

## İnsansız Hava Araçları için Çok Kriterli Güzergâh Planlama Modeli

Nafiz Arıca<sup>1</sup> Halil Cicibaş<sup>2</sup> Kadir Alpaslan Demir<sup>3</sup>

### Öz

Bu bildiri Orta İrtifalarda Uçuş ve Uzun Havada Kalış İmkânına Sahip İnsansız Hava Araçları (Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicles-MALE UAVs) için geliştirilen çok kriterli güzergâh 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 güzergâh lar planlanabilmektedir. Ayrıca model, uçuş öncesi (offline) ve uçuş esnasında (online) güzergâh planlamalarının dinamik olarak yapılabilmesine imkân tanımaktadır. Bu çalışmanın diğer güzergâh 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 güzergâh lar planlanabilmesine olanak sağlanmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** İnsansız Hava Araçları, Çok Kriterli Güzergâh 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:** Unmanned Aerial Vehicles, Multi-criteria Path Planning, Modeling, Simulation.

<sup>1</sup> Yazışma adresi: Doç.Dr., Deniz Harp Okulu, Dekanlık, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. Tuzla, İstanbul, narica@dho.edu.tr

<sup>2</sup> Deniz Harp Okulu, Dekanlık, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tuzla, İstanbul.

<sup>3</sup> Dr., Deniz Harp Okulu, Dekanlık, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü. Tuzla, İstanbul.

## Giriş

İnsansız hava araçları (İHA), yakın zaman içerisinde gerek sivil gerekse askerî 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 sağlamak üzerinedir.

Literatürde, İHA'larının otonomluk alanındaki çalışmalar hiyerarşik olarak birbirinden ayrılabilir (Boskovic, Prasanth ve Mehra, 2002). Bu çalışmalar, Boskovic vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada 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 güzergâh planlama üzerinedir. Bu katmandaki çalışmaların amacı başlangıç ve varış noktaları arasında İHA'yı 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 güzergâh 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 güzergâh planlama, uçuş başlangıç noktasından varış noktasına erişene dek çeşitli kısıtlar altında üzerinden geçilecek noktaların belirlenmesi olarak nitelendirilebilir. Otonom güzergâh 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 güzergâh 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 güzergâh planlama çalışmalarında (Wu, Campbell, Duncan, Merz, 2009; Xia, Jun, Manyi, Ming, Zhike, 2009; Jun ve Qingbao, 2010; Kim, Gu, Postlethwaite, 2008; Wu, Clothier, Campbell, Walker, 2007; Nikolos, Valavanis, Tsourveloudis, Kostaras, 2003; Rubio, Vagners, Rysdykz, 2004; Pfeiffer, Batta, Klamroth, Nagi, 2005; Goerzen, Kong, Mettler, 2009; Kress ve Royset, 2007; Tezcaner ve Köksalan, 2009; Myers, Batta, Karwan, 2011; Jun ve Qingbao, 2010; Qi, Shao, Ping, Hiot, Leong, 2010; Lamont, Slear, Melendez, 2007; Rathbun, Capozzi, Kragelund, Pongpunwattana, 2002) 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, Wu, Campbell, Duncan, ve Merz (2009) tarafından yapılan çalışma, İHA'ların sivil amaçlarla kullanılabilmesini sağlayacak gerçek zamanlı ve çok kriterli güzergâh planlama yaklaşımı sunmaktadır.

Bu çalışmanın diğer güzergâh 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 (ABD Savunma Bakanlığı, 2009) ABD Savunma Bakanlığının insansız araçlar teknoloji yol haritası klavuzunun 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.

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

**Tablo 1.** Uçuş Kriterleri ve Maliyet Kısıtları

Uçuş Kriterleri (Flight Criteria)	(Nikolos vd., 2003)	(Pfeiffer vd., 2005)	(Lamont vd. 2007)	(Kim vd., 2008)	(Qi vd., 2010)	(Wu, vd., 2009)	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	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	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Yok*	Var
Rüzgâr	Yok	Yok	Yok	Yok	Yok	Var	Var
3-Boyut	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
<b>Uçuş Maliyet</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**
Güzergâh 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 ayırımına uymasına gerek yoktur.

## Çok Kriterli Güzergâh Planlama Modeli

Modelimizde İHA'nın uçuşunu gerçekçi ve emniyetli bir şekilde tamamlayabilmesi için çeşitli uçuş kriterleri kullanılmıştır. Bu kriterler (Wu, 2009)'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 güzergâhları planlamaktır. Çalışma kapsamında dikkate aldığımız uçuş kriterleri şunlardır:

- Sabit Kriterler
  - Coğrafi yapı
  - Mimari yapılar
  - Tehditli bölgeler
  - Emniyet irtifaları
  - Rota-irtifa ayrımları
- Dinamik Kriterler
  - Hareketli Unsurlar
  - Bulut
  - Hareketli Hedefler
  - Yerdeki Hareketli Tehditler
  - Rüzgâr

Güzergâh 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. Güzergâh planlama hesabı 3 boyutlu arama uzayında yapılmaktadır. Arama uzayının yaratılmasında ızgara (grid) yapısı kullanılmıştır.

Güzergâh 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.

### 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.

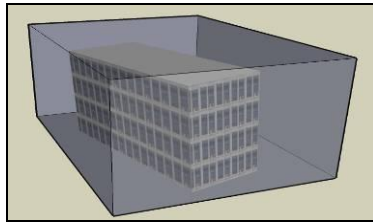
#### *Sabit Uçuş Kriterleri*

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.

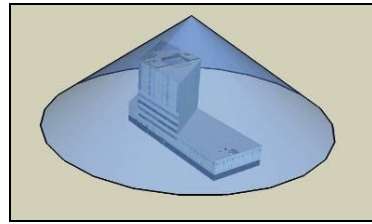
**Coğrafi Yapı:** Coğrafi yapı, eş yükselti eğrilerinin bulunduğu sayısal haritalardan faydalanılarak 3 boyutlu uzaya aktarılmıştır (NASA Jet Propulsion Laboratory, 2011). Arama uzayında coğrafi yapılar erişilemez alanlar olarak tanımlanmaktadır.

**Mimari Yapılar:** Uçuş öncesinde bu yapılar, varsa veritabanlarından yoksa kullanıcı tarafından arama uzayına dâhil 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

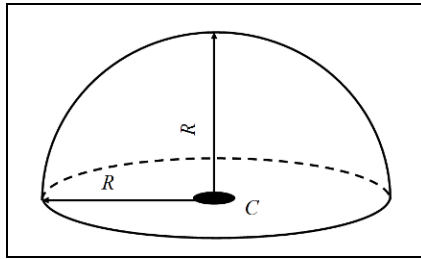
**Emniyet İrtifası:** Emniyet irtifası, İHA'nın herhangi bir coğrafi engele çarpmasını engellemek amacıyla belirlenen asgari uçuş yüksekliğini belirtmektedir. Açık kaynaklardan elde edilen İHA kullanım konseptlerine göre emniyet irtifası 5000ft. olarak belirlenmiştir.

**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 ...) uçuşuna izin verilmektedir.

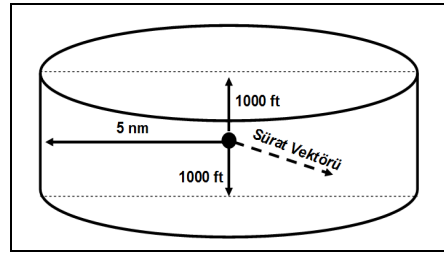
### ***Dinamik Uçuş Kriterleri***

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 ayırmlarının 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)

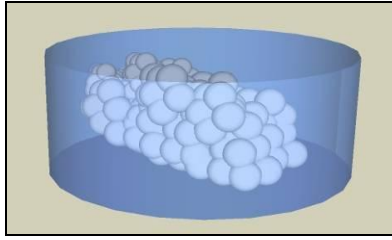


**Şekil 4.** Hava Unsurlarına Ait  
Hava Ayırım Alanı

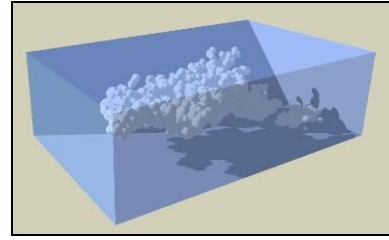
**Hareketli Hedefler:** İHA'nın tespit edeceği hedeflerin hareketli olması, yapılan hesaplamaların çeşitli öngörülere dayanması ve sürekli güncellenmesi zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır. Bildiride yer alan modelde İHA, hedefe ait bilgiler değiştikçe güzergâhını

güncelleyebilmektedir. Modelde, İHA'larının hedef mevkisinde değişimleri takip edebildiği kabul edilmiştir. İHA, güzergâh planlama esnasında hedefin mevcut mevkisi yerine hedef ile buluşma anındaki hedefin muhtemel mevkisini dikkate alır. Böylece İHA, kendisi ile hedefi buluşturan en az maliyetli güzergâh ı hesaplayarak gereksiz uçuş güzergâhları izlememiş olur.

**Bulut:** Bulutlar, İHA'larının görevlerini icra etmelerini kısmen engelleyebilecek yapıda ya da 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.

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

### ***Uçuş Maliyetleri***

Uçuş maliyetleri, yukarıdaki kriterler göz önüne alınarak hesaplanan güzergâh ın 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:

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

$$F(x)=\min(f_{\text{süre}}(x))$$

$$F(x)=\min(f_{\text{yakıt}}(x))$$

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

$w_1, 2, 3$  : Maliyet ağırlığı       $f_{\text{süre}}(x)$       : Süre maliyeti

$f_{\text{mesafe}}(x)$ : Mesafe maliyeti       $f_{\text{yakıt}}(x)$       : Yakıt maliyeti

Mesafe: Literatürde yer alan güzergâh 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, rüzgâr ve ilerleme vektörü ile düğümler arası mesafeye bağlı olarak hesaplanır. Rüzgâr hızı ve yönü, İHA'nın rotası ve süratinde değişikliklere yol açarak uçuş süresini etkilemektedir. İHA'nın uçuşu boyunca motor süratinin 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	: Dügümler arası mesafe,	t(s)	: Varış düğümüne uçuş süresi
V <sub>c</sub>	: İHA motor sürati,	τ(s, s')	: Dügümler arası uçuş süresi
V <sub>w</sub>	: Rüzgâr sürati	s'	: Çocuk düğüm
		s	: Ata düğüm

İHA'nın havaya göre olan süratinin hesaplanmasında motor ve rüzgâr süratinin vektörel toplamı kullanılmaktadır. Ancak, rüzgârın 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 tüketimin 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 (Wu, 2009).

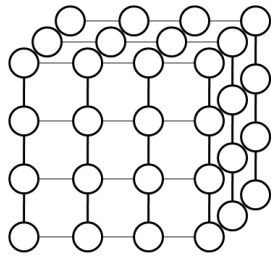
İrtifa (Basınç)	İHA Ağırlığı
Sürat	Tırmanış ve Alçalış Açıları
Sıcaklık	İHA motor özellikleri

Açık kaynaklardan MALE tipi İHA için herhangi bir yakıt modeline erişilememiştir. Bu nedenle geliştirilen model yapısında EngineSim (EngineSim Version 1.7a) ortamında yer alan yakıt tüketim modellerinden dönüşüm yapılmıştır. EngineSim, NASA tarafından geliştirilmiş motor performans analizine imkân veren model tabanlı değerlendirme ortamıdır.

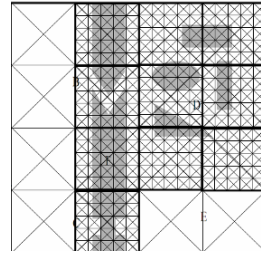
### Ortam Benzetimi ve Arama Uzayı

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 (Kambhampati ve Davis, 1986) 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 güzergâhların planlanmasını sağlamaktadır.

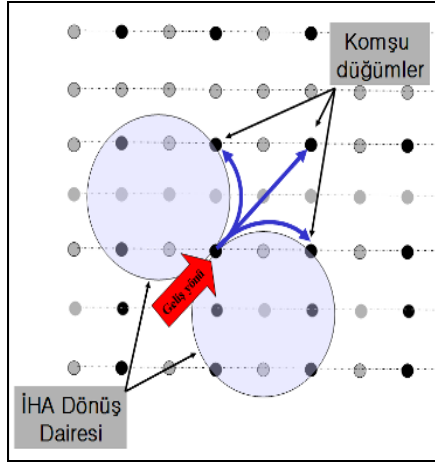


**Şekil 7.** Düğümlerden Oluşan Arama Uzayının Görünümü

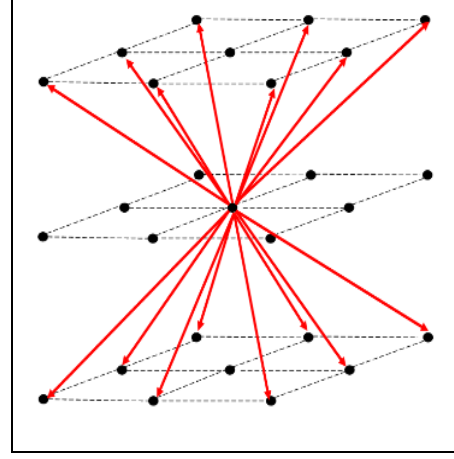


**Şekil 8.** Çok Çözünürlüklü Arama Uzayının 2 Boyutlu Görünümü

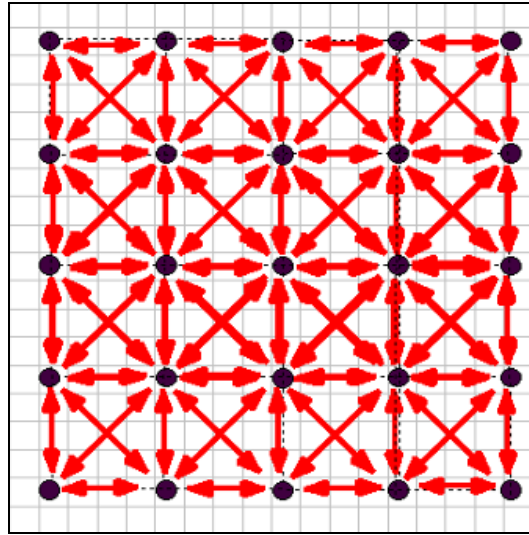
Düğümler arasındaki asgari mesafelerin belirlenmesinde İHA'nın dönüş çapı ile tırmanış ve iniş açıları dikkate alınmıştır. Dönüş çapı, yatay düğümler arasındaki; tırmanma ve iniş açısı ise dikey düğümler arasındaki mesafeyi etkilemektedir. Dönüş çapı 1 nm olarak kabul edilmiştir. Bu parametreler dikkate alınarak düğümler arasındaki mesafelerin seçilmesinde ve düğümler arasındaki komşulukların belirlenmesinde (Xia, Jun, Manyi, Ming ve Zhike, 2009)'da belirtilen model kullanılmıştır (Şekil 9).



**Şekil 9.** İHA Performans Kabiliyetlerine Göre Komşulukların Belirlenmesi (Xia vd., 2009)



**Şekil 10.** Dikey Düğümler Arasındaki Komşuluk İlişkileri



**Şekil 11.** Yatay Düğümler Arasındaki Komşuluk İlişkileri

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.

### 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'ya ait temel özellikler Tablo 2'de yer almaktadır.

**Tablo 2.** İHA Temel Özellikleri

<i>Fiziksel Özellikleri</i>			
Uzunluk	30 m	Kanat Genişliği	50 m
Ağırlık	2.500 lb	Yük Kapasitesi	500 lb
<i>Performans Özellikleri</i>			
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	Tırmanma Yakıt Tüketimi Yakıt İniş Yakıt Tüketimi	48,52 lb/saat 14,58 lb/saat
Dönüş Çapı	1 nm	Tırmanma Sürati	1000ft/dk

### Simülasyon

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

### **Kullanılan Araçlar**

Modelin kodlanmasında Java programlama dili kullanılmıştır. Yapılan simülasyonlarda SimKit (Buss, 2002) kütüphanesi ve OpenMap (OpenMapTM, 2011) 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, ABD, tarafından geliştirilmiş ve Java dilinde yazılmış kütüphanelere sahip ayrık olay simülasyon aracıdır. OpenMap ise BBN Technologies tarafından geliştirilmiş, açık kaynak koduna sahip, çeşitli harita işlemlerine imkân tanıyan, Java platformu üzerinde çalışan ve görsel desteği bulunan bir ortamdır.

### **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 dönüştürülür ve arama işlemi gerçekleştirilir. İkinci kısımda ise dinamik kriterlerin değerleri ve konumları güncellenerek arama uzayı güncellenir. İkinci kısım sayesinde gerçek zamanlı olarak güzergâh planlanmış olur. Dinamik kriterlerin ortamdaki hareketleri belirlediğimiz rota ve sürata bağlı olarak SimKit kütüphanesi yardımı ile kontrol edilmektedir.

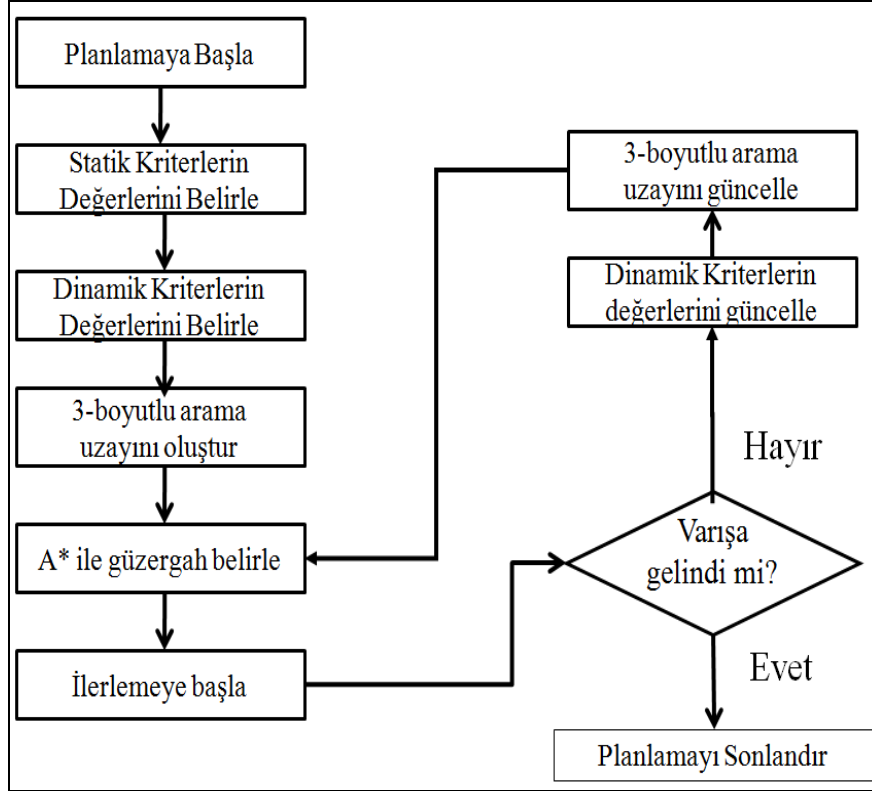
### **Arama Algoritması**

Uçuş öncesi planlama safhasında ve gerçek zamanlı uçuş esnasında güzergâh, A\* sezgisel arama algoritması ile hesaplanmıştır. Sezgisel arama algoritmaları birçok alanda kolay uygulanabilirliği nedeniyle güzergâh planlamada sıklıkla kullanılmaktadır (Ferguson, Likhachev ve Stentz, 2005). 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.

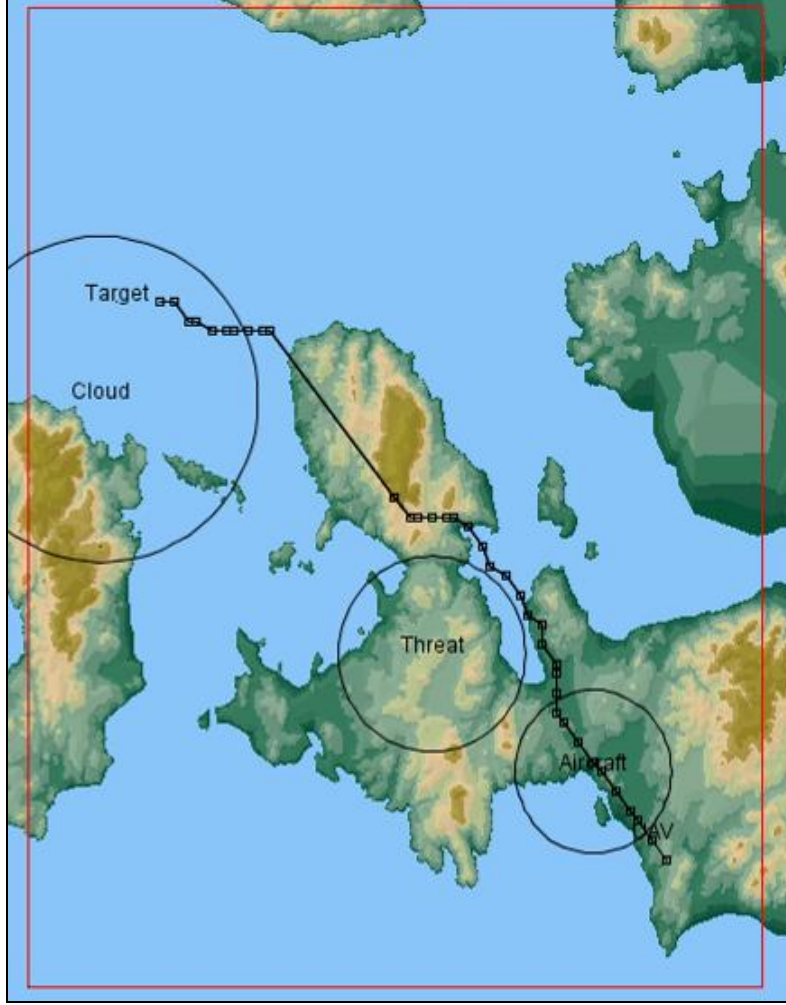
Çalışmada, geniş bir kitle tarafından kullanılmış olması ve aramayı başlangıçtan varışa doğru (forward) yapmasından dolayı A\* arama algoritması tercih edilmiştir. A\* algoritması haricinde gerçek zamanlı planlama gerektiren ortamlarda kullanılabilen çeşitli sezgisel arama algoritmaları da bulunmaktadır. Ancak bu algoritmaların bir kısmı (D\* Lite gibi) varıştan başlangıca doğru (backward) çalışır. Bu nedenle söz konusu algoritmalarla modelimizdeki dinamik kriterler dikkate alınarak güzergâh planlamak mümkün değildir. Sezgisel arama algoritmaları hakkında geniş bilgi Ferguson ve arkadaşları tarafından verilmiştir (Ferguson vd., 2005).



Şekil 12. Simülasyon Akış Şeması

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 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 güzergâh 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 sonuçlarla aşağıdaki hususlar:

- Modelin, İHA'larında çok kriterli güzergâhlar planlama için kullanılabilceği,
- Modelin çeşitli uçuş kriterlerini gözeterek beklenen uçuş maliyetlerini karşılayacağı,
- Ortam benzetimi ve arama uzayının kolayca geliştirilebilir ve değiştirilebilir şekilde tasarlanıp kodlanabildiği,
- Güzergâh planlanma süresine çok çözümlü yapının olumlu yönde etki ettiği,
- Kriter sayısının ve değerlerinin hesaplama süresini ve maliyetleri etkilediği,

tespit edilmiştir.

### **Sonuç ve Değerlendirme**

Bildiride, MALE tipi İHA'ları için geliştirdiğimiz çok kriterli güzergâh 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 güzergâh planlama modeli sayesinde İHA için emniyetli ve daha gerçekçi kriterler kullanılarak güzergâhların planlanması yapılabilmektedir. Arama uzayının ızgara (grid) yapısında oluşturulması kriterlerin kolayca modele ilave edilmesini sağlamıştır. Bunun yanında arama uzayının çok çözümlü 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 imkân tanımıştır.

Önerilen modelin nesneye yönelik tasarım teknikleri ile üretilmesi, sonraki çalışmalarda modelin kolayca geliştirilmesine imkân 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 amacıyla ızgara yapısı yerine çizge (graph) yapısının kullanılması üzerine çalışmalar yapılmaktadır.

### **Kaynakça**

- ABD Savunma Bakanlığı. (2009). *Unmanned Systems Integrated Roadmap, 2009-2034*.
- Boskovic, J.D., Prasanth, R. ve Mehra, R.K., (2002). *A Multilayer Control Architecture For Unmanned Aerial Vehicles*, American Control Conference, Alaska, A.B.D.
- Buss, A. (2002). *Component based simulation modeling with SIMKIT*, Winter Simulation Conference, San Diego, California, ABD.
- EngineSim Version 1.7a (2011). 14 Mayıs 2011'de <http://www.grc.nasa.gov/WWW/K-12/airplane/ngnsim.html> adresinden alınmıştır.
- Ferguson, D., Likhachev, M. ve Stentz, A. (2005). *A guide to heuristic-based path-planning. ICAPS Workshop on Planning under uncertainty for Autonomous Systems*.
- Goerzen, C., Kong, Z. ve Mettler, B. (2009). A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance, *Journal of Intelligent Robotic Systems*.
- Jun, H. ve Qingbao, Z. (2010). *Multi-objective Mobile Robot Path Planning Based on Improved Genetic Algorithm, 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Nanjing, China.
- Kambhampati, S., Davis, L.S. (1986). Multiresolution path planning for mobile robots, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2 (3), 135–145.
- Kim, Y., Gu, D. W. ve Postlethwaite, I. (2008). Real-Time Path Planning With Limited Information For Autonomous Unmanned Air Vehicles, *Automatica Volume 44* (3), 696-712.

- Kress, M. ve Royset, J.O. (2007). Aerial Search Optimization Model (ASOM) for UAVs in Special Operations, *Technical Reseach Report*, Naval Postgraduate School, Monterey, California, ABD.
- Lamont, G.B., Slear, J.N. ve Melendez, K. (2007). *UAV Swarm Mission Planning and Routing using Multi-Objective Evolutionary Algorithms*, IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multicriteria Decision Making, Honolulu, ABD.
- Myers, D., Batta, R. ve Karwan, M. (2011). Calculating Flight Time for Unmanned Aerial Vehicles in the Presence of Obstacles and the Incorporation of Flight Dynamics. (Military Operations Research dergisine yayımlanmak üzere gönderilmiştir.)
- NASA Jet Propulsion Laboratory. Shuttle Radar Topography Mission, 14 Mayıs 2011'de <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/> adresinden alınmıştır.
- Nikolos, I.K., Valavanis, K.P., Tsourveloudis, N.C. ve Kostaras, A.N. (2003). Evolutionary algorithm based offline/online path planner for UAV navigation, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 33 (12), 898-912.
- OpenMapTM, BBN Technologies, 14 Mayıs 2011'de <http://openmap.bbn.com> adresinden alınmıştır.
- Pfeiffer, B., Batta, R., Klamroth, K., Nagi, R. (2005). Probabilistic modeling for UAV path planning in the presence of threat zones, *Operations Research*.
- Qi, Z., Shao, Z., Ping, Y.S., Hiot, L.M. ve Leong, Y.K. (2010). *An Improved Heuristic Algorithm for UAV Path Planning in 3D Environment*, Second International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetic, Nanjing, Çin.
- Rathbun, D., Capozzi, B., Kragelund, S. ve Pongpunwattana, A. (2002). *An Evolution Based Path Planning Algorithm for Autonomous Motion of a UAV Through Uncertain Environments*, AIAA Digital Avionics Systems Conference, Irvine, CA, ABD.
- Rubio, J.C., Vagners, J. ve Rysdykz, R. (2004). *Adaptive Path Planning for Autonomous UAV Oceanic Search Missions*, AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago, Illinois.
- Tezcaner, D. ve Köksalan, M. (2009). *Multi Objective Route Planning for Unmanned Air Vehicles*, 20th International Conference on MCDM, Chengdu, China.

- Wu, P., Clothier, R., Campbell, D. ve Walker, R. (2007). *Fuzzy Multi-Objective Mission Flight Planning in Unmanned Aerial Systems*, 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence in Multi-criteria Decision Making, Honolulu, A.B.D.
- Wu, P., Campbell, P.Y., Duncan, A. ve Merz, T. (2009). *On-board multiobjective mission planning for unmanned aerial vehicles*, IEEE Aerospace Conference, Montana.
- Xia, L., Jun, X., Manyi, C., Ming, X. ve Zhike, X., (2009). *Path Planning for UAV Based on Improved Heuristic A\* Algorithm*, The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments, China.