algoritma olmaları ve karşılaştırma yapılması nedeniyle aynı işlevdeki parametre değerleri aynı seçilmiştir. Yukarıda belirtilen parametrelerle her bir algoritma sonucu bulunan yolların, deney

haritasındaki görselleri, toplam yol uzunluğu ve toplam manevra açısı değerleri kaydedilmiştir.

3.2.2 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç Algoritmaları ile 3 Boyutta yol planlaması

Bu bölümde HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı algoritmaları ile 3 boyutlu konfigürasyonda Şekil 3.2' de verilen harita üzerinde yapılan yol planlama çalışması anlatılmaktadır.



Şekil 3.12 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı ile 3 boyutta yol planlaması haritası

Şekil 3.12 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı ile 3 boyutta yol planlaması haritası gösterilmiştir. Haritada bu deneyde kullanılan İHA'nın hedef bölgesi siyah dikdörtgenler prizması bölge ile ve başlangıç noktası yıldız ('*') ile gösterilmektedir. Deneyde, kullanılan algoritmaların hedefe erişme hızı ve çözüm kabiliyetinin daha hassas ölçülebilmesi amacıyla hedef bölge küçük ve dar yollardan oluşan güzergâh içerisinde seçilmiştir.

Başlangıç noktasının konumu (0.1,0.2,0.1) olarak belirlenmiştir. Hedef bölgesi 4 yüzeyden oluşan dikdörtgenler prizması seçilmiş olup, oluşan geometriye uygun her köşenin konum bilgisi sırasıyla 1.köşe (Ön yüz sol üst) (16.5,12,2.1), 2.köşe (Ön yüz sol alt) (16.5,12,1.2), 3.köşe (Ön yüz sağ alt) (17.5,12,1.2), 4.köşe (Ön yüz sağ üst) (17.5,12,2.1), 5.köşe (Arka yüz sol üst) (16.5,12.4,2.1), 6.köşe (Arka yüz sol alt)

(16.5,12.4,1.2), 7.köşe (Arka yüz sağ alt) (17.5,12.4,1.2) ve 8.köşe (Arka yüz sağ üst) (17.5,12.4,2.1 olarak belirlenmiştir.

HTRA algoritmasında parametre değeri olarak maksimum adım büyüklüğü 1, maksimum komşu nokta uzaklığı 10 ve toplam iterasyon sayısı ise 3000 belirlenmiştir. HTRA* algoritmasında maksimum adım büyüklüğü ve toplam iterasyon sayısı HTRA ile aynı sırasıyla 1 ve 3000 olarak belirlenmiştir. Gamma (γ) değeri ise 5 olarak seçilmiştir. HTRA*-Akıllı algoritmasında ise, maksimum adım büyüklüğü 1, toplam iterasyon sayısı 3000, Gamma (γ) 5, Eğilim oranı 2 ve Akıllı örnekleme yarı çapı 2 olarak belirlenmiştir. Daha sonra, her bir algoritma sonucu bulunan yolların, deney haritasındaki görselleri, toplam yol uzunluğu ve toplam manevra açısı değerleri kaydedilerek deney sonlandırılmıştır.

3.2.3 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ile 3 boyutta ÇAO

Bu bölümde ÇAO optimizasyon algoritması olan BSGA-II ile HTRA algoritmasının sonucu olarak planlanan yolun optimizasyonu anlatılmıştır. HTRA ile planlanan yolun, HTRA* ve HTRA*-Akıllı sonuçlarına göre yol uzunluğu ve manevra cinsinden daha maliyetli olması, kullandığı işlem gücünün az olması ve kullanımının yaygın olması HTRA algoritmasının seçilme nedenlerini oluşturmaktadır. Böylece optimizasyon sonucunun daha net gözlemlenebileceği düşünülmüştür.

BSGA-II algoritması Genetik Algoritma temel alınarak oluşturulmuştur (Deb vd. 2002). Bu yüzden, GA'da yer alan popülasyon büyüklüğü ve jenerasyon büyüklüğü parametrelerini içermektedir. Bu parametrelere ek olarak, karar değişkenlerinin alabileceği değer limitlerini belirleyebilmek adına yarı çap parametresi tanımlanmıştır. Parametre değerleri olarak popülasyon büyüklüğü 50, jenerasyon sayısı 500, karar değişkenleri limit değeri yarı çapı 3, mutasyon dağılım indeksi 20 ve çaprazlama dağılım indeksi 20 belirlenmiştir.

Optimizasyon süresinin kabul edilebilir sınırlarda kalabilmesi için, yapılan testler ile optimizasyon parametreleri belirlenmiştir. BSGA-II'de türetilen her yeni jenerasyonun

geçerli bir aday olabilmesi için, yeni jenerasyondaki bağlantı noktalarının engel üzerinde olmaması, bağlantı noktalarını bağlayan doğrunun engelle kesişmemesi ve her bir bağlantı noktasının HTRA sonucundaki ilgili noktasından en fazla 5 birim uzaklıkta olması kriterlerine bakılmıştır. Toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğü maliyetlerini minimuma indirmek için 2 amaç fonksiyonu kullanılmış olup, bu fonksiyonlar ile ilgili detaylı bilgi, Bölüm 3.1.6’da verilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucu oluşan yolların deney haritasındaki görselleri, toplam yol uzunlukları ve toplam manevra açısı değerleri kaydedilmiştir.

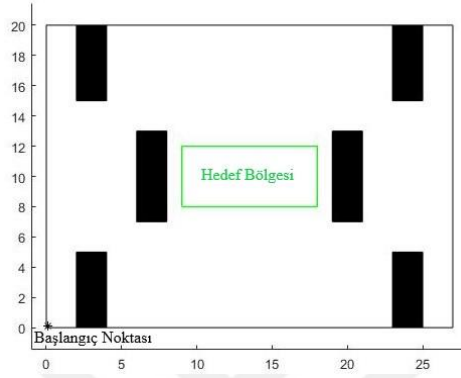
3.2.4 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile yol planlama

Bu bölümde HTRA ve OYH algoritmaları ile 2 boyutlu konfigürasyonda yapılan yol planlaması çalışmalarının anlatımına yer verilmiştir.

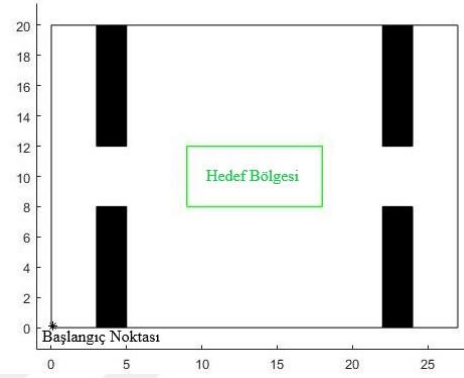
Şekil 3.13’de yer alan haritalarda, benzetimi yapılan İHA’nın hedef bölgesi, yeşil dikdörtgen bölge ile ve başlangıç noktası yıldız (*) ile gösterilmektedir. HTRA algoritmasında kullanılan parametre değerleri, maksimum adım büyüklüğü 1, maksimum komşu nokta uzaklığı 10 ve toplam iterasyon sayısı 3000 olarak belirlenmiştir. OYH algoritmasında ise, maksimum adım büyüklüğü 1 ve oluşturulan nokta sayısı ise 2000 seçilerek parametre atamaları yapılmıştır.

Başlangıç noktasının konumu her iki algoritma için kullanılan 5 haritada da (0,1,0,1) olarak belirlenmiştir. HTRA algoritması için hedef bölge olarak belirlenmesine rağmen OYH algoritması harita üzerinde oluşan noktaları birleştirerek noktasal planlama yaptığı için hedef nokta olarak belirlenmiştir. HTRA algoritması ile harita 1 ve harita 2 üzerinde yapılan yol planlama benzetiminde hedef bölgelerin 1.köşesi (sol alt) (9,8) noktası, 2.köşesi (sol üst) (12,8) noktası, 3.köşesi (sağ üst) (18,12) ve 4.köşesi (sağ alt) (18,8) noktası olarak belirlenmiştir. OYH algoritmasının harita 1 ve harita 2 üzerindeki hedef noktaları ise (13,5,10) olarak belirlenmiştir. Harita 3 için HTRA algoritması hedef bölgesinin 1.köşesi (sol alt) (10,9) noktası, 2.köşesi (sol üst) (10,11) noktası, 3.köşesi (sağ üst) (17,11) ve 4.köşesi (sağ alt) (17,9) noktası, OYH için hedef noktası ise (13,5,10) olarak belirlenmiştir. Harita 4 için HTRA algoritması hedef bölgesinin

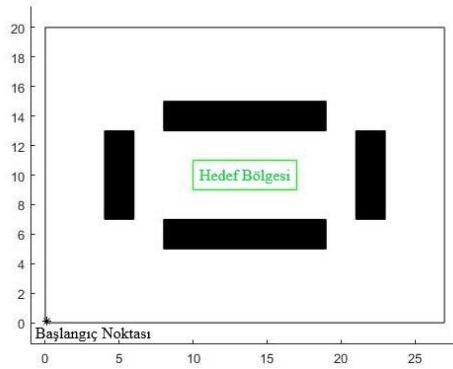
1.köşesi (sol alt) (18,2.5) noktası, 2.köşesi (sol üst) (18,6.5) noktası, 3.köşesi (sağ üst) (25,6.5) ve 4.köşesi (sağ alt) (25,2.5) noktası, OYH için hedef noktası ise (21.5,4.5) olarak belirlenmiştir. Son olarak simetrik olan 5 numaralı haritada HTRA algoritmasının hedef bölge sınırları (8,8), (8,12), (12,12) ve (12,8) noktaları arası, OYH hedef noktası ise (10,10) olarak belirlenmiştir.



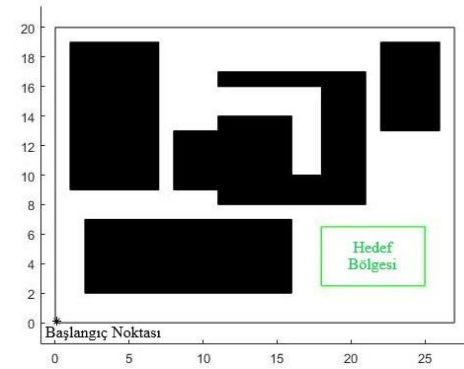
a-) Harita -1



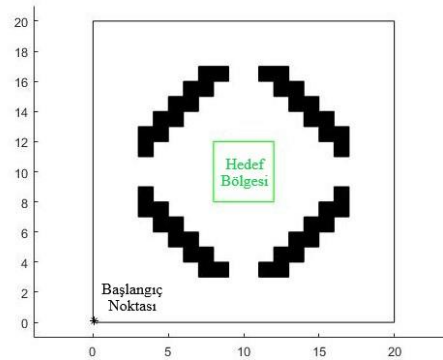
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

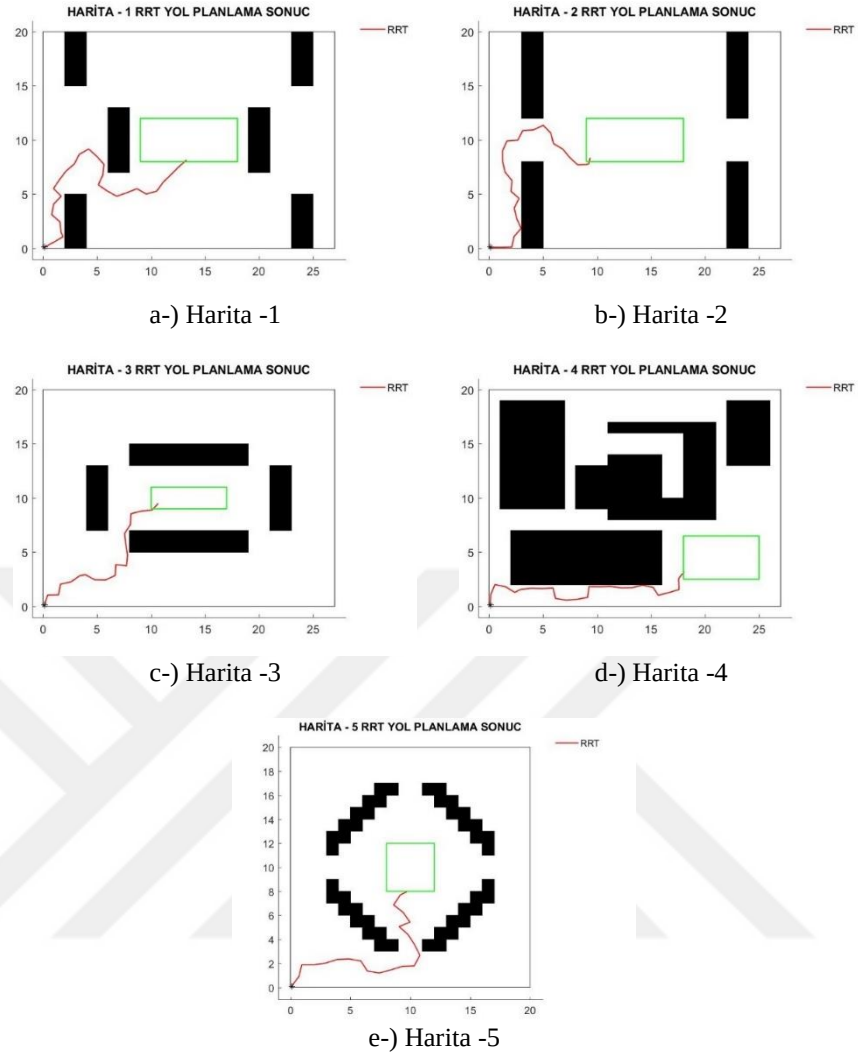
Şekil 3.13 HTRA ve OYH ile yol planlaması için kullanılan haritalar

HTRA ve OYH algoritmalarıyla deney haritalarında oluşturulan yollar, yolların deney haritasındaki görselleri, toplam yol uzunluğu ve toplam manevra açısı değerleri kayıt altına alınıp, çalışma sonlandırılmıştır.

3.2.5 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile yol planlaması CAO

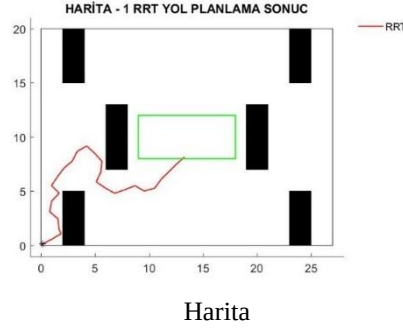
Bu kısımda, 3.2.4’de HTRA ile planlanan yolların, BSGA-II ve ATÇAEA algoritmaları kullanılarak belirlenen amaçlar doğrultusunda optimize edilmesi anlatılmıştır.

Buradaki CAO çalışması kapsamında, toplam yol uzunluğu ve toplam manevra büyüklüğü, amaç fonksiyonlarının en aza indirilmesi amacıyla ve harcanan enerji ve en büyük (keskin) manevranın minimize edilmesi amacıyla 2 farklı CAO deneyi planlanmış olup, kullanılan amaç fonksiyonları ilgili detaylı bilgi 3.1.6’da verilmiştir. CAO çalışması yapılacak yol planları, her bir haritadaki HTRA algoritmasının 30 farklı sonucu arasından seçilmiş olup, seçilen sonuç Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de paylaşılmıştır. 1 numaralı deney, toplam yol uzunluğu ve toplam manevra büyüklüğü amaç fonksiyonları kullanılarak 5 haritada da gerçekleştirilmiştir. 2 numaralı deney ise harcanan enerji ve en büyük manevra açısı amaç fonksiyonları ile sadece 1 numaralı harita üzerinde yapılmaktadır. Haritaların üzerindeki kırmızı renkli çizgiler HTRA algoritması sonucu planlanan yolları belirtmektedir. Tüm HTRA sonuçları arasından yapılan seçimlerde sayısal bir kriter bulunmamakla birlikte, toplam manevra büyüklüğü ve yol uzunluğu daha sayısal olarak büyük olan sonuçlar tercih edilmiştir. Böylece, CAO sonuçlarının daha kolay anlaşılabilmesi amaçlanmıştır. 1 numaralı deneyde BSGA-II algoritmasında kullanılan parametre değerleri, popülasyon büyüklüğü 50, jenerasyon büyüklüğü 1000, karar değişkenleri sınır değeri yarı çapı 2, mutasyon dağılım indeksi 20 ve çaprazlama dağılım indeksi 20 olarak belirlenmiştir. ATÇAEA yönteminde ise popülasyondaki birey sayısı 50, yenilenecek jenerasyon sayısı 1000, karar değişkenlerinin sınır değeri yarı çapı 2 ve dağılım sabiti gamma (γ) 0.8 ve ceza parametresi (θ) 5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.14 1 numaralı CAO'da kullanılan HTRA ile planlanan yollar

2 numaralı deneyde ise BSGA-II algoritmasında kullanılan parametre değerleri, popülasyon büyüklüğü 50, jenerasyon büyüklüğü 2000, karar değişkenleri sınır değer yarı çapı 2, mutasyon dağılım indeksi 20 ve çaprazlama dağılım indeksi 20 olarak belirlenmiştir. ATÇAEA'da ise popülasyondaki birey sayısı 50, yenilenecek jenerasyon sayısı 2000, karar değişkenlerinin sınır değer yarı çapı 2 ve dağılım sabiti gamma (γ) 0.8 ve ceza parametresi (θ) 5 olarak belirlenmiştir.

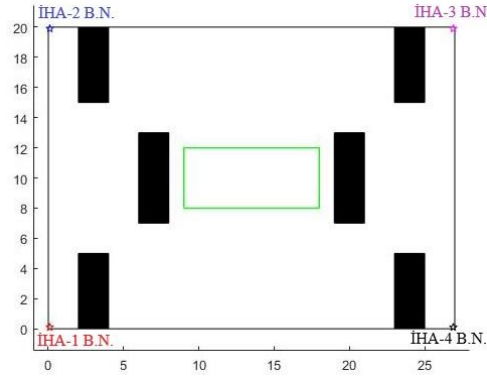


Şekil 3.15 2 numaralı ÇAO’da kullanılan HTRA ile planlanan yol

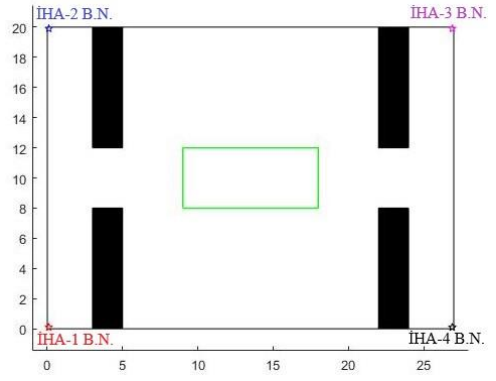
Her iki algoritmada, türetilen her yeni jenerasyonun geçerli bir aday olabilmesi için, yeni jenerasyondaki bağlantı noktalarının engel üzerinde olmaması, bağlantı noktalarını bağlayan doğrunun engelle kesişmemesi ve her bir bağlantı noktasının HTRA sonucundaki ilgili noktasından en fazla sınır değer yarı çapı kadar uzaklıkta olması kriterlerine bakılmıştır. ÇAO sonucu oluşan yollardaki bağlantı noktası değerleri, yolların deney haritasındaki görselleri, amaç fonksiyon değerleri kayıt altına alınıp, ÇAO çalışması sonlandırılmıştır.

3.2.6 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile toplanma planlaması

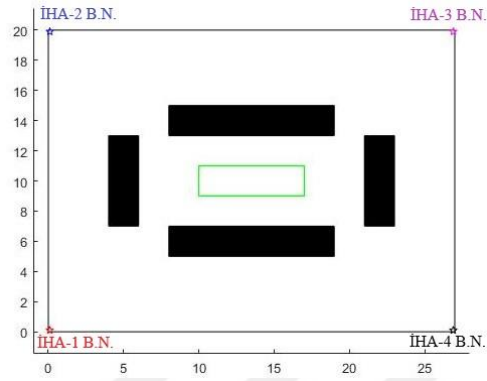
Bu deneyde HTRA ve OYH algoritmaları ile birden fazla İHA’nın farklı başlangıç konumlarından başlayarak ortak bir hedef bölgede toplanması için, her İHA’ya özgü oluşturulacak yolların, planlama çalışmalarına yer verilmiştir.



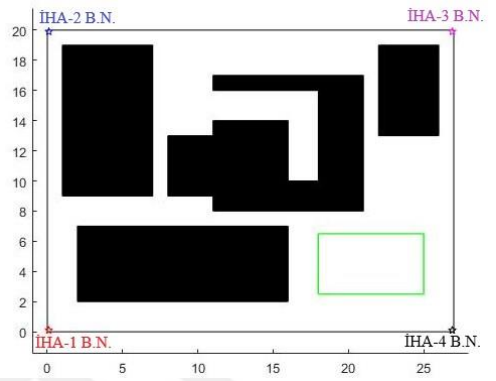
a-) Harita -1



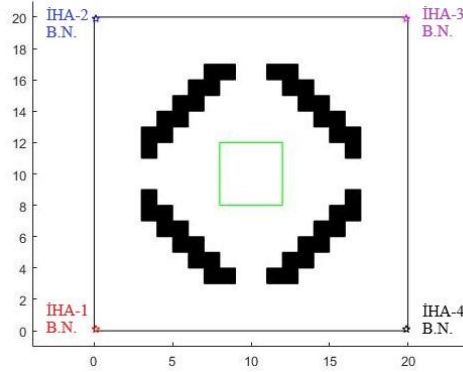
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 3.16 HTRA ve OYH ile toplanma için başlangıç ve hedef noktası gösterimi

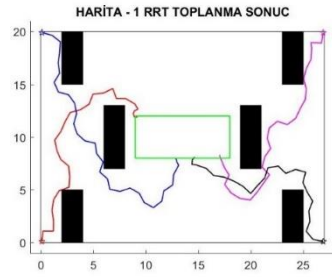
4 adet İHA'nın harita üzerindeki başlangıç konumları ve hedef bölgesi Şekil 3.16'da yer alan haritalarda gösterilmiştir. Haritalardaki yeşil sınırlarla çizili dikdörtgen geometrideki bölge, toplanılması istenen bölgeyi temsil etmektedir. Kırmızı, mavi, mor ve siyah renkteki yıldızlar ('*') sırasıyla İHA-1, İHA-2, İHA-3 ve İHA-4'ün başlangıç konumlarını simgelemektedir. Harita 1, harita 2, harita 3 ve harita 4 üzerinde başlangıç konumları sırasıyla İHA-1 için (0.1,0.1), İHA-2 için (0.1,19.9), İHA-3 için (26.9,19.9)

ve İHA-4 için (26.9,0.1) noktalarıdır. Simetrik olan harita 5’de ise İHA-1 için (0.1,0.1), İHA-2 için (0.1,19.9), İHA-3 için (19.9,19.9) ve İHA-4 için (19.9,0.1) noktaları başlangıç konumu olarak belirlenmiştir. Hedef konumları harita 1 ve harita 2 için (9,8), (9,12), (18,12) ve (18,8) noktaları arasında kalan dikdörtgen alan olarak belirlenmiştir. Harita 3’deki hedef bölge köşe noktaları (10,9), (10,11), (17,11) ve (17,9)’dir. Harita 4’de hedef bölge diğer haritalara göre merkezden uzak ve köşe noktaları (18,2.5), (18,6.5), (25,6.5) ve (25,2.5) olarak belirlenmiştir. Simetrik haritanın hedef bölgesi kare geometride belirlenmiş olup, (8,8), (8,12), (12,12) ve (12,8) noktaları arasında kalan yüzey olarak belirlenmiştir. Toplanma çalışması kapsamındaki akışta, öncelikle İHA - 1’in hedef bölge yolu planlamasının ardından sırasıyla İHA-2, İHA-3 ve İHA-4’ün toplanma yolları planlanmaktadır. Bu planlamalar esnasında, rastgele üretilen noktaların bağlantı noktası olabilmesi için haritanın içerisinde yer alması, engel üzerinde olmaması, bir önceki ve sonraki bağlantı noktasıyla arasında çizilen doğru engelle kesişmemesi gerekmektedir. Ayrıca noktanın, varsa önceki İHA veya İHA’ların yol planlarındaki (örneğin İHA-3 için İHA-1 ve İHA-2 için planlanan yollar) bağlantı noktalarıyla arasında en az ϵ (epsilon) kadar Öklid cinsinden mesafe olması gerekmektedir. ϵ ‘dan daha yakın mesafede bir bağlantı noktası rastgele olarak belirlenmişse bu nokta başarısız kabul edilip, yeni nokta oluşturulmaktadır. Deney esnasında HTRA algoritmasında kullanılan parametre değerleri: Maksimum adım büyüklüğü 1, maksimum komşu nokta uzaklığı 10, epsilon (ϵ) 0.5 ve toplam iterasyon sayısı 1000 olarak belirlenmiştir. OYH algoritmasında ise maksimum adım büyüklüğü 1, haritalarda oluşturulan nokta (node) sayısı 15000 ve epsilon (ϵ) 0.5 parametre değerleri kullanılmıştır. HTRA ve OYH algoritmalarıyla yapılan toplanma deneyi sonucu, 5 haritada planlanan toplanma güzergahlarının bağlantı nokta değerleri, güzergahların haritalardaki görselleri kaydedilip deney neticelendirilmiştir.

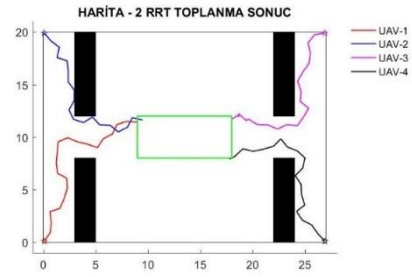
3.2.7 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile toplanma CAO

Bu kısımda, Bölüm 3.2.6’da HTRA ile planlanan toplanma güzergahlarının, BSGA-II ve ATÇAEA algoritmaları kullanılarak belirlenen amaçlar fonksiyonları doğrultusunda çok amaçlı optimize edilmesi anlatılmıştır. Buradaki CAO çalışması kapsamında,

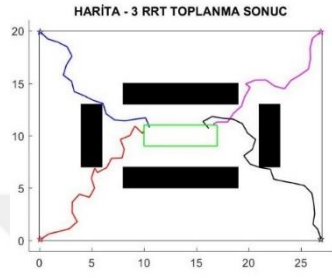
toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğünün minimize edilmesi amacıyla 1 numaralı deney, toplam harcanan enerji ve her bir İHA'nın en büyük manevrasının toplamı olmak üzere 2 farklı deney planlanmış olup, kullanılan amaç fonksiyonları ile ilgili detaylı bilgi 3.1.6'da verilmiştir. 1 numaralı deney tüm deney haritalarında yapılırken, 2 numaralı deney sadece 1 numaralı deney haritası üzerinde yapılmıştır. CAO çalışması yapılacak güzergah planları, her bir haritadaki 30 HTRA sonucu arasından seçilmiş ve Şekil 3.17 ve Şekil 3.18'de paylaşılmıştır. Haritaların üzerindeki kırmızı, mavi, mor ve siyah renkli çizgiler, HTRA sonucu sırasıyla İHA-1, İHA-2, İHA-3 ve İHA-4 için planlanan toplanma güzergahlarını belirtmektedir. Tüm HTRA sonuçları arasından yapılan seçimlerde toplam manevra büyüklüğü, yol uzunluğu ve yolların kesişme nokta sayısı daha büyük olan sonuçlar tercih edilmiştir. Böylece, CAO sonuçlarının daha kolay anlaşılabilmesi amaçlanmıştır. 1 numaralı deneyde kullanılan BSGA-II' de popülasyon büyüklüğü 50, karar değişkenleri limit değeri yarı çapı 3, mutasyon dağılım indeksi 20, çaprazlama dağılım indeksi 20 ve oluşturulacak jenerasyon sayısı 5000 olarak belirlenmiştir. ATÇAEA'da ise popülasyon büyüklüğü 50, karar değişkenleri sınır değeri yarı çapı 3, gamma (γ) 0.8, ceza parametresi (θ) 5 ve toplam jenerasyon sayısı 4000 olarak parametre değerleri uygulanmıştır.



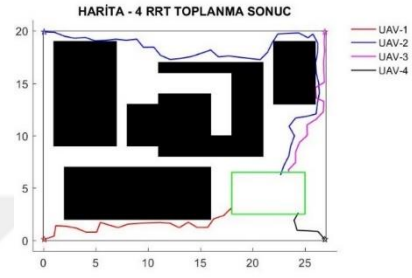
a-) Harita -1



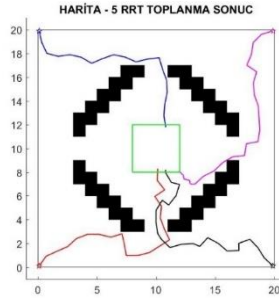
b-) Harita -2



c-) Harita -3



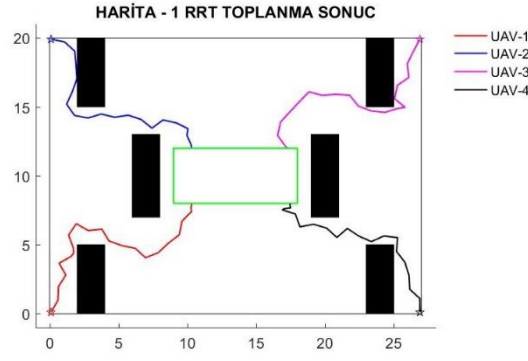
d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 3.17 1 numaralı CAO yapılan HTRA toplanma güzergahı sonuçları

2 numaralı deneyde ise, BSGA-II'nin popülasyon büyüklüğü 50, karar değişkenleri limit değer yarı çapı 3, mutasyon dağılım indeksi 20, çaprazlama dağılım indeksi 20 ve oluşturulacak jenerasyon sayısı 5000 olarak belirlenmiştir. ATÇAEA'da ise popülasyon büyüklüğü 50, karar değişkenleri sınır değer yarı çapı 3, gamma (γ) 0.8, ceza parametresi (θ) 5 ve toplam jenerasyon sayısı 4000 olarak parametre değerleri uygulanmıştır.



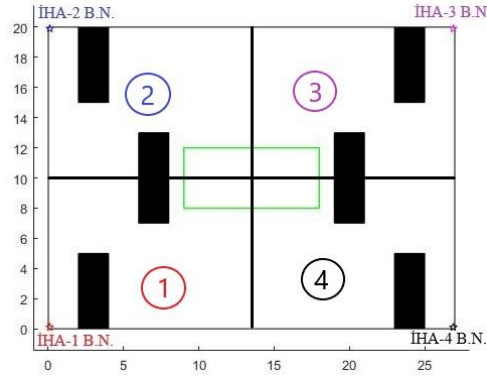
Harita -1

Şekil 3.18 2 numaralı ÇAO yapılan HTRA toplanma güzergahı

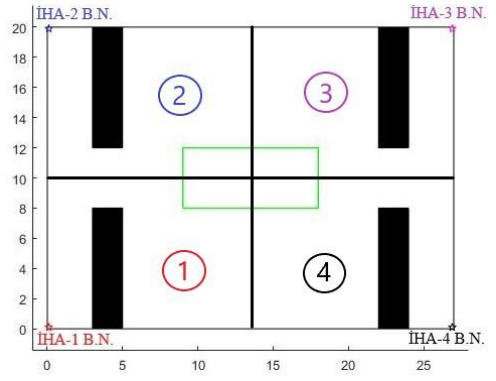
Her iki algoritmada, türetilen her yeni jenerasyonun geçerli bir aday olabilmesi için, yeni jenerasyondaki bağlantı noktalarının engel üzerinde olmaması, bağlantı noktalarını bağlayan doğrunun engelle kesişmemesi ve her bir bağlantı noktasının HTRA sonucundaki ilgili noktasından en fazla 3 birim uzaklıkta olması kriterlerine bakılmıştır. Seçilen parametre değerlerinden popülasyon, jenerasyon ve gamma büyüklüğü ile optimizasyon süresi doğru orantılıdır. Yapılan denemeler sonucu, kullanılan donanımına uygun sürelerde sonuçlanabilecek ve optimizasyondan en fazla faydalanabilecek şekilde değerler belirlenmiştir. ATÇAEA algoritmasında, mutasyon ve çaprazlama varyasyon sınırları olarak $[0.8, 1.6]$ kullanılmıştır. BSGA-II algoritmasında ise bu değerler $[0, 1]$ aralığı olarak belirlenmiştir. ÇAO sonuç değerleri, yolların deney haritasındaki görselleri, amaç fonksiyon değerleri kayıt altına alınıp, ÇAO çalışması ve deney çalışmaları sonlandırılmıştır.

3.2.8 Hızla Tarayan Rastgele Ağaç ve Olasılıksal Yol Haritası ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma planlaması

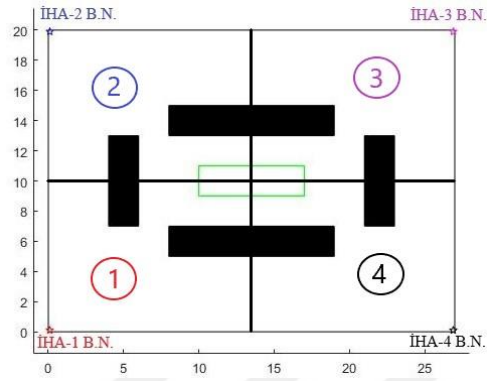
Bu deneyde HTRA ve OYH algoritmaları ile birden fazla İHA'nın farklı başlangıç konumlarından başlayarak ortak bir hedef bölgede toplanması için, her İHA'ya özgü oluşturulacak yolların belirlenmiş bölge ve harita sınırlarda olması şartı ile, planlama çalışmalarına yer verilmiştir.



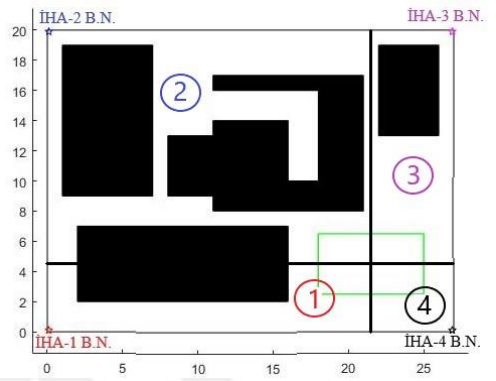
a-) Harita -1



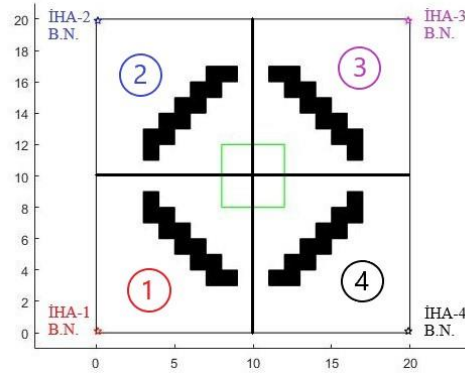
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

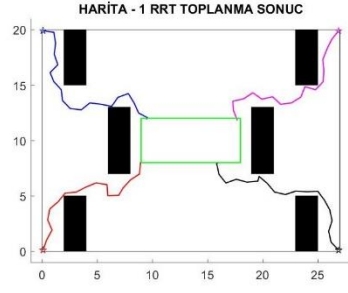
Şekil 3.19 HTRA ve OYH ile toplanma için başlangıç, hedef noktası ve sınır bölgelerinin gösterimi

4 adet İHA'nın harita üzerindeki başlangıç konumları, hedef bölgesi ve her bir İHA yolunun yer alacağı bölge sınırları Şekil 3.19'da gösterilmiştir. Bölüm 3.2.6'daki deneyde yer alan tüm parametre ve deney adımları aynı şekilde kullanılmakla beraber bu deney düzeneğine özgü güzergahların yer alacağı bölge sınırları kullanılmaktadır. Bölgeler, haritalarda yer alan hedef bölgesinin orta noktasından geçen ve harita

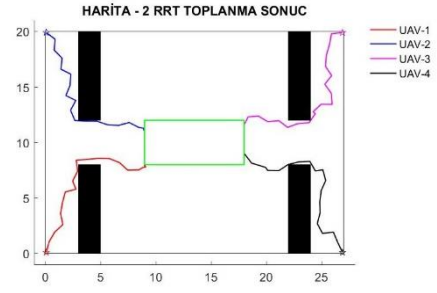
sınırlarına kadar uzanan doğrulardan oluşmaktadır. İHA-1'in toplanma güzergahının yer alacağı bölge 1, İHA-2'nin toplanma güzergahının yer alacağı bölge 2, İHA-3'ün toplanma güzergahının yer alacağı bölge 3 ve İHA-4'ün toplanma güzergahının yer alacağı bölge 4 olmak üzere her bir harita 4 bölgeye ayrılıp şekil üzerinde gösterilmiştir. 5 haritada planlanan toplanma güzergahlarının bağlantı nokta değerleri, güzergahların haritalardaki görselleri kaydedilip deney sonlandırılmıştır.

3.2.9 Baskılanamayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Ayrılma Tabanlı Çok Amaçlı Evrimsel Algoritma ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma ÇAO

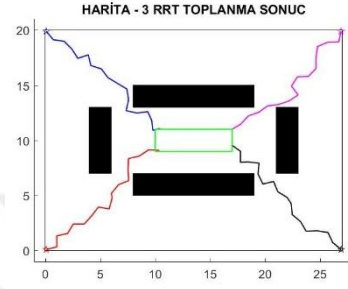
Bu kısımda, Bölüm 3.2.8'de HTRA ile sınırlandırılmış bölgelerde planlanan toplanma güzergahlarının, BSGA-II ve ATÇAEA algoritmaları kullanılarak belirlenen amaçlar fonksiyonları doğrultusunda çok amaçlı optimize edilmesi anlatılmıştır. Buradaki ÇAO çalışmasında, bölge sınırlandırması olmadan Bölüm 3.2.7'de toplam yol uzunluğu ve toplam manevra büyüklüğü amaç fonksiyonları kullanılarak yapılan 1 numaralı deney düzeneğindeki parametre, kurallar ve deney adımları aynı şekilde ve değerle kullanılmaktadır. Optimizasyon öncesi sınırlandırılmış bölgeler içerisinde toplanma güzergahlarının oluşturulması nedeniyle yollardaki kesişmeler engellenmektedir. Bu nedenle ÇAO esnasında maliyet fonksiyonlarına kesişmenin etkisi bulunmamaktadır. Bu deneyde kullanılmak üzere, sınırlandırılmış bölgelerde HTRA kullanılarak elde edilen güzergahlar Şekil 3.20 ÇAO yapılan sınırlandırılmış bölgedeki HTRA toplanma güzergahı sonuçları gösterilmektedir.



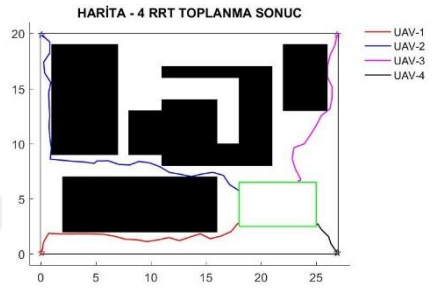
a-) Harita -1



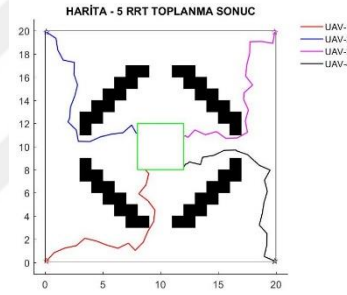
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 3.20 ÇAO yapılan sınırlandırılmış bölgedeki HTRA toplanma güzergahı sonuçları

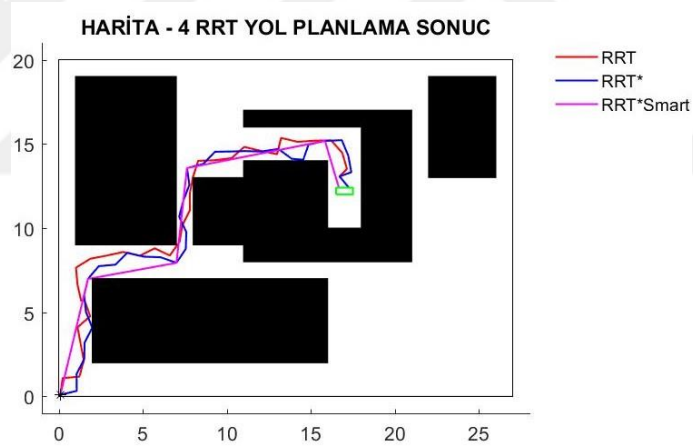
Deney, her bir simülasyon sonucu elde edilen pareto optimal çözümler ve amaç fonksiyon değerleri kayıt altına alınıp sonlandırılmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında yapılan tüm deneylerin sayısal ve görsel sonuçlarına yer verilmiştir. Daha sonra bu sonuçlar kullanılarak oluşturulan pareto optimal küme ve bu kümenin oluşturduğu PC bilgisi verilmiştir. Ardından, Hiper-hacim (hypervolume) ve boşluklama (spacing) metrikleri kullanılarak optimizasyon sonuçları analiz edilmiş ve analiz sonuçlarına göre karşılaştırmalı değerlendirmeler paylaşılmıştır.

4.1 Yol Planlama Sonuçları

Tez kapsamında yol planlama çalışmalarında HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı ve OYH algoritmaları kullanılmış olup, yapılan deney sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.1 HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı ile yol planlama sonucu

Şekil 4.1’de HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı algoritmalarıyla 2 boyutlu deney haritasında planlanan yolun görselleri paylaşılmıştır. Kullanılan 3 rastgele örnekleme tabanlı sezgisel algoritmaların sonucunda, HTRA*-Akıllı ile planlanan yolun (mor renkli yol) diğer 2 algoritmanın yolundan daha kısa bir yol olduğu görülmektedir. Ayrıca, HTRA*-Akıllı algoritmasının yolu keskin manevralar barındırsa da yoldaki salınımların az olduğu, toplam yapılan manevra büyüklüğünün HTRA ve HTRA* algoritma sonuçlarına göre daha küçük değerde olduğu görülmektedir. HTRA (kırmızı

renkli yol) ve HTRA*(mavi renkli yol)'ın benzer yollar izlediği, bu yüzden yol uzunluğu ve manevra maliyetlerinin de yakın olduğu görülmektedir.

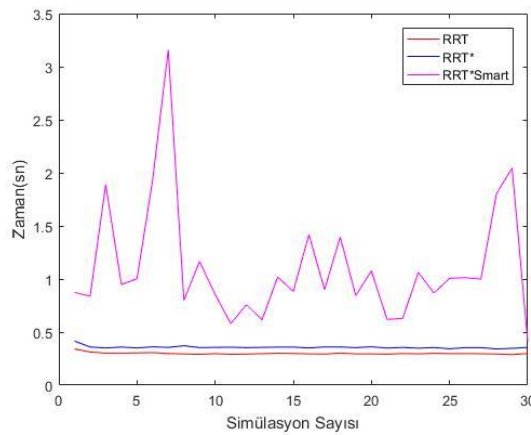
Her 3 algoritmada da bulunan maksimum adım büyüklüğünün artması çözüm süresini kısaltmasına rağmen, bulunan yolun toplam yol ve manevra büyüklüğünü üstel olarak arttırdığı yapılan deneyler sonucu görülmüştür. Bu yüzden deney sürelerini kabul edilebilir sınırlarda tutacak maksimum adım büyüklüğü değeri belirlenmiştir. HTRA algoritmasında bulunan maksimum komşu arama uzaklığı değerinin, deney sonuçlarını doğrudan etkilemediği ancak rastgele seçilmesi sonucu oluşan yeni noktaların çok uzak komşulara bağlanmasını önlemek amacıyla makul bir değer belirlenmiştir. İterasyon sayısının artmasının, toplam yol ve manevra büyüklüğünü azalttığı ama bir süre sonra bu etkinin oldukça azaldığı gözlenmiştir. Diğer açıdan iterasyon sayısı ile çözüm süresini arasında doğru orantı olduğu görülmüştür. Bu nedenle 3 algoritmada da ortak olacak optimum bir değer seçilmiştir.

HTRA* algoritmasında yer alan γ değerinin artması toplam yol uzunluğunu azaltmaktadır (Noreen, 2016). Diğer taraftan, değerin artması çözüm süresini de arttırmaktadır. Bu yüzden, yapılan deneyler sonucu uygun bir değer seçilmiş ve aynı değer HTRA*Akıllı için de kullanılmıştır. HTRA*Akıllı algoritmasında yer alan eğilim oranı değeri akıllı örneklemenin sıklığını değiştirmektedir. Eğilim oranı olarak Noreen'de (2016) belirlenen değer kullanılmıştır. Akıllı örnekleme yarıçapı değerinin değişimi, çözüm üzerinde γ değerine benzer etki göstermektedir.

Çizelge 4.1 HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı yol planlama sonuç karşılaştırması

Yöntem	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
HTRA	32.24	72.20	39.96	10.00	38.01	1070	2962.7	1892.7	437.05	1520.1
HTRA*	31.27	70.74	39.47	15.08	45.39	963.65	3288.1	2324.5	574.05	1738
HTRA*-Akıllı	27.64	56.98	29.34	12.98	38.74	266.65	523.47	256.81	62.83	337.17

Çizelge 4.1’de bu 3 algoritmanın 30 döngü tekrarından elde edilen karşılaştırma analizi sonuçları, görsel sonuçları desteklemektedir. Çizelgeye göre HTRA*-Akıllı algoritmasının toplam yol maliyeti dağılımının HTRA ve HTRA*’a göre daha az sapmaya sahip olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, HTRA algoritmasının ortalama yol maliyeti HTRA*Akıllı ile benzer büyüklüktedir. Bu da HTRA algoritmasının çoğu simülasyonda kestirme yollar planladığını ve ancak, çok fazla doğrultu değiştirdiğini toplam manevranın arttığını göstermektedir.

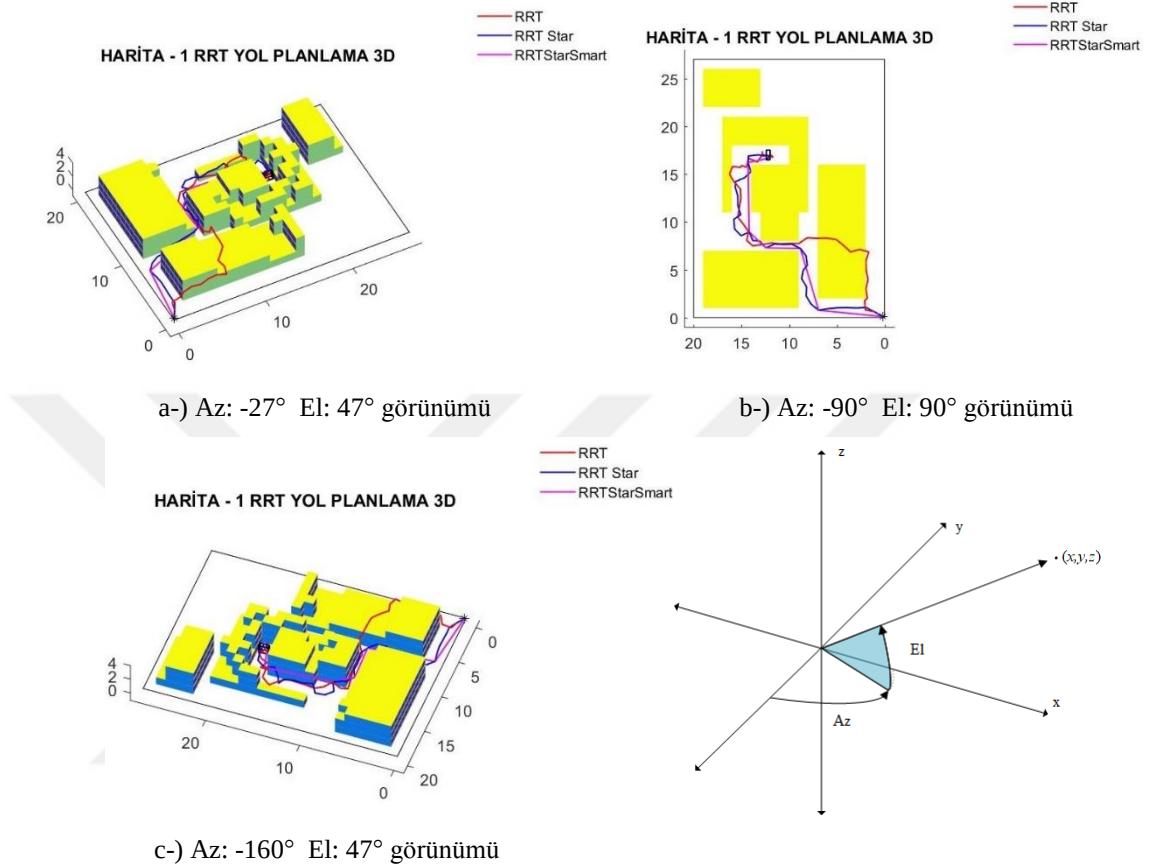


Şekil 4.2 HTRA, HTRA*, HTRA*-Akıllı yol planlama zaman karşılaştırması

Algoritmaların çözüm üretirken ihtiyaç duydukları işlem gücü ya da zaman, algoritmaların etkinliğini belirleyen diğer bir parametredir. Şekil 4.2’de 3 algoritmanın aynı çözüm uzayında çözüm ararken harcadıkları zaman gösterilmiştir. HTRA’nin en kısa sürede çözüm üretebildiği görülürken, HTRA*Akıllı’nın daha fazla zamanda planlama yapabildiği ve sürenin oldukça değişken olduğu görülmektedir.

Tez kapsamında, HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı ile yapılan bir diğer benzetim analizi, 3 boyutlu konfigürasyondaki çözüm uzayında yapılan yol planlama çalışmasıdır. Şekil 4.3’de 3 boyutlu harita üzerinde yapılan benzetimin 3 farklı perspektiften kaydedilen sonuçları paylaşılmıştır. Sonuçlara değerlendirildiğinde, 3 algoritmanın da yüksek boyutlu çözüm uzayında çözüm üretebileceği anlaşılmaktadır. Görsellere göz önünde bulundurularak algoritmaların karşılaştırılması yapıldığında, 2 boyutlu deney sonuçlarına benzer sonuç elde edildiği görülmektedir. HTRA*Akıllı, en

düşük yol ve manevra maliyetli yollar planlarken HTRA çözüme hızlı yakınsamasına rağmen verimli sonuçlar ortaya koyamamıştır.



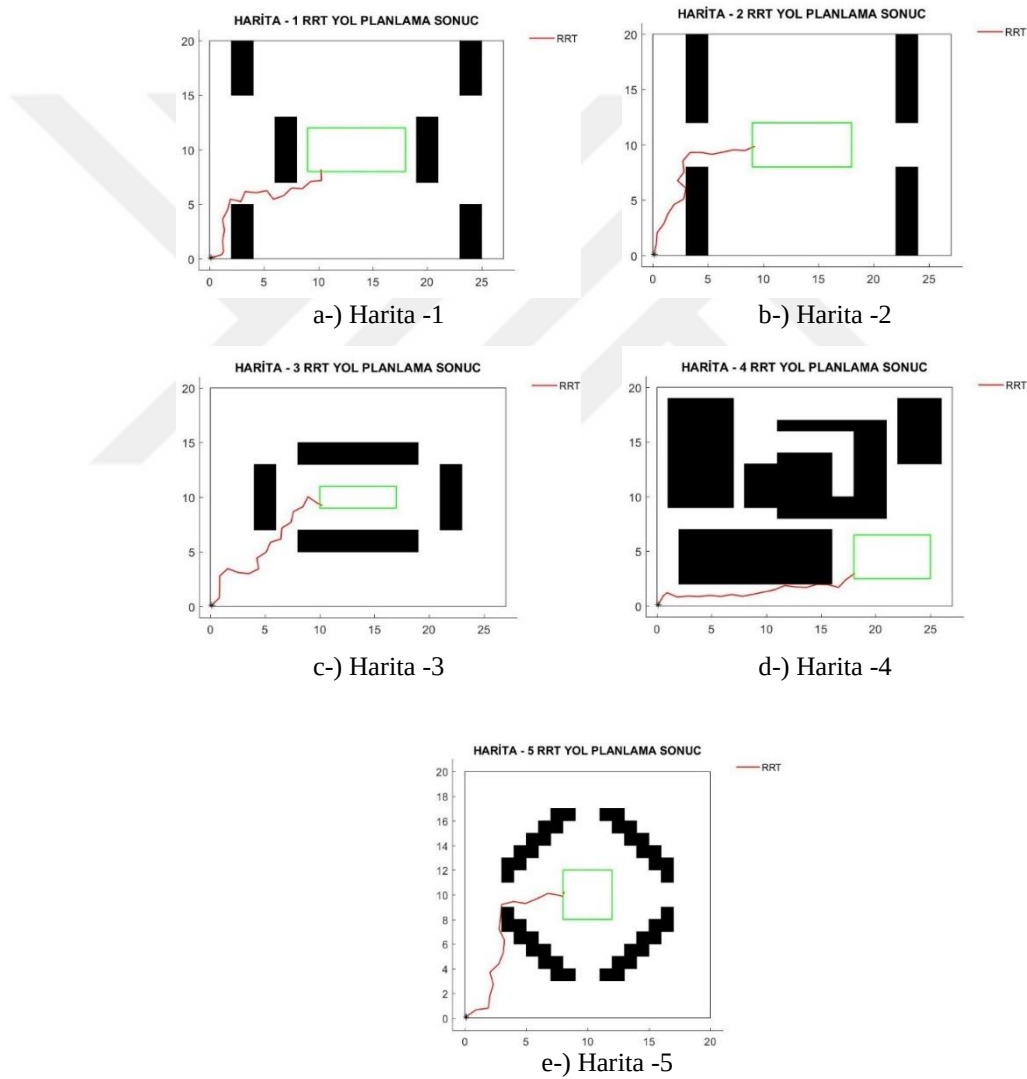
Şekil 4.3 HTRA, HTRA* ve HTRA*-Akıllı ile 3 boyutta yol planlama sonucu

Çizelge 4.2'deki karşılaştırma tablosu da 2 boyuttaki sonuçlara benzer sonuçlar elde edildiğini göstermektedir. 3 boyutlu deney sonuçlarındaki farklardan bir tanesi HTRA*Akıllı algoritmasının her iki maliyet açısından da standart sapması küçük daha kararlı sonuçlar elde etmesidir.

Çizelge 4.2 HTRA, HTRA* ve HTRA*Akıllı 3boyutta yol planlama karşılaştırması

Yöntem	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
HTRA	33.11	65.73	32.61	8.17	43.17	1903.5	4044.6	2141.1	568.71	2669.5
HTRA*	35.23	59.65	24.42	7.51	45.89	1632.2	3853.2	2221	498.51	2616.1
HTRA*-Akıllı	27.51	46.90	19.38	6.50	36.17	288.90	548.09	259.19	76.88	356.18

Tez kapsamında HTRA algoritmasıyla İHA için 2 boyutlu 5 harita yapılan deney sonuçları Şekil 4.4’de verilmiştir. Görsel sonuçlar incelendiğinde, HTRA’nin farklı konfigürasyon ve zorluktaki haritalarda planladığı yolların başarılı şekilde hedef bölgelere erişebildiği görülmektedir. Ancak, özellikle harita 1, harita 2 ve harita 3’de planlanan hedefe varış rotasının çok fazla salınım yaparak manevraya ihtiyaç duyduğu ve optimal çözüme uzak olduğu anlaşılmaktadır. Göreceli olarak daha kolay bir hedef bölgesi barındıran harita 4’de ise optimal yola yakın bir çözüm elde ettiği, simetrik harita olan harita 5’de başlangıç bölgesinde sert manevralar yaptığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.4 HTRA ile 5 haritada yapılan yol planlama sonuçları

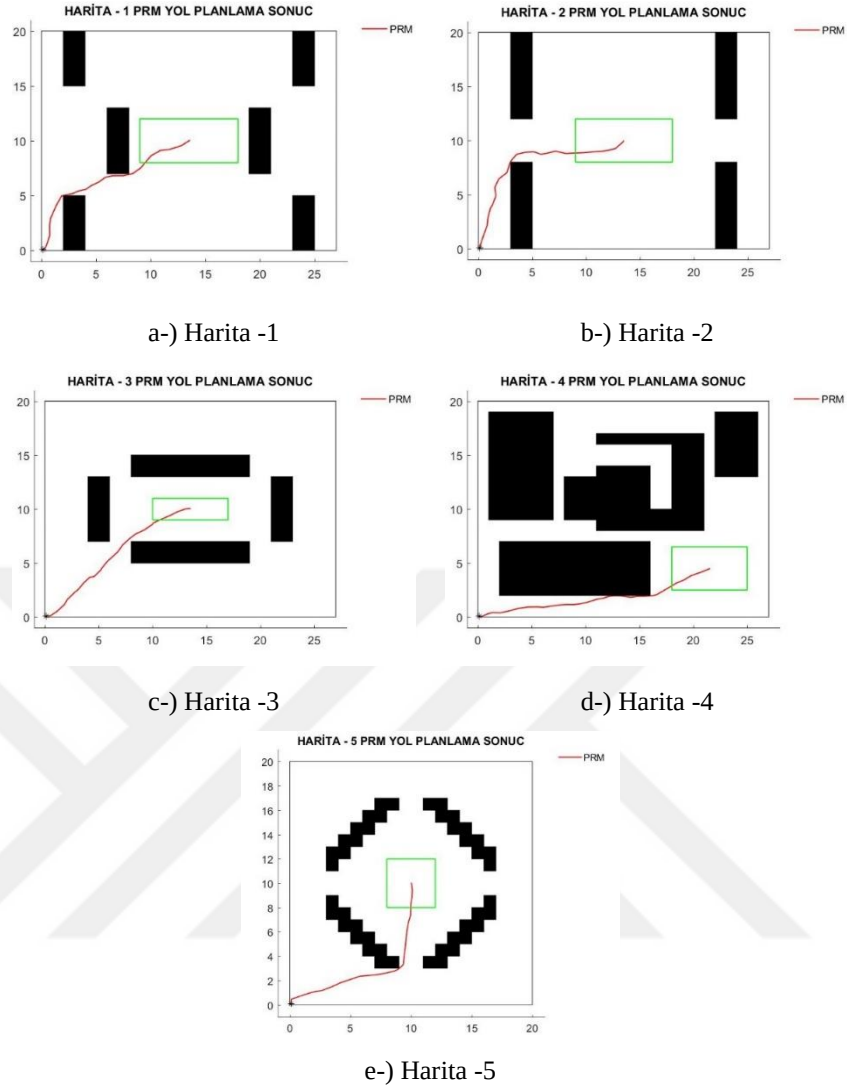
Çizelge 4.3’de HTRA sonuçlarının yol uzunluğu ve manevra cinsinden maliyet analizi verilmiştir. Yol maliyetine bakıldığında, standart sapmanın düşük olduğu, bunun da

HTRA algoritmasının istikrarlı şekilde rotasını engellere yakın kestirme güzergahlar üzerinde oluşturması yorumu yapılmaktadır. Manevra maliyetine bakıldığında ise hem çözüm aralıklarının büyüklüğü hem de standart sapmanın büyüklüğünün güzergâh üzerinde çok fazla doğrultu değiştirerek salınım yaptığı anlaşılmaktadır. Tablodaki genel sonuçlar görseldeki sonuçları desteklemektedir.

Çizelge 4.3 HTRA Yol planlaması maliyet tablosu

HTRA Yol planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	15.13	31.64	16.51	3.76	19.51	392	1199.10	807.12	217.82	776.34
2	17	23.87	6.87	1.74	19.24	453.63	1115.3	661.62	167.15	721.79
3	15	31.74	16.74	4.65	19.67	263.14	1429.9	1166.7	273.72	757.03
4	19	27.98	8.98	2.28	21.70	226.49	1368.3	1141.8	234.56	682.94
5	16.61	20.69	4.08	1.04	18.67	428.36	985.66	557.30	127.10	668.39

Tez kapsamında kullanılan 2. yol planlama algoritması olan OYH'e ait 5 deney haritasındaki sonuçlar Şekil 4.5'de gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında, OYH'in tüm haritalarda optimal çözüme yakın çözüm ürettiği görülmektedir. OYH algoritması çözüm uzayında inşa ettiği noktalar üzerinden yol planladığı için, hedef olarak bir bölge yerine HTRA algoritması ile yapılan deneylerdeki hedef bölgelerin orta noktaları belirlenmiştir.



Şekil 4.5 OYH ile 5 haritada yapılan yol planlama sonuçları

OYH algoritmasındaki nokta sayısı ile algoritmanın problemi çözüm başarımı doğru orantılıdır. Artan nokta sayısı, harita üzerindeki rastgele seçilen nokta sayısını arttırmakla beraber işlem gücü ve dolayısıyla çözüm süresini arttırmaktadır. Diğer taraftan, her haritanın karakteristiği birbirinden farklı olup, çözüm elde edebilmek için ihtiyaç duyulan nokta sayısı değişmektedir. Bu nedenle, OYH kullanılan deneylerde, nokta sayısını başlangıçta belirlemek güçleşmektedir. Bu problemi çözebilmek için minimum nokta sayısı parametresi oluşturulmuştur. Başlangıçta belirlenen bu değer algoritmanın her başarısız döngüsü sonucunda 1000 arttırılmıştır. Bu artış, algoritmanın çözüm elde edeceği döngü sonuna kadar devam ettirilmiştir. OYH algoritmasının 30 simülasyon sonucu elde edilen sonuçlara göre oluşturulan maliyet analiz tablosu

Çizelge 4.4’de verilmiştir. Tablodaki genel yol maliyetinde yer alan standart sapma ve maksimum-minimum aralığı görseldeki başarının istisnai olmadığı, algoritmanın tüm çözümlerinde kullandığı patikanın benzer olduğu anlaşılmaktadır. Manevradaki değişim ise algoritmanın doğası gereği yakın noktalar arasında manevra dikkate almadan kısa yola bakarak planlama yaptığını göstermektedir.

Çizelge 4.4 OYH Yol planlaması maliyet tablosu

OYH Yol planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	18.22	19.56	1.34	0.39	18.86	293.53	713.56	420.03	95.74	489.23
2	19.56	20.82	1.26	0.30	20.07	277.03	619.12	342.08	82.43	455.25
3	17.03	18.68	1.65	0.38	17.48	263.81	610.63	346.81	90.12	398.02
4	22.20	23.13	0.92	0.25	22.59	251.72	509.09	257.37	69.95	376.45
5	16.67	17.41	0.73	0.20	16.95	207.13	562.68	355.55	81.19	348.40

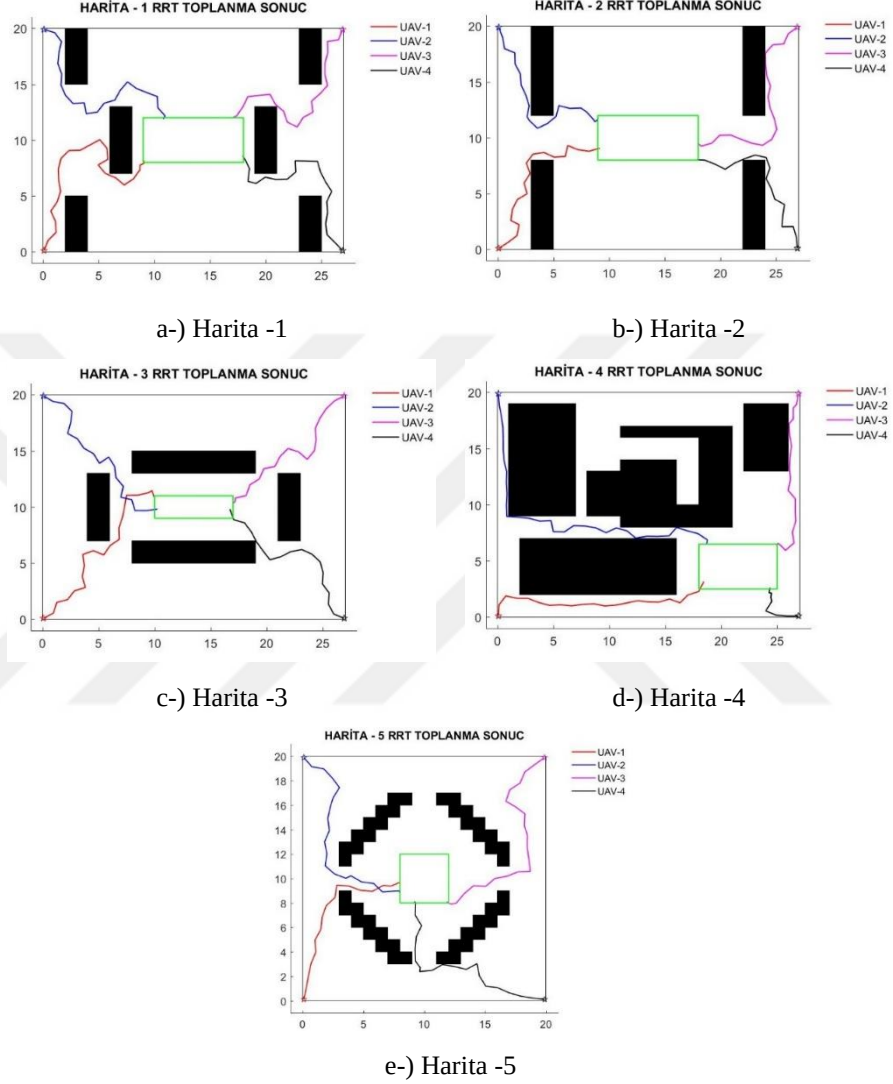
HTRA ve OYH algoritmalarının oluşturulan deney düzenekleri ve elde edilen sonuçlar üzerinden kıyaslamalı analizi yapıldığında, OYH’in çözümlerinin HTRA’ye göre 5 haritada da daha deterministik ve optimal çözüme yakın yol planlaması yapabildiği anlaşılmaktadır. Her iki algoritmanın kriteri olmamasına rağmen, manevra maliyetleri, OYH kullanılarak planlanan yollarda HTRA’ye göre küçüktür. Genel bir değerlendirme yapıldığında, OYH’in 2 boyutlu durağan engellerin bulunduğu konfigürasyonlu çalışmalarda daha etkin bir yöntem olduğu görülmektedir. OYH algoritmasına gösterilen hedef nokta hedef sınırlarının içinde kaldığı için, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4’de yer alan yol maliyet sütunundaki minimum ve maksimum değerleri sayısal büyüklük bakımından karşılaştırılamamaktadır.

4.2 Toplanma Sonuçları

Bu bölümde HTRA ve OYH algoritmalarıyla sınırlandırılmamış bölge kullanılarak ve kullanılmayarak yapılan toplanma planlaması deneylerine ilişkin sonuçlar verilmiş olup,

ardından iki algoritmanın aynı deney düzeneklerindeki performansları karşılaştırılarak analiz edilmiştir.

4.2.1 Sınırlandırılmamış güzergahta toplanma sonuçları



Şekil 4.6 HTRA ile yapılan toplanma sonuçları

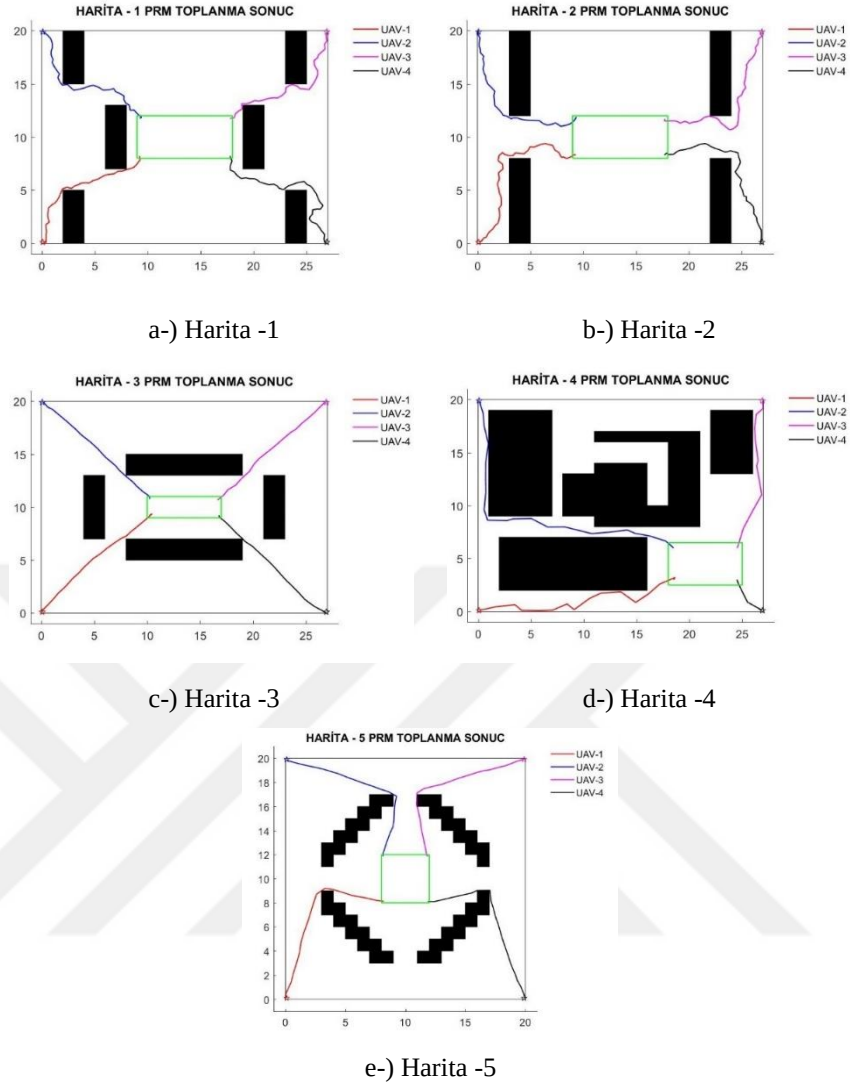
Şekil 4.6’da HTRA algoritmasıyla yapılan 4 farklı başlangıç noktasından hedef bölgeye benzetimi kapsayan yol planlama sonuçları verilmiştir. Toplanma sonuçları ile tek bir İHA için yapılan yol planlama sonuçları benzerlik göstermektedir. HTRA’nin her bir İHA için planladığı güzergahlarda algoritmanın yapısı gereği rastgele yönlendiği için çok fazla salınım yaptığı ve bu salınımlar gereği rotanın toplam manevra büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir. Algoritmadaki iterasyon sayısı, algoritmanın çözüm kabiliyeti

ve ihtiyaç duyulan planlama zamanı ile doğru orantılıdır. Yapılan deneyler sonucu çözüm oluşturabilecek minimum iterasyon sayısı tespit edilerek kullanılmıştır.

Çizelge 4.5 HTRA toplanma planlaması maliyet tablosu

HTRA Toplanma planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	67.96	103.34	35.38	6.42	81.29	2919.1	4255	1335.9	335.32	3317.1
2	71.58	85.05	13.47	3.009	75.58	2580	3584.1	1004.1	251.30	2970.6
3	64.79	126.43	61.64	12.79	76.98	2309.4	5285.4	2976.1	631.68	3129.9
4	70.21	100.08	29.87	6.03	78.68	1933.2	3718.7	1785.6	418.33	2590.6
5	67.11	89.31	22.21	4.15	76.68	1702.6	3869.6	2167.1	475.99	3058.1

Çizelge 4.5’de yer alan HTRA toplanma maliyetleri incelendiğinde, harita 1’deki engellerin İHA rotalarını, farklı engel aralıklarından belirlemesi için baskıladığı ve toplam manevranın arttığı gözlenmektedir. Bu durumun tam tersi ise harita 2 sonuçlarında yer almaktadır. Harita 2’de İHA’lar aynı oluk içerisinde geçebildiği için minimum yol uzunluğunda az manevra yaparak hedef bölgeye gidebilmektedir. Çizelgenin harita 3’de yer alan manevra maliyeti büyüklüğü diğer haritalara göre oldukça yüksek olmuştur. Bu durumun nedeni olarak harita 3’de yer alan hedef bölgenin diğer haritalara göre küçük olması, engellerin hedef bölgeyi sarması bu bölgede toplanacak İHA rotalarının birbirleriyle kesişmemeleri amacıyla oluşturulan rotalar üzerinde baskı oluşturması görülmektedir. Bu nedenle güzergahlarda çok fazla dönüş oluşmaktadır. Toplanma planlaması sırasıyla İHA-1, İHA’2, İHA3 ve İHA’4’ün yol planlaması olacak şekilde yapılmaktadır. Bu nedenle önce planlanan yolların maliyet kriterine göre başarılı olması, çözümün başarısını doğrudan etkilemektedir. Bu durum da HTRA toplanma planlamalarında çözümün değişkenliğini arttırmakta, dolayısıyla standart sapmaların değerlerinin yüksek çıkmasına katkı sağlamaktadır.



Şekil 4.7 OYH ile yapılan toplanma sonuçları

Şekil 4.7’de OYH algoritmasıyla yapılan toplanma planlaması görsel sonuçlardan bir tanesi paylaşılmıştır. Haritalar üzerindeki sonuçlara bakıldığında OYH ile farklı konfigürasyonlardaki ortamlarda çözüm üretilebileceği görülmektedir.

Çizelge 4.6’da OYH ile 30 bağımsız benzetimde 5 farklı haritada elde edilen sonuçların maliyet analizine yer verilmiştir.

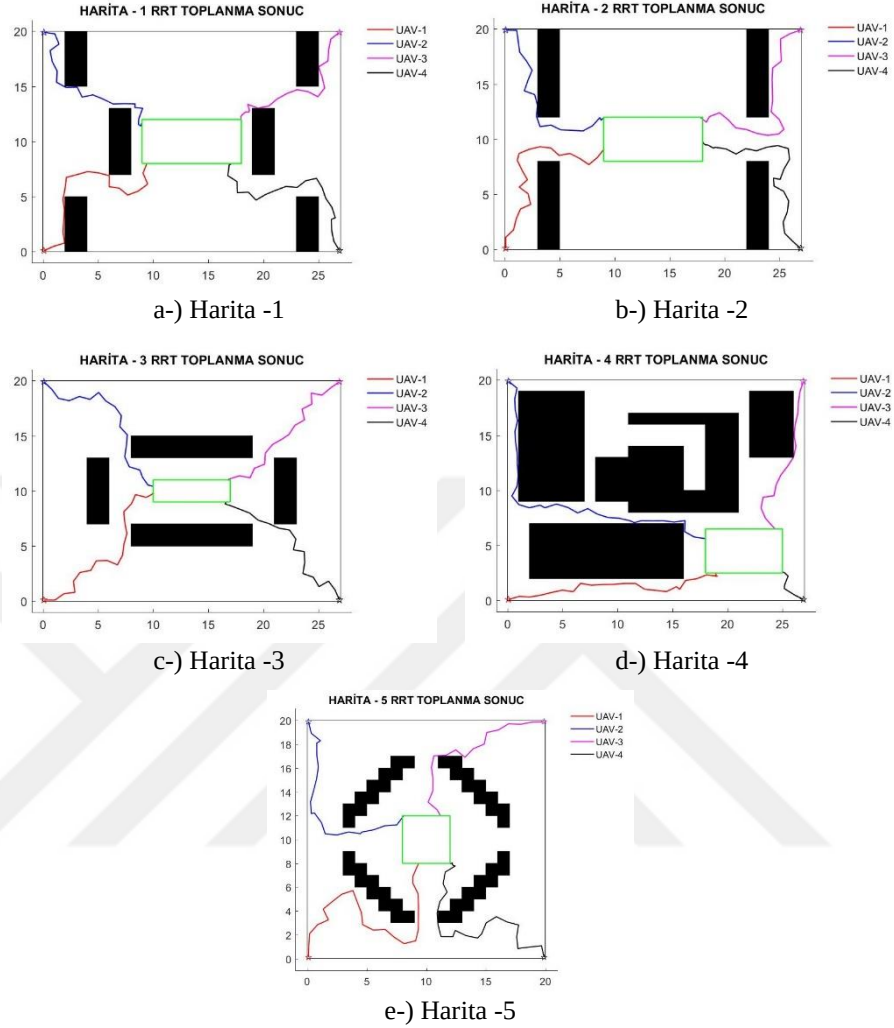
Çizelge 4.6 OYH ile elde edilen toplanma planlaması maliyet tablosu

OYH Toplanma planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	63.10	84.31	21.21	5.22	71.32	4186.5	7094.3	2907.8	754.32	5383.8
2	66.04	76.35	10.30	2.33	71.16	4085.1	6130.5	2045.4	477.95	5082.3
3	54.74	58.48	3.74	1.04	56.68	812.28	1292.7	480.42	135.52	1035.2
4	69.43	87.39	17.95	4.35	77.90	1190.3	2133	942.66	278.31	1595.3
5	59.60	62.14	2.54	0.61	60.69	900.68	1573.5	672.86	148.76	1191.2

Çizelge sonuçlarına bakıldığında, yol maliyetlerinin her bağımsız döngü sonucu ortalamadan sapma miktarının düşük olduğu ancak ihtiyaç duyulan manevraların oldukça fazla olduğu görülmektedir. Bu durumun nedeni olarak OYH algoritmasının yerel planlayıcısının noktaları bağlarken tek kriter olarak, iki nokta arası mesafenin minimize edilmesini belirlemesi görülmektedir. Diğer taraftan, OYH ile mesafe uzun olan daha düşük manevra açısı ile bağlanabilecek yollar tercih edilmemektedir. Bu durum yolların yakın güzergahlardan oluştuğu harita 1 ve harita 2 için çok fazla bağlantı noktası oluşturulmasına ve dolayısıyla manevra maliyetinin artmasına yol açmaktadır. Haritaların daha yoğun şekilde taranarak nokta kümesi eleman sayısının arttırılmasının, OYH sonucu oluşan yol planlarındaki manevra maliyetlerini de düşüreceği öngörülmektedir.

HTRA ve OYH algoritmalarında kullanılan maksimum adım büyüklüğü ile epsilon arasında bir bağıntı mevcuttur. Maksimum adım büyüklüğünün epsilon'dan küçük olması halinde planlanan yolların birbiriyle kesişmediği ancak algoritmanın toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğü açısından performansını oldukça düşürdüğü, dar veya beraber geçilmesi gereken yolların bulunduğu harita-2, harita-4 ve harita-5'de çoğu denemede çözüm üretilemediği gözlenmiştir. Bu nedenle, maksimum adım büyüklüğü ve epsilon değerleri, deney süresi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir.

4.2.2 Sınırlandırılmış güzergahta toplanma sonuçları



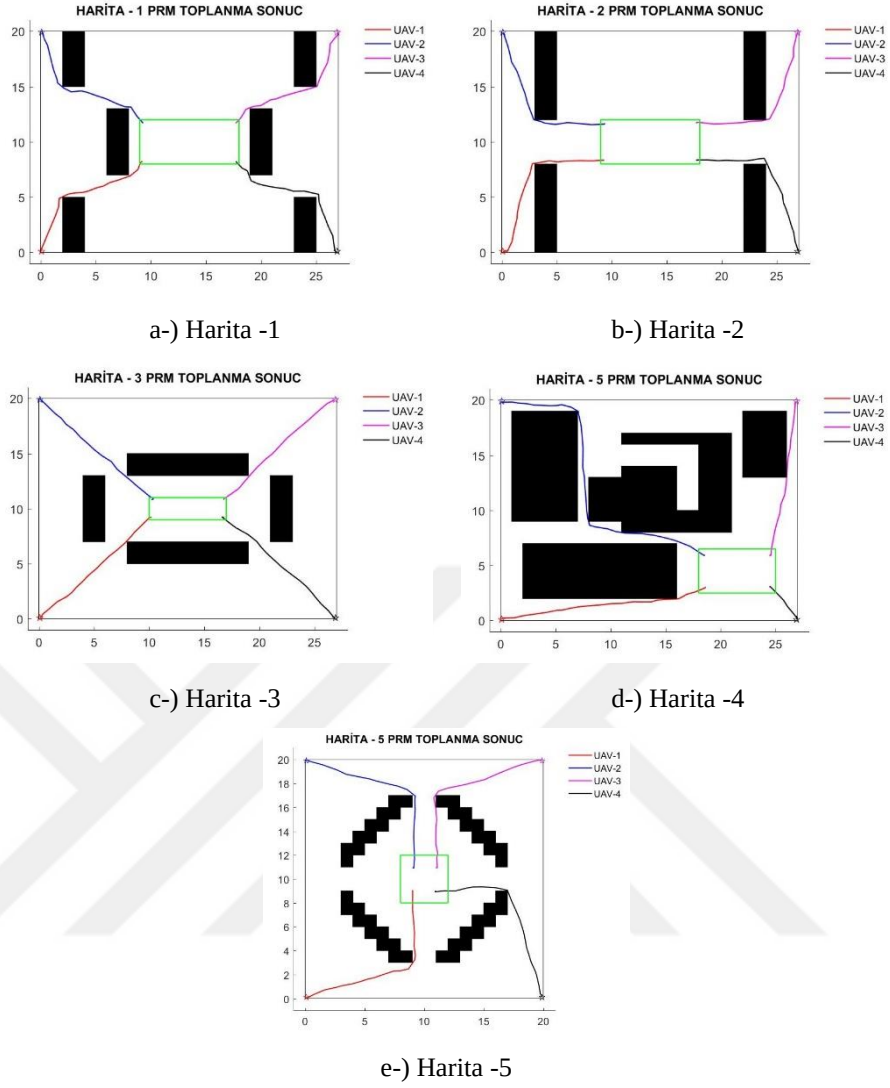
Şekil 4.8 HTRA ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları

Şekil 4.8 HTRA ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları HTRA algoritmasıyla güzergahta bölgesel sınırlandırma kullanılarak 4 farklı başlangıç noktasından hedef bölgeye benzetimi kapsayan yol planlama sonuçları verilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde, sınırlandırılmış güzergahtan elde edilen toplanma sonuçları, bölgesel kısıt kullanılmayan toplanma planlamalarına göre daha kısa yol üzerinden daha az manevra ile planlamaların sonuçlandığı görülmektedir. HTRA'nin daha küçük bir alanda arama yaptığı için aynı iterasyon sayısında daha iyi çözümler üretmesi gerektiği değerlendirilmektedir. Diğer taraftan, algoritmanın yapısı gereği rastgele yönlendiği için çok fazla salınım yaptığı ve bu salınımlar gereği rotanın toplam manevra büyüklüğünün arttığı gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.7 HTRA ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma planlaması maliyet tablosu

HTRA Sınırlandırılmış Toplanma planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	67.23	78.67	11.44	2.81	72.55	2056.4	3821.5	1765.2	352.79	2927.6
2	69.10	83.62	14.55	3.02	76.37	2679.5	3969.1	1289.5	411.38	3045.3
3	65.4	75.82	10.42	2.4	69.7	2756.2	3724.7	1068.5	282.51	3185.1
4	69.26	76.04	6.78	1.84	72.37	1910.6	3002	1091.4	318.11	2417.8
5	69.63	82.93	13.30	2.99	75.37	2546.1	3933.3	1387.2	352.08	3362.5

Çizelge 4.7’de yer alan HTRA toplanma maliyetleri incelendiğinde, bölge kısıtlarının uygulanmadığı deneye göre, güzergahın dar bir alanda aranması sonucu yol uzunluklarının kısaldığı görülmektedir. Diğer taraftan, kullanılan HTRA algoritmasının sezgisel olarak türetilen noktalar üzerinden ağaç yapısını genişletmesiyle güzergahlar ortaya çıkarılmaktadır. Bu durumda noktaların yayılımını genişletirken manevra maliyetlerini de arttırmaktadır. Toplanma planlaması sırasıyla İHA-1, İHA’2, İHA3 ve İHA’4’ün yol planlaması olacak şekilde yapılmaktadır. Ancak bölgesel sınırlandırma yapıldığı için önce planlanan yolların maliyet kriterine göre başarılı olması, çözümün başarısını etkilememektedir.



Şekil 4.9 OYH ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları

Şekil 4.9 OYH ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma sonuçları OYH algoritmasıyla kısıtlanmış bölgelerde yapılan toplanma planlaması görsel sonuçlardan bir tanesi paylaşılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde OYH algoritmasının farklı koşul ve zorluktaki engellerle dolu ortamlarda, birden fazla İHA'nın sınırlandırılmamış güzergahlarda olduğu gibi yol uzunluğu ve manevra ölçütleri dikkate alındığında etkili çözüm üretebildiği görülmektedir.

Çizelge 4.8'de OYH ile 30 bağımsız benzetimde 5 farklı haritada elde edilen sonuçların maliyet analizine yer verilmiştir.

Çizelge 4.8 OYH ile elde edilen sınırlandırılmış toplanma planlaması maliyet tablosu

OYH Sınırlandırılmış Toplanma planlaması										
Harita No	Yol Maliyeti					Manevra Maliyeti				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	54.12	57.85	13.73	0.98	56	1151.8	1818.1	666.30	185.24	1441.2
2	59.36	62.38	3.02	0.82	61.05	1173.7	1714.6	540.95	152.34	1391
3	54.69	58.4	3.82	1.04	56.34	744.58	1359.8	615.21	113.58	1066.9
4	65.97	69.46	3.48	0.98	67.56	930.7	1465.8	535.06	137.08	1182.8
5	60.82	63.48	2.65	0.80	62.07	951.66	1570.5	618.82	175.19	1193.2

Çizelge sonuçlarına bakıldığında, üretilen toplam nokta sayısının aynı olması ve aramanın bölgesel kısıt kullanılarak tüm haritaya göre daha küçük bir alanda yapılması nedeniyle sınırlandırılmamış deneylere göre maliyetler azalarak daha etkin güzergahlar oluşturduğu gözlemlenmektedir. Standart sapma değerlerinin küçüklüğü algoritmanın bağımsız denemelerin hepsinde deterministik sonuçlar elde ettiği değerlendirilmektedir.

4.3 HTRA ve OYH Karşılaştırma Analizi

Tez kapsamında yapılan toplanma planlamalarında İHA-1 için planlanan yolun diğer İHA'lar için planlanan yola doğrudan etkisi olduğu önceki deney sonuçlarında bahsedilmektedir. Bu durum algoritmaların ilk planlanan yoldaki etkinliğinin önemini arttırmaktadır. HTRA algoritması, çözüm ağacının genişleme yapısı gereği iterasyona bağlı dallanmakta, dallanırken ağaca hali hazırda bağlı noktalarda herhangi bir yol kısaltması yapmadan rastgele üretilen noktayı en yakındaki noktaya bağlamaktadır. Bu durumda ağaca sonradan giren bir nokta önceki noktalar için daha kısa bir yol oluştursa dahi bu yol göz ardı edilmektedir. Böylece planlanan yol yerel minimuma yaklaşıp da genel bir minimizasyon mümkün olmamaktadır. Yukarıdaki sonuçlarda da görebileceğimiz gibi verimsiz dallanmaların diğer bir etkisi çok fazla doğrultu değişimine bağlı yüksek manevra ihtiyacı olarak görülmektedir. İlk haritada üretilen bir çözüm bu şartlar altına çok fazla dallanma ve manevra yaptığı için sonraki planlanacak yolları kesişimi engelleme adına daha geniş yollara ya da keskin manevralar yapmaya zorlamaktadır. Böylece oluşturulan yollar oldukça verimsiz (uzun yol ve yüksek

manevra ihtiyacı) olmaktadır. Bu yüzden oluşturulan bu yolların İHA'lar tarafından doğrudan kullanılabilir olması pek mümkün görülmemektedir. HTRA için ilk planlanan yolun dezavantaj yaratması, OYH algoritması açısından avantaj oluşturmaktadır. OYH çözüm uzayının taranması ve elde edilen noktalar üzerinden yol planlaması yapılması adımlarını ayırarak birbirinden bağımsız hale getirmiştir. Böylece, planlama sonrası yeterli çözüm elde edilemezse bir önceki aşamaya geçerek çözüm uzayı tarama yoğunluğunun arttırılması ve ardından tekrar yerel planlayıcı üzerinden yol planlaması yapılması algoritmanın etkinliğinin temel nedenlerinden birisi olarak görülmektedir. OYH algoritmasında çözüm uzayı tarandıktan sonra noktalar arası maliyetler belirlenmekte ve ardından bu maliyetlere göre yol planı yapılmaktadır. Böylece elde edilen yol, alınan yol maliyeti açısından verimli hale gelmektedir. Bu durum bölge kısıtlamaları kullanılan deneylerde de görülmektedir. Diğer taraftan, OYH tarama ve yol planlama fonksiyonlarını ayırıştırması nedeniyle, HTRA'ye göre daha fazla işlem gücü ve zamana ihtiyaç duymaktadır. Haritalara göre bu durumun 4 veya 5 kat zaman farkı oluşturduğu sonucu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.9'da HTRA ve OYH algoritmalarıyla sınırlandırılmamış haritalarda yapılan toplanma yolu planlaması deneylerinin sonuç başarımları karşılaştırılmıştır. Başarı oranı ilgili haritada yapılan 30 bağımsız döngü sonucunun kaç tanesinde planlanan yolların birbirleriyle kesişmediği olarak belirlenmiştir. Sonuçlar yüzde hesaplamasıyla verilmiştir.

Başarı oranlarını incelendiğinde, OYH algoritmasının 5 haritadaki deneylerde de birbirleriyle kesişimi olmayan yollar planladığı, HTRA algoritmasının ise harita 2 ve harita 5'de diğer haritalara göre daha başarısız olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ise harita 2 ve harita 5'de planlanacak yolların hedef bölgeye gidebilmek için aynı geçiş ağzlarını kullanmaları gerekmeleri ve bu durumun HTRA için yukarıda anlatılan nedenlerden dolayı, dezavantaj oluşturması olarak değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.9 HTRA ile OYH'nin deney sonuçlarına göre karşılaştırılması

Toplanma Başarı Oranı		
Harita No	HTRA (%)	OYH (%)
1	80	100
2	56,7	100
3	63,3	100
4	86,7	100
5	36,7	100

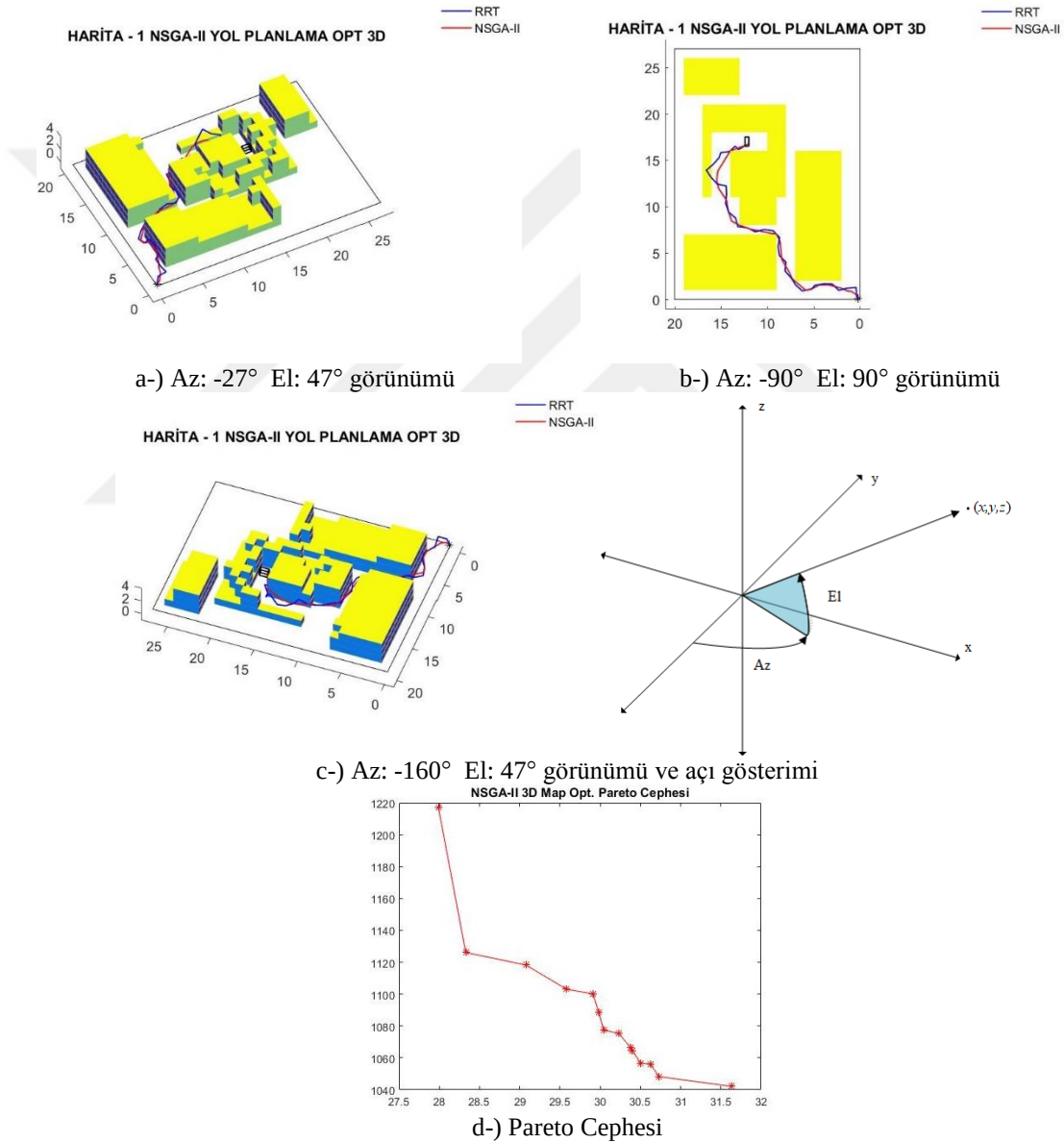
4.4 Yol Planlama Optimizasyonu Sonuçları

Tez kapsamında, 2 ve 3 boyutta çok amaçlı yol planlama optimizasyonu çalışmaları yürütülmüş olup, yürütülen çalışmalar doğrultusunda yapılan deneylerin sonuçları ve sonuçlardan hiper-hacim ve boşluklama CAO metrikleri kullanılarak elde edilen analiz sonuçlarına, yapılan değerlendirmeler ile bu bölümde yer verilmiştir. Ardından kullanılan CAO algoritmaları olan BSGA-II ve ATÇAEA, metrik sonuçlarına göre karşılaştırılmıştır.

BSGA-II ve ATÇAEA ile optimizasyon çalışmaları için seçilen parametre değerlerinden popülasyon ve jenerasyon büyüklüğü, optimizasyon süresi ile doğru orantılıdır. Yapılan testler sonucu kullanılan donanıma uygun sürelerde sonuçlanacak değerler seçilmiş olup, algoritmaların başarımını kıyaslayabilmek için eşit tutulmuştur.

ATÇAEA algoritmasında kullanılan Gamma (γ) sabiti, çaprazlamada yeni jenerasyon adayı dağılımını belirleyen sınır değerlerini simgelemektedir. Gamma değerinin artması, genetik operatör sonucu oluşan yeni bireylerin çeşitliliğini arttırmaktadır. Ancak, Gamma değerinin aşırı büyümesi de sonuçların çok daha geniş bir alanda aranması neticesinde optimizasyonun başarısını negatif etkilemektedir. Diğer taraftan, Gamma değerinin küçültülerek, karar değişkenlerinin daha yakın komşulardan seçilmesi, kriterlere uygun birey türetilmesini kolaylaştırırken, çeşitliliği azalttığı için sonuçların Pareto optimal çözüme yakınsamasını, yani optimizasyon etkinliğini de negatif etkilemektedir.

Şekil 4.8’de BSGA-II ÇAO algoritması ile 3 boyutta yapılan deneyin görsel sonuçları ve pareto cephesi paylaşılmıştır. Görsel sonuçlara bakıldığında HTRA algoritması sonucu planlanan yolda iyileştirmeler olduğu, ancak optimal çözüm elde edilemediği gözlenmektedir. Bir diğer sonuç olan PC grafiği ise elde edilen sonuçların amaç uzayındaki görünümünü göstermektedir. PC’ye bakıldığında çözüm kümesinin iç bükey yapıda olduğu ancak çözümlerin PC’ye belli bölgelerde eşit yayılmadığı, çözümler arası geniş boşluklar olduğu anlaşılmaktadır.

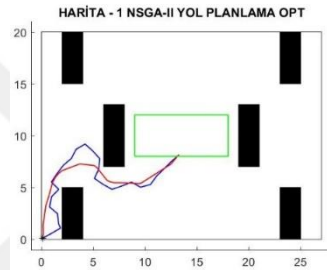


Şekil 4.10 3 boyutta BSGA-II ile yapılan deney sonuçları

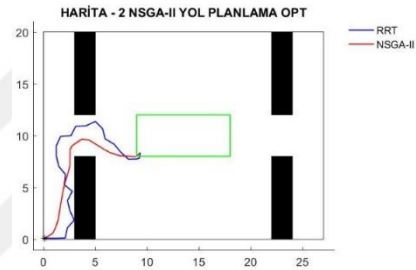
Çizelge 4.10’da deney sonuçlarının hiper-hacim ve boşluklama metrikleriyle analizine yer verilmiştir. Hiper-Hacim metriğinin referans noktası olarak, tüm sonuçlar incelendikten sonra en kötü pareto optimal çözümün yakınında bir nokta olan analitik düzlemdeki (toplam yol uzunluğu -x eksen, toplam manevra büyüklüğü -y eksen) (33,1400) noktası belirlenmiştir.

Çizelge 4.10 3 boyutta BSGA-II optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları

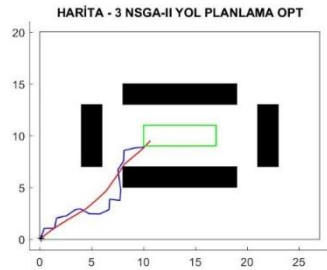
BSGA-II 3 Boyutlu yol planlama optimizasyonu										
Harita No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	989.1	2216.8	1227.7	378.11	1582,3	0.8	1.9	1.1	0.22	0,99



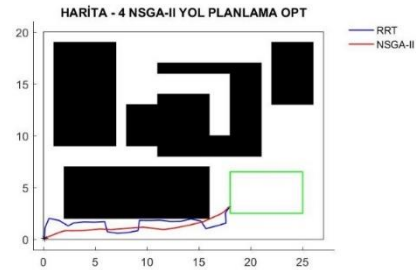
a-) Harita -1



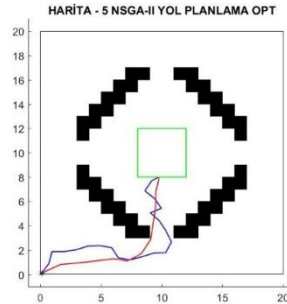
b-) Harita -2



c-) Harita -3



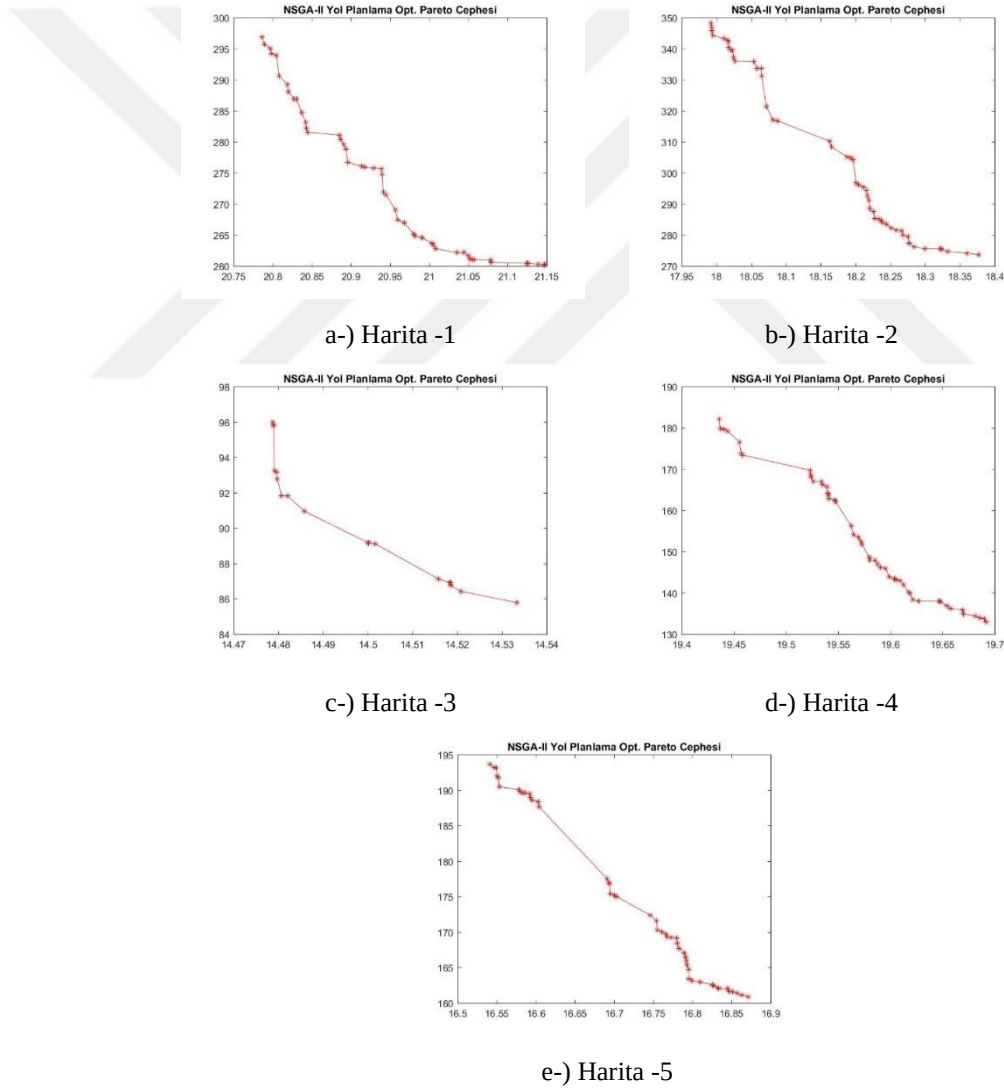
d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.11 BSGA-II ile yapılan yol planlama deney sonuçları

Şekil 4.11 BSGA-II ile yapılan yol planlama deney sonuçları İHA'nın başlangıç noktasından hedef noktasına ulaşması için HTRA algoritmasıyla elde edilen yolların, 1 numaralı deneyde BSGA-II ile iyileştirilmesiyle elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır. 5 farklı haritada yapılan çalışma sonucu, yollarındaki salınımların azaldığı ve daha kısa yollar oluşturulduğu gözlemlenmektedir. Harita 1 ve harita 2 üzerinde elde edilen sonuçlarda, yolların diğer haritalara göre kısıtlı miktarda kısaltıldığı anlaşılmaktadır. Bu durumun temel nedeni olarak, BSGA-II algoritmasındaki yeni birey seçim kriterlerinden, orijinal noktadan limit uzaklık parametresinin küçük olması olarak değerlendirilmektedir.



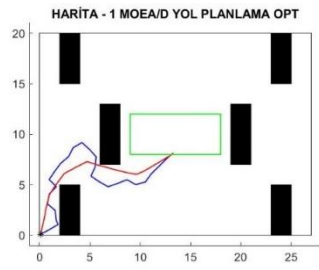
Şekil 4.12 BSGA-II ile yol optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

Bir adet İHA için 5 haritada 2 boyutlu planlanan yolların, BSGA-II algoritmasıyla optimizasyon sonucu elde edilen pareto optimal çözüm kümesinin, amaç uzayındaki gösterimi Şekil 4.12’de paylaşılmıştır. Şekilde yatay (x) eksen toplam yol uzunluğunu, dikey (y) eksen toplam manevra büyüklüğünü göstermektedir. Pareto optimal çözüm kümelerinde çözüm elemanları arası mesafelerin değişkenlik gösterdiği ancak, dağılımın PC boyunca devam ettiği gözlemlenmektedir.

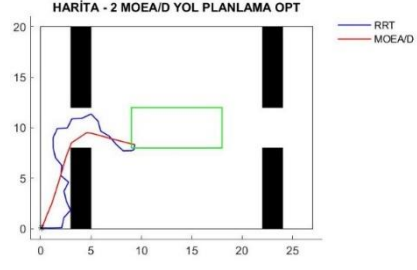
Çizelge 4.11 BSGA-II yol optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları

BSGA-II Yol planlama optimizasyonu										
Harita No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	859.50	2681.17	1822.2	582.84	1907	0.78	1.63	0.85	0.23	1.19
2	814.91	3518.1	2703.2	603.4	2674.8	0.81	1.64	0.83	0.18	1.20
3	351.33	1257.2	905.85	214.70	758.95	0.89	1.89	1	0.22	1.22
4	705.17	2036.9	1331.7	318.91	1355	0.76	1.81	1.02	0.23	1.20
5	424.66	1999.2	1574.6	387.48	1184	0.83	2	1.17	0.30	1.27

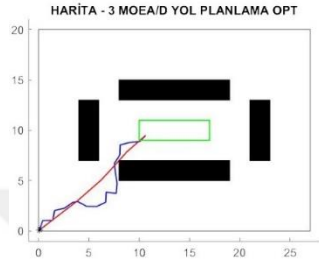
Çizelge 4.11’de BSGA-II ile yapılan optimizasyon çalışmasının HH ve boşluklama metrik değerleri ve bu değerlerin istatistiksel sonuçları verilmiştir. HH hesaplamalarında, harita 1 için referans noktası (25,800), harita 2 için referans noktası (25,700), harita 3 için referans noktası (18,400), harita 4 için referans noktası (23,600) ve harita 5 için referans noktası (20,450) olarak belirlenmiştir.



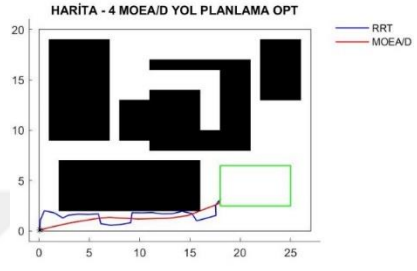
a-) Harita -1



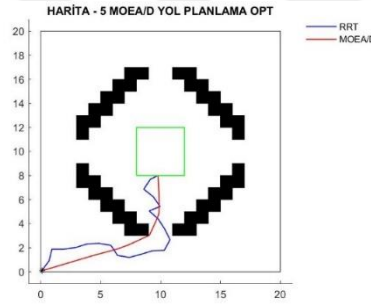
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4

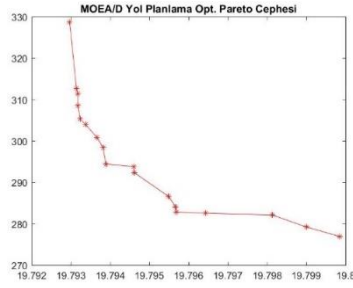


e-) Harita -5

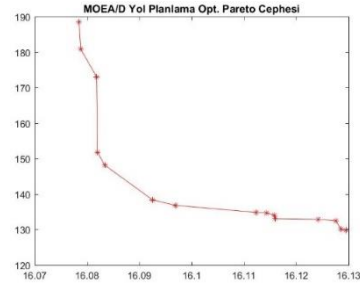
Şekil 4.13 ATÇAEA ile yapılan yol planlama deney sonuçları

Şekil 4.13’de HTRA algoritması ile planlanan yolun ATÇAEA ile optimize edilmesinin görsel sonuçları paylaşılmıştır. Her bir harita üzerinde planlanan yollarda oldukça fazla salınım ve keskin manevralar olmasına rağmen optimizasyon sonucunda yolların kısaldığı ve manevraların azaldığı gözlemlenmektedir. Ancak, harita 1 ve harita 2’deki optimizasyon sonuçlarında diğer haritalardan farklı olarak, nispeten iyileşmenin az olduğu görülmektedir. Bunun nedeni olarak deney esnasında belirlenen karar değişkenleri yarı çapının, yeni jenerasyon bireylerinin seçilmesini doğrudan etkilemesi ve küçük seçilen yarı çap değeri neticesinde, bağlantı noktalarından daha fazla uzaklaşamayan yeni bireylerin çözümde yer alması olarak değerlendirilmektedir. Harita 1 ve harita 2’de yer alan optimize edilecek yollardaki gibi oldukça verimsiz planlanan

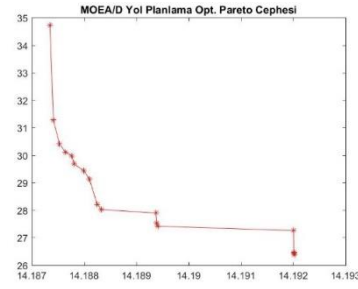
güzergahlarda, toplam jenerasyon sayısını arttırılmasının çözümü iyileştirmeye katkı sağlayacağı, ancak tek başına en iyi çözüme ulaşmakta yeterli olmadığı deneyler sonucunda gözlemlenmiştir. Daha iyi sonuçlar elde etmek için, jenerasyon sayısının, jenerasyonu çeşitlendirecek sınır değer yarı çapının ve her bir jenerasyonda yer alacak popülasyon sayısının arttırılması gerektiği değerlendirilmektedir.



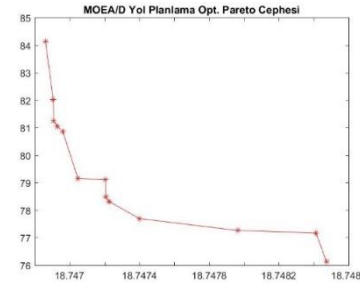
a-) Harita -1



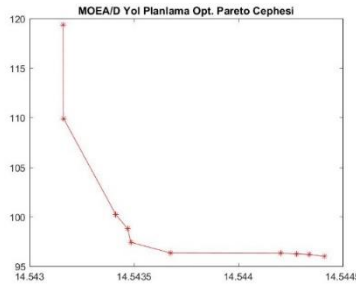
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.14 ATÇAEA ile yol optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

Şekil 4.14’de yapılan optimizasyon sonucu, baskılanamayan çözümlerden elde edilen amaç uzayındaki PC grafiği paylaşılmıştır. Her bir haritadaki pareto optimal çözümlere ait grafiklerdeki x eksenini toplam yol uzunluğunu, y eksenini ise toplam manevra büyüklüğünü temsil etmektedir. PC’ler incelendiğinde, çözüm kümesinin amaç

uzayında iç bükey geometride yayıldığı, ancak küme elemanları arasındaki mesafelerin eşit olmadığı, yayılımın değişkenlik gösterdiği gözlemlenmektedir.

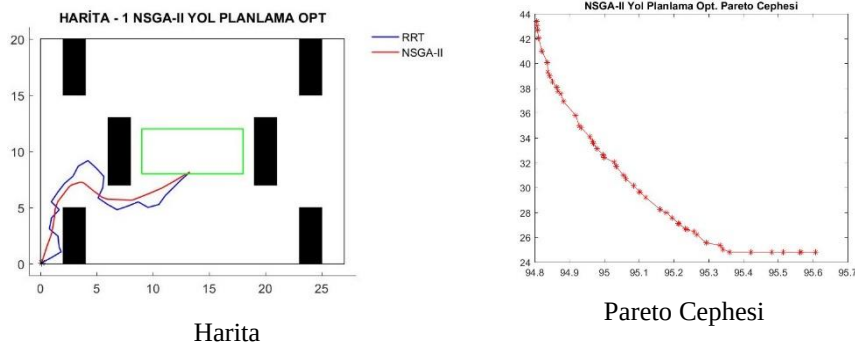
Çizelge 4.12 ATÇAEA yol optimizasyonu hiper hacim ve boşluklama sonuçları

ATÇAEA Yol planlama optimizasyonu										
Harita No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	2037.7	4580.5	2542.8	741.57	3245.8	1	1.89	0.89	0.19	1.51
2	2696.8	5555.1	2858.3	785.25	4111.3	0.95	1.81	0.85	0.20	1.48
3	458.29	1470	1011.7	215.58	1191.6	0.82	38	37.18	5.86	2.35
4	1255.7	2495.5	1239.9	381.72	1953.8	1	2	1	0.22	1.46
5	889.96	2038.5	1148.6	316.73	1661.9	0.90	2	1.10	0.24	1.48

S.S.: Standart Sapma

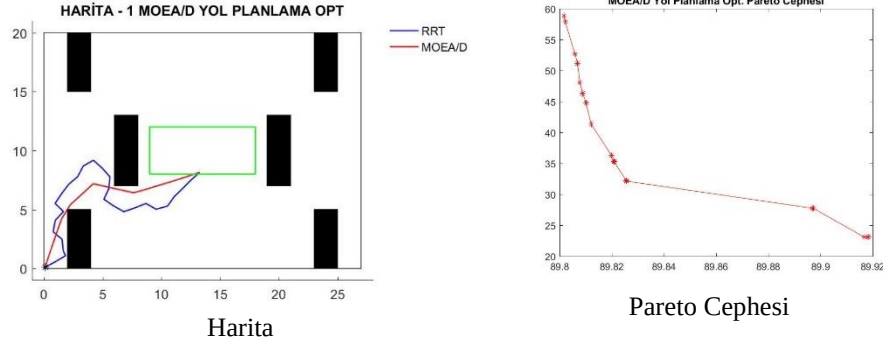
Çizelge 4.12’de verilen HH sonuçlarında, harita -1 için referans noktası (25,800), harita -2 için referans noktası (25,700), harita -3 için referans noktası (18,400), harita -4 için referans noktası (23,600) ve harita -5 için referans noktası (20,450) olarak belirlenmiştir.

Yol planlama ÇAO çalışması kapsamında minimum enerji ve minimum manevra (en büyük manevranın en aza indirilmesi) amaçlarına göre her iki ÇAO algoritması da kullanılarak deney (2 numaralı deney) gerçekleştirilmiştir. BSGA-II kullanılarak gerçekleştirilen 2 numaralı ÇAO sonucu ve Pareto optimal çözümlere ait PC grafiği Şekil 4.15’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.15 BSGA-II ile 2 numaralı yol planlama ÇAO

ATÇAEA kullanılarak gerçekleştirilen 2 numaralı ÇAO sonucu ve Pareto optimal çözümlere ait PC grafiği Şekil 4.16’da paylaşılmıştır.



Şekil 4.16 ATÇAEA ile 2 numaralı yol planlama ÇAO

Yol planlama amacıyla yapılan 2 numaralı ÇAO çalışmalarında her iki algoritmanın HH hesaplamalarında referans noktası olarak (180,180) belirlenmiştir. BSGA-II ve ATÇAEA’ya ait metrik sonuçları Çizelge 4.13’de verilmiştir.

Çizelge 4.13 BSGA-II ve ATÇAEA ile 2 numaralı ÇAO’nun HH ve boşluklama sonuçları

Alg. No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	10924	14432	3507.2	943.3	11919	0.53	1.72	1.19	0.25	0.82
2	6878.2	14687	7809.1	1693	12852	1.19	1.83	0.64	0.16	1.59

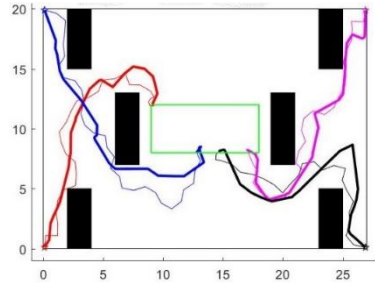
S.S.: Standart Sapma, Algoritma No – 1: BSGA-II, Algoritma No – 2: ATÇAEA

Metrik sonuçlarına göre 1 numaralı ÇAO deneylerinde de olduğu gibi, ATÇAEA sonuçlarının ideal pareto optimal sonuçlara daha çok yakınsadığı, ancak BSGA-II’nin PC’ye daha eşit dağıldığı değerlendirilmektedir.

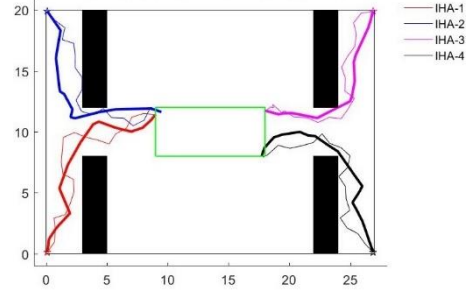
4.5 Toplanma optimizasyonu sonuçları

BSGA-II algoritmasında mutasyon dağılım indeksi ve çaprazlama dağılım indeksi değerinin artması, mutasyon sonucu ortaya çıkacak jenerasyon çeşitliliğini azaltmakta,

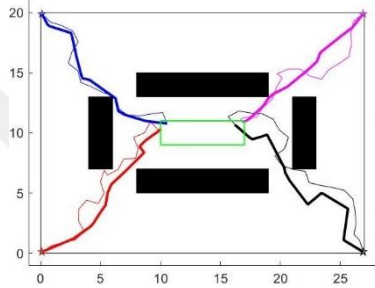
dolayısıyla optimizasyonu başarısını düşürmektedir. Diğer taraftan, mutasyon değerinin azalması da en iyi sonuca yakınsamasını engellemektedir.



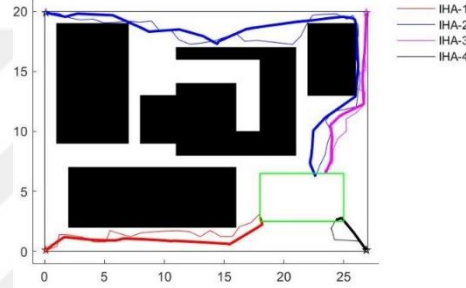
a-) Harita -1



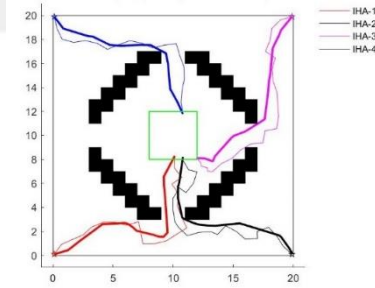
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4

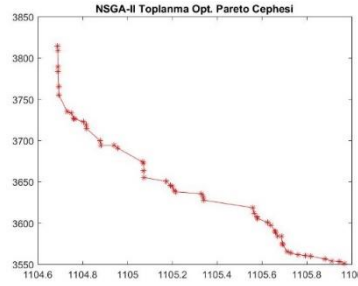


e-) Harita -5

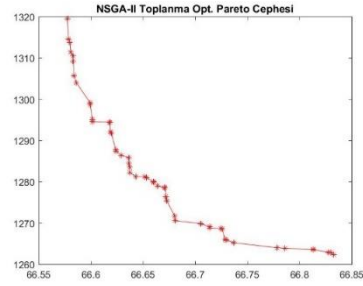
Şekil 4.17 BSGA-II ile yapılan 1 numaralı toplanma deney sonuçları

Şekil 4.17’de HTRA algoritması ile 4 adet İHA için planlanan toplanma yollarının, BSGA-II ile optimize edilmesinin görsel sonuçları paylaşılmıştır. Harita 1’de optimize edilecek toplanma güzergahında 2 adet kesişme olmasına rağmen BSGA-II algoritmasının optimizasyonu sonucu kesişme sayısının 1’e düşürüldüğü gözlemlenmektedir. Bölüm 3’deki deney açıklamasında anlatılan nedenlerden dolayı, karar değişken yarı çapının göreceli olarak küçük seçilmesi neticesinde, kesişmelerin sıfırlanması mümkün olamamaktadır. Diğer haritalardaki optimizasyon sonuçlarında

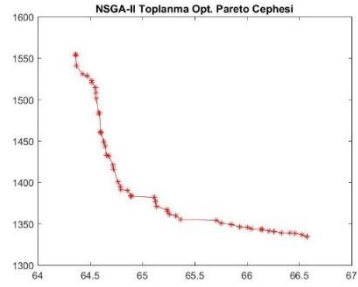
ise, planlanan toplanma güzergahlarındaki tüm kesişmelerin giderildiği ve İHA'ların güvenli şekilde hedef bölgede toplanabildiği görülmektedir. Diğer taraftan, toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğünün sınırlı miktarda azaltıldığı gözlemlenmektedir. Bu sonucun, belirlenen maliyet fonksiyonlarında kesişme sayısının ağırlığının, toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğünün en aza indirilmesine göre oldukça fazla olması neticesinde oluştuğu değerlendirilmektedir.



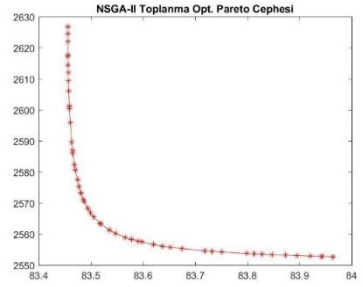
a-) Harita -1



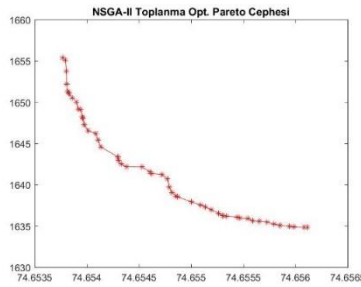
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.18 BSGA-II ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

Şekil 4.18'da yapılan optimizasyon sonucu, optimal çözümlerin amaç uzayındaki gösterimlerinden elde edilen PC grafikleri paylaşılmıştır. Her bir grafiğin x eksenini

Denklem 3.24’da verilen amaç fonksiyon değerini, y eksenine ise Denklem 3.25’de verilen amaç fonksiyon değerini temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde, her bir haritadaki çözüm kümesinin amaç uzayında iç bükey geometride yayıldığı gözlemlenmektedir. Harita 1, harita 2, harita 3 ve harita 4’deki çözüm kümesinin PC’ye yayılımında elemanlar arası boşlukların eşit olmadığı, ancak çözümler arası büyük mesafelerin yer almadığı görülmektedir. Harita 5’de ise PC yayılımının ideale yakın olduğu değerlendirilmektedir.

Çizelge 4.14 BSGA-II ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu HH ve boşluklama sonuçları

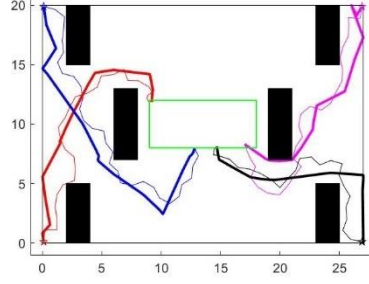
BSGA-II Toplanma optimizasyonu										
Harita No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	Standart Sapma	Ort.
1	1.71	13.67	11.97	4.29	4.89	0.67	1.35	0.68	0.21	1.01
2	0.98	3.14	2.94	1.07	1.94	0.60	1.36	0.76	0.22	0.97
3	0.36	4.58	4.22	1.34	3.18	0.76	1.59	0.83	0.28	1.01
4	0.06	17.1	17.04	5.40	8.47	0.56	1.64	1.09	0.23	1.10
5	0.24	9.76	9.52	3.07	6.29	0.67	1.59	0.92	0.24	1.05

Not: Çizelgedeki hiper-hacim değerleri 10^6 ile çarpılmalıdır.

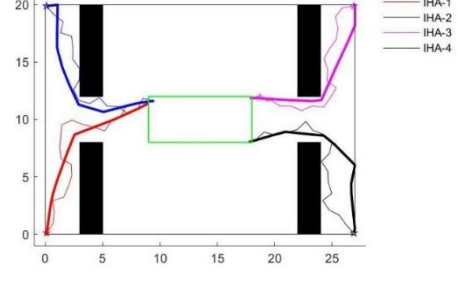
Çizelge 4.14’de verilen HH sonuçlarında, harita -1 için referans noktası (4000,8000), harita -2 için referans noktası (1400,3500), harita -3 için referans noktası (1500,4000), harita -4 için referans noktası (3500,6000) ve harita -5 için referans noktası (2500,5000) olarak belirlenmiştir.

ATÇAEA ile yapılan toplanma optimizasyonu çalışmalarında belirlenen Gamma parametresinin etkisinin, yol planlama çalışmalarındaki etkisine benzer şekilde, artışının çözüm çeşitliliğini arttırdığı ama pareto optimal çözüme (en iyi) yakınsamasını azalttığı, azalışının tersi etki yaptığı gözlemlenmiştir. Ceza parametresinin detaylı parametre analizi yapılmamıştır. Ancak, azalıp artışının, çözümleri pareto optimal çözümlerden uzaklaştırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.19’da ATÇAEA ile 4 İHA için, farklı başlangıç

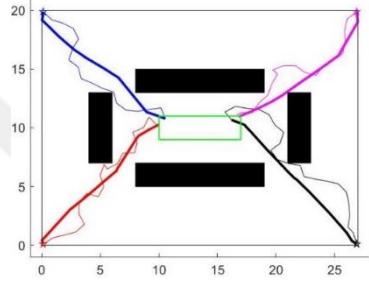
noktalarından hareket ederek hedef bölgede toplanması amacıyla yapılan optimizasyon çalışması sonuçları paylaşılmıştır.



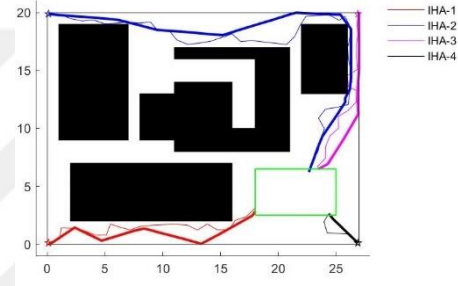
a-) Harita -1



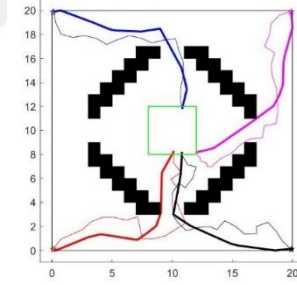
b-) Harita -2



c-) Harita -3



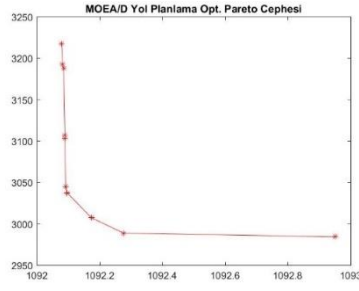
d-) Harita -4



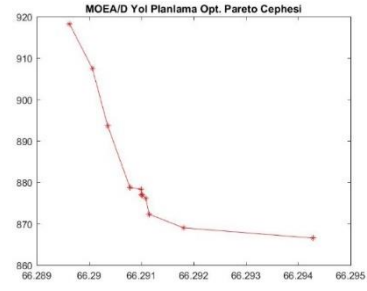
e-) Harita -5

Şekil 4.19 ATÇAEA ile 1 numaralı toplanma deneyi sonuçları

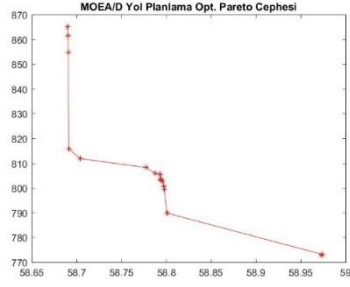
ATÇAEA ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde, İHA'lar için HTRA ile elde edilen toplanma güzergahlarındaki yol kesişmelerinin, harita 1 hariç tüm haritalarda ortadan kalktığı gözlemlenmektedir. Diğer taraftan, harita 1'deki kesişme sayısının da azaldığı anlaşılmaktadır. Deneyde manevra büyüklüğü ve yol uzunluğuna, kesişme miktarına göre düşük ağırlık verilmesine rağmen, yollarda iyileştirmeler olduğu görülmektedir.



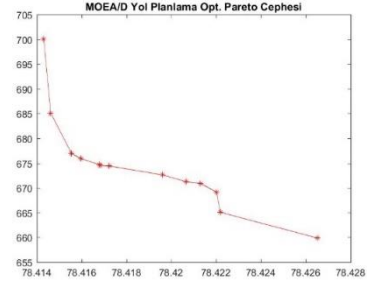
a-) Harita -1



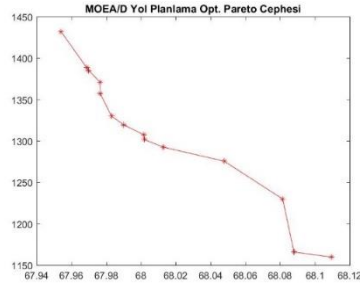
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.20 ATÇAEA ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

ATÇAEA ile elde edilen pareto optimal çözüme kümesine ait PC grafikleri Şekil 4.20'de paylaşılmıştır. PC grafiklerinin içbükey geometride olduğu ve çözümlerin PC'ye birçok noktada yayılarak kullanıcının farklı değerlendirmelere göre seçebileceği çözümler elde edildiği görülmektedir.

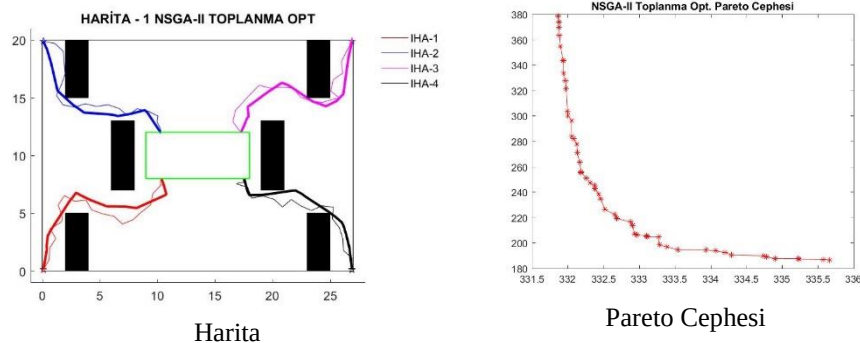
Çizelge 4.15 ATÇAEA ile 1 numaralı deney toplanma optimizasyonu HH ve boşluklama sonuçları

ATÇAEA Toplanma optimizasyonu										
Harita	Hiper Hacim					Boşluklama				
No	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	1.97	14.36	12.39	5.14	6.47	1.25	1.76	0.51	0.15	1.54
2	2.19	3.61	1.42	0.38	3.06	1.18	1.88	0.70	0.17	1.50
3	3.47	4.94	1.47	0.35	4.34	1.19	1.82	0.62	0.19	1.53
4	0.30	18.55	18.25	4.68	13.76	0.99	2	1.01	0.32	1.46
5	7.49	10.14	2.66	0.67	9.09	1.27	1.72	0.45	0.16	1.53

Not: Çizelgedeki hiper-hacim değerleri 10^6 ile çarpılmalıdır. S.S. : Standart Sapma

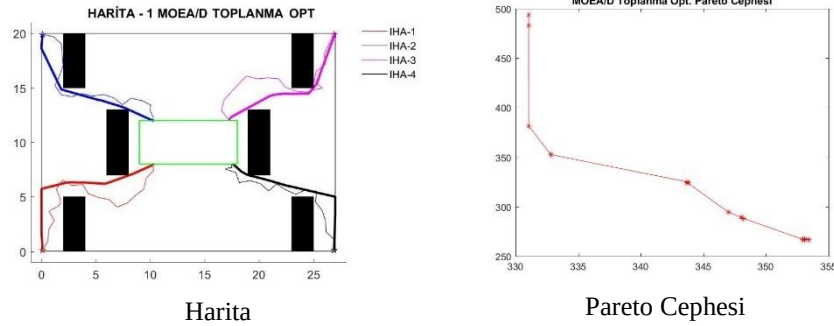
Çizelge 4.15’de verilen HH sonuçlarında, harita -1 için referans noktası (4000,8000), harita -2 için referans noktası (1400,3500), harita -3 için referans noktası (1500,4000), harita -4 için referans noktası (3500,6000) ve harita -5 için referans noktası (2500,5000) olarak belirlenmiştir.

Toplanma ÇAO çalışması kapsamında minimum enerji ve minimum manevra (en büyük manevranın en aza indirilmesi) amaç fonksiyonları ile her iki ÇAO algoritması da kullanılarak deney (2 numaralı deney) gerçekleştirilmiştir. BSGA-II kullanılarak gerçekleştirilen 2 numaralı deney sonuç görsellerinden bir tanesi ve Pareto optimal çözümlere ait PC grafiği Şekil 4.21’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.21 BSGA-II ile 2 numaralı toplanma planlama ÇAO

ATÇAEA kullanılarak gerçekleştirilen 2 numaralı ÇAO sonucu ve PC grafiği Şekil 4.22’de paylaşılmıştır.



Şekil 4.22 ATÇAEA ile 2 numaralı toplanma planlama ÇAO

Toplanma amacıyla yapılan 2 numaralı ÇAO çalışmalarında, her iki algoritmanın HH hesaplamalarında referans noktası olarak x eksenini harcayan toplam enerji ve y eksenini maksimum manevra büyüklüğü olmak üzere (520,600) noktası belirlenmiştir. BSGA-II ve ATÇAEA’nın 2 numaralı toplanma deneylerine ait metrik sonuçları Çizelge 4.16’da verilmiştir.

Çizelge 4.16 BSGA-II ve ATÇAEA ile 2 numaralı toplanma ÇAO deneyi HH ve boşluklama sonuçları

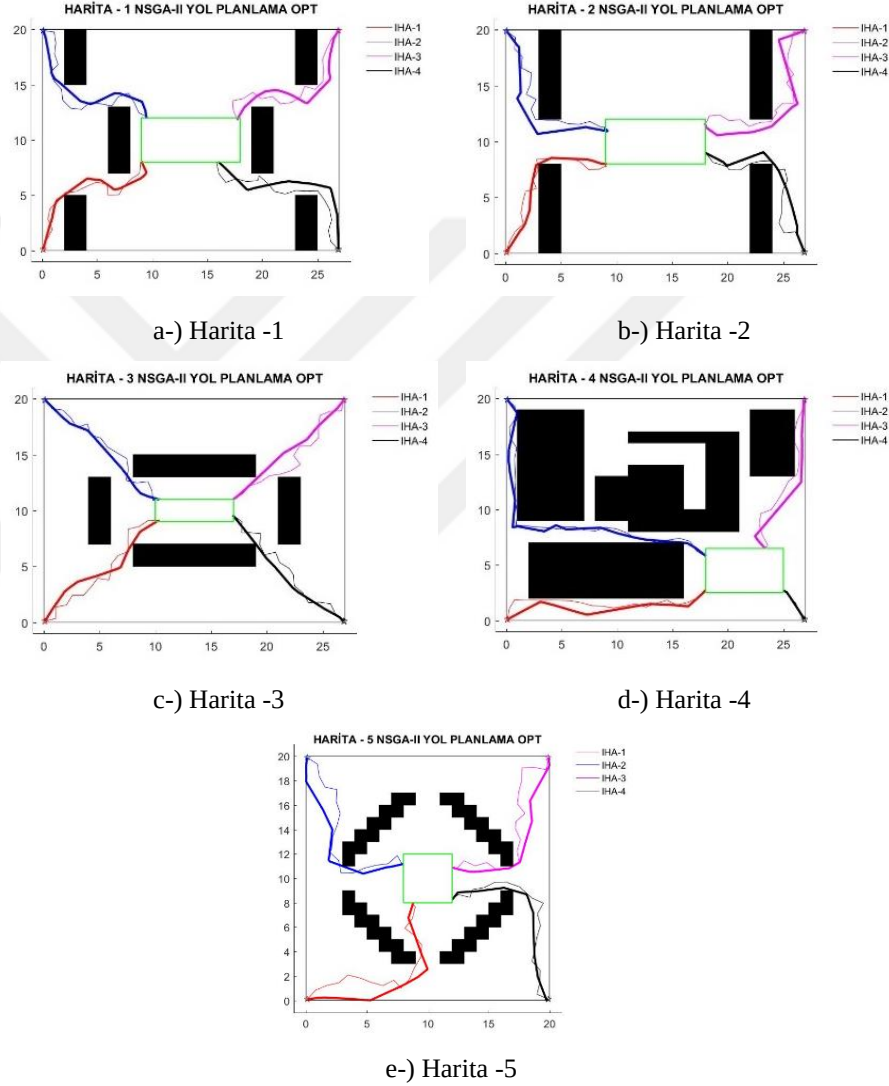
Alg. No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	36483	88607	52124	11337	67238	0.55	0.92	0.37	0.09	0.70
2	16580	98498	81918	18754	70473	1.20	1.86	0.65	0.17	1.60

S.S.: Standart Sapma, Algoritma No – 1: BSGA-II, Algoritma No – 2: ATÇAEA

Metrik sonuçlarına göre 1 numaralı toplanma ÇAO deneylerinde de olduğu gibi, ATÇAEA sonuçlarının ideal pareto optimal sonuçlara daha çok yakınsadığı, ancak BSGA-II’nin PC’ye daha eşit dağıldığı değerlendirilmektedir.

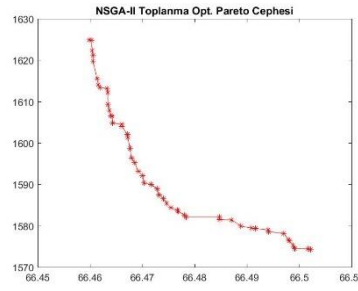
4.5.1 Sınırlandırılmış güzergahta toplanma optimizasyonu sonuçları

BSGA-II algoritmasıyla sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan ÇAO deneylerinde, Bölüm 4.5’de yer alan kısıtlamasız deneydeki mutasyon dağılım indeksi ve çaprazlama dağılım indeksi parametrelerinin etkisinin aynı etki yaptığı görülmektedir.

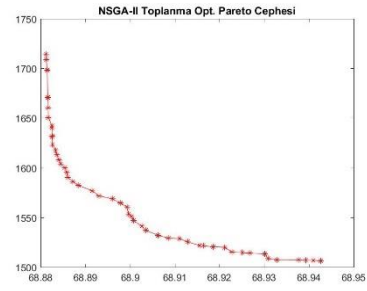


Şekil 4.23 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma ÇAO sonuçları

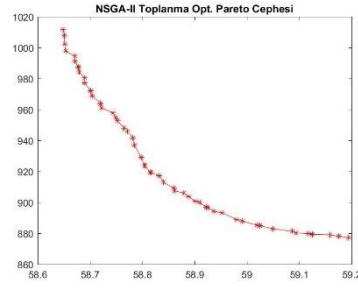
Şekil 4.23’de HTRA algoritması ile 4 adet İHA için sınırlandırılmış bölgelerde planlanan toplanma yollarının, BSGA-II ile optimize edilmesinin görsel sonuçları paylaşılmıştır. Kesişmenin planlama aşamasında engellenmesi sonucu tüm haritalarda toplam yol uzunluğu ve manevra büyüklüğünün azaldığı gözlemlenmektedir.



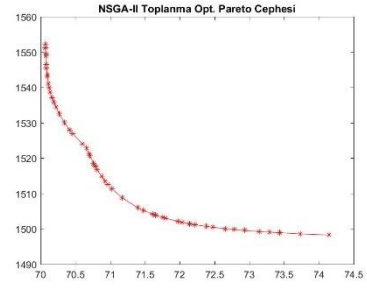
a-) Harita -1



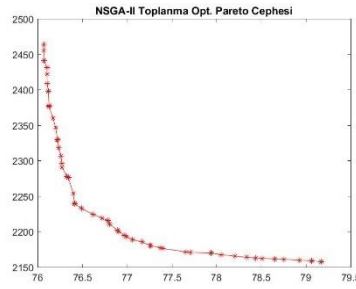
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.24 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahtaki toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

Şekil 4.24’de yapılan optimizasyon sonucu, optimal çözümlerin amaç uzayındaki gösterimlerinden elde edilen PC grafikleri paylaşılmıştır. Her bir grafiğin x eksenini Denklem 3.24’de verilen amaç fonksiyon değerini, y eksenini ise Denklem 3.25’de verilen amaç fonksiyon değerini temsil etmektedir. Grafikler incelendiğinde, her bir haritadaki çözüm kümesinin amaç uzayında iç büküme geometride yayıldığı gözlemlenmektedir. Harita 1, harita 2, harita 3, harita 4 ve harita 5’deki çözüm kümesinin PC’ye yayıldığı görülmektedir.

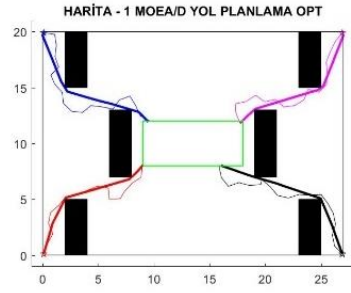
Çizelge 4.17 BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan toplanma optimizasyonunun hiper hacim ve boşluklama sonuçları

BSGA-II ile sınırlandırılmış güzergahlarda toplanma optimizasyonu										
Harita	Hiper Hacim					Boşluklama				
No	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	3.21	20.11	16.90	4.29	10.37	0.57	1.43	0.86	0.23	1.01
2	1.17	16.33	15.16	3.10	9.44	0.62	1.43	0.81	0.26	0.97
3	0.61	12.85	12.25	2.58	8.23	0.55	1.45	0.90	0.24	1.07
4	49.89	107.5	57.61	13.76	87.30	0.59	1.57	0.98	0.24	1.14
5	1.59	30.02	28.43	6.47	14.29	0.65	1.59	0.93	0.21	1.05

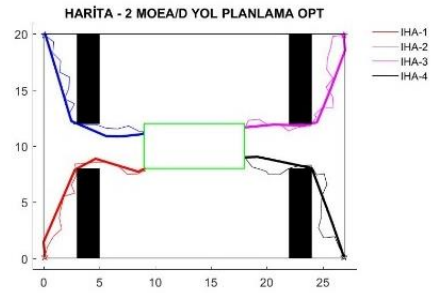
Not: Çizelgedeki hiper-hacim değerleri 10^3 ile çarpılmalıdır. S.S. : Standart Sapma

Çizelge 4.17’de verilen HH sonuçlarında, harita -1 için referans noktası (80,2000), harita -2 için referans noktası (80,2300), harita -3 için referans noktası (70,1600), harita -4 için referans noktası (100,4100) ve harita -5 için referans noktası (85,2700) olarak belirlenmiştir.

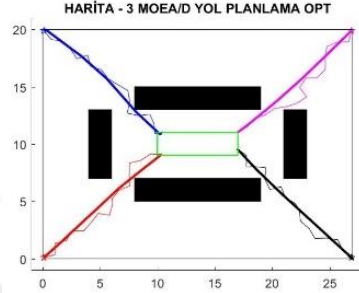
ATÇAEA ile yapılan toplanma optimizasyonu çalışmalarında belirlenen Gamma parametresinin etkisinin, yol planlama çalışmalarındaki etkisine benzer şekilde, artışının çözüm çeşitliliğini arttırdığı ama Pareto optimal çözüme (en iyi) yakınsamasını azalttığı, azalışının tersi etki yaptığı gözlemlenmiştir. Şekil 4.25’de 4 İHA için sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan optimizasyon çalışması sonuçları paylaşılmıştır.



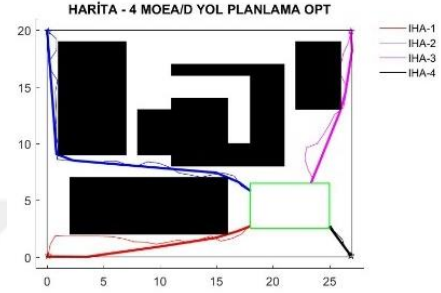
a-) Harita -1



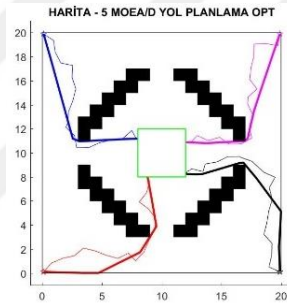
b-) Harita -2



c-) Harita -3



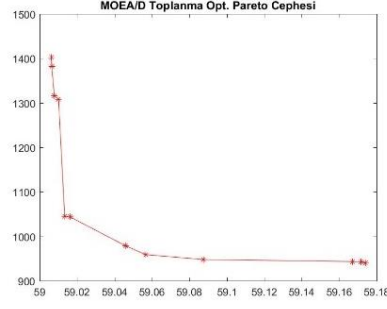
d-) Harita -4



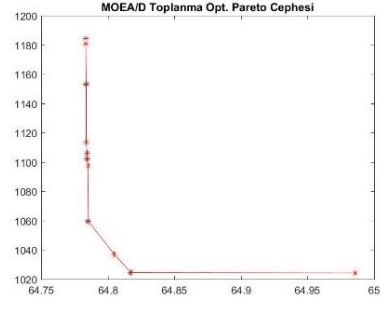
e-) Harita -5

Şekil 4.25 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahta yapılan toplanma deneyi sonuçları

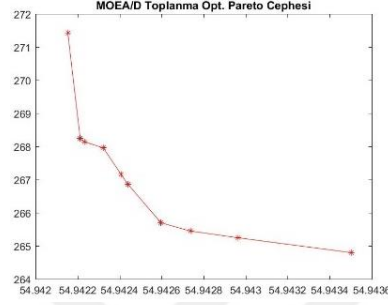
ATÇAEA ile elde edilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, güzergahların kısaldığı ve manevra büyüklüklerinin azaldığı görülmektedir.



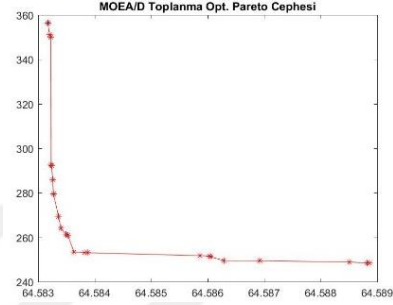
a-) Harita -1



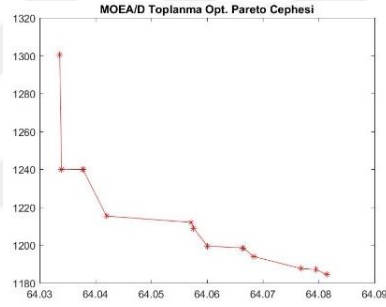
b-) Harita -2



c-) Harita -3



d-) Harita -4



e-) Harita -5

Şekil 4.26 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahtaki toplanma optimizasyonu Pareto Cephesi sonuçları

ATÇAEA ile elde edilen pareto optimal çözüme kümesine ait PC grafikleri Şekil 4.26'da paylaşılmıştır. Sonuçların, amaç fonksiyon değerlerinin oldukça düşük olduğu, ancak PC'ye dağılımın eşit olmadığı görülmektedir.

Çizelge 4.18 ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahlarda yapılan toplanma optimizasyonunun hiper hacim ve boşluklama sonuçları

ATÇAEA ile sınırlandırılmış güzergahta toplanma optimizasyonu										
Harita No	Hiper Hacim					Boşluklama				
	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.	Min.	Mak.	Aralık	S.S.	Ort.
1	10.47	28.96	18.50	4.83	20.3	1.09	1.84	0.76	0.18	1.46
2	5.81	29.92	24.11	6.56	19.68	0.97	1.82	0.85	0.19	1.50
3	9.35	20.32	10.97	3.15	15.82	0.88	1.88	0.98	0.23	1.53
4	8.62	136.41	127.79	35.41	96.18	0.96	1.87	0.91	0.26	1.33
5	18.01	39.83	21.82	5.88	28.17	1.02	1.90	0.89	0.22	1.48

Not: Çizelgedeki hiper-hacim değerleri 10^3 ile çarpılmalıdır. S.S. : Standart Sapma

Çizelge 4.18’de verilen HH sonuçlarında, harita -1 için referans noktası (80,2000), harita -2 için referans noktası (80,2300), harita -3 için referans noktası (70,1600), harita -4 için referans noktası (100,4100) ve harita -5 için referans noktası (85,2700) olarak belirlenmiştir.

4.6 BSGA-II ile ATÇAEA Karşılaştırma Analizi

BSGA-II ve ATÇAEA evrimsel algoritmaları ile 5 haritada ve 2 farklı amaç fonksiyon gurubuyla elde edilen yol planlama optimizasyonu sonuçları, her iki algoritmanın da HTRA sonucu elde edilen ilk yolu iyileştirdiğini göstermektedir. Ancak, sonuçları karşılaştırdığımızda, ATÇAEA algoritmasının hiper hacim metrik değerlerinin BSGA-II algoritmasına göre yüksek olduğu görülmektedir. Bu nedenle ATÇAEA sonuçlarının amaç uzayında daha geniş alan kapladığı pareto optimal çözüme daha fazla yakınsadığı anlaşılmaktadır. Diğer taraftan, 30 bağımsız deney sonucu elde edilen hiper hacim değerlerinin standart sapmasına bakıldığında, harita 1 ve harita 2’de BSGA-II algoritmasının sonuçlarının ortalamaya daha yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle, BSGA-II’nin harita 1 ve harita 2 de ATÇAEA’ya göre daha tutarlı sonuçlar ürettiği söylenebilmektedir. Boşluklama metrik sonuçları incelendiğinde, BSGA-II sonuçlarının ATÇAEA’ya göre daha küçük değerde olduğu görülmektedir. Bu nedenle, BSGA-II

sonuçlarının PC'ye dağılımında çözümler arası mesafelerin ortalamadan çok farklı olmadığı anlaşılmaktadır.

Her iki algoritma ile sınırlandırılmış güzergahta 1, sınırlandırılmamış güzergahta 2 farklı amaç fonksiyon gurubu kullanılarak yapılan toplanma optimizasyonu çalışmaları değerlendirildiğinde, BSGA-II algoritmasının HH ortalamasının ATÇAEA'ya göre 5 haritada da daha küçük olduğu görülmektedir. Diğer taraftan, BSGA-II Boşluklama metriği ortalamaları ATÇAEA'ya göre daha küçüktür. Sınırlandırılmamış güzergahlarda yapılan optimizasyon sonuçlarına göre ATÇAEA sonuçlarının kesişme sayısını, her iki gruptaki amaç fonksiyon değerlerini azaltarak, pareto optimal çözüme daha çok yakınsadığı değerlendirilmektedir. Aynı jenerasyon sayısı sonucu sınırlandırılmış güzergahlardan elde edilen optimizasyon sonuçları sınırlandırma olmayan optimizasyon sonuçlarına göre pareto optimal çözüme daha çok yakınsadığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak kesişme sayısının amaç fonksiyonlarının değerlerini etkilememesi olarak değerlendirilmektedir. Boşluklama metrik sonuçlarına göre, BSGA-II'nin pareto optimal çözüm kümesindeki çözümlerinin PC'ye dağılımının ATÇAEA'ya göre daha iyi olduğu değerlendirilmektedir. Sınırlandırılmamış güzergahlarda yapılan, toplanma CAO metrik sonuçları ile Çizelge 4.19'da paylaşılan İHA yollarındaki kesişmelerin giderilmesi başarımının birbirini desteklediği görülmektedir. Harita 1'de her iki algoritmanın başarımının 0 olduğu yani tüm kesişmeleri gideremediği anlaşılmaktadır. Ancak, bu sonuç beklenen bir sonuçtur. Çünkü, kesişen yollardaki bağlantı noktaları arasındaki mesafe, algoritmalarındaki karar değişkenlerinin değişim limitlerini aşmaktadır. Bu nedenle, harita 1 üzerindeki değerlendirme, karar değişkenleri limit değerleri içerisinde kalan toplam kesişim sayısının azaltılması üzerine yapılmıştır. BSGA-II algoritması bağımsız deneylerin %36,7'sinde, ATÇAEA'nın ise %40'ında kesişim sayısını azalttığı gözlemlenmiştir. BSGA-II'nin çözüm uzayına daha iyi yayıldığı ve ATÇAEA'nın daha iyi sonuçlar elde ettiği, karşılaştırmalı analiz sonucu değerlendirilmektedir. Bir diğer değerlendirme, kullanılan EA'ların hızları üzerine yapılmaktadır. ATÇAEA ceza tabanlı sınır kesişme yaklaşımıyla, çok amaçlı problemi alt problemlere bölmekte ve bu alt problemleri skalar olarak karşılaştırmaktadır. Bu yaklaşım, BSGA-II'nin bir den fazla amacı karşılaştırarak baskılanamayan çözüm kümesi elde etme yaklaşımına göre oldukça fazla hız kazandırmaktadır. Aynı şartlarda

yürütülen deneylerde ATÇAEA'nın BSGA-II'ye göre daha hızlı çözüm ürettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.19 BSGA-II ile ATÇAEA toplanma optimizasyonu başarı kıyaslaması

Toplanma Optimizasyonu Başarı Oranı		
Harita No	BSGA-II (%)	ATÇAEA (%)
1	36,7*	40*
2	63,4	96,7
3	76,7	96,7
4	43,3	73,3
5	76,6	100

*: Optimizasyon yapılan yoldaki toplam kesişme sayısında azalım olması oranı

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Gelişen dünya ile varlığını kabul ettiren insansız araç teknolojisi, sahip olduğu otonomi potansiyeli ile var olan veya gelecekte var olacak birçok problemi çözmeye adaydır. En popüler ve insanoğlu problemlerini çözmeye aday teknolojilerden birisi de insansız hava araçlarıdır. Bu tez çalışmasında, günümüzde teknolojinin gelişmesi ve insanoğlunun ihtiyaçlarının artmasıyla askeri ve sivil birçok alanda kullanılmaya başlanan İHA'ların kompleks görevleri yerine getirebilmek için ihtiyaç duyulan otonom yol planlaması ve toplanma kabiliyetleri kazanabilmesine adına, Bölüm 3'de detaylarıyla anlatılmakta olan ve araştırmacılar tarafından etkinlikleri ve hızları nedeniyle sıklıkla kullanılan örnekleme tabanlı sezgisel yol planlama algoritmalarıyla planlanan yol ve toplanma güzergahlarının literatürde sıkça kullanılan ÇAO algoritmalarıyla iyileştirilmesine yönelik, optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür.

Öncelikle, yapılan çalışmanın, gerçek dünyadaki problemin çözümüne katkı sağlayabilmesi için farklı konfigürasyon ve boyutlarda benzetim ortamı oluşturulmuştur. 2 farklı yol planlama yöntemiyle, oluşturulan ortamlarda bir İHA'nın yol planlaması senaryosu oluşturularak benzetimi yapılmış ve ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda yöntemlerin maliyet esaslı karşılaştırma analizi yapılmıştır.

Aynı yol planlama yöntemlerinin kompleks problemlere çözüm yaklaşımlarını daha kolay analiz edebilmek için 4 tane İHA'nın farklı başlangıç noktalarından hareketlerine başlayarak farklı zorluktaki haritalarda yer alan, hedef bölgede toplanma senaryosu oluşturulup, yöntemlerin bu senaryodaki kabiliyetleri maliyet esaslı analiz edilmiştir. Yöntemlerden HTRA'nin OYH'e göre daha hızlı çözüm ürettiği, ancak ortaya koyduğu yol planının, İHA'ların yakıt maliyeti, aerodinamik yapılarına bağlı manevra kısıtı, operasyonel zaman kısıtı ve hareket kabiliyetleri göz önünde bulundurulduğunda gerçek dünyadaki uygulamalarda kullanılabilir olmadığı gözlemlenmiştir. OYH'in ise 2 boyutlu ortamlardaki her iki ana senaryoda optimal çözüme yakınsadığı ve ortaya koyduğu çözümlerin gerçek hayata uyarlanabilir olduğu anlaşılmıştır. Diğer taraftan, OYH'nin ihtiyaç duyduğu işlem gücü HTRA'ya göre oldukça fazladır. Ayrıca, OYH

algoritmasının 3 boyutlu ortamlarda kullanılabilirliği bir başka araştırma konusu olabilir. HTRA'nin hem 2 ve 3 boyutlu farklı zorluktaki senaryolarda hızlı şekilde çözüml üretebilme kabiliyeti, hem de araştırmacıların yöntemin eksiklerini gidermek adına geliştirme çalışmalarına devam etmeleri, yöntemin tez kapsamındaki optimizasyon çalışmalarında kullanılması için önemli bir motivasyon olmuştur. HTRA'nin geliştirme çalışmaları sonucunda önerilen HTRA* ve HTRA*Akıllı algoritmaları da tez kapsamında incelenmiş ve bu 3 yöntemin kıyaslamalı analizine yer verilmiştir. Kıyaslamada HTRA*Akıllı'nın çözüml kabiliyeti açısından başarılı olduğu ancak işlem gücü faktörü göz önüne alındığında, HTRA'ye göre 4-5 kat daha fazla süreye ihtiyaç duyduğu görölmüştür.

Tez kapsamında, HTRA sonucu planlanan yolların kullanılabilir olmaması nedeniyle, yolların optimal yola dönüşebilmesi için optimizasyon çalışmaları yürütölmüştür. Optimizasyon çalışmalarında son yıllarda araştırmacılar tarafından sıklıkla karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan döneminin “state of the art” algoritmalarından olan BSGA-II ve ATÇAEA çok amaçlı evrimsel algoritmaları tercih edilmiştir. Yol planlama ve toplanma olmak üzere iki ana senaryo üzerinden yürütölmüş olan çalışmalar, yöntemlerin kabiliyetlerini daha net gözlemleyebilmek adına farklı deney setlerine bölünmüştür. Bu deney setlerinde farklı amaç fonksiyonlarının çözüme etkisinin değerlendirilebilmesi amacıyla, toplam yol uzunluğu ve yapılan toplam manevra kriterlerine bağlı 1 numaralı deney ve toplam harcanan enerji ve en büyük manevra kriterlerine bağlı olarak 2 numaralı deney yer almaktadır. Ayrıca 1 numaralı deney setindeki amaç fonksiyonları kullanılarak, toplanma çalışmalarında planlanan yolların kesişmesi ve kesişmemesi durumlarına göre iki farklı senaryo oluşturulmuştur. Yolların kesişmesi senaryosunda, 4 farklı noktadan harekete başlayan İHA'ların bağlantı noktaları arasında belirli bir uzaklık şartı bulunmaktadır. Ancak, bu şart sağlanırsa yolların kesişip kesişmemesi dikkate alınmamaktadır. Yolların kesişmeme senaryosunda ise, planlanan yollar doğrudan belirlenen bağımsız bölgeler içerisinde oluşturulduğu için kesişme engellenmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda zaman parametre olarak belirlenmeyerek, doğrudan maliyetlere etkisi oluşturulmamıştır. Ancak, toplam harcanan enerji amaç fonksiyonunda, yol uzunluğu ve sabit hıza bağlı olarak maliyet değerismektedir. Bu durumda, zaman parametre olarak yer almasa dahi

yolun uzaması ile sabit hızda zamanda artmakta olup, maliyeti de arttırmaktadır. Belirlenen senaryolar altında, ÇAO'nun sonuçlara etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra, algoritmaların karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Her iki algoritmanın da uygulanan tüm senaryolarda planlanan toplanma güzergahlarını iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Ancak, deneylerde daha yüksek işlem gücüne sahip donanımlar kullanılarak, jenerasyon miktarı ve çözüm çeşitliliğini arttırmak mümkün görülmektedir. Böylece, ÇAO sonuçlarının pareto optimal çözüme daha fazla yakınsama yapabileceği değerlendirilmektedir.

Tez kapsamında yapılan değerlendirmeler sonucu gelecek çalışmalara katkı sağlayacak bazı ön görüler elde edilmiştir. Bunlardan ilki tamamen sezgisel bir yöntem üzerinden yol planlaması yapmak yerine HTRA* ve HTRA*Akıllı gibi sezgisellikle çözüm uzayı taranırken, elde edilen yetersiz çözümlerden bilgi toplanarak, bu bilgiler ışığında mutlak çözüm arayışının sürdürüldüğü bir yöntem kullanmanın daha başarılı sonuç ortaya çıkaracağı düşünülmektedir.

Tez kapsamında 3 boyutlu uzayda bir adet deney yapılmıştır. Tek bir senaryo üzerinden yapılacak değerlendirmelerden doğru çıkarımlar elde edilemeyebilir. Bu yüzden 3 boyutlu uzaydaki deneylerin kapsamını genişletmek, harita, engel gibi benzetim öğelerine rüzgar, fırtına, hava trafiği gibi dinamik modeller koyarak senaryoları karmaşıktırmak ortaya çıkacak sonucun verimliliğini arttıracakları öngörülmektedir.

Toplam harcanan enerjinin amaç fonksiyonu olarak kullanıldığı çalışmada gerçek bir İHA modelinin kullanılmasının ve bu modele bağlı değişken hız ve yakıt kullanım parametrelerinin çalışmaya entegre edilmesinin sonuçları daha güvenilir kılacağı öngörülmektedir.

Bir diğer öneri ise, benzetimlerde kapsamlı bir İHA modelinin kullanılmasıdır. Çünkü yapılan deneylerde İHA'nın mekanik, elektriksel veya fiziksel yapılarından oluşan farklılıklar ihtiyaç duyulan rotayı doğrudan etkileyecek unsurlardandır.

KAYNAKLAR

- Ahmed, F., & Deb, K. (2013). Multi-objective optimal path planning using elitist non-dominated sorting genetic algorithms. *Soft Computing*, 17(7), 1283-1299.
- Austin, R. (2011). *Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment* (Cilt 54). UK: John Wiley & Sons.
- Aviation International News. (2019). Ocak 20, 2020 tarihinde ainonline.com: <https://www.ainonline.com/aviation-news/business-aviation/2019-07-18/teal-report-sees-civil-uas-market-tripling-size-2028> adresinden alındı
- Bader, J., & Zitzler, E. (2011). HypE: An algorithm for fast hypervolume-based many-objective optimization. *Evolutionary computation*, 19(1), 45-76.
- Bellingham, J. S., Tillerson, M., Alighanbary, M., & How, J. P. (2002, December). Cooperative path planning for multiple UAVs in dynamic and uncertain environments. *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 2002. 3, s. 2816-2822. IEEE.
- Beume, N., Naujoks, B., & Emmerich, M. (2007). SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume. *European Journal of Operational Research*, 181(3), 1653-1669.
- Bonebaw, E., Dorigo, M., & Theraulaz, G. (1999). *Swarm intelligence: from natural to artificial systems*. ": Oxford University Press.
- Boskovic, J. D., Prasanth, R., & Mehra, R. K. (2002). A multilayer control architecture for unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the 2002 American Control Conference*. 3, s. 1825-1830. IEEE.
- Canny, J. (1988). *The complexity of robot motion planning*. MIT Press.
- Darwin, C. (1859). *The origin of species*. London.
- Das, I., & Dennis, J. E. (1998, Ağustos). Normal-boundary intersection: A new method for generating Pareto optimal points in multicriteria optimization problems. *SIAM J. Optim*, 8(3), 631-657.
- De Weck, O. L. (2004). Multiobjective optimization: History and promise. *Invited Keynote Paper, GL2-2, The Third China-Japan-Korea Joint Symposium on Optimization of Structural and Mechanical Systems*, 2, s. 34. Kanazawa, Japan.
- Deb, K. (2011). Multi-objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction. L. Wang, H. C. Amos, & K. Deb (Dü) içinde, *Multi-objective Evolutionary Optimization for Product Design and Manufacturing* (s. 3-34). London: Springer.

- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., & Meyarivan, T. (2002, April). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 6(2), 182-197.
- Ding, D., & Wang, G. (2013). Ding, D. W., & Wang, G. (2013). MOEA/D-GO for fragmented antenna design. *Progress In Electromagnetics Research*, 33-15.
- Ding, X. C., Rahmani, A. R., & Egerstedt, M. (2010). Multi-UAV convoy protection: An optimal approach to path planning and coordination. *IEEE transactions on Robotics*, 26(2), 256-268.
- Dorigo, M. (1992). *Optimization, Learning and Natural Algorithms*. Doktora Tezi, Politecnico di Milano, Italy.
- Edgeworth, F. Y. (1881). *Mathematical physics*. P. Keagan, London, England.
- Emmerich, M., Beume, N., & Naujoks, B. (2005, Mart). An EMO algorithm using the hypervolume measure as selection criterion. *International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization* (s. 66-72). Berlin, Heidelberg: Springer.
- Fonseca, C. M., & Fleming, P. J. (1993). Genetic algorithm for multiobjective optimization: Formulation decision and generalization. S. Mateo, & M. Kauffman (Dü.), *Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithm içinde*, (s. 416-423).
- Garnier, S., Gautrais, J., & Theraulaz, G. (2007). The biological principles of swarm intelligence. *Swarm intelligence*, 1(1), 3-31.
- Goel, U., Varshney, S., Jain, A., & Maheshwari, S. (2018). Three dimensional path planning for UAVs in dynamic environment using glow-worm swarm optimization., 133, s. 230-239.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley.
- Guavera, B. C. (2018, Temmuz). *An overview of the class of rapidly-exploring random trees*. B.Sc thesis, Utrecht University, Faculty of Humanities, Utrecht, Netherlands.
- Hao, Y., Li, B., Shao, L., Zhang, Y., & Cui, J. (2017). Multi-objective Path Planning for Unmanned Aerial. *Chinese Automation Congress (CAC)* (s. 7035-7039). IEEE.
- Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics*, 4(2), 100-107.
- Hayat, S., Yanmaz, E., Brown, T. X., & Bettstetter, C. (2017, Mayıs). Multi-objective UAV path planning for search and rescue. *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (s. 5569-5574). IEEE.

- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press.
- Karaağaç, C. (2016). *Iha sistemleri yol haritası geleceğin hava kuvvetleri 2016-2050*. STM, Ankara.
- Karaman, S., & Frazzoli, E. (2010). Incremental Sampling-based Algorithms for Optimal Motion Planning. *Robotics Science and Systems VI*, 104(2).
- Karaman, S., & Frazzoli, E. (2011). Sampling based algorithms for optimal motion planning. *The international journal of robotics research*, 30(7), 846-894.
- Kavraki, L. E., Svestka, P., Latombe, J.-C., & Overmars, M. H. (1996). Probabilistic roadmaps for Path Planning in high-dimensional configuration spaces. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 566-580.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. C. (1995, November). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks*, 4, s. 1942-1948.
- Khan, W., & Zhang, Q. (2010, Eylül). Khan, W., & Zhang, Q. (2010, September). MOEA/D-DRA with two crossover operators. *2010 UK workshop on computational intelligence (UKCI)* (s. 1-6). IEEE.
- LaValle, S. M. (1998). Rapidly-Exploring Random Trees: A new Tool for Path Planning.
- LaValle, S. M., Kuffner, J. J., & Donald, B. (2001). Rapidly-exploring random trees: Progress and prospects. *Algorithmic and computational robotics: new directions*(5), 293-308.
- Li, H., & Zhang, Q. (2008). Multiobjective optimization problems with complicated Pareto sets MOEA/D and NSGA-II. *IEEE transactions on evolutionary computation*, 13(2), 284-302.
- Messac, A., Ismail-Yahaya, A., & Mattson, C. A. (2003). The normalized normal constraint method for generating the Pareto frontier. *Structural and multidisciplinary optimization*, 25(2), 86-98.
- Mishra, M., Han, X., Sidoti, D., Ayala, M. D., An, W., Pattipati, K. R., & Kleinman, D. L. (2014). Multi-Objective Path Planning for a Team of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in a Dynamic and Uncertain Environment. *CONNECTICUT UNIV STORRS DEPT OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE*.
- Mittal, S., & Deb, K. (2007, Eylül). Three-dimensional offline path planning for UAVs using multiobjective evolutionary algorithms. *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation* (s. 3195-3202). IEEE.

- Monwar, M., Semiari, O., & Saad, W. (2018, Aralık). Optimized path planning for inspection by unmanned aerial vehicles swarm with energy constraints. *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)* (s. 1-6). IEEE.
- Murata, T., & Ishibuchi, H. (1994, Kasım). MOGA: Multi-objective genetic algorithms. *IEEE international conference on evolutionary computation*. 1, s. 289-294. IEEE.
- Nasir, J., Islam, F., Malik, U., Ayaz, Y., Hasan, O., Khan, M., & Muhammad, M. S. (2013). RRT*-SMART: A rapid convergence implementation of RRT*. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(7), 299.
- Noreen, I. (2016, October). A Comparison of RRT, RRT* and RRT*-Smart Path Planning Algorithms. *International Journal of Computer Science and Network Security*, 20-27.
- NS. (2020). Curve intersections (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/22441-curve-intersections>). *MATLAB Central File Exchange*.
- Pareto, V. (1896). *Cours D'Economic politique* (Cilt 1-2). F. Rouge, Lausanne .
- Ren, Q., Yao, Y., Yang, G., & Zhou, X. (2019, April). Multi-objective path planning for UAV in the urban environment based on CDNSGA-II. *IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)* (s. 350-3505). IEEE. doi:10.1109/SOSE.2019.00059
- Robotikpedia. (2020, Mart). <https://robotikpedia.com/>. adresinden alındı
- Rudnick-Cohen, E., Azarm, S., & Herrmann, J. W. (2015). Multi-objective design and path planning optimization of unmanned aerial vehicles (UAVs). *16th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference*, (s. 2322).
- Schaffer , D. (1985). Multiple objective optimization with vector evaluated genetic algorithm. *Genetic Algorithms and their Applications. Proceeding of First International Conference on Genetic Algorithms*, (s. 93-100).
- Schott, J. R. (1995). *Fault tolerant design using single and multi-criteria genetic algorithms optimization*. Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Aeronautics and Astronautics, Cambridge, MA.
- Seshadri, A. (2020). NSGA - II: A multi-objective optimization algorithm (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/10429-nsga-ii-a-multi-objective-optimization-algorithm>). *MATLAB Central File Exchange*.
- Srinivas, N., & Deb, K. (1994). Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms. *Evolutionary computation*, 2(3), 221-248.
- Tao, H., Wang, Z., & Li, J. (2014, July). Three-Dimensional path planning for unmanned aerial vehicles based on multi-objective genetic algorithm.

Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference (s. 8617-8621). Nanjing, China: IEEE.

Turgut, A. E., Çelikkanat, H., Gökçe, F., & Şahin, E. (2008, Aralık). Self-organized flocking in mobile robot swarms. *Swarm Intelligence*, 2(2-4), 97-120. doi:10.1007/s11721-008-0016-2

Virág, C., Vásárhelyi, G., Tarcai, N., Szörényi, T., Somorjai, G., Nepusz, T., & Vicsek, T. (2014). Flocking algorithm for autonomous flying robots. *Bioinspiration & biomimetics*, 9(2).

Whitehead, J. (2020). Path Planning (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53739-path-planning>). *MATLAB Central File Exchange*.

Yarpiz. (2019, Kasım). www.yarpiz.com: <https://yarpiz.com/95/ypea124-moead> adresinden alındı

Yi, D., Goodrich, M. A., & Seppi, K. D. (2015). MORRF*: Sampling-based multi-objective motion planning. *Twenty-Fourth International Joint Conference on Artificial Intelligence*.

Zhang, Q., & Li, H. (2007, December). MOEA/D : A Multiobjective Evolutionary Algorithm Based on Decomposition. *IEEE Transactions on evolutionary computation*, 11(6), 712-731.

Zhang, Q., Zhou, A., Zhao, S., Suganthan, P. N., Liu, W., & Tiwari, S. (2009). *Multiobjective optimization test instance for the CEC 2009 special session and competition*. Technical Report CES-487, University of Essex.

Zitzler, E. (1999). *Evolutionary algorithms for multiobjective optimization: Methods and applications*. Doktora Tezi, Swiss Federal Institute of Technology Zurich.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Anıl Ulaş KOÇAK
Doğum Yeri : Şanlıurfa
Doğum Tarihi : 21 Ocak 1990
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kirami Refia Alemdaroğlu Lisesi (2008)
Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (2013)
Yüksek Lisans : Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı (2020)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Alan Sondajcılık Ltd. Şti. (2013 – 2017)
Roketsan A.Ş.(2017 – Devam etmekte)