

**T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ EKONOMETRİ ANABİLİM
DALI**

DOKTORA TEZİ

**ENERJİ OPTİMİZASYONU ODAKLI ÇOKLU
İNSANSIZ HAVA VE KARA ARAÇLARI İLE
GÖREV PLANLAMASI**

Alparslan GÜZEY

2502200070

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. Mehmet Hakan SATMAN

İSTANBUL – 2024

ÖZ

ENERJİ OPTİMİZASYONU ODAKLI ÇOKLU İNSANSIZ HAVA VE KARA
ARAÇLARI İLE GÖREV PLANLAMASI
ALPARSLAN GÜZEY

Bu tez kapsamında, acil durum lojistiğinde İnsansız Hava Araçları (İHA) ve İnsansız Kara Araçlarının (İKA) görev planlamasının optimizasyonu kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın amacı, afet bölgelerinde acil ihtiyaç malzemelerinin teslimatında yenilikçi rotalama stratejileri ile verimliliği, hızı ve güvenilirliği artırmaktır.

Afetler ile etkin bir mücadele, lojistik operasyonların verimliliğine büyük ölçüde bağlıdır. Geleneksel yöntemler, erişim sorunları ve afet ortamlarının öngörülemezliği nedeniyle genellikle yetersiz kalmaktadır. Bu tez, İHA ve İKA'ların esneklik ve verimlilik sunduğu alternatif çözümler olarak değerlendirilmesini önermektedir.

Araştırma, acil durum senaryolarında İHA ve İKA'ların optimize edilmiş rotalamasına yönelik hesaplama modelleri geliştirmekte ve doğrulamaktadır. Tez kapsamında iki ana uygulama incelenmiştir: dinamik enerji ve maliyet etkin çoklu İHA sistemlerinin rotalanması ve acil durum lojistiği için hibrit İHA/İKA modelleri. Çalışmanın ana hedefleri, acil durum lojistiğinde İHA ve İKA ile ortak görev planlamanın zorluklarını ve fırsatlarını daha iyi anlamak, afet müdahalesi senaryolarında otonom araç rotalaması ve koordinasyonunu optimize etmek ve bu modellerin etkinliğini deneysel olarak doğrulamaktır.

Tez, Yöneylem Araştırması, Bilgisayar Bilimi ve Acil Durum Yönetimi prensiplerini birleştiren çok disiplinli bir yaklaşım kullanmaktadır. Problemin tanımlanması ve modellenmesi, algoritma geliştirme, simülasyon ve doğrulama adımlarını içermektedir. Araştırma kapsamında, enerji verimliliğini maksimize eden ve operasyonel maliyetleri minimize eden ileri algoritmalar geliştirilmiştir.

Araştırma kapsamında, İHA ve İKA'lar için yenilikçi rotalama stratejileri geliştirilmiş olup afet lojistiği alanına yönelik katkı sağlaması amaçlanmıştır. Bu araştırma, acil malzeme teslimatlarının optimizasyonuna yönelik değerli bilgiler ve pratik çözümler sunmakta, acil müdahale etkinliğini artırmaktadır. Gelecekte ilgili alanda yapılacak

Çalışmalarda evresel faktörlerin İHA enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin ve yenilenebilir enerji kaynaklarının fizibilitesinin araştırılması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: İnsansız Hava Araçları (İHA), Acil durum Lojistiği, Enerji Optimizasyonu, Rotalama Algoritmaları, Görev Planlama.



ABSTRACT

ENERGY OPTIMIZATION FOCUSED MISSION PLANNING WITH MULTIPLE UNMANNED AIR VEHICLES AND GROUND VEHICLES ALPARSLAN GÜZEY

This study presents optimizing the planning of missions, for unmanned air vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs) in emergency logistics. The main goal is to enhance the speed, efficiency and dependability of delivering supplies to disaster affected areas by introducing routing strategies.

Efficient disaster response relies on the operation of logistics activities. Conventional methods often face challenges related to accessibility issues and the unpredictable nature of disaster zones. This study suggests considering UAVs and UGVs as alternatives that provide adaptability and efficiency.

The thesis focuses on creating and validating models for optimizing the routing of UAVs and UGVs during emergency situations. It explores two applications; energy efficient routing for multiple UAV systems as well as hybrid UAV/UGV models tailored for emergency logistics. The primary objectives include gaining insights into the complexities and advantages of mission planning involving UAVs and UGVs in emergency logistics, optimize autonomous vehicle routing and coordination techniques for disaster response scenarios and conducting experiments to showcase the effectiveness of these models.

This thesis adopts an approach by combining concepts from Operations Research, Computer Science and Emergency Management. It involves stages such, as defining problems, developing algorithms conducting simulations and validating findings. New algorithms have been developed to maximize energy efficiency and minimize operational costs.

The study focus on efficient disaster relief logistics through the creation of novel routing techniques for vehicles (UAVs) and unmanned ground vehicles (UGVs). This study offers perspectives and actionable approaches to improve the efficiency of emergency supply deliveries thereby optimizing the effectiveness of emergency responses. It is suggested that future studies how environmental conditions influence UAV energy usage and assess the viability of energy alternatives.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), Emergency Logistics, Energy Optimization, Routing Algorithms, Mission Planning.



ÖNSÖZ

Öncelikle, tez danışmanım Prof. Dr. Mehmet Hakan Satman'a, bu çalışmanın her aşamasında sunduğu rehberlik, bilgi ve desteği için en derin şükranlarımı sunarım. Kendisi, tez çalışmamın yönlendirilmesinde ve araştırma sürecinde bana sağladığı değerli önerilerle bu tezin şekillenmesine büyük katkı sağlamıştır.

Tez izleme jürimde yer alan ve araştırmama katkı sağlayan Prof. Dr. Murat Ermiş'e, araştırma sürecinde gösterdiği ilgi, sağladığı geri bildirimler ve yönlendirmeler için teşekkür ederim. Kendisinin katkıları, araştırmamın derinleşmesine ve daha kapsamlı bir çalışma haline gelmesine yardımcı olmuştur.

Ayrıca, abim Doç. Dr. Hacı Mehmet Güzey'e, tez sürecindeki değerli önerileri ve destekleri için teşekkür ederim. Akademik yolculuğumda bana olan inancı ve teşviki, bu çalışmanın tamamlanmasında büyük bir motivasyon kaynağı olmuştur.

Bu tezin ortaya çıkmasında ailemin desteği yadsınamaz. Sevgili eşim Nur Gül Güzey ve kızım Asya Güzey'e, her daim yanımda oldukları, sabrı ve sevgisi ile bu süreci kolaylaştırdıkları için minnettarım. Annem Münüre Güzey'e ve babam Servet Güzey'e, bana verdikleri sonsuz destek, sevgi ve inanç için teşekkür ederim. Kardeşim Timur Güzey'e de her zaman yanımda olduğu ve manevi desteği ile beni güçlendirdiği için teşekkür ederim.

ALPARSLAN GÜZEY

İSTANBUL, 2024

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZ	ii
ABSTRACT	iv
ÖNSÖZ.....	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR LİSTESİ	xi
GİRİŞ.....	1

BİRİNCİ BÖLÜM LİTERATÜR TARAMASI

1.1. Genel Tanımlar ve Tarihçe.....	6
1.2. Afet Yönetimi.....	8
1.3. Afet Yönetiminde İHA ve İKA Uygulamaları	11
1.3.1. Kentsel Alanlarda Hava Taksiler ve Mobilite Çözümleri	12
1.3.2. Sağlık ve Acil Durum Lojistiğinde İHA Kullanımı	14
1.3.3. Son-nokta Teslimat ve Tedarik Zinciri Optimizasyonu	15
1.4. İHA ve İKA Kullanımının Önemi ve Kısıtlamalar.....	30

İKİNCİ BÖLÜM METODOLOJİ

2.1. Önerilen Algoritmalarda Kullanılan Araçlar	34
2.1.1. Gezgin Satıcı Problemi.....	34
2.1.2. Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama	36
2.1.3. K-Means Kümeleme Yöntemi.....	39
2.1.4. Genetik Algoritma.....	42
2.1.5. 2-Opt Yöntemi	47
2.2. Önerilen Algoritma 1	48
2.2.1. Karar Değişkenleri, Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar.....	48

2.3.	Önerilen Algoritma 2.....	56
2.3.1.	Karar Değişkenleri ve Amaç Fonksiyonu.....	58
2.3.2.	Genetik Algoritmanın Uygulanması	60
2.3.3.	Kısıtlar	62
2.3.3.1.	Kapasite Kısıtı.....	63
2.3.3.2.	Teslimat Noktası Kısıtı	64
2.3.3.3.	Enerji Kısıtı.....	65
2.3.4.	İHA Uçuş Segmentleri için Enerji Tüketiminin Hesaplanması	69
2.3.4.1.	Kalkış Süresi ve Hızlanma Katsayısının Hesaplanması	71
2.3.4.2.	İHA Uçuşu Aşamaları İçin Gerekli Güç Hesaplamaları.....	74
2.3.4.3.	İHA Uçuş Segmenti Toplam Enerji Hesaplaması.....	76
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM		
UYGULAMA		
3.1.	Uygulama 1: Acil Durum Lojistiğinde Hibrit İHA/İKA Modeli.....	80
3.1.1.	Uygulama Temel Bileşenleri	80
3.1.2.	Bulgu ve Yorumlar.....	82
3.2.	Uygulama 2: Enerji ve Maliyet Etkin Çoklu İHA Rotalama.....	87
3.2.1.	Uygulama Temel Bileşenleri	87
3.2.2.	Bulgu ve Yorumlar.....	90
SONUÇ		103
KAYNAKÇA		107
ÖZGEÇMİŞ		129

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1.: İndisler	60
Tablo 3.2.: Parametreler	60
Tablo 3.3.: Karar Değişkenleri	61
Tablo 3.4.: Notasyonlar	69
Tablo 3.5.: Paket Ağırlıkları ve Koordinatlar.....	88
Tablo 3.6.: İHA Özellikleri.....	89
Tablo 4.1.: Test Senaryolarının Sonuçları.....	100
Tablo 4.2.: Senaryo 5 Test Sonuçları	101
Tablo 4.3.: Toplanma Noktalarının Koordinatları ve İHA'ların Atamaları	102
Tablo 4.4.: İHA-1 Alt Tur Sonuçları	104
Tablo 4.5.: İHA-2 Alt Tur Sonuçları	105
Tablo 4.6.: İHA-3 Alt Tur Sonuçları	106
Tablo 4.7.: İHA-4 Alt Tur Sonuçları	106

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Afet Yönetim Sisteminin Aşamaları	23
Şekil 3.1: Hibrit İHA/İKA Rota Akış Şeması	66
Şekil 3.2: Hibrit İHA/İKA Rotalama Çözümü	67
Şekil 3.3.: Optimuma yakın Hız Hesaplama Algoritması.....	77
Şekil 3.4.: İHA Enerji Hesaplama Algoritması	79
Şekil 3.5.: İHA Segment Uçuş Aşamaları	81
Şekil 3.6.: İHA Uçuş Zamanı ve Enerjisi Hesaplama Algoritması	86
Şekil 3.7.: Genetik Algoritma Akış Şeması	90
Şekil 3.8.: İHA Rota Optimizasyonu için Genetik Algoritma	94
Şekil 4.1.: Senaryo Sonuçları 1	97
Şekil 4.2.: Senaryo Sonuçları 2	98
Şekil 4.3.: Çoklu İHA Görev Planlama Rotaları	107
Şekil 4.4.: İHA Segment Hızları	108
Şekil 4.5.: İHA Hızı ve Taşınan Yük.....	109
Şekil 4.6.: İHA Yüğü ve Hızlanma Katsayısı.....	110
Şekil 4.7.: İHA Segment Uçuşu Enerji Tüketimi	111
Şekil 4.8.: Farklı Yüklerde İHA Güç Tüketimi ve Hızı	112
Şekil 4.9.: Farklı Yüklerde İHA Dayanıklılığı ve Hızı	113
Şekil 4.10.: Farklı Yüklerde İHA Uçuş Menzili ve Hızı	114

KISALTMALAR LİSTESİ

CDRP	: Kapasite Kısıtlı İHA Rotalama Problemi
GA	: Genetik Algoritma
GSP	: Gezgin Satıcı Problemi
IoT	: Nesnelerin İnterneti
İHA	: İnsansız Hava Aracı
İHS	: İnsansız Hava Sistemleri
İKA	: İnsansız Kara Aracı
KKS	: Karınca Koloni Sistemi
MILP	: Karma Tamsayı Doğrusal Programlama
UAM	: Urban Air Mobility-Kentsel Hava Hareketliliği
VRP	: Araç Rotalama Problemi
VTOL	: Dikey İniş Kalkış Yapabilen Otonom Hava aracı

GİRİŞ

Afetler, insanlık tarihinden bu yana dünya üzerinde yaşayan tüm canlıları olumsuz etkilemektedir. Bu afetlerle bağlantılı riskleri azaltmak amacıyla, bireyler ve toplumlar afet yönetimi üzerine çeşitli çabalar sarf etmişlerdir. Dünya genelinde afet yönetiminin temel motivasyonu, afetlerin canlılara, toprağa ve çevreye verdiği zararın azaltılmasıdır. Bazı bölgeler ve ülkeler, politik, kültürel veya ekonomik nedenlerden ötürü afet kaynaklı problemlerin üstesinden gelmekte daha etkili olabilmektedirler. Küresel ekonominin büyümesi, afetlerin etkilerinin bir ülkenin sınırları içinde kalmasını daha da zorlaştırmakta olup, afet bölgesinde meydana gelen zararların global çapta hissedilmesine yol açmaktadır (R. Wu, 2023).

Yaşanan afetlere karşı uluslararası yardım yanıtları karmaşık, zaman zaman kaotik ve her zaman çok yönlüdür (Zhao vd., 2018). Her ülke, kendi tehlike profiline, kırılganlık dalgalanmasına, acil durum yönetim sistemlerinin gelişimine veya çöküşüne, benzersiz kültürel, ekonomik ve politik karakteristiklere sahiptir. Bu özellikler, ülkelerin uluslararası afet yönetimi ajansları ve organizasyonlarla etkileşiminde rol oynamaktadır (Dilley, 2006).

Afet yönetimi uygulaması ve afet müdahale uzmanlığı mesleği, hızla genişlemekte ve gelişmektedir. Bu gelişim süreci, acil durum yönetiminin dört aşamasında (azaltma, hazırlık, yanıt ve toparlanma) yer alan ülkelerin ve sivil toplum örgütlerinin modern ihtiyaçları bağlamında yönlendirilmektedir (Coppola, 2015).

Acil durumlarda afet lojistiği, yaşanan afetlerden ciddi şekilde etkilenen bölgelerdeki savunmasız insanlara yardım sağlanması için vazgeçilmez bir unsurdur. Acil durum lojistiği, afetzedelerin acılarını hafifletmek amacıyla dağıtılan malzemelerin yanı sıra koordinasyon için gerekli bilgilerin planlama noktasından tüketim noktasına kadar verimli, uygun maliyetli akışını ve depolanmasını yönetme sürecidir (Alem vd., 2016). Acil durum lojistiğinin amacı, bir afetin olumsuz etkilerini azaltmak, yararlanıcıların ihtiyaç ve gereksinimlerine etkin bir şekilde yanıt vermektir (N. Liu ve Ye, 2013). Ticari lojistiğin aksine, afet bölgelerinden gelen talepler tahmin edilemediği için acil durum lojistiği farklı belirsizlikler ve bilinmezlikler ile mücadele etmektedir. Ticari lojistik maliyet verimliliği odaklı operasyonel faaliyetlerini planlasa da acil durum lojistiği, verimlilikten ziyade etkinliğe odaklanmaktadır. Acil durum lojistik ağlarındaki

ortaklar arasında teşviklerin ve hedeflerin uyumlaştırılması esastır. Çünkü, ilgili paydaşlar (askeri ve insani yardım kuruluşları, yerel yetkililer, sivil toplum kuruluşları) arasında etkili bir ortaklık, yardımın zamanında ulaştırılması için önemlidir.

Ticari lojistik alanında faaliyet gösteren kurumlar düzenli olarak istikrarlı bir ortamda faaliyet göstermektedirler. Oluşturulan bu ortam içerisinde kurumlar, kâr güdüsüyle hareket ederken, acil durum lojistiği alanındaki kurumlar düzenli olarak tedarik zinciri kesintileriyle karşı karşıya kalmaktadırlar (Bode ve Macdonald, 2017). Temel amacı hayat kurtarmak ve zor koşullardaki savunmasız mağdurlara hizmet etmek olan acil durum lojistiği için ise bu durum, ortak çaba gerektirerek aşılmalıdır. Bu nedenle acil durum lojistiğinin zaman, konum, tür ve büyüklük açısından talep belirsizliği, çok kısa teslim sürelerinde çok çeşitli malzemelere yönelik beklenmedik derecede yüksek talep hacimleri, insan ve altyapı kaynaklarının yetersizliği gibi birçok ayırt edici özelliğinin etkin bir şekilde yönetilmesine ihtiyaç duyulmaktadır.

Acil durum lojistik operasyonlarını sürdürmek için gelişmiş iletişim araçları ve teknolojileri insani yardım kuruluşlarının verimliliğini ve etkinliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır. Son zamanlarda İHA, akademi, medya ve insani yardım kuruluşları tarafından ilgi görmektedir. İnsansız Hava Sistemleri (İHS), üzerinde insan olmadan çalışan hava araçları veya İHA olarak tanımlanmaktadır. İHA'lar otonom ya da uzaktan kontrol edilirler ve izleme-haritalama işlemleri için görsel ve işitsel verileri yakalayıp kaydedebilen farklı sensörlerden oluşmaktadırlar. Geçmiş yıllarda, İHA'lar öncelikle askeri uygulamalarda gözetleme ve keşif amacıyla kullanılmışlardır. Yakın zamanlarda ise, İHA'ların taşımacılıkta kullanımı tedarik zinciri yönetimi ve lojistikte daha yaygın hale gelmiştir (Madani ve Ndiaye, 2022). Uygulamalarından bağımsız olarak, İHA'ların kullanımının arkasındaki genel motivasyon, maliyet verimliliğini ve ön kararlılığı artırarak tedarik zinciri süreçlerinin hızını ve esnekliğini geliştirme yetenekleridir. Acil durum lojistiği alanında, İHA'ların konuşlandırılması geniş operasyonel, ekonomik ve sosyal fırsatlarla ilişkilidir. Bu nedenle, Dünya genelinde insani yardım amaçlı kullanım için insansız otonom sistemlere yönelik standartlar ve politikalar halihazırda formüle edilmektedir.

Otonom sistemlerin her geçen yıl artan kullanımı ile birlikte, İHA ve İKA'ların ortaya çıkışı acil durum lojistiğinde yeni bir dönemin habercisi olmuştur. Bu otonom sistemlerin afet müdahalesinde kullanılması, yalnızca daha fazla verimlilik ve güvenlik vaat etmekle kalmayıp, aynı zamanda dünya çapındaki araştırmacıların ilgisini çeken karmaşık optimizasyon modelleri de ortaya koymaktadır.

Bu çalışma, afet müdahale senaryolarına yönelik teorik araştırma ve pratik uygulama arasındaki boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Araştırma, acil durum lojistiğinde İHA ve İKA ile eşgüdümlü teslimat optimizasyonunu incelemekte ve bu alanda yenilikçi çözümler sunmaktadır. Araştırmanın merkezinde, acil durum tedarik teslimatının hızını, verimliliğini ve güvenilirliğini artıran ve böylece afetlerden etkilenen topluluklar üzerindeki etkisini azaltan stratejiler arayışı yer almaktadır.

Mevcut acil durum lojistik uygulamaları, lojistik kısıtlamalar, erişilemeyen araziler ve afet ortamlarının öngörülemezliği nedeniyle afetten etkilenen bölgelerin acil ihtiyaçlarını karşılamada genellikle yetersiz kalmaktadır (Negi ve Negi, 2020). Geleneksel dağıtım yöntemleri, bu tür zorluklar karşısında yetersiz kalmakta ve acil durum senaryolarının karmaşıklığını aşabilecek yenilikçi çözümlere duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bu bağlamda, hızlı, esnek ve otonom çalışma yetenekleriyle İHA ve İKA'lar umut verici bir alternatif sunmaktadır.

Bu çalışmada gelişmiş hesaplama algoritmaları ve yönlendirme stratejileri aracılığıyla İHA ve İKA kullanımının optimize edilmesine odaklanılmıştır. Acil durum lojistiğinde bu otonom sistemlerin görev planlamasının kapsamlı bir analizini sunan araştırmada, çoklu İHA sistemlerinin dinamik enerji ve maliyet etkin yönlendirilmesi incelenmiş olup, acil durum lojistiği için hibrit İHA/İKA modelleri araştırılmıştır. Bu kapsamda, dinamik enerji ve maliyet etkin çoklu İHA sistemlerinin yönlendirilmesi ve kentsel alanlarda hibrit İHA/İKA modellerinin konuşlandırılmasına çalışılmıştır.

Çalışmada aynı zamanda acil durum lojistiği kapsamında, İHA ve İKA ile teslimat uygulamalarına yönelik zorlukların ve fırsatların ortaya konması hedeflenmiştir. Afet müdahale senaryolarında, otonom araçların rotalama ve koordinasyonunu optimize eden hesaplama algoritmaları geliştirilmiş olup, modellerin deneysel olarak doğrulanması amaçlanmıştır. İHA ve İKA'lar için yenilikçi rotalama stratejilerinin geliştirilmesi ve analizi yoluyla acil durum lojistiği alanını ilerleterek ve bunların afet müdahalesi ile akıllı şehir lojistiğinde kullanımını optimize edilmesi düşünülmektedir.

Acil durumlarda müdahale sürelerinin önemli ölçüde iyileştirilmesi amacıyla İHA ve İKA yeteneklerinden yararlanarak acil durum lojistik performansının artırılması önem arz etmektedir. Hızlı, verimli ve güvenilir teslimat sağlayan algoritmalar ve operasyonel çerçeveler geliştirilmekte olup, tıbbi kitlerin ve diğer kritik malzemelerin etkilenen bölgelere ulaştırılması gerekmektedir. Ayrıca gelişmiş kümeleme teknikleri ve rota planlama algoritmalarını birleştirerek kaynak tahsisi ve dağıtımını optimize edilmelidir.

Sonuç olarak bu araştırmanın, acil durum lojistiği alanındaki teorik ve pratik bilgilere önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir. Araştırma, Yöneylem Araştırması, Bilgisayar Bilimi ve Acil Durum Yönetimi ilkelerinden yararlanan multidisipliner bir yaklaşımla, doğrulanmış, ölçeklenebilir modeller ve algoritmalar sunarak gelecekteki ilerlemeler için bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır. Araştırmadan elde edilecek sonuçların hem akademik camiaya hem de afet yönetimindeki pratik uygulamalara önemli katkılar sunması beklenmektedir.

Bu tez toplamda beş bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, çalışmanın motivasyonu, hedefleri ve acil durum lojistiğinin İHA'lar ve İKA'lar ile optimize edilmesinin önemi özetlenerek araştırma için zemin hazırlanmıştır. Bu tez kapsamında yürütülen araştırma sorularına genel bir bakış sunulmuş ve çalışmanın yapısı tanıtılmıştır.

İkinci bölümde ise mevcut literatürün ayrıntılı bir incelemesi yapılarak mevcut araştırmanın daha kapsamlı bir literatür içerisindeki konumu sunulmuştur. Bu bölüm kapsamında, Yöneylem Araştırması, acil durum lojistiği ve otonom sistemlerin kullanım uygulamaları sunulmuş olup literatürdeki mevcut gelişmeler, teorik çerçeveler ve boşluklar vurgulanmıştır.

Üçüncü bölümde ise araştırma kapsamında yapılan iki uygulamaya ait problem formülasyonu ve metodoloji ele alınmıştır. İlk uygulamada kentsel alanlarda afet sonrası acil durum lojistiğine yönelik Hibrit İHA/İKA Rotalama modeli sunulmuştur. İkinci uygulamada ise, genetik algoritma kullanarak dinamik enerji ve maliyet etkin çoklu İHA rotalama problemi sunulmuştur. Bu iki uygulamanın değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonları bu bölümde sunulmuştur. Bu bölümde uygulamaların teorik temelleri ortaya konmuştur. Aynı zamanda söz konusu uygulamalar için geliştirilen hesaplama modelleri ve algoritmalar da detaylandırılmıştır.

Üçüncü bölümde açıklanan uygulamalara dayanan dördüncü bölümde, iki uygulamadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonuçlar eleştirel bir bakış açısıyla incelenmekte olup, acil durum lojistiği, İHA ve İKA dağıtımının verimliliği ile afet müdahale stratejileri üzerindeki daha geniş etkileri tartışılmaktadır.

Araştırmanın sonuç bölümünde ise, tezin acil durum lojistiği ve otonom sistemler alanına genel katkıları ortaya konmuştur. Uygulamalardan elde edilen sonuçlar araştırmanın amaçları doğrultusunda değerlendirilmiş olup, acil durum senaryolarında İHA ve İKA optimizasyonu anlayışına etkisi vurgulanmıştır. Ayrıca, çalışmada elde edilen sonuçlar çerçevesinde gelecekte ilgili alanda yapılacak araştırmalar için öneriler geliştirilmiştir.

BİRİNCİ BÖLÜM

LİTERATÜR TARAMASI

Bu bölümde, afet yönetimi ve afet yönetiminde İHA/İKA uygulamalarına yönelik literatür taraması yapılmıştır. İlk olarak, genel tanımlar ve tarihçe ele alınarak afet yönetiminin temel kavramları ve gelişimi incelenmiştir. Ardından, İHA ve İKA'ların kullanımına dair mevcut uygulamalar ve araştırmalar detaylandırılmıştır.

1.1. Genel Tanımlar ve Tarihçe

Bu araştırmada temel oluşturmak amacıyla, araştırmanın merkezinde yer alan temel kavramlar aşağıda açıklanmıştır:

- **Yöneylem Araştırması:** Daha iyi kararlar alınmasına yardımcı olmak için gelişmiş analitik yöntemlerin uygulanmasıdır. Bu çalışma kapsamında Yöneylem Araştırması, acil durum senaryolarında rota belirleme, kaynak tahsisi ve lojistik planlama optimizasyonunu ifade etmektedir (Brown ve Easterfield, 1951).
- **Acil Durum Lojistiği:** Acil durumlarda afetzedelerin taleplerini karşılamak amacıyla malzeme teslimatı ve ilgili bilgilerin çıkış noktasından tüketim noktasına kadar verimli, uygun maliyetli akışını ve depolanmasını planlama, uygulama ve kontrol etme sürecidir. Afetlere hızlı müdahale mekanizmalarını kapsar ve etkilenen bölgelere malzeme ile hizmetlerin zamanında ulaştırılmasını sağlamaktadır (Caunhye vd., 2012).
- **İnsansız Hava Araçları (İHA):** Genellikle drone olarak adlandırılan bu hava araçları, üzerinde pilot bulunmayan hava araçlarıdır. Uzaktan veya otonom olarak kontrol edilirler ve bu araştırmada havadan gözetleme, haritalama ve acil durum malzemelerinin teslimi gibi görevler için kullanılmaktadır.
- **İnsansız Kara Araçları (İKA):** Yerde insan varlığına gerek duymadan çalışan robotik platformlardır. İKA'lar insanlar için erişilemez veya tehlikeli olabilecek alanlarda nakliye, teslimat ve keşif amacıyla kullanılmaktadır.

- Rotalama Algoritmaları: Araçların izleyeceği en verimli yolları belirlemek için kullanılan hesaplama stratejileri. Acil durum lojistiğinde bu algoritmalar, mesafe, hız ve yük kapasitesi gibi faktörleri göz önünde bulundurarak malzemelerin teslimatını optimize etmek için oldukça önemlidir (Li vd., 2022).
- Genetik Algoritma: Doğal seçim sürecini taklit ederek optimizasyon ve arama problemlerini çözmek için kullanılan evrimsel algoritmaların bir alt kümesidir. Bu araştırmada acil durum lojistiğinde yönlendirmenin dinamik ve karmaşık doğasını ele almak için genetik algoritmalar kullanılmıştır (Gen ve Cheng, 1999).
- Son-Kilometre Teslimatı: Malların bir nakliye merkezinden nihai varış noktasına aktarıldığı teslimat sürecinin son ayağını ifade eder. Acil durum lojistiğinde bu aşama, malzemelerin genellikle zorlu koşullar altında acil ihtiyaç sahiplerine ulaşmasını sağlamak için kritik öneme sahiptir (Boysen vd., 2020).
- Çoklu İHA-Çoklu Ziyaret: Malzeme dağıtımı için birden fazla İHA'nın birden fazla ziyaret gerçekleştirmesini içeren bir strateji. Bu yaklaşım, acil durum malzemelerinin birden fazla yere dağıtımında kapsamı ve verimliliği en üst düzeye çıkarmayı amaçlamaktadır.

Tez, bu tanımları ortaya koyarak acil durum lojistiğinin inceliklerini ve afetlerin etkisini azaltmada otonom sistemlerin yenilikçi kullanımını tartışmak için net bir çerçeve oluşturmakta olup, araştırmancının katkılarını ve bulgularını anlamak için sağlam bir referans noktası sağlamaktadır.

İkinci Dünya Savaşı sırasındaki stratejik askeri teknolojilerden doğan Yöneylem Araştırması, Acil Durum Yönetimi de dahil olmak üzere çeşitli sivil ve endüstriyel alanlara nüfuz eden verimlilik ve optimizasyonun temel ilkelerini ortaya koymuştur (Yıldırım, 2021). 20. yüzyılın ikinci yarısında doğal afetlerin ve kentsel krizlerin artmasıyla birlikte acil durum lojistiğinin ayrı bir alan olarak ortaya çıkması, etkilenen nüfus üzerindeki etkilerin azaltılması için hızlı, etkin ve koordineli müdahale mekanizmalarının gerekliliğinin altını çizmiştir.

Dünya 21. yüzyıla birlikte yapay zekâ ve bilgi çağına girmiş bulunmaktadır. Bu gelişmeler, otonom araçların sivil uygulamalara, özellikle de acil durum lojistiğine entegrasyonunu teşvik eden önemli teknolojik atılımlara sebep olmuştur. İHA ve

İKA'ların potansiyel kullanımı, askeri keşiflerin ötesinde, havadan haritalama, arama ve kurtarma operasyonları ile acil durum malzemelerinin teslimatını kapsayan görevlerde artmıştır. Bu sayede acil durum lojistiğinde de yenilikçi gelişmelere sebep olmuştur. Bu araştırma kapsamında, otonom sistemlerin kullanımını optimize etmek, teslimat verimliliğini ve etkinliğini artırmak için yönlendirme algoritmalarına, araç koordinasyonuna ve yük optimizasyonuna odaklanılmıştır.

Bu gelişmelere paralel olarak, genetik algoritmalar ve makine öğrenimi modelleri de dahil olmak üzere hesaplama algoritmalarının evrimi, dinamik ve belirsiz ortamlarda rotalama ve lojistik optimizasyonunun karmaşıklıklarını yönlendirmek için kompleks araçlar olarak sunulmuştur. Yenilikçi araştırmalar, acil durum lojistiği ve otonom sistem teslimatlarının gerçek zamanlı uygulanabilirliği üzerine yoğunlaşmıştır. Günümüzün odak noktası, enerji ve maliyet verimliliği sağlarken operasyonel hızı ve dinamizmi artıran bütünsel İHA/İKA sistemleri geliştirmektir.

1.2. Afet Yönetimi

Afetler, genellikle doğal tehlikeler veya insan faaliyetleri nedeniyle önemli ölçüde bozulma, yıkım ve sıkıntıya yol açan olaylardır. Afet yönetimi, bu tür olaylara hazırlık yapmak, müdahale etmek ve etkili bir şekilde iyileşmek için uygulanan süreç ile stratejileri kapsar. Bu süreç, afetlerin bireyler, topluluklar ve toplumlar üzerindeki etkisini azaltmaya katkıda bulunan çeşitli disiplinleri içermektedir (Christoplos vd., 2001).

Afet yönetimi, korumayı, yaşam kalitesini, dayanıklılığı ve sürdürülebilir kalkınmayı artırırken sosyal, ekonomik ve iklimle ilgili riskleri azaltmayı amaçlayan kapsamlı bir yaklaşımı içermektedir (Widowati, 2022). Otomasyon ve yapay zeka, afetlerin öngörülmesi, afetler sırasında operasyonların yönetilmesi ve iyileştirme çabalarının kolaylaştırılması için etkili durumsal farkındalık sağladığından afet risk yönetiminde oldukça önemlidir (Thekdi vd., 2023). Sendai Afet Risk Azaltma Yapısı, afet yönetiminde mevcut ve gelecekteki riskleri azaltmak için kamu ve özel kurumlar arasında ortaklıklar kurulmasının önemini vurgulamaktadır (Zhang vd., 2023).

Afet yönetimi araştırmaları, mühendislik, tıp, acil sağlık hizmetleri, hemşirelik, psikoloji, sosyoloji, siyaset bilimi, coğrafya ve kamu politikası gibi alanlardan yararlanan çok disiplinli bir yaklaşımı içermektedir. Örneğin, hemşireler arasında afete

hazırlık üzerine yapılan araştırmalar (Labrague vd., 2018), afetlere hazır olma durumunun iyileştirilmesinde eğitim ve öğretimini önemini vurgulamaktadır. Afet müdahalesi için etik rehberlik (Leider vd., 2017), afet yönetiminde ahlaki açıdan uygun araçlara duyulan ihtiyacı belirtmektedir. Afetlerin sağlık boyutları üzerine yapılan araştırmalar (Birnbaum vd., 2015), mekanizmaları anlamak, riskleri azaltmak ve toplum direncini artırmak için epidemiyolojik çalışmalara odaklanmaktadır.

Ayrıca, afet yönetimi zarar görebilirlik ve dayanıklılığı (Baker, 2009), sosyal sermaye etkilerini (Albrecht, 2018) ve afet planlamasında sosyal bilimlerin rolünü (Tironi ve Manriquez, 2019) anlamayı da içermektedir. Bunun yanı sıra, afete hazırlık kabiliyetlerinin (Zhai ve Lee, 2023), afet riskinin azaltılmasında yönetişimin (Lauta vd., 2018) ve afetlerin mekânsal dağılımının (Soto vd., 2015) analizini de kapsamaktadır. Afet yönetimi ayrıca, afetlerden sonra toplulukları yeniden inşa etmek (Mulligan, 2013) ve başarılı afet risk azaltma çabalarından dersler çıkarmak gibi geçmiş deneyimlerden öğrenmeyi de içermektedir.

Afetlere yönelik hazırlık faaliyetleri, risk ve zarar azaltma, hazırlık, müdahale ve iyileştirme olmak üzere dört başlıktan oluşmakta olup Şekil 2.1.'de sunulmuştur (Aydin vd., 2017).

Hazırlık aşaması, afet durumunda oluşması muhtemel kayıpların azaltılması ve acil yardım ihtiyaçlarının karşılanması için, arama-kurtarma çalışmalarının planlanması ve operasyonel anlamda aktif hale getirilmesine yönelik çalışmaları kapsamaktadır (Şahin, 2009).

Afet öncesi yürütölen faaliyetler, planlama, satın alma, taşımacılık, depo yönetimi, raporlama ve insan kaynaklarının artırılması gibi başlıkları kapsamaktadır (Tanyaş, 2013). Bu başlıklara ek olarak, sağlık, barınma ve acil durumlar için afet yönetim birimleri tarafından yönetilen depolarda bulunan her tür ihtiyaç malzemelerinin dağıtımı için lojistik merkezlerinin kurulmasını da kapsamaktadır.

Risk ve zarar azaltma evresi, afet öncesi gerekli kurumların olası afet durumlarını gerçek zamanlı simöle ederek olası etkilerini en aza indirici tedbirler almasıdır. Bu aşama, iyileştirme ile yeni bir afet durumuna kadar olan süreci kapsamaktadır.

Bu aşamada insanları, mal, yapı, hizmet, doğal ve kültürel kaynakları korumak ile afet sonrası ve sırasındaki çalışmalarının maliyetini azaltmak amaçlanmaktadır. (Kadioğlu, 2011).

Müdahale aşamasında, afet durumunda ilk zamanların kritikliği göz önünde bulundurularak afetzedelerin kurtarılması, yaralıların tedavisinin planlanması, lojistik, levazım, güvenlik ve psikolojik destek gibi yaşam gereksinimlerinin karşılandığı aşamadır. Müdahale faaliyetlerinin kısa süre içerisinde en uygun yöntemlerle yapılması hedeflenir (Şahin, 2009).

İyileştirme aşaması, afet yaşanan bölgede bulunan insanların ihtiyaçlarının karşılanması, hayatın bir an önce normale döndürülmesi için gereken faaliyetlerden oluşur. Normale dönüş süresinin mümkün olduğunca kısaltılması sürecin başlıca amacıdır (Aydın vd., 2017).



Şekil 2.1. Afet Yönetim Sisteminin Aşamaları

“Uluslararası Afet Yönetimi” terimi, iki ayrı ancak iç içe geçmiş konsepti temsil etmektedir. Dünya genelinde var olan çeşitli acil durum ve afet yönetim sistemleri ve yapıları üzerine çalışma ve afet durumunda bir ülkenin yanıt mekanizmalarının kapasitesinin aşıldığı senaryolarda afet yönetimi üzerine çalışmalardır.

Her ülke, her hükümet ve her toplum için aşağıda sıralanan başlıklar farklılaşmaktadır (Kapucu, 2008):

- Kendi kırılganlıkları ve bunların kök nedenleri,
- Risk algısı ve bunu belirlemek ve analiz etmek için kullanılan yöntemler;
- Riski yönetmek amacıyla oluşturulan kurumlar, sistemler ve yapılar;
- Riskin yönetimini ve gerçekten meydana gelen olayların yönetimini yönlendiren yasal yetkililer;
- Afet olaylarına yanıt vermek üzere geliştirilen mekanizmalar ve bu mekanizmaların yanıt kapasitesi.

1.3. Afet Yönetiminde İHA ve İKA Uygulamaları

Dünya genelinde kentsel alanların yoğunluğu her geçen gün daha da artmaktadır. Bu artışa paralel olarak, geleneksel kara taşımacılığının verimlilik ve sürdürülebilirlik açısından kriz durumlarında, sistemin sağlıklı çalışmadığı gözlemlenmektedir (İslam vd., 2023).

İklim değişikliğinin artık somut olarak gözlemlendiği günümüzde, İHA kullanımının sağladığı çevresel faydalarının da önemi artmaktadır (Wu vd., 2023). Geleneksel acil durum lojistiği yöntemleri genellikle fosil yakıtla çalışan araçlara dayanmakta olup afetlere müdahale araçları karbon salınımı sorununa katkıda bulunmaktadır. Buna karşılık, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan İHA'ların ise daha sürdürülebilir bir alternatif oldukları söylenebilmektedir. Bu, verimlilik ve kamusal faydanın yanı sıra sürdürülebilirliğe öncelik veren akıllı şehirlerin daha uzun vade hedefleriyle de örtüşmektedir. İklimsel belirsizliklerle dolu bir geleceğe doğru ilerlerken, İHA gibi otonom sistemlerin akıllı şehirlerin envanterinde vazgeçilmez bir araç olarak öne çıktığı, acil durum lojistiğinin sadece hızlı ve verimli değil, aynı zamanda sürdürülebilir olmasına da katkı sağlayabilecekleri düşünülmektedir.

1.3.1.Kentsel Alanlarda Hava Taksiler ve Mobilite Çözümleri

Geleceğin akıllı şehirlerinde hava taksi konseptinin kara taşımacılığının yükünü azaltması bakımından uygulanabilir bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Rajendran ve Pagel, 2020). Dikey kalkış ve iniş yapabilme özelliğine sahip VTOL teknolojilerini kullanan hava taksilerin daha verimli, daha hızlı ve potansiyel olarak daha çevreci bir ulaşım şekli olarak hizmet verebileceği düşünülmektedir (Cohen vd., 2021). Hava taksiler, günlük işe gidiş gelişleri kolaylaştırmanın ötesinde yoğun karayolu trafiğinden etkilenmeden ve mevcut toplu taşıma sistemleri üzerindeki baskıyı azaltarak, kısa mesafeli seyahatlerin çevre dostu yöntemler kullanarak aşılmasına olanak sağlayacaktır (Salucci vd., 2021). Bu teknolojik yeniliğin akıllı şehirlerin mobilite çözümlerinin bütünleşmiş bir parçası haline gelerek, mevcut karayolu ve demiryolu ağlarıyla sorunsuz bir şekilde çalışan tamamen yeni bir ulaşım katmanı sunabileceği söylenebilmektedir.

Akıllı şehirlere yönelik kentsel hava teknolojileri geliştikçe, acil durum senaryolarında kullanım koordinasyonu sağlanması açısından, birleşik, akıllı bir lojistik sisteme entegrasyonları elzem hale gelmektedir. Böyle bir sistemin gerçek zamanlı veri analitiği, optimum yönlendirme için makine öğrenimi algoritmaları ve güvenli biçimde takip için blok zinciri teknolojilerini kullanabileceği söylenebilir. Sistemin hava durumu değişiklikleri, acil durum uyarıları ve belirli malzemelere yönelik talepler gibi dinamik koşullara uyum sağlayabileceği ifade edilebilir. Bu sayede bütünsel, uyarlanabilir ve önemli ölçüde verimli bir acil durum lojistik sistem mimarisi oluşturulabilmesi mümkün olabilir (Wei vd., 2024).

Urban Air Mobility-Kentsel Hava Hareketliliği (UAM), kentsel hava sahasında, güvenli, sürdürülebilir ve erişilebilir bir hava taşımacılığı sistemi öngören bir kavramdır. Hava taksi hizmetleri, son-nokta teslimatı ve hastaneler arası tıbbi teslimat dahil olmak üzere çeşitli uygulamaları kapsamaktadır. Literatürde bulunan çalışmalar, bu kullanım alanlarına ilişkin potansiyel faydalarını ve zorluklarını araştırmaktadır (Scott ve Scott, 2017).

Hava taksi hizmetleri, kentsel alanlarda gelecek vaat eden bir ulaşım şekli olarak büyük ilgi görmüştür. Araştırmacılar, hava taksi sektörünün pazar potansiyelini, talep analizini ve pazar dinamiklerini incelemişlerdir (Goyal vd., 2021). Hava taksi

hizmetlerinin fizibilitesini ve kabulünü anlamak amacıyla yolculuk mimarisi, altyapı gereksinimleri ve tüketici tercihleri gibi faktörler araştırılmıştır (Rajendran ve Srinivas, 2020).

Akıllı şehirlerde hava taksi hizmetleri, son-nokta teslimatı ve tıbbi teslimat gibi kentsel hava sahası kullanım alanlarının potansiyel faydalarını vurgulamaktadırlar. Bununla birlikte, başarılı bir uygulama için altyapı, kanuni düzenlemeler, güvenlik ve halkın kabulü ile ilgili zorlukların ele alınması gerekmektedir. Gelecekteki araştırmaların bu zorlukları ele almaya ve kentsel alanlarda bu teknolojilerin potansiyelini en üst düzeye çıkarmak için yenilikçi çözümler keşfetmeye odaklanmalarının faydalı olacağı düşünülmektedir.

Dünya genelinde şehirlerde akıllı teknolojilerin kentsel yaşamın çeşitli yönlerine entegre etme çalışmalarının hızlanması ile, İHA'ların acil durum lojistiğinde önemli bir konuma geldiği gözlenmektedir. Akıllı şehirler, yaşam kalitesini artırmak, sürdürülebilirliği geliştirmek ve kamu güvenliğini sağlamak için teknolojiden yararlanmayı amaçlamaktadır (İsmagilova vd., 2019). İHA'lar, hızlı konuşlandırma yetenekleri, manevra kabiliyetleri ve maliyet etkinlikleriyle bu hedeflere yönelik önemli katkı sağlamaktadır. Acil durumlarda İHA'lar, temel malzemeleri, tıbbi yardımı hızlı bir şekilde ulaştırabilir ve hatta gerçek zamanlı veri ve durumsal farkındalık sağlayıp, aynı anda havadan iletişim merkezi görevi de üstlenebilmektedirler. Bu tarz teknolojik otonom hava ve kara araçlarının akıllı şehir lojistik altyapısına entegrasyonları ile, daha hızlı ve daha verimli müdahale sürelerine ek olarak daha etkin afet hazırlık ve yönetim sistemlerinin de geliştirilmesi mümkün olabilecektir.

Otonom sistemlerin akıllı şehir lojistik altyapısına entegrasyonu, iklim değişikliğinin artan etkileri nedeniyle gün geçtikçe öneminin daha da artacağı ortadadır. Aşırı hava olayları daha sık ve yoğun hale geldikçe, yaşanan afetlerin sayısının da aynı oranda arttığı gözlemlenmektedir. Kentsel alanlar, sel, deprem, sıcak hava dalgaları ve orman yangınları gibi iklim değişikliğinin etkilerine karşı özellikle savunmasızdır. Bu gibi acil durumlarda, yardım ulaştırmak ve hasarı değerlendirmek için kullanılan geleneksel yöntemler, kapanan yollar veya tehlikeli koşullar nedeniyle çoğu zaman yetersiz kaldığı bilinmektedir. İHA'lar, çeşitli çevresel kısıtlamalar altında çalışabilen daha esnek ve uyarlanabilir çözümler sunmaktadırlar. Bu gibi otonom araçların kullanımı, afetten etkilenen ulaşılması güç bölgelerdeki nüfusa gerekli lojistik yardımın

hızlı biçimde ulaşmasını sağlayarak iklim kaynaklı afetlerin olumsuz etkilerini azaltılabilecektir (X. Huang ve Song, 2018).

1.3.2. Sağlık ve Acil Durum Lojistiğinde İHA Kullanımı

Sağlık alanında, hava ambulansları kentsel hava sahasını kullanarak hastaneler arası acil hasta nakli için umut verici bir çözüm sunmaktadır. Geleneksel ambulans hizmetleri genellikle yol tıkanıklığı nedeniyle sorun yaşamakta ve hayati tehlike yaratabilecek gecikmelere yol açmaktadırlar. Hava ambulansları, bu gibi sorunları yaşamadan özellikle trafik yoğunluğu olan saatlerde yaşanan tıbbi acil durumlarda önemli ölçüde hızlı müdahale olanağı sunabilecektir (Lockwood ve Ackery, 2014). Bu teknoloji, uzun vadeye yönelik bir hedef değildir. Global ölçekte şirketlerin ve kamu kuruluşlarının, acil tıbbi durumlar için sadece hastaları değil aynı zamanda aşı, kan ve hayat kurtaran ilaçlar gibi tıbbi malzemeleri de doğrudan olay yerine veya tıbbi tesislere ulaştırabilen otonom İHA teknolojileri alanlarında yatırımlarının artarak devam ettiği bilinmektedir (Scott ve Scott, 2017).

Acil müdahale ve tıbbi teslimat alanında kentsel hava sahası teknolojilerinin kullanımı süreçleri önemli ölçüde iyileştirebilecektir. Hava ambulansları ve İHA'lar gibi hava araçları, tıbbi malzemelerin, nakil için organların ve acil tıbbi hizmetlerin hızlı ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlayarak sağlık hizmetlerinde genel olarak daha hızlı ve etkin çözümler sunabilecektir.

Ayrıca, kentsel hava sahası teknolojilerinin akıllı şehirlere entegrasyonu, vatandaşların genel yaşam kalitesine de olumlu yönde katkı sağlayacaktır. Bu teknolojiler gerçek zamanlı veri toplama ve analizine olanak tanıyarak daha iyi kentsel planlama, kaynak yönetimi ve karar alma süreçlerini kolaylaştıracaktır (Ismagilova vd., 2019). Ayrıca, halk katılımı ile bireylerin şehirlerinin gelişimine ve iyileştirilmesine katkıda bulunmaları için imkan sağlayacaktır (Kostko ve Pecherkina, 2021).

Bu farklı teknolojiler arasında veri paylaşımı ve birlikte çalışabilirlik, acil durum lojistiğini daha etkili hale getirmek için son derece önemlidir. Hava taksileri, hava ambulansları ve teslimat İHA'larından gelen verilerin entegrasyonu, büyük ölçekli acil durumlarda vazgeçilmez olabilecek kapsamlı bir durumsal farkındalık sağlayabilmektedir. Örneğin, teslimat İHA'ları hava koşulları veya engellerle ilgili gerçek zamanlı verileri paylaşabilir ve bu veriler daha sonra hava ambulanslarının

veya hava taksilerinin yeniden yönlendirilmesi için kullanılabilmesine imkân sağlayabilir. Makine öğrenimi, rota çizelgeleme gibi gelişmiş algoritmalar, bu bilgiyi gerçek zamanlı olarak işlemek, lojistik dağıtımını optimize etmek ve müdahale sürelerini önemli ölçüde iyileştirmek amacıyla kullanılabilmesine imkân sağlayacaktır.

1.3.3. Son-nokta Teslimat ve Tedarik Zinciri Optimizasyonu

Son-nokta teslimatı, İHA'ların önemli bir etki yaratabileceği belki de en acil uygulama alanlarından biri olarak görülmektedir (Dorling vd., 2017). İster tıbbi malzeme ister kargo olsun, teslimat rotasının son nokta dağıtımı, genellikle en karmaşık ve zaman alıcı olanıdır (Peinkofer vd., 2020). Küçük paketlerin ve kritik tıbbi malzemelerin teslimatı için yapılan denemelerde kullanılan İHA'lar bu sorunu çözme konusunda ciddi fayda sağlamaktadırlar (Garg vd., 2023). İHA teknolojileri geliştikçe, bu yöntemle daha büyük yükler taşınabileceği ve daha uzun mesafelerde çalışarak tedarik zincirlerinin verimliliğinin artırılabilmesi mümkün olabilir. Bunun özellikle zamanında teslimatın kritik önem arz ettiği acil durum senaryolarında ya da çevresel felaketler veya altyapı kısıtlamaları nedeniyle yer tabanlı teslimatın pratik olmadığı durumlarda hayati önem taşıyabileceği düşünülmektedir (Faiz vd., 2022).

İHA'lar veya İHA kullanılarak yapılan son-nokta teslimatı, kentsel lojistiğin verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Çalışmalar, son nokta teslimatı için İHA kullanmanın, daha kısa teslimat süresi, maliyet tasarrufu ve çevresel avantajlar gibi faydalarını ve zorluklarını araştırmışlardır (Mangiaracina vd., 2019). İHA'ların lojistik ağına entegrasyonu, hava sahası entegrasyonu, düzenleyici kanunlar ve halkın kabulü gibi hususların dikkate alınmasını gerektirmektedir (Straubinger vd., 2020).

UAM kullanarak gerçekleştirilen tıbbi teslimat, özellikle acil durumlarda sağlık lojistiğinde devrim yaratma potansiyeline sahip bir teknolojik çözüm olarak görülmektedir. Hava ambulansları ve İHA'lar, organların ve acil tıbbi malzemelerin hızlı ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlayabilmektedirler (Cohen vd., 2021).

UAM teknolojilerinin başarılı bir şekilde uygulanmasında halkın kabulü çok önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmalar, algılanan faydalar, riskler ve çevre dostu olma dahil olmak üzere İHA tabanlı lojistik teknolojilerine yönelik kamu tutumlarını ve niyetlerini etkileyen faktörleri incelemiştir. Güvenlik endişeleri, askeri kullanım ve kötüye

kullanım da halkın kabulünü etkileyen önemli faktörler olarak tanımlanmıştır (Clothier vd., 2015).

Kentsel alanlarda nüfus artışına paralel olarak artan paket teslimatı hacmi, trafik sıkışıklığına ve hava kirliliğine olumsuz katkıda bulunmaktadır. İHA tabanlı son-nokta teslimatı konseptlerinin uygulanması, şehir merkezlerine giren teslimat araçlarının sayısını azaltarak bu sorunların hafifletilmesine yardımcı olabileceği belirtilmektedir (Boysen vd., 2020). İHA'lar, insansız çalışabilme, hava yolu ile kara trafiğinden kaçınma, kara aracına kıyasla daha hızlı teslimat süreleri ve kilometre başına daha düşük nakliye maliyetleri gibi çeşitli avantajlar sunmaktadır (Ha vd., 2018).

Akıllı şehirlerde kullanılan otonom sistemler ve Nesnelerin İnterneti (IoT), iletişim, ulaşım, tarım (Güzey vd., 2020), emniyet ve güvenlik, afet azaltma, çevre koruma, enerji tasarrufu, sağlık hizmetleri ve bunlar gibi çeşitli uygulamaları desteklemede hayati bir rol oynamaktadırlar. İHA'lar ve IoT teknolojileri, verimli ve etkili hizmet sunumu, hava durumu izleme, e-atık azaltma ve sağlık desteği sağlayarak şehirlere yönelik daha akıllı çözümler sunulmasına katkıda bulunmaktadır (Alsamhi vd., 2019).

Son dönemde yapılan araştırmalar, şehirlere yönelik İHA tabanlı dağıtım sistemlerini optimize etmeye odaklanmıştır. Hem kara araçları, hem de İHA'lar için verimli rotalar bulmayı amaçlayan, İHA'larla araç rotalama problemini çözmek için uyarlanabilir farklı meta sezgisel algoritmalar araştırılmaktadır (Sacramento vd., 2019). En yakın komşu arama algoritmaları, uçan yardımcı Gezgin Satıcı Problemi (GSP) için teslimat süresini iyileştirme potansiyeli göstermiştir (Freitas ve Penna, 2020). Ayrıca, İHA kullanımı kara araçlarının görevlerini yerine getirme sürecine havadan teslimat yaparak katkı sağlamaktadır. Bu sayede genel teslimat sürecini optimize etmektedirler (Poikonen vd., 2017).

Akıllı şehirlerde İHA tabanlı son-nokta teslimat teknolojisinin benimsenmesi çok sayıda fayda sağlama potansiyeline sahiptir. İşçilik maliyetlerini büyük ölçüde düşürerek, geleneksel paket teslimat yöntemlerini değiştirme potansiyelini artırmaktadır (Aurambout vd., 2019). Ayrıca, elektrikle çalışan İHA'lar, çevresel etkinin azaltılmasına katkıda bulunurlar ve kara trafiğinde yaşanan sıkışıklığın azaltılmasına ciddi ölçüde katkı sağlamaktadırlar (Borghetti vd., 2022).

Genel olarak yapılan alışmalar, İHA'ların acil durum lojistiğindeki potansiyelini ve akıllı şehirler için faydalarını vurgulamaktadırlar. İHA'ların maliyet ve zaman tasarrufu, trafik sıkışıklığı ve kirliliğın azaltılması ile gelişmiş hizmet sunumu gibi avantajlar sundukları belirtilmektedir. İHA rotasının optimize edilmesi ve IoT teknolojileriyle entegre edilmesi, acil durum lojistiğindeki etkinliklerini daha da artırabilir ve şehirlere yönelik daha akıllı özömler sunulmasına katkı sağlayabilir.

Son-nokta teslimatı, özellikle şehir içi lojistiğı açısından önem arz etmektedir ve İHA'ların kullanımı, verimliliğı artırmak ve maliyetleri düşörmek için potansiyel bir özömler olarak ortaya çıkmıştır (Liu vd., 2022). İHA'lar, son-nokta teslimatlarını gerçekleştirme ve acil durumlara müdahale etme maliyetini ve süresini önemli ölçüde azaltma potansiyeline sahiptirler (Dorling vd., 2017). Bununla birlikte, İHA teslimatının benimsenip yaygınlaşması için güvenlik, güröltü azalımı, halkın kabullenmesi gibi çeşitli faktörlerin dikkatle değeriendirilmesinde fayda olduğı düşünölmektedir.

Tüketici tercihleri, İHA teslimatı da dahil olmak üzere son-nokta teslimat yöntemlerinin başarısında önemli bir rol oynamaktadır. Araştırmalar, insansız hava aracı teslimatı da dahil olmak üzere yenilikçi son-nokta paket teslimatına yönelik tüketici tercihlerinin kolaylık, güvenilirlik ve güven gibi faktörlerden etkilendiğini göstermiştir (Merkert vd., 2022). Bu tercihlerin bilinmesi, tüketici beklentilerini karşılayan etkili İHA teslimat sistemlerini geliştirmek için önem arz etmektedir.

Son-nokta teslimatı ile alakalı yürütölen çalışmalar, son-nokta teslimatında İHA'ları kullanmak için farklı konseptleri araştırmıştır. İki popüler konsept, merkeze bağılı doğrudan teslimat için İHA'ların kullanılması ve İHA'ların taşıma kapasitesini artırmak amacıyla mobil şarj istasyonları olarak kullanılmasıdır (Boysen vd., 2020). Bu konseptler, İHA teslimat rotalarını optimize etmek ve verimliliğı artırmak için potansiyel özömler sunmaktadır.

İHA'ların son-nokta teslimat sistemine entegrasyonunda teknik zorlukların da ele alınmasını gerektirmektedir. Bu zorluklardan biri, zaman aralıklarıyla verimli teslimat sağlamak için kara aracı ve İHA rotalarının senkronizasyonudur (Li ve Wang, 2022). Ayrıca, taşıma kapasitesinin artırılarak İHA'lar için hareketli şarj istasyonları olarak kullanılması hem enerji tasarrufuna yardımcı olabilmekte hem de İHA destekli son-nokta teslimatının sürdürölebilirliğini artırabilmektedir (Moadab vd., 2022).

Son-nokta teslimatı için İHA kullanımının fizibilitesini ve faydalarını değerlendirmek üzere vaka çalışmaları yapılmıştır. İtalya'nın Milano kentinde yapılan sayısal bir vaka çalışması, İHA teslimatının küçük ve hafif paketleri başarılı bir şekilde teslim edebileceğini, çevresel ve sosyal etkileri azaltırken kargo şirketleri için kar sağladığını göstermiştir (Borghetti vd., 2022). Bir kan teslimatı çalışmasında, son-nokta teslimatı için İHA teknolojisinin kullanılmasının sürdürülebilirliğinin değerlendirilmesi, İHA teslimatının benimsenmesinde çevresel ve sosyal faktörlerin dikkate alınmasının önemini vurgulamıştır (Rashidzadeh vd., 2021).

Hannan ve arkadaşları (2021) tarafından son-nokta teslimatının güvenilirliğinin artırılması amacıyla tüketici kimlik doğrulamasına yönelik çerçeveler önerilmiştir. Merkezi olmayan bir hibrit bilgi işlem tüketici kimlik doğrulama çerçevesinin, İHA tabanlı son-nokta teslimatının eksiksiz ve güvenilir olmasını sağlamada etkili olduğu görülmüştür.

İHA teslimatının uygulanabilirliğini değerlendirirken pazar potansiyeli ve vatandaşlara erişim önemli hususlardır. Avrupa şehirlerindeki pazar potansiyeline ve vatandaşlara erişime ilişkin Aurambout ve arkadaşları (2019) tarafından tahminler yapılmış ve İHA teslimatının lojistik sektörü üzerindeki potansiyel etkisinin önemi vurgulanmıştır.

Hava araçları ile son-nokta teslimatına ilişkin literatür, lojistik sektöründe İHA'ların benimsenmesiyle ilgili potansiyel faydaları, zorlukları ve dikkat edilmesi gereken hususları vurgulamaktadır. Tüketici tercihleri, operasyonel araştırmalar, teknik zorluklar, sürdürülebilirlik faktörleri ve pazar potansiyeli, İHA teslimat sistemleri tasarlanıp uygulanırken göz önünde bulundurulması gereken önemli hususlardır.

Kentsel alanlara yönelik acil durum lojistiğinde İHA kullanımı son yıllarda büyük artış göstermektedir. Kentsel alanlarda İHA ile teslimatın geniş ölçekte benimsenmesi, emisyonların ve kara trafiği sıklığının azaltılmasının yanı sıra lojistik şirketleri için maliyet tasarrufu da dahil olmak üzere birtakım toplumsal faydalar sağlama potansiyeline sahiptir (Doole vd., 2021).

Dağlık alan kurtarma görevleri gibi belirli acil durumlarda, İHA'lar kurtarma görevlilerine yardımcı olmak için potansiyel bir araç olarak araştırılmıştır (Holzmann vd., 2021). İHA'lar ayrıca sel, kasırga ve nükleer reaktör kazaları gibi felaketlerden sonra kentsel hasarı değerlendirmek için de kullanılmıştır (Merkert ve Bushell, 2020).

Denetim İHA'ları, yangınla mücadele ve acil durum birimlerinin tehlikeleri daha hızlı ve daha güvenli bir şekilde değerlendirmesine olanak sağlamanın yanı sıra lojistik şirketlerinin gemilerdeki yapısal sorunları tespit etmesine ve yol bakım şirketlerinin altyapı aşınma ve yıpranmasını izlemesine olanak tanıyarak acil durumlarda kesin faydasını kanıtlamıştır (Floreano ve Wood, 2015).

İHA'ların küçük boyutları, yüksek hızları ve zorlu arazi koşullarında çalışabilmeleri gibi avantajları, onları afet bölgelerinde ve diğer alanlardaki acil durum lojistiği görevleri için uygun hale getirmektedir (Hu vd., 2023). Ayrıca, İHA'ların yüksek nüfuslu kentsel şehirlerdeki tedarik zinciri ve lojistik sistemleri üzerindeki potansiyel etkisi incelenmiş ve ticari İHA kullanımı için düzenlemelerin kaldırılmasının önemi vurgulanmıştır (Gabani vd., 2021).

Acil durum lojistiğinde İHA teknolojisi kullanımının benimsenmesi için farklı zorlukların aşılması gerekmektedir. Bu zorluklara örnek olarak, acil durum lojistiğinde İHA kullanımını tam olarak gerçekleştirmek için düzenleyici ve operasyonel zorlukların ele alınması gerekmektedir. İHA'larla GSP gibi İHA rotalama problemleri için optimizasyon yaklaşımlarının ve sezgisel yöntemlerin geliştirilmesi, İHA tabanlı acil durum lojistiğinin verimliliğini ve etkinliğini artırmaya yardımcı olabilir (Agatz vd., 2018).

Tüketici tercihleri de İHA tabanlı acil durum lojistiğinin benimsenmesinde rol oynamaktadır. İHA ile teslimat da dahil olmak üzere yenilikçi son-nokta teslimat yöntemlerine yönelik tüketici tercihlerini anlamak, tüketici beklentilerini karşılayan etkili sistemler tasarlamak için önemlidir (Merkert vd., 2022).

İHA tabanlı acil durum lojistiğinin uygulanabilirliğini değerlendirirken pazar potansiyeli ve vatandaşlara erişim önemli hususlardır. Aurambout ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışmada, kentsel alanlarda pazar potansiyeline ve vatandaşlara erişime ilişkin tahminler yapılmış ve İHA teslimatının acil durum lojistiği üzerindeki potansiyel etkisine ilişkin öngörüler sağlanmıştır.

Genel olarak literatür, İHA'ların kentsel alanlarda acil durum lojistiğini önemli ölçüde geliştirme potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Zorlu arazilerde gezinme, hasarı değerlendirme ve malzemeleri hızlı ve verimli bir şekilde teslim etme yetenekleri, onları acil müdahale çabalarında değerli bir araç haline getirmektedir. Bununla birlikte, İHA'ların acil durum lojistiğindeki potansiyelini tam olarak

gerçekleştirip, düzenleyici ve operasyonel zorlukları ele almak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Akıllı şehirler için İHA destekli acil durum lojistiği kavramı henüz tam olarak kullanıma girmemiş bir gelecek teknolojisi olarak gözüke de geniş bir halk kabulü olmadan şehirlere tam entegrasyonu gerçekleşemez. Bu kabulü teşvik etmenin en etkili yollarından biri şeffaf iletişim ve kamu katılımıdır. Şehir yönetimleri ve ilgili makamlar, İHA teknolojilerinin faydalarını ve güvenlik özelliklerini sergilemek için eğitim kampanyaları ve halka açık gösteriler düzenlemelidir. Çalıştaylar, halka açık forumlar ve hatta interaktif atölye çalışmaları bu teknolojilere karşı duyulan güvensizliği ortadan kaldıracaktır. Bu sayede vatandaşlar, otonom hava ve kara araçlarının nasıl çalıştığı ile kentsel yaşamı nasıl iyileştirebileceğini öğrenebilirler. Vatandaşlara sorularını ve endişelerini dile getirebilecekleri platformlar oluşturmak, teknolojinin kamu ihtiyaçlarını daha iyi karşılayacak şekilde uyarlanmasına yardımcı olmanın yanı sıra güven de inşa edebilir.

Kentsel hava sahası teknolojileri, kentsel yaşamın çeşitli yönlerini geliştirerek akıllı şehirler için çok sayıda fayda sunmaktadırlar. Literatürde bulunan çalışmalar, bu teknolojilerin akıllı şehir bağlamında avantajları ve potansiyel uygulamaları hakkında fikir vermektedir.

Temel faydalardan biri, kara trafiğinin iyileştirilmesine yöneliktir. Kentsel hava sahası teknolojilerinin sağladığı hava taksi hizmetleri ve son-nokta teslimatı, trafik sıkışıklığını hafifletme ve şehir içi seyahat sürelerini azaltma potansiyeline sahiptir (Moridpour vd., 2018). Bu hizmetler daha hızlı ve daha esnek bir ulaşım şekli sağlayarak vatandaşlar için şehir içi ulaşımında daha hızlı ve etkin bir çözüm sunmaktadır (Neirotti vd., 2014).

Kentsel hava sahası teknolojileri çevresel sürdürülebilirliğe de katkıda bulunmaktadır. Hava taksileri ve diğer hava araçları, elektrikli veya hibrit elektrikli tahrik sistemleri kullanarak sera gazı emisyonlarını ve gürültü kirliliğini azaltarak daha temiz ve sessiz şehir hayatına imkan sağlayabilmektedirler (Myeong ve Shahzad, 2021). Ayrıca, kent ormancılığı ile bitki örtüsünün akıllı şehirlere entegrasyonu hava kalitesini artırabilmekte ve kentsel ısı adası etkisini azaltarak kentsel alanların genel yaşanabilirliğini artırabilmektedir (Uçar vd., 2020).

Son-nokta teslimatında kentsel hava sahası teknolojilerinin uygulanması lojistik ve e-ticarette devrim yaratabilme potansiyeline sahiptir. İHA'lar ve diğer insansız hava araçları hem malzemelerin verimli hem de zamanında teslim edilmesini sağlayarak trafik sıkışıklığını ve geleneksel teslimat yöntemleriyle ilişkili olan karbon emisyonlarını azaltacağı değerlendirilmektedir (Russo ve Cirella, 2018). Bu teknolojinin hem işletmelere hem de tüketicilere fayda sağlayacağı, kentsel lojistik ağlarının verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırma potansiyelinin olduğu ileri sürülebilir.

Akıllı şehirlere yönelik fayda sağlayacak diğer bir kullanım alanı ise İHA teknolojisine dayalı "sürü lojistiği" kavramıdır. Doğada bulunan ve sürü halinde hareket eden canlıların, karmaşık görevleri yerine getirmek için sürü davranış mantığı temel alınarak doğadan ilham alan bir İHA sürüsü, malzeme dağıtmak, iletişim kurmak ve hatta arama kurtarma operasyonları yürütmek için birlikte çalışabilir. Bu sadece acil durum müdahalelerini hızlandırmakla kalmayacak, aynı zamanda tek bir birimin arızalanması görevi önemli ölçüde engellemeyeceği için onları daha esnek hale getirecektir. Yine, oyun teorisi gibi Yöneyim Araştırması teknikleri, bu kooperatif sistemlerin tasarlanmasında yardımcı olabilir ve bireysel İHA'ların kolektif hedefi en üst düzeye çıkaracak şekilde çalışmasını sağlayabilmektedir.

Bu teknolojik yeniliklerin hayata geçirilmesinde politika ve düzenlemelerin önemi göz ardı edilmemelidir. Politika yapıcılar, inovasyonu engellemeden güvenlik ve gizliliği sağlayan bir düzenleyici çerçeve oluşturmak için araştırmacılar ve sektörel uzmanlarla yakın bir şekilde çalışmalıdır. Hava sahası yönetimi, veri gizliliği ve güvenlik protokolleri gibi alanların iyi düşünülmüş düzenlemelere ihtiyacı olduğu söylenebilir.

Halk nezdinde yeni teknolojilerin kabullenme oranını artırmaya yönelik bir diğer hayati yaklaşım da kanıtlanabilir güvenlik önlemleri ve hesap verebilirliktir. İHA'lar özellikle acil durum lojistiğinde daha kritik roller üstlendikçe, herhangi bir teknolojik veya operasyonel arıza ciddi sonuçlar doğurabilmektedir. Bu durum halkın güvenini sarsabilmektedir. Bundan dolayı sıkı güvenlik protokolleri, düzenli bakım kontrolleri ve şeffaf raporlama mekanizmaları mevcut olmalıdır. Buna ek olarak, güvenilir toplum kuruluşları ve liderleriyle kurulacak ortaklıklar, teknolojiyi destekleme ve güvenilirliğini artırma konusunda uzun bir yol kat edebilir. İnsanlara, İHA'ların ve diğer akıllı şehir teknolojilerinin sadece verimli değil aynı zamanda güvenli ve hesap verebilir olduğu

gösterildiğinde, yaygın olarak benimsenmelerini destekleme olasılıkları daha yüksektir.

Akıllı şehirlerde İHA tabanlı lojistik teknolojilerinin halk tarafından kabulü son yıllarda ilgi çeken bir konu olmuştur. Araştırmacılar, İHA tabanlı lojistik hizmetlerin benimsenmesine yönelik kamu tutumlarını ve niyetlerini etkileyen çeşitli faktörleri incelemişlerdir.

Yapılan bir çalışmada, İHA ile yemek teslimatı hizmetlerinin sonuçları incelenmiş ve çevre dostu olma algısının tüketicilerin bu tür hizmetleri kullanmaya yönelik tutum ve niyetlerini olumlu yönde etkilediği gözlemlenmiştir (Hwang ve Kim, 2019).

Bir başka çalışmada ise İHA ile yemek teslimatı hizmetlerinin kullanımından beklenen faydalar araştırılmış ve İHA'lara yönelik olumlu tutumların tüketicilerin bu hizmetleri kullanma, yakın çevresi ile iletişim ve bu hizmetler için daha fazla ödeme yapma niyetlerini önemli ölçüde etkilediği bulunmuştur (Choe vd., 2021).

İHA ile yemek teslimatı hizmetleriyle ilişkili algılanan riskler de incelenmiştir. COVID-19 pandemisinden önce ve sonra yapılan bir çalışmada, pandemi yaşandıktan sonra algılanan risklerin azaldığı tespit edilmiş, bu da kamu algısında İHA tabanlı lojistik teknolojilerinin daha fazla kabul görmesine yönelik potansiyel bir değişime işaret etmiştir (Choe vd., 2021).

Bir diğer çalışmada ise, İHA'ların benimsenmesine yönelik kamu tutumlarını ve niyetlerini etkileyen faktörler araştırılmıştır. Tüketicilerin, kullanılabilirlik, kullanım kolaylığı, keyif ve öznel normlar gibi faktörlerin İHA teslimat hizmetlerini benimseme tutum ve niyetlerinin önemli belirleyicileri olarak tanımlanmıştır (Yoo vd., 2018).

Bir başka çalışmada kurtarma çalışanları arasında acil durum lojistiğinde İHA'ların kabulünü etkilemede operasyonel performansın, destek, eğitim ve pratik deneyimin önemi vurgulanmıştır (Holzmann vd., 2021).

Kentsel hava sahasında İHA operasyonlarının yönetimi ve düzenlenmesi de araştırılmıştır. Araştırmacılar İHA'ların akıllı şehir projelerine entegrasyonu ile ilgili zorlukları ve fırsatları incelemiş, güvenli ve verimli operasyonlar sağlamak için etkili yönetim ve düzenleme ihtiyacını vurgulamıştır (Tran ve Nguyen, 2022).

Yapılan alışmalar genel olarak, akıllı şehirlerde İHA tabanlı lojistik teknolojilerinin halk tarafından kabulünün evre dostu olma, beklenen faydalar, algılanan riskler, algılanan kullanışlılık, kullanım kolaylığı, öznel normlar ve operasyonel performans gibi faktörlerden etkilendiğini göstermektedir. Bu faktörlerin anlaşılması, akıllı şehirlerde İHA tabanlı lojistik hizmetlerinin başarılı bir şekilde uygulanması ve benimsenmesi için önem arz etmektedir.

İHA teknolojisinin ortaya çıkışı ve ilerlemesi, birçok sektörde değişikliklere neden olmuştur. Fotoğrafçılık, gözetleme, hassas tarım ve çevresel izleme gibi alanlarda verimlilik ve yenilikçi çözümler sağlamıştır. Lojistik ve teslimat hizmetleri alanında İHA'lar, son kilometre teslimatlarını dönüştürme potansiyeline sahip bir teknoloji haline gelmiştir. Taşıma yöntemlerine hızlı ve evre dostu alternatifler sunmaktadırlar. Ancak bu gelişmelere rağmen, İHA'ların ana akım lojistiğe tam olarak entegre edilebilmesi için ele alınması gereken zorluklar vardır. Bu zorluklar arasında faydalı yük kapasitesinin optimize edilmesi, enerji tktiminin etkin bir şekilde yönetilmesi ve verimli uçuş yollarının sağlanması yer almaktadır. Literatürde bu alanda yapılan çalışmalardan örnekler aşağıda sunulmaktadır.

İHA teknolojisi, gerçek zamanlı kontrol, araç yönlendirme sorunları, g yönetimi hususları, alan kullanım stratejileri, halk sağlığı sektörlerindeki uygulamalar ve çeşitli sektörlerde İHA'ların ekonomik ve operasyonel değerinin araştırılması gibi bir dizi araştırma alanını kapsamaktadır. Kangunde ve arkadaşları (2021), gerçek zamanlı İHA kontrolü zerine, İHA'ların zaman içinde kontrol edilmesiyle ilgili iş yükü yönlerinin yönetilmesine ışık tutan bir inceleme sunmaktadır.

Ayrıca, Dorling ve arkadaşları (2017), tarafından yapılan bir çalışmada, araç rotalama problemlerine odaklanarak İHA teslimatını araştırmışlardır. Enerji kullanımı, yük kapasitesi ve batarya ağırlığı arasındaki korelasyonu vurgulayarak çok motorlu İHA'lar için bir enerji tktim modelinin türetilmesine ilişkin bilgiler sunmaktadırlar. Otto ve arkadaşları (2018), sivil uygulamalarda hava araçları (İHA'lar) için optimizasyon yaklaşımları üzerine bir literatür araştırması yürütmüşlerdir. Araştırma, zellikle İHA'lara ve uzaktan algılamadaki uygulamalarına uyarlanmış optimizasyon stratejilerine genel bir bakış sunmaktadır.

İHA rotalama problemleri, araç rotalama, matematiksel optimizasyon, Bilgisayar Bilimi ve algoritma geliştirme gibi konuları kapsamaktadır. Çok sayıda alışma, Zhang ve Li

(2023) tarafından, incelenen eşzamanlı teslim alma ve teslim etme hizmeti ile ziyaret İHA araç rotalama problemi de dahil olmak üzere bu problemin yönlerine odaklanmıştır. Luo ve arkadaşları (2019) tarafından, kentsel yol sistemlerinde İHA'larla trafik devriye rotalama problemi araştırılmıştır. Singgih ve arkadaşları (2020) tarafından, gerekli gözlem kalitesi ve pil değişimini dikkate alan düğüm ve uç İHA gözetim problemi çalışılmıştır. Bu çalışmalar, problemin bu varyantları için formülasyonlar ve verimli çözüm metodolojileri önerirken, İHA rotalamasında yer alan karmaşıklıkları anlamamıza önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

Literatürde ayrıca İHA'ların kara aracı ile çalışma kombinasyonu da araştırılmıştır. Bu durum, kara aracı ve İHA'ları içeren iki kademeli rotalama problemi (Hà vd., 2020), son kilometre teslimat aracı ve sabit bir taşıyıcı rotası olan taşıyıcı araç sistemlerinin rotalanması (Othman vd., 2017) ve İHA kara aracı gözetim operasyonlarını optimize eden iç içe araç rotalama problemi (F. Zeng vd., 2022) gibi rotalama problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bu çalışmalar, İHA'ların kara araçlarıyla eşleştirilmesinin nasıl koordine ve optimize edileceğini, aksaklıkların rotalama süresini ve İHA planlamasını nasıl etkileyebileceği araştırılmıştır.

Doğrusal enerji tüketimi (Bruni vd., 2023), kara aracı ve İHA teslimat sisteminde enerji tasarrufu için rüzgar etkileri (Sorbelli vd., 2023) ve İHA içeren araç rotalama probleminde güç tüketim oranı ve rüzgar etkileri (Kim ve Kim, 2022) gibi faktörleri dikkate alan enerji İHA rotalama üzerine odaklanan çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalar, enerji verimli İHA rotalaması elde etmek için operasyonel modeller ve matematiksel optimizasyon teknikleri geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

İHA rotalama problemleri üzerine yürütülen algoritmik yaklaşımlarda ilerlemeler kaydedilmiştir. Örneğin Zudio ve arkadaşları (2021), toplama ve teslimat için hibrit araç İHA rotalama probleminin üstesinden gelmek için bir anahtar genetik algoritma geliştirmişlerdir. Wu ve arkadaşları (2022), geliştirilmiş komşu arama tekniklerinden yararlanan koordineli bir araç İHA yay rotalama yaklaşımı önermiştir. Bu çalışmalar öncelikle karmaşık İHA rotalama problemlerini ele almak için optimizasyon teknikleri ve sezgisel algoritmalar geliştirmeye odaklanmıştır.

Araçlar (İHA'lar) alanında dinamik yol planlama ve enerji verimli rotalama üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Takemura ve arkadaşları (2023), enerji verimli

yolları belirlemek için İHA'larda hem enerji tüketimini hem de algı farkındalığını dikkate alan bir planlama ve navigasyon çerçevesi sunmuştur.

Benzer şekilde Khan ve arkadaşları (2022), olay/hava durumu tahmini ve verimli yol planlama stratejileri aracılığıyla enerji verimliliği sunan afet senaryoları için uyarlanmış bir Dinamik İHA yaklaşımı sunmuştur. Melo ve arkadaşları (2021), zaman, maliyet ve enerji verimliliği gibi faktörleri vurgulayarak İHA yol planlamasında en iyiye ulaşma zorluğunu ele almıştır. Li ve arkadaşları (2022), dinamik yol planlamasının doğasını ve İHA uçuş verimliliğini artırma potansiyelini vurgulamıştır.

Huang ve arkadaşlarına göre (2018), İHA'lar için dinamik yol planlamasının görevlerin yerine getirilmesindeki önemi vurgulanmıştır. Dell'Amico ve arkadaşları (2021), özellikle enerji tasarrufunu en üst düzeye çıkaran yönlendirme ve planlama yollarına odaklanarak İHA destekli teslimatları iyileştirmenin yollarını araştırmıştır. Lánský ve arkadaşları (2023), ateş böceği algoritmasını kullanarak uçan ad-hoc ağlarda hem enerji kullanımını hem de bağlantı kalitesini dikkate alan bir yönlendirme yöntemi sunmuştur.

Macrina ve arkadaşları (2020), enerji tüketimi ve hız tahmini için modeller içeren İHA destekli rotalama üzerine mevcut literatürün bir incelemesini yapmıştır. Madani ve Ndiaye (2022), yük kapasitesi, hız, menzil ve enerji tüketimi gibi çeşitli faktörleri göz önünde bulundurarak kara aracı İHA teslimat sistemlerine odaklanan bir inceleme gerçekleştirmiştir.

Pachayappan ve Vijayakumar (2021), teslim alma ve teslim etme hizmetleri için yerleştirme istasyonları uygulayarak İHA yönlendirme zorluklarını ele almak amacıyla bir çözüm önermişlerdir. Yaklaşımları hem enerji verimliliğini hem de maliyet etkinliğini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Toplu olarak bu çalışmalar, dinamik yol planlama senaryolarında İHA'lar için yaklaşımların, optimizasyon algoritmalarının ve enerji bilinçli yönlendirme stratejilerinin geliştirilmesine yönelik öngörüler sağlamaktadır.

Son kilometre teslimatında kara araçları ve İHA'lar arasındaki iş birliği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Isenberg ve arkadaşları (2011), görselleştirme teknikleriyle ilgili zorlukları araştırıp, görselleştirme araçları için uygulamalara ve daha geniş kitlelere duyulan ihtiyacı vurgulamıştır.

Zeng ve arkadaşları (2015) , su altı araçları için yol planlama alanını araştıran ve bu alanda ortaya çıkan çeşitli zorluklara ve fırsatlara ışık tutan bir anket gerçekleştirmiştir.

Kapasite kısıtlı İHA rotalama problemi (CDRP), operasyonel maliyetleri en aza indirirken bir grup müşteriye hizmet vermek için taşıma kapasitesine sahip İHA'ların atanmasını gerektirmektedir. Wu ve arkadaşları (2018), belirli bir bölge içinde yerdeki kullanıcılara hizmet vermek için birden fazla İHA'nın kullanıldığı bir İHA kablosuz iletişim sistemini araştırmıştır. Çalışmaları, sistemlerin işbirlikçi doğasının altını çizmektedir.

Sacramento ve arkadaşları (2019), İHA'larla araç rotalama problemini çözmek için özel olarak tasarlanmış bir komşu arama metasezgisel yöntemini önermiştir. Teslimat operasyonlarının optimize edilmesinde rota planlama ve kaynak tahsisinin önemini vurgulamışlardır.

Devam eden araştırmalar, kapasite kısıtlı İHA rotalama problemini çözmek için optimizasyon yaklaşımlarına ve çözüm yöntemlerine odaklanmaktadır. Ermagun ve Morshedlou (2023), çoklu İHA çoklu kara aracı rotalama problemini, bu alandaki hem engelleri hem de potansiyel fırsatları vurgulayarak aksaklık değerlendirmesi bağlamında ele almıştır.

Luo ve arkadaşları (2022), yaklaşımlarının İHA sistemleri için savaş senaryolarında nasıl sağlamlık ve kararlılık sağladığını vurgulayarak DDPG'ye dayalı bir İHA penetrasyon dinamik izleme önleme yöntemi sunmuştur.

Çoklu İHA sistemlerinin verimliliğini optimize etmek için rotalama sırasında enerji ve maliyetleri verimli bir şekilde yönetmek çok önemlidir. Dorling ve arkadaşlarına göre (2017), İHA teslimat senaryoları için araç rotalama problemleri (VRP'ler) geliştirmek, İHA operasyonları için yol planlamasının önemini vurgulamak açısından önemlidir.

İHA sistemleri, çok ziyaretli rotalama probleminde özellikle İHA'larla araç rotalama problemi göz önüne alındığında kritik bir rol oynamaktadır (Nuryanti, 2023) . Nuryanti ayrıca Tabu arama algoritması ve Analitik Hiyerarşi Süreci kullanarak çok ziyaretli yol planlamasını optimize etmenin önemini vurgulamaktadır. Bu yaklaşımlar, haritalama ve matematiksel optimizasyon teknikleri aracılığıyla zorlukları ele almaktadır (Nuryanti, 2023). Ayrıca Poikonen ve Campbell (2020), İHA araştırmalarında yeni katkılarının İHA türleri ve yeni İHA uygulamaları modellerine odaklanması gerektiğini

vurgulamaktadır. Bu da İHA sistemlerinde rota optimizasyonunun önemini vurgulamaktadır.

Birden fazla İHA kullanarak çoklu ziyarete izin veren teslimat sistemi, araştırma literatüründe önemli miktarda ilgi görmüştür. Odak noktası, teslimat ve lojistik operasyonları için birden fazla İHA'nın konuşlandırılmasıyla ilgili zorlukların ve fırsatların ele alınması olmuştur. Birçok çalışma, özellikle teslimat amacıyla tasarlanan bu İHA sistemlerinin anlaşılmasına ve geliştirilmesine katkıda bulunmuştur. Bu çalışmalar, görevlerin enerji verimliliğinin ve dinamik kaynak yönetiminin avantajlarını vurgulamıştır.

Gupta ve arkadaşları (2016), çalışmalarında, tek İHA sistemlerine kıyasla İHA sistemlerinin verimliliğini ve ekonomik faydalarını vurgulayarak özellikle işbirliğine dayalı görev tamamlamanın önemini vurgulamışlardır. Campbell ve arkadaşları (2023), teslimat görevlerinin yanı sıra havadan görüntüleme verilerinin toplanması için çok amaçlı İHA'ların kullanıldığı küresel sağlık uygulamalarına özel bir odaklanma ile K amaçlı İHA'larla ilgili rotalama problemini ele almıştır. Lin ve arkadaşları (2022), ulaşım sistemlerinde kara aracı İHA işbirliğini optimize etmenin önemini vurgulayarak uzak bölgelere kaynak taşımak için hem çoklu İHA'ları hem de kara araçları içeren bir sistemi araştırmıştır. Zhang ve Li (2023), kullanılan İHA sayısını azaltarak İHA ve araç seyahat mesafelerini en aza indirmeyi amaçlayan MDVRPSD (Eşzamanlı Teslim Alma ve Teslim Etme Hizmeti ile Çoklu Ziyaret İHA Araç Rotalama Problemi) adlı bir çözüm önermiştir.

Singhal ve Barick (2022), İHA'ların kullanıldığı bir ağa yönelik, maliyet azaltma, güvenilirlik, genişletilmiş kapsama alanı ve bilgi paylaşımı yoluyla artırılmış sağlamlık gibi faydalarını araştırmışlardır.

Sawadsitang ve arkadaşları (2019), İHA teslimat planlaması için verimli ve güvenli sürü modeli iletişimini ele alan üç aşamalı bir stokastik optimizasyon modeli önermiştir. Khamidehi ve arkadaşları (2021), hizmet kalitesini sağlamak için İHA teslimat sistemlerinde dinamik kaynak yönetiminin önemini vurgulamış ve özellikle İHA'ların talep karşılamaya dayalı olarak koli dağıtım merkezlerine tahsis edilmesine dikkat çekmiştir. Gabani ve arkadaşları (2021), bir başka çalışmada, tek bir kara aracı senaryosundaki İHA sorunlarını ele almak için bir kara aracı rotası boyunca fırlatma alanlarından birden fazla İHA'nın konuşlandırıldığı bir sistemi incelemişlerdir.

Araçların (İHA'lar) araç rotalama problemlerine entegrasyonu kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Otto ve arkadaşları (2018), İHA'ların sivil uygulamalarına yönelik optimizasyon yaklaşımları üzerine bir araştırma yaparak, bunların ölçme ve uzaktan algılama alanlarındaki kullanımlarına ışık tutmuştur.

Khoufi ve arkadaşları (2019) tarafından yapılan çalışma, özellikle gezgin satıcı ve araç rotalama problemlerine odaklanarak hava araçları (İHA'lar) için rotalama problemlerindeki uyarlamaları ve gelişmeleri araştırdı. Bu, rotalama görevlerinde İHA uygulamalarının gelişen manzarasına ışık tutmuştur.

Teslimat sistemlerinde İHA operasyonlarını optimize ederken önemli bir husus, İHA'nın ağırlığı değiştikçe hızını dinamik olarak ayarlamaktır. Bu konuyu ele alan çok sayıda çalışma, yük ağırlığındaki dalgalanmalara bağlı olarak İHA hızını uyarlamaya yönelik algoritmalar ve stratejiler hakkında araştırmalar sunmaktadır.

Wu ve arkadaşları (2018), yük ağırlığı değişikliklerine dayalı olarak hızda dinamik ayarlamaları barındırırken İHA yörüngelerinin tasarımını kolaylaştıran karmaşıklığa sahip bir başlatma şeması önermiştir. Benzer şekilde Zeng ve arkadaşları (2018), yukarı bağlantı iletişim toplam oranını en üst düzeye çıkarmak için bir İHA'nın yönünü dinamik olarak ayarlamak için bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma yükteki değişiklikleri dikkate alarak dinamik hız ayarlamalarını içerecek şekilde genişletilebilir.

Özellikle, Claro ve arkadaşları (2023) ,enerji yollarını planlarken İHA'ların ağırlık gibi özelliklerini hesaba katmanın önemini vurgulayarak, yük ağırlığındaki değişiklikleri karşılamak için dinamik ayarlamaların gerekliliğini vurgulamıştır.

Ayrıca Dorling ve arkadaşları (2017) tarafından yürütülen bir çalışmada, çok motorlu İHA'lar için enerji tüketimi ve faydalı yük ağırlığı arasındaki ilişkiyi inceleyen bir model oluşturulmuştur. Bu bulgu, dinamik hız ayarlamaları yapmanın önemini vurgulamaktadır.

Huang ve arkadaşları (2022) tarafından yapılan bir araştırmada mevcut kapsama yolu planlama algoritmalarının genellikle sabit İHA hızı varsayımlarında bulunduğu vurgulanmıştır. Yazarlar, yavaşlama, dönüş ve hızlanma dahil olmak üzere dönüşler gibi faktörleri hesaba katmak için dinamik hız ayarlamalarının dahil edilmesinin önemine değinmiştir.

Ayrıca Li ve arkadaşları (2022), bir keşif faktörü getirerek keşif sömürü ikilemini ele almak için Q öğrenme mekanizmasına bir uzantı önermiştir. Bu yaklaşımı, yükteki değişimlere dayalı dinamik yol ayarlamalarını kolaylaştırmak için genişletmek mümkündür.

Freitas ve Penna (2020), insansız yüzey araçlarının yol planlaması için bir yöntem sağlayan uçan yardımcı GSP'yi ele almak için en yakın komşu arama yaklaşımını tanıtmıştır. Bu çalışma, bu alandaki zorlukları ve fırsatları ele alırken, özellikle araç yolu planlaması için tasarlanmış optimizasyon tekniklerinin geliştirilmesine katkıda bulunmuştur.

Son yıllarda, çeşitli kombinatoriyal problemler için optimizasyon algoritmaları üzerine önemli araştırmalar yapılmıştır (Johnson, 1984). Johnson tarafından yapılan bu araştırma, kombinatoriyal optimizasyon algoritmaları ve karmaşıklıkları hakkında kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Kolen tarafından yapılan çalışmada, kombinatoriyal optimizasyon problemlerinin algoritmik karmaşıklığı araştırılmıştır (Kolen, 1983).

Optimizasyondaki bir diğer önemli problem, bir dizi müşteriye hizmet verecek bir araç filosu için en uygun rotaların belirlenmesini içeren Araç Rotalama Problemidir (VRP). (Laporte vd., 2002), belirsiz müşteri taleplerini dikkate alan stokastik talep kapasiteli VRP için tamsayılı bir algoritma önermektedir.

Robotik alanında, İnsansız Hava Araçları (İHA'lar) ve İnsansız Kara Araçları (İKA'lar) için rota planlama üzerine araştırmalar yapılmıştır. Tokekar ve arkadaşları, hassas tarıma yönelik simbiyotik bir İHA ve İKA sistemi için sensör planlamasını çalışmışlardır. Tarımsal uygulamalarda İHA ve İKA'ların koordinasyonlu kullanımına yönelik bir araştırmadır (Tokekar vd., 2016).

Liu ve arkadaşları (2022), birden fazla tarlanın ilaçlanması için, insansız hava aracı rota planlaması çalışmışlardır. Uygulamada karınca kolonisi ikili yinelemeli optimizasyonu ile dinamik genetik algoritmaya dayalı bir rota planlama algoritması önerilmektedir.

Afet sonrası değerlendirme bağlamında, Redi ve arkadaşları (2021), koordineli olarak görev yapabilen bir hibrit hava ve kara aracı rotalama yaklaşımı önermekte olup afet

sonrası değerlendirme ve rotalama stratejilerini anlamak açısından önem arz etmektedir.

Li ve arkadaşları (2021), çok noktalı İHA sürüsü rotalama problemini çözmek için hibrit bir en yakın komşu arama algoritması önermektedirler.

Luo ve arkadaşları (2017), bir kara aracı ve üzerinde bulunan insansız hava aracı için iki kademeli bir iş birliği rotalama problemini araştırmaktadır. Bu referans hem kara araçlarını hem de İHA'ları içeren rotalama problemlerini anlamak için önem arz etmektedir.

1.4. İHA ve İKA Kullanımının Önemi ve Kısıtlamalar

İHA'lar, İKA'lar ve iş birliğine dayalı İHA-İKA işletim sistemlerinin kullanımı, afet yönetimi kabiliyetlerinin geliştirilmesinde büyük önem taşımaktadır. Bu gelişmiş teknolojiler, afet senaryoları sırasında müdahale verimliliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artıran bir dizi fayda sunmaktadır.

İHA'lar, afet yönetiminde gerçek zamanlı izleme, uzaktan algılama, arama ve kurtarma operasyonları ve altyapı denetimi için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Shakhatreh vd., 2019). Havadan perspektif sağlama ve geniş alanlarda hızlı bir şekilde veri toplama kabiliyetleri, durumsal farkındalığı önemli ölçüde artırmakta ve acil durumlarda karar verme süreçlerini desteklemektedir. Benzer şekilde, İKA'lar, karmaşık arazilerde gezinme, saha hazırlığı ve keşif gibi görevleri yerine getirmeye olanak tanıyan yer hareketliliği ve yüksek çözünürlüklü algılama yetenekleri nedeniyle afet müdahalesinde önem arz etmektedir (Z. Li, Zhao, vd., 2022).

Afet yönetiminde İHA ve İKA'ların birlikte çalışması, ortak hedeflere daha etkili bir şekilde ulaşmak için her iki sistemin güçlü yönlerinden yararlanmaya olanak sağlamaktadır (Elmakis vd., 2022). Bu işbirlikçi sistemler, İHA'ların havadaki kabiliyetlerini İKA'ların yerdeki hareket kabiliyetiyle birleştirerek afetten etkilenen bölgelerde veri toplama, gözetleme ve kaynak tahsisini optimize edebilmektedir. Bu eşgüdüm, operasyonel verimliliğin artmasını ve afet bölgelerinin kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlayarak, karar alma süreçlerinin daha bilinçli ve zamanında ilerlemesini sağlamaktadır (Alzahrani vd., 2020).

Ayrıca, iş birliğine dayalı İHA-İKA sistemleri afet senaryolarında hızlı veri toplama, yol planlama ve engelleri aşmayı kolaylaştırmaktadır (Chang vd., 2022). Bu sistemler, eylemlerini koordine ederek ve bilgi paylaşarak zorlu ortamlarda gezinebilir, tehlikeleri tespit edebilir ve kritik kaynakları etkilenen bölgelere verimli bir şekilde ulaştırabilirler. İHA'ların ve İKA'ların sorunsuz entegrasyonu, müdahale kabiliyetlerini geliştirerek hızlı ve koordineli afet yönetimi operasyonlarına olanak sağlamaktadır (Pretto vd., 2021).

Afet yönetiminde İHA'ların, İKA'ların ve iş birliğine dayalı İHA-İKA işletim sistemlerinin kullanılması, müdahale kabiliyetlerinin geliştirilmesi, durumsal farkındalığın artırılması ve kaynak tahsisinin optimize edilmesi için çok önemlidir. Bu gelişmiş teknolojiler, afetlerin etkisini azaltmada, zamanında ve etkili müdahale çabalarını kolaylaştırmada ve nihayetinde acil durumlarda hayat kurtarmada çok önemli bir rol oynamaktadır.

İHA'lar ve İKA'ların afet yönetiminde kullanımına ilişkin sınırlamalar ve kısıtlamalar, bu araçların etkinliğinin optimize edilmesinde önemli hususlardır. İHA'lar ve İKA'lar afet müdahalesinde önemli avantajlar sunarken, ele alınması gereken önemli zorluklar da bulunmaktadır. İHA'ların afet yönetimindeki en büyük kısıtlamalarından biri, sınırlı batarya kapasiteleri nedeniyle kısıtlı operasyon süreleridir (Mondal vd., 2023). Bu kısıtlama, afet senaryoları sırasında uzun süreli gözetim ve veri toplama çabalarını engelleyebilmektedir. Ayrıca, İHA'lar güç kaynakları ve faydalı yük kapasiteleri ile sınırlıdır. Bu durum temel ekipman veya malzemeleri taşıma kabiliyetlerini etkileyebilmektedir (J. Zhang vd., 2020).

Öte yandan, İKA'lar yüksek çözünürlüklü algılama yeteneklerine sahip olup, yeterli enerji depolama ile büyük hacimli ve kütleli sensörler taşıyabilmektedir (Kıvanç, 2019). Ancak, İKA'lar manevra kabiliyeti ve daha geniş alanlara erişebilirlik açısından İHA'lara kıyasla zorluklarla karşılaşabilmektedir. Bu sınırlama, karmaşık arazilerde gezinme veya afet müdahale çalışmaları sırasında uzak yerlere ulaşma konusunda İKA'ların hızını ve verimliliğini etkileyebilmektedir.

Ayrıca, Amerikan Federal Havacılık Dairesi (FAA) tarafından belirlenen düzenlemeler ve kılavuzlar, uçuş irtifası, havalimanlarına yakınlık ve görüş hattı gereksinimleri gibi kısıtlamalar da dahil olmak üzere İHA operasyonlarına sınırlamalar getirmektedir (Gupta vd., 2016). Bu düzenleyici kısıtlamalar, afet yönetimi operasyonlarında

İHA'ların ve İKA'ların esnekliğini ve özerkliğini etkileyebilmekte, potansiyel olarak belirli senaryolarda etkinliklerini sınırlandırabilmektedir.

Ayrıca, İHA'lar ve İKA'lar arasındaki koordinasyon ve iletişim, afet müdahalesinde iş birliği çabalarını optimize etmede zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Birden fazla hava ve yer robotundan oluşan bir sistem için yol planlaması, maksimum hızlar, şarj süreleri ve araçlar arasındaki dinamik etkileşimler gibi çeşitli kısıtlamaların dikkate alınmasını gerektirmektedir (Y. Chen vd., 2020). İHA'lar ve İKA'lar arasında sorunsuz entegrasyon ve senkronizasyon sağlamak, afet yönetimi senaryolarında kolektif yeteneklerini geliştirmek açısından çok önemlidir.



İKİNCİ BÖLÜM

METODOLOJİ

Afet sonrası acil durum lojistiğinde İHA ve İKA kullanılmaya başlanması, daha hassas ve uyarlanabilir afet müdahale stratejilerine yönelik önemli bir değişimi temsil etmektedir. Tezin bu bölümü, bu teknolojilerin potansiyelini özetleyen iki farklı ancak birbiriyle bağlantılı uygulamayı incelemektedir: "Kentsel Alanlarda Hibrit İHA/İHA Rotalama: Acil Durum Lojistiği Üzerine Bir Uygulama" ve "Genetik Algoritma Kullanarak Dinamik Enerji ve Maliyet Etkin Çoklu İHA Rotalama Problemi". Bu uygulamaların seçimi, acil durum lojistiğindeki zorlukların ve boşlukların, özellikle de afetten etkilenen ortamlarda kaynak dağıtımının optimize edilmesinin bir değerlendirmesinden kaynaklanmaktadır. Bu araştırma, gelişmiş hesaplama modellerini entegre ederek, acil durum müdahale çabalarının verimliliğini ve etkinliğini önemli ölçüde artırmaya yönelik yolları aydınlatmayı amaçlamaktadır.

İlk uygulama, tek başına kullanıldığında her bir sistemin sınırlamalarının üstesinden gelmek için İHA'ları ve İKA'ları koordineli olarak birleştiren hibrit bir modeli araştırmaktadır. Bu çalışma, İHA'ların (havadan hareket kabiliyeti ve zorlu arazilere erişim) ve İKA'ların (daha büyük yük kapasitesi ve daha uzun operasyonel dayanıklılık) tamamlayıcı güçlerinden yararlanarak, kentsel acil durum lojistiği için yeni bir çerçeve sunmaktadır. Bu çalışmanın önemi, acil durum malzemelerinin zamanında ve verimli bir şekilde teslim edilmesini sağlarken karmaşık kentsel manzaralarda gezinebilen yenilikçi lojistik çözümler gerektiren kentsel afetlerin artan sıklığı ve yoğunluğu ile vurgulanmaktadır.

İkinci uygulama, yüksek düzeyde hizmet verimliliğini korurken enerji tüketimini ve operasyonel maliyetleri optimize etmeye odaklanarak çoklu İHA sistemlerinin dinamik yönlendirilmesi için genetik algoritma kullanımını araştırmaktadır. Bu çalışmanın kritik önemi, İHA'ların sınırlı pil ömrü ve kapsamlı İHA dağıtımlarının maliyet etkileri gibi geleneksel olarak acil durum tedarik dağıtımıyla ilişkili lojistik kısıtlamaları önemli ölçüde azaltma potansiyelinde yatmaktadır. Bu yaklaşım sadece İHA'ların acil durum lojistiğinde kullanılmasının pratik zorluklarını ele almakla kalmamış olup, aynı zamanda afet müdahalesi için daha geniş çapta benimsenmesinde önemli faktörler olan İHA operasyonlarının sürdürülebilirliğine ve ölçeklenebilirliğine de katkıda bulunmaktadır.

Bu uygulamaların genel amaçları iki yönlüdür. İlk olarak, acil durum senaryolarının ortaya çıkardığı lojistik zorlukların üstesinden gelmek için İHA'ların ve İKA'ların koordineli bir şekilde kullanılmasının fizibilitesini ve etkinliğini göstermeyi amaçlamaktadırlar. Bu, sadece araç rotalama ve koordinasyonunun teknik yönlerini değil, aynı zamanda enerji verimliliği, maliyet yönetimi ve dinamik ve belirsiz afet ortamlarına uyum sağlama becerisini de içermektedir. İkinci olarak uygulamalar, afet yönetimi uygulayıcıları ve politika yapıcılar için değerli çıktılar sunarak, bu modellerin gerçek dünya ortamlarında uygulanmasına ilişkin ampirik kanıtlar ve pratik bilgiler sağlamayı amaçlamaktadır.

Bu uygulamalar, acil durum lojistiğinde İHA'ların ve İKA'ların tam potansiyelini gerçekleştirmeye yönelik kritik adımları temsil etmekte ve teorik modellerden afet müdahale operasyonlarında kullanılabilecek uygulanabilir çözümlere geçişi sağlamaktadırlar. Ayrıca çalışmalar, lojistik alanında otonom sistemlere ilişkin literatüre katkıda bulunarak alanı yeni bilgiler, metodolojiler ve uygulamalarla zenginleştirmektedir.

2.1. Önerilen Algoritmalarda Kullanılan Araçlar

Bu kısımda, acil durum lojistiğinde İHA'lar ve İKA'lar rota ve görev planlamasını optimize etmek için önerilen algoritmalarda kullanılan araçlar ve metodolojiler özetlenmektedir. Aşağıda yer alan alt bölümler, kullanılan belirli araç ve teknikleri detaylandırmakta ve bunların bu araştırmayla ilgisini ve uygulanabilirliğini açıklamaktadır.

2.1.1. Gezgin Satıcı Problemi

GSP, bir dizi konumu tam olarak bir kez ziyaret eden ve başlangıç noktasına geri dönen mümkün olan en kısa rotayı belirlemeye çalışan temel bir kombinatoriyal optimizasyon problemidir (Li vd., 2022). Bu çalışma kapsamında GSP, acil durum malzemelerinin verimli bir şekilde teslim edilmesini sağlamak için İHA'ların ve İKA'ların rotasını optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. GSP, mesafe, zaman ve kaynak sınırlamaları gibi çeşitli kısıtlamaları göz önünde bulundurarak teslimat rotalarını modellemektedir. Genetik algoritmalar ve sezgisel yöntemler gibi gelişmiş teknikler, acil durum lojistik senaryolarının karmaşıklığı göz önüne alındığında GSP'ye optimuma yakın çözümler bulmak için uygulanmaktadır. GSP, etkili acil durum

müdahale lojistiği için kritik olan rota optimizasyonunun temel zorluğunu doğrudan ele aldığı için bu çalışma kapsamında kullanılmıştır.

GSP, özellikle lojistik ve taşımacılık sektörlerinde araç rotalama alanında sıkça kullanılan bir yöntemdir. Bir dizi noktayı ziyaret ederek ve başlangıç noktasına geri dönen, mümkün olan en kısa rotayı arayan GSP yöntemi, teslimatlar, acil servisler ve hatta otonom sürüş için araçların yönlendirilmesinde pratik uygulamaları bulunmaktadır. GSP'nin en önemli özelliği basitliğinde yatar; problem ifadesinin anlaşılması kolay olsa da nokta sayısı arttıkça optimuma yakın bir çözüm bulmak katlanarak daha karmaşık hale gelmektedir. Bu hesaplama zorluğuna rağmen, genetik algoritmalar, benzetimli tavlama (simulated annealing) ve tam sayılı programlama dahil olmak üzere çeşitli sezgisel yöntemler ve optimizasyon teknikleri, makul bir zaman diliminde optimuma yakın çözümler bulmak için geliştirilmiştir.

Applegate ve arkadaşları (2006) tarafından yürütülen “GSP: hesaplamalı bir çalışma”, GSP'nin çözümüne yönelik hesaplamalı yaklaşımların ayrıntılı bir analizini sunmaktadır.

Acil durum lojistiği senaryosu kapsamında birden fazla acil durum bölgesine mümkün olan en kısa sürede bir ambulans veya itfaiye aracı filosu ulaşması gerekmektedir. Zamana Bağlı Gezgin Satıcı Problemi (ZBGSP) olarak bilinen GSP'nin bir varyasyonu, trafik koşulları, yol kapanmaları ve her bir konumdaki hizmet süresi gibi gerçek dünya kısıtlamalarını hesaba katarak sonuç üretebilmektedir. Acil servisler, gelişmiş GSP algoritmaları kullanarak yönlendirme planlarını gerçek zamanlı olarak dinamik bir şekilde uyarlayabilir, böylece müdahale sürelerini iyileştirebilir ve potansiyel olarak daha fazla acil duruma müdahale olanakları sağlayabilir.

GSP yönteminin uygulama alanı sadece karasal araçlarla sınırlı değildir; gelişmekte olan kentsel hava hareketliliği alanında hava sahasında bulunan hava araçları için rotalama yöntemi olarak kullanılmaktadır. Teslimat İHA'ları ya da hava taksilerinden oluşan bir filo için GSP yöntemi, rotalarının optimize edilmesinde kullanılmaktadır. Bu sayede enerji ve hava sahasının verimli kullanılmasını sağlayabilmektedir. Yükseklik, uçuşa yasak bölgeler, hava koşulları ve hava trafik kontrol düzenlemeleri gibi ek kısıtlamalarda hesaba katıldığında, karma tam sayılı doğrusal programlama veya meta sezgisel algoritmalar gibi yöneylem araştırma yöntemleri, bu karmaşıklıkların etkili bir şekilde üstesinden gelmek için kullanılmaktadır.

GSP, kombinatoriyal optimizasyon alanında iyi çalışılmış bir problemdir (Johnson, 1984). GSP'yi çözmek için yaklaşım algoritmaları (Klein ve Young, 2009), karınca kolonisi optimizasyon algoritmaları (Dorigo vd., 1996; Dorigo ve Gambardella, 1997), genetik algoritmalar (Riazi, 2019) ve en yakın komşu arama varyantları (Todosijević vd., 2017) dahil olmak üzere çeşitli algoritmalar önerilmiştir. Bu algoritmalar, her şehri tam olarak bir kez ziyaret eden ve minimum toplam mesafeye sahip bir döngü olan optimal Hamilton döngüsünü bulmayı amaçlamaktadırlar.

GSP'yi çözmeye yönelik yaklaşımlardan biri, işbirliği yapan agent'lardan oluşan bir koloni kullanan karınca koloni sistemidir (KKS) yöntemidir (Dorigo ve Gambardella, 1997). Karınca koloni sistem yönteminin GSP için optimuma yakın çözümler bulmada etkili olduğu görülmüştür. Diğer bir yaklaşım ise turlar oluşturma amacıyla operatörlerin kullanımını içeren genetik algoritmalar yönteminin kullanılmasıdır (Riazi, 2019). Bu algoritmalar GSP'ye başarılı biçimde uygulanmıştır.

Son yıllarda, GSP'yi anlama konusunda ilerlemeler kaydedilmiştir. Örneğin bir çalışmada (Wang, 2019), frekans dörtgenlerine dayalı optimal Hamilton döngüsünde bir kenar için yeterli ve gerekli koşulları incelemiştir. GSP'nin optimuma yakın çözümü için bir alt sınır sağlayan Gezgin Satıcı Sabiti için yeni sınırlar türetmiştir (Steinerberger, 2015).

Genel olarak, GSP optimizasyon alanında zorlu bir problem olarak varlığını sürdürmektedir. Araştırmacılar bu problemi çözmek için algoritmalar geliştirmeye ve iyileştirmeye devam etmektedirler.

2.1.2. Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama

Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP), hem sürekli hem de tamsayılı değişkenlere sahip optimizasyon problemlerini içeren bir matematiksel modelleme yaklaşımıdır. MILP, özellikle acil durum lojistiğinde rotalama ve çizelgeleme ile ilgili karmaşık kısıt ve hedeflerin ele alınmasında faydalı olmaktadır (Shen ve Wei, 2022). Bu tezde, araç kapasiteleri, teslimat zaman pencereleri ve enerji sınırlamaları gibi çeşitli kısıtlamaları ele almak için MILP modelleri geliştirilmiştir. MILP formülasyonları, rotalama ve çizelgeleme görevlerinin hassas bir şekilde optimize edilmesine olanak tanıyarak kaynakların verimli bir şekilde kullanılmasını ve teslimat hedeflerinin verilen kısıtlamalar altında karşılanmasını sağlamaktadır. MILP'nin karmaşık, çok yönlü

optimizasyon problemlerini ele alma yeteneği sebebiyle bu araştırma için ideal bir araç haline getirmekte ve optimum rotalama stratejilerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi için sağlam bir çerçeve sağlamaktadır.

Araç rotalama alanında MILP, birden fazla araç türü, deđeršen teslimat zamanları ve belirli yol kısıtlamaları gibi gerçek dünyadaki karmaşıklıklarla bařa çıkmak için son derece kullanışlı bir yöntemdir (Floudas ve Lin, 2005). MILP formölasyonları yüksek derecede özelleştirmeye izin verir; bu sayede, eldeki sorunun tam doğasına uyacak şekilde belirli kısıtlamalar ve hedefler dahil edilebilmektedir. branch-and-cut veya branch-and-bound gibi algoritmalar, MILP formölasyonlarına optimale yakın çözümler bulmak için yaygın olarak kullanılmaktadır.

Acil durum lojistiği senaryolarında MILP uygulaması çok kullanışlı olabilmektedir. Örneđin, büyük ölçekli bir doğal afete maruz kalmış bir şehirde ambulansların yönlendirilmesi; farklı yerlerdeki yaralıların sayısı, ambulansların yol koşullarına göre deđeršen hızları ve kritik vakaların önceliklendirilmesi gibi çok sayıda değerşkeni dikkate alarak rotaları optimize etmek için karma tamsayılı doğrusal programlama yöntemi kullanılabilmektedir. Çıktı, kaynakların en verimli şekilde tahsis edilmesini sağlayarak müdahale sürelerini en aza indirirken yardım edilen kiři sayısını en üst düzeye çıkarmaktadır.

Ayrıca, İHA'lar ve hava taksileri gibi kentsel hava mobilite sistemleri daha yaygın hale geldikçe, MILP bu yeni ulaşım alanında rotalama problemlerini çözmek amacıyla kullanılabilmektedir. Yükseklik, uçuşa yasak bölgeler ve elektrikli İHA'lar için batarya kısıtlamaları, bir MILP modeline uygun şekilde entegre edilebilecek faktörlere örnektir. Hem mekânsal hem de zamansal boyutların eşzamanlı optimizasyonuna olanak tanıyarak hava sahasının ve enerjinin en verimli şekilde kullanılmasına imkân sağlamaktadır.

MILP yöntemi, rotalama, çizelgeleme ve yol planlama optimizasyonu dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Rota planlama ve çizelgeleme gibi görevleri optimize etmek, verimliliği ve performansı artırmak amacıyla MILP yöntemi literatürde güncelliğini korumaktadır.

Richards ve arkadaşları (2002), kaçınma kısıtlarını dahil etmek amacıyla MILP yöntemini kullanarak bir uzay aracı yörünge planlama yaklaşımı önermektedirler.

Araştırma, engel ve kısıtlardan kaçınılması için uzay aracı yörüngesini optimize etmeye odaklanmaktadır.

Schouwenaars ve arkadaşları (2001), MILP'in çok araçlı yol planlama ve çarpışmadan kaçınma problemleri için uygunluğunu göstermişlerdir. MILP'in yol planlama ve çarpışmadan kaçınma problemlerindeki etkinliğini gösteren bir örnek uygulama sunmuşlardır.

Borghetti ve arkadaşları (2008), güç sistemlerinde kısa vadeli hidro çizelgeleme ve birim taahhüdü için MILP kullanmışlardır. Çalışmaları, güç sistemlerinde çizelgeleme ve birim taahhüt problemlerinin çözümünde MILP'in etkinliğini ve doğruluğunu göstermektedir.

Floudas ve Lin (2005), kimyasal işleme sistemlerinin çizelgelenmesi için MILP tabanlı yaklaşımlardaki gelişmeleri gözden geçirmiştir. MILP'in süreç çizelgeleme optimizasyonundaki modelleme, algoritma ve uygulamaları araştırılmıştır.

Grossmann ve Trespalacios (2013), optimizasyon problemleri için MILP'de model formüle etmenin önemini vurgulamaktadırlar. Model formülasyonunun MILP'de çözüm bulma performansı ve kabiliyeti üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Pellegrini ve arkadaşları (2014), karmaşık kavşaklarda optimum tren rotalama ve çizelgeleme için bir MILP formülasyonu önermektedirler. Çalışmaları, mevcut altyapıyı detaylarıyla temsil etmekte ve MILP'nin trafik yönetmedeki etkinliğini göstermektedir.

Kuwata ve How (2004), İHA'ların üç boyutlu azalan ufuk kontrolü için MILP optimizasyonunu kullanmışlardır. Yaklaşımları kaba bir maliyet haritası oluşturmakta ve İHA'lar için ayrıntılı yörüngeler tasarlamak için MILP optimizasyonunu kullanmaktadır.

Asfora ve arkadaşları (2020), çok robotlu arama problemleri için MILP modeli önermişlerdir. MILP'in çoklu robotlar için hareket planlama ve arama stratejilerini optimize etmedeki etkinliğini gösterilmiştir.

Genel olarak yürütülen çalışmalar, MILP yönteminin rotalama, çizelgeleme ve yol planlama optimizasyonundaki etkinliğini göstermektedir. Araştırmacılar, bu görevlerin

çeşitli yönlerini optimize etmek için MILP'i kullanmış ve farklı uygulama alanlarında verimlilik, performans ve çözüm doğruluğunun artmasını sağlamıştır.

2.1.3.K-Means Kümeleme Yöntemi

K-Means Kümeleme yöntemi, bir veri kümesini özellik benzerliğine dayalı olarak K farklı kümeye ayırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu çalışmada, teslimat noktalarını kümelere ayırmak için K-Means kümeleme yöntemi kullanılarak hesaplama karmaşıklığı azaltılmış ve ele alınan problem daha basit hale gelmiştir. Her bir küme, GSP gibi geleneksel rotalama algoritmalarının daha etkili bir şekilde uygulanabileceği bir alt problem olarak ele alınabilmektedir (Ferrandez vd., 2016). Bu kümeleme yaklaşımı, özellikle teslimat noktalarının sayısının önemli olabileceği yoğun nüfuslu kentsel alanlarda yönlendirme sürecinin genel verimliliğini artırmaktadır. K-Means kümeleme yönteminin kullanımı, karmaşık bir yönlendirme problemini yönetilebilir alt problemlere ayırmaya yardımcı olduğu ve böylece önerilen algoritmaların ölçeklenebilirliğini ve verimliliğini artırması amacıyla bu çalışmada kullanılmıştır.

K-means kümeleme yöntemi ile lojistik ve teslimat hizmetlerinde teslimat hedeflerini, coğrafi yakınlık temelinde K adet gruba ayırarak rota optimizasyon problemlerinin hesaplama karmaşıklığı önemli ölçüde azaltmaktadır. Örneğin, her bir küme, GSP veya Araç Rotalama Problemi algoritmaları gibi geleneksel rotalama algoritmalarının uygulanabileceği bir alt problem olarak ele alınabilmektedir. Bu 'böl ve yönet' yaklaşımı, daha verimli kaynak tahsisine olanak tanıyarak kat edilen toplam mesafeyi ve harcanan zamanı azaltır ve özellikle yoğun nüfuslu kentsel alanlardaki son-nokta teslimat senaryoları için kullanım alanı oldukça fazladır.

K-Means kümeleme yöntemi, GA'da popülasyon oluşturmak için hayati önem taşımaktadır.

K-Means kümeleme yönteminin amacı n adet teslimat noktasını K adet kümeye ayırarak her bir p_i noktasının ortalamaya sahip kümeye ait olmasını sağlamaktır. Bu, her bir küme içindeki kareler toplamını en aza indirme hedefiyle bir bölüm $S = \{S_1, S_2, \dots, S_k\}$ oluşturur:

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^K \sum_{p \in S_i} \|p - \mu_i\|^2 \quad (3.1)$$

burada μ_i , S_i içindeki noktaların ortalamasıdır.

1. Teslimat noktalarını K adet kümeye ayır,
2. Her teslimat noktasını en yakın kümeye ata,
3. Kümelerin merkezlerini güncelle,
4. Adım 2 ve 3'ü kümelerin merkezleri değişmeyene kadar tekrar et.

Acil durum lojistik uygulamaları kapsamında K-means kümeleme yöntemi kullanılmaktadır. Büyük ölçekli bir afet durumunda, acil durum hizmetleri genellikle geniş bir coğrafi alana dağılmış birden fazla olaya müdahale etme zorluğuyla karşı karşıya kalmaktadır. K-means kümeleme yöntemi kullanılarak, olay konumları yakınlık, acil durum türü ve hatta aciliyet düzeyi gibi çeşitli parametrelere göre kümelenebilmektedir. Her bir küme daha sonra farklı acil durum birimlerine atanarak rotaları optimize edilebilir ve bu sayede daha hızlı, daha organize bir müdahale sağlanabilmektedir.

Ayrıca, K-means kümeleme yöntemi, gerçek zamanlı veri içeren dinamik yönlendirme senaryoları için de uyarlanabilmektedir. Kentsel bir ortamda tıbbi malzeme teslimatı için kullanılan bir otonom İHA filosu için yeni teslimat talepleri geldikçe, K-means kümeleme yöntemi bu İHA'ların rotalarını sürekli olarak güncellemek ve optimize etmek için gerçek zamanlı olarak kullanılabilmektedir. Sistemin değişen koşullara dinamik olarak uyum sağlamasına olanak sağlayarak enerji tüketimini en aza indirirken, teslimatların zamanında yapılmasına imkân tanımaktadır.

K-means kümeleme yöntemi, rotalama, çizelgeleme ve yol planlama optimizasyonu dahil olmak üzere çeşitli alanlarda yaygın olarak uygulanmaktadır. Araştırmacılar, bu alanlarda verimliliği ve performansı artırmak amacıyla k-means kümeleme yöntemini farklı uygulamalarda kullanmışlardır.

Wai ve Prasetia (2019), bir İHA gözetim sistemi için uyarlanabilir bir sinir ağı kontrolü ve optimum yol planlama çerçevesi önermektedir. Yol planlama sürecini optimize

etmek ve enerji tüketimini tahmin etmek için K-means kümeleme yöntemi kullanılmış olup uygulama sonucunda gözetleme verimliliğinde artış sağlanmıştır.

Kumar ve arkadaşları (2020), IoT teknolojilerinde iş çizelgeleme ve enerji optimizasyonu için karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ve k-means kümeleme yöntemi üzerine karşılaştırmalı bir çalışma yürütmüşlerdir. Yönlendirme ve çizelgeleme görevlerini optimize etmede k-means kümeleme yönteminin performansını değerlendirerek enerji tasarrufu sağlayan bir uygulama yapılmıştır.

Ter Mors ve arkadaşları (2010), trafik koşulları ve kullanıcı tercihleri gibi çeşitli faktörleri göz önünde bulundurmaya içeren bağlama duyarlı rota planlamasını araştırmışlardır. Bağlama duyarlı rota planlamasını optimize etmek için k en kısa ayrık yol algoritması önerilmiştir.

Tong ve Richardson (1984), sabit tarifeli bir transit sistemde zamana bağlı minimum yolu bulmak için bir bilgisayar modeli geliştirmişlerdir. Yolculuk süresine veya ağırlıklı süreye dayalı minimum yolu belirlemek için k-means kümeleme yöntemini kullanarak transit yolcu planlama verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Song ve arkadaşları (2021), internet üzerinde çeşitli veri akışı hizmetlerinin eşzamanlı iletimi için yönlendirme ve çizelgeleme algoritmaları üzerine çalışmışlardır. Yönlendirme ve çizelgeleme görevlerini optimize etmek için k-means kümeleme yönteminin uygulanmasını araştırarak hesaplama verimliliği ve yakınsama hızı gibi zorlukları ele almışlardır.

Huang ve Peng (2002), transit yolculuk planlama sistemleri için program tabanlı yol bulma algoritmaları çalışmışlardır. Program bilgisine dayalı yol bulmayı optimize etmek için kümeleme yöntemini kullanarak yolculuk planlama uygulamalarının performansını artırılması amaçlanmıştır.

Krishna ve Doja (2015), kablosuz sensör ağları için periyodik kimlik doğrulamalı deterministik güvenli kapsama kümelemesi (K-SCC) çalışmışlardır. Kapsama kümelemesini optimize etmek ve sensör ağlarında güvenli iletişimi sağlamak için k-means kümeleme yöntemi uygulanmıştır.

Han (2023), paralel kümelemeye dayalı çok depolu araç rotalama problemi için bir yol planlama algoritması önermiştir. Yol planlamasını optimize etmek ve çoklu depo

senaryolarında araç rotalama verimliliğini artırmak amacıyla k-means kümeleme yöntemi uygulanmıştır.

Mam ve arkadaşları (2017), coğrafi bir ağ üzerinde geliştirilmiş bir k-means kümeleme yöntemi tabanlı dağıtım planlama yaklaşımı önermektedirler. Fider uzunluğu ve güç kayıpları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak dağıtım planlamasını optimize etmek için k-means kümeleme yöntemi uygulanmıştır.

Li ve arkadaşları (2022), birden fazla İHA'nın koordineli olarak, yol planlaması yapılması amacıyla bilgi toplamak için optimum arama zamanı tahsisini araştırmışlardır. Yol planlamasını optimize etmek ve arama süresini verimli bir şekilde tahsis etmek için k-means kümeleme yöntemini kullanarak daha iyi bilgi toplanması sağlanmıştır.

Genel olarak, literatür k-means kümeleme yönteminin rotalama, çizelgeleme ve yol planlama optimizasyonundaki etkinliğini göstermektedir. Araştırmacılar, bu görevlerin çeşitli yönlerini optimize etmek amacıyla k-means kümeleme yöntemini kullanmış ve farklı uygulama alanlarında verimlilik, enerji tasarrufu ve performans artışı sağlamışlardır.

2.1.4. Genetik Algoritma

Genetik Algoritma (GA), doğal seçim ve genetik ilkelerinden esinlenen evrimsel bir optimizasyon tekniğidir (Holland, 1992; Satman, 2013). GA, bu tezde İHA'lar ve İKA'larla ilişkili karmaşık rotalama ve çizelgeleme problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. GA çerçevesi, potansiyel çözümlerden oluşan bir popülasyonu optimuma yakın konfigürasyonlara doğru iteratif olarak geliştiren seçim, çaprazlama ve mutasyon süreçlerini içermektedir (Hazama vd., 2021). Bu çalışma, GA'yı K-Means kümeleme yöntemi ve MILP gibi diğer tekniklerle entegre ederek, acil durum lojistik senaryolarının dinamik ve belirsiz doğasıyla başa çıkabilecek sağlam ve uyarlanabilir algoritmalar geliştirmeyi amaçlamaktadır. GA'nın esnekliği ve uyarlanabilirliği, geniş çözüm uzaylarını etkili bir şekilde arayabildiği ve karmaşık ve dinamik ortamlarda yüksek kaliteli çözümler sağlayabildiğinden ötürü bu çalışmada kullanılmıştır.

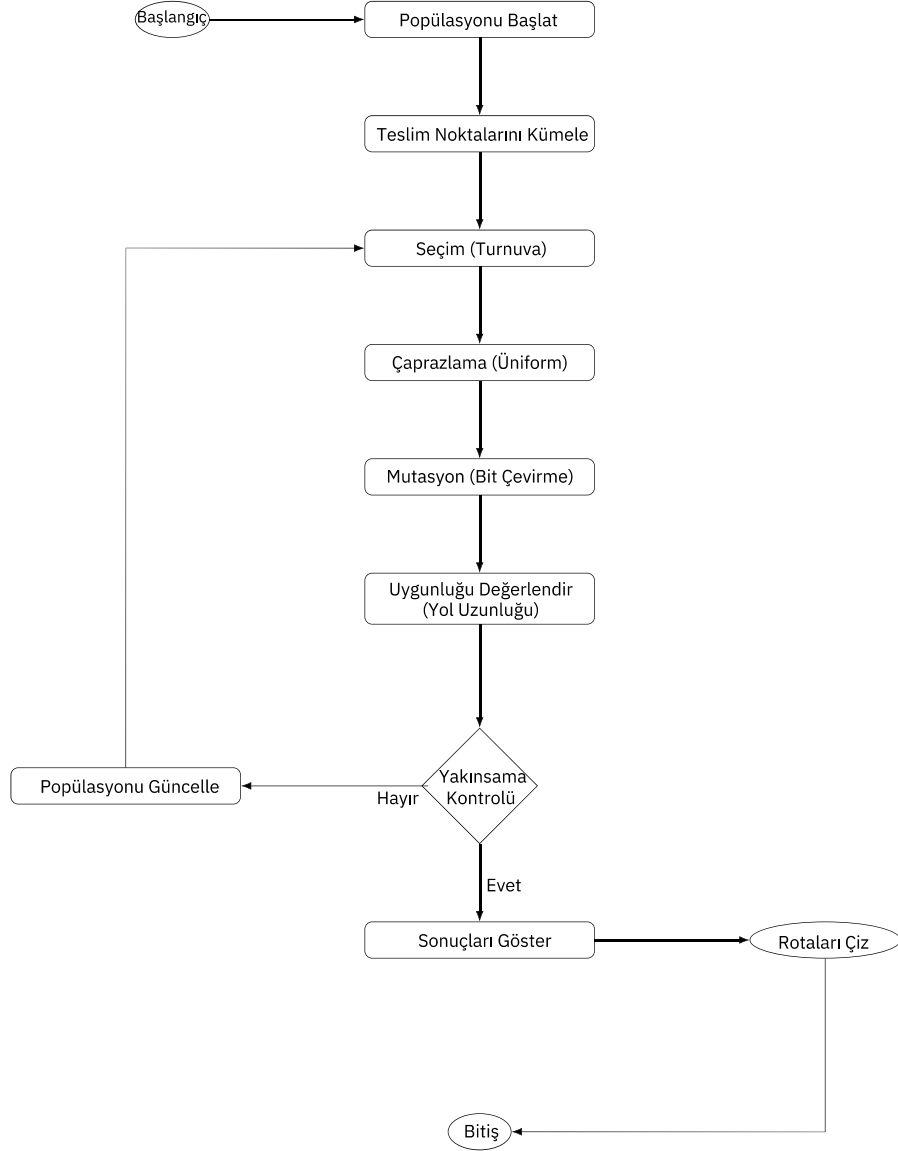
İnsansız hava araçları (İHA) için yol planlamada genetik algoritmaların (GA) uygulanmasını araştırmak için çalışmalar yapılmıştır. Gautam ve Verma (2014) ve Pan ve arkadaşları (2021), İHA yol planlamasında GA'nın etkinliğini vurgulamışlardır.

Ayrıca Peng ve Isler (2020), sabit kanatlı İHA'lar için GA ve Dubins eğri teorisini birleştiren bir yol planlama algoritması önermiştir. Ancak Liu (2022), İHA yol planlaması için kullanıldığında GA'nın optimizasyon doğruluğunda optimizasyon sorunları olasılığını düşündüren sınırlamalar tespit etmiştir.

Bagherian ve Alos (2015), İHA rota planlaması için algoritmaları parçacık sürüsü algoritmaları ile karşılaştırarak genetik algoritmaların geniş uygulanabilirliğini göstermiştir. Benzer şekilde Sonmez ve arkadaşları (Sonmez vd., 2015), İHA'lar için yol planlamasını optimize etmek için algoritmalar kullanmıştır. Bu çalışmalar toplu olarak İHA yol planlamasında algoritmaların kullanımını göstermektedir.

GA modelinde, İHA'lar için her bir potansiyel rota konfigürasyonu, bu rotaları oluşturan genleri temsil eden bireysel segmentlere sahip bir kromozom olarak kabul edilmektedir. Her bir çözümün etkinliği, enerji tüketimi, teslimat süresi ve faydalı yük kısıtlamalarına bağlılık açısından verimliliğine göre değerlendirilmektedir.

Şekil 3.1'de görülebileceği gibi, GA kullanan yaklaşım, nesiller boyunca bir çözüm popülasyonunu koruduğu ve geliştirdiği için doğası gereği karakterize edilmektedir. Bu yöntem, İHA teslimatları için verimli rotaların araştırılmasında iyileştirme sağlamaktadır.



Şekil 3.1. Genetik Algoritma Akış Şeması

Genetik Algoritma Süreci Aşamaları

- **Başlangıç popülasyonu:** GA başlangıç noktası bir dizi İHA rota konfigürasyonudur. Kromozom olarak adlandırılan her bir konfigürasyon, teslimat noktalarının dizilerini temsil eden rotalardan oluşmaktadır. Başlatma

sırasında, arama uzayını kapsamlı bir şekilde keşfetmek için bir dizi çözümü kapsamak amaçlanmıştır. Rota konfigürasyonlarının (kromozomlar) ilk popülasyonu, İHA'ların teslimat noktaları ve kapasitelerine göre oluşturulmaktadır. Her bir noktayı belirli bir İHA'ya atamak için K-Means kümeleme yöntemi kullanılmaktadır.

Notasyon:

P: Popülasyon büyüklüğü

$Route_k$: k. İHA'nın rotası (teslimat noktalarının sıralı listesi)

Popülasyon= $\{Route_1, Route_2, \dots, Route_p\}$

- Seçilim süreci: Bu süreç, uygunluğun değerlendirilmesine dayanan seçilime benzemektedir. Zaman ve enerji verimliliği için teslimat rotalarını optimize eden ve aynı zamanda yük sınırlarına uyan en uygun çözümlerin üreme için seçilme şansı bulunmaktadır. Çözümlerden yararlanma ve olasılıkları keşfetme arasındaki dengeyi korumak için, bir sonraki nesil için çözümleri seçmek üzere bir rulet tekerleği mekanizması kullanılmıştır.

Rulet Tekerleği Seçimi:

Rulet tekerleği seçiminde, her bireyin seçilme olasılığı uygunluk değeri ile orantılıdır. Uygunluk değeri, maliyetin (Z) tersine orantılıdır, çünkü maliyeti minimize etmeye çalışıyoruz. Dolayısıyla, düşük maliyet değerine sahip bireylerin uygunluk değeri yüksek, dolayısıyla seçilme olasılığı daha yüksektir.

Uygunluk değeri, Z maliyetine göre şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$\text{Uygunluk değeri} = 1/Z$$

Her bireyin seçilme olasılığı ise uygunluk değeri ile orantılı olarak hesaplanmaktadır:

$$\text{Seçilme Olasılığı} = \frac{1/Z_i}{\sum_{i=1}^P 1/Z_i} \quad (3.2)$$

Burada:

- Z_i , i'nci bireyin maliyet değeridir.
- P, popülasyon büyüklüğüdür.

Bu formüle göre, düşük maliyet değerlerine (Z) sahip bireyler, yüksek uygunluk değerleri ($1/Z$) ve dolayısıyla yüksek seçilme olasılıkları elde etmektedir.

- Çaprazlama: Çaprazlama, seçilen ebeveyn çözümlerini birleştirerek çözümler (yavrular) üretmede rol oynamaktadır. GA, konfigürasyonlar oluşturmak için ebeveyn rotalarının segmentlerinin değiştirildiği nokta veya çok noktalı çaprazlama gibi teknikleri içermektedir.

Modelde çaprazlama operatörü olarak basit bir tek noktalı çaprazlama işlemi kullanılmaktadır. Bu yöntem, iki ebeveyn bireyin belirli bir kesişme noktasında kesişmesiyle yeni yavrular oluşturmakta ve bu süreçte belirli sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Özellikle permütasyon kromozomlar söz konusu olduğunda, bu çaprazlama yöntemi bazen mükerrer (tekrarlı) noktalı çözümler oluşturabilmekte, yani aynı teslimat noktası birden fazla kez görünmektedir veya bazı teslimat noktaları eksik kalabilmektedir.

Bu tür mükerrer veya eksik noktalı çözümleri önlemek için kod içerisinde geçerlilik kontrolü ve düzeltme mekanizmaları bulunmaktadır. “Mutate” fonksiyonu, geçersiz mutasyonları orijinal rotayla değiştirmekte, “is_route_valid” fonksiyonu ise rotanın kapasite sınırlarını ve başlangıç-bitiş noktalarının doğruluğunu kontrol etmektedir.

Çaprazlama Operatörü (Tek Noktalı Çaprazlama):

İki ebeveyn bireyin rotalarının belirli bir noktasında kesişerek yeni yavrular oluşturulmaktadır.

Ebeveyn 1: $Route_1 = [A, B, C, D, E]$

Ebeveyn 2: $Route_2 = [C, E, D, A, B]$

Çaprazlama Noktası: 3

Yavru 1: $Route_1^{Yavru} = [A, B, C, A, B]$

Yavru 2: $Route_2^{Yavru} = [C,E,D,D,E]$

Bu yavrular, rotanın geçerliliğini sağlamak için düzeltme işlemine tabi tutulmaktadır.

- Mutasyon: Mutasyon, popülasyon içinde çeşitliliği teşvik eden ve yerel optimumlara doğru yakınsamayı önleyen yavrulara yönelik uygulanan değişiklikleri ifade etmektedir.

Swap Mutasyonu:

İki rastgele noktanın yer değiştirilmesiyle bireyin rotası değiştirilmektedir.

Önceki Rota = [A,B,C,D,E]

Mutasyon Noktaları: 2 ve 4

Mutasyon Sonrası Rota = [A,D,C,B,E]

2.1.5. 2-Opt Yöntemi

2-Opt yöntemi, öncelikle Gezgin Satıcı Problemi (TSP) ve benzer rotalama problemlerinin çözümlerini iyileştirmek amacıyla kullanılan bir optimizasyon algoritmasıdır (X. Chen vd., 2017). Bir rotadan iki kenarın iteratif olarak çıkarılmasını ve toplam rota mesafesini azaltmak için farklı bir şekilde oluşturulan iki yolun yeniden bağlanmasını kapsamaktadır. 2-Opt yönteminin ilk amacı, bir rotada toplam mesafeyi artıran herhangi bir çaprazlama noktasını ortadan kaldırarak rotayı daha verimli hale getirmektir.

Genetik algoritma modelinde kullanılan 2-Opt yöntemi, algoritma tarafından üretilen çözümlerin kalitesini artırmak amacıyla bir yerel arama optimizasyon tekniği olarak kullanılmaktadır (Uddin vd., 2023). Genetik algoritmalar çaprazlama ve mutasyon yoluyla çözüm uzayını keşfetmede etkili olsalar da bazen optimal olmayan çözümlere yakınsayabilmektedirler. 2-Opt yöntemi, rotaların mümkün olduğunca kısa ve verimli olmasını sağlamak için lokal optimizasyonlar gerçekleştirerek bu çözümleri daha da iyileştirmek için kullanılır. Bu kullanım ile, genetik algoritmanın küresel arama ve 2-Opt yönteminin lokal optimizasyon özelliklerinden yararlanarak rotalama ve çizelgeleme problemlerinde daha iyi çözümler sağlamaktadır.

GA Modelinde 2-Opt Yöntemi:

1. İki kenar seçilir ve bu kenarlar değiştirilir.
2. Yeni rota daha kısa ise bu rota kabul edilir.

Formülasyon:

Önceki Rota: Route=[A,B,C,D,E]

Değiştirilecek Kenarlar: (B, C) ve (D, E)

Yeni Rota: Route=[A,D,C,B,E]

2.2. Önerilen Algoritma 1

Bu uygulamada, acil durum lojistiği için hibrit İHA/İKA rotalama problemi çalışılmıştır. İHA/İKA ile ortak dağıtım modeli, her iki aracın birden fazla dağıtım görevini tamamlamak için birlikte çalıştığı, özellikle acil durumlar için uygun bir lojistik hizmet modelidir. Ele alınan problem, İKA, İHA ve tıbbi kitlerin depolanabileceği merkezi bir depoyu içermektedir. Araç, İHA'ları ve tıbbi kitleri merkezi depodan önceden planlanmış bir rota boyunca acil durum toplanma noktalarına taşırken, İHA'lar tıbbi kitleri otonom olarak İKA'dan alır ve dağıtım için diğer acil durum toplanma noktalarına uçmaktadır. İHA'lar, tüm görevler tamamlanana kadar yeniden şarj olmak ve daha fazla teslimat yapmak için İKA'ya geri döner. Ardından her iki araç da merkez depoya geri dönmektedir. Çalışma, İHA uçuş mesafesi, küme düğümleri, teslimat sırası, dayanıklılık süresi gibi kısıtlamaları göz önünde bulundurarak toplam teslimat süresini en aza indirmek için İHA/İHA rotalarının planlanmasına odaklanmaktadır.

2.2.1. Karar Değişkenleri, Amaç Fonksiyonu ve Kısıtlar

Problemin aşağıdaki varsayımları, afet sonrası durumlar için operasyon senaryosuna dayanmaktadır:

1. Tüm tıbbi kitler ve kara/hava araçları merkezi depoda bulunmaktadır.
2. Bir İKA sadece dört İHA taşıyabilmektedir (Y. Chen vd., 2019).
3. Bir İHA yalnızca bir tıbbi kit taşıyabilmektedir (Dorling vd., 2017).
4. Her bir toplanma noktası yalnızca bir İKA veya İHA tarafından ziyaret edilmelidir.
5. İKA toplanma noktasına ulaştığında, İHA'lar toplanma noktalarına tıbbi kitleri teslim etmek üzere İKA üzerinden kalkış yapmaktadır.

6. Acil durum toplanma noktalarının yerlerinin bilindiği ve tüm araçların önceden hedef noktalara atandığı varsayılmaktadır.
7. İHA'lar bir sonraki İKA istasyonuna geri dönebilmektedir.
8. Toplam uçuş süresini en aza indirmek için birden fazla İHA, İKA noktalarından aynı anda gönderilebilmektedir.
9. İHA'lar aynı toplanma noktasından enerjisi yettiği takdirde bir kez daha teslimat yapmak üzere kalkış yapabilmektedir.
10. İKA'nın hızı (S_{UGV}) ve İHA'nın hızı (S_{UAV}) teslimat süresini etkiledikleri için dikkate alınmaktadır.
11. Her bir İKA'nın tıbbi kitler için sınırlı bir taşıma kapasitesi (C_{UGV}) ve her bir İHA'nın tıbbi kitler için sınırlı bir taşıma kapasitesi (C_{UAV}) vardır.

Her bir İHA'nın maksimum uçuş menzili sistemde sınırlayıcı bir faktördür. İKA'nın rotası bir depoda başlar ve tur sonrası aynı depoda bitmekte olup, tur içerisinde İHA'ların kalkış yaptığı veya iniş yaptığı istasyonlarda durmaktadır. Bu istasyonlar aynı zamanda, istasyon çevresindeki yoğun nüfuslu acil durum toplanma noktalarına tıbbi kitlerin ulaştırılması için aynı İHA'nın birden fazla kalkış yapabileceği bekleme alanları olarak da hizmet vermektedir. Birden fazla İHA söz konusu olduğundan ötürü İHA'lar, farklı zamanlarda gelebilirler ve erken gelen İHA'ların İKA'yı beklemesi gerekebilmektedir. Her İHA yalnızca önceden belirlenmiş bir ağırlığa sahip olan bir tıbbi kit taşıyabilmektedir. Bir toplanma noktasına indikten sonra, İHA, İKA'nın rotası boyunca bir sonraki istasyona geri dönmeli, burada yeniden şarj edilebilmeli ve sonraki teslimatlar için başka bir tıbbi kit ile yüklenebilmelidir. Bu yaklaşım, İHA'ların İKA'lara göre öngörülen daha düşük işletme maliyetlerinden yararlanmakta ve İHA'lar ile İKA'nın yönlendirilmesinde daha fazla esneklik sunarak kentsel acil durumlarda tıbbi malzemelerin daha verimli bir şekilde teslim edilmesini sağlamaktadır. Aşağıda sunulan Tablo 3.1., hibrit İHA/İKA rotalama probleminin formüle edilmesinde kullanılan indisleri, Tablo 3.2., parametreleri ve Tablo 3.3. ise karar değişkenlerini açıklamaktadır.

TABLO 3.1. İndisler

İndisler	Açıklamalar
P	Acil durum toplanma noktası indisleri, burada $P = \{1,2,...,p_{\max}\}$ ve $p_{\max}$ kentsel alandaki toplam toplanma noktası sayısıdır
Q	Durak indisleri, burada $Q = \{1,2,...,q_{\max}\}$ ve $q_{\max}$ kentsel alandaki toplam durak sayısıdır
R	İHA indisleri, burada $R = \{1,2,...,r_{\max}\}$ ve $r_{\max}$ İKA üzerindeki toplam İHA sayısıdır
W	İHA indisleri, burada $R = \{1,2,...,r_{\max}\}$ ve $r_{\max}$ İKA üzerindeki toplam İHA sayısıdır

TABLO 3.2. Parametreler

Parametreler	Açıklama
$N(p,q)$	Matris, her bir paketin hangi acil durum toplanma noktasına teslim edilmesi gerektiğini göstermektedir
$D(p,q)$	Her bir acil durum toplanma noktasının duraklara dakika cinsinden uzaklığıdır
S_{UGV}	İKA'nın dakika başına metre cinsinden hızıdır
S_{UAV}	İHA'nın dakika başına metre cinsinden hızıdır
C_{UGV}	İKA için tıbbi kitlerin maksimum taşıma kapasitesidir
C_{UAV}	İHA için tıbbi kitlerin maksimum taşıma kapasitesidir

TABLO 3.3. Karar Değişkenleri

Karar Değişkenleri	Açıklama
$M(p,q,r)$	p toplanma noktası r İHA'sı tarafından q durağında teslim edilip edilmeyeceğini gösteren bir karar değişkenidir.
$SE(p,q,r)$	İHA'nın dakika cinsinden şarj süresini gösteren gerçek değerli bir değişkendir.
$SD(q,r)$	İHA r 'nin toplanma noktasına teslim etmek ve q durağında şarj etmek için harcadığı toplam süreyi dakika cinsinden gösteren gerçek değerli bir değişkendir.
$SDM(q)$	İKA'nın q durağında geçirdiği toplam süreyi dakika cinsinden gösteren gerçek değerli bir değişken. Bu süre, q durağındaki

	İHA'lar arasında en yüksek teslimat ve şarj süresine sahip İHA'dan elde edilmektedir.
--	---

Probleme ilişkin modelde önerilen amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda açıklanmıştır.

Kısıtlar:

- İfade (3.1), her bir tıbbi kitin herhangi bir İHA tarafından herhangi bir durakta teslim edilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{q=1}^{q_{\max}} \sum_{r=1}^{r_{\max}} M_{(p,q,r)} = 1, \forall p \in P \quad (3.3)$$

- İfade (3.2), İHA'ların her durakta yalnızca kendi menzilleri içindeki acil durum toplanma noktalarına teslimat yapmasını sağlamaktadır. İHA, teslimat yolunda bir tıbbi kit taşıdığından, şarj süresinin %150'sini (60/40) tüketmektedir (Torabbeigi vd., 2020). Bu nedenle, acil durum toplanma noktasından durağa olan mesafenin zaman açısından 60 dakikalık toplam uçuş süresinin 2,5 katından daha az olması gerekmektedir. İHA teslimat dönüşünde boş döndüğü için harcadığı zaman kadar şarj tüketmektedir.

$$2.5N_{(p,q)}D_{(p,q)}M_{(p,q,r)} \leq 60, \quad \forall p \in P, q \in Q, r \in R \quad (3.4)$$

- İfade (3.3), ifade (3.2)'den elde edildiği gibi, İHA r'nin model içindeki q durağından p acil durum toplanma noktasına ulaşması için dakika cinsinden şarj süresini elde etmek için kullanılmaktadır.

$$2.5N_{(p,q)}D_{(p,q)}M_{(p,q,r)} = SE_{(p,q,r)}, \quad \forall p \in P, q \in Q, r \in R \quad (3.5)$$

- İfade (3.4), İHA r'nin q durağından teslimat ve şarj için harcadığı toplam süreyi dakika cinsinden elde etmek için kullanılmaktadır.

$$\sum_{p=1}^{p_{\max}} (2N_{(p,q)}D_{(p,q)}M_{(p,q,r)} + SE_{(p,q,r)}) = SD_{(q,r)}, \quad \forall q \in Q, r \in R \quad (3.6)$$

- İfade (3.5), en uzun şarj süresine sahip İHA'nın dikkate alındığı q durağından İHA'ların teslimat ve şarj için harcadıkları toplam süreyi dakika cinsinden elde etme koşulunu sağlamaktadır.

$$SD_{(q,r)} \leq SDM_{(q)}, \quad \forall q \in Q, r \in R \quad (3.7)$$

- İfade (3.6), her İHA'nın kapasitesinden daha fazla tıbbi kit taşımamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{p_{\max}} M_{(p,q,r)} \leq C_{\text{UAV}}, \quad \forall r \in R, q \in Q \quad (3.8)$$

- İfade (3.7), İKA'nın kapasitesinden daha fazla tıbbi kit taşımamasını sağlamaktadır.

$$\sum_{p=1}^{p_{\max}} \sum_{r=1}^{r_{\max}} M_{(p,q,r)} \leq C_{\text{UGV}}, \quad \forall q \in Q \quad (3.9)$$

- İfade (3.8), her bir İHA için batarya değiştirme sayısının izin verilen maksimum değiştirme sayısını aşmamasını sağlamaktadır $w_{\max}$.

$$\sum_{q=1}^{q_{\max}} \sum_{w=1}^{w_{\max}} B_{(q,r,w)} \leq w_{\max}, \quad \forall r \in R \quad (3.10)$$

- İfade (3.9), İHA'ların yalnızca İKA tarafından ziyaret edilen duraklardan kalkış yapabilmesini sağlamaktadır.

$$M_{(p,q,r)} \leq V_{\text{UGV}(q)}, \quad \forall p \in P, q \in Q, r \in R \quad (3.11)$$

İfade (3.9)'da $V_{UGV}(q)$, İHA q durağını ziyaret ederse "1", aksi takdirde "0" değerini alan ikili bir değişkendir. Bu, İHA'ların yalnızca İKA tarafından ziyaret edilen duraklardan uçabilmesini sağlamaktadır.

- Amaç fonksiyonu:

İKA ve İHA iş birliğine dayalı lojistik yol optimizasyon modeli, toplam dağıtım maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Acil durum toplanma noktasına en uzun teslimatı yapan İHA' nın harcadığı toplam süreyi ve her durakta şarj süresini dakika cinsinden en aza indirmeyi hedefleyen amaç fonksiyonu İfade (3.10)'de gösterilmiştir:

$$Z_{\min} = \sum_{q=1}^{q_{\max}} SDM_{(q)} \quad (3.12)$$

Modelde ilk olarak, acil durum toplanma noktalarının bulunduğu koordinatlar temel alınarak İHA'nın uçuş menzili içerisinde K-Means kümeleme yöntemi ile küme merkezleri tahmin edilmektedir. Algoritmanın iki aşaması vardır: ilki teslimat konumlarını bir kerede en yakın kümeye (centroid) atamakta ve ardından centroid'leri yeniden hesaplamaktadır, bu da optimumun altında bir yerel minimumla sonuçlanmaktadır. Bununla birlikte, başlangıç ve Aşama II için iyi aday merkezler vermektedir. İkinci aşama, eğer maliyeti düşürüyorsa aday noktaları farklı merkezlere yeniden atamak için "on-line" güncellemeler kullanmaktadır. Küme merkezleri belirlendikten sonra, sezgisel yöntemlerden biri olan gezgin satıcı yöntemi kullanılarak insansız kara aracının (İKA) rotası hesaplanmaktadır. GSP, belirlenen n konumun tamamından sadece bir kez geçerken aynı konumda başlayan ve biten en verimli rotayı bulmayı ifade etmektedir. İnsansız kara aracı (İKA) duraklara ulaştığında üzerindeki İHA'lar ile teslimat yapılmasını sağlamak için Karışık Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile yer aracı üzerindeki dört İHA'nın en kısa sürede hangi acil durum toplanma noktalarına gideceği hesaplanmaktadır.

Hibrit İHA/İHA rotalama çözümümüzün nasıl işlediğini açıklamak için Şekil 3.1.'de bir İKA ve dört İHA'nın bir depodan yola çıkarak altı İKA durağından acil durum toplanma noktalarına malzeme teslim ettiği ve durakta İKA'ya iniş yaptığı süreç gösterilmektedir.

Şekil 3.2.'deki akış şeması, İHA/İKA rotalaması kullanarak acil durum lojistiği yaklaşımında yer alan adımları göstermektedir. Süreç, toplanma noktaları için koordinatların oluşturulmasıyla başlamaktadır. Ardından, İKA'lardan İHA dağıtımlarını optimize etmek için alanı kümelere bölmek üzere K Means Kümeleme Algoritması uygulanmaktadır. Bu kümeleme yöntemi, operasyonları alt kümelere ayırarak daha etkin hale getirmeye ve İHA'lar için seyahat mesafelerini azaltmaya yardımcı olmaktadır.

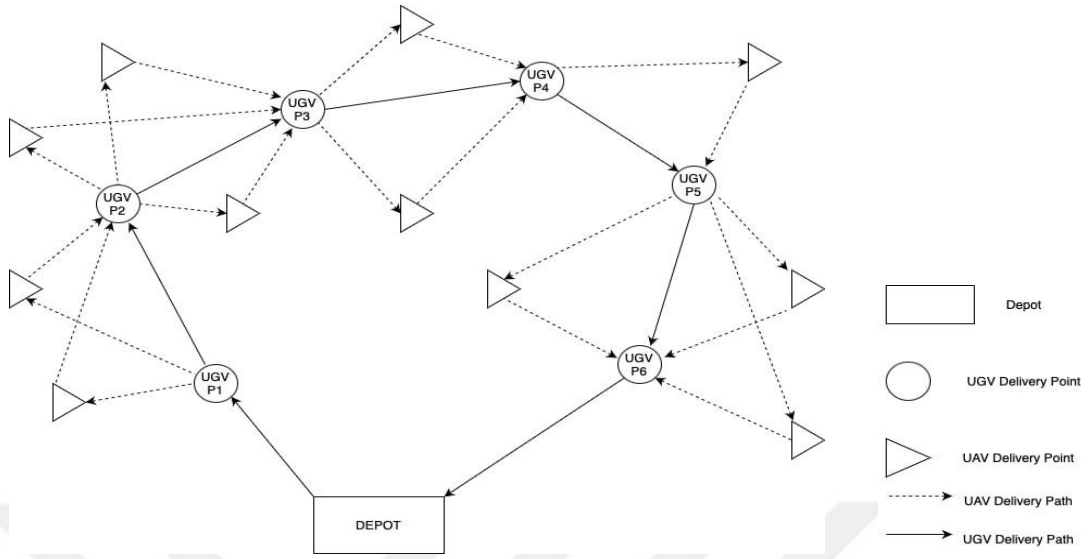
Daha sonra, belirlenen kümelerin küme merkezleri arasındaki yolları bulmak amacıyla GSP'yi kullanarak İKA'lar için rota oluşturulmuştur. Bu yöntem, İKA'ların rotaları takip etmesini sağlayarak seyahatte zaman kazandırmaktadır. Rota planlamasının ardından, İHA kapasitesi ve uçuş menzili gibi kısıtlara dayalı görevler atayarak İHA'lar için teslimat atamalarını optimize etmek amacıyla Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) kullanılmıştır.

Son olarak metodoloji, önerilen lojistik çözümün iyi çalıştığını garanti etmek amacıyla teslimatların ne kadar hızlı yapıldığını ve genel verimliliği değerlendiren sonuçları ve performans ölçümlerini inceleyerek sona ermektedir. Bu kapsamlı yöntem, teslimat süresini kısaltmak ve gerekli durumlarda yanıt verebilirliğini artırmak için tasarlanmıştır.



Şekil 3.2. Hibrit İHA/İKA Rota Akış Şeması.

Hibrit İHA/İKA rotalama çözümü yaklaşımını tanımlamak için, Şekil 3.3'te merkezi bir depodan ayrılan İKA ve dört İHA, altı İKA durağından acil durum toplanma noktalarına ulaşmakta ve bir sonraki durakta İKA'ya iniş yapmaktadır.



ŞEKİL 3.3. Hibrit İHA/İKA Rotalama Çözümü

2.3. Önerilen Algoritma 2

Bu çalışmada, İHA rota optimizasyonu problemi için K-Means kümeleme yöntemi, GA ve 2-Opt yöntemlerini entegre eden bir yaklaşım sunulmaktadır. Burada İHA'ların toplam uçuş süresini, enerji tüketimini ve operasyonel maliyetleri minimize ederek, yük taşıma kapasitesi ve enerji kısıtları altında en verimli rotaların belirlenmesi amaçlanmaktadır.

İlk adımda, teslimat noktalarını İHA'lara atanacak kümelere ayırmak için K-Means kümeleme yöntemi kullanılmıştır. K-Means, teslimat noktalarını yakınlıklarına göre gruplandırarak her bir kümenin merkezini belirlemektedir. Bu merkezler, İHA'ların başlangıç noktaları olarak alınır ve rotalar bu merkezlere göre oluşturulmaktadır. Bu yöntem, başlangıç popülasyonunun oluşturulmasında önemli bir rol oynamakta olup genetik algoritmanın arama uzayını daraltarak daha etkili sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır.

K-Means kümeleme yöntemi ile başlangıç popülasyonu oluşturulduktan sonra, genetik algoritma kullanılarak bu rotalar optimize edilmektedir. İlk olarak, çeşitli başlangıç çözümleri (rota konfigürasyonları) rastgele veya K-Means kümeleme yöntemi ile oluşturulmaktadır. Her çözümün (rotanın) uygunluğu, toplam uçuş süresi, enerji tüketimi ve kapasite kısıtları dikkate alınarak değerlendirilmektedir. Uygunluk

fonksiyonuna göre en iyi çözümler seçilerek bu işlem, rulet tekerleği seçimi veya turnuva seçimi gibi yöntemlerle gerçekleştirilir. Seçilen çözümler arasında genetik materyal değişimi yapılır ve yeni çözümler (yavrular) oluşturulur. Bu işlem, mevcut çözümlerin kombinasyonlarını araştırarak daha iyi çözümler bulmayı amaçlamaktadır. Yeni çözümler üzerinde küçük rastgele değişiklikler yapılarak popülasyon içindeki çeşitlilik artırılır ve yerel optimumlardan kaçınması sağlanmaktadır.

GA ile elde edilen çözümler, 2-Opt yöntemi kullanılarak optimize edilmektedir. Bu yöntem kullanılarak, İHA rotasının toplam uzunluğu azaltılarak enerji tüketimini ve uçuş süresini minimize etmeye katkı sağlamaktadır (Uddin vd., 2023).

Modelde kullanılan temel kısıtlar arasında kapasite, enerji ve rota kısıtları yer almaktadır. Kapasite kısıtı, her İHA'nın taşıma kapasitesinin aşılmamasını sağlamaktadır. Enerji kısıtı ise, her İHA'nın toplam enerji tüketiminin mevcut batarya kapasitesinin %80'ini aşmamasını garanti etmektedir. Bu kısıtlar, genetik algoritmanın uygunluk fonksiyonunun hesaplanmasında kritik rol oynar ve çözümlerin geçerliliğini belirlemektedir.

Modelde kullanılan ana değişkenler arasında rota atama değişkeni, seyahat süresi değişkeni ve enerji tüketim değişkeni bulunmaktadır. Rota atama değişkeni, bir İHA'nın belirli bir rota segmentini takip edip etmediğini göstermektedir. Seyahat süresi değişkeni, bir İHA'nın belirli bir rota segmentini takip ederken harcadığı süreyi ifade etmektedir. Enerji tüketim değişkeni ise, bir İHA'nın belirli bir segmentte harcadığı enerjiyi temsil etmektedir.

Bu metodolojik yaklaşımla, İHA'ların toplam uçuş süresini, enerji tüketimini ve operasyonel maliyetleri minimize ederek, yük taşıma kapasitesi ve enerji kısıtları altında en verimli rotaları belirlemek amaçlanmaktadır. K-Means kümeleme yöntemi, genetik algoritma ve 2-Opt yöntemlerinin entegrasyonu, gerçek dünyadaki İHA teslimat sistemlerinin karşılaştığı zorlukları ele alarak daha verimli ve ölçeklenebilir çözümler sunmaktadır. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, İHA tabanlı teslimat sistemlerinin operasyonel verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmaktadır.

2.3.1. Karar Değişkenleri ve Amaç Fonksiyonu

Bu kısımda, merkezi depodan İHA'larla önceden belirlenmiş teslimat noktalarına kadar olan süreci kapasite, enerji ve zaman kısıtları altında optimize edecek model açıklanmıştır.

Uygulamanın temel amacı, İHA'ları birden fazla noktaya ulaştırırken her bir segmentin ayrı ayrı toplam uçuş süresini, enerji tüketimini ve toplam alt tur mesafesini optimize etmektir. Bu kapsamda enerji verimliliği ve toplam maliyet minimizasyonu gibi kaynakların en aza indirilmesi ile genel teslimat görevinin operasyonel olarak sürdürülebilir hale getirilmesi hedeflenmektedir. GA modelinde kullanılan notasyonlar Tablo 3.4.'te sunulmuştur.

Tablo 3.4. Notasyonlar

Sembol	Açıklama
N	Depo dahil teslimat noktası sayısı
D	Sistemdeki toplam İHA sayısı
M_p	Bir İHA'nın maksimum taşıma kapasitesi (kg)
W_b	Bir İHA'nın temel ağırlığı (kg)
ρ	Hava yoğunluğu (kg/m ³)
C_d	Sürüklenme katsayısı
A	İHA'ların kanat alanı (m ²)
g	Yerçekimi ivmesi (m/s ²)
h	Kalkış ve iniş yüksekliği (m)
P	Genetik algoritmada popülasyon büyüklüğü
G	Genetik algoritmada maksimum jenerasyon sayısı
μ	Genetik algortmadaki mutasyon oranı
T	Genetik algoritmada turnuva boyutu
ϵ	Kalkış sırasında hızlanma katsayısı
V_{bmin}	İHA hareketi için temel minimum hız (m/s)
V_{bmax}	İHA hareketi için temel maksimum hız (m/s)
I	İHA indis seti
C	Teslimat noktaları için küme seti
R	Her bir İHA için rota seti
S	İHA'nın rotasındaki segmentler seti

Karar Değişkenleri:

Modelin formülasyonunda kullanılan karar değişkenleri aşağıda açıklanmıştır:

- Rota Ataması $R_{\{d,p\}}$: Teslim noktasının p. İHA ve d. alt tur rotası üzerinde olup olmadığını gösteren ikili bir değişkendir. $R_{\{d,p\}} = 1$, İHA d, teslimat noktası p'ye atanmışsa 1, aksi takdirde $R_{\{d,p\}} = 0$ değerini almaktadır.
- Yük Dağılımı $L_{\{d,p\}}$: d. İHA tarafından p. teslim noktasına taşınan yükün ağırlığını temsil eden bir tür sürekli değişkendir.
- Enerji Tüketimi $E_{\{d,s\}}$: s. Segment uçuşu sırasında d. İHA tarafından tüketilen enerjiyi hesaplayan sürekli tipte bir değişkendir. İHA'nın o segmentteki toplam faydalı yükünü, hızını ve toplam segment uçuş mesafesini dikkate almaktadır.
- Uçuş Hızı $V_{\{d,s\}}$: İHA'nın s. segmentindeki d. uçuş hızını temsil eden sürekli tipte bir değişkendir. İHA'nın hızını s segmentinin başlangıcındaki ağırlığına göre dinamik olarak belirleyerek enerji verimliliğini amaçlamaktadır.

Yukarıda açıklanan karar değişkenleri, araştırmanın temelini oluşturan optimizasyon sürecinin unsurlarıdır. Bu değişkenler aracılığıyla, teslimat noktalarının İHA'lara atanması, İHA kapasitesine göre faydalı yük dağılımı ve İHA hızlarının alt tur içinde dinamik olarak ayarlanması enerji verimliliğinin elde edilmesini sağlamaktadır. Bu değişkenlerin optimum şekilde ayarlanması sağlanarak İHA ile görev planlamalarında operasyonel olarak verimli ve etkin kaynak kullanımı sağlanmaktadır.

Amaç Fonksiyonu

İHA teslimat sisteminin amacı, İHA'ların toplam uçuş süresini, enerji tüketimini ve operasyonel maliyetleri minimize ederek, yük taşıma kapasitesi ve enerji kısıtları altında en verimli rotaları belirlemektir. İHA hızlarındaki değişkenlik ve enerji tüketiminin önemi göz önünde bulundurularak fonksiyon aşağıdaki gibi formüle edilmektedir;

$$\min Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N t_{ijk} \cdot x_{ijk} \quad (3.13)$$

Burada;

- Z, minimize etmeyi amaçladığımız toplam uçuş süresini temsil etmektedir.
- K, kullanılan İHA sayısını ifade etmektedir.
- N, depo da dahil olmak üzere teslimat noktalarının sayısına karşılık gelmektedir.
- $T_{\{ijk\}}$, değişken hızlar dikkate alındığında, k. İHA'nın, i noktasından j noktasına doğrudan seyahat etmesi için geçen süreyi göstermektedir.
- $X_{\{ijk\}}$, k. dronu doğrudan i noktasından j noktasına gidiyorsa 1'e, aksi takdirde 0'a eşit olan ikili bir değişkendir.

2.3.2. Genetik Algoritmanın Uygulanması

Bu uygulamada, enerji ve maliyet verimliliği elde etmeye odaklanarak İHA'ların rotalarını optimize etmek amacıyla GA yöntemi kullanılmaktadır. GA modelinde kısıtların nasıl çalıştığı ve 2-Opt yönteminin kullanımı aşağıda açıklanmaktadır.

Uygunluk Değerlendirmesi

Her bireyin uygunluğu, toplam uçuş süresini minimize etmeyi hedefleyen amaç fonksiyonuna göre değerlendirilmektedir. Uygunluk değerlendirme mesafe, enerji tüketimi ve yük kısıtlamaları gibi faktörlere dayanmaktadır. Her bir segment için enerji tüketimi hesaplamaları, İHA ağırlığı, taşıma kapasitesi, seyir hızı ve aerodinamik özellikler gibi değişkenleri dikkate alınmaktadır.

2-Opt Yöntemi ile İyileştirme

Genetik algoritma sonrası rotaların iyileştirilmesi için 2-Opt yöntemi uygulanmaktadır. Her bir offspring üzerinde çaprazlama ve mutasyon adımları gerçekleştirildikten sonra her bir rotayı ayrı ayrı iyileştirmek için 2-Opt yöntemi uygulanmaktadır. Bu adım, teslimat noktalarının ziyaret edilme sırasını optimize etmeye odaklanmaktadır. Olası

çözümlerde sıkışıp kalmayı önlemeye yardımcı olan bu yöntem, popülasyonun genel uygunluğunu artırmaktadır.

GA modeli uygulamasının başlangıcında, rota konfigürasyonlarına sahip bir popülasyon oluşturmak için K-Means kümeleme yöntemi kullanılmaktadır. 2-Opt yöntemi, GA tarafından oluşturulan rotaları iyileştirmek ve optimize etmek için sonraki nesillerde uygulanmaktadır. Bu entegrasyon, enerji ve zaman sınırlamalarını dikkate alarak İnsansız Hava Araçlarının (İHA) teslimatı için daha kısa yollar keşfetmeye yönelik Genetik Algoritmaların (GA) yeteneğini geliştirmektedir.

Algorithm 4 İHA Rota Optimizasyonu için Geliştirilmiş Genetik Algoritma (İHAGGA)

```

1: Girdi: Kordinatlar, PaketAgirlik, DroneSayisi, MaksimumYuk,
2:   PopulasyonBuyuklugu, MaksimumNesil, MutasyonOrani, TurnuvaBuyuklugu
3: Cikti: EnIyiCozum, EnIyiUyum
4: procedure İHAGGA
5:   Kumeler  $\leftarrow$  kumelendir(Coords, DroneSayisi)
6:   Pop  $\leftarrow$  popBaslat(Kumeler, PktAgrlk, PopBuyuklugu)
7:   EnIyiCozum  $\leftarrow \emptyset$ , EnIyiUyum  $\leftarrow \infty$ 
8:   for nesil  $\leftarrow$  1 den MaxNesil do
9:     YeniPop  $\leftarrow \emptyset$ 
10:    for i  $\leftarrow$  1 den  $\frac{|Pop|}{2}$  do
11:      E1, E2  $\leftarrow$  turnuvaSec(Pop, TurnuvaBuyuklugu, Coords, PktAgrlk, MaxYuk)
12:      O1, O2  $\leftarrow$  caprazla(E1, E2, MaxYuk, PktAgrlk)
13:      O1  $\leftarrow$  mutasyon(O1, MutOrani, MaxYuk, PktAgrlk)
14:      O2  $\leftarrow$  mutasyon(O2, MutOrani, MaxYuk, PktAgrlk)
15:      for drone  $\leftarrow$  1 den DroneSayisi do
16:        if drone  $\leq$  uzunluk(O1) then
17:          O1[drone]  $\leftarrow$  iki_opt(O1[drone], Coords)
18:        end if
19:        if drone  $\leq$  uzunluk(O2) then
20:          O2[drone]  $\leftarrow$  iki_opt(O2[drone], Coords)
21:        end if
22:      end for
23:      YeniPop.ekle(O1, O2)
24:    end for
25:    Pop  $\leftarrow$  YeniPop
26:    for her Birey  $\in$  Pop do
27:      Uyum  $\leftarrow$  uyumHesapla(Birey, Coords, PktAgrlk, MaxYuk)
28:      if Uyum  $<$  EnIyiUyum  $\wedge$  Uyum  $\neq 0$  then
29:        EnIyiUyum  $\leftarrow$  Uyum, EnIyiCozum  $\leftarrow$  Birey
30:      end if
31:    end for
32:    yazdir("Nesil", nesil, "En İyi Uyum:", EnIyiUyum)
33:  end for
34:  return EnIyiCozum, EnIyiUyum
35: end procedure

```

ŞEKİL 3.3. İHA Rota Optimizasyonu için Genetik Algoritma

Şekil 3.3'te sunulan algoritma, İHA rota optimizasyonu için genetik algoritma kullanarak en iyi çözümü ve en iyi uyumu bulmayı hedeflemektedir. Algoritma, belirli giriş parametreleriyle (koordinatlar, paket ağırlıkları, drone sayısı, maksimum yük, popülasyon büyüklüğü, maksimum nesil, mutasyon oranı, turnuva büyüklüğü) çalışmaktadır. İlk olarak, teslimat noktalarını kümelere ayırmakta ve başlangıç popülasyonunu oluşturmaktadır. Daha sonra, belirlenen maksimum nesil sayısına kadar her nesilde yeni bir popülasyon üretmektedir. Her nesilde, turnuva seçimi ile ebeveyn bireyler seçilmekte ve çaprazlama işlemi ile yeni bireyler (yavrular) üretilmektedir. Mutasyon işlemi, çeşitliliği sağlamak için uygulanmaktadır. Her yeni birey, iki-opt yöntemi ile iyileştirilmektedir. Yeni popülasyon, bir önceki popülasyonun yerini almakta ve her bireyin uygunluk değeri hesaplanmaktadır. En iyi uyuma sahip birey, en iyi çözüm olarak güncellenmektedir. Bu süreç, belirlenen nesil sayısına kadar devam etmekte ve sonunda en iyi çözüm ve en iyi uyum döndürülmektedir. Bu algoritma, İHA'ların rota optimizasyonu problemini çözmek için genetik algoritmanın etkili bir şekilde uygulanmasını sağlamaktadır.

2.3.3.Kısıtlar

Uygunluk değerlendirmesi, genetik algoritmanın kritik bir parçası olup, her bireyin (rota konfigürasyonunun) kalitesini belirlemekte ve toplam uçuş süresini minimize etmeyi hedefleyen amaç fonksiyonuna göre yapılmaktadır. Uygunluk değerlendirmesi için temel kısıtlar bu kısımda sunulmuştur:

- **Kapasite Kısıtı:** İHA'ların taşıma kapasitesi sınırlıdır. Bu nedenle, her bireyin rotası, İHA'nın maksimum taşıma kapasitesini aşmamalıdır. Her bir teslimat noktasındaki paket ağırlıkları dikkate alınarak toplam yük hesaplanmakta ve bu yükün kapasite sınırları içinde kalması sağlanmaktadır. Kapasiteyi aşan rotalar, uygunluk değerini olumsuz yönde etkilemektedir.
- **Teslimat Noktası Kısıtı:** Her paketin belirlenen teslimat noktasına ulaştığından emin olmak önem arz etmektedir. Model atlanan hedef bırakmadan tüm teslimat noktalarına servis yapıldığını garanti etmektedir.

- Enerji Kısıtı: İHA'nın her uçuş segmenti için enerji tüketimi hesaplamaları yapılmaktadır. Enerji tüketimi, İHA'nın ağırlığı, taşıma kapasitesi, seyir hızı ve aerodinamik özellikler gibi değişkenlere dayanmaktadır. Bu hesaplamalar, her bir uçuş segmentinin kalkış, seyir ve iniş aşamalarında tüketilen enerjiyi içermektedir.

2.3.3.1. Kapasite Kısıtı

Kapasite kısıtı, İHA teslimat sisteminde her bir İHA'nın maksimum yük kapasitesinin ötesinde aşırı yüklenmemesini sağlayan bir rol oynamaktadır. Bu kısıt, İHA rotalarının fizibilitesi ve güvenliği için hayati önem taşımaktadır.

Kısıt Formülasyonu

Matematiksel olarak her bir İHA için kapasite kısıtı aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\sum_{p \in route_d} weight(p) \leq max_payload, \quad \forall d \in D \quad (3.14)$$

Burada:

- $\sum_{p \in route_d} weight(p)$, d. İHA'nın rotasındaki tüm paketlerin ağırlığını hesaplamaktadır.
- $max_payload$, bir İHA'nın taşıyabileceği maksimum ağırlığı temsil etmektedir.
- $\forall d \in D$, bu kısıtın, D kümesindeki her İHA için geçerli olduğunu göstermektedir.

Değişkenler ve fonksiyonlar:

- $weight_p$: p noktasındaki bir paketin ağırlığını belirler. Bir İHA rotası $route_d$ içindeki her nokta bir pakete karşılık gelir. Bu fonksiyon, ağırlığın doğru bir şekilde hesaplanmasına yardımcı olmaktadır.

- Bir İHA'nın güvenli bir şekilde taşıyabileceği ağırlık sınırını temsil eden $max_{payload}$ adında önceden tanımlanmış bir sabit bulunmaktadır. İHA'nın kapasitesini kritik bir parametre olarak dikkate almak gerekmektedir.

2.3.3.2. Teslimat Noktası Kısıtı

Rota kısıtları, her teslimat noktasının bir İHA tarafından bir kez ziyaret edilmesini ve her İHA rotasının depoda başlayıp depoda bitmesini garanti etmektedir.

Teslimat Noktalarını Ziyaret Etme Kısıtı:

Bu kısıt, her teslimat noktasının bir İHA tarafından ziyaret edilmesini sağlar. Aşağıdaki gibi ifade edilmektedir;

$$\sum_{k=1}^K \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^N x_{ijk} = 1, \forall j = 1, 2, \dots, N \quad (3.15)$$

Bu denkleme göre her teslimat noktası j için farklı bir noktadan l, herhangi bir İHA k tarafından alınan bir rota olmalıdır.

Depo Başlangıç- Bitiş Kısıtı:

Bu kısıt, her bir İHA rotasının depoda başlamasını ve depoda bitmesini sağlar. İki denklem olarak formüle edilmektedir;

$$\sum_{j=1}^N x_{0jk} = 1, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{i0k} = 1, \forall k = 1, 2, \dots, K \quad (3.17)$$

Bu denklemler, her bir İHA k için depodan ('0' noktası) başlayarak bir teslimat noktasına j giden ve bir teslimat noktasından l depoya geri dönen bir rota olmasını sağlamaktadır.

2.3.3.3. Enerji Kısıtı

İHA ile teslimat sisteminde dikkate alınan faktörlerden biri de enerji kaynaklarının nasıl etkin bir şekilde yönetileceğidir. İHA'ların bataryalarını tüketmeden teslimat görevlerini başarıyla tamamlayabilmelerini sağlamak amacıyla enerji kısıtı uygulanmaktadır.

Enerji kısıtı, her bir İHA'ya hangi teslimat görevlerinin atanacağını belirlenmesinde rol oynamakta ve ayrıca rotanın planlanmasına yardımcı olmaktadır. Bir İHA'ya yalnızca enerji kısıtı kriterlerini karşılıyorsa görev atanmaktadır. Belirli bir alt görev, İHA'ların batarya kapasitesinin %80'inden fazlasını gerektiriyorsa, İHA'nın söz konusu görev için uygun olmadığından ötürü görev atanmamaktadır. Bu durumda, sistem yeterli pil kapasitesine sahip başka bir İHA seçmekte veya enerji taleplerini azaltmak için rotayı ayarlamaktadır. Bu yaklaşım, İHA'larımızın uçuş halinde iken güçlerinin tükenmeyeceğini garanti ederek hem verimlilik hem de güvenlik sağlamaktadır.

Matematiksel Formülasyon

Formülasyon için aşağıdaki notasyon kullanılmıştır:

- $E_{segment}(m, h, d)$: İHA'ların kütlesine m , yüksekliğine h ve mesafesine d bağlı olan bir uçuş segmentinin enerji tüketimini temsil etmektedir.
- E_{total} : İHA alt tur uçuş rotası için toplam enerji tüketimini göstermektedir.
- $B_{current}$: İHA batarya kapasitesini ifade etmektedir.
- $Route$: İHA alt tur rotasındaki uçuş segmentlerinin toplamını temsil etmektedir.

İHA rotasının toplam enerjisini hesaplamak için tüm uçuş segment enerjileri toplanmaktadır:

$$E_{total} = \sum_{s \in route} E_{segment}(s) \quad (3.18)$$

Enerji kısıtı daha sonra aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$E_{total} \leq 0.8 \times B_{current} \quad (3.19)$$

Her Segment İçin Zaman Hesaplaması

Her bir segmentin zamanını $t_{\{ijk\}}$, noktalar arasındaki mesafe ve İHA'nın değişken hızı gibi faktörlere dayanarak hesaplıyoruz ve hesaplama şu şekilde sunulmaktadır;

$$t_{ijk} = \frac{d_{ij}}{v_{ijk}} \quad (3.20)$$

Burada;

$d_{\{ij\}}$, i ve j noktaları arasındaki Öklid mesafesini göstermektedir.

$v_{\{ijk\}}$, i noktasından j noktasına giderken k. İHA'nın hızını temsil etmektedir.

Mesafenin Hesaplanması:

(x_1, y_1) ile (x_2, y_2) noktaları arasındaki $d_{\{ij\}}$ olarak ifade edilen mesafe aşağıdaki formül kullanılarak belirlenebilir;

$$d_{ij} = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (3.21)$$

Burada (x_1, y_1) ve (x_2, y_2) sırasıyla i ve j noktalarının koordinatlarıdır.

Hızın Hesaplanması:

K. İHA'nın i noktasından j noktasına kadar olan segment için hızını $v_{\{ijk\}}$ hesaplamak için taşıdığı yükün ağırlığı ve aerodinamik özellikleri gibi çeşitli faktörler dikkate alınmaktadır. Bu hesaplama için optimum hız fonksiyonu kullanılmaktadır;

$$v_{ijk} = V_{opt}(m_k + \text{payload}(i, j), A, C_d, \rho) \quad (3.22)$$

Burada $V_{\{opt\}}$ hız hesaplama fonksiyonunu, m_k ise İHA'nın temel ağırlığını göstermektedir. Bu kısıt, İHA rotalarının hem uygulanabilir hem de güvenli olmasını sağlamak için önem arz etmektedir.

Optimum Hızın Hesaplanması

Enerji tüketimi ve aerodinamik verimliliğin dengelendiği bir uçuş sağlamak için bir İHA'nın optimuma yakın hızını bulmak çok önemlidir. Bu bölümde, ağırlığı,

aerodinamik özellikleri ve çevre koşulları gibi faktörleri dikkate alarak bir İHA'nın hızını belirlemek için kullanılan yaklaşım sunulmuştur.

Algorithm 1 Optimal Hız Hesaplama

```

1: Girdi: İHA kütlesi  $m$ , kanat alanı  $A$ , sürüklenme katsayısı  $C_d$ , hava yoğunluğu  $\rho$ , temel minimum hız, temel maksimum hız
2: Çıktı: İHA için optimal hız
3: procedure OPTIMAL HIZ HESAPLA( $m, A, C_d, \rho, temel\_min\_hiz = 40, temel\_max\_hiz = 60$ )
4:    $m$ 'ye dayalı  $agirlik\_faktoru$  hesapla
5:    $min\_hiz \leftarrow temel\_min\_hiz \cdot agirlik\_faktoru$ 
6:    $max\_hiz \leftarrow temel\_max\_hiz \cdot agirlik\_faktoru$ 
7:    $optimal\_hiz$  hesaplama sürecini başlat
8:   for  $min\_hiz$  ile  $max\_hiz$  aralığındaki her  $hiz$  için do
9:      $hiz$  için gereken  $guc\_ihtiyaci$  hesapla
10:  end for
11:   $optimal\_hiz \leftarrow guc\_ihtiyaci$ 'nı minimize eden  $hiz$ 
12:  return  $optimal\_hiz$ 
13: end procedure

```

Şekil 3.4. Optimuma Yakın Hız Hesaplama Algoritması

Şekil 3.4'te sunulan algoritma, İHA için optimuma yakın hızı hesaplamayı amaçlamaktadır. Algoritma, İHA temel ağırlığı, kanat alanı, sürüklenme katsayısı, hava yoğunluğu, temel minimum hız ve temel maksimum hız gibi parametreleri girdi olarak almaktadır. Çıktı olarak İHA için optimuma yakın hızı vermektedir. İlk adımda, İHA'nın kütlesine dayalı olarak ağırlık faktörü hesaplanmaktadır. Bu ağırlık faktörü, minimum ve maksimum hızların belirlenmesinde kullanılmaktadır. Minimum hız, temel minimum hız ile ağırlık faktörünün çarpılmasıyla; maksimum hız ise temel maksimum hız ile ağırlık faktörünün çarpılmasıyla elde edilmektedir. Daha sonra, optimuma yakın hızı hesaplama süreci başlatılmaktadır. Bu süreçte, minimum hız ile maksimum hız aralığındaki her hız için gereken güç ihtiyacı hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar sonucunda, güç ihtiyacını minimize eden hız, optimuma yakın hız olarak belirlenmektedir. Son olarak, optimuma yakın hız döndürülmekte ve algoritma sona ermektedir.

Ağırlık Faktörünün Hesaplanması:

Başlangıç olarak, İHA'nın temel ağırlığını W_b dikkate alarak ağırlık faktörünü W_f hesaplanmaktadır. Maksimum taşıma kapasitesi M_p . Bu ağırlık faktörü, İHA'nın ağırlığına bağlı olarak hız aralığının ayarlanmasına yardımcı olmaktadır.

$$W_f = \frac{m}{W_b + M_p} \quad (3.23)$$

Minimum ve Maksimum Hızların Belirlenmesi:

Daha sonra İHA'nın ulaşabileceği V_{min} ve V_{max} hızları belirlenmektedir. Ayrıca temel minimum $V_{b_{min}}$ ve temel maksimum $V_{b_{max}}$ hızları bu hesaplamada dikkate alınmaktadır.

$$\begin{aligned} V_{min} &= V_{b_{min}} \times W_f \\ V_{max} &= V_{b_{max}} \times W_f \end{aligned} \quad (3.24)$$

Belirli Bir Hızda Gerekli olan Güç:

$P_r(s)$, s hızında İHA için gereken güç ve D_f ise İHA'ya etki eden sürtünme kuvveti olarak tanımlanmıştır.

$$P_r(s) = D_f(s) + m \times g \times s$$

$$D_f(s) = 0.5 \times \rho \times C_d \times A \times s^2 \quad (3.25)$$

Optimum Hızı Bulma:

İHA için en uygun hız, uçuş sırasında hangi hız değerinin güç tüketimini en aza indirdiğini belirleyerek bulunmaktadır. Bu optimum hız V_{opt} olarak gösterilmektedir.

$$V_{opt} = \min_{s \in [V_{min}, V_{max}]} P_r(s) \quad (3.26)$$

2.3.4. İHA Uçuş Segmentleri için Enerji Tüketiminin Hesaplanması

Bu kısımda, İHA uçuşunun her ayağı için enerji gereksinimlerinin belirlenmesi süreci incelenmektedir. Bu hesaplama, enerji verimliliğini en üst düzeye çıkarmak ve İHA'nın menzilini genişletmek amacıyla uçuş rotasını optimize etmek için gereklidir. İlk olarak, bir İHA uçuş bölümünün enerjisini hesaplamak için girdi ve çıktıları özetleyen bir yaklaşımın ana hatları çizilmektedir. Bu algoritma, İHA uçuş dinamiğinin hesaplamaları ve teorik açıklamaları için temel oluşturmaktadır.

Bir segmentin enerji hesaplamasını sistematik olarak her bir İHA uçuşunun belirli bir aşamasına karşılık gelen bileşenlere ayrılmıştır. İlk olarak kalkış süresinin hesaplanmasıyla bu süreç başlamaktadır. Ardından, yükseliş sırasında enerji tüketimini önemli ölçüde etkileyen istenen irtifaya ulaşmak için gereken ivme katsayısı hesaplanmaktadır. Daha sonra, yerden belirli bir irtifaya ulaşip havada asılı kalmaya geçişi sağlamak için hem pozitif hem de negatif hızlanma aşamalarını kapsayan kalkış dinamiklerinin bir analizi sunulmaktadır. Bu bölümde ayrıca, uçuş boyunca enerji dinamiklerinin kapsamlı bir görünümünü vermek için kalkış, seyir ve iniş aşamalarındaki güç gereksinimleri de incelenmektedir. Nihayetinde bu hesaplamalar, gerçek dünya uygulamaları için bir ölçü olan Watt/saat cinsinden ifade edilen segment enerjisinin belirlenmesiyle sonuçlanmaktadır.

Enerji segmentlerinin hesaplanmasında kullanılan yöntem, İHA uçuşlarının planlanmasında doğruluğun önemini vurgulamaktadır. Operasyonel verimliliği artırmak için algoritmaların gerekliliğini vurgulamaktadır.

Algorithm 2 Segment Enerji Hesaplama

```
1: Girdi: İHA kütlesi  $m$ , yükseklik  $h$ , mesafe  $d$ , hava yoğunluğu  $\rho$ , kanat alanı  $A$ , sürüklenme katsayısı  $C_d$ , yerçekimi ivmesi  $g$ 
2: Çıktı: Bir segment için enerji tüketimi, seyir süresi, optimal hız, ivme katsayısı  $\epsilon$ 
3: procedure SEGMENT ENERJISI HESAPLA( $m, h, d, \rho, A, C_d, g = 9.81$ )
4:    $optimal\_hiz \leftarrow optimal\_hizi\_hesapla(m, A, C_d, \rho)$ 
5:    $t\_kalkis \leftarrow \frac{h}{optimal\_hiz}$ 
6:    $t\_inis \leftarrow \frac{h}{optimal\_hiz}$ 
7:    $\epsilon \leftarrow \frac{4 \cdot h}{t\_kalkis^2}$ 
8:    $P\_kalkis, E\_kalkis, t\_seyir, P\_hover, P\_surtunme, P\_seyir, E\_seyir$ , ve  $E\_inis$  hesapla
9:    $E\_segment \leftarrow E\_kalkis + E\_seyir + E\_inis$ 
10:   $E\_segment\_Wh \leftarrow \frac{E\_segment}{3600}$ 
11:  return  $E\_segment\_Wh, t\_seyir, optimal\_hiz, \epsilon$ 
12: end procedure
```

Şekil 3.5. İHA Segment Enerjisi Hesaplama Algoritması

Şekil 3.5'te sunulan algoritma, İHA için bir segmentin enerji tüketimini, seyir süresini ve optimuma yakın hızı hesaplamayı amaçlamaktadır. Algoritma, İHA temel ağırlığı, yükseklik, mesafe, hava yoğunluğu, kanat alanı, sürüklenme katsayısı ve yerçekimi ivmesi gibi parametreleri girdi olarak almaktadır. Çıktı olarak bir segment için enerji tüketimi, seyir süresi ve optimuma yakın hızı vermektedir. İlk olarak, optimuma yakın hız hesaplanmaktadır. Ardından, kalkış süresi ve iniş süresi, yükseklik ve optimuma yakın hız kullanılarak hesaplanmaktadır. İvme katsayısı, yükseklik ve kalkış süresi dikkate alınarak belirlenmektedir. Daha sonra, kalkış gücü, seyir gücü, hover gücü, sürüklenme gücü ve iniş gücü hesaplanmaktadır. Bu güçlerin kullanımıyla, kalkış, seyir ve iniş aşamalarında harcanan enerjiler belirlenmektedir. Toplam segment enerjisi, bu üç enerji bileşeninin toplamı olarak hesaplanmaktadır ve watt saat (Wh) cinsine dönüştürülmektedir. Sonuç olarak, segment enerjisi, seyir süresi ve optimuma yakın hız döndürülmekte ve algoritma sona ermektedir.

2.3.4.1. Kalkış Süresi ve Hızlanma Katsayısının Hesaplanması

Kalkış süresinin hesaplanması

Formülde t_{takeoff} olarak gösterilen kalkış için gereken süreyi belirlemek için irtifa değişimini h ve optimum hızı v_{opt} kullanılmaktadır;

$$t_{\text{takeoff}} = \frac{h}{v_{\text{opt}}} \quad (3.27)$$

Hızlanma katsayısının hesaplanması

Bir İHA'nın nasıl havalandığını anlamak için, uçuş performansına ulaşmada ivme katsayısının ϵ önemini kavramak önemlidir. İvme katsayısı, İHA'nın hem kalkış hem de iniş sırasında seyir aşamasındaki sabit hızıyla uyumlu bir hızı korumasını sağlamada rol oynamaktadır. Bu uyum, uçuş boyunca verimliliği ve dengeyi korumak için önem arz etmektedir. Şekil 3.6.'da bir İHA'nın uçuş aşamaları bulunmaktadır.

ϵ Değerinin belirlenmesi, İHA'ların çalışması için ideal olduğu düşünülen v_{opt} olarak gösterilen bir hızın hesaplanmasını içermektedir. Ortalama hızlar uçuş segmentleri arasında farklılık gösterdiğinden (kalkış, seyir ve iniş) her segment için ayrı hesaplamalar yapılmaktadır. Bu özel yaklaşım, v_{opt} değerine verimli bir şekilde ulaşmak için hızlanmanın yönetilmesine olanak tanımaktadır.

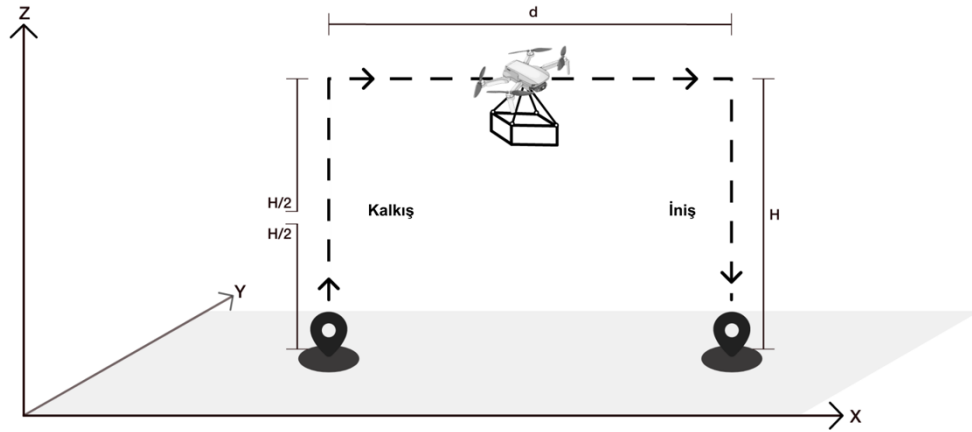
Kalkış sırasında hızlanma iki ayrı faza ayrılmaktadır; önce $h/2$ 'ye kadar irtifa kazanmak için $(g + \epsilon)$ ile hızlanır, ardından istenen irtifaya (h) ulaşmak için $(g - \epsilon)$ ile yavaşlar. Bu segmentasyon, her aşama için ϵ hesaplayarak İHA'ların performansını optimize etmektedir. Bu sayede İHA, kalkıştan seyir ve son olarak inişe kadar farklı uçuş modları arasında sorunsuz geçişleri kolaylaştıran ortalama bir hızı koruyabilmektedir.

Bir İHA'nın segment uçuşu içerisinde kalkış ve iniş süreci, belirli bir irtifaya (h) ulaşmak için iki farklı ivme aşaması içermektedir.

Kalkış dinamikleri:

Kalkış sırasında iki ivme aşaması vardır;

- Pozitif İvme Aşaması (Yerden- $h/2$ 'ye): İHA, yerden $(g + \epsilon)$ kadar bir kuvvet uygulayarak $(h/2)$ yüksekliğe kadar hızlanır. Bu aşama irtifa kazanımını sağlamaktadır.
- Negatif İvme Aşaması ($h/2$ - h): İHA, $(h/2)$ irtifadan (h) irtifasına kadar $(g - \epsilon)$ kadar bir kuvvet uygulayarak yavaşlar ve böylece (h) irtifasına ulaştığında sabit bir duruma sorunsuz bir şekilde geçiş yapmaktadır.



Şekil 3.6.: İHA Segment Uçuş Aşamaları

İniş dinamikleri:

- Pozitif İvme Aşaması ($h - h/2$): İHA, İniş yapmak için $(h/2)$ irtifaya ulaşana kadar $(g + \epsilon)$ kuvvetiyle aşağı doğru ivmelenerek (h) irtifadan kademeli olarak alçalır ve alçalma hızını etkin bir şekilde kontrol etmektedir.
- Negatif İvme Aşaması ($h/2$ - iniş noktası): İHA, $(h/2)$ irtifadan iniş noktasına kadar inişini yavaşlatmak ve kontrollü ve yumuşak bir iniş sağlamak için $(g - \epsilon)$ kuvvet uygular ve iniş noktasına ulaştığında sorunsuz bir iniş yapmaktadır.

İvme hızının hesaplanması:

Verimli ve kontrollü bir yükseliş sağlamak için, (t) zaman aralığında istenen bir yüksekliğe (h) iki adımlı bir ivme stratejisi kullanılmaktadır. Bu yöntem, nesnelerin ivme ile nasıl hareket ettiğine dair kinematiğin temel ilkelerine dayanmaktadır.

Kinematikteki temel denklem, durağan halden başlayan ve ivme kazanan bir nesne için aşağıdaki gibidir:

$$s = ut + \frac{1}{2}at^2 \quad (3.28)$$

Burada;

- s, yer değiştirmeyi,
- u, ilk hızı,
- a, ivmeyi,
- t, ise zamanı temsil etmektedir.

İHA'nın (t) zaman dilimi içerisinde (h) irtifaya ulaşması için gerekli ivmeyi ϵ belirlemek için yükselişte konum denklemi kullanılmaktadır. Bu iki aşamalı hızlanma stratejisi, istenen irtifaya verimli bir yükseliş sağlamaktadır.

$$\frac{h}{2} = \frac{1}{2}\epsilon \left(\frac{t}{2}\right)^2 \quad (3.29)$$

ϵ için çözümlendiğinde ise;

$$\epsilon = \frac{4h}{t^2} \quad (3.30)$$

elde edilmektedir.

Bu iki aşamalı ivme yaklaşımı, istenen irtifaya sorunsuz ve verimli bir yükseliş sağlamaktadır.

2.3.4.2. İHA Uçuşu Aşamaları İçin Gerekli Güç Hesaplamaları

İHA kalkış gücünün hesaplanması

Leishman (Leishman, 2006) tarafından helikopterler üzerinde yürütülen ve Dorling ve arkadaşları (2017) tarafından genişletilen araştırmaya dayanarak, açıklanan aerodinamik ilkeleri kullanarak dört rotorlu bir hava aracının havada kalmasını sağlamak için gerekli güç (P) hesaplanabilmektedir.

$$P = \sqrt{\frac{T^{3/2}}{2\rho\sigma}} \quad (3.31)$$

İtme kuvveti (T) aşağıdaki şekilde belirlenmektedir:

$$T = (W + m)g \quad (3.32)$$

Burada, (W) gövde ağırlığını, (m) batarya ve yükün birleşik ağırlığını, (g) yerçekimine bağlı ivmeyi ifade etmektedir. ρ Hava yoğunluğunu ve σ dönen bıçak diskinin alanını ifade etmektedir.

Kalkış için gereken gücü hesaplamak amacıyla P_{takeoff} , İHA'nın ağırlığına karşı koymak ve ivme sağlamak amacıyla kaldırma kuvveti üretmemiz gerekmektedir;

$$\text{Kaldırma Kuvveti: } F_{\text{lift}} = m \cdot (g + \varepsilon) \quad (3.33)$$

$$\text{Kaldırma Gücü: } P_{\text{lift}} = \frac{F_{\text{lift}} \cdot v_{\text{air}}}{\eta} \quad (3.34)$$

$$\text{Rotor Hızı: } v_{\text{air}} = \sqrt{\frac{F_{\text{lift}}}{2 \cdot \rho \cdot A}} \quad (3.35)$$

Burada;

- m İHA'nın kütlesi,
- g yerçekimine bağlı ivmeyi,
- ε ivmeyi,
- ρ hava yoğunluğunu,

- A toplam rotor alanını,
- η tahrik sisteminin verimliliğini ifade etmektedir.

Bu hesaplamaları birleştirerek, İHA uçuşunu yöneten her iki aerodinamik prensibi de göz önünde bulundurularak kalkış için gereken güç doğru bir şekilde belirlenmektedir.

Seyir gücü hesaplaması:

Bir İHA uçuşunun seyir aşaması sırasında gereken toplam güç, havada kalmayı sürdürmek için gereken güç ile sürüklenmenin üstesinden gelmek için gereken gücün bir kombinasyonundan oluşmaktadır.

Seyir için gereken toplam güç P_{cruise} olarak gösterilir ve kaldırma kuvvetini sürdürmek için gereken güç ile ileriye doğru hareket ederken parazit sürüklenme için gereken gücün toplamı olarak ifade edilmektedir. Thibbotuwawa ve arkadaşlarına (2019) göre, parazitik sürüklenme kuvveti F_P aşağıdaki gibi modellenenmektedir:

$$F_P = \frac{1}{2} C_D A_D \rho v^2 \quad (3.36)$$

C_D Sürüklenme katsayısını, A_D İHA'nın referans alanını, ρ hava yoğunluğunu ve v , İHA'nın hızını temsil etmektedir.

Sonuç olarak, bu sürüklemenin üstesinden gelmek için gereken gücü P_{drag} kullanarak hesaplanmaktadır;

$$P_{\text{drag}} = F_P \times v = \frac{1}{2} C_D A_D \rho v^3 \quad (3.37)$$

Hover gücü hesaplaması:

Hover gücü, diğer bir deyişle havada asılı kalma gücü, İHA'ların ağırlığına eşit bir kaldırma kuvveti üreterek sabit bir pozisyonu korumak için gereken enerjiyi ifade etmektedir. Yaklaşık olarak şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$P_{\text{hover}} = \frac{(m \cdot g)^{3/2}}{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot A} \quad (3.38)$$

Toplam seyir gücü:

Asılı kalma ve sürükleme gücünü birleştirilerek, seyir için gereken güç elde edilmektedir:

$$P_{\text{cruise}} = \left(\frac{(m \cdot g)^{3/2}}{\sqrt{2} \cdot \rho \cdot A} \right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A_{\text{front}} \cdot v^3 \right) \quad (3.39)$$

Bu yaklaşım hem kaldırma hem de aerodinamik direnci dikkate alınarak seyir aşamasındaki güç gereksinimlerinin anlaşılmasını sağlamaktadır.

İniş gücü hesaplanması:

İniş için gerekli gücün P_{landing} , kalkış için gerekli olan güce eşdeğer olduğu varsayılmaktadır:

$$P_{\text{landing}} = P_{\text{takeoff}}$$

2.3.4.3. İHA Uçuş Segmenti Toplam Enerji Hesaplaması

Bir İHA'nın rotası için gereken enerjinin hesaplanması, kalkış, seyir ve iniş sırasında kullanılan enerjinin toplamını kapsamaktadır. Bu hesaplama, İHA'ların görevlerini enerjileri tükenmeden verimli bir şekilde tamamlayabilmelerini sağlamak amacıyla görev planlaması ve kaynak tahsisi için çok önemlidir. E_{segment} Kalkış, seyir ve iniş sırasındaki enerjinin toplamıdır:

$$E_{\text{segment}} = E_{\text{takeoff}} + E_{\text{cruise}} + E_{\text{landing}} \quad (3.40)$$

Uçuş süresi ve enerjinin hesaplanması, İHA operasyonlarını analiz etmede önemli rol oynamaktadır. Şekil 3.7'de görüldüğü üzere, bir İHA'nın belirli bir rotayı tamamlamak için ne kadar zamana ve enerjiye ihtiyacı olduğunu belirlemeye odaklanılmaktadır. Bu hesaplama, İHA'ların enerjileri tükenmeden görevlerini verimli bir şekilde yerine getirebilmelerini sağlayan görev planlaması ve kaynak yönetimi için hayati önem taşımaktadır.

Algorithm 3 Uçuş Süresi ve Enerji Hesaplama

```

1: Girdi: mesafeler, rota, drone_id, paket_agirliklari,
   drone_temel_agirligi,  $\rho$ ,  $A$ ,  $C_d$ ,  $g = 9.81$ ,  $h = 50$ 
2: Çıktı: segment_detaylari, toplam_sure, toplam_enerji
3: procedure UÇUŞ SÜRESİ VE ENERJİ HESAPLA
4:   drone_agirligi  $\leftarrow$  drone_temel_agirligi
5:   toplam_sure, toplam_enerji  $\leftarrow$  0, 0
6:   segment_detaylari adında boş bir liste başlat
7:   kalan_yk  $\leftarrow$  rota[1 : -1] için paket_agirliklarinin toplamı
8:   for i  $\leftarrow$  0 den rota uzunluğu - 2 do
9:     balangic_noktasi  $\leftarrow$  rota[i]
10:    bitis_noktasi  $\leftarrow$  rota[i + 1]
11:    segment_mesafesi  $\leftarrow$  mesafeler[balangic_noktasi][bitis_noktasi]
12:    if bitis_noktasi  $\neq$  0 then
13:      yuk  $\leftarrow$  paket_agirliklari[bitis_noktasi]
14:    else
15:      yuk  $\leftarrow$  0
16:    end if
17:    drone_yukle_agirligi  $\leftarrow$  drone_agirligi + kalan_yuk
18:    drone_yukle_agirligi,  $A$ ,  $C_d$ ,  $\rho$  kullanarak optimal_hiz hesapla
19:    t_seyir  $\leftarrow$  segment_mesafesi/optimal_hiz
20:    Segment için enerji, t_kalkis, t_inis, ve  $\epsilon$  hesapla
21:    segment_sresi  $\leftarrow$  t_seyir + t_kalkis + t_inis
22:    toplam_sre ve toplam_enerji güncelle
23:    segment_detaylarina segment detaylarını ekle
24:    if bitis_noktasi  $\neq$  0 then
25:      kalan_yuk  $\leftarrow$  kalan_yuk - yuk
26:    end if
27:  end for
28:  return segment_detaylari, toplam_sure, toplam_enerji
29: end procedure

```

ŞEKİL 3.7. İHA Uçuş süresi ve Enerjisi Hesaplama Algoritması

Şekil 3.7'de sunulan algoritma, İHA için uçuş süresi ve enerji hesaplamayı amaçlamaktadır. Algoritma, mesafeler, rota, drone kimliği, paket ağırlıkları, drone temel ağırlığı, hava yoğunluğu, kanat alanı, sürüklenme katsayısı ve yerçekimi ivmesi gibi parametreleri girdi olarak almaktadır. Çıktı olarak segment detayları, toplam süre ve toplam enerji vermektedir.

İlk olarak, drone'un ağırlığı temel ağırlığına eşitlenmektedir ve toplam süre ve enerji sıfırlanmaktadır. Segment detayları için boş bir liste başlatılmaktadır ve rota üzerindeki tüm paket ağırlıklarının toplamı hesaplanmaktadır. Daha sonra, rota üzerindeki her iki nokta arasındaki mesafeler hesaplanmakta ve bitiş noktası kontrol edilmektedir. Bitiş noktasında paket varsa ağırlığı belirlenmektedir, yoksa ağırlık sıfırlanmaktadır. Drone'un toplam ağırlığı, temel ağırlık ve kalan yükün toplamı olarak güncellenmektedir. Bu ağırlık, optimuma yakın hızı hesaplamak için kullanılmakta ve segmentin seyir süresi, kalkış ve iniş süreleri hesaplanmaktadır. Segmentin enerji tüketimi ve süresi hesaplanmakta, toplam süre ve toplam enerji güncellenmektedir. Segment detayları listeye eklenmektedir ve bitiş noktasında kalan yük güncellenmektedir. Son olarak, segment detayları, toplam süre ve toplam enerji döndürülerek algoritma sona ermektedir.

Mesafelerin hesaplanması

Her bir İHA'nın rotasını etkili bir şekilde planlamak için teslimat noktaları arasındaki mesafeleri belirlemek önem arz etmektedir. Bir rotanın her bir uçuş segmenti için mesafe, aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanabilmektedir;

$$d_{ij} = \sqrt{(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2} \quad (3.41)$$

Bu formül, (x_i, y_i) ve (x_j, y_j) koordinatlarını temsil ettiği herhangi iki nokta i ve j arasındaki doğrusal mesafenin hesaplanmasını sağlamaktadır.

optimuma yakın hız ve enerji hesaplanması

Enerji tüketimini en aza indirirken verimliliği en üst düzeye çıkarmak için bir İHA rotasının her bir segmenti için hızı belirlemek önem arz etmektedir. optimuma yakın hız, İHA'ların ağırlığı ve aerodinamik özellikleri gibi faktörleri dikkate almakta olup aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$v_{\text{opt}} = \min_v (P_{\text{drag}}(v) + P_{\text{lift}}(v)) \quad (3.42)$$

Ayrıca kalkış, seyir ve iniş aşamaları da dahil olmak üzere rotanın her bir bölümünü tamamlamak için gereken enerjiyi de dikkate almak gerekmektedir:

$$E_{\text{segment}} = (P_{\text{takeoff}} \times t_{\text{takeoff}}) + (P_{\text{cruise}} \times t_{\text{cruise}}) + (P_{\text{landing}} \times t_{\text{landing}}) \quad (3.43)$$



ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

UYGULAMA

Uygulamalarda yer alan birinci model, Apple M2 Pro işlemci ve 16 GB RAM ile donatılmış bir bilgisayarda, ikinci model ise M3 çipi ve 8GB RAM'e sahip bir MacBook Pro bilgisayarda test edilmiştir.

3.1. Uygulama 1: Acil Durum Lojistiğinde Hibrit İHA/İKA Modeli

Bu bölümde, acil durum lojistiğinde kullanılmak üzere geliştirilen hibrit İHA/İKA modelinin temel bileşenleri ve uygulama detayları sunulmaktadır (Guzey ve Satman, 2024).

3.1.1. Uygulama Temel Bileşenleri

Uygulamada İKA bir adet, İHA ise İKA üzerinde dört adet olarak tanımlanmıştır. Batarya kapasitesi İHA faydalı yükü ile birlikte 40 dakika, faydalı yük olmadan 60 dakika olarak belirlenmiştir. Uçuş süresi İHA yüklüken 10 m/dk, boşken 15 m/dk olarak tanımlanmıştır. Toplanma noktası sayısı 100 ve 200 olarak test edilmiştir. Her iki senaryo için de İHA hız parametresi 5 m/dk, 10 m/dk ve 15 m/dk olarak belirlenmiş olup, İHA hızının toplam uçuş süresi ve küme sayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Hesaplamalar için Julia programlama dili ve sonuçların 3D görselleştirilmesi için Python programlama dili kullanılmıştır.

Julia hesaplamaları için:

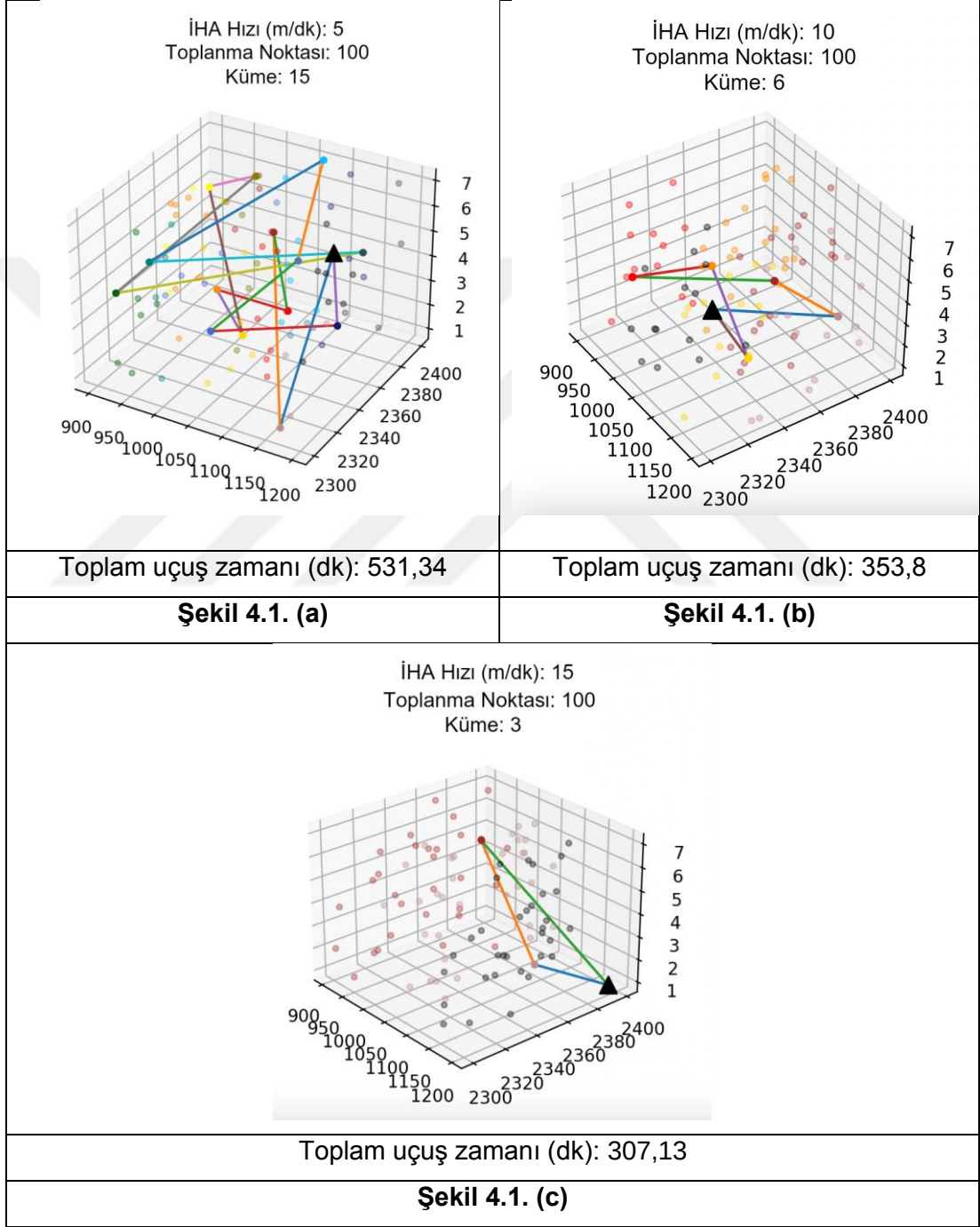
- Acil durum toplanma noktalarının sayısı 100 ve 200 olarak tanımlanmıştır ve toplanma noktalarının koordinatları JuliaLang/Random.jl rand fonksiyon paketi kullanılarak oluşturulmuştur. Bu koordinatlar, [0, 1000] aralığında uniform (eşit olasılıklı) bir dağılımdan rastgele olarak çekilmiştir (Bezanson vd., 2017) . Uniform dağılım kullanımı, toplanma noktalarının çalışma alanında rastgele ve eşit dağılımını sağlamaktadır. Bu yöntem, acil durum lojistiğinde olası senaryoları temsil eden geniş bir veri kümesi oluşturmayı amaçlamaktadır.

- Toplanma noktalarını kümelemek için K-means kümeleme yöntemi kullanılmıştır. Maksimum iterasyon sayısı 200 olarak ayarlanmıştır. Acil durum toplanma noktaları, her kümenin merkezine olan uzaklıklarına göre her kümeye atanmıştır (*Clustering.jl*, 2023) .
- Her bir toplanma noktasının kendisine atanan küme merkezine ulaşması için geçen süre (dakika cinsinden) Euclidean (Öklidyen) mesafe kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama, JuliaStats/Distances.jl (2023), mesafe paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir
- Her bir küme için, her İHA tarafından teslim edilecek en uygun toplanma noktalarını belirlemek amacıyla, LinearAlgebra paketi kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. Burada, her İHA'nın rotası için toplam mesafeyi minimize eden bir optimizasyon problemi çözülmüştür. Bu işlem, küme merkezlerinden toplanma noktalarına olan mesafelerin matrisi kullanılarak yapılmıştır. Mesafe matrisi oluşturulmuş ve bu matrisi kullanarak her İHA'nın rotasını optimize etmek için matris çarpımı ve toplama işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu yaklaşım, küme merkezleri ile toplanma noktaları arasındaki en kısa yolları belirlemek için kullanılmıştır.
- İKA rotası için gezgin satıcı problemi (Fields, 2023) yöntemi kullanılmıştır.
- Model HiGHS optimizier (2023) kullanılarak çözülmüştür. Amaç fonksiyonu, tüm acil durum toplanma noktalarına teslimat için geçen toplam süreyi en aza indirmektir.

Toplam uçuş süreleri, her senaryo için belirlenen İHA hızlarına göre hesaplanmış ve analiz edilmiştir. İlk üç senaryoda, toplanma noktası sayısı 100 olarak tanımlanmış, İHA hızını 5 m/dk'dan 10 m/dk'ya çıkarmanın küme sayısında ve toplam uçuş süresinde önemli bir azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. İHA hızının 15 m/dk'ya çıkarılması, küme sayısı ve toplam uçuş süresi üzerinde etkisi önceki hız artışına göre daha az olarak gözlemlenmiştir. Son üç senaryoda ise, toplanma noktası sayısı 200 olarak tanımlanmış ve İHA hızının 5 m/dk'dan 10 m/dk'ya çıkarılması, küme sayısının ve toplam uçuş süresinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Ancak, İHA hızının 10 m/dk'dan 15 m/dk'ya çıkarılması, sistemin performansını iyileştirme açısından azalan getirilerle sonuçlanmıştır.

3.1.2. Bulgu ve Yorumlar

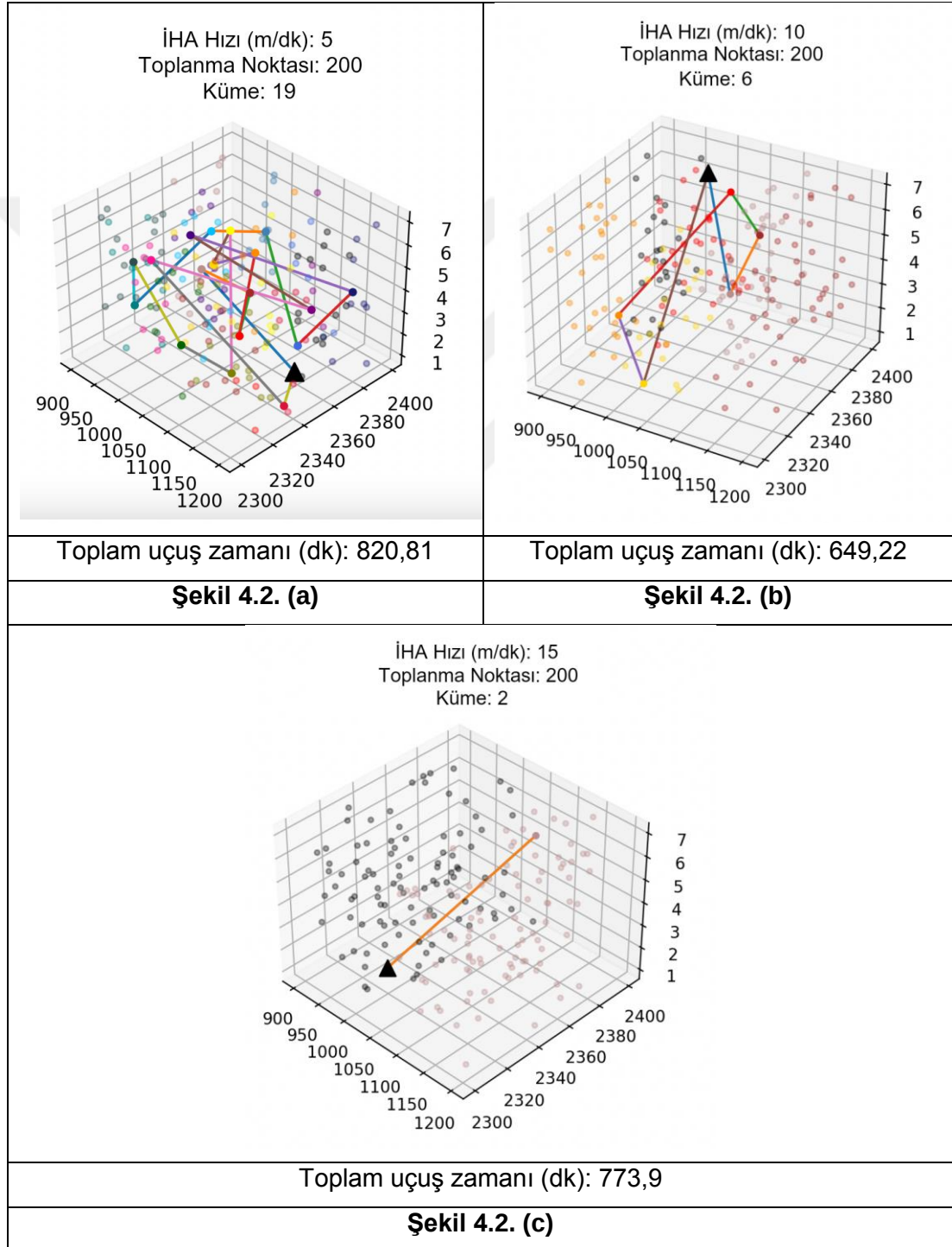
ŞEKİL 4.1. Senaryo Sonuçları 1



Sonuçlar, Şekil 4.1. (a), (b), (c)'de gösterildiği gibi, İHA hızı 5 m/dk'dan 15 m/dk'ya yükseldikçe ve küme sayısı ile İKA durakları azaldıkça, toplam teslimat süresinin 531

dakikadan 307 dakikaya önemli ölçüde azaldığını göstermektedir. İHA'nın hızı arttıkça katettiği mesafe de aynı oranda artacağından ötürü tıbbi kitleri acil durum toplanma noktalarına daha hızlı ulaştırabilmektedir.

ŞEKİL 4.2. Senaryo Sonuçları 2



Şekil 4.2. (a), (b), (c)'de ise durum bu kadar açık değildir. Şekil 4.2. (a) ve (b)'de İHA hızı 5 m/dk'dan 10 m/dk'ya çıktığında toplam teslimat süresi azalsa da Şekil 4.2. (c)'de İHA hızı 15 m/dk olduğunda toplam teslimat süresi tekrar artmaktadır. Şekil 4.1'de olduğu gibi, İHA hızı arttıkça küme sayısı azalmaktadır. Model, toplanma noktası sayısı, İHA hızı ve küme sayısı arasında optimum bir denge olduğunu açıkça göstermektedir. Şekil 4.2. (b)'deki sonuç, minimum toplam sürenin sadece İHA hızına değil, aynı zamanda küme ve toplanma noktası sayılarına da bağlı olduğunu göstermektedir.

TABLO 4.1. Test Senaryolarının Sonuçları

Senaryo	Toplanma Noktası Sayısı	İHA Hızı	Küme Sayısı	Toplam Uçuş Zamanı
1	100	5 m/dk	15	531 dk
2	100	10 m/dk	6	353 dk
3	100	15 m/dk	3	307 dk
4	200	5 m/dk	19	820 dk
5	200	10 m/dk	6	649 dk
6	200	15 m/dk	2	773 dk

Altı senaryo için model parametreleri ve sonuçları Tablo 4.1'de özetlenmiştir. İlk üç senaryoda toplanma noktası sayısı 100 olarak tanımlanmıştır. Görüldüğü üzere, İHA hızını 5 m/dk'dan 10 m/dk'ya çıkarmak küme sayısında ve toplam uçuş süresinde önemli bir azalmaya neden olurken, İHA hızını 15 m/dk'ya çıkarmak küme sayısında ve toplam uçuş süresinde daha az bir azalmaya neden olmuştur.

Son üç senaryoda toplanma noktası sayısı 200 olarak tanımlanmıştır. İHA hızının 5 m/dk'dan 10 m/dk'ya çıkarılması, küme sayısının 19'dan 6'ya önemli ölçüde azalmasına ve toplam uçuş süresinin 820 m/dk'dan 649 m/dk'ya düşmesine neden olmuştur. Bu, İHA hızının artırılmasının sistemin performansı üzerinde büyük bir etkisi olduğunu göstermektedir. Ancak, İHA hızının 10 m/dk'dan 15 m/dk'ya çıkarılması, küme sayısı veya toplam uçuş süresinde o kadar büyük bir azalmaya neden olmamıştır; çünkü küme sayısı yalnızca 6'dan 2'ye düşmüş ve toplam uçuş süresi 649

m/dk'dan 773 m/dk'ya hafif bir artış göstermiştir. Bu durum, İHA hızının belirli bir noktanın ötesinde artırılmasının, sistemin performansını iyileştirme açısından azalan getirilerle sonuçlanabileceğini göstermektedir.

Genel olarak sonuçlar, İHA hızı parametresinin sistemin performansında kritik bir faktör olduğunu ve sistemi optimize ederken dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Genel sistem optimizasyonunu sağlamak için diğer parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Senaryo 5'te en iyi çözüm elde edilmiştir. Duraklarda bulunan toplam acil durum toplanma noktaları, herhangi bir duraktan en uzak toplanma noktası, duraklarda harcanan toplam süre, yer aracının harcadığı süre ve toplam süre Tablo 4.2.'de sunulmuştur. Acil durum toplanma noktalarının koordinatları ve İHA'ların teslimat için atamaları Tablo 4.3.'te sunulmuştur.

TABLO 4.2. Senaryo 5 Test Sonuçları

Duraklar	Durakta Bulunan Toplanma Alanı Sayısı	Duraktaki En Uzak Toplanma Alanı (m/dk)	Durakta Harcanan Toplam Süre (m/dk)
1	28	4,394411746	75,42911605
2	41	5,852687419	116,0541909
3	47	5,324028825	164,710768
4	32	4,370856297	94,193446
5	30	4,341762315	82,6783061
6	22	4,951427292	56,87057617
İKA tarafından duraklar arası harcanan toplam süre (dk)			59,28528072
İHA ve İKA tarafından görevde harcanan toplam süre (dk)			649,2216839

Tablo 4.2'de ilk sütun durak numarasını, ardından her durakta bulunan toplanma noktası sayısını göstermektedir. Üçüncü sütun duraktan en uzak toplanma noktası hakkında dakika cinsinden bilgi vermektedir. Dördüncü sütun, her bir durakta harcanan toplam süreyi dakika cinsinden göstermektedir. Bir sonraki satır, kara aracının duraklar arasında geçirdiği süre hakkında bilgi verir; bu süre 59,28 dakika olarak ölçülmüştür. Son olarak, tablonun son satırı hem İHA hem de yer aracı tarafından harcanan ve 649,22 dakika olarak ölçülen toplam süreyi göstermektedir.

Farklı sayıda toplanma noktasına sahip altı durağımız var. Durak 3 47 ile en yüksek sayıda toplanma noktasına sahipken, durak 6 22 ile en düşük sayıya sahiptir. Her duraktaki en uzak toplanma noktası 4,34 dakika ile 5,85 dakika arasında değişmektedir. Her durakta harcanan toplam süre 56,87 dakika ile 164,71 dakika arasında değişmektedir. Tabloda ayrıca, 59,29 dakika olan İKA'nin duraklar arasında geçirdiği süre ve 649,22 dakika olan toplam İHA/İKA operasyon süresi hakkında bilgi verilmektedir.

Acil durum toplanma noktalarının koordinatları ve atandıkları kümeler Tablo 4.3'te sunulmuştur. Toplam 200 toplanma noktası olduğu için ilk 10 ve son 10 toplanma noktası hakkında bilgi verilmiştir.

TABLO 4.3. Toplanma Noktalarının Koordinatları ve İHA'ların Atamaları

Alan no	X	Y	İrtifa	Atanan Küme	Alan no	X	Y	İrtifa	Atanan Küme
1	1044	2301	2	6	----	----	----	----	----
2	960	2326	3	5	----	----	----	----	----
3	1145	2340	7	3	191	945	2367	6	1
4	1022	2388	6	4	192	998	2382	5	4
5	1176	2384	7	3	193	974	2389	7	1
6	1081	2307	2	6	194	914	2383	3	1
7	1200	2381	3	3	195	1193	2351	2	3
8	968	2399	6	1	196	925	2306	6	5
9	1142	2319	6	3	197	1059	2310	7	6
10	930	2329	5	5	198	928	2383	5	1
----	----	----	----	----	199	1097	2349	1	2
----	----	----	----	----	200	985	2337	5	4

3.2. Uygulama 2: Enerji ve Maliyet Etkin Çoklu İHA Rotalama

Bu uygulama kapsamında, birden fazla noktaya teslimat yapan bir sistem aracılığıyla enerji ve maliyet verimliliğini optimize etmeye odaklanan bir İHA yaklaşımı kullanılarak Kapasite Kısıtlı İHA Rotalama Problemi incelenmiştir (Guzey & Satman, 2024b).

3.2.1. Uygulama Temel Bileşenleri

Problemin çözümünde, rota optimizasyonu için 2-Opt yöntemi ve İHA'lar arasında görevleri verimli bir şekilde tahsis etmek için K-Means kümeleme yöntemini içeren bir genetik algoritma kullanılarak tasarlanmıştır. Bu yöntem, kapasite kısıtını, enerji verimliliğini ve operasyonel maliyeti göz önünde bulundurarak, İHA'lar ile görev planlamasını bir bütün olarak ele almaktadır.

Tablo 4.4 ve 4.5'te paket ağırlıkları ve koordinatları ile İHA özellikleri gösterilmektedir. Uygulama için kullanılan veriler, İHA rota optimizasyonu probleminin gerçekçi ve geçerli bir şekilde modellenebilmesi için dikkatle seçilmiş ve üretilmiştir. Bu veriler, teslimat noktalarının koordinatları, paket ağırlıkları ve İHA özellikleri gibi kritik bilgileri içermektedir.

TABLO 4.4.: Paket Ağırlıkları ve Koordinatlar

Teslimat Noktaları	Koordinatlar (x, y)	Paket Ağırlıkları (kg)
0	(342, 598)	0
1	(200, 900)	5
2	(120, 300)	10
3	(250, 990)	15
4	(300, 700)	10
5	(350, 500)	20
6	(400, 400)	5
7	(900, 150)	10
8	(600, 600)	15
9	(900, 100)	5
10	(550, 850)	10

Veri Üretim Süreci:

- Koordinatlar: Teslimat noktalarının koordinatları, çalışma bölgesindeki farklı konumları temsil etmektedir. Bu koordinatlar, belirli bir alan içerisindeki rastgele noktalar olarak üretilmiştir. Her bir koordinat çifti, (x,y) değerleri ile ifade edilmiştir ve her iki değer de [100, 1000] aralığında eşit olasılıkla bir Uniform Dağılımdan çekilmiştir. Bu yaklaşım, farklı uzaklıkları temsil eden gerçek dünya senaryolarını simüle etmek amacıyla seçilmiştir.
- Paket Ağırlıkları: Paket ağırlıkları, farklı teslimat noktalarına gönderilecek paketlerin çeşitliliğini yansıtmak amacıyla seçilmiştir. Farklı ağırlıklar, İHA'ların yük taşıma kapasitesini test etmek ve enerji tüketimini optimize etmek için önem arz etmektedir. Paket ağırlıkları, 0 kg (depo) ile 20 kg arasında eşit olasılıkla bir uniform dağılımdan çekilmiştir. Bu rastgelelik, farklı senaryolarda İHA'ların performansını değerlendirmek için gerekli çeşitliliği sağlamaktadır.

TABLO 4.5.: İHA özellikleri

Açıklamalar	Değerler
İHA sayısı (D)	4
İHA Maksimum Yük Taşıma Kapasitesi (M_p)	40 kg
İHA Temel Ağırlığı (W_b)	20 kg
Hava Yoğunluğu (ρ)	1.225 kg/m ³
Sürüklenme Katsayısı (C_d)	1
Kanat Alanı (A)	2 m ²
Yerçekimsel İvme (g)	9.81 m/s ²
Kalkış / İniş için Yükseklik (h)	50 m
Temel Min/Maks Hız (V_{bmin} , V_{bmax})	Yüke göre değişken

Veri Üretim Süreci:

- İHA Sayısı: Çalışmamızda 4 İHA kullanılmaktadır. Bu sayı, tipik bir operasyonel senaryoyu temsil etmek için seçilmiştir.

- Maksimum Yük Taşıma Kapasitesi: 40 kg olarak belirlenen maksimum yük taşıma kapasitesi, mevcut ticari İHA'ların taşıma kapasitelerine dayanmaktadır (DroneEngr, 2024).
- Temel Ağırlık: İHA'ların temel ağırlığı, batarya ve diğ er donanımlar dahil edilerek 20 kg olarak belirlenmiştir (DroneEngr, 2024).
- Hava Yoğunluğu, Sürüklenme Katsayısı, Kanat Alanı: Bu aerodinamik parametreler, tipik bir İHA'nın uçuş dinamiklerini modellemek için kullanılmaktadır.
- Yerçekimsel İvme: Standart yerçekimi ivmesi $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak alınmıştır.
- Kalkış / İniş için Yükseklik: 50 m olarak belirlenen bu değ er, İHA'ların operasyonel irtifalarını yansıtmaktadır.
- Temel Min/Maks Hız: İHA'ların taşıdığı yük miktarına göre değ işkenlik gösteren hız aralığı, gerçekçi uçuş senaryolarını temsil etmektedir.

Optimizasyon probleminin çözümü için Gurobi 11.0   z c s  kullanılmıştır. Gurobi   z c , performans, esneklik ve kullanım kolaylığı sağlaması nedeniyle optimizasyon probleminin çözümünde tercih edilmiştir (Gurobi Optimization, 2023). Bu kurulum, yaklaşımların mevcut hesaplama platformlarında uygulanabilir olduğunu göstermektedir. Sonuçların güvenilir bir şekilde yeniden retilbilmesini sağlamak için çözücü parametreleri varsayılan ayarlarında tutulmuştur. Ayrıca, keşif ve pratik kısıtlamalar arasında bir denge kurmak için her deneye dört saatlik bir zaman sınırı konulmuştur.

Bu kapsamda, İHA yönlendirme sistemlerinde operasyonel verimliliğı artırmada önerilen metodolojilerin etkinliğı incelenmiştir. Araştırma sonucunda elde edilen bulgular, İHA lojistiğinde ilerleme potansiyelini ortaya koymaktadır.

Simülasyon Kurulumu:

Simülasyon ortamı, gerçek dünyadaki İHA teslimat operasyonlarındaki karmaşıklıkları ve sınırlamaları eklemek için dikkatlice tasarlanmıştır. Deneysel parametreler aşığıdaki gibidir:

- Popölasyon Büyüklüğü: Algoritma tarafından araştırılan olası rota çözümlerinin çeşitliliğini belirleyen ve geniş bir çözüm uzayı keşfetmeyi sağlayan popölasyon 50 olarak belirlenmiştir.
- Maksimum Nesil Sayısı: Optimum rota konfigürasyonları için yürütölen arama derinliğini göstermektedir ve 100 ile sınırlıdır.
- Mutasyon Oranı: Mutasyon oranı sabit bir değör olan 0,1 olarak seçilmiştir. Bu oran, algoritmaların değışkenlik sunma ve yerel optimumlarda takılıp kalmaktan kaçınma yeteneğini vurgulamaktadır.
- Turnuva Boyutu: genetik algoritma içerisinde üreme için bireylerin seçilmesinde turnuva seçimi yöntemi kullanılmış olup turnuva boyutu 5 olarak belirlenmiştir. Seçilen bireylerin genetik çeşitliliğini koruyarak ve uygunluk değeri yüksek bireyleri tercih ederek algoritmanın performansını artırmaktadır.
- Batarya Kapasitesi: İHA'ların batarya kapasiteleri 300 watt saattir.
- İHA Sayısı: İHA filosu, operasyonel ölçeklenebilirlik ve yönetilebilirlik hususlarına uygun olarak 4 adet İHA'dan oluşmaktadır.
- İHA Özellikleri: Her bir İHA 20 kg temel ağırlığa ve 40 kg maksimum faydalı yük kapasitesine sahiptir. Bu parametreler, enerji tüketimini ve yönlendirme dinamiklerini anlamak için önem arz etmektedir.
- Paket Ağırlıkları ve Teslimat Koordinatları: Teslimat senaryolarını simüle etmek için paket ağırlıkları 5 ila 20 kg arasında değışmektedir. Ayrıca teslimat noktaları, rotalama algoritmasını zorlamak amacıyla stratejik olarak dağıtılmıştır.

Bu konfigürasyon modelin çok yönlölüğünü göstermektedir. Ayrıca, çeşitli lojistik sınırlamalarla karşılaştığında sınırlarını ve kapasitelerini araştırmaktadır.

3.2.2. Bulgu ve Yorumlar

Tablo 4.4.'te sunulan İHA 1'in uçuşunda, İHA başlangıçta 35 kg'lık bir faydalı yük taşımakta ve hızlı teslimat sağlamak için 35,555 m/s'lik yüksek bir optimum hıza ulaşmaktadır. Bununla birlikte, her teslimatta ve yük azaldıkça, İHA'nın hızı ve ivmesi, verimliliği ve güvenliği korumak için orantılı olarak azalmaktadır. Enerji tüketimi, yük

nedeniyle başlangıçta en yüksek seviyededir. İHA hafifledikçe hız ihtiyacı azalmakta ve aciliyet azaldığında dönüş yolculuğunda enerji tasarrufu sağlanmaktadır. Genel olarak, bu uçuş stratejisi, hız, enerji kullanımı ve yük yönetimini dikkate alarak uyarlanabilir uçuş parametrelerinin İHA teslimat sistemlerinde ne kadar etkili olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.4. İHA-1 Alt Tur Sonuçları

Segment	Route	Optimal Speed	Epsilon	Payload	Package Weight	Flight Time	Energy
1	(0, 5)	35.555	1.580	35	20	5.577	49.186
2	(5, 6)	17.777	0.395	15	5	11.913	33.9
3	(6, 2)	13.333	0.222	10	10	29.799	54.026
4	(2, 0)	4.444	0.024	0	0	106.11	36.693
Total Subtour						153.401	173.807

Tablo 4.5.'te sunulan İHA 2 için yapılan uçuş analizinde, İHA teslimat rotasında ilerledikçe optimum hız ve ivme katsayısında bir düşüş gözlemlenmektedir. İHA, 15 kg yük ile 17.777 m/s optimum hızda başlamaktadır. Yük ağırlığı 5 kg'a düştüğünde hızını kademeli olarak 8.888 m/s'ye indirmektedir. Sonunda, tüm yükü teslim ettiğinde hızı daha da düşerek 4.444 m/s'ye inmektedir. Bu durum, ağırlığa bağlı olarak uyarlanabilir kontrol mekanizmalarının teslimatlar sırasında İHA 2'nin hızını düzenlemede nasıl bir rol oynadığını vurgulamaktadır. Segment sırasında gözlenen önemli enerji tüketimi, hem yük ağırlığı hem de seyahat mesafesi faktörlerinin birlikte katkıda bulunmasından kaynaklanmaktadır.

Alt turların uçuş süresi, hem taşıma yükü hem de kat edilen mesafe dikkate alındığında oldukça uzun olmakta ve 210.667 Wh'lık bir enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu durum, yükün ve mesafenin enerji kullanımını ve uçuş süresini nasıl etkilediğini vurgulayarak, teslimat için bu faktörlerin optimize edilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 4.5. İHA-2 Alt Tur Sonuçları

Segment	Route	Optimal Speed	Epsilon	Payload	Package Weight	Flight Time	Energy
1	(0, 7)	17.777	0.395	15	10	45.876	128.058
2	(7, 9)	8.888	0.098	5	5	16.875	16.645
3	(9, 0)	4.444	0.024	0	0	190.779	65.963
Total Subtour						253.531	210.667

Tablo 4.6.'da sunulan İHA 3'ün alt tur sonuçları analiz edildiğinde, faydalı yük yönetimi ile enerji verimliliği arasında bir denge olduğu ortaya çıkmaktadır. Rotasının başında İHA, 20 kg ağırlığında bir faydalı yük taşımakta ve 22.222 m/s'lik optimum hıza ulaşmaktadır. Bu, 0.617'lik daha yüksek bir ivme katsayısı ile mümkün olmaktadır. Paketler teslim edildikçe ve yük 15 kg'a düştüğünde, optimum hız 0.395 epsilon değeri ile 17.777 m/s'ye düşmekte ve uçuş hızının değişen ağırlığa göre nasıl ayarlandığını göstermektedir. Yolculuğun yüksüz ayağında İHA, 4.444 m/s hızda seyreterek önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlamaktadır.

Bu alt tur için toplam uçuş süresi 144.030 saniye olarak ölçülmekte ve 148.861 Wh enerji tüketilmektedir. Bu bulgular, İHA teslimat sistemlerinde verimliliği ve performansı artırmak için rotaları planlarken ve hızları ayarlarken faydalı yük ağırlığını ve uçuş dinamiklerini göz önünde bulundurmanın önemini vurgulamaktadır.

Tablo 4.6. İHA-3 Alt Tur Sonuçları

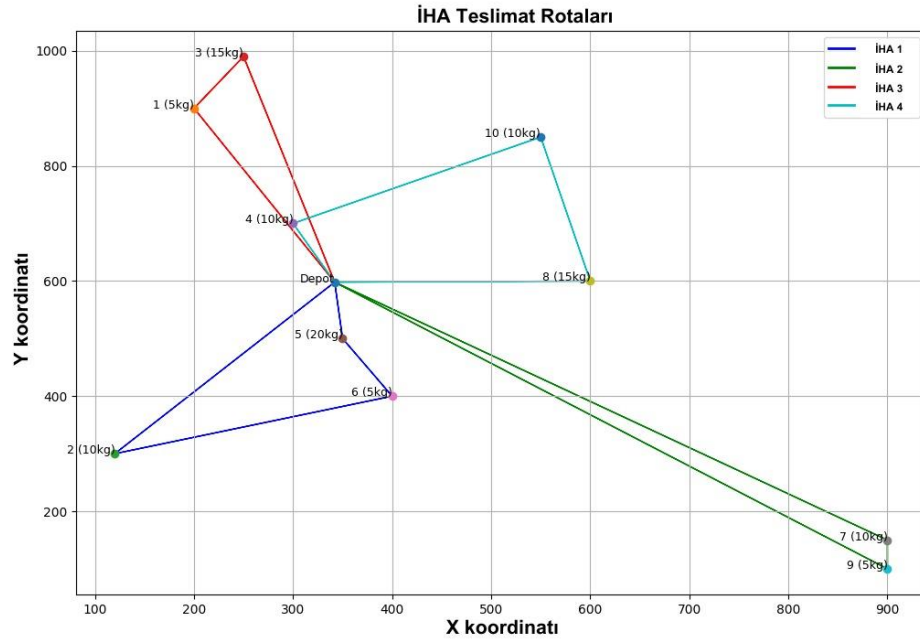
Segment	Route	Optimal Speed	Epsilon	Payload	Package Weight	Flight Time	Energy
1	(0, 1)	22.222	0.617	20	5	19.517	77.231
2	(1, 3)	17.777	0.395	15	15	11.416	32.521
3	(3, 0)	4.444	0.024	0	0	113.096	39.108
Total Subtour						144.030	148.861

Tablo 4.7.'de sunulan İHA 4 için rota, 35 kg'lık yükünü taşıırken başlamakta ve bu, 35,555 m/s hız ve güçlü bir başlangıca işaret eden 1,58 ivme katsayısı ile sonuçlanmaktadır. Beklendiği gibi, bu ilk segment, ilgili ağırlık ve hız nedeniyle 51.834 Wh'lık bir enerji tüketimine neden olmaktadır. İHA rotası boyunca ilerledikçe taşıma kapasitesi kademeli olarak 25 kg'a, daha sonra 15 kg'a düşmektedir. Sonuç olarak hem hızda hem de ivmede düşüş gözlemlenmekte, sırasıyla 0,888 epsilon ile 26,666 m/s ve 0,395 epsilon ile 17,777 m/s değerlerine ulaşılmaktadır. Hız ve ivmedeki bu düşüş, ağırlığa adaptasyon sağlanarak bu segmentler sırasında enerji tasarrufu yapılmasını mümkün kılmaktadır. Özellikle yolculuğun bu ayağında İHA, herhangi bir yük taşımamakta ve epsilon değeri 0,024 gibi düşük bir değerle 4,444 m/s'lik bir hızı korumaktadır. Rota sürecinin dikkatli yönetimi ile bu özel segment boyunca 27,857 Wh enerji tüketimi gerçekleşmektedir. Tüm bu segmentler toplu olarak değerlendirildiğinde, İHA 4'ün tüm alt turu tamamlaması 121.115 saniye sürmektedir. Ayrıca, İHA 4'ün tüm segmentlerde, teslimat rotası boyunca karşılaştığı değişen

faydalı yüklere göre verimliliğini ve enerji kullanımını ayarlayarak etkili bir uçuş yönetimi sergilediği vurgulanmalıdır.

Tablo 4.7. İHA-4 Alt Tur Sonuçları

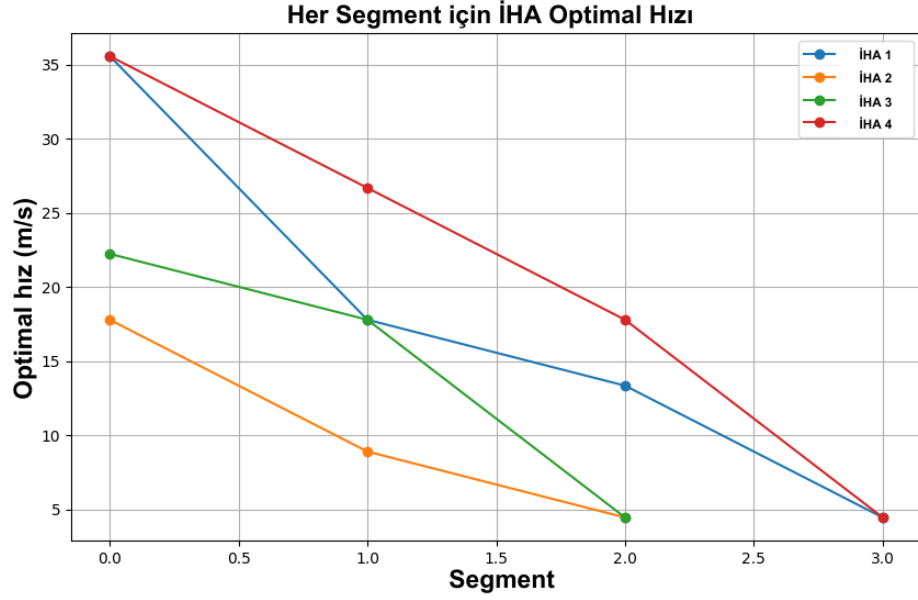
Segment	Route	Optimal Speed	Epsilon	Payload	Package Weight	Flight Time	Energy
1	(0, 4)	35.555	1.58	35	10	5.914	51.834
2	(4, 10)	26.666	0.888	25	10	14.683	77.391
3	(10, 8)	17.777	0.395	15	15	19.965	56.224
4	(8, 0)	4.444	0.024	0	0	80.551	27.857
Total Subtour						121.115	213.307



Şekil 4.3. Çoklu İHA Görev Planlama Rotaları

Şekil 4.3, İHA'ların yük dağılımı ve rota verimliliğini dengelemek için stratejik olarak konuşlandırıldığı bir İHA teslimat görevinin analizini sunmaktadır. Amaç, teslimat sürelerini ve enerji kullanımını optimize etmektir. Başlangıçta yükü taşıyan İHA 1, hızlı bir şekilde başlamış ancak teslimatlar yapıldıkça kademeli olarak yavaşlamıştır. Öte yandan, İHA 4 de bir yük ile başlayarak daha enerji verimli bir rota izlemiştir. İHA 2'nin daha uzun uçuş süresi, rotasının diğerlerine kıyasla daha uzun veya daha az verimli olabileceğini gösterirken, İHA 3 görev boyunca parametreleri korumuştur. Genel görev 253,53 saniyede tamamlanmış ve yaklaşık 746,64 Wh enerji tüketilmiştir. Bu analiz, İHA teslimat sistemlerinde hız, yük kapasitesi ve enerji tüketimi arasındaki

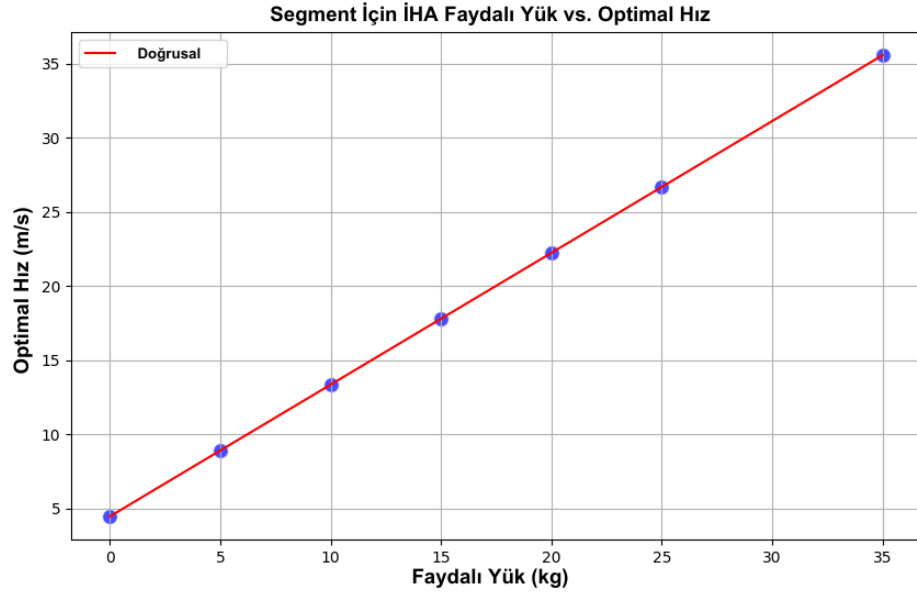
dengeyi vurgulamaktadır. Ayrıca, gelecekteki optimizasyon modelleri için potansiyel alanlar belirlenmiştir.



Şekil 4.4. İHA Segment Hızları

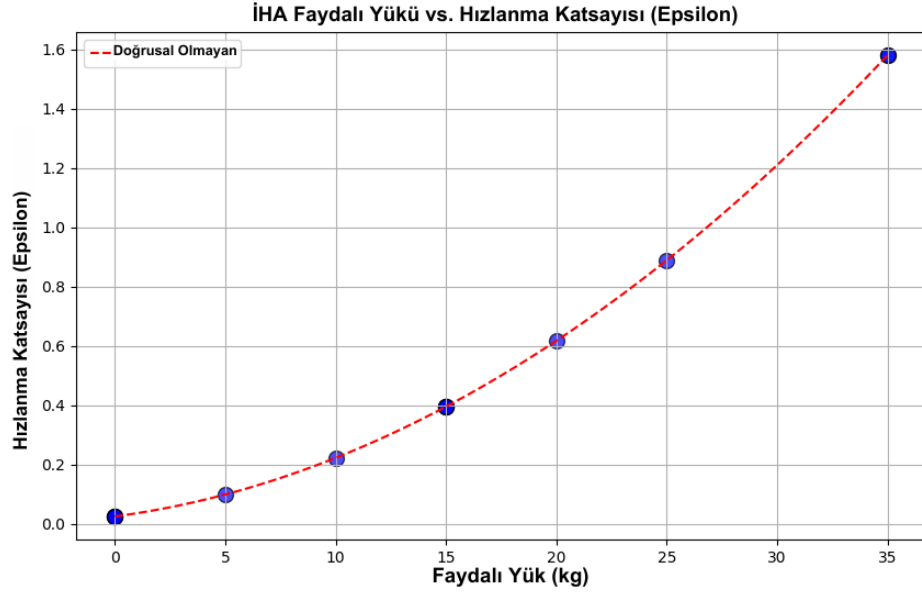
Şekil 4.4'te, İHA'ların teslimat operasyonları sırasında rota segmentlerine ve yük ağırlığındaki değişikliklere göre hızlarını nasıl ayarladıklarını gösteren bir grafik görülebilmektedir. Başlangıçta İHA 1 ve İHA 4, yaklaşık 35 m/s hız ile başlamışlardır. Teslimat yaptıkça, hızlarını kademeli olarak düşürmüşlerdir. Bu, rotalarının ilk bölümlerinin daha uzun olabileceğini veya daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir. İHA'ların yükleri zaman içinde azaldıkça, hızları da sürekli olarak düşmüş ve nihayetinde görevin sonuna doğru daha yüksek verimlilik için optimum hızlara ulaşmışlardır. Bu eğilim, teslimatlar sırasında enerji tasarrufu sağlamak için İHA hızının stratejik olarak yük ağırlığına göre ayarlandığını göstermektedir.

Tüm İHA'ların son segmentinde hız, 5 m/s'ye düşerek depoya dönüş için standart bir yaklaşıma işaret etmektedir. Bunun nedeni, mesafeler veya teslimat çalışmalarını tamamlamak için standart bir prosedür olabilir. Grafik, yük yönetimi, rota planlama ve enerji tasarrufu açısından hızın optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır. İHA teslimat sistemlerinin iyileştirilmesi için gerekli dinamikler hakkında fikir vermektedir.



Şekil 4.5. İHA Hızı ve Taşınan Yük

Şekil 4.5, İHA yük ağırlıkları ile optimum hızları arasındaki korelasyonu göstermekte ve İHA teslimat sistemlerinde operasyonel verimliliğe ilişkin iki analitik perspektif sunmaktadır. Bir eğri ile tamamlanan dağılım grafiği, İHA'ların yük taşıdıkça daha yüksek optimum hızlarda çalışma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Bu ilişki, hizalanmış veri noktaları ve yük ağırlığıyla hızdaki artışı vurgulayan doğrusal bir eğilim çizgisi aracılığıyla açıkça görülmektedir. Bu bulgular, daha ağır teslimatların, uçuş dinamiklerini sağlamak ve enerjiyi etkin bir şekilde yönetmek için daha yüksek hızlar gerektirdiğini göstermektedir. Bu tür öngörüler, farklı taşıma yüklerine dayalı olarak optimum hızların tahmin edilmesini sağladığından, planlama için çok önemlidir. Bu, rota optimizasyonunu, teslimat planlamasını ve batarya kullanımının tahmin edilmesini kolaylaştırmaktadır. Ayrıca, grafik İHA'ların artan taşıma yüklerine rağmen hızlarını koruma becerisini sergilemekle kalmamakta, aynı zamanda İHA tabanlı lojistik operasyonlarında zaman verimliliğini ve operasyonel öngörülebilirliği artıran uçuş planlama hesaplamalarını basitleştirmektedir.



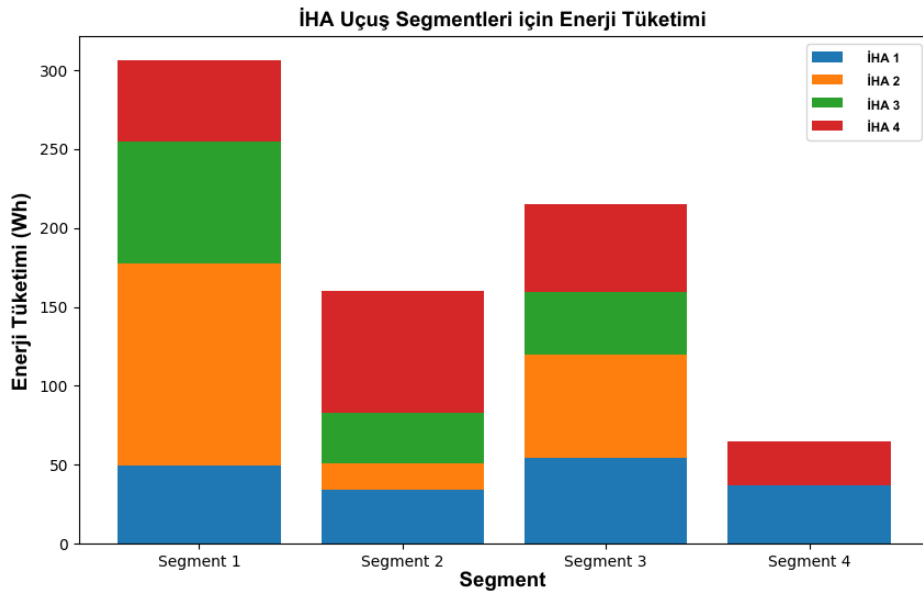
Şekil 4.6. İHA Yüğü ve Hızlanma Katsayısı

Şekil 4.6'da, İHA'ların taşıdığı ağırlığın hızlanma kabiliyetlerini nasıl etkilediğine dair bir görünüm sunulmaktadır. Yükle ağırlaştıkça, hızlanma için daha fazla güç veya verimlilik gerektirdiği gözlemlenmektedir. Bu durum, dağılım grafiğinde gösterilen ve eğri bir çizgi ile vurgulanan ivme katsayısındaki (Epsilon) artışla belirginleşmektedir. Yükle ağırlığı ve ivme arasındaki ilişki, ağırlık arttıkça daha belirgin hale gelmektedir. Başlangıçta, faydalı yükler daha hafifken, İHA'ların hızını korumasına izin veren hızlanma performansı üzerinde bir etki gözlenmektedir. Ancak, faydalı yükler sınırları aştıkça, eğri önemli ölçüde dikleşmekte ve daha ağır yüklerin etkili hızlanma ve kaldırma için daha fazla güç gerektirdiği anlaşılmaktadır.

Bu analizle, İHA'ların daha hafif yüklerle eşit hızlanmayı koruyabildiği ancak daha ağır yüklerin taşınması artan hızlanma taleplerini karşılamak için uçuş dinamiklerinde veya güç ayarlarında ayarlamalar gerektirdiği anlaşılmaktadır. Bu grafiğin sonuçları, hızlanmanın ötesinde, enerji tüketimine de uzanmaktadır; daha ağır yükler, enerji kullanımını artırmaktadır. Özellikle İHA'lar maksimum kapasitelerine yaklaştıkça, rota planlama ve programlama gibi lojistik hususlar da etkilenmektedir.

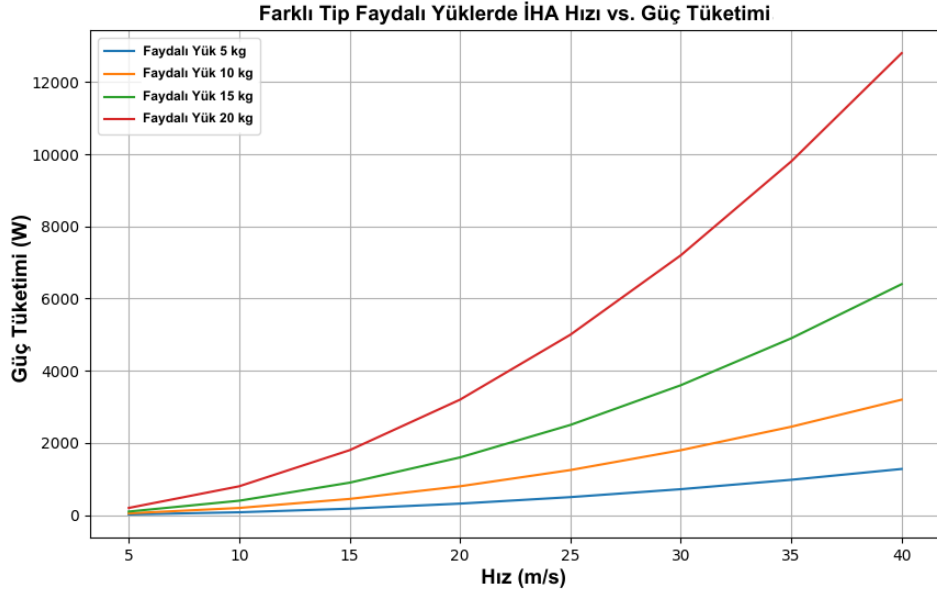
İHA tasarımı ve görev planlama amaçları için bu grafik bir araç görevi görmektedir. Yükle ağırlığı ile taşınması gereken hız arasındaki ilişkinin anlaşılması büyük önem

taşımaktadır. Bu bilgi, İHA'ların yük boyutlarını verimli bir şekilde kaldırabilmesi için motorların ve pillerin özelliklerinin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, aşırı yüklenmeyi önlemek ve İHA kullanımını optimize etmek, sonuçta enerji verimliliğini ve operasyonel sürdürülebilirliği artırmaktadır. Bu kapsamlı analiz, İHA teslimat sistemleri geliştirilirken taşıma yükü ve hızlanma faktörlerinin dikkate alınmasının önemini ortaya koyarken, performansı ve verimliliği en üst düzeye çıkarmak için planlama ve özenli tasarım ihtiyacını vurgulamaktadır.



Şekil 4.7. İHA Segment Uçuşu Enerji Tüketimi

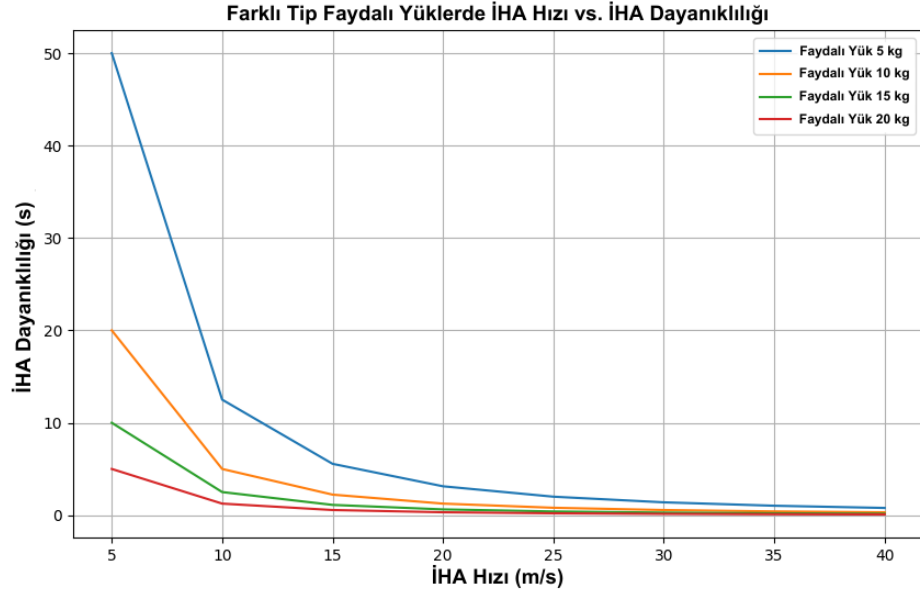
Şekil 4.7'de, teslimat görevleri sırasında İHA'ların enerji kullanım modellerine ilişkin öngörüler elde edilebilmektedir. İHA 2'nin başlangıçta, yüke veya daha uzun rotaya atfedilebilecek yüksek enerji talepleri olduğu açıkça görülmektedir. Öte yandan, İHA 4, başlangıçta daha hafif bir yüke veya daha kısa bir başlangıç segmentine işaret eden daha düşük enerji kullanımı göstermektedir. Görev ilerledikçe, tüm İHA'lar, yük teslimatı ve azalan enerji gereksinimlerini yansıtan segmentler boyunca enerji tüketiminde bir düşüş göstermektedir. Özellikle, İHA 1'in sürekli olarak diğerlerinden daha fazla enerji tüketmesi, mesafeleri kat etmedeki veya daha ağır yükleri taşımadaki rolünü ortaya koymaktadır. Bu analiz, enerji verimliliğini ve genel operasyonel etkinliği artırmak için İHA'lar arasında rota planlamasının ve yük dağıtımının önemini vurgulamaktadır. Bu bulgular, İHA teslimat görevlerini optimize etmek için öngörüler sunmaktadır.



Şekil 4.8. Farklı Yüklere İHA Güç Tüketimi ve Hızı

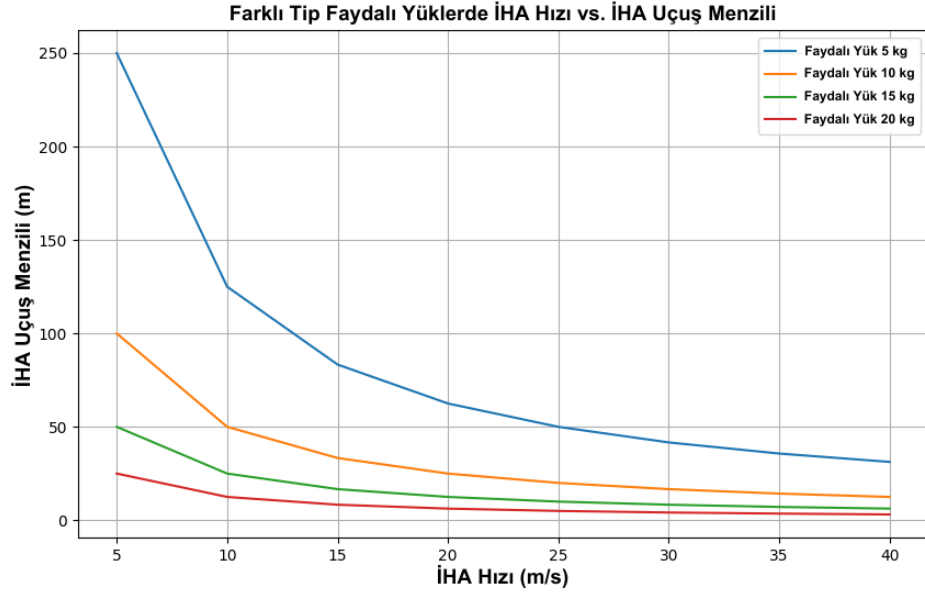
Şekil 4.8, bir İHA'nın hızı, taşıdığı faydalı yük ve bunun sonucunda ortaya çıkan güç gereksinimleri arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Veriler, farklı faydalı yük ağırlıkları arasında güç tüketiminin hızlarla birlikte arttığı bir korelasyonu açıkça göstermektedir. Bu durum, özellikle daha ağır yükler söz konusu olduğunda, hızlardaki sürüklenmeye karşı koymak için gereken enerji taleplerini vurgulamaktadır. Enerji verimliliğini artırmak ve performansı optimize etmek için stratejik hız yönetiminin önemini vurguladığı için, bu tür bilgiler İHA tasarımı için çok önemlidir. Bu bulgular, batarya ve motor seçiminde yardımcı olurken, teslimat verimliliği ve güç kullanımı arasında bir denge kurmaya yönelik planlamaya da katkı sağlamaktadır.

Bu analiz, İHA dayanıklılığını, menzilini ve genel görev etkinliğini iyileştirmek için bir temel sağlayarak, İHA operasyon stratejilerinde hem faydalı yükün ağırlığını hem de hızı dikkate almanın önemini vurgulamaktadır.



Şekil 4.9. Farklı Yüklere İHA Dayanıklılığı ve Hızı

Şekil 4.9'da İHA hızı arttıkça araçların dayanıklılığının farklı faydalı yük ağırlıkları arasında azaldığı görülmektedir. Bu düşüş, hız artışıyla daha belirgin hale gelmekte ancak belirli bir hızdan sonra stabilize olmaktadır. Bu durum, daha ağır yüklerin İHA'ların uçuş süresini sürekli olarak azalttığı durumlarda, faydalı yük ağırlığının dayanıklılığı nasıl etkilediğini açıkça göstermektedir. Özellikle, faydalı yüklerle uğraşırken, dayanıklılıklarını en üst düzeye çıkarmak için İHA'ları optimum hız aralığında çalıştırmanın önemini vurgulamaktadır. Bu analiz, operatörlerin süreyi uzatmak için İHA hızlarını yük ağırlığına göre ayarlamasına olanak tanıdığından, görev planlaması için çok önemlidir. Sonuç olarak, teslimat hizmetleri, gözetleme operasyonları ve diğer zamana duyarlı görevlerde verimliliği artırmak için İHA'ların konuşlandırma kararlarını bilgilendirmektedir.



Şekil 4.10. Farklı Yüklerde İHA Uçuş Menzili ve Hızı

Şekil 4.10, bir İHA'nın uçuş menzilinin hem faydalı yük hem de hız arttıkça azaldığını göstermektedir; bu dayanıklılık açısından gözlemlenilebilir. Bu durum, tüm faydalı yüklerde hız ve menzil arasında ters bir ilişki olduğunu göstermektedir. Daha ağır faydalı yüklerin tıpkı dayanıklılık üzerindeki etkileri gibi İHA'ların menzili üzerinde bir etkisi vardır. Artan hız ile birleştiğinde, uçuş süresini ve mesafe kabiliyetini azaltmaktadır. Sonuç olarak, bu durum performans için hız yönetiminin önemini ortaya koymaktadır.

Dört İHA'nın alt turları üzerinden elde edilen sonuçlar, hız optimizasyonu, enerji tüketimi, yük taşıma kapasitesi ve kalkış veya hız değiştirme için gereken gücü ölçen ivme katsayısı gibi faktörlere dayanarak verimlilik seviyelerini ortaya koymaktadır.

Optimum Hız Yönetimi: İHA 4 ve İHA 1, daha ağır yükler taşıırken güçlü başlangıç itmesi ve kaldırma kabiliyetlerini gösteren yüksek hızlar sergilemektedir. İHA 4, özellikle ilk segmentinde faydalı yük ile optimum hız arasında bir denge kurarak etkileyici bir performans sergilemekte ve bu, güçlü bir güç/ağırlık oranını işaret etmektedir. İHA 3 ise, önemli bir faydalı yük taşımasına rağmen hızını korumakta ve bu da enerji tasarrufu stratejisine veya itme kabiliyetinin sınırlarına işaret edebilmektedir.

Enerji Tüketimi: İHA 2'nin segmenti, düşük enerji tüketimi (65,963 Wh) ile enerji tasarrufu açısından dikkat çekmektedir. Bu, yüksüzken verimli seyir moduna geçebildiğini göstermektedir. İHA 4'ün enerji kullanımı, yükü teslim ettikçe ve görev ilerledikçe azalmaktadır, bu da enerji yönetiminin iyi yapıldığını ve görevin tamamlanmasıyla ilişkilendirildiğini göstermektedir.

İvme Katsayısı: Epsilon değeri, yük azaldıkça kaldırma için gereken enerjinin azaldığını göstermekte ve bu durum tüm İHA'ların son segmentlerinde gözlemlenen epsilon değerleriyle desteklenmektedir.

Bu çalışma, İHA teslimat sistemlerinde faydalı yük ağırlığı, enerji tüketimi ve uçuş verimliliği arasındaki ilişkiyi detaylı bir şekilde incelemektedir. Dikkate alınması gereken bazı önemli noktalar şunlardır:

1. Faydalı Yük ve Enerji Verimliliğini Optimize Etmek: İHA'ların taşıdığı ağırlık ile tükettikleri enerji arasında bir denge kurulması esastır. Bu, teslimat rotalarının planlanmasına ve faydalı yük taşıyan İHA'ların uçuş süresi ve enerji kullanımını en aza indirecek şekilde optimum hızları korumasına yardımcı olmaktadır.
2. Verimli Uçuş Süresi Yönetimi: Toplam alt tur süresi, rotaların ne kadar verimli planlandığını yansıtmaktadır. Daha kısa uçuş süreleri ve düşük enerji tüketimi tercih edilmektedir. İHA 1'in ilk segmenti ve İHA 4'ün alt turu, bu dengeyi sağlama konusunda verimliliği göstermektedir.
3. Stratejik Faydalı Yük Dağıtımı: Maliyet etkin operasyonlar için faydalı yükler, enerji tüketimini dengeleyecek şekilde İHA'lar arasında dağıtılmalıdır.
4. Gerçek Dünyadan Çıkarımlar: Bu çalışma, pratikte enerji kullanımını ağırlıklarına göre uyarlayabilen İHA'ların tasarımının önemini vurgulamaktadır.

Gelecekteki İyileştirmeler: Elde edilen bulguların uçuş parametrelerini zaman içinde uyarlayabilen kendi kendine pilot algoritmaları ve değişik yük boyutları için uygun İHA'ların geliştirilmesine yönelik çalışmalara rehberlik edebileceği düşünülmektedir.

Özetle, ideal bir İHA teslimatı, hız, faydalı yük kapasitesi, uçuş süresi ve enerji tüketimi arasında bir denge kurmalıdır. En az enerjiyi kullanarak yükünü teslim eden İHA'nın

en verimli olduğu kabul edilir. Bu çalışmanın sonuçları, İHA teslimat sistemlerinin anlaşılmasını sağlamakta ve operasyonel etkinliklerini artıran yenilikler için yol göstermektedir.



SONUÇ

Uygulama 1 kapsamında, tıbbi kitleri acil durum toplanma noktalarına ulaştırmak için bir kara aracı üzerinde birden fazla İHA kullanan, toplam maliyet minimizasyonu amaç fonksiyonuna sahip hibrit bir İHA/İKA rotalama modeli önerilmiştir. Maliyet fonksiyonunu kullanmanın temel amacı, afetten etkilenen bölgelerdeki insanların tıbbi kitler için bekleme süresini en aza düşürmektir.

Etkilenen alan, K-ortalamalar kümeleme yöntemi kullanılarak alt bölümlere ayrılmakta ve her bir küme merkezi İKA durağı olarak tanımlanmaktadır. Teslimatlar, İHA'lar aracılığıyla İKA duraklarından toplanma noktalarına yapılmaktadır. İHA'lar, uçuş menziliinde batarya kapasitesi olduğu sürece paketleri teslim etmek için kara aracı üzerinden birden fazla kez kalkış yapabilmektedirler. Önerilen modelde amaç fonksiyonunun nasıl çalıştığını göstermek amacıyla bazı senaryolar test edilmiş ve sonuçları birbirleriyle karşılaştırılmıştır.

Deneysel sonuçlar, İHA hızı arttığında toplam teslimat süresinin önemli ölçüde azaldığını ve küme sayısı ile İKA duraklarının da azaldığını göstermektedir. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü İHA, daha yüksek hız ile daha kısa sürede daha fazla mesafe kat edebilmektedir. Dolayısıyla, İHA'lar tıbbi kitleri acil durum toplanma noktalarına daha hızlı ulaştırabilmektedir. Ancak model, bazı senaryolarda İHA hızı arttıkça toplam teslimat süresi azalsa da, İHA hızı belirli bir hızı aştığında tekrar artmaktadır. Model, toplanma noktası sayısı, İHA hızı ve küme sayısı arasında optimum bir denge olduğunu açıkça göstermektedir. Sonuçlar, minimum toplam sürenin yalnızca İHA hızına değil, aynı zamanda küme ve toplanma noktası sayılarına da bağlı olduğunu göstermektedir. Bu durum, İHA hızının belirli bir noktanın ötesinde artırılmasının, sistemin performansını iyileştirme açısından azalan getirilerle sonuçlanabileceğini göstermektedir.

Genel olarak sonuçlar, İHA hızı parametresinin sistemin performansında kritik bir faktör olduğunu ve sistemi optimize ederken dikkatle değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir. Genel sistem optimizasyonunu sağlamak için diğer parametrelerin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Gelecekte yapılacak araştırmalar için öneriler aşağıda listelenmektedir:

- Daha hızlı teslimat yapılmasını sağlamak için İKA'lerdeki İHA'lar için otonom batarya değiştirme istasyonu,
- Zaman penceresi ve modelin deneysel analizi,
- İHA'lar tarafından yer aracına dinamik kalkış ve iniş,
- Birden fazla İHA ve İKA kullanarak teslimat senaryoları,
- Uçuşlara görev kritikliği faktörleri atayarak zaman minimizasyonunun önceliklendirilmediği senaryoların test edilmesi,
- İHA hızının bölgeye ve uçuş koşullarına göre dinamik olarak belirlenmesi,
- Afet koordinasyon merkezi ile koordineli olarak çalışan gerçek zamanlı otonom lojistik yönetim sistemi.

Uygulama 2 kapsamında çalışılan lojistik ve teslimat sektörü, İHA teknolojisinin uygulama alanlarının artmasıyla birlikte bir dönüşüm geçirmektedir. İHA'lar, karayolu altyapısı ile sınırlı kalmadan hava sahasını kullanarak kara taşımacılığı yöntemlerine bir alternatif sunmaktadır. Bu da teslimatların hızlandırılması, verimliliğin artırılması ve çevresel etkinin azaltılması için bir fırsat sunmaktadır. Bununla birlikte, İHA'ların teslimat amacıyla kullanılmasıyla ilgili zorluklar bulunmaktadır. Bu zorluklar arasında enerji verimliliği için faydalı yük kapasitelerinin optimize edilmesi, güvenlik endişelerinin giderilmesi ve gerçek zamanlı değişkenlere uyum sağlayabilecek yönlendirme algoritmalarının geliştirilmesi yer almaktadır. İHA tabanlı teslimat sistemlerinin potansiyelinden tam olarak faydalanmak için bu alanda araştırmaların devam etmesi önem arz etmektedir.

Çalışmada, mevcut literatürde belirtilen söz konusu zorlukların ele alınmasına katkıda bulunulmuştur. Araştırmada elde edilen temel bulgular aşağıda sıralanmaktadır:

1. Kapasite kısıtlı oklu İHA, oklu ziyaret rotalama problemini çözmek için özel olarak tasarlanmış bir algoritma geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, İHA teslimat sistemlerinde hem yönlendirme verimliliğini hem de enerji tüketimini optimize edebilmeyi sağlamaktadır.
2. Araştırmada ilgili alanda yapılmış diğer çalışmalardan farklı olarak, İHA hızlarının değişen faydalı yüklere göre ayarlanmasının enerji verimliliğini ve operasyonel maliyetleri nasıl etkileyebileceği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Literatürde büyük ölçüde göz ardı edilen bu faktör, mevcut

araştırmada teslimat sistemlerini modellemeye yönelik bir yaklaşım benimsendiğinden dikkatle ele alınmıştır.

3. Çalışmada İHA yükü ve hız dinamikleriyle ilişkili doğrusal enerji tüketimi sorunu, aralarındaki karmaşık ilişkiyi doğru bir şekilde temsil eden bir model kapsamında ele alınmıştır: Bu model, simülasyonların gerçekçiliğini artırmakla kalmamakta, aynı zamanda İHA operasyonlarının çeşitli koşullarda daha etkili bir şekilde optimize edilmesini sağlamaktadır.
4. Önerilen algoritmayı doğrulamak için gerçek dünyadaki teslimat zorluklarına yakından benzeyen hesaplama testleri gerçekleştirildi: Bu testler, algoritmaların yüklere, rota karmaşıklıklarına ve operasyonel gereksinimlere uyulanabilirliğini göstermekte ve İHA tabanlı teslimat hizmetlerinin verimliliğini artırma potansiyelini ortaya koymaktadır.

Bu katkılar sayesinde araştırmada, İHA teslimat sistemlerini optimize etmek amacıyla bir ereve oluşturarak mevcut literatürdeki boşlukları doldurmaktadır. Bu ereve, ihtiyaçlara uyum sağlarken aynı zamanda enerji kullanımını ve maliyetleri en aza indirmektedir.

Bu alışmada, İHA operasyonlarında faydalı yük, hız ve enerji tüketimi arasındaki ilişki kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Elde edilen bulgular, operasyonel verimlilik için İHA performansının optimize edilmesine yönelik öngörüler sunmaktadır. Hem faydalı yük kapasitesinin hem de hızın bir İHA'nın enerji gereksinimleri ve görev etkinliği üzerinde etkili olduğunu doğrulanmaktadır. İlginç bir şekilde, daha ağır faydalı yüklerin enerji taleplerini artırdığı gözlemlenmiştir. İHA 1 ve 4 gibi İHA'lar, hız ve faydalı yükü yöneterek verimli enerji tüketimi sergilemektedir. Öte yandan, İHA 2'nin yük ile uzun uçuş süresi, optimuma yakın olmayan rota seçimleri veya hız ayarlamaları nedeniyle olası verimsizlikleri göstermektedir. İHA 3, hızın korunmasının nasıl dengeli enerji tüketimine ve etkili yk yönetimine yol açtığını göstererek bir dengeyi temsil etmektedir.

Araştırma, farklı uçuş segmentleri sırasında enerji tüketim modellerinin nicel bir analizini sunarak İHA operasyonlarını çevreleyen pratik tartışmalara katkıda

bulunmaktadır. Değişken faydalı yüklerin hızı optimize etme ve enerji harcamasını en aza indirme üzerindeki etkisi vurgulanarak, verimliliği artırmak için özelleştirilmiş rota planlaması ve hız düzenlemesine duyulan ihtiyaç ortaya konmuştur. İHA'lar karşılaştırılarak, verimliliği en üst düzeye çıkarmak için rota planlama ve hız kontrolünde özel yaklaşımların önemi vurgulanmıştır.

Bulguların pratik sonuçları bir dizi uygulamaya sahiptir. Teslimat hizmetleri alanında araştırmanın uygulanması, İHA filolarının yönetimini sağlayarak maliyet tasarrufu ve teslimat sürelerinde iyileşme sağlayabilmektedir. Acil müdahale İHA'ları, araştırmanın öngörülerini kullanarak kritik durumlarda hizmet sağlayan uçuş sürelerine ulaşabilecektir. Ayrıca, enerji verimliliği için optimize edilmiş İHA'lar, alanları kaplayarak ve veri toplama süreçlerini iyileştirerek çevresel izleme çabalarına büyük fayda sağlayabilecektir.

İlgili alanda ileriye dönük olarak daha fazla araştırma yapılması gereken alanlar bulunmaktadır. Gelecekte yapılacak çalışmalar, rüzgâr direnci ve sıcaklık dalgalanmaları gibi çevresel faktörlerin İHA enerji tüketimini ve uçuş dinamiklerini nasıl etkilediğini keşfedebilme olanağına sahiptir. Gerçek zamanlı rota planlaması ve hız ayarlamaları için algoritmalar geliştirmek, İHA performansını önemli ölçüde artırabilecektir. Ayrıca, elektrik gibi enerji kaynaklarının fizibilitesinin incelenmesi, uzun İHA görevleri ve sürdürülebilir operasyonlar için yeni olanaklar sunabilmektedir. İHA'ların verimliliğini ve kabiliyetlerini artırmak için fırsatlar bulunmaktadır. Analiz için makine öğreniminin kullanılması, rota optimizasyonu, yük yönetimi ve enerji kullanımında devrim yaratma potansiyeline sahiptir. Gerçek zamanlı verileri entegre eden bir çerçevenin uygulanması, İHA'ları uçuşlar sırasında dinamik karar verme yetenekleriyle güçlendirebilmektedir. Ayrıca, batarya teknolojisinin geliştirilmesi ve enerji sistemlerinin araştırılması, İHA'ların menzilini ve kabiliyetlerini büyük ölçüde artırarak uygulamalarının sınırlarını zorlama potansiyeline sahiptir.

Özetle, araştırma ve potansiyel geliştirmeler için bu alanlara odaklanarak, sektörler arasında artan talepleri karşılamak üzere İHA teknolojisine devam edilebilir. Araştırmanın İHA operasyonlarında verimliliği, sürdürülebilirliği ve uyarlanabilirliği artırmayı amaçlayan yenilikler için bir temel oluşturacağı düşünülmektedir.

KAYNAKÇA

- Agatz, N., Bouman, P., Schmidt, M. (2018) Optimization approaches for the traveling salesman problem with drone. *Transportation Science*, 52(4), 965-981.
- Albrecht, F. (2018) Natural hazard events and social capital: The social impact of natural disasters. *Disasters*, 42(2), 336-360. <https://doi.org/10.1111/disa.12246>
- Alem, D., Clark, A., Moreno, A. (2016) Stochastic network models for logistics planning in disaster relief. *European Journal of Operational Research*, 255(1), 187-206. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.04.041>
- Alsamhi, S. H., Ma, O., Ansari, M. S., Almalki, F. A. (2019) Survey on Collaborative Smart Drones and Internet of Things for Improving Smartness of Smart Cities. *IEEE Access*, 7, 128125-128152. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2934998>
- Alzahrani, B., Oubbati, O. S., Barnawi, A., Atiquzzaman, M., Alghazzawi, D. (2020) UAV assistance paradigm: State-of-the-art in applications and challenges. *Journal of Network and Computer Applications*, 166, 102706. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102706>
- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., Cook, W. J. (2006) *The Traveling Salesman Problem: A Computational Study*. Princeton University Press. <https://www.jstor.org/stable/j.ctt7s8xg>
- Asfora, B. A., Banfi, J., Campbell, M. (2020) Mixed-Integer Linear Programming Models for Multi-Robot Non-Adversarial Search. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 6805-6812. IEEE Robotics and Automation Letters. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3017473>
- Aurambout, J.-P., Gkoumas, K., Ciuffo, B. (2019) Last mile delivery by drones: An estimation of viable market potential and access to citizens across European cities. *European Transport Research Review*, 11(1). <https://doi.org/10.1186/s12544-019-0368-2>

- Aydin, H., Ayvaz, B., Küçükaşçi, E. Ş. (2017) AFET YÖNETİMİNDE LOJİSTİK DEPO SEÇİMİ PROBLEMİ: MALTEPE İLÇESİ ÖRNEĞİ. *Journal of Yasar University*.
- Bagherian, M., Alos, A. (2015) 3D UAV trajectory planning using evolutionary algorithms: A comparison study. *The Aeronautical Journal*, 119(1220), 1271-1285. <https://doi.org/10.1017/S0001924000011246>
- Baker, S. M. (2009) Vulnerability and Resilience in Natural Disasters: A Marketing and Public Policy Perspective. *Journal of Public Policy & Marketing*, 28(1), 114-123. <https://doi.org/10.1509/jppm.28.1.114>
- Bala Krishna, M., Doja, M. N. (2015) Multi-Objective Meta-Heuristic Approach for Energy-Efficient Secure Data Aggregation in Wireless Sensor Networks. *Wireless Personal Communications*, 81(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11277-014-2114-3>
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S., Shah, V. B. (2017) Julia: A fresh approach to numerical computing. İçinde *SIAM Review* (v1", C. 59, Sayı 1, ss. 65-98) [Julia]. <https://doi.org/10.1137/141000671>
- Birnbaum, M. L., Daily, E. K., O'Rourke, A. P. (2015) Research and Evaluations of the Health Aspects of Disasters, Part V: Epidemiological Disaster Research. *Prehospital and Disaster Medicine*, 30(6), 648-656. <https://doi.org/10.1017/S1049023X1500535X>
- Bode, C., Macdonald, J. R. (2017) Stages of Supply Chain Disruption Response: Direct, Constraining, and Mediating Factors for Impact Mitigation. *Decision Sciences*, 48(5), 836-874. <https://doi.org/10.1111/dec.12245>
- Borghetti, A., D'Ambrosio, C., Lodi, A., Martello, S. (2008) A MILP Approach for Short-Term Hydro Scheduling and Unit Commitment With Head-Dependent Reservoir. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(3), 1115-1124. *IEEE Transactions on Power Systems*. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.926704>
- Borghetti, F., Caballini, C., Carboni, A., Grossato, G., Maja, R., The Use of Drones for Last-Mile Delivery: A Numerical Case Study in Milan, Italy. *Sustainability*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031766>

Barabino, B.
(2022)

Boysen, N.,
Fedtke, S.,
Schwerdfeger, S.
(2020)

Last-mile delivery concepts: A survey from an operational research perspective. *Or Spectrum*, 43(1).
<https://doi.org/10.1007/s00291-020-00607-8>

Brown, R. G.,
Easterfield, T. E.
(1951)

A Proposed Definition of Operations Research. *Journal of the Operational Research Society*, 2(2), 21-24.
<https://doi.org/10.1057/jors.1951.8>

Bruni, M. E.,
Khodaparasti, S.,
Perboli, G. (2023)

Energy Efficient UAV-Based Last-Mile Delivery: A Tactical-Operational Model With Shared Depots and Non-Linear Energy Consumption. *IEEE Access*, 11.
<https://doi.org/10.1109/access.2023.3247501>

Campbell, J.,
Corberán, Á.,
Plana, I., Sanchis,
J. M., & Segura,
P. (2023)

The multi-purpose K-drones general routing problem. *Networks*, 82(4), 437-458. <https://doi.org/10.1002/net.22176>

Caunhye, A. M.,
Nie, X., Pokharel,
S. (2012)

Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1), 4-13.
<https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004>

Chen, X., Zhou,
Y., Tang, Z., &
Luo, Q. (2017)

A hybrid algorithm combining glowworm swarm optimization and complete 2-opt algorithm for spherical travelling salesman problems. *Applied Soft Computing*, 58, 104-114.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2017.04.057>

Chen, Y., Ren, S.,
Chen, Z., Chen,
M., & Wu, H.
(2019)

Path Planning for Vehicle-borne System Consisting of Multi Air-ground Robots. *Robotica*, 38(3), 493-511.
<https://doi.org/10.1017/S0263574719000808>

Choe, J. Y.
(Jacey), Kim, J.
J., & Hwang, J.
(2021)

Perceived risks from drone food delivery services before and after COVID-19. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 33(4), 1276-1296.
<https://doi.org/10.1108/IJCHM-08-2020-0839>

Christoplos, I.,
Mitchell, J., &
Liljelund, A.
(2001)

Re-framing Risk: The Changing Context of Disaster Mitigation and Preparedness. *Disasters*, 25(3), 185-198.
<https://doi.org/10.1111/1467-7717.00171>

- Claro, R. M., Pereira, M. I., Neves, F. S., & Pinto, A. M. (2023) Energy Efficient Path Planning for 3D Aerial Inspections. *IEEE Access*, 11, 32152-32166. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3262837>
- Clothier, R. A., Greer, D. A., Greer, D. G., & Mehta, A. M. (2015) Risk Perception and the Public Acceptance of Drones. *Risk Analysis*, 35(6), 1167-1183. <https://doi.org/10.1111/risa.12330>
- Clustering.jl*. (2023) Julia Statistics. <https://github.com/JuliaStats/Clustering.jl> (Original work published 2012)
- Cohen, A. P., Shaheen, S. A., & Farrar, E. M. (2021) Urban Air Mobility: History, Ecosystem, Market Potential, and Challenges. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(9), 6074-6087. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3082767>
- Coppola, D. P. (Ed.). (2015) *Introduction to International Disaster Management (Third Edition)* (ss.xxiii-xxiv). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801477-6.09002-X>
- De Freitas, J. C., & Penna, P. H. V. (2020) A variable neighborhood search for flying sidekick traveling salesman problem. *International Transactions in Operational Research*, 27(1), 267-290. <https://doi.org/10.1111/itor.12671>
- Dell'Amico, M., Montemanni, R., & Novellani, S. (2021) Drone-assisted deliveries: New formulations for the flying sidekick traveling salesman problem. *Optimization Letters*, 15(5), 1617-1648. <https://doi.org/10.1007/s11590-019-01492-z>
- Dilley, M. (2006) Setting priorities: Global patterns of disaster risk. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1845), 2217-2229. <https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1823>
- Distances.jl*. (2023) Julia Statistics. <https://github.com/JuliaStats/Distances.jl> (Original work published 2014)

- Doole, M., Ellerbroek, J., & Knoop, V. L. (2021) Constrained Urban Airspace Design for Large-Scale Drone-Based Delivery Traffic. *Aerospace*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/aerospace8020038>
- Dorigo, M., & Gambardella, L. M. (1997) Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 53-66. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. <https://doi.org/10.1109/4235.585892>
- Dorigo, M., Maniezzo, V., & Coloni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 26(1), 29-41. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*. <https://doi.org/10.1109/3477.484436>
- Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2017) Vehicle Routing Problems for Drone Delivery. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 47(1). <https://doi.org/10.1109/tsmc.2016.2582745>
- DroneEngr. (2024) Heavy load drone with 40KGS payload 20 minutes endurance. *One-Stop Drone Parts Store. Save BIG*. <https://www.droneassemble.com/product/heavy-load-drone-with-40kgs-payload-20-minutes-endurance/>
- Elmakis, O., Shaked, T., & Degani, A. (2022) Vision-Based UAV-UGV Collaboration for Autonomous Construction Site Preparation. *IEEE Access*, 10, 51209-51220. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3170408>
- Ermagun, A., & Tajik, N. (2023) Multiple-Drones-Multiple-Trucks Routing Problem for Disruption Assessment. *Transportation Research Record*, 2677(2), 725-740. <https://doi.org/10.1177/03611981221108378>
- Faiz, T. I., Vogiatzis, C., & Noor-E-Alam, M. (2022) A Robust Optimization Framework for Two-Echelon Vehicle and UAV Routing for Post-Disaster Humanitarian Logistics Operations (arXiv:2207.11879). *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.11879>

- Ferrandez, S. M., Harbison, T., Weber, T., Sturges, R., & Rich, R. (2016) Optimization of a truck-drone in tandem delivery network using k-means and genetic algorithm. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 9(2), 374-388.
- Fields, E. (2023) *TravelingSalesmanHeuristics* [Julia]. <https://github.com/evanfields/TravelingSalesmanHeuristics.jl> (Original work published 2016)
- Floreano, D., & Wood, R. J. (2015) Science, technology and the future of small autonomous drones. *Nature*, 521(7553). <https://doi.org/10.1038/nature14542>
- Floudas, C. A., & Lin, X. (2005) Mixed Integer Linear Programming in Process Scheduling: Modeling, Algorithms, and Applications. *Annals of Operations Research*, 139(1), 131-162. <https://doi.org/10.1007/s10479-005-3446-x>
- Gabani, P. R., Gala, U. B., Narwane, V. S., Raut, R. D., Govindarajan, U. H., & Narkhede, B. E. (2021) A viability study using conceptual models for last mile drone logistics operations in populated urban cities of India. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 3(3). <https://doi.org/10.1049/cim2.12006>
- Garg, V., Niranjana, S., Prybutok, V., Pohlen, T., & Gligor, D. (2023) Drones in last-mile delivery: A systematic review on Efficiency, Accessibility, and Sustainability. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 123, 103831. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103831>
- Gautam, S. A., & Verma, N. (2014) Path planning for unmanned aerial vehicle based on genetic algorithm & artificial neural network in 3D. *2014 International Conference on Data Mining and Intelligent Computing (ICDMIC)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICDMIC.2014.6954257>
- Gen, M., & Cheng, R. (1999) *Genetic Algorithms and Engineering Optimization*. John Wiley & Sons.
- Goyal, R., Reiche, C., Fernando, C., & Cohen, A. (2021) Advanced Air Mobility: Demand Analysis and Market Potential of the Airport Shuttle and Air Taxi Markets. *Sustainability*, 13(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/su13137421>

- Grossmann, I. E., & Trespalacios, F. (2013). Systematic modeling of discrete-continuous optimization models through generalized disjunctive programming. *AIChE Journal*, 59(9), 3276-3295. <https://doi.org/10.1002/aic.14088>
- Gupta, L., Jain, R., & Vaszkun, G. (2016). Survey of Important Issues in UAV Communication Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(2), 1123-1152. [IEEE Communications Surveys & Tutorials. https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297](https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2495297)
- Gurobi Optimization, L. (2023). *Gurobi Optimizer Reference Manual*. Gurobi Optimization. <https://www.gurobi.com/>
- Guzey, A., & Satman, M. H. (2024a). "Collaborative Truck/Drone Routing Problem: An Application to Disaster Logistics", *JSAS*, sy. 9, ss. 77–94, Haziran 2024, doi: 10.52693/jsas.1474515.
- Guzey, A., & Akıncı, M. & Altan, Ş. (2020). Otonom Kara ve Hava Araçları ile Akıllı Tarım: Hasat Optimizasyonu Üzerine Bir Uygulama. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 207-220. <https://doi.org/10.26745/ahbvuidfd.706304>
- Guzey, A., & Satman, M. H. (2024b). *Multi-UAV Routing Genetic Algorithm in Python (UAV) [Software]*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.12746686>
- Hà, M. H., Vu, L., & Vu, D. M. (2020). *The two-echelon routing problem with truck and drones* (arXiv:2004.02275). [arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.02275](https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.02275)
- Ha, Q. M., Deville, Y., Pham, Q. D., & Hà, M. H. (2018). On the min-cost traveling salesman problem with drone. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 86, 597-621.
- Han, X. (2023). Path Planning Algorithm for the Multiple Depot Vehicle Routing Problem Based on Parallel Clustering. *Scientific Programming*, 2023, e7588595. <https://doi.org/10.1155/2023/7588595>
- Hannan, A., Hussain, F., Noman, A., Ehatisham-ul-Haq, M., Ashraf,

M. U., Alghamdi,
A. M., & Alfakeeh,
A. S. (2021)

Hazama, Y., Iima,
H., Karuno, Y., &
Mishima, K.
(2021) Genetic algorithm for scheduling of parcel delivery by drones. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 15(6), JAMDSM0069-JAMDSM0069. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2021jamdsm0069>

HiGHS.jl. (2023) JuMP-dev. <https://github.com/jump-dev/HiGHS.jl> (Original work published 2019)

Holland, J. H.
(1992) Genetic Algorithms. *Scientific American*, 267(1), 66-73.

Holzmann, P.,
Wankmüller, C.,
Globocnik, D., &
Schwarz, E. J.
(2021) Drones to the rescue? Exploring rescue workers' behavioral intention to adopt drones in mountain rescue missions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 51(4). <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-01-2020-0025>

Hu, Z.-H., Li, T.,
Tian, X.-D., &
Wei, Y.-H. (2023) Drone-Based Emergent Distribution of Packages to an Island from a Land Base. *Drones*, 7(3). <https://doi.org/10.3390/drones7030218>

Huang, R., &
Peng, Z.-R.
(2002) Schedule-Based Path-Finding Algorithms for Transit Trip-Planning Systems. *Transportation Research Record*, 1783(1), 142-148. <https://doi.org/10.3141/1783-18>

Huang, X., &
Song, L. (2018) An emergency logistics distribution routing model for unexpected events. *Annals of Operations Research*, 269, 223-239.

Huang, Y., Xu, J.,
Shi, M., & Liu, L.
(2022) Time-Efficient Coverage Path Planning for Energy-Constrained UAV. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5905809>

Hwang, J., & Kim,
H. (2019) Consequences of a green image of drone food delivery services: The moderating role of gender and age. *Business Strategy and the Environment*, 28(5), 872-884. <https://doi.org/10.1002/bse.2289>

- Isenberg, P., Elmqvist, N., Scholtz, J., Cernea, D., Ma, K.-L., & Hagen, H. (2011) Collaborative visualization: Definition, challenges, and research agenda. *Information Visualization*, 10(4), 310-326. <https://doi.org/10.1177/1473871611412817>
- Islam, R., Jones, S., & Hudnall, M. (2023) Transportation system functions during hurricane Response: A systematic review of modes and methods. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 18, 100786. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2023.100786>
- Ismagilova, E., Hughes, L., Dwivedi, Y. K., & Raman, K. R. (2019) Smart cities: Advances in research—An information systems perspective. *International Journal of Information Management*, 47, 88-100. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.01.004>
- Johnson, D. S. (1984) [Review of *Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity*., tanıtım yazarı C. H. Papadimitriou & K. Steiglitz]. *The American Mathematical Monthly*, 91(3), 209-211. <https://doi.org/10.2307/2322374>
- Kadioğlu, M. (2011) *Afet Yonetimi: Beklenilmeyeni Beklemek, En Kötüsünü Yönetmek*. <https://www.academia.edu/22920333>
- Kangunde, V., Jamisola, R. S., & Theophilus, E. K. (2021). A review on drones controlled in real-time. *International Journal of Dynamics and Control*, 9(4), 1832-1846. <https://doi.org/10.1007/s40435-020-00737-5>
- Kapucu, N. (2008) Collaborative emergency management: Better community organising, better public preparedness and response. *Disasters*, 32(2), 239-262. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2008.01037.x>
- Khamidehi, B., Raeis, M., & Sousa, E. S. (2021) *Dynamic Resource Management for Providing QoS in Drone Delivery Systems* (arXiv:2103.04015). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.04015>
- Khan, A., Zhang, J., Ahmad, S., Memon, S., Qureshi, H. A., & Ishfaq, M. (2022) Dynamic Positioning and Energy-Efficient Path Planning for Disaster Scenarios in 5G-Assisted Multi-UAV Environments. *Electronics*, 11(14), Article 14. <https://doi.org/10.3390/electronics11142197>

- Khoufi, I., Laouiti, A., & Adjih, C. (2019) A survey of recent extended variants of the traveling salesman and vehicle routing problems for unmanned aerial vehicles. *Drones*, 3(3), 66.
- Kivanç, Ö. (2019) An approach to improve the performance of cooperative unmanned vehicle team. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 27(2), 1428-1444. <https://doi.org/10.3906/elk-1806-98>
- Kim, S., & Kim, S. (2022) VRP of Drones Considering Power Consumption Rate and Wind Effects. *LOGI – Scientific Journal on Transport and Logistics*, 13(1), 210-221.
- Klein, P., & Young, N. (2009) Approximation Algorithms for NP-Hard Optimization Problems. İçinde M. Atallah & M. Blanton, *Algorithms and Theory of Computation Handbook, Second Edition, Volume 1* (C. 3, ss. 1-20). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781584888239-c34>
- Kolen, A. (1983) Combinatorial optimization algorithm and complexity: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1982, 496 pages, \$49.50. *European Journal of Operational Research*, 12(3), 314. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90201-1](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90201-1)
- Kostko, N., & Pecherkina, I. (2021) Impact of citizen's urban identity on the smart city technologies usage. *E3S Web of Conferences*, 258, 06011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202125806011>
- Kumar, D., Solanki, V., Choudhary, S., Selamat, A., & Gonzalez Crespo, R. (2020) Comparative Study on Ant Colony Optimization (ACO) and K-Means Clustering Approaches for Jobs Scheduling and Energy Optimization Model in Internet of Things (IoT). *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 6, 107-116. <https://doi.org/10.9781/ijimai.2020.01.003>
- Kuwata, Y., & How, J. (2004) Three-Dimensional Receding Horizon Control for UAVs. İçinde *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2004-5144>

- Labrague, L. j., Hammad, K., Gloe, D. s., McEnroe-Petitte, D. m., Fronda, D. c., Obeidat, A. a., Leocadio, M. c., Cayaban, A. r., & Mirafuentes, E. c. (2018) Disaster preparedness among nurses: A systematic review of literature. *International Nursing Review*, 65(1), 41-53. <https://doi.org/10.1111/inr.12369>
- Lansky, J., Rahmani, A. M., Malik, M. H., Yousefpoor, E., Yousefpoor, M. S., Khan, M. U., & Hosseinzadeh, M. (2023) An energy-aware routing method using firefly algorithm for flying ad hoc networks. *Scientific Reports*, 13(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-27567-7>
- Laporte, G., Louveaux, F. V., & van Hamme, L. (2002) An Integer L-Shaped Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands. *Operations Research*, 50(3), 415-423. <https://doi.org/10.1287/opre.50.3.415.7751>
- Lauta, K. C., Vendelø, M. T., Sørensen, B. R., & Dahlberg, R. (2018) Conceptualizing cold disasters: Disaster risk governance at the Arctic edge. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 31, 1276-1282. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.12.011>
- Leider, J. P., DeBruin, D., Reynolds, N., Koch, A., & Seaberg, J. (2017) Ethical Guidance for Disaster Response, Specifically Around Crisis Standards of Care: A Systematic Review. *American Journal of Public Health*, 107(9), e1-e9. <https://doi.org/10.2105/AJPH.2017.303882>
- Leishman, J. G. (2006) *Principles of helicopter aerodynamics* (2nd ed). Cambridge University Press.
- Li, H., & Wang, F. (2022) Branch-price-and-cut for the truck-drone routing problem with time windows. *Naval Research Logistics (NRL)*, 70(2). <https://doi.org/10.1002/nav.22087>
- Li, J., Liu, H., Lai, K. K., & Ram, B. (2022) Vehicle and UAV Collaborative Delivery Path Optimization Model. *Mathematics*, 10(20), 3744.

- Li, J., Noto, M., & Zhang, Y. (2022) Optimization of Delivery Routes for Vehicle-mounted Drones in Emergencies. *2022 2nd International Conference on Computer, Control and Robotics (ICCCR)*, 6-13.
- Li, X., Li, P., Zhao, Y., Zhang, L., & Dong, Y. (2021) A Hybrid Large Neighborhood Search Algorithm for Solving the Multi Depot UAV Swarm Routing Problem. *IEEE Access*, 9, 104115-104126. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3098863>
- Li, Z., Zhao, W., & Liu, C. (2022) Completion Time Minimization for UAV-UGV-Enabled Data Collection. *Sensors*, 22(15), Article 15. <https://doi.org/10.3390/s22155839>
- Lin, M., Chen, Y., Han, R., & Chen, Y. (2022) Discrete Optimization on Truck-Drone Collaborative Transportation System for Delivering Medical Resources. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2022, e1811288. <https://doi.org/10.1155/2022/1811288>
- Liu, J. (2022) An Improved Genetic Algorithm for Rapid UAV Path Planning. *Journal of Physics: Conference Series*, 2216(1), 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2216/1/012035>
- Liu, N., & Ye, Y. (2013) Humanitarian logistics planning for natural disaster response with Bayesian information updates. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 10(3), 665-689. <https://doi.org/10.3934/jimo.2014.10.665>
- Liu, Y., Zhang, P., Ru, Y., Wu, D., Wang, S., Yin, N., Meng, F., & Liu, Z. (2022) A scheduling route planning algorithm based on the dynamic genetic algorithm with ant colony binary iterative optimization for unmanned aerial vehicle spraying in multiple tea fields. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.998962>
- Lockwood, J., & Ackery, A. (2014) Improving air medical transport of the trauma patient from the ground. *Canadian Journal of Emergency Medicine*, 16(3), 243-246. <https://doi.org/10.2310/8000.2013.131141>
- Luo, H., Zhang, P., Wang, J., Wang, G., & Meng, F. (2019) Traffic Patrolling Routing Problem with Drones in an Urban Road System. *Sensors*, 19(23), Article 23. <https://doi.org/10.3390/s19235164>

- Luo, Y., Song, J., Zhao, K., & Liu, Y. (2022) UAV-Cooperative Penetration Dynamic-Tracking Interceptor Method Based on DDPG. *Applied Sciences*, 12(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/app12031618>
- Luo, Z., Liu, Z., & Shi, J. (2017) A Two-Echelon Cooperated Routing Problem for a Ground Vehicle and Its Carried Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors*, 17(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/s17051144>
- Macrina, G., Di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., & Laporte, G. (2020) Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102762. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102762>
- Madani, B., & Ndiaye, M. (2022) Hybrid Truck-Drone Delivery Systems: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 10, 92854-92878. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3202895>
- Mam, M., G. L., & Saxena, N. S. (2017) Improved K-means Clustering based Distribution Planning on a Geographical Network. *International Journal of Intelligent Systems and Applications*, 9(4), 69.
- Mangiaracina, R., Perego, A., Seghezzi, A., & Tumino, A. (2019) Innovative solutions to increase last-mile delivery efficiency in B2C e-commerce: A literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(9), 901-920. <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2019-0048>
- Melo, A. G., Pinto, M. F., Marcato, A. L. M., Honório, L. M., & Coelho, F. O. (2021) Dynamic Optimization and Heuristics Based Online Coverage Path Planning in 3D Environment for UAVs. *Sensors*, 21(4), Article 4. <https://doi.org/10.3390/s21041108>
- Merkert, R., Bliemer, M. C. J., & Fayyaz, M. (2022) Consumer preferences for innovative and traditional last-mile parcel delivery. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 52(3). <https://doi.org/10.1108/ijpdlm-01-2021-0013>
- Merkert, R., & Bushell, J. (2020) Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. *Journal of Air Transport*

- Moadab, A., Farajzadeh, F., & Valilai, O. F. (2022) Drone routing problem model for last-mile delivery using the public transportation capacity as moving charging stations. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10408-4>
- Mondal, A., Mishra, D., Prasad, G., & Hossain, A. (2023) Deep Reinforcement Learning for Green UAV-Assisted Data Collection. *ICASSP 2023 - 2023 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICASSP49357.2023.10094618>
- Moridpour, S., Chung, E. C., & Rashidi, T. (2018) Optimization Concepts in Traffic and Transportation Science. *Journal of Advanced Transportation*, 2018, 1-2. <https://doi.org/10.1155/2018/6825205>
- Mulligan, M. (2013) Rebuilding Communities after Disasters: Lessons from the Tsunami Disaster in Sri Lanka. *Global Policy*, 4(3), 278-287. <https://doi.org/10.1111/1758-5899.12038>
- Myeong, S., & Shahzad, K. (2021) Integrating Data-Based Strategies and Advanced Technologies with Efficient Air Pollution Management in Smart Cities. *Sustainability*, 13(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/su13137168>
- Negi, S., & Negi, G. (2020) Framework to manage humanitarian logistics in disaster relief supply chain management in India. *International Journal of Emergency Services*, 10(1), 40-76. <https://doi.org/10.1108/IJES-02-2020-0005>
- Neirotti, P., De Marco, A., Cagliano, A. C., Mangano, G., & Scorrano, F. (2014) Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts. *Cities*, 38, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010>
- Nuryanti, L. (2023) A Vehicle Routing Problem Optimization With Drone Using Tabu Search Algorithm and Analytical Hierarchy Process. *Majalah Ilmiah Pengkajian Industri*, 15(1). <https://doi.org/10.29122/mipi.v15i1.4732>

- Othman, M. S. bin, Shurbevski, A., Karuno, Y., & Nagamochi, H. (2017) Routing of Carrier-vehicle Systems with Dedicated Last-stretch Delivery Vehicle and Fixed Carrier Route. *Journal of Information Processing*, 25, 655-666. <https://doi.org/10.2197/ipsjip.25.655>
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J. F., Golden, B. L., & Pesch, E. (2018) Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(4). <https://doi.org/10.1002/net.21818>
- Pachayappan, M., & Sudhakar, V. (2021) A Solution to Drone Routing Problems using Docking Stations for Pickup and Delivery Services. *Transportation Research Record*, 2675(12), 1056-1074. <https://doi.org/10.1177/036119812111032219>
- Pan, Y., Yang, Y., & Li, W. (2021) A Deep Learning Trained by Genetic Algorithm to Improve the Efficiency of Path Planning for Data Collection With Multi-UAV. *IEEE Access*, 9, 7994-8005. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049892>
- Peinkofer, S. T., Schwieterman, M. A., & Miller, J. W. (2020) Last-Mile Delivery in the Motor-Carrier Industry: A Panel Data Investigation Using Discrete Time Event History Analysis. *Transportation Journal*, 59(2), 129-164. <https://doi.org/10.5325/transportationj.59.2.0129>
- Pellegrini, P., Marlière, G., & Rodriguez, J. (2014) Optimal train routing and scheduling for managing traffic perturbations in complex junctions. *Transportation Research Part B: Methodological*, 59, 58-80. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.10.013>
- Peng, C., & Isler, V. (2020) Visual Coverage Path Planning for Urban Environments. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 5(4), 5961-5968. IEEE Robotics and Automation Letters. <https://doi.org/10.1109/LRA.2020.3010745>
- Poikonen, S., & Campbell, J. F. (2020) Future directions in drone routing research. *Networks*, 77(1). <https://doi.org/10.1002/net.21982>
- Poikonen, S., Wang, X., & Golden, B. (2017) The vehicle routing problem with drones: Extended models and connections. *Networks*, 70(1), 34-43. <https://doi.org/10.1002/net.21746>

- Pretto, A., Aravecchia, S., Burgard, W., Chebrolu, N., Dornhege, C., Falck, T., Fleckenstein, F., Fontenla, A., Imperoli, M., Khanna, R., Liebisch, F., Lottes, P., Milioto, A., Nardi, D., Nardi, S., Pfeifer, J., Popović, M., Potena, C., Pradalier, C., ... Nieto, J. (2021) Building an Aerial–Ground Robotics System for Precision Farming: An Adaptable Solution. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 28(3), 29-49. IEEE Robotics & Automation Magazine. <https://doi.org/10.1109/MRA.2020.3012492>
- Rajendran, S., & Pagel, E. (2020) Recommendations for emerging air taxi network operations based on online review analysis of helicopter services. *Heliyon*, 6(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05581>
- Rajendran, S., & Srinivas, S. (2020) Air taxi service for urban mobility: A critical review of recent developments, future challenges, and opportunities. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 143, 102090. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102090>
- Rashidzadeh, E., Molana, S. M. H., Soltani, R., & Hafezalkotob, A. (2021) Assessing the sustainability of using drone technology for last-mile delivery in a blood supply chain. *Journal of Modelling in Management*, 16(4). <https://doi.org/10.1108/jm2-09-2020-0241>
- Redi, A. A. N. P., Sopha, B. M., Asih, A. M. S., & Liperda, R. I. (2021) Collaborative Hybrid Aerial and Ground Vehicle Routing for Post-Disaster Assessment. *Sustainability*, 13(22), Article 22. <https://doi.org/10.3390/su132212841>
- Riazi, A. (2019) Genetic algorithm and a double-chromosome implementation to the traveling salesman problem. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1397. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1469-1>
- Richards, A., Schouwenaars, Spacecraft Trajectory Planning with Avoidance Constraints Using Mixed-Integer Linear Programming. *Journal of*

- T., How, J. P., & Feron, E. (2002) *Guidance, Control, and Dynamics*, 25(4), 755-764. <https://doi.org/10.2514/2.4943>
- Russo, A., & Cirella, G. T. (2018) Modern Compact Cities: How Much Greenery Do We Need? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ijerph15102180>
- Sacramento, D., Pisinger, D., & Ropke, S. (2019) An adaptive large neighborhood search metaheuristic for the vehicle routing problem with drones. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 102, 289-315.
- Salucci, F., Trainelli, L., Bruglieri, M., Riboldi, C. E., Rolando, A. L., & García González, G. (2021) Capturing the Demand for an Electric-Powered Short-Haul Air Transportation Network. İçinde *AIAA Scitech 2021 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2021-0869>
- Satman, M. (2013) Machine Coded Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization Problems. *Gazi University Journal of Science*, 26(1), Article 1.
- Sawadsitang, S., Niyato, D., Tan, P. S., Wang, P., & Nutanong, S. (2019) Multi-Objective Optimization for Drone Delivery. *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/VTCFall.2019.8891117>
- Schouwenaars, T., De Moor, B., Feron, E., & How, J. (2001) Mixed integer programming for multi-vehicle path planning. *2001 European Control Conference (ECC)*, 2603-2608. <https://doi.org/10.23919/ECC.2001.7076321>
- Scott, J., & Scott, C. (2017) *Drone Delivery Models for Healthcare*. <http://hdl.handle.net/10125/41557>
- Shakhatreh, H., Sawalmeh, A., Al-Fuqaha, A., Dou, Z., Almaitta, E., Khalil, I., Othman, N., Khreishah, A., & Guizani, M. (2019) Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *IEEE Access*, 7, 48572-48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>

- Shen, Y., & Wei, C. (2022) Target tracking and enclosing via UAV/UGV cooperation using energy estimation pigeon-inspired optimization and switchable topology. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 95(5), 768-783. <https://doi.org/10.1108/AEAT-05-2022-0143>
- Singgih, I. K., Lee, J., & Kim, B.-I. (2020) Node and Edge Drone Surveillance Problem With Consideration of Required Observation Quality and Battery Replacement. *IEEE Access*, 8, 44125-44139. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976122>
- Singhal, C., & Barick, S. (2022) ECMS: Energy-Efficient Collaborative Multi-UAV Surveillance System for Inaccessible Regions. *IEEE Access*, 10, 95876-95891. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206375>
- Song, Y., Guo, C., Xu, P., Li, L., & Zhang, R. (2021) Research on routing and scheduling algorithms for the simultaneous transmission of diverse data streaming services on the industrial internet. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-97613-9>
- Sonmez, A., Kocyigit, E., & Kugu, E. (2015) Optimal path planning for UAVs using Genetic Algorithm. *2015 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 50-55. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2015.7152274>
- Sorbelli, F. B., Corò, F., Palazzetti, L., Pinotti, C. M., & Rigoni, G. (2023) How the Wind Can Be Leveraged for Saving Energy in a Truck-Drone Delivery System. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(4), 4038-4049. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. <https://doi.org/10.1109/TITS.2023.3234627>
- Soto, A. J., Rodhe, A., Pohjola, V., & Boelhouwers, J. (2015) Spatial distribution of disasters caused by natural hazards in the samala river catchment, guatemala. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(1), 181-196. <https://doi.org/10.1111/geoa.12097>
- Steinerberger, S. (2015) New Bounds for the Traveling Salesman Constant. *Advances in Applied Probability*, 47(1), 27-36. <https://doi.org/10.1239/aap/1427814579>
- Straubinger, A., Rothfeld, R., Shamiyeh, M., Büchter, K.-D., Kaiser, J., & An overview of current research and developments in urban air mobility – Setting the scene for UAM introduction. *Journal of Air Transport Management*, 87, 101852. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101852>

Plötner, K. O.
(2020)

Şahin, N. (2009) 1. AFET TANIMI VE AFET TÜRLEİ.

Takemura, R.,
Aoki, N., &
Ishigami, G.
(2023) Energy-and-perception-aware planning and navigation framework for unmanned aerial vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(4), 16878132231169688. <https://doi.org/10.1177/16878132231169688>

Tanyaş, B. (2013) AFET LOJİSTİK YÖNETİMİNDE RİZE İLİNE YÖNELİK YENİ MODEL ÖNERİSİ.

Ter Mors, A. W.,
Witteveen, C.,
Zutt, J., &
Kuipers, F. A.
(2010) Context-Aware Route Planning. İçinde J. Dix & C. Witteveen (Ed.), *Multiagent System Technologies* (ss. 138-149). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-16178-0_14

Thekdi, S., Tatar,
U., Santos, J., &
Chatterjee, S.
(2023) Disaster risk and artificial intelligence: A framework to characterize conceptual synergies and future opportunities. *Risk Analysis*, 43(8), 1641-1656. <https://doi.org/10.1111/risa.14038>

Thibbotuwawa,
A., Nielsen, P.,
Zbigniew, B., &
Bocewicz, G.
(2019) Energy Consumption in Unmanned Aerial Vehicles: A Review of Energy Consumption Models and Their Relation to the UAV Routing. *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2018* (ss. 173-184). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16

Tironi, M., &
Manríquez, T.
(2019) Lateral knowledge: Shifting expertise for disaster management in Chile. *Disasters*, 43(2), 372-389. <https://doi.org/10.1111/disa.12313>

Todosijević, R.,
Mjirda, A.,
Mladenović, M.,
Hanafi, S., &
Gendron, B.
(2017) A general variable neighborhood search variants for the travelling salesman problem with draft limits. *Optimization Letters*, 11(6), 1047-1056. <https://doi.org/10.1007/s11590-014-0788-9>

Tokekar, P.,
Hook, J. V.,
Mulla, D., & Isler,
V. (2016) Sensor Planning for a Symbiotic UAV and UGV System for Precision Agriculture. *IEEE Transactions on Robotics*, 32(6),

- 1498-1511. IEEE Transactions on Robotics. <https://doi.org/10.1109/TRO.2016.2603528>
- Tong, C. O., & Richardson, A. J. (1984) A computer model for finding the time-dependent minimum path in a transit system with fixed schedules. *Journal of Advanced Transportation*, 18(2), 145-161. <https://doi.org/10.1002/atr.5670180205>
- Torabbeigi, M., Lim, G. J., & Kim, S. J. (2020) Drone Delivery Scheduling Optimization Considering Payload-induced Battery Consumption Rates. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 97(3), 471-487. <https://doi.org/10.1007/s10846-019-01034-w>
- Tran, T.-H., & Nguyen, D.-D. (2022) Management and Regulation of Drone Operation in Urban Environment: A Case Study. *Social Sciences*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/socsci11100474>
- Uçar, Z., Akay, A. E., & Bilici, E. (2020) TOWARDS GREEN SMART CITIES: IMPORTANCE OF URBAN FORESTRY AND URBAN VEGETATION. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIV-4-W3-2020, 399-403. ISPRS TC IV, ISPRS WG IV/1
5th International Conference on Smart City Applications (Volume XLIV-4/W3-2020) - 7–8 October 2020, Virtual Safranbolu, Turkey (online). <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-4-W3-2020-399-2020>
- Uddin, F., Riaz, N., Manan, A., Mahmood, I., Song, O.-Y., Malik, A. J., & Abbasi, A. A. (2023) An Improvement to the 2-Opt Heuristic Algorithm for Approximation of Optimal TSP Tour. *Applied Sciences*, 13(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/app13127339>
- Wai, R.-J., & Prasetya, A. S. (2019) Adaptive Neural Network Control and Optimal Path Planning of UAV Surveillance System With Energy Consumption Prediction. *IEEE Access*, 7, 126137-126153. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938273>
- Wang, Y. (2019) Sufficient and Necessary Conditions for an Edge in the Optimal Hamiltonian Cycle Based on Frequency Quadrilaterals. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 181(2), 671-683. <https://doi.org/10.1007/s10957-018-01465-9>

- Wei, Y., Yuan, H., & Li, H. (2024) Exploring the Contribution of Advanced Systems in Smart City Development for the Regeneration of Urban Industrial Heritage. *Buildings*, 14(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/buildings14030583>
- Widowati, D. A. (2022) Disaster Mitigation in Coastal Areas: Perspective of the Indonesian Spatial Planning Law. *Jurnal Media Hukum*, 29(1), Article 1. <https://doi.org/10.18196/jmh.v29i1.14685>
- Wu, B., Lu, J., Zhou, B., & Song, Z. (2023) Exploring consumers' environmental ethical preferences in the context of unmanned aerial vehicle utilization for plant protection. *Scientific Reports*, 13(1), 3716. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30557-4>
- Wu, G., Zhao, K., Cheng, J., & Ma, M. (2022). A Coordinated Vehicle–Drone Arc Routing Approach Based on Improved Adaptive Large Neighborhood Search. *Sensors*, 22(10). <https://doi.org/10.3390/s22103702>
- Wu, Q., Zeng, Y., & Zhang, R. (2018) Joint Trajectory and Communication Design for Multi-UAV Enabled Wireless Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(3), 2109-2121. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. <https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2789293>
- Wu, R. (2023) Natural disasters, climate change, and structural transformation: A new perspective from international trade. *The World Economy*, 46(5), 1333-1377. <https://doi.org/10.1111/twec.13335>
- Yıldırım, U. (2021) Military Operations Research: Origins, Recent Past, and Present. *Türk Savaş Çalışmaları Dergisi*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.52792/tws.916617>
- Yoo, W., Yu, E., & Jung, J. (2018) Drone delivery: Factors affecting the public's attitude and intention to adopt. *Telematics and Informatics*, 35(6), 1687-1700. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.04.014>
- Zeng, F., Chen, Z., Clarke, J.-P., & Goldsman, D. (2022) *Nested Vehicle Routing Problem: Optimizing Drone-Truck Surveillance Operations* (arXiv:2103.01528). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.01528>

- Zeng, Y., Xu, X., & Zhang, R. (2018) Trajectory Design for Completion Time Minimization in UAV-Enabled Multicasting. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17(4), 2233-2246. IEEE Transactions on Wireless Communications. <https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2790401>
- Zeng, Z., Lian, L., Sammut, K., He, F., Tang, Y., & Lammas, A. (2015) A survey on path planning for persistent autonomy of autonomous underwater vehicles. *Ocean Engineering*, 110, 303-313. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.10.007>
- Zhai, L., & Lee, J. E. (2023) Analyzing the Disaster Preparedness Capability of Local Government Using AHP: Zhengzhou 7.20 Rainstorm Disaster. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijerph20020952>
- Zhang, J., Yu, Z., Mao, S., Periaswamy, S. C. G., Patton, J., & Xia, X. (2020) IADRL: Imitation Augmented Deep Reinforcement Learning Enabled UGV-UAV Coalition for Tasking in Complex Environments. *IEEE Access*, 8, 102335-102347. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997304>
- Zhang, S., & Li, L. (2023) The Multi-visits Drone-Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery Service. *Journal of the Operations Research Society of China*. <https://doi.org/10.1007/s40305-023-00471-7>
- Zhang, Y., Moyle, B., Dupré, K., Lohmann, G., Desha, C., & MacKenzie, I. (2023) Tourism and natural disaster management: A systematic narrative review. *Tourism Review*, 78(6), 1466-1483. <https://doi.org/10.1108/TR-08-2022-0377>
- Zhao, R., Zhong, S., & He, A. (2018) Disaster Impact, National Aid, and Economic Growth: Evidence from the 2008 Wenchuan Earthquake. *Sustainability*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/su10124409>
- Zudio, A., Coelho, I. M., & Ochi, L. S. (2021) Biased Random-key Genetic Algorithm for the Hybrid Vehicle-drone Routing Problem for Pick-up and Delivery. *Anais Do 15. Congresso Brasileiro de Inteligência Computacional*, 1-6. <https://doi.org/10.21528/CBIC2021-107>

ÖZGEÇMİŞ

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	İstanbul Üniversitesi	2024
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi	2020
Lisans	Gazi Üniversitesi	2016

Yabancı Dil

Yökdil, 85

Yayınlar

A. Güzey, M. H. Satman, “Collaborative Truck/Drone Routing Problem: An Application to Disaster Logistics”, JSAS, sy. 9, ss. 77–94, Haziran 2024, doi: 10.52693/jsas.1474515.

Güzey, A., AKINCI, M. M., ve ALTAN, Ş. (2020). Otonom Kara ve Hava Araçları ile Akıllı Tarım: Hasat Optimizasyonu Üzerine Bir Uygulama. *Ankara Hacı Bayram Veli Üniversitesi İktisadi Ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi* 207-220. <https://doi.org/10.26745/ahbvuidfd.706304>

Güzey, A., Akıncı, M.M., Mehmet Güzey, H. (2021). Artificial Intelligence and IoT-Based Technologies for Sustainable Farming and Smart Agriculture // Smart Agriculture with Autonomous Unmanned Ground and Air Vehicles: Approaches to Calculating Optimal Number of Stops in Harvest Optimization and A Suggestion. DOI: 10.4018/978-1-7998-1722-2.ch010

Güzey, A., Akıncı, M., Altan, S.,: Smart Agriculture with Autonomous Ground and Air Vehicles: An Application on Harvest Optimization. Journal of Ankara Hacı Bayram Veli University Faculty of Economics and Administrative Sciences. International Symposium on Econometrics, Operations Research and Statistics EY II 2020 Special Issue, p. 207–220 (2020), <https://doi.org/10.26745/ahbvuidfd.706304>

Güzey, A., Akıncı, M.M., Mehmet Güzey, H. (2022). Optimal Energy Consuming on Spraying an Agricultural Field by Using Multiple UAVs. Agriculture Digitalization and Organic Production. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 245. Springer, Singapore.

International Conference on Computer Science, Mechatronics and Information Technology - (ICCSMIT-23): The Hybrid UAV/UGV Routing Problem: An Application of Disaster Logistic in Urban Areas

20th International Symposium on Econometrics, Operations Research And Statistics 2020 (EYI):

Smart Agriculture with Autonomous Land and Air Vehicles: An Application on Harvest Optimization (2020).

International OECD Studies Conference on Engineering, Technology and Robotics: Smart Agriculture with Autonomous Land and Air Vehicles: Approaches to Calculating the Optimal Number of Stops in Harvest Optimization (2021).

HEZARFEN 2nd International Congress of Science, Mathematics and Engineering Sciences:

Smart Agriculture with Autonomous Unmanned Ground and Air Vehicles: Approaches to Calculating Optimal Number of Stops in Harvest Optimization and A Suggestion (2021).

The 4th International Conference on Natural Sciences and Technologies (ICONAT 2022): Optimal Energy Consuming on Spraying an Agricultural Field by Using Multiple UAVs (2022).