Drone Filo Optimizasyonu: Çok Kısıtlı Ortamlarda Dinamik Teslimat Planlaması

| 1. Ceyda Özmen  *Bilişim Sistemleri Mühendisliği* Kocaeli *Üniversitesi* Kocaeli, Türkiye 221307058@kocaeli.edu.tr | 2. Necibe Güner *Bilişim Sistemleri Mühendisliği* Kocaeli *Üniversitesi* Kocaeli, Türkiye 221307049@kocaeli.edu.tr | 3. Tuğçe Gül  *Bilişim Sistemleri Mühendisliği* Kocaeli *Üniversitesi* Kocaeli, Türkiye 221307036@kocaeli.edu.tr | 4. Zeynep Aydın *Bilişim Sistemleri Mühendisliği* Kocaeli *Üniversitesi* Kocaeli, Türkiye 221307053@kocaeli.edu.tr |
| --- | --- | --- | --- |

***Özet*—Bu proje, enerji limitleri ve uçuş yasağı bölgeleri gibi dinamik kısıtlar altında çalışan drone'lar için en uygun teslimat rotalarının belirlenmesini sağlayan bir algoritma tasarlamayı hedeflemektedir. Proje kapsamında, teslimat noktaları, drone özellikleri ve operasyonel kısıtlar esnek bir yapıda tanımlanmakta ve gerektiğinde rastgele olarak A\*, Genetic Algorithm (GA) ve Kısıtlama Tatmin Problemi (CSP) ile üretilebilmektedir. Bu sayede, gerçek zamanlı koşullarda drone filo yönetimi için yenilikçi ve uyarlanabilir bir çözüm geliştirilmesi amaçlanmaktadır.**

***Anahtar Kelimeler — dinamik kısıt, teslimat rotası, A\*, Genetic Algorithm (GA), Kısıtlama Tatmin Problemi (CSP), drone filo yönetimi***

***Abstract*—This project aims to design an algorithm for determining optimal delivery routes for drones operating under dynamic constraints such as energy limits and no-fly zones. Within the scope of this project, delivery points, drone characteristics, and operational constraints are defined in a flexible structure and can be randomly generated using A\*, Genetic Algorithm (GA) and Constraint Satisfaction Problem (CSP) when needed. Thus, the goal is to develop an innovative and adaptable solution for real-time drone fleet management.**

***Keywords — dynamic constraint, delivery route, A\*, Genetic Algorithm (GA), Constraint Satisfaction Problem (CSP), drone fleet management***

# GİRİŞ

Bu proje, Kocaeli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Bilişim Sistemleri Mühendisliği Bölümü'nün TBL 331: Yazılım Geliştirme Laboratuvarı II dersi kapsamında hazırlanan "Drone Filo Optimizasyonu: Çok Kısıtlı Ortamlarda Dinamik Teslimat Planlaması" başlıklı projeyi sunmaktadır. Projenin temel amacı, enerji limitleri ve uçuş yasağı bölgeleri (no-fly zone) gibi dinamik kısıtlar altında çalışan drone'lar için en uygun teslimat rotalarının belirlenmesini sağlayacak bir algoritma tasarlamaktır.

Günümüzde teslimat hizmetleri sunan lojistik firmaları, paketleri kısa sürede ve verimli bir şekilde ulaştırma konusunda çeşitli zorluklarla karşılaşmaktadır. Proje kısıtlarında da bahsedilen bu zorluklar arasında farklı ağırlık ve öncelik seviyelerine sahip paketlerin yönetimi, enerji kısıtları, uçuş yasağı bölgeleri ve diğer dinamik çevresel değişkenler önemli yer tutmaktadır. Bu proje, söz konusu firmaların rota planlamasını en uygun şekilde gerçekleştirebileceği ve değişen koşullara hızla uyum sağlayabileceği yenilikçi ve uyarlanabilir bir çözüm geliştirmeyi hedeflemektedir.

Proje kapsamında, teslimat noktaları, drone özellikleri ve operasyonel kısıtlar projeye özgü olarak tanımlanabilmekte ve gerektiğinde rastgele olarak üretilebilecek esnek bir yapı sunulmaktadır. Bu sayede, geliştirilen algoritma gerçek zamanlı senaryolara kolayca adapte olabilmektedir. Algoritma tasarımında, teslimat noktalarını düğüm ve drone hareketlerini kenar olarak modelleyerek bir “graf” yapısı oluşturulmaktadır. Maliyet fonksiyonu, uzaklık ve taşıma ağırlığına dayalı maliyete, teslimat önceliğine göre ağırlıklı bir ceza eklenerek belirlenmektedir. Rota bulma sürecinde A∗ algoritması kullanılmış olup, bu algoritmanın tahmin fonksiyonu (heuristic) hedefe olan mesafe ile uçuş yasağı bölgelerine girme durumunda uygulanacak cezayı içermektedir. Ayrıca, drone kapasitesini aşan rotalar elenmektedir. Dinamik kısıtlar için Kısıtlama Tatmin Problemi (CSP) yaklaşımı benimsenmektedir. Değişkenler, dronelar ve teslimatlar olarak tanımlanmakta; kısıtlar ise bir drone'un aynı anda tek bir paket taşıması ve uçuşa yasak bölgeleri ihlal etmemesi olarak belirlenmektedir. Optimizasyon aşamasında ise Genetik Algoritma (GA) kullanılarak başlangıç popülasyonu rastgele oluşturulmuş geçerli rotalardan meydana gelmektedir. Çaprazlama (Crossover) ile iki rotadan yeni rotalar üretilirken mutasyon ile rastgele bir teslimat noktası değiştirilmektedir. Uygunluk fonksiyonu (Fitness), yüksek teslimat sayısını ödüllendirirken yüksek enerji tüketimini ve kural ihlallerini cezalandırmaktadır.

Projenin test ve performans analizini ölçebilmek adına iki ana senaryo üzerinden kıyaslanmaktadır. İlk senaryo 5 drone, 20 teslimat noktası ve 2 adet no-fly zone içermektedir. İkinci senaryo ise 10 drone, 50 teslimat noktası ve 5 adet dinamik no-fly zone içermektedir. Özellikle, 50 teslimat noktalı dinamik senaryo, algoritmanın karmaşık ve değişen koşullara uyum yeteneğini ve verimliliğini göstermesi açısından kritik önem taşımaktadır. Performans analizi tamamlanan teslimat yüzdesi, ortalama enerji tüketimi ve algoritma çalışma süresi gibi metrikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir. Projenin çıktıları arasında A\*, CSP ve GA implementasyonlarını içeren kodlar ile rastgele drone, teslimat ve no-fly zone oluşturabilen bir veri üreteci bulunmaktadır. Geliştirilen teslimat rotalarının görselleştirilmesi için Matplotlib kütüphanesi kullanılarak bir harita oluşturulmaktadır. Bu görsel çıktı, drone'ların başlangıç konumları, teslimat noktaları, no-fly zone bölgeleri ve belirlenen rotaları net bir şekilde göstermektedir.

# TESLİMAT SİSTEMLERİ

Günümüz lojistik sektöründe, teslimat hizmetlerinin verimliliği ve hızı, müşteri memnuniyeti ve operasyonel başarı için kritik öneme sahiptir. Geleneksel teslimat yöntemlerinin yanı sıra insansız hava araçları (İHA) veya bilinen adıyla drone'lar, özellikle e-ticaret ve kargo taşımacılığı alanında yenilikçi çözümler sunmaktadır. Drone tabanlı teslimat sistemleri, paketlerin kısa sürede, düşük maliyetle ve zorlu coğrafi koşullara sahip bölgelere ulaştırılmasında önemli potansiyel barındırmaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkin bir şekilde çalışabilmesi için enerji kısıtları, uçuş yasağı bölgeleri ve değişen çevresel faktörler gibi dinamik kısıtların titizlikle ele alınması gerekmektedir. Bir drone teslimat sisteminin temel bileşenleri şunlardır:

1. **Drone Özellikleri:** Her drone'un kendine özgü bir kimlik numarası (id), taşıyabileceği maksimum ağırlık (max\_weight), batarya kapasitesi (battery) ve hızı (speed) gibi özellikleri bulunmaktadır. Ayrıca, her drone'un bir başlangıç koordinatı (start\_pos) mevcuttur. Bu özellikler, drone'ların hangi paketleri taşıyabileceğini ve ne kadar süre havada kalabileceğini belirlemede temel rol oynar.
2. **Teslimat Noktaları:** Teslimatın yapılacağı her noktanın benzersiz bir kimlik numarası (id), konum koordinatları (pos), paketin ağırlığı (weight) ve teslimatın öncelik seviyesi (priority) bulunmaktadır. Öncelik seviyesi teslimatın aciliyetini belirtir ve rota planlamasında önemli bir parametredir. Ayrıca, teslimatların kabul edilebilir bir zaman aralığı (time window) içinde tamamlanması gerekmektedir.
3. **No-Fly Zone'lar (Uçuşa Yasak Bölgeler):** Drone operasyonlarını kısıtlayan en önemli faktörlerden biri uçuşa yasak bölgelerdir. Bu bölgeler, benzersiz bir kimlik numarası (id), köşe noktalarıyla tanımlanan koordinatlar listesi (coordinates) ve aktif olduğu zaman aralığı (active\_time) ile belirlenir. Dinamik no-fly zone'lar, projenin karmaşıklığını ve gerçek dünya senaryolarına uygunluğunu artıran önemli bir unsurdur.

Bu bileşenler göz önüne alındığında, bir teslimat sisteminde en uygun rotaları belirlemek, birden fazla kısıtın aynı anda optimize edilmesini gerektiren karmaşık bir problem haline gelmektedir. Bu proje, söz konusu kısıtları entegre ederek drone filolarının verimli bir şekilde yönetilmesini sağlayacak yenilikçi bir çözüm geliştirmeyi amaçlamaktadır.

# OPTİMİZASYON YÖNTEMLERİ

Drone tabanlı teslimat sistemlerinde verimli rota planlaması, çok sayıda dinamik kısıtın eş zamanlı olarak optimize edilmesini gerektiren karmaşık bir problem teşkil etmektedir. Bu bölümde, projenin temelini oluşturan ve en uygun teslimat rotalarını belirlemek için kullanılan optimizasyon yöntemleri detaylandırılmaktadır.

## Graf Yapısı ve Maliyet Fonksiyonu

Teslimat rotalarının modellenmesi için düğüm ve kenarlardan oluşan bir graf yapısı kullanılmaktadır. Bu yapıda:

**Düğümler (Nodes):** Teslimat noktaları düğüm olarak temsil edilir.

**Kenarlar (Edges):** Drone hareketleri kenar olarak modellenir.

Her bir kenar için bir maliyet (cost) değeri atanmaktadır. Bu maliyet fonksiyonu Denklem 1’de görüldüğü gibi, uzaklık ve taşıma ağırlığına dayalı temel maliyete, teslimatın önceliğine göre ağırlıklı bir ceza eklenerek hesaplanmaktadır. Bu fonksiyon, hem fiziksel mesafeyi ve taşınan yükün etkisini hem de teslimatın aciliyetini dikkate alarak rotaların maliyetini belirlemektedir.

Maliyet (cost) = Uzaklık × Ağırlık + (Öncelik×100) (1)

## A\* Algoritması ile Rota Bulma

A∗ algoritması, en kısa yol problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan sezgisel bir arama algoritmasıdır. Bu projede, A∗ algoritması drone'lar için en uygun rotaları bulmak amacıyla kullanılmaktadır. A\* algoritmasının temelini oluşturan tahmin fonksiyonu (heuristic) Denklem 2’deki bileşenleri içermektedir:

Tahmin Fonksiyonu = Hedefe Olan Mesafe + Uçuş Yasağı Bölgesi Cezası (2)

* **Hedefe Olan Mesafe:** Drone'un mevcut konumundan hedefe olan fiziksel mesafeyi temsil eder.
* **Uçuş Yasağı Bölgesi Cezası:** Drone'un bir uçuş yasağı bölgesine (no-fly zone) girme olasılığı veya durumu karşılığında uygulanacak bir cezadır. Bu ceza, algoritmanın no-fly zone'lardan kaçınmasını teşvik eder.

A∗ algoritması kullanılırken drone'un taşıma kapasitesini aşan rotalar otomatik olarak elenmektedir. Bu, drone'un “max\_weight” özelliği ile taşınacak paketin “weight” özelliğinin karşılaştırılmasıyla sağlanmaktadır..

## Dinamik Kısıtlar İçin Kısıt Tatmini Problemi (CSP)

Drone teslimat sistemlerindeki dinamik ve karmaşık kısıtları yönetmek için CSP çerçevesi kullanılmaktadır. CSP, değişkenler ve bu değişkenler üzerindeki kısıtlar kümesi ile tanımlanan bir problem türüdür. CSP, bu kısıtları sağlayacak atamaları bularak drone ve teslimat eşleşmelerini optimize etmeye yardımcı olmaktadır. Bu projede:

**Değişkenler:** Dronelar ve teslimatlar CSP'nin değişkenleri olarak tanımlanmıştır.

**Kısıtlar:**

* Bir drone aynı anda yalnızca tek bir paket taşıyabilir.
* Dronelar uçuşa yasak bölgeleri ihlal edemez. Bu kısıt, drone'un “start\_pos” ve “speed” özellikleri ile no-fly zone'ların “coordinates” ve “active\_time” özellikleri dikkate alınarak uygulanır.

## Genetik Algoritma (GA) ile Optimizasyon

Genetik Algoritma (GA), evrimsel biyolojiden esinlenerek geliştirilmiş popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Kompleks optimizasyon problemlerinde yakınsama sağlayarak etkili çözümler bulma kapasitesine sahiptir. Bu projede GA, nihai rota optimizasyonu için kullanılmaktadır.

**Başlangıç Popülasyonu:** Rastgele oluşturulmuş geçerli rotalar, genetik algoritmanın başlangıç popülasyonunu oluşturmaktadır.

**Çaprazlama (Crossover):** İki mevcut rotadan (ebeveyn) yeni rotalar (yavrular) üretilmektedir. Bu işlem, farklı rota segmentlerinin bir araya getirilerek yeni kombinasyonlar oluşturmasını sağlamaktadır.

**Mutasyon:** Oluşturulan rotalarda rastgele bir teslimat noktasının değiştirilmesi işlemidir. Mutasyon, çözüm uzayında çeşitliliği artırarak algoritmanın yerel optimumlara takılmasını önlemektedir.

**Uygunluk Fonksiyonu (Fitness Function):** Her bir rotanın "kalitesini" değerlendirmek için bir uygunluk fonksiyonu kullanılır. Bu fonksiyon, drone filosu yönetiminin temel hedeflerini yansıtacak şekilde tasarlanmıştır. Gerekli fonksiyon Denklem 3’te yer almaktadır:

Uygunluk (Fitness) = (Teslimat Sayısı × 50) − (Toplam Enerji × 0.1) − (İhlal Edilen Kısıt × 1000) (3)

Bu denkleme göre algoritma, yüksek teslimat sayısında ödüllendirme yapmakta, yüksek enerji tüketiminde ceza uygulamaktadır. Bu, drone'un “battery” kapasitesi ve rotanın enerji maliyeti ile ilişkilidir. No-fly zone ihlalleri veya kapasite aşımlarında da yüksek oranda ceza uygulanmaktadır.

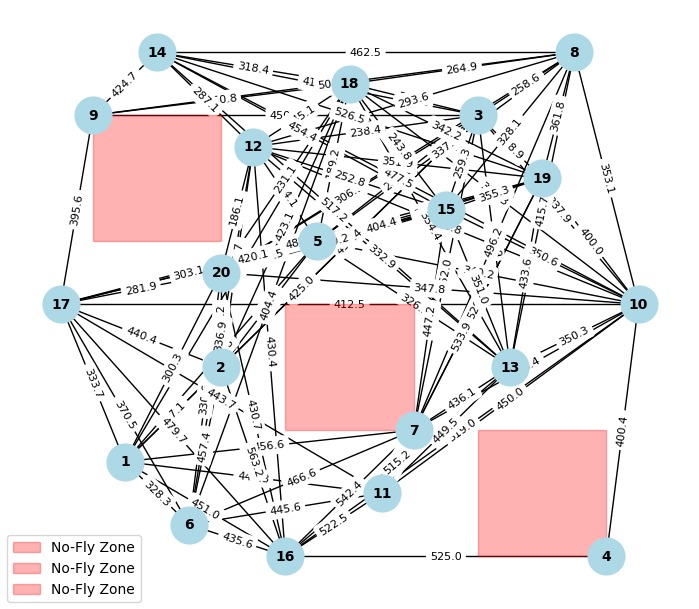
Bu optimizasyon yöntemleri, drone'ların enerji kısıtları, uçuş yasağı bölgeleri ve paket öncelikleri gibi dinamik kısıtlar altında en verimli teslimat rotalarını bulmasını sağlamak için birleşik bir yaklaşımla projeye entegre edilmektedir.

# MODELLEME ve SİMÜLASYON

Bu bölümde, drone filo optimizasyonu problemini çözmek amacıyla geliştirilen matematiksel modelleme ve sistemin soyut yapısı detaylandırılmaktadır. Problemin dinamik kısıtlar ve çoklu hedeflerle karakterize edilen yapısı, çözüm için kapsamlı ve esnek bir modelleme yaklaşımını zorunlu kılmaktadır. Bu çerçevede, sistemin temel bileşenleri öncelikle tanımlanmış ve sonrasında bu yapının grafik teorisi temelli bir modele dönüştürülmesiyle çözümün iskeleti oluşturulmuştur.

Projede kullanılan temel varlıklar arasında “drone”, “teslimat noktaları” ve “uçuşa yasak bölgeler” yer almaktadır. Her bir drone’un benzersiz bir kimliği, maksimum taşıma kapasitesi, batarya kapasitesi, hızı ve başlangıç konumu bulunmaktadır. Teslimat noktaları, belirli koordinatlara sahip olup teslim edilecek paketin ağırlığı, öncelik seviyesi ve zaman penceresi gibi özelliklerle tanımlanmıştır. Uçuşa yasak bölgeler ise belirli zaman aralıklarında aktif olan, çok köşeli alanlardır ve bu alanlar drone rotaları planlanırken dikkate alınması gereken kritik kısıtlar arasındadır.

Teslimat rotaları problemi, graf yapısı çerçevesinde modellenmektedir. Bu modelde, her bir teslimat noktası ve drone’un başlangıç konumu birer düğüm olarak tanımlanmakta; bu düğümler arasındaki geçişler ise ağırlıklı kenarlarla ifade edilmektedir. Kenar ağırlıkları, mesafe ve taşıma yüküne dayalı maliyetin yanı sıra teslimat önceliğine göre eklenen ceza terimleriyle Şekil 1’deki gibi hesaplanmaktadır.

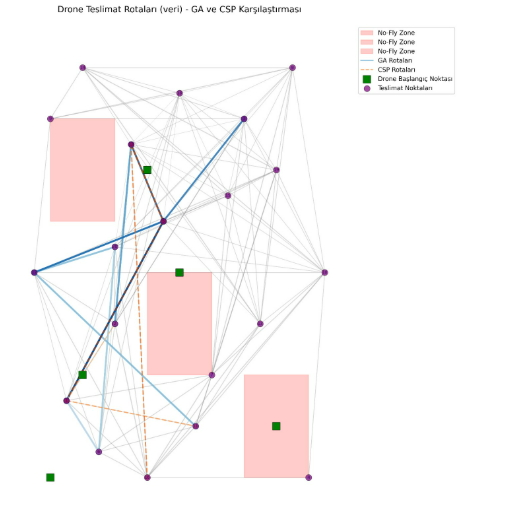


Şekil 1: Proje Graf Yapısı

Model, değişken çevresel ve operasyonel koşullara uyum sağlamak adına dinamik olarak tasarlanmıştır. Teslimat noktaları, drone parametreleri ve uçuş yasakları gibi girdiler hem kullanıcı tanımlı hem de rastgele üretilebilir şekilde modellenmiştir. Özellikle zamanla değişen uçuşa yasak bölgeler gibi unsurlar, algoritmaların çevik ve esnek şekilde tepki verebilmesini gerektirmekte ve bu sayede sistemin, karmaşık ve değişken lojistik ortamlarında etkin biçimde çalışabilmesi hedeflenmektedir.

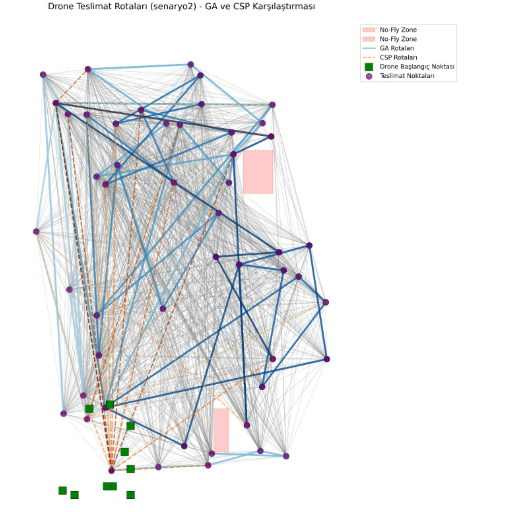
Drone filo optimizasyonu için geliştirilen algoritmaların etkinliğini, verimliliğini ve gerçek dünya koşullarına uyum yeteneğini değerlendirmek amacıyla kapsamlı simülasyon senaryoları oluşturulmaktadır. Bu senaryolar, farklı operasyonel büyüklüklere ve değişken kısıtlara sahip ortamlarda algoritmaların performansını ölçmeye yönelik olarak tasarlanmıştır.

Simülasyonlar kapsamında iki temel senaryo tanımlanmıştır. Birinci senaryo, küçük ölçekli bir operasyonu temsil etmektedir. Bu senaryoda, 5 drone, 20 teslimat noktası ve 2 adet statik uçuşa yasak bölge bulunmaktadır. Görece daha az karmaşık yapısıyla bu senaryo, algoritmaların temel işlevselliğini test etmek ve sistemin düzgün çalıştığını doğrulamak amacıyla tercih edilmiştir. Senaryo 1’e ait çıktı Şekil 2’deki gibidir.



Şekil 2: Senaryo 1’e Ait Algoritma Yapısı

İkinci senaryo ise daha büyük ve dinamik bir operasyonu simüle etmektedir. Bu yapı içerisinde 10 drone, 50 teslimat noktası ve 5 adet zamanla değişkenlik gösteren uçuşa yasak bölge yer almaktadır. Dinamik no-fly zone'ların farklı zaman aralıklarında aktif olması, algoritmaların gerçek zamanlı değişimlere uyum sağlama kabiliyetini test etmek açısından kritik bir rol oynamaktadır. Özellikle yüksek sayıda teslimat noktasına sahip bu senaryo, sistemin ölçeklenebilirliğini ve zorlu koşullar altında gösterdiği performansı değerlendirmek için önem arz etmektedir. Simülasyonların tekrarlanabilirliğini sağlamak ve farklı senaryoların esnek biçimde oluşturulmasına olanak tanımak amacıyla rastgele veri üretimi gerçekleştiren bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, belirli parametre aralıkları dahilinde rastgele drone özellikleri (kimlik numarası, maksimum taşıma kapasitesi, batarya kapasitesi, hız ve başlangıç konumu), teslimat noktası özellikleri (konum, ağırlık, öncelik seviyesi ve teslimat zaman aralığı) ve uçuşa yasak bölgelerin tanımlarını (geometrik koordinatlar ve aktif zaman aralığı) otomatik olarak oluşturabilmektedir. Bu sayede, algoritmaların farklı koşullar altında test edilmesi kolaylaşmakta ve sistemin genel dayanıklılığı değerlendirilebilmektedir. Senaryo 2’ye ait çıktı Şekil 3’teki gibidir.



Şekil 3: Senaryo 2’ye Ait Algoritma Yapısı

Algoritmaların performansı, çeşitli metrikler aracılığıyla nicel olarak değerlendirilmektedir. Bunların başında tamamlanan teslimat yüzdesi gelmektedir; bu metrik, tüm teslimatlar içerisinden başarıyla gerçekleştirilenlerin oranını ifade etmekte ve algoritmanın temel işlevselliğini yansıtmaktadır. Bir diğer önemli metrik ise ortalama enerji tüketimidir. Bu, tamamlanan tüm teslimatlar için drone’ların harcadığı enerji miktarının ortalamasını vermekte ve algoritmanın enerji verimliliğini değerlendirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca, algoritmanın toplam çalışma süresi de önemli bir değerlendirme ölçütüdür. Gerçek zamanlı sistemlere uygunluk açısından kritik olan bu metrik, algoritmanın optimum rotaları ne kadar sürede bulduğunu göstermektedir. Hedeflenen performans seviyesi, 50 ve daha fazla teslimat noktası içeren durumlarda algoritmanın bir dakikadan kısa sürede sonuç üretmesidir. Bu senaryoların simülasyon sonuçlarının anlaşılabilirliğini arttırmak amacıyla görselleştirme aracı olan Matplotlib kütüphanesi sisteme entegre edilmiştir. Görselleştirilen bilgiler arasında drone’ların başlangıç konumları, teslimat noktalarının dağılımı, tanımlanmış no-fly zone bölgeleri ve algoritma tarafından oluşturulan optimize edilmiş teslimat rotaları yer almaktadır. Bu görselleştirmeler, algoritmaların çıktılarının sezgisel olarak değerlendirilmesine olanak tanımakta ve farklı senaryolar arasındaki performans farklarının kolayca analiz edilmesini sağlamaktadır.

# DİNAMİK TESLİMAT PLANLAMASI

Dinamik teslimat planlaması, operasyon sırasında ortaya çıkan ani değişimlere — örneğin yeni siparişlerin eklenmesi, hava koşullarındaki ani değişiklikler, trafik yoğunluğu ya da uçuşa yasak bölgelerin zamana bağlı olarak güncellenmesi gibi durumlara — gerçek zamanlı olarak yanıt verebilen bir rota optimizasyon sürecini ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında, geleneksel statik rota planlama yaklaşımlarının ötesine geçilerek değişken çevresel ve operasyonel koşullara uyum sağlayabilecek esnek bir planlama yapısı geliştirilmiştir. Amaç, drone filosunun operasyonel verimliliğini artırmakla birlikte sistemin esnekliğini de güvence altına alarak beklenmedik durumlara karşı dayanıklılığını güçlendirmektir.

1. Dinamik Kısıtların Yönetimi

Bu projede ele alınan başlıca dinamik kısıtlar; zamanla değişen uçuşa yasak bölgeler, batarya kapasiteleri ve şarj süreleri ile teslimatların öncelik ve ağırlık değerlerindeki değişkenlerdir.

Dinamik uçuşa yasak bölgeler, belirli zaman aralıklarında aktif hâle gelebilmekte veya geçerliliğini yitirebilmektedir. Bu durum, rota planlamasının sürekli olarak güncellenmesini zorunlu kılmaktadır. Algoritmada bu tür ihlaller, yüksek maliyetli ceza fonksiyonlarıyla temsil edilerek droneların bu bölgelere yönlendirilmesini engellemektedir.

Drone'ların sınırlı batarya kapasiteleri, hem rotaların uzunluğunu hem de taşınabilecek yük miktarını doğrudan etkilemektedir. Bu nedenle, planlama sürecine drone’ların şarj istasyonlarına dönmesi ve belirli sürelerde yeniden şarj olması gibi parametreler dahil edilmiştir. Böylece enerji tüketimi ve teslimat zamanlaması arasında daha hassas bir denge kurulabilmektedir.

Teslimatların öncelik düzeyleri ve paket ağırlıkları ise zamana bağlı olarak değişebilmektedir. Bu değişiklikler, rota maliyet fonksiyonunu doğrudan etkileyerek öncelikli teslimatların seçilmesini gerektirir. Bu noktada, acil teslimatlara öncelik vermek amacıyla Min-Heap veri yapılarından yararlanılmıştır.

Bu projede rota optimizasyonu amacıyla iki farklı yaklaşım uygulanmıştır: A\* algoritması ve Genetik Algoritma (GA). Her iki algoritma da farklı senaryolarda çeşitli avantajlar doğurmaktadır:

A\* algoritması, sezgisel arama temelli bir yöntem olup belirli bir hedefe ulaşmak için en kısa ve en uygun yolu belirlemede etkilidir. Bu yöntemde kullanılan maliyet fonksiyonu; mesafe, taşıma ağırlığı ve teslimat önceliği gibi unsurları içermekte, sezgisel fonksiyon ise hedefe olan mesafe ile uçuşa yasak bölgelere girilmesini engelleyen ceza bileşenlerini hesaba katmaktadır. A\* algoritması, problem uzayının belirli olduğu senaryolarda oldukça etkin çalışmakla birlikte, çok büyük ve değişken problem alanlarında hesaplama maliyeti açısından sınırlılıklar taşıyabilmektedir. Bununla birlikte, taşıma kapasitesi aşımı gibi geçersiz rotaları önceden eleme yeteneği ile pratik uygulamalarda avantaj sağlamaktadır.

Genetik Algoritma ise daha geniş ve dinamik problem uzaylarında çalışabilen, küresel optimuma ulaşma potansiyeline sahip popülasyon tabanlı bir optimizasyon tekniğidir. Bu yöntem, çoklu hedefleri — örneğin teslimat sayısı, enerji verimliliği ve kısıt ihlali oranı — eşzamanlı olarak optimize edebilme kapasitesine sahiptir. Rastgele oluşturulan başlangıç popülasyonları, çaprazlama ve mutasyon işlemleri ile zenginleştirilerek çözüm çeşitliliği korunmakta ve yerel minimumlara takılma olasılığı azaltılmaktadır. Bununla birlikte, A\* algoritmasının aksine Genetik Algoritma optimal çözüme ulaşma garantisi vermemekte ve yakınsama süresi problem boyutuna göre değişkenlik gösterebilmektedir.

Her iki algoritma farklı yönlerden avantaj sağladığı için bu projede karşılaştırmalı analiz gerçekleştirilmiştir. A\*, grafik tabanlı yapılarda ve hedef odaklı senaryolarda daha hızlı ve etkili sonuçlar verirken GA daha esnek ve çok kısıtlı ortamlarda başarılı çözümler üretmektedir. Özellikle 50 teslimat noktası içeren dinamik senaryolarda, her iki algoritmanın performansı karşılaştırılmış ve hangi yapının hangi koşullarda daha etkili olduğu değerlendirilmiştir. Bu analiz, gelecekteki hibrit algoritma yaklaşımları için de temel oluşturacaktır.

Proje senaryoları çalıştırıldığında gözlenen değerlerden bir tanesi aşağıdaki Tablo 1’de yaklaşık değerleri ile yer almaktadır. Enerji tüketimi drone başına ortalama değer olarak hesaplanmıştır. Çalışma süresi, algoritmanın rota hesaplaması için harcadığı toplam süredir. Kural ihlali, no-fly zone veya kapasite limitlerine uyumsuzluk olarak tanımlanmıştır.

| Metrik | Senaryo | A\* | GA |
| --- | --- | --- | --- |
| Tamamlanan Teslimat (%) | S1 | 20 | 40 |
| S2 | 0.22 | 59.72 |
| Ortalama Enerji Tüketimi | S1 | 0.4175 mAh | 0.6375 mAh |
| S2 | 0.22 | 59.72 |
| Çalışma Süresi (saniye) | S1 | 0.01 | 10.68 |
| S2 | 0.22 | 59.72 |
| Kural İhlal Sayısı | S1 | 9 | 10 |
| S2 | 1 | 2 |

**Tablo 1:** A\* ve GA Algoritmalarının Proje Üzerinde Kıyaslanması

# ZAMAN KARMAŞIKLIĞI ANALİZİ

Drone filo optimizasyonuna yönelik geliştirilen sistemin gerçek zamanlı uygulanabilirliğini değerlendirebilmek için algoritmaların zaman karmaşıklığı hem teorik hem de deneysel olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Özellikle dinamik kısıtların (örneğin uçuş yasağı bölgeleri, batarya sınırlamaları ve öncelikli teslimatlar) sisteme entegre edilmesi, algoritmaların işlem süresi üzerindeki etkisini doğrudan artırmakta; bu durum, zaman verimliliğini kritik bir metrik hâline getirmektedir.

## Teorik Zaman Karmaşıklıkları

Kullanılan algoritmaların teorik karmaşıklıkları aşağıdaki şekilde özetlenmiştir:

**Genetik Algoritma (GA):** O(P×G×N), GA’nın zaman karmaşıklığıdır. Burada P popülasyon büyüklüğünü, G nesil sayısını ve N her bireyin uygunluk fonksiyonunu hesaplama maliyetini temsil etmektedir. Bu uygunluk fonksiyonu; teslimat sayısı, enerji tüketimi ve kural ihlali gibi faktörleri içermektedir.

**A\* Algoritması:** Sezgisel bir arama yöntemi olan A\*’ın zaman karmaşıklığı O(E+Vlog⁡V) şeklindedir. Burada V düğüm sayısı ve E kenar sayısını ifade etmektedir. Derin aramalarda en kötü durum senaryosu O(b^d) olabilir; b dallanma faktörü, d ise hedefe olan derinliktir.

**CSP Kontrolleri:** CSP’nin zaman karmaşıklığı genel olarak O(P×Z) şeklindedir. Burada P değişken sayısını (drone-teslimat eşlemeleri) ve Z kısıt sayısını ifade etmektedir. Bu kontroller, ağırlık, enerji, zaman ve bölge ihlalleri gibi kısıtların sağlanıp sağlanmadığını doğrulamaktadır.

## Deneysel Zaman Karmaşıklıkları

Senaryo 1 kapsamında (5 drone, 20 teslimat noktası, 3 no-fly zone), algoritmaların işlem süreleri aşağıda yer alan Tablo 2’deki gibi ölçülmüştür:

| Algoritma | Süre (s) | İşlem Sayısı | Zaman Payı(%) |
| --- | --- | --- | --- |
| GA | 10.68 | 15000 | 99.22 |
| A\* | 0.01 | 2169.89 | 0.12 |
| CSP | 0.0712 | 4 | 0.66 |
| Toplam | 10.76 | 17173.89 | 100 |

**Tablo 2:** Zaman Analizi

Bu verilere göre, toplam sürenin neredeyse tamamı (%99.22) Genetik Algoritma tarafından tüketilmiştir. GA’nın bu yüksek işlem maliyeti; geniş popülasyon büyüklüğü, çoklu nesiller ve her iterasyonda hesaplanan karmaşık uygunluk fonksiyonlarından kaynaklanmaktadır. A\* algoritması ve CSP kontrolleri ise oldukça düşük işlem süresine sahiptir ve sistemin toplam zaman yüküne neredeyse ihmal edilebilir seviyede etki etmektedir.

## Deneysel Zaman Karmaşıklıkları

Deneysel çıktılar, rota optimizasyonundaki zaman maliyetinin büyük ölçüde GA’ya ait olduğunu göstermektedir. Bu durum, özellikle daha büyük senaryolarda (<1 dakika hedefiyle), GA’nın optimize edilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu kapsamda önerilen iyileştirmeler arasında şunlar yer almaktadır: dinamik popülasyon boyutu belirleme, adaptif nesil sayısı kullanımı ve paralel işlem desteği. Buna ek olarak, A\* algoritmasının lokal rota iyileştirme amacıyla GA ile hibrit biçimde kullanılması, toplam işlem süresini düşürme ve algoritmanın genel verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır.

##### Kaynaklar

1. GitHub Proje Linki:

<https://github.com/NecibeGuner/drone-fleet-optimization.git>

1. Trello Çalışma Linki: https://trello.com/invite/b/682881c2165431d88d4b4fb9/ATTIe847ffdf1f6c3e0153e7e4f7653609059A19D616/drone-fleet-optimization
2. <https://bilgisayarkavramlari.com/2009/03/02/a-yildiz-arama-algoritmasi-a-star-search-algorithm-a/>
3. <https://www.geeksforgeeks.org/constraint-satisfaction-problems-csp-in-artificial-intelligence/>
4. <https://www.geeksforgeeks.org/comparison-between-adjacency-list-and-adjacency-matrix-representation-of-graph/>
5. https://www.geeksforgeeks.org/introduction-to-min-heap-data-structure/
6. https://www.geeksforgeeks.org/genetic-algorithms/
7. *A Pathfinding for Real-Time Applications*\* P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, “A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Trans. Systems Science and Cybernetics*, vol. 4, no. 2, pp. 100–107, 1968.

<https://ieeexplore.ieee.org/xpl/RecentIssue.jsp?punumber=4082035>

1. Bhuiyan T. H., Walker V., Roni M., Ahmed I. “Aerial drone fleet deployment optimization with endogenous battery replacements for direct delivery of time-sensitive products”

https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957417424010388

1. Routing Battery-Constrained Delivery Drones in a Depot Network

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0968090X23001365>

1. Drone-Fleet-Enabled Logistics: A Joint Design of Flight Trajectory and Package Delivery Under No-Fly Zones

<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9026723/>