EDITORS

PROF. IRINA-ANA DROBOT
PROF. DR. RAUL D.S.G. CAMPILHO

20TH INTERNATIONAL ISTANBUL SCIENTIFIC RESEARCH CONGRESS ON LIFE, ENGINEERING, ARCHITECTURE, AND MATHEMATICAL SCIENCES PROCEEDINGS BOOK

FEBRUARY 21-23, 2025
İSTANBUL, TÜRKİYE



PARTICIPANT COUNTRIES (23 COUNTRIES)

Türkiye, Saudi Arabia, Malaysia, Philippines, Pakistan, Hungary, Kosovo, Sudan, Nigeria, India, Azerbaijan, Algeria, Morocco, United States of America, Iran, N. Macedonia, Portugal, Malaysia, China, Czechia, Egypte, Poland, United Arab Emirates

ISBN: 978-9952-8553-0-2
DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

KARGO DRONLAR İÇİN ROTA OPTİMİZASYONU

Rıdvan Mermer[1], Serkan Kurt[2], Mehmet Cemil Kazanbaş[3]

[1]Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

[2] Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

[3] Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Aviyonik Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

ORCID Code: 0009-0003-8418-3050

ÖZET

Dünyadaki teknolojik ilerlemeler ile birlikte kargo dronları modern lojistik endüstrisinde hızla yaygınlaşmaktadır. Kargo taşımacılığında geleneksel yöntemler yerini yeni nesil taşıma araçlarına bırakmaktadır. Dronların kargo taşımacılığında kullanılması ile birlikte özellikle şehir içlerinde ve düşük irtifalarda insansız hava araçları için hava trafiğinde önemli ölçüde artış beklenmektedir. Kargo dronların lojistikte kullanımının sürekli artması bu konuda hava trafik yönetimini daha da kompleks hale getirecektir. Zira her bir dron birbirinden farklı yapıda, farklı kabiliyette olabilmektedir. Tüm bunları dikkate alarak bir Hava Trafik Yönetimi düzenlemek önemlidir. Hava trafik yönetimi için mevcut olan kurallar ticari ve askeri amaçla kullanılan insanlı uçakları kapsayıcı olup insansız hava sistemleri ile ilgili olarak bu konuda çalışmalar devam etmektedir. Literatürde İnsansız Hava Sistemleri Trafik Yönetimi (Unmannded Aerial System Traffic Management) olarak geçen bu konu ile ilgili olarak çeşitli çalışmalar yapılmış ve bu konseptin geliştirilmesine yönelik ihtiyaç belirtilmiştir.

İnsansız hava trafiği bağlamında kargo dronlarının hava sahalarına entegrasyonu bazı fiziksel kısıtlara tabidir. Bu tür kısıtlar arasında bölgede aktif dron sayısı, sınırlı pil ömrü, dronun ağırlığı, yük kapasitesi, hava koşulları, çevresel koşullar, dronun aerodinamik yapısı, dronun hızı, uçuş yüksekliğinin ve bulunduğu hava sahasındaki trafik yoğunluğu yer almaktadır. Bu kısıtlara bağlı olarak operayon süresi, menzili ve hava trafiğinin yoğunluğu değişkenlik göstermektedir.

Aynı anda havada operasyon halinde olan birden fazla dronun kargoları istenilen noktalara çarpışma olmadan bırakabilmeleri için rota optimizasyonu ile seyrüseferlerine devam etmeleri kritik öneme sahiptir. Kargo dronlar için rota optimizasyonu, başlangıç noktasından varış noktasına ulaşmak için diğer dronların da rotalarını dikkate alarak en optimum yolu bulma anlamına gelmektedir. Dinamik bir rota planlama öne çıkmaktadır. Bu makalede, rota belirlenmesi kapsamında Boeing şirketinin ticari amaçla kullanılan sivil uçaklar için geliştirdiği Hava Aracı Niyet Tanımlama Dili (Aircraft Intent Description Language) tekniğinden de yararlanılmıştır. Harici etkenler altında kargo dronların belirlenen rotaya uyum kabiliyetini sağlamak uçuş kontrol sistemleri ile mümkün olmaktadır. Bu etkenler altında hava aracının rotaya uygun biçimde seyrüsefer yapabilmesi için dayanıklı kontrol (robust control) sistemine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca uçuş emniyetinin sağlanması için çarpışmadan kaçınma sistemleri

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

ele alınmış ve bu sistemlerde kullanılan "Algıla ve Kaçın (Sense-and-Avoid)" yöntemlerinin kargo dronlar için uygulanabilir olmaları incelenmiştir.

Özetle bu makalede kargo dronlar kapsamında rota optimizasyonu için gerekli parametrelerin belirlenmesi ve uygulanacak yöntemler üzerine araştırma yapılmıştır.

Keywords: Kargo Dronları, Rota Optimizasyonu, Hava Aracı Niyet Açıklama Dili, İnsansız Hava Araçları Trafik Yönetimi, Çarpışmadan Kaçınma

ROUTE OPTIMIZATION FOR CARGO DRONES

ABSTRACT

Cargo drones are quickly expanding in the modern logistics sector due to global technical advancements Traditional methods in cargo transportation are being replaced by new generation transportation vehicles. Unmanned aerial vehicle traffic is predicted to rise significantly as a result of the usage of drones in cargo transportation, particularly in cities and at low altitudes. Air traffic management system will become considerably more complicated in this sense as the usage of cargo drones in logistics continues to grow. Because the structure and capabilities of each drone could varies. Planning an Air Traffic Management, it is crucial to consider all of these factors. The existing rules for air traffic management cover manned aircraft used for commercial and military purposes, research on unmanned aerial systems is still improving. Many research on this topic, known in the literature as Unmanned Aerial System Traffic Management, has been conducted, and it has been noted that this concept needs to be developed.

The integration of cargo drones is subject to various physical limitations in the context of unmanned air traffic. These limitations include the number of drones operating in the area, limited battery life, weight and payload, weather, environmental conditions, aerodynamic design, speed, flight altitude, and traffic volume in the airspace they operate in. Air traffic density, range, and operating time also vary according to these limitations.

It is critical that several drones operating in air at the same time continue their navigation with route optimization in order to be able to drop the cargo at the desired points without collisions. Route optimization for cargo drones means finding the most optimum path by considering the routes of other drones to reach the destination from the starting point. Dynamic route planning stands out. In this article, Aircraft Intent Description Language technique developed by Boeing for civil aircrafts was also used within the scope of route determination. Ensuring the ability of cargo drones to fly on route under external factors is possible with flight control systems. In order for the air vehicle to navigate in accordance with the route under these factors, it is necessary to have a robust control system. In addition, collision avoidance systems were discussed to enhance flight safety and the applicability of the "Sense-and-Avoid" methods used in these systems for cargo drones was examined.

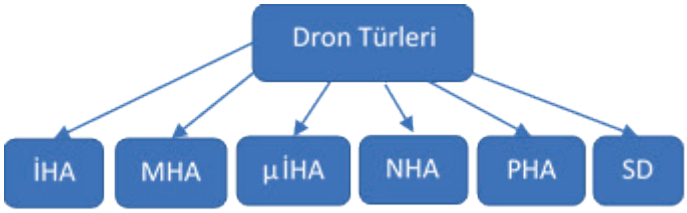
In summary, in this article, necessary parameters for route optimization and the methods to be used within the scope of cargo drones were the subjects of research in this article.

Keywords: Cargo Drones, Route Optimization, Aircraft Intent Description Language, Unmanned Aerial System Traffic Management

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA) veya insansız hava sistemleri (İHS) olarak da bilinen kargo dronları, pilota ihtiyaç duymadan mal veya kargo taşımak için tasarlanmış hava araçlarıdır. Bu dronlar, otonom veya uzaktan kumandalı uçuş gerçekleştirebilmek için engellerden kaçınma (obstacle avoidance), çarpışmadan kaçınma (collision avoidance) teknolojileri ve GPS gibi sistemlerini kullanırlar. [1] Kargo dronlar çeşitli boyutlarda yük taşıma kapasitelerine sahip oldukları için teslimat hizmetleri, altyapı sistemlerinin izlenmesi, tarımsal ilaçlama, çevresel takip ve sınır güvenliği, tıbbi malzemelerin acil transferleri ve eğlence gibi amaçlarla kullanılmaktadır. Aşağıda 1 mm'lik kanat açıklığına sahip Sensör Dronlar'dan 61 m kanat açıklığına sahip olan İHA'lara kadar dron çeşitleri gösterilmiştir. Bu görselde mikro insansız hava aracı (µİHA), mini hava aracı (MİHA), nano hava aracı (HNA) ve piko hava aracı (PAV) gibi farklı boyutlardaki dron çeşitleri verilmiştir. [2]



Şekil SEQ Şekil * ARABIC 1. Boyutlarına göre dron türleri

Dronlarda rota optimizasyonu ile ilgili dikkat edilmesi gereken bazı husular vardır. Bunlardan bazıları başlangıç noktasından varış noktasına kadar belirlenen güzergahta engellerden kaçınma (obstacle avoidance), dronların sahip olduğu rota planlamalarının zaman domeninde çakışmamasını sağlamak yani çarpışmadan kaçınma (collision avoidance) ve planlanan rota çerçevesinde maksimum uyum kabiliyetine sahip olmaktır. [3]

Havacılık sektöründe faaliyet gösteren lider firmalardan biri olan Amerikan Boeing şirketi sivil uçaklar için hava trafiği yönetiminde (Air Traffic Management - ATM) kullanılmak üzere Hava Aracı Niyet Açıklama Dili (AIDL – Aircraft Intent Description Language) ile ilgili çalışmalar yürütmektedir. Hava Aracı Niyet Açıklama Dili (AIDL), Yörünge Tabanlı Operasyonlarda (Trajectory Based Operations - TBO) tahmin edilen hava aracı yörüngelerini tanımlamak ve değiştirmek için standart bir araç olarak tanımlanmaktadır. AIDL, yörünge tahmini bağlamında hava aracının belirli bir zaman aralığında seyrüseferine nasıl devam edeceğini açıklamakta ve bu durumu matematiksel olarak formüle etmek için gereken unsurları sağlamaktadır. [4]

Bu çalışmada AIDL tekniği ile kargo dronlar için rota optimizasyonun nasıl gerçekleştirilebileceği incelenmiştir. Geniş kapalı alanlara sahip olan büyük tesislerde veya kargo transfer işlemlerinin yoğun olarak yapıldığı bölgelerde aynı anda birden fazla dron operasyon halinde olmaktadır. Hava aracı niyet açıklama dili vasıtasıyla dronların birbirleri ile sürekli haberleşmeleri sağlanarak yoğunluk yaşanan bölgelerde meydana gelebilecek kazaları önlemek, zaman domeninde optimum olarak tasarlanan rotaların çakışmamasını sağlamak ve bir dronun belirlenen rotaya uygun olarak seyrüseferine devam etmesini sağlamak bu çalışmanın amaçları arasında yer almaktadır.

Makalenin II. kısmında hava aracı niyet açıklama dilinin kargo dronlar için rota optimizasyonu bakımından uygulanabilirliği incelenmiş, III. kısımda harici etkenler altında dronların rotaya uyum kabiliyetine değinilmiştir. IV. Kısımda çarpışmadan kaçınma ve rotaların dağıtık mimari ile oluşturulması

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

ele alınmış, V. kısımda ise sonuçlar ve insansız hava aracı trafik yönetimi ile ilgili ilerde yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

DRON ROTA OPTİMİZASYONUNDA AIDL KULLANIMI

Hava trafik yönetimi uygulamalarında hava aracının yörüngesini hesaplamak için farklı hareket denklemleri kullanılabilir. Bu hareket denklemlerinde bulunan değişkenler, hava aracının rotasını tanımlamak amacıyla hava aracı niyet tanımlama dilinde kullanılan talimatlarda da bulunmaktadır. AIDL'yi açıklayan hareket denklemlerinde, hava aracının kütlesi değişen katı bir cisim olarak kabul edilir ve ağırlık merkezinin hareketi tanımlanır. Hava aracının kütle merkezinin konumunu tanımlamak için üç koordinat kullanılır: boylam (λ), enlem (φ) ve yükseklik (h). Aerodinamik yunuslama (pitch) açısı (γTAS), aerodinamik sapma açısı (χTAS) ve aerodinamik yatış açısı (μTAS) belirtilen üç koordinattaki değişimin ifade edilmesi amacıyla kullanılır. Denklem setini türetmek için, katı bir cismin atmosferik savrularak uçuşunu tanımlayan uçuş mekaniğinin genel denklemlerine çeşitli basitleştirici varsayımlar uygulanmıştır. Aşağıda verilen denklemlerde, hava trafiği yönetimi (ATM) bağlamında rotaların incelenmesiyle ilgili olan hava aracının tüm eksenlerde hareketini tanımlamak amaçlanmıştır. [5]

Dinamikler:

$$\frac{d\ vTAS}{dt} = \frac{T - D - W \sin\sin \gamma TAS}{m} + W_{A_1} \quad (1)$$

$$\frac{d\ \gamma TAS}{dt} = \frac{1}{vTAS}\left[\frac{L\cos \mu TAS - D - W\cos\cos \gamma TAS}{m}\right] + W_{A_2} \quad (2)$$

$$\frac{d\ \chi TAS}{dt} = \frac{1}{vTAS\cos\cos \gamma TAS}\left[\frac{L\sin \mu TAS}{m}\right] + W_{A_3} \quad (3)$$

Kütle varyasyonu:

$$\frac{d\ m}{dt} + F = 0 \quad (4)$$

Navigasyon:

$$\frac{d\ \lambda}{dt} = \frac{1}{(N+h)\cos\cos \varphi}\ (vTAS\cos \gamma TAS\ \cos\chi TAS + W_{2}) \quad (5)$$

$$\frac{d\ \varphi}{dt} = \frac{1}{M+h}\ (vTAS\cos \gamma TAS\ \cos\chi TAS + W_{1}) \quad (6)$$

$$\frac{d\ h}{dt} = vTAS\ \sin \gamma TAS \quad (7)$$

T: toplam itme kuvveti,

D: toplam sürüklenme,

L: toplam kaldırma kuvveti,

W: hava aracının ağırlığı,

m: hava aracının kütlesi,

F: anlık yakıt tüketimi,

M ve N: sırasıyla meridyen ve eğriliğin asal dikey yarıçapı,

WA_1 ve WA_2 ise rüzgar gardayanları,

W_1 ve W_2 ise rüzgar bileşenlerinin fonksiyonlarıdır.

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

Dinamik denklemler dronlar için uyarlandığında F değişkenini anlık tüketilen güç miktarı olarak, M ve N değişkenlerini katettikleri mesafelerin uçaklara göre daha kısa olması nedeniyle sabit olarak kabul edilmelidir. (1) ve (7) arasındaki denklemlerin tamamı Hava Aracı Hareket Modeli (AMM – Aircraft Motion Model) olarak tanımlanır ve bir TE (Trajectory Engine)'de rota hesaplaması için kullanılabilir. Yukarıdaki hareket denklemleri, yedi doğrusal olmayan(nonlineer) adi(ordinary) diferansiyel denklem ve on bağımlı değişkenden oluşan bir sistem oluşturur: vTAS , γTAS, χTAS , μTAS , L, δT , λ, φ, h, m. Bu nedenle, sistemin üç matematiksel serbestlik derecesi vardır (yani bağımlı değişkenlerin sayısı - denklem sayısı). Hava aracının yörüngesini açık bir şekilde tanımlayan kapalı bir sistem elde etmek için üç serbestlik derecesinin harici olarak (yani denklemler kullanılarak varsayımsal bir TE (rota hesaplaması)'ye girdi olarak tanımlanması gerekmektedir. Denklemler (1) ila (7)'nin, sırasıyla iniş takımının (δ_{LG}), yüksek kaldırma cihazlarının konumunu (δ_{HL}) ve hız frenlerini (δ_{SB}) tanımlayan üç parametre tarafından verildiği varsayılan belirli bir aerodinamik konfigürasyon için geçerlidir. Fakat dronlar için bu üç parametrenin sabit olarak denklemlere dahil edilmesine dikkat etmek gerekmektedir. Sonuç olarak, aerodinamik yapının incelenmesi, altı serbestlik derecesine sahip bir denklem sistemi ile mümkün olmaktadır. Ortaya çıkan denklem sistemindeki değişkenler şu şekilde gruplandırılabilir: [6]

Durum değişkenleri: v_{TAS}, γ_{TAS}, χ_{TAS}, λ, φ, h, m

Kontrol değişkenleri: μ_{TAS}, L, δ_T

Yapılandırma değişkenleri: δ_{HL}, δ_{SB}, δ_{LG} (sabit)

AIDL hareket denklemlerinden çözümü benzersiz bir yörünge olan iyi konumlanmış, kapalı bir matematiksel problem elde etmenin en basit yolu, üç kontrol ve üç durum değişkenini zaman domeninde tanımlamaktır. Ancak, denklemlerin altı serbestlik derecesini içeren böyle bir yaklaşım, ATM bağlamında uygulanan kontrol modlarının basit bir şekilde modellenmesine izin vermemektedir. Tablo 1'de gösterildiği gibi C1, C2 ve C3 olarak belirlenen üç bağımsız yapılandırma kısıtlaması aracılığıyla yapılabilir. Fakat bu üç yapılandırma kısıtlaması yolcu uçakları gibi büyük boyutlu hava araçları için geçerlidir. Kargo dronlar için C kodlu kısıtlamalar yerine M kodlu kısıtlamalar kullanılmalıdır. AIDL'de yer alan δT (throttle) ve μ_{TAS} (yatış açısı) gibi parametreler hareket kısıtlamalarıdır. Bu kısıtlamalar, pilot/uçuş yönetim sistemine sunulan kontrol ve yönlendirme modlarının matematiksel açıklamalarıdır. Sonuç olarak, hareket kısıtlamaları aşağıdaki üç kategoriden birine ait olabilmektedir: [7]

Kontrol: $u_i = g\ (X, E(X,t),t)$

Yönlendirme: $X_i = f\ (X, E\ (X,t),t)$

Gelişmiş Yönlendirme: $f(X) = g\ (X, E(X,t),t)$

Tablo 1'de AIDL'e dahil edilmek üzere seçilen hareket kısıtlama türleri gösterilmektedir. M1 ve M2 tiplerinin kısıtlamaları kontrol kategorisine, M3 ila M6 tiplerinin kısıtlamaları yönlendirme kategorisine ve M7 ila M10 tiplerinin kısıtlamaları da gelişmiş yönlendirme kategorisine aittir. Bu tür hareket kısıtlamaları, hava trafik yönetimi (ATM) bağlamında anlamlı hava aracı davranışını ifade eden temel yapı taşlarıdır. [4]

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

Tablo 1. Hareket Kısıtlama Türleri (4)

Code	Generic mathematical	Generic mathematical
C1	$\delta_{HL} = c_1 (X,t)$	High Lift Devices
C2	$\delta_{SB} = c_2 (X,t)$	Speed Brakes
C3	$\delta_{LG} = c3 (X,t)$	Landing Gear
M1	$\delta_T = g(X,E(X,t),t)$	Throttle
M2	$\mu_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Bank Angle
M3	$V_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Speed
M4	$\gamma_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Path Angle
M5	$\chi_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Yaw Angle
M6	$h = g(X,E(X,t),t)$	Altitude
M7	$V_{TAS} \cos\gamma_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Horizontal Speed
M8	$V_{TAS} \sin\gamma_{TAS} = g(X,E(X,t),t)$	Vertical Speed
M9	$g(\lambda,\phi) = 0$	Horizontal Track
M10	$g(\lambda,\phi,h) = 0$	Vertical Track

AIDL'nin alfabesi 32 talimattan oluşmaktadır. Talimatlar, hava aracının operasyonunu yönlendirmek için uçuş yönetim sistemi veya uçuş kontrol yazılımının tarafından kullanılan kavramsal unsurlardır. Bu kavramlar sayesinde hava aracının komuta, yönelme modu ya da kontrol stratejisini modellenmektedir. AIDL alfabesinde kullanılan talimatlar Tablo 2'de gösterilmektedir. Bu talimatlar, temel uçuş parametreleri ve sistem dinamiklerini içerecek şekilde, hava araçlarının ATM bağlamında kullandığı farklı çalışma modlarının ayrıntılı analizlerinden elde edilmiştir. Talimatlar, Tablo 1'deki kısıtlama çeşitleriyle tutarlıdır. Dolayısıyla, Tablo 2'deki her talimat, Tablo 1'deki bir kısıtlama türüyle ilişkili olmak durumundadır. İlişkili olan kısıtlama türü, talimatın hareket denklemlerine uyguladığı cebirsel denklemin biçimini belirlemektedir. [5]

HARİCİ ETKENLER ALTINDA DRONLARIN BELİRLENEN ROTAYA UYUM KABİLİYETİ

Dron veya insansız hava aracı sistemlerinin harici etkenler altında önceden belirlenen rotada kalabilmelerini sağlamak sistem dinamikleri, bozucular ve belirsizlikler gibi unsurlar sebebiyle zorlu ve karmaşık bir problemdir. Dayanıklı kontrol yöntemi (robust control), insansız hava araçlarının gerçek fiziksel koşullarda istenmeyen bozucuların, belirsizliklerin ve sensör gürültülerinin etkilerini en aza indirerek uçuş yapmasını sağlamaktadır. [8] Kargo dronlar ve diğer insansız hava aracı sistemlerinin kontrol algoritmaları tasarlanırken sistemin kararlılığı (stability) ve güvenilirliği (reliability) en öncelikli konular arasında yer almaktadır. Görev bakımından kritik (mission critic) uçuşlar genellikle büyük belirsizliklere ve küçük boyutta kararlılık marjlarına sahip olduğu için, bu tip görevleri yapacak hava araçlarında dayanıklı kontrol sistemlerinin bulunması önem arz etmektedir. [9]

Geleneksel kayan kipli kontrol (SMC), geri adımlama ve diğer teknikler genel olarak ele alındığında, nonlineer (lineer olmayan) dinamiklere sahip olan ve zamana göre değişen sistemlere uygulanabilir oldukları gözlemlenmektedir. [10] Örneğin geri adımlamalı kontrol tekniği bir dronun hareketi hassas ve dayanıklı bir şekilde kontrol etmeyi sağlayan doğrusal olmayan bir yaklaşımdır. Bu teknik sistem

dinamiğini daha basit alt parçalara bölünerek her bir alt sistemin doğrusal olmayan dinamiğinin kontrol edilmesine dayanır. Kayan Kipli Kontrol (SMC), modellenmesi güç olan dinamiklere ve dış etkenlere karşı dayanıklılık sağlayan bir başka doğrusal olmayan kontrol yöntemidir. Bu yöntemde amaç, hava aracının rotasını belli bir kayma yüzeyine yerleştirmek ve rotanın bu yüzeyde kalmasını sağlamaktır. Hava aracının sistem dinamiğini kayan kip yüzeyi belirlemektedir. Kayma yüzeyi sisteme ait konum ve hız dinamiklerinin orantılı olarak kontrol edilmesini sağlamaktadır. [11]

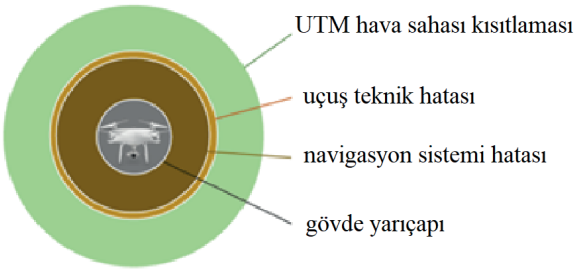
Dronların matematiksel olarak modellenebilmesi için sisteme ait aerodinamik, mekanik karakteristiklerin ve dinamikler ait parametrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Modelleme sürecinde, dron hareketi, pervane aerodinamiği ve eyleyici dinamiği gibi farklı unsurlar biraraya getirilmektedir. Yere göre yani sabit bir çerçeveye göre dronun konumu ve rotası (hareket yönü) kinematik denklemler ile temsil edilmektedir. Dinamik denklemler ise dron üzerindeki harici kuvvetleri ve harici momentleri içermektedir. Burada harici kuvvetler öteleme ivmesi ile harici momentler de dönme ivmesi ile belirtilmektedir. Dronların sahip olduğu rotor sayısına bağlı olarak sistem mimarileri farklılık göstermektedir. Bir dronun üç eksende hareketi, rotorların hızı değiştirilerek kontrol edilmektedir. Örneğin dört rotora sahip bir dronda sapma hareketi, iki karşıt rotor arasında hız farkı oluşturularak elde edilmektedir. Dikey eksende hareket için, tüm rotorların toplam hızları artırılır veya azaltılır. [12]

ÇARPIŞMADAN KAÇINMA VE ROTALARIN DAĞITIK MİMARİ İLE OLUŞTURULMASI

Kargo dronların belirlenmemiş hava sahalarında otonom olarak veya uzaktan kumanda ile sürüş yapabilmesi için engellerden ve diğer hava araçlarından kaçınması gerekmektedir. Bir drounun görevini başarıyla yerine getirebilmesi için uçuş emniyetini (flight safety) sağlaması gerekmektedir. Uçuş emniyetinin sağlanabilmesi için "Algıla ve Kaçın (Sense-and-Avoid)-(SAA)" sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler kooperatif (cooperative) ve kooperatif olmayan (non- cooperative) sistemler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. TCAS (Traffic Alert and Collision Avoidance System), ADS-B (Automatic Dependent Surveillance – Broadcast) ve ASAS (Airborne Separation Assurance System) gibi kooperatif olan sistemlerde hız, irtifa, mevcut konum ve yön gibi temel uçuş bilgileri diğer hava araçları ile paylaşılmaktadır. Algılama fonksiyonu için kullanılan elektro-optik (EO) kameralar, kızılötesi (IR) kameralar, Işık Algılama ve Mesafe Ölçme (LIDAR), radar gibi sistemer de kooperatif olmayan sistemlere örnek gösterilmektedir. Kaçınma fonksiyonunun devreye girmesi için algılanan nesne/hedef ile ilgili hız ve konum gibi parameterler değerlendirilmektedir. Değerlendirme sonucunda çarpışmanın meydana gelme olasılığı yüksek olduğu durumlarda kaçınma manevrası hesaplanmaktadır. [13]

Çarpışma önleme sistemlerinde binalar, kuleler veya elektrik direkleri gibi statik olan engeller için kesin ve net bilgiler bulunmaktadır. Dinamik engeller için de konum, hız ve yön bilgilerinin hesaplanmasını sağlayan mekanizmalara ihtiyaç duyulmaktadır. [14] Çarpışmadan kaçınma fonksiyonunun gerçekleştirilebilmesi için Çatışma Tespiti ve Çözümü (Conflict Detection and Resolution - CDR) yöntemleri kullanılmaktadır. Çatışma tespiti (CD), dronlar arasındaki olası yetersiz mesafeleri öngörmektir. Çatışma çözümü (CR) ise, dronların manevralar sayesinde diğer hava araçları ile arasındaki güvenli mesafeyi korumayı amaçlamaktadır. UTM bağlamında, ATM uygulamalarına benzer olarak çarpışmanın tespit edilebilmesi için dron çevresinde belli katmanlar hesaba katılmaktadır. Aşağıdaki görselde, dronun gerçek gövde yarıçapı, navigasyon sistemi hatası, uçuş teknik hatası gibi farklı belirsizlik marjlarını ve bir UTM hava sahası kısıtlaması olarak belirlenen minimum ayırma mesafesini temsil eden ekstra katmanlar gösterilmektedir. [15]

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2



Şekil 2. Çarpışma Tespiti ve Çözümü için kullanılan katmanlar (15)

Çatışma çözümü için genellikle hız, irtifa ve baş açısı parametrelerinin kontrolü sağlanmalıdır. Birden fazla dron için çatışma çözümü doğrusal (lineer) olmayan bir optimizasyon problemidir. Özellikle eşit hızlara sahip olmayan ve çarpışma riski bulunan dronlar için doğrusal olmayan rota optimizasyon yöntemleri kullanılmalıdır. [16]

Uçuş emniyetini sağlayabilmek için çarpışma tesipiti ve çözümü kapsamında kullanılan yöntemler iki başlıkta ele alınabilir. Bunlar merkezi ve merkezi olmayan CDR yöntemleridir. Merkezi olmayan CDR yöntemi iki hava aracı arasında anlık olarak çarpışmadan kaçınma fonksiyonunu iyi bir şekilde yerine getirir. Fakat hava aracı sayısı arttıkça merkezi CDR yöntemlerinin daha verimli olduğu belirtilmektedir. [17]

Hava trafik yönetimi bağlamında hava araçlarının uçuş sırasında operasyonel kriterleri veya hava sahası kısıtlamaları nedeniyle rotalarını optimize etmeleri gerekebilir. Geleneksel ATM konseptinde rotaların yeniden belirlenmesi ve uçakların yönlendirilmesi hava trafik kontrolörlerinin sorumluluğunda merkezi olarak sağlanmaktadır. Merkezi olarak rotaların hesaplanabilmesi için veri akışının doğru ve hızlı yapılması önemlidir. [18] Fakat hava trafiğinin kargo dronları kapsamında merkezi olarak yerden yönetilmesi günümüz koşullarında henüz gerçekleştirilememiştir. Dronlar yük kapasitesi, manevra kabiliyeti, pilot modu ve hava aracı boyutu bakımından insanlı uçaklardan farklıdır. [19] Dronlar arasındaki mesafeler uçaklarla kıyaslandığında çok daha küçük olduğu için rotalarının daha hızlı bir şekilde hesaplanması gerekmektedir. Böylece rotaların merkezcil değil dağıtık olarak oluşturulması anlık olarak aksiyon alınmasını ve gerçek zamanlı operasyonlar için daha elverişli bir rota optimizasyonu sağlamaktadır. [20]

SONUÇ VE TARTIŞMA

Bağımsız dronların rota optimizasyonu için hangi parametrik değerlerin dikkate alınması gerektiği ve AIDL tekniğinde yer alan kısıtlama türlerinden hangilerinin kargo dronlar için uygulanabilir olduğu bu makalede analiz edilmiştir. İnsansız hava trafiği bağlamında kargo dronların hava sahalarına entegrasyonu için bazı fiziksel kısıtlar belirtilmiştir. Bunlar bölgede aktif dron sayısı, sınırlı pil ömrü, dronun ağırlığı, yük kapasitesi, hava koşulları, çevresel koşullar, dronun aerodinamik yapısı, dronun hızı, uçuş yüksekliğinin ve bulunduğu hava sahasındaki trafik yoğunluğudur. Hareket kısıtlamaları zamanın fonksiyonları olduğu için zaman faktörü en önemli parametredir. AIDL tekniğinde kullanılan talimatlar ve doğrusal olmayan dayanıklı kontrol sistemleri sayesinde rota belirleme, rotaya uyum ve çarpışmadan kaçınma fonksiyonlarının güvenilir bir UTM oluşturması hedeflenmiştir. Özellikle hava trafiğinin yoğun olduğu ortamlarda uçuş emniyetini sağlayacak çarpışmadan kaçınma fonksiyonu kapsamında hangi CDR yöntemlerinin kargo dronları için kullanılabileceği de bu çalışmada incelenen konular arasındadır.

Bu çalışmanın sonucunda AIDL tekniğinde kullanılan talimatlar ve doğrusal olmayan dayanıklı kontrol sistemlerinden de faydalanarak çarpışma tespiti ve çözümü fonksiyonlarının gerçekleştirilmesinin mümkün olduğu değerlendirilmiştir. AIDL tekniğini tanımlamak için kullanılan hareket denklemlerinde yer alan bazı parametrelerin kargo dronlar için uyarlanması gerekmektedir. Örneğin, F anlık yakıt tüketimi olarak değil anlık tüketilen güç miktarı olarak ele alınmalıdır. Kargo dronların menzili yolcu uçaklarına göre daha düşük olduğu için meridyen ve eğrilikleri ile ilgili olan değişkenler (M ve N) de sabit olarak düşünülmelidir. Ayrıca C1, C2 ve C3 konfigürasyon kısıtlamaları büyük boyutlu uçaklar için geçerli olmaları sebebiyle rota hesaplamalarında sabit olarak alınmalıdır. M kodlu kontrol ve yönlendirme kategorisine ait olan kısıtlamalar kargo dronlar kapsamında ele alınmalıdır. M3, M5 ve M6 gibi hareket kısıtlamaları sayesinde dronların hız, baş açısı ve irtifa gibi parametreleri kullanılarak kooperatif olmayan bir çarpışmadan kaçınma çözümü uygulanabilir. UTM bağlamında çarpışmadan kaçınma fonksiyonunu gerçekleştirebilmek için dağıtık CDR yöntemlerinin kargo dronlar için daha uygulanabilir oldukları değerlendirilmiştir.

Bu makalenin kargo dronların yoğun hava sahalarında etkin bir şekilde operasyon yapabilmeleri için rota optimizasyonu konusunda yol gösterici bir çalışma olacağı düşünülmektedir. Gelecekte daha da artması beklenen insansız hava trafiği yoğunluğunun sağlıklı bir şekilde yönetilebilmesi için AIDL gibi farklı tekniklerin kargo dronları için uygulanabilir olmaları araştırılmalıdır. İnsansız hava araçları trafik yönetimi (UTM) ile ilgili genel kuralların belirlenmesi, hava sahasının etkin ve emniyetli bir şekilde kullanılması bakımından kritiktir. Ayrıca insansız hava aracı trafik yönetiminin (UTM) geleneksel hava trafik yönetimi (ATM) ile entegrasyonunun sağlanması konusu da Avrupa, Amerika ve Singapur gibi bazı Asya ülkelerinde çeşitli çalışmalar başlamış durumdadır. Hava araçları arasında ortak bir dil geliştirilmesine yönelik yeni tekniklerin CDR algoritmalarında kullanılması ile gelecekte havacılık sektöründe operasyonel veriimliliğin artırılması sağlanabilir.

KAYNAKÇA

[1] Ermiş M., Pakkan M. (2010). İnsansız hava araçlarının genetik algoritma yöntemiyle çoklu hedeflere planlanması, HHO Havacılık ve Uzay Teknolojileri Enstitüsü

[2] Abdelkefi A., Hassanalian M.(2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review, Prog. Aerosp. Sci., vol. 91, pp. 99–13. https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2017.04.003

[3] Elmas E. E. ve Alkan M. (2025). "Collision Avoidance for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles with Dynamic and Stationary Obstacles", Journal of Polytechnic, 28(1): 297-308

[4] López-Leonés, J. (2007). The Aircraft Intent Description Language, PhD Thesis, University of Glasgow, UK

[5] Lopez J., Vilaplana M., Gallo E., Navarro F, Querejeta C. (2007). The Aircraft Intent Description Language: A key enabler for air-ground synchronization in Trajectory-Based Operations, Conference: 26th Digital Avionics Systems Conference

[6] Shreepal, A. M., & Vijaya Kumar, S. H. (2021). Implementation and comparison of the Aircraft Intent Description Language and point-mass Non-Linear Dynamic Inversion approach to aircraft modelling in Modelica (Dissertation). Retrieved from https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-180928

[7] Gallo E., Navarro F. A., Swierstra S. and Vilaplana M. A. (2005). Towards a formal language for the common description of aircraft intent, 24th Digital Avionics Systems Conference, Washington, DC, USA, pp. 3.C.5-3.1, doi: 10.1109/DASC.2005.1563351.

[8] Zhang P. (2010). Advaced Industrial Control Technology

[9] Chen L., Liu Z., Dang Q., Wang G., Zhao W. (2022). Robust trajectory tracking control for a quadrotor using recursive sliding mode control and nonlinear extended state observer, Aerospace Science and Technology, 128: 107749

DOI: https://doi.org/10.30546/19023.978-9952-8553-0-2.2025.2034.
ISBN: 978-9952-8553-0-2

[10] Canpolat Tosun, D. (2024). Bir Quadrotorun Yörünge Takibinde Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Kontrol Yöntemlerinin Performans Değerlendirmesi. Politeknik Dergisi, 27(5), 1923-1936. https://doi.org/10.2339/politeknik.1219648

[11] Utkin V. I. (2013). Sliding modes in control and optimization. Springer Science & Business Media

[12] Nettari, Y. (2023). Lineer Olmayan Sistemler İçin Dayanıklı Kontrol Sistem Tasarimi, Doktora Tezi, YTÜ - Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

[13] Orefice M., Di Vito V., Torrano G., (2015) Sense and Avoid Systems and Methods, Encyclopaedia of Aerospace Engineering, vol. 9 UAS, Edited by John Wiley & Sons

[14] Dushime, K, Nkenyereye, L, Yoo, S & Song, JS 2021, A Review on Collision Avoidance Systems for Unmanned Aerial Vehicles. in 2021 International Conference on ICT Convergence (ICTC). IEEE, pp. 1150 - 1155, 12th International Conference on ICT Convergence, Jeju Island, Korea, Republic of, 20/10/21.

[15] Ho F., Geraldes R., Gonçalves A., Cavazza M. and Prendinger H. (2019). Improved Conflict Detection and Resolution for Service UAVs in Shared Airspace, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 68, no. 2, pp. 1231-1242, doi: 10.1109/TVT.2018.2889459.

[16] Yang J., Yin D., Niu Y., Zhu L. (2015). Unmanned aerial vehicles conflict detection and resolution in city airspace, China, DOI: 10.1109/ROBIO.2015.7419704

[17] Bilimoria K. D., Lee H. Q., Mao Z., Feron E. (2000). Comparison of centralized and decentralized conflict resolution strategies for multiple-aircraft problems, DOI: 10.2514/6.2000-4268

[18] Xue M. (2020) Urban Air Mobility Conflict Resolution: Centralized or Decentralized? NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA 94035, DOI:10.2514/6.2020-3192

[19] Yang J, Yin D, Niu Y, Zhu L. (2016). Cooperative conflict detection and resolution of civil unmanned aerial vehicles in metropolis. Advances in Mechanical Engineering. doi:10.1177/1687814016651195

[20] Yang J, Yin D, Cheng Q, Shen L, Tan Z. (2016) Decentralized cooperative unmanned aerial vehicles conflict resolution by neural network-based tree search method. International Journal of Advanced Robotic Systems. doi:10.1177/1729881416663371