

# İNSANSIZ HAVA ARAÇLARI İÇİN ÇOK KRİTERLİ GÜZERGAH PLANLAMA MODELİ

**Halil Cicibas, Kadir Alpaslan Demir, Nafiz Arica**

Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Deniz Harp Okulu, Tuzla/İSTANBUL

{ hcicibas,kademir,narica } @dho.edu.tr

## ÖZ

Bu bildiri Orta İrtifalarda Uçuş ve Uzun Havada Kalış İmkanına Sahip İnsansız Hava Araçları (Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles-MALE UAVs) için geliştirilen çok kriterli güzergah planlama (multi-criteria path planning) modeli anlatılmaktadır. Önerilen model yardımıyla insansız hava araçlarının uçuş kabiliyetlerini, temel havacılık kurallarını, ortam dinamiklerini dikkate alarak insansız hava araçları için mesafe, süre, yakıt tüketimi açısından optimal güzergahlar planlanabilmektedir. Ayrıca model, uçuş öncesi (offline) ve uçuş esnasında (online) güzergah planlamalarının dinamik olarak yapılabilmesine imkan tanımaktadır. Bu çalışmanın diğer güzergah planlama çalışmalarından farkı, operasyonel ortam faktörlerini de içine alan daha fazla sayıda uçuş kriterinin planlamada dikkate alınmasıdır. Geliştirdiğimiz model sayesinde İHA'larının otonom ve operatör kullanımlı uçuşlarında temel havacılık kurallarına uygun, etkin ve emniyetli güzergahlar planlanabilmesine olanak sağlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız Hava Araçları, Çok kriterli güzergah planlama, Modelleme, Simülasyon

## MULTI-CRITERIA PATH PLANNING MODEL FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

### ABSTRACT

In this paper, we present a multi-criteria path planning model for Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles (MALE-UAVs). The model aids in offline and online planning of optimal paths in terms of time, distance and fuel consumption, while considering UAV performance limitations, basic aviation rules and dynamics of operational environments. In addition, our model enables dynamic path planning. Compared to other studies, our model consists of more flight criteria including operational environment factors. With the help of proposed model, autonomous and operator controlled flights may be planned effectively, and safely.

**Keywords:** Path planning, Unmanned Aerial Vehicles, Multi criteria planning, Modeling, Simulation

## 1. GİRİŞ

İnsansız hava araçları (İHA), yakın zaman içerisinde gerek sivil gerekse askeri kullanım alanlarındaki en gelişmiş sistemler arasında yerlerini almışlardır. Bu araçların üretilmesi ve teknolojilerinin geliştirilmesi yönünde birçok çevreler tarafından önemli mühendislik atılımları gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmaların birçoğunun ana hedefi bu sistemlerin daha emniyetli otonom uçuşlar gerçekleştirmelerini sağlamaktır.

Literatürde, İHA'larının otonomluk alanındaki çalışmalar hiyerarşik olarak birbirinden ayrılabilir [24]. Bu çalışmalar, [24]'de yer alan İHA'larında Akıllı Karar Verme Mimarisi (*UAS Intelligence Decision Making Architecture*) ile gruplanabilir. Belirtilen mimari yapı, temel olarak 4 ana katmana ayrılmaktadır. İlk katmanda yer alan çalışmalar uçuş sırasında oluşabilecek hataların en aza indirilmesini ve giderilmesini hedeflemektedir. İkinci katmandaki çalışmalar ise aviyonik alanındadır. Bu çalışmaların ana hedefi uçağın 3 boyutlu uzayda anlık hareketlerini planlamaktır. Üçüncü katmanda yer alan çalışmalar ise otonom güzergah planlama üzerinedir. Bu katmandaki çalışmaların amacı başlangıç ve varış noktaları arasında İHA'nı etkin şekilde yönlendirmektir. Son katmandaki çalışmalar ise İHA'nın görev amaçları ve kısıtları, diğer unsurların hareketleri ve durumsal farkındalık bilgilerine istinaden daha üst seviyede yapılan planlamalara yöneliktir. Bildiride anlatılan çalışma ise üçüncü katmanda bulunan otonom güzergah planlama (Autonomous Path Planning) alanındaki hususlara odaklanmaktadır. Ancak, geliştirdiğimiz model, dördüncü katmanda yer alan daha üst seviyedeki bazı uygulamalar (görev planlaması gibi) için de kullanılabilir.

İHA'larında güzergah planlama, uçuş başlangıç noktasından varış noktasına erişene dek çeşitli kısıtlar altında üzerinden geçilecek noktaların belirlenmesi olarak nitelendirilebilir. Otonom güzergah planlama alanındaki yapılan çalışmalarda İHA'nın performans kabiliyetleri, operasyonel ortam şartları, temel uçuş kuralları ve görev nitelikleri gibi kriterleri dikkate almak, İHA'larının kendilerine verilen görevleri etkinlikle icra etmelerine katkı sağlayacaktır. Gerçeğe yakın faktörlerin güzergah planlamalarına dahil edilmesiyle İHA'larının daha emniyetli ve daha güvenilir otonom uçuşlar gerçekleştirebilecekleri öngörülmektedir. Ayrıca bu faktörlerin dikkate alınması, uçuş öncesinde daha gerçekçi planlamaların yapılmasını sağlayacağı değerlendirilmektedir.

Literatürde yer alan güzergah planlama çalışmalarında [6-22] yer alan kriterler ve maliyet kısıtları, problem alanındaki hususlar dikkate alınarak belirlenmektedir. Tehdit faktörü, hareketli engeller, coğrafi yapı gibi kriterler ile mesafe, süre gibi maliyet kısıtları bu çalışmaların birçoğunda yer almaktadır. Bu çalışmalar arasında, [6]'da yapılan çalışma, İHA'ların sivil amaçlarla kullanılabilmesini sağlayacak gerçek zamanlı ve çok kriterli güzergah planlama yaklaşımı sunmaktadır.

Bu çalışmanın diğer güzergah planlama çalışmalarından farkı, operasyonel ortam faktörlerini de içine alan daha fazla sayıda uçuş kriterinin planlamada dikkate alınmasıdır. Benzer çalışmalarda yer alan kriterler ve maliyet kısıtları ile çalışmamızda yer alan kriterler ve maliyet kısıtları Tablo 1’de karşılaştırılmaktadır.

Bildiride yer alan model, İHA’ların kullanım konseptlerinin [23] analiz edilmesi ile geliştirilebilirlik prensiplerine uygun olarak oluşturulmuştur. Araştırma sonuçlarının diğer araştırmalarda da rahatlıkla tekrar edilebilmesi amacıyla çalışma esnasında açık kaynaklardan erişilebilecek yazılım geliştirme ortamlarının ve verilerinin kullanılmasına özen gösterilmiştir.

Tablo 1: Uçuş Kriterleri ve Maliyet Kısıtları

Uçuş Kriterleri (Flight Criteria)	[11]	[13]	[21]	[9]	[20]	[6]	Geliştirilen Model
Coğrafi yapı	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Mimari yapılar	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Tehlikeli bölgeler	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Var
Emniyet irtifaları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Hava Sınıf Ayrımları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Yok***
Rota-irtifa ayrımları	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Hareketli Unsurlar	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Bulut	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Hareketli Hedefler	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var
Yerdeki Hareketli Tehditler	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Var
Rüzgar	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
3-Boyut	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
<b>Uçuş Maliyet Kısıtları (Flight Objectives)</b>							
Uçuş Mesafesi	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Uçuş Süresi	Yok	Var	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Yakıt Tüketimi	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
Risk/Tehdit/Gizlilik	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Yok**
Güzergah Düzlüğü	Yok	Yok	Yok	Var	Yok	Yok	Yok

\* Uçuş maliyetlerine etki edecek şekilde modellenmiştir.

\*\* Uçuş kriteri olarak modellenmiştir. Tehditli alanlara kesinlikle İHA girmemektedir.

\*\*\* Çalışmamızdaki operasyonel ortamda İHA’nın herhangi bir hava sınıf ayrımına uymasına gerek yoktur.

Bildirinin ikinci bölümünde, çok kriterli güzergah planlama modeline; üçüncü bölümde, modelin geliştirilmesinde kullanılan araçlar ve simülasyon sonuçlarına ilişkin hususlara; son bölümde ise sonuç ve değerlendirmelere yer verilmektedir.

## 2. ÇOK KRİTERLİ GÜZERGAH PLANLAMA MODELİ

Modelimizde İHA’nın uçuşunu gerçekçi ve emniyetli bir şekilde tamamlayabilmesi için çeşitli uçuş kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterler [6]’da belirtilen kriterler ile çalışma kapsamında belirlediğimiz kriterlerin birleşiminden oluşmaktadır. Ayrıca bulut ve hareketli hedefler İHA alanında ilk defa bu çalışmada uçuş kriteri olarak kullanılmıştır. Modelin amacı çeşitli uçuş kısıtları altında en az maliyetli güzergahları planlamaktır. Çalışma kapsamında dikkate aldığımız uçuş kriterleri şunlardır:

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sabit Kriterler <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Coğrafi yapı</li> <li>○ Mimari yapılar</li> <li>○ Tehditli bölgeler</li> <li>○ Emniyet irtifaları</li> <li>○ Rota-irtifa ayrımları</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dinamik Kriterler <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Hareketli Unsurlar</li> <li>○ Bulut</li> <li>○ Hareketli Hedefler</li> <li>○ Yerdeki Hareketli Tehditler</li> <li>○ Rüzgar</li> </ul> </li> </ul>
---	---

Güzergah planlama esnasında dikkate alınan bu kriterler sabit ve dinamik olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Sabit kriterlerin değerlerinde uçuş boyunca değişiklik olmadığı kabul edilir. Bu kriterlerin değerleri veya mevkileri hesaplama öncesinde belirlenir ve hesaplama süresince değiştirilmeden kullanılır. Dinamik kriterler ise zamana bağlı olarak değerlerinde veya mevkilerinde ölçülebilir değişimler yaşanan kriterlerdir. Bu tip kriterlerin değerleri veya mevkilerindeki değişimler gerçek zamanlı olarak güncellenmektedir. Güzergah planlama hesabı 3 boyutlu arama uzayında yapılmaktadır. Arama uzayının yaratılmasında ızgara (grid) yapısı kullanılmıştır.

Güzergah planlamada, kriterler ve temel uçuş gereksinimleri belirlendikten sonra hesaplama geçilmektedir. Çalışma kapsamında kolay uygulanabilirliği, bütünlüğü (*completeness*) ve optimal sonuçlar üretmesi nedeniyle A\* sezgisel arama algoritması tercih edilmiştir.

## 2.1. Uçuş Kriterleri

Bu kısımda modelde kullanılan uçuş kriterleri incelenecektir. Bildiride yer alan kriter modellerinin uçuş öncesi planlama safhasında İHA yer kontrol istasyonları tarafından; uçuş safhasında ise İHA'nın sensör ve cihazları ile oluşturulabildiği kabul edilmiştir. Bu varsayım, İHA'larının günümüz ve gelecek teknolojik gelişimleri göz önüne alındığında geçerli bir varsayım olarak kabul edilebilir.

### 2.1.1. Sabit Uçuş Kriterleri

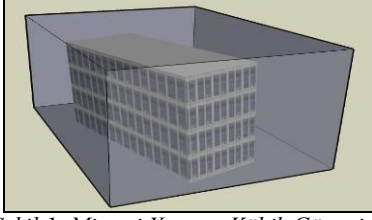
Sabit uçuş kriterlerinin maliyetleri zamana bağlı olarak değişmez. Bu nedenle kriter maliyetlerinin sadece bir defa hesaplanması yeterli olacaktır. Tüm uçuş süresince dikkate alınan kriter maliyeti aynıdır.

Coğrafi Yapı: Coğrafi yapı, eş yükselti eğrilerinin bulunduğu sayısal haritalardan faydalanılarak 3 boyutlu uzaya aktarılmıştır [5]. Arama uzayında coğrafi yapılar erişilemez alanlar olarak tanımlanmaktadır.

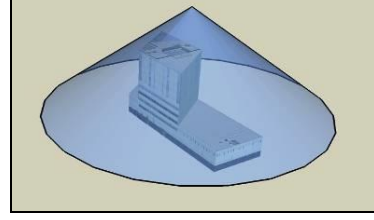
Mimari Yapılar: Uçuş öncesinde bu yapılar, varsa veritabanlarından yoksa kullanıcı tarafından arama uzayına dahil edilmektedir. Uçuş esnasında ise bu yapıların İHA tarafından algılanarak sayısal verilere otomatik çevrildiği varsayılmaktadır. Çalışmada, mimari yapılar özelliklerine bağlı olarak kübik veya konik alanlar olarak temsil edilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2).

Tehditli Bölgeler: Tehdit kriteri, insansız hava aracının uçuşunu ya da görevin etkinlikle icrasını engelleyebilecek her türlü unsuru kapsamaktadır. Bu kriterin hesaplanmasında

tehdit oluşturabilecek unsurların mevki bilgilerinin daha önceden tespit edildiği kabul edilmektedir. Tehditli bölgeler küresel alanlar ile temsil edilmiştir (Şekil 3).



Şekil 1: Mimari Yapının Kübik Gösterimi



Şekil 2: Mimari Yapının Konik Gösterimi

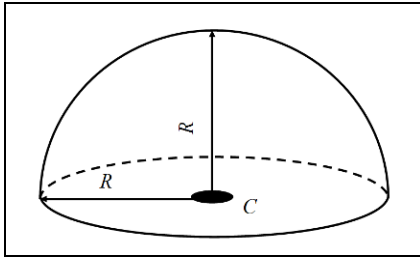
**Emniyet İrtifası:** Emniyet irtifası, İHA'nın herhangi bir coğrafi engele çarpmasını engellemek amacıyla belirlenen asgari uçuş yüksekliğini belirtmektedir. Açık kaynaklardan elde edilen İHA kullanım konseptlerine göre emniyet irtifası 5000ft. olarak belirlenmiştir.

**Rota-İrtifa Ayrımı:** Bu kriter, havada farklı yönlerde ilerleyen hava araçları arasında oluşabilecek çatışmaları önlemek amacıyla havacılıkta kullanılan temel kurallardan biridir. Bu kriter kapsamında rotası  $0^\circ$  ile  $179^\circ$  arasında olan araçların tek sayı ile başlayan irtifalarda (Ör. 1000ft, 3000ft, 5000ft..); rotası  $180^\circ$  ile  $359^\circ$  arasında olanların ise çift sayı ile başlayan irtifalarda (e.g. 2000, 4000, 6000ft ...) uçuşmasına izin verilmektedir.

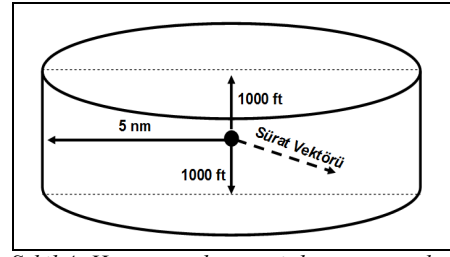
### 2.1.2. Dinamik Uçuş Kriterleri

Bu kriterlerin maliyetleri ve mevkileri zamanla değişmektedir. Her bir kriterin maliyeti ve mevkisi İHA varışa gelene kadar güncellenir. Güncelleme işlemi, sensör verileri ya da geçmiş bilgilere göre yapılır.

**Hareketli Unsurlar:** Operasyonel ortamdaki diğer unsurlar ile İHA arasındaki çatışmayı önlemek amacıyla Rota-İrtifa Ayrım kuralına ilave tedbirler kullanılmalıdır. Bu yaklaşımda, diğer hava araçları silindirik yapılar olarak modellenmektedir (Şekil 4). Hava ayırımının belirlenmesi dikey ve yatay ayırım mesafeleri ile ilerleme vektörüne bağlı olarak yapılmaktadır. Modelde dikey ayırım mesafesi 2000 ft, yatay ayırım mesafesi 5 deniz mili (nm) olarak belirlenmiştir.



Şekil 3: Tehditli alanlar (R=menzil, C=tehdit merkezi)

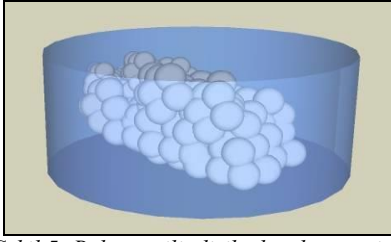


Şekil 4: Hava unsurlarına ait hava ayırım alanı

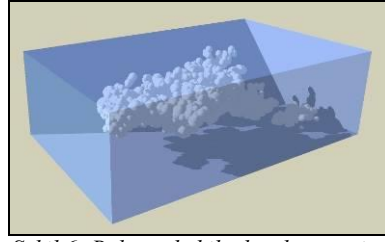
**Hareketli Hedefler:** İHA'nın tespit edeceği hedeflerin hareketli olması, yapılan hesaplamaların çeşitli öngörülere dayanması ve sürekli güncellenmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bildiride yer alan modelde İHA, hedefe ait bilgiler değiştikçe güzergahını güncelleyebilmektedir. Modelde, İHA'larının hedef mevkinde değişimleri

takip edebildiği kabul edilmiştir. İHA, güzergah planlama esnasında hedefin mevcut mevkisi yerine hedef ile buluşma anındaki hedefin muhtemel mevkisini dikkate alır. Böylece İHA, kendisi ile hedefi buluşturan en az maliyetli güzergahı hesaplayarak gereksiz uçuş güzergahları izlememiş olur.

**Bulut:** Bulutlar, İHA'larının görevlerini icra etmelerini kısmen engelleyebilecek yapıda yada mevkide olabilirler. Modelde, tespit edilecek hedef mevkisi üzerinde bulut mevcutsa İHA'nın hedefin bulunduğu bölgeye yaklaştığında bulutun altına inmesi sağlanmaktadır. Diğer bölgelerde ise İHA'nın bulut içinden geçmesine izin verilebilmektedir. Bulutların tespiti, yer kontrol istasyonu ya da İHA'nın sensörleri ile yapılabilir. Bulutların 3 boyutlu gösterimi Şekil 5 ve 6'da sergilenmiştir.



Şekil 5: Bulutun silindirik olarak gösterimi



Şekil 6: Bulutun kübik olarak gösterimi

**Yerdeki Hareketli Tehditler:** Sabit kriterlerde açıklanan tehditler kriteri ile benzer şekilde modellenen ancak hareketli olup İHA'nın uçuşunu tehdit edebilecek yerdeki unsurlardır.

**Rüzgar:** Rüzgar kriteri İHA'nın yere göre olan anlık sürat vektörünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Rüzgara bağlı olarak İHA'nın sürati ve harcanan yakıt miktarı değişebilmektedir. Rüzgarın maliyetlere etkisi sonraki bölümde detaylandırılmaktadır.

### 2.1.3. Uçuş Maliyetleri

Uçuş maliyetleri, yukarıdaki kriterler göz önüne alınarak hesaplanan güzergahın izlenmesi sonucunda ortaya çıkan toplam maliyet değeridir. Uçuş maliyetleri görev nitelikleri, kullanıcı gereksinimleri gibi faktörlere bağlı olarak belirlenebilir. Amaç fonksiyonuna bu maliyetler tek olarak (1) ya da diğer maliyetler ile ağırlıklı olarak dahil edilebilirler (2). Amaç fonksiyonunun ağırlıklı olması halinde maliyetlerin sahip olduğu ağırlık değerlerinin belirlenmesi hassaslıkla yapılmalıdır. Çalışmamızda 3 adet uçuş maliyeti dikkate alınmıştır. Bu maliyetler bildirinin hazırlandığı dönemde tek olarak amaç fonksiyonuna ilave edilmektedir. Ancak, çalışmanın sonraki dönemlerinde çok maliyetli (multi-objective) olarak algoritmanın çalıştırılması planlanmaktadır. Bildiride yer alan maliyetleri mesafe, süre ve yakıt tüketimi gibi sıralayabiliriz:

$$F(x)=\min(f_{\text{mesafe}}(x)) \text{ veya } F(x)=\min(f_{\text{süre}}(x)) \text{ veya } F(x)=\min(f_{\text{yakıt}}(x)) \quad (1)$$

$$F(x)=\min(w_1.f_{\text{mesafe}}(x)+w_2.f_{\text{süre}}(x)+w_3.f_{\text{yakıt}}(x)) \quad (2)$$

$w_{1,2,3}$  : Maliyet ağırlığı  
 $f_{\text{mesafe}}(x)$  : Mesafe maliyeti

$f_{\text{süre}}(x)$  : Süre maliyeti  
 $f_{\text{yakıt}}(x)$  : Yakıt maliyeti

**Mesafe:** Literatürde yer alan güzergah planlama çalışmalarının çoğunda mesafenin amaç fonksiyonu olarak kullanılmasının nedeni mesafenin temel bir karşılaştırma ölçütü

olması ve diğer maliyet tiplerine temel oluşturmasıdır. Bu nedenle biz de çalışmamızda mesafeyi bir maliyet tipi olarak ele aldık. Çalışma kapsamında mesafe maliyeti, başlangıç düğüm ile varış düğümünü birleştiren en kısa hat üzerindeki düğümlerin belirlenmesine dayanmaktadır.

Süre: Bir düğümden diğer bir düğüme varış süresinin en aza indirilmesi zaman-kritik uçuşlarda önemli bir husustur. Süre maliyeti, rüzgar ve ilerleme vektörü ile düğümler arası mesafeye bağlı olarak hesaplanır. Rüzgar hızı ve yönü, İHA'nın rotası ve süratinde değişikliklere yol açarak uçuş süresini etkilemektedir. İHA'nın uçuşu boyunca motor süratının ortalama 60 mil/saat olduğu kabul edilmiştir. Bu varsayım alan uzmanlarıyla yapılan görüşmeler neticesinde elde edilen bilgiler ışığında yapılmıştır. Son faktör olan düğümler arası mesafeye ilişkin hususlar bir önceki kısımda anlatıldığı gibidir. Düğümler arasındaki uçuş süresi bahsedilen değişkenlere bağlı olarak (3) ile hesaplanır. İHA'nın toplam uçuş süresi ise (4) ile hesaplanır.

$$\tau(s, s') = \frac{d(s, s')}{|\overline{V_c} + \overline{V_w}|} \quad (3) \quad t(s') = t(s) + \tau(s, s') \quad (4)$$

d : Düğümler arası mesafe,  
V<sub>c</sub> : İHA motor sürati,  
V<sub>w</sub> : Rüzgar sürati

t(s) : Varış düğümüne uçuş süresi  
τ(s,s') : Düğümler arası uçuş süresi  
s' : Çocuk düğüm  
s : Ata düğüm

İHA'nın havaya göre olan süratının hesaplanmasında motor ve rüzgar süratının vektörel toplamı kullanılmaktadır. Ancak, rüzgarın sadece 2 boyutta İHA üzerine etki ettiği kabul edilerek dikey düzlemdeki bileşke vektörlerinin etkisinin yok sayılabileceği kabul edilmiştir. Yere göre olan hız vektörünün hesaplanmasında da kosinüs teoremi kullanılmıştır.

Yakıt Tüketimi: Yakıt tüketiminin oranı İHA'nın havada kalış süresini etkilemektedir. Birim zamandaki yakıt tüketimine irtifa ve sürat başta olmak üzere birçok faktör etki eder. Bu faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz [6].

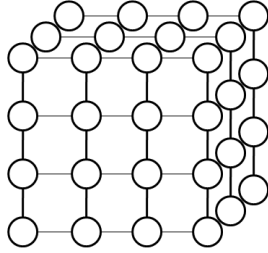
- İrtifa (Basınç)
- İHA Ağırlığı
- Sürat
- Tırmanış ve Alçalış Açıları
- Sıcaklık
- İHA motor özellikleri

Açık kaynaklardan MALE tipi İHA için herhangi bir yakıt modeline erişilememiştir. Bu nedenle geliştirilen model yapısında EngineSim [1] ortamında yer alan yakıt tüketim modellerinden dönüşüm yapılmıştır. EngineSim, NASA tarafından geliştirilmiş motor performans analizine imkan veren model tabanlı değerlendirme ortamıdır.

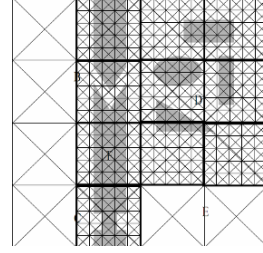
## 2.2. Ortam Benzetimi ve Arama Uzayı

Bu kısımda, İHA'nın faaliyet gösterdiği operasyon ortamının önceki bölümlerde belirtilen uçuş kriterleri de göz önüne alınarak 3 boyutlu arama uzayına dönüştürülmesi anlatılmaktadır. Arama uzayının oluşturulmasında uçuş kriterleri, İHA uçuş kabiliyetleri, temel görev nitelikleri, uçuş maliyetleri dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında oluşturulan 3 boyutlu arama uzayı çok-çözünürlüklü [25] olarak

tasarlanmıştır. Arama uzayı içinde bulunan düğümler arası mesafeler İHA'nın uçuş kabiliyetlerine istinaden belirlenmiştir. Arama uzayı olarak adlandırdığımız yapı, birçok düğüm ve düğümler arasındaki ilişkilerden oluşan 3 boyutlu ızgara modeline sahiptir (Şekil 7). Oluşturulan çok çözünürlüklü arama uzayının gösterimi Şekil 8'de yer almaktadır. Çok çözünürlüklü haritalar belirli oranda hesaplama karmaşıklığı ve zamanını azaltarak, gerekli hassasiyette güzergahların planlanmasını sağlamaktadır.

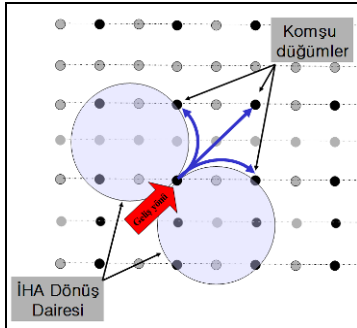


Şekil 7: Düğümlerden Oluşan Arama Uzayının Görünümü

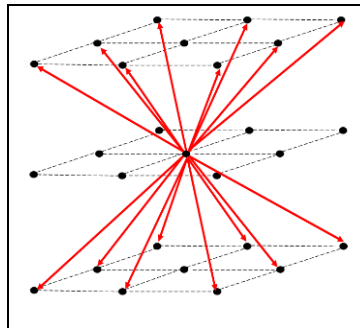


Şekil 8: Çok Çözünürlüklü Arama Uzayının 2 Boyutlu Görünümü

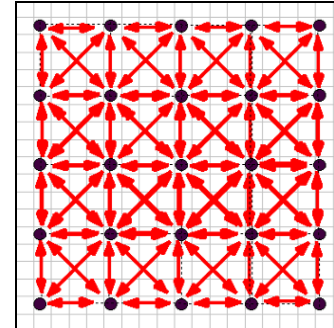
Düğümler arasındaki asgari mesafelerin belirlenmesinde İHA'nın dönüş çapı ile tırmanış ve iniş açıları dikkate alınmıştır. Dönüş çapı, yatay düğümler arasındaki; tırmanma ve iniş açısı ise dikey düğümler arasındaki mesafeyi etkilemektedir. Dönüş çapı 1 nm olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler dikkate alınarak düğümler arasındaki mesafelerin seçilmesinde ve düğümler arasındaki komşulukların belirlenmesinde [7]'de belirtilen model kullanılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9: İHA performans kabiliyetlerine göre komşulukların belirlenmesi [7]



Şekil 10: Dikey düğümler arasındaki komşuluk ilişkileri



Şekil 11: Yatay düğümler arasındaki komşuluk ilişkileri

Dönüş çapı dikkate alınarak yatay düğümler arasındaki asgari mesafe 1 nm; tırmanış ve iniş açısı dikkate alınarak da dikey düğümler arasındaki asgari mesafe 1000ft olarak belirlenmiştir. Arama uzayındaki her bir düğümün 3 boyutta toplam 24 adet komşusu bulunmaktadır. Şekil 10'da dikey düğümler arasındaki, Şekil 11'de ise yatay düğümler arasındaki ilişkiler gösterilmiştir.

### 2.3. İnsansız Hava Aracı Modeli

Model kapsamında kullanılan İHA'nın sahip olduğu cihazlar, sensörler, fiziksel kabiliyetler ve kısıtların belirlenmesinde, genel MALE tipi insansız hava araçlarının özellikleri baz alınmıştır. Modellenen İHA'na ait temel özellikler Tablo-2'de yer almaktadır.



Tablo 2: İHA Temel Özellikleri

Fiziksel Özellikleri			
Uzunluk	30 m	Kanat Genişliği	50 m
Ağırlık	2.500 lb	Yük Kapasitesi	500 lb
Performans Özellikleri			
Havada Kalış Süresi	24 saat	Max/İlerleme Sürati	120 kts, 60 kts
Azami Uçuş İrtifası	30.000ft	Kullanım çapı	200nm
İlerleme Süratinde Yakıt Tüketimi (60 kts - 20000 ft)	29,16 lb/saat	Tımanma Yakıt Tüketimi İniş Yakıt Tüketimi	48,52 lb/saat 14,58 lb/saat
Dönüş Çapı	1 nm	Tımanma Sürati	1000ft/dk

### 3. SİMÜLASYON

Bu bildirimizdeki odağımız İHA'ları için operasyonel ortamda dinamik güzergah planlama modeli geliştirilmesidir. Modelimizin geçerliliğini test etmek için simülasyonlar yapılmıştır. Bu bölümde yapılan simülasyonlara ilişkin genel hususlar kısaca anlatılmaktadır.

#### 3.1. Kullanılan Araçlar

Modelin kodlanmasında Java programlama dili kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda SimKit [3] kütüphanesi ve OpenMap [4] ortamından faydalanılmıştır. Çalışma kapsamında yaratılan modellerin sonraki çalışmalarda tekrar kullanılabilirliğini ve çalışmanın sonraki dönemlerde hızlıca geliştirilebilmesine kolaylık sağlaması amacıyla Java dili seçilmiştir. SimKit kütüphanesi Naval Postgraduate School, A.B.D., tarafından geliştirilmiş ve Java dilinde yazılmış kütüphanelere sahip ayrıık olay simülasyon aracıdır. OpenMap ise BBN Technologies tarafından geliştirilmiş, açık kaynak koduna sahip, çeşitli harita işlemlerine imkan tanıyan, Java platformu üzerinde çalışan ve görsel desteği bulunan bir ortamdır.

#### 3.2. Simülasyon Altyapısı

Simülasyonlar Şekil-12'de belirtilen akış şemasını takip ederek çalışmaktadır. Bu akış şeması iki kısımdan oluşur. İlk kısımda statik ve dinamik kriterlerin değerleri ve konumları belirlenerek arama uzayına dönüştürölür ve arama işlemleri gerçekteşirilir. İkinci kısımda ise dinamik kriterlerin değerleri ve konumları güncellenerek arama uzayı güncellenir. İkinci kısım sayesinde gerçekte zamanlı olarak güzergah planlanmış olur. Dinamik kriterlerin ortamdaki hareketleri belirlediğimiz rota ve sürate bağlı olarak SimKit kütüphanesi yardımı ile kontrol edilmektedir.

#### 3.3. Arama Algoritması

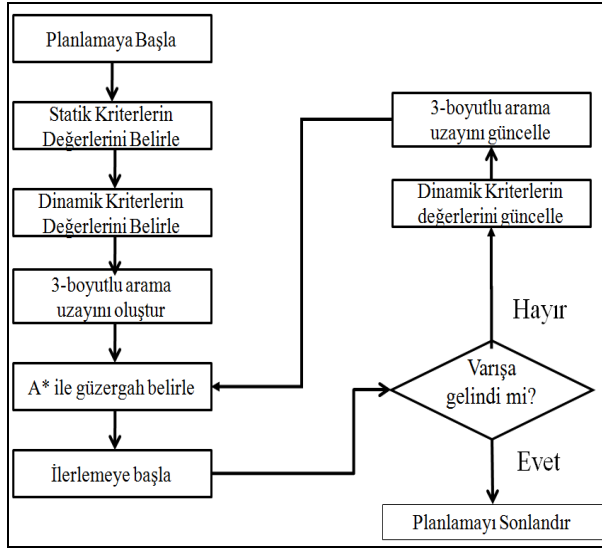
Uçuş öncesi planlama safhasında ve gerçekte zamanlı uçuş esnasında güzergah, A\* sezgisel arama algoritması ile hesaplanmıştır. Sezgisel arama algoritmaları birçok alanda kolay uygulanabilirliği nedeniyle güzergah planlamada sıklıkla kullanılmaktadır [2]. A\* arama algoritmasına ait amaç fonksiyonu  $f(x)$ , (5)'de belirtilmektedir.  $g(x)$  başlangıç düğümünden o anki düğüme  $x$ , geliş maliyetini gösterirken  $h(x)$  varışa olan sezgisel maliyeti ifade etmektedir.

$$f(x) = g(x) + h(x) \quad (5)$$

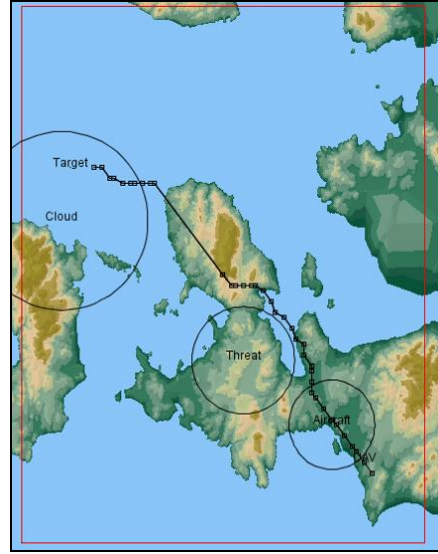
A\* algoritması, sezgisel arama algoritmaları arasında en yaygın kullanılan algoritmalar arasında yer almaktadır. A\* algoritması kabul edilebilir sezgisellerle çalıştırıldıklarında optimal sonuçlar bulmaktadır. Çalışmada, geniş bir kitle tarafından kullanılmış olması ve aramayı başlangıçtan varışa doğru (forward) yapmasından dolayı A\* arama algoritması tercih edilmiştir. A\* algoritması haricinde gerçek zamanlı planlama gerektiren ortamlarda kullanılabilen çeşitli sezgisel arama algoritmaları da bulunmaktadır. Ancak bu algoritmaların bir kısmı (*D\* Lite* gibi) varıştan başlangıca doğru (backward) çalışır. Bu nedenle söz konusu algoritmalarla modelimizdeki dinamik kriterler dikkate alınarak güzergah planlamak mümkün değildir. Sezgisel arama algoritmaları hakkında geniş bilgi [2]'de yer almaktadır.

### 3.4. Simülasyon Sonuçları ve Analiz

Model kriterleri dikkate alınarak statik ve dinamik olmak üzere 2 temel senaryo belirlenmiştir. Statik ortamda kriterlerin bir kısmı kullanılırken dinamik senaryoda ise tüm kriterler kullanılmıştır. Belirtilen senaryolar, varsayımlar ve altyapı kullanılarak mesafe, süre ve yakıt tüketimi maliyet kısıtlarına göre benzetim yapılmıştır. Simülasyona ilişkin ekran görüntüsü Şekil 13'de yer almaktadır.



Şekil 12: Simülasyon Akış Şeması



Şekil 13: Simülasyona İlişkin Ekran Görüntüsü

Simülasyonlar 2.93GHz Intel i5 işlemcili 3GB RAM ve 64-bit Windows 7 işletim sistemi yüklü bilgisayarda yapılmıştır. Simülasyonlar neticesinde güzergah hesaplama süresinin statik ortamlarda 10 saniyenin, dinamik ortamlarda ise 40 saniyenin altında olduğu tespit edilmiştir. Ancak benzetim hesaplama süresi, arama uzayının boyutu, ortamdaki engel sayısı, arama algoritması gibi birçok faktöre bağlıdır. Aynı senaryo üzerinde benzetim yapılmadığı sürece diğer çalışmalarla sağlıklı bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir. Modelimizin içerdiği kriter sayısı diğer çalışmalardan daha fazladır (Tablo 1).

Simülasyonlar neticesinde genel olarak elde edilen sonuçları aşağıdaki gibi:

- Modelin, İHA'larında çok kriterli güzergahlar planlama için kullanılabilceği,
- Modelin çeşitli uçuş kriterlerini gözeterek beklenen uçuş maliyetlerini karşılayacağı,

- Ortam benzetimi ve arama uzayının kolayca geliştirilebilir ve değiştirilebilir şekilde tasarlanıp kodlanabildiği,
- Güzergah planlanma süresine çok çözünürlüklü yapının olumlu yönde etki ettiği,
- Kriter sayısının ve değerlerinin hesaplama süresini ve maliyetleri etkilediği tespit edilmiştir.

#### **4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME**

Bildiride, MALE tipi İHA'ları için geliştirdiğimiz çok kriterli güzergah planlama modeli anlatılmıştır. Bu modelde kullanılan uçuş kriterlerinin bir kısmı literatürdeki mevcut uçuş kriterlerinden seçilmiş bir kısmı ise bu çalışma kapsamında ilk defa belirlenmiştir. Çok kriterli güzergah planlama modeli sayesinde İHA için emniyetli ve daha gerçekçi kriterler kullanılarak güzergahların planlanması yapılabilmektedir. Arama uzayının ızgara (grid) yapısında oluşturulması kriterlerin kolayca modele ilave edilmesini sağlamıştır. Bunun yanında arama uzayının çok çözünürlüklü yapıda kullanılması hesaplama zamanını önemli oranda azaltmaktadır. Ancak, operasyonel ortam genişledikçe arama uzayının büyüklüğü artmakta ve ızgara yapısının yüksek bellek ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Arama algoritması olarak A\* algoritmasının seçilmesi, optimal sonuçların elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca modelin Java platformu üzerinde geliştirilmiş olması açık kaynaklı araçlardan faydalanılmasına imkan tanımıştır.

Önerilen modelin nesneye yönelik tasarım teknikleri ile üretilmesi, sonraki çalışmalarda modelin kolayca geliştirilmesine imkan sağlayacağı değerlendirilmektedir. Gelecek çalışmalarda uçuş kriterlerinin ihtiyaçlara bağlı olarak arttırılması, gerçek İHA'lara ait yakıt tüketim modellerinin kullanılması, farklı arama algoritmaları ile aramanın yapılması ve farklı senaryolar kullanılarak modelin kullanılabilirliği ve limitlerinin analiz edilmesi planlanmaktadır. Ayrıca arama uzayının modellenmesinde bellek ihtiyacını en aza indirmek maksadıyla ızgara yapısı yerine çizge (graph) yapısının kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

#### **5. AÇIKLAMALAR**

Bu bildirinin kapsamında olan direk veya dolaylı tüm fikir, yorum ve görüşler yazarların şahsi fikirleri olup, bağlı buldukları hiçbir kurumun direk veya dolaylı olarak resmi veya gayri resmi hiçbir görüşünü temsil etmezler. Bağlı buldukları kurumlar bu bildirden doğan her türlü sorumluluktan muaftırlar.

#### **6. KAYNAKLAR**

- [1] EngineSim Version 1.7a <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/ngnsim.html> Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011
- [2] D. Ferguson, M. Likhachev, and A. Stentz, "A guide to heuristic-based path-planning," ICAPS Workshop on Planning under uncertainty for Autonomous Systems, 2005
- [3] A. Buss, "Component based simulation modeling with SIMKIT", In Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2002.
- [4] OpenMapTM, BBN Technologies, <http://openmap.bbn.com>. Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011

- [5] NASA Jet Propulsion Laboratory. Shuttle radar topography mission, <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> Erişim Tarihi: 14 Mayıs 2011
- [6] P. Wu, P.Y. Campbell, A. Duncan, T. Merz, “On-board multiobjective mission planning for unmanned aerial vehicles”, In IEEE Aerospace Conference Montana, 2009
- [7] L. Xia, X. Jun, C. Manyi, X. Ming ,W. Zhike, “Path Planning for UAV Based on Improved Heuristic A\* Algorithm” , The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, China, 2009
- [8] H. Jun, Z. Qingbao, “Multi-objective Mobile Robot Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm”, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, , Nanjing China ,2010
- [9] Y. Kim, D. W. Gu, I. Postlethwaite, “Real-time path planning with limited information for autonomous unmanned air vehicles” *Automatica* Volume 44, Issue 3, Pages 696-712 2008
- [10] P. Wu, R. Clothier, D. Campbell, R. Walker, “Fuzzy Multi-Objective Mission Flight Planning in Unmanned Aerial Systems”, Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-criteria Decision Making, 2007
- [11] I. K. Nikolos, K. P. Valavanis, N. C. Tsourveloudis, A. N. Kostaras, “Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 33, no. 12, pp. 898–912, 2003.
- [12] J.C. Rubio, J. Vagners, and R. Rysdyk, “Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions”, AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, Illinois, 2004
- [13] B. Pfeiffer, R. Batta, K. Klamroth, R. Nagi, "Probabilistic modeling for UAV path planning in the presence of threat zones," *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005.
- [14] C.Goerzen, Z.Kong, B.Mettler, “A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance”, *Journal of Intelligent Robotic Systems* 2009
- [15] M. Kress, J.O.Royset, Aerial Search Optimization Model (ASOM) for UAVs in Special Operations“, Technical Research Report, Naval Postgraduate School, 2007
- [16] J.C.Rubio, J.Vagners, R.Rysdyk, “Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions” Proceedings of the AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference ,2004.
- [17] Tezcaner, D. and Köksalan, M., “Multi Objective Route Planning for Unmanned Air Vehicles”. 20th International Conference on MCDM, Chengdu, China.
- [18] D. Myers, R. Batta and M. Karwan, “Calculating Flight Time for Unmanned Aerial Vehicles in the Presence of Obstacles and the Incorporation of Flight Dynamics,” submitted to *Military Operations Research*
- [19] H. Jun, Z. Qingbao " Multi-objective Mobile Robot Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm" International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation, 2010.
- [20] Z. Qi, Z. Shao, Y. S. Ping, L. M. Hiot, Y. K. Leong, “An Improved Heuristic Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment”, Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, 2010
- [21] G. B. Lamont, J. N. Slear, K. Melendez, “UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms”, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, 2007
- [22] D. Rathbun, S. Kragelund, A. Pongpunwattana, ” An Evolution Based Path Planning Algorithm for Autonomous Motion of a UAV Through Uncertain Environments”
- [23] “Unmanned Systems Integrated Roadmap, 2009-2034”, ABD Savunma Bakanlığı, 2009.
- [24] J.D. Boskovic, R. Prasanth, and R.K. Mehra. “A multilayer control architecture for unmanned aerial vehicles”. *American Control Conference*, 2002.
- [25] S. Kambhampati and L.S. Davis. “Multiresolution path planning for mobile robots”. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2(3):135–145, 1986.