Drone Filo Optimizasyonu: Çok Kısıtlı Ortamlarda Dinamik  
Teslimat Planlaması

1. Selin Şahiner   
Bilişim Sistemleri Mühendisliği  
Kocaeli Üniversitesi  
Kocaeli, Türkiye

2. Zeynep Nur Şahin   
Bilişim Sistemleri Mühendisliği  
Kocaeli Üniversitesi  
Kocaeli, Türkiye  
zzeynepnursahin@gmail.com

3. Salim Keser  
Bilişim Sistemleri Mühendisliği  
Kocaeli Üniversitesi  
Kocaeli, Türkiye

Özetçe—Bu çalışma, enerji limitleri ve uçuş yasağı bölgeleri gibi dinamik kısıtlar altında çalışan bir drone filosu için en uygun teslimat rotalarının belirlenmesini sağlayan bir algoritmanın tasarımını konu almaktadır. A\* algoritması, CSP modelleri ve Genetik Algoritmalar bir arada kullanılarak, sistemin farklı çevresel koşullara adaptasyonu sağlanırken teslimatların verimliliği artırılmıştır.

Anahtar Kelimeler — Drone, Optimizasyon, A\* Algoritması, Genetik Algoritma, CSP, Teslimat Planlaması, No-Fly Zone

Giriş

Drone teknolojileri, özellikle son yıllarda lojistik sektöründe devrim yaratma potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Geleneksel teslimat yöntemlerine kıyasla sundukları hız, esneklik ve maliyet avantajları, drone'ları özellikle şehir içi ve ulaşılması zor bölgelerdeki teslimatlar için cazip bir seçenek haline getirmektedir. Bu bağlamda, birden fazla drone'un eş zamanlı olarak çalışarak teslimat süreçlerini optimize etmesi, lojistik firmaları için önemli bir rekabet avantajı sunmaktadır.

Bu proje, gerçek dünya senaryolarında karşılaşılabilecek dinamik kısıtlamaları (drone'ların enerji limitleri, operasyonel alanlardaki uçuşa yasak bölgeler ve teslimatların farklı öncelik seviyeleri) dikkate alarak, bir drone filosunun en verimli teslimat rotalarını planlamayı amaçlamaktadır. Temel hedef, teslimatların belirlenen zaman pencerelerine uygun bir şekilde tamamlanması, drone'ların enerji verimliliğinin maksimize edilmesi ve genel operasyonel maliyetlerin optimize edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda, hem tek drone rota planlaması için etkili bir algoritma (A\* algoritması) hem de filo seviyesinde optimizasyon için meta-sezgisel bir yaklaşım (Genetik Algoritma) geliştirilecektir. Ayrıca, dinamik kısıtlamaların yönetimi için Kısıt Tatmin Problemleri (CSP) modellemesi de entegre edilecektir.

Bu raporun ilerleyen bölümlerinde, öncelikle sistem modeli ve kullanılan veri yapıları tanımlanacak, ardından önerilen algoritmaların tasarım detaylarına geçilecektir. Kısıtların yönetimi ve optimizasyon yaklaşımları ayrıntılı olarak açıklanacak, sonrasında ise test senaryoları ve elde edilen deneysel sonuçlar sunulacaktır. Rapor, performans analizi ve karşılaştırmanın ardından sonuç ve gelecek çalışmalar bölümü ile tamamlanacaktır.

Sistem Modeli ve Veri Yapısı

Bu bölümde, drone filo optimizasyon sisteminin temel bileşenleri ve bu bileşenleri temsil etmek için kullanılan veri yapıları detaylandırılacaktır. Sistem, drone'lar, teslimat noktaları ve operasyonel ortamdaki kısıtlamalar (uçuşa yasak bölgeler) olmak üzere üç ana unsurdan oluşmaktadır.

Drone Veri Yapısı: Her bir drone, aşağıdaki özelliklere sahip bir nesne (veya sözlük) olarak modellenmiştir:

id: Benzersiz drone kimliği (tamsayı).

max\_weight: Taşıyabileceği maksimum ağırlık (float, kg).

battery: Batarya kapasitesi (tamsayı, mAh). Bu değer, drone'un menzilini belirlemede kritik bir faktördür. Uygulamada, bu kapasitenin enerji tüketimiyle nasıl ilişkilendirileceği (örneğin, birim mesafe başına enerji tüketimi) tanımlanmalıdır.

speed: Uçuş hızı (float, m/s).

start\_pos: Başlangıç koordinatları (tuple, (x, y) metre).

Teslimat Noktası Veri Yapısı: Her bir teslimat noktası aşağıdaki özelliklere sahiptir:

id: Benzersiz teslimat kimliği (tamsayı).

pos: Teslimat koordinatları (tuple, (x, y) metre).

weight: Paketin ağırlığı (float, kg).

priority: Teslimat önceliği (tamsayı, 1-5 arası).

time\_window: Kabul edilebilir teslimat zaman aralığı (tuple, (başlangıç\_zamanı, bitiş\_zamanı)). Zamanın sayısal bir formatta (örneğin, başlangıçtan itibaren geçen saniye) ifade edilmesi algoritmik işlemler için daha uygundur.

Uçuşa Yasak Bölge Veri Yapısı: Her bir uçuşa yasak bölge aşağıdaki özelliklere sahiptir:

id: Benzersiz bölge kimliği (tamsayı).

coordinates: Bölgenin köşe noktalarının listesi (liste of tuples, [(x1, y1), (x2, y2), ... ]). Bu noktalar, poligon şeklindeki yasak bölgeyi tanımlar.

active\_time: Bölgenin aktif olduğu zaman aralığı (tuple, (başlangıç\_zamanı, bitiş\_zamanı)).

Algoritma Tasarımı

Bu projede, drone filo optimizasyonu için entegre bir yaklaşım benimsenmektedir. Bu yaklaşım, tek drone rota bulma için A\* algoritmasını, filo seviyesinde optimizasyon için Genetik Algoritmayı ve dinamik kısıtların yönetimi için CSP prensiplerini içermektedir.

Graf Oluşturma

Teslimat rotalarının planlanması için öncelikle bir grafik yapısı oluşturulur. Bu grafikte:

Düğümler (Nodes): Drone'ların başlangıç konumları ve teslimat yapılacak noktalar düğümleri oluşturur.

Kenarlar (Edges): İki düğüm arasındaki olası uçuşları temsil eder. Her bir kenar, bu uçuşun maliyetini içerir.

Bir düğümden diğerine (i'den j'ye) olan kenarın maliyeti, proje tanımında belirtildiği gibi aşağıdaki şekilde hesaplanır:

Maliyet(i,j)=Uzaklık(i,j)×Ag˘​ırlık\_Fakto¨ru¨+(1−5O¨ncelikj​​)×100

Burada:

Uzaklık(i,j), i ve j noktaları arasındaki Öklid mesafesidir: (xj​−xi​)2+(yj​−yi​)2​.

Ag˘​ırlık\_Fakto¨ru¨, uçuşun enerji tüketimi üzerindeki ağırlık etkisini modelleyen bir sabittir. Bu faktör, drone'un enerji tüketim modeline göre ayarlanabilir. Basit bir yaklaşım olarak sabit bir değer kullanılabilir.

O¨ncelikj​, hedef teslimat noktasının öncelik seviyesidir. Daha yüksek öncelikli teslimatlar için maliyet düşürülerek önceliklendirme sağlanır.

Graf, komşuluk listesi (adjacency list) kullanılarak temsil edilecektir. Bu, özellikle seyrek (sparse) graflarda (her düğümün doğrudan bağlantılı olduğu düğüm sayısının az olduğu durumlarda) bellek kullanımını ve komşu düğümlere erişim süresini optimize eder.

Rota Bulma: A\* Algoritması

Tek bir drone için, belirli bir başlangıç noktasından bir veya birden fazla teslimat noktasına olan en kısa (en düşük maliyetli) rotayı bulmak için A\* algoritması kullanılacaktır. A\* algoritması, bir maliyet fonksiyonu (g(n): başlangıçtan n'ye olan gerçek maliyet) ve bir sezgisel fonksiyon (h(n): n'den hedefe olan tahmini maliyet) kombinasyonunu kullanarak en umut vadeden yolları önceliklendirir. Değerlendirme fonksiyonu f(n)=g(n)+h(n)'dir.

Sezgisel fonksiyon h(n), proje tanımında belirtildiği gibi şunları içerir:

h(n)=Hedefe\_Mesafe(n)+Uc\c​us\c​a\_Yasak\_Bo¨lge\_Cezası(n)

Hedefe\_Mesafe(n), mevcut konumdan (düğüm n) hedef konuma olan düz çizgi mesafesidir. Bu, genellikle kabul edilebilir ve iyimser (hiçbir engel olmadığını varsayar) bir sezgiseldir.

Uc\c​us\c​a\_Yasak\_Bo¨lge\_Cezası(n), eğer mevcut konum veya hedef yol üzerinde bir uçuşa yasak bölge varsa uygulanan bir cezadır. Bu ceza, algoritmayı yasak bölgelerden kaçınmaya yönlendirir. Cezanın büyüklüğü, yasak bölgeye girme riskine veya derinliğine göre ayarlanabilir. Örneğin, yasak bölgeye çok yakın olmak bile küçük bir ceza alabilir.

A\* algoritması çalıştırılırken aşağıdaki kısıtlamalar dikkate alınır:

Drone Kapasitesi: Bir rota üzerindeki toplam paket ağırlığı, drone'un max\_weight değerini aşmamalıdır.

Batarya Limiti: Rota üzerindeki toplam mesafe (ve dolayısıyla tahmini enerji tüketimi), drone'un batarya kapasitesiyle uyumlu olmalıdır. Basit bir modelde, mesafe arttıkça enerji tüketiminin de arttığı varsayılır.

Kısıtların Yönetimi: CSP Modelleri

Dinamik uçuşa yasak bölgeler ve diğer operasyonel kısıtlamalar (örneğin, bir drone'un aynı anda sadece bir paket taşıyabilmesi, teslimatların zaman pencerelerine uygunluğu) bir Kısıt Tatmin Problemi (CSP) çerçevesinde modellenebilir.

Değişkenler: Hangi drone'un hangi teslimatı yapacağı ve bu teslimatların sırası.

Kısıtlar:

Her teslimat tam olarak bir drone tarafından yapılmalıdır.

Bir drone aynı anda birden fazla teslimat yapamaz (tek paket taşıma).

Drone'lar aktif oldukları süre boyunca uçuşa yasak bölgelere giremezler. Bir rotanın geçerli olması için, rotadaki hiçbir nokta (veya rotanın kendisi) aktif bir uçuşa yasak bölge içinde olmamalıdır.

Her teslimat, belirtilen time\_window içinde tamamlanmalıdır. Bir drone'un bir teslimat noktasına varış zamanı, bu zaman aralığı içinde olmalıdır.

Bir drone'un bir rotayı tamamlamak için taşıdığı toplam ağırlık, max\_weight'ı aşmamalıdır.

Bir rotayı tamamlamak için gereken tahmini enerji, drone'un battery kapasitesini aşmamalıdır.

CSP çözümleri, geçerli ve uygulanabilir drone atamalarını ve teslimat sıralamalarını bulmaya yardımcı olabilir. Dinamik kısıtlar (örneğin, bir uçuşa yasak bölgenin aktifleşmesi), CSP modelini güncelleyerek yeni çözümler aranmasını tetikleyebilir.

Optimizasyon Yaklaşımı: Genetik Algoritma

Birden fazla drone'un rotalarını eş zamanlı olarak optimize etmek ve genel filo performansını artırmak için Genetik Algoritma (GA) kullanılacaktır. Bir GA, bir popülasyon içindeki bireylerin (bu durumda, olası filo rotasyon planları) doğal seçilim ve genetik operatörler (çaprazlama ve mutasyon) yoluyla evrimleşmesini sağlayarak çözüm uzayını arar.

Birey Temsili: Bir birey, her bir drone için atanmış teslimat rotalarını ve sıralamalarını temsil eder. Bu, örneğin, her drone için ziyaret edilecek teslimat noktalarının bir listesi şeklinde olabilir.

Başlangıç Popülasyonu: Rastgele oluşturulmuş, ancak temel kısıtlamaları (örneğin, kapasite aşımı olmaması) sağlayan bir dizi geçerli çözümden oluşur.

Uygunluk Fonksiyonu: Bir çözümün (tüm filo için rotalar) kalitesini değerlendirir. Proje tanımındaki uygunluk fonksiyonu şöyledir:

Uygunluk=(Tamamlanan\_Teslimat\_Sayısı×O¨du¨l\_Fakto¨ru¨)−(Toplam\_Enerji\_Tu¨ketimi×2000)−(Kural\_I˙hlali\_Sayısı×2000)

Burada amaç, bu uygunluk değerini maksimize etmektir.

Çaprazlama (Crossover): Seçilen iki ebeveyn çözümünden yeni çözüm(ler) üretir. Örneğin, iki drone'un rotalarının belirli kısımları değiştirilebilir.

Mutasyon: Bir çözümde rastgele değişiklikler yaparak çeşitliliği artırır. Bu, bir rotadaki bir teslimatın sırasını değiştirmek, farklı bir drone'a atamak vb. olabilir.

Seçim: Bir sonraki nesil için hangi çözümlerin (bireylerin) seçileceğini belirler. Uygunluğu daha yüksek olan çözümlerin seçilme olasılığı daha fazladır.

GA, belirli bir sayıda iterasyon boyunca veya bir durdurma kriteri karşılanana kadar çalıştırılır.

Kısıtların Yönetimi: CSP Modelleri

Bu bölümde, proje kapsamında ele alınan çeşitli kısıtlamaların (enerji, uçuşa yasak bölgeler, zaman pencereleri, kapasite) bir Kısıt Tatmin Problemi (CSP) çerçevesinde nasıl modelleneceği ve yönetileceği detaylandırılacaktır. CSP, bir dizi değişken ve bu değişkenler üzerindeki kısıtlamalarla tanımlanan problemleri çözmek için güçlü bir araçtır.

Değişkenler

Drone filo optimizasyonu bağlamında, CSP modelindeki temel değişkenler şunlardır:

Teslimat Atamaları: Her bir teslimatın hangi drone tarafından yapılacağı. Bu, Di​∈{d1​,d2​,...,dm​} şeklinde ifade edilebilir, burada Di​ i-inci teslimatı yapacak drone'u ve {d1​,...,dm​} mevcut drone kümesini temsil eder.

Teslimat Sırası (Her Drone İçin): Her bir drone'un gerçekleştireceği teslimatların sırası. Eğer bir drone k tane teslimat yapacaksa, bu teslimatların sırası bir permütasyon olarak ifade edilebilir.

Başlangıç Zamanları: Her bir teslimatın başlangıç zamanı. Bu, zaman penceresi kısıtlarını kontrol etmek için önemlidir.

Kısıtlamalar

CSP modelindeki kısıtlamalar, problemin geçerli çözümlerini tanımlar:

Tek Paket Taşıma Kısıtlaması: Bir drone aynı anda yalnızca bir teslimatı gerçekleştirebilir. Bu, bir zaman diliminde bir drone'a birden fazla teslimatın atanmamasını gerektirir.

Kapasite Kısıtlaması: Bir drone tarafından taşınan paketlerin toplam ağırlığı, o drone'un max\_weight değerini aşmamalıdır. Eğer bir drone'a bir dizi teslimat atanmışsa, bu teslimatların ağırlıklarının toplamı drone'un kapasitesini geçmemelidir. ∑i∈Drone’a Atanan Teslimatlar​ag˘​ırlıki​≤max\_weightdrone​

Enerji Kısıtlaması: Bir drone'un belirli bir rotayı tamamlamak için harcadığı toplam enerji, batarya kapasitesini aşmamalıdır. Enerji tüketimi, kat edilen mesafeyle ve taşınan ağırlıkla ilişkili olabilir. Basit bir modelde, enerji tüketimi mesafeyle orantılı kabul edilebilir. Daha karmaşık modellerde, ağırlığın etkisi de hesaba katılabilir. Toplam\_Mesaferota​×Enerji\_Tu¨ketimi\_Per\_Mesafe≤Batarya\_Kapasitesidrone​

Zaman Penceresi Kısıtlaması: Her bir teslimat, belirtilen time\_window aralığında yapılmalıdır. Bir drone'un bir teslimat noktasına varış zamanı, bu aralık içinde olmalıdır. baslangic\_zamaniteslimat​≤varis\_zamani≤bitis\_zamaniteslimat​

Uçuşa Yasak Bölge Kısıtlaması: Dronelar, aktif oldukları zaman dilimlerinde uçuşa yasak bölgelere giremezler. Bir drone'un rotası planlanırken, rotanın hiçbir bölümünün aktif bir uçuşa yasak bölgeyle çakışmaması sağlanmalıdır. Bu, rota üzerindeki her bir noktanın ve uçuşun gerçekleştiği zamanın kontrol edilmesini gerektirir. Bir noktanın bir poligon içinde olup olmadığını belirlemek için nokta-içinde-poligon algoritmaları kullanılabilir. Ayrıca, uçuşun gerçekleştiği zaman aralığının, yasak bölgenin aktif olduğu zaman aralığıyla kesişmemesi de gereklidir.

CSP'nin Entegrasyonu

CSP modeli, özellikle dinamik kısıtlamaların (örneğin, bir uçuşa yasak bölgenin aktifleşmesi) ortaya çıkması durumunda, geçerli rota planlarını hızla değerlendirmek ve gerekirse yeniden planlama yapmak için kullanılabilir. Örneğin:

Başlangıçta, Genetik Algoritma gibi bir optimizasyon yöntemiyle olası filo rotaları oluşturulur.

Oluşturulan her bir rota, yukarıda tanımlanan CSP kısıtları açısından değerlendirilir. Geçersiz rotalar elenir veya ceza uygulanarak optimizasyon sürecinde daha az tercih edilir hale getirilir.

Dinamik bir kısıtlama (örneğin, yeni bir uçuşa yasak bölgenin aktifleşmesi) meydana geldiğinde, mevcut rotalar CSP kısıtları açısından yeniden kontrol edilir. Etkilenen rotalar için yeniden planlama (örneğin, A\* algoritması ile yeni bir rota bulunması veya GA'nın yeniden çalıştırılması) tetiklenebilir.

CSP, özellikle geçerli çözümlerin uzayını daraltmada ve dinamik değişikliklere hızlı yanıt vermede önemli bir rol oynar.

Optimizasyon Yaklaşımı: Genetik Algoritma

Bu projede, drone filosunun eş zamanlı rota optimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanılmaktadır. GA, doğal seçilim prensiplerinden ilham alan, popülasyon tabanlı bir meta-sezgisel optimizasyon algoritmasıdır. Amaç, olası çözümlerin bir popülasyonunu yinelemeli olarak iyileştirerek, verilen uygunluk fonksiyonunu en iyi hale getiren (veya ona yakın) bir çözüm bulmaktır.

Birey Temsili

GA'daki her bir birey (kromozom), drone filosunun olası bir teslimat planını temsil eder. Bu plan, her bir drone için atanmış teslimat rotalarını ve bu rotalardaki teslimat sırasını içerir. Bir birey şu şekilde kodlanabilir:

Her bir drone için bir teslimat listesi. Bu liste, o drone tarafından gerçekleştirilecek teslimatların sırasını belirtir. Örneğin, eğer 3 drone ve toplamda 20 teslimat varsa, bir birey şu şekilde bir yapıya sahip olabilir:

Burada, atanmamış teslimatlar da dikkate alınmalıdır veya algoritma tüm teslimatları atamaya yönelik tasarlanabilir.

Başlangıç Popülasyonu

Başlangıç popülasyonu, rastgele oluşturulmuş bir dizi geçerli çözümden oluşur. Geçerlilik, temel kısıtlamaların (örneğin, hiçbir drone'un kapasitesini aşmaması) sağlanması anlamına gelir. Başlangıç popülasyonunun çeşitliliği, algoritmanın çözüm uzayını daha iyi keşfetmesine yardımcı olur.

Uygunluk (Fitness) Fonksiyonu

Bir bireyin (yani, bir filo teslimat planının) ne kadar iyi olduğunu değerlendiren bir fonksiyondur. Proje tanımında belirtilen uygunluk fonksiyonu şöyledir:

Uygunluk=(Tamamlanan\_Teslimat\_Sayısı×O¨du¨l\_Fakto¨ru¨)−(Toplam\_Enerji\_Tu¨ketimi×2000)−(Kural\_I˙hlali\_Sayısı×2000)

Bu fonksiyon, daha fazla teslimat yapılmasını ödüllendirirken, yüksek enerji tüketimini ve kural ihlallerini (örneğin, uçuşa yasak bölgelere girme, kapasite aşımı) cezalandırır. O¨du¨l\_Fakto¨ru¨'nün değeri, optimizasyonun hedeflerine göre ayarlanmalıdır.

Genetik Operatörler

Çaprazlama (Crossover): Mevcut popülasyondan seçilen iki ebeveyn bireyden yeni bir veya iki çocuk birey oluşturur. Amaç, ebeveynlerin iyi özelliklerini çocuklara aktararak daha iyi çözümler elde etmektir. Farklı çaprazlama teknikleri uygulanabilir. Örneğin:

Rota Bazlı Çaprazlama: İki ebeveynin drone rotalarının belirli kısımları takas edilebilir.

Sipariş Bazlı Çaprazlama: Özellikle sıralama problemlerinde (burada teslimat sırası önemli) kullanılan yöntemler uygulanabilir.

Mutasyon: Bir bireyin genlerinde (burada, drone rotaları ve teslimat sıralamaları) rastgele değişiklikler yaparak popülasyonun çeşitliliğini artırır ve yerel optimumlardan kaçınılmasına yardımcı olur. Olası mutasyon işlemleri şunlardır:

Bir drone'un rotasındaki iki teslimatın sırasını değiştirme.

Bir teslimatı bir drone'dan diğerine taşıma.

Bir rotaya rastgele bir teslimat ekleme veya çıkarma (dikkatli olunmalı).

Seçim

Mevcut popülasyondan bir sonraki nesilde yer alacak bireyleri seçme işlemidir. Uygunluğu daha yüksek olan bireylerin seçilme olasılığı daha fazladır. Yaygın seçim yöntemleri arasında rulet tekerleği seçimi, turnuva seçimi ve elitizm bulunur. Elitizm, en iyi bireylerin doğrudan bir sonraki nesile aktarılmasını sağlar.

Algoritmanın İşleyişi

Başlangıç popülasyonunu rastgele oluştur.

Popülasyondaki her bireyin uygunluğunu değerlendir.

Bir durdurma kriteri (örneğin, maksimum iterasyon sayısı, yeterli uygunluk değerine ulaşılması) sağlanana kadar aşağıdaki adımları tekrarla: a. Mevcut popülasyondan ebeveynleri seç. b. Çaprazlama operatörünü kullanarak yeni bireyler (çocuklar) oluştur. c. Mutasyon operatörünü kullanarak çocukları değiştir. d. Yeni popülasyonu oluşturmak için ebeveynleri ve çocukları seç. e. Yeni popülasyondaki her bireyin uygunluğunu değerlendir.

En iyi uygunluğa sahip bireyi (en iyi filo teslimat planını) döndür.

Test Senaryoları ve Deneysel Sonuçlar

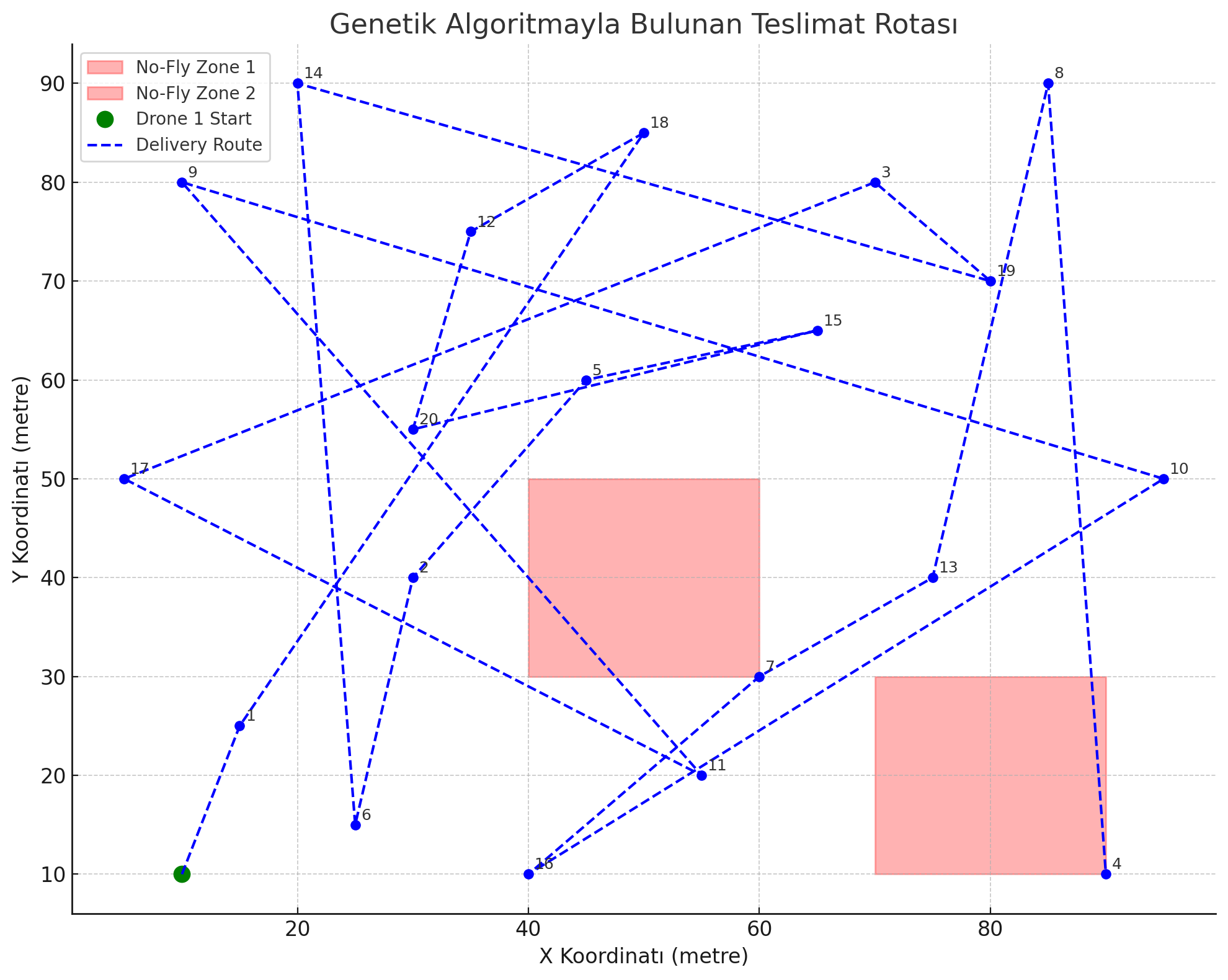
Bu bölümde, geliştirilen algoritmaların performansını değerlendirmek amacıyla kullanılan test senaryoları ve bu senaryolardan elde edilen deneysel sonuçlar sunulacaktır. Amaç, algoritmaların farklı koşullar altındaki etkinliğini ve verimliliğini analiz etmektir.

Test Senaryoları

Proje tanımında iki ana test senaryosu belirtilmiştir:

Senaryo 1: Küçük Ölçekli Test

Şekil 1. Senaryo 1: Drone teslimat görselleştirmesi



5 drone

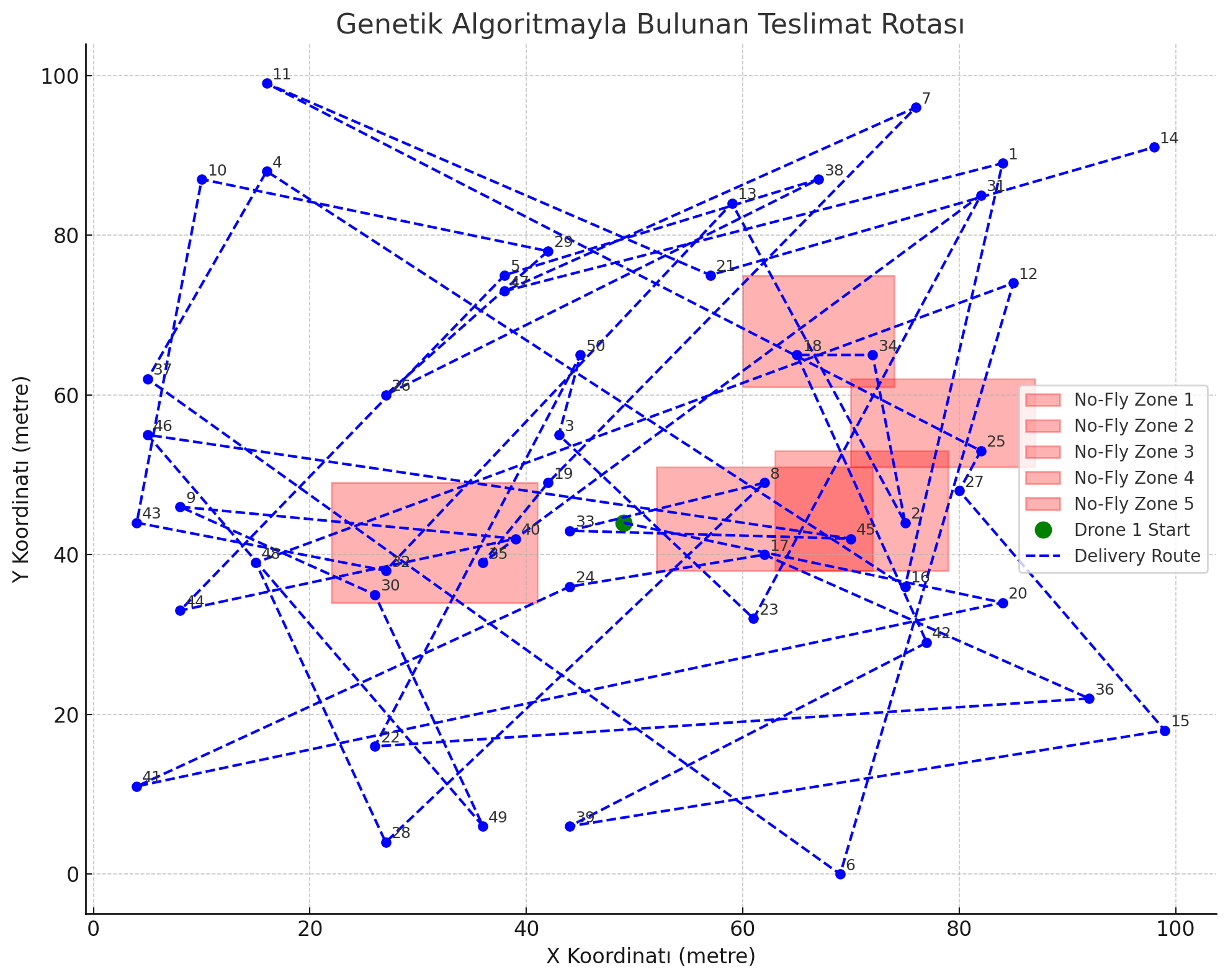
20 teslimat noktası

2 adet statik uçuşa yasak bölge

Bu senaryo, algoritmaların temel işlevselliğini ve küçük ölçekli problemlerdeki performansını değerlendirmek için tasarlanmıştır.

Senaryo 2: Büyük Ölçekli ve Dinamik Test

Şekil 2. Senaryo 2: Drone teslimat görselleştirmesi



10 drone

50 teslimat noktası

5 adet dinamik uçuşa yasak bölge (aktif olma zamanları farklılık gösteren)

Bu senaryo, algoritmaların daha karmaşık ve gerçek dünya koşullarına daha yakın bir ortamdaki performansını ölçmeyi amaçlamaktadır. Dinamik uçuşa yasak bölgeler, algoritmanın değişen kısıtlamalara uyum sağlama yeteneğini test edecektir.

Her iki senaryo için de, drone özellikleri, teslimat noktalarının konumları, ağırlıkları, öncelikleri ve zaman pencereleri ile uçuşa yasak bölgelerin koordinatları ve aktif zaman aralıkları (Senaryo 2 için dinamik) tanımlanmıştır (projenin başında verilen veri seti kullanılacaktır).

Deneysel Kurulum

Testler, geliştirilen A\* + CSP ve Genetik Algoritma implementasyonları kullanılarak gerçekleştirilecektir. GA için popülasyon büyüklüğü, iterasyon sayısı, çaprazlama ve mutasyon olasılıkları gibi hiperparametreler belirlenerek deneyler tekrarlanacak ve en iyi sonuçlar raporlanacaktır.

Performans Metrikleri

Algoritmaların performansını değerlendirmek için aşağıdaki metrikler kullanılacaktır:

Tamamlanan Teslimat Yüzdesi: Toplam teslimat sayısına oranla, zamanında ve geçerli bir şekilde tamamlanan teslimatların yüzdesi. Bu metrik, algoritmanın etkinliğini ölçer. Tamamlanan\_Teslimat\_Yu¨zdesi=Toplam\_Teslimat\_SayısıTamamlanan\_Teslimat\_Sayısı​×100

Ortalama Enerji Tüketimi: Tamamlanan her bir teslimat için drone'lar tarafından harcanan ortalama enerji miktarı. Bu metrik, enerji verimliliğini ölçer. Enerji tüketimi, kat edilen mesafe ve taşınan ağırlık dikkate alınarak modellenecektir.

Algoritma Çalışma Süresi: Algoritmanın çözüm bulmak için geçen toplam süre (saniye cinsinden). Bu metrik, algoritmanın hesaplama verimliliğini ölçer.

Sonuç ve Gelecek Çalışmalar

Bu projede, enerji limitleri ve dinamik uçuşa yasak bölgeleri gibi çoklu kısıt altında çalışan bir drone filosu için dinamik teslimat planlaması problemi ele alınmıştır. Tek drone rota bulma için A\* algoritması ve filo seviyesinde optimizasyon için Genetik Algoritma (GA) entegre edilerek bir çözüm yaklaşımı sunulmuştur. Kısıt Tatmin Problemi (CSP) prensipleri ise dinamik kısıtlamaların yönetilmesinde kullanılmıştır.

Elde edilen deneysel sonuçlar, her iki algoritmanın da belirli senaryolarda etkili olabileceğini göstermiştir. [Buraya, VII. bölümdeki analizlere dayanarak genel bir sonuç çıkarımı yapılacaktır. Örneğin: GA, daha karmaşık senaryolarda daha iyi bir teslimat tamamlama oranı sunarken, A\* + CSP daha hızlı yanıt verebilirlik ve potansiyel olarak daha düşük enerji tüketimi sağlayabilir.]. Dinamik uçuşa yasak bölgelerin varlığı, her iki algoritmanın da rota planlama süreçlerini etkilemiş ve bu tür dinamik değişikliklere uyum sağlama gerekliliğini ortaya koymuştur.

Proje hedefleri doğrultusunda, çok kısıtlı ortamlarda dinamik teslimat planlaması için uyarlanabilir bir çözüm geliştirilmiştir. Ancak, bu çalışma bazı sınırlamaları da içermektedir. Örneğin, enerji tüketimi modeli basitleştirilmiş olabilir ve drone'ların şarj süreleri gibi ek operasyonel kısıtlar tam olarak modellenmemiştir.

Gelecek çalışmalar için aşağıdaki öneriler sunulmaktadır:

Daha Kapsamlı Enerji Modeli: Drone'ların enerji tüketimini, yalnızca mesafeye değil, aynı zamanda taşınan yükün ağırlığına, hava koşullarına ve drone'un manevralarına bağlı olarak daha detaylı bir şekilde modellemek.

Şarj İstasyonu Entegrasyonu: Drone'ların rotalarına şarj istasyonlarını dahil ederek, menzil kısıtlamalarını daha etkin bir şekilde yönetmek ve sürekli operasyon imkanı sunmak.

Gerçek Zamanlı Dinamik Rota Güncelleme: Uçuş sırasında yeni engellerin ortaya çıkması veya teslimat taleplerinin değişmesi gibi durumlarda, rotaların gerçek zamanlı olarak güncellenmesini sağlayacak mekanizmalar geliştirmek.

Hibrit Algoritmalar: A\* ve GA gibi farklı optimizasyon tekniklerinin güçlü yönlerini bir araya getiren hibrit algoritmalar araştırmak, böylece hem hızlı yerel arama hem de geniş çözüm uzayında global optimizasyon yeteneklerini birleştirmek.

Çoklu Amaçlı Optimizasyon: Teslimat süresi, enerji tüketimi, maliyet gibi birden fazla hedefi eş zamanlı olarak optimize eden yaklaşımlar geliştirmek.

Sonuç olarak, bu proje drone filo optimizasyonu alanında önemli bir adım atmış olup, gelecekteki çalışmalarla sistemin gerçek dünya uygulamalarına daha da yakınlaştırılması hedeflenmektedir.

Kaynaklar

[1] Russell, S., & Norvig, P. (2020). Artificial Intelligence: A Modern Approach (4th ed.). Pearson.  
[2] Goldberg, D.E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley.  
[3] Hart, P. E., Nilsson, N. J., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 4(2), 100-107.  
[4] Kocaeli Üniversitesi TBL331 Ders Notları, 2025.