

KOKPİT OTOMASYONU TABANLI TAKTİKSEL YÖRÜNGE PLANLAMA

Mevlüt Uzun* Emre Koyuncu† ve Gökhan İnalhan‡
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Hava trafik yönetimi, hızla büyüyen talep karşısında yeni teknolojilere ve operasyonel gelişmelere ihtiyaç duymaktadır. Mevcut sisteme eklenecek prosedürler, kokpit tarafında da yenilikçi alt sistemler, prosedürler ve algoritmalar gerektirecektir. Hava trafik yönetim sisteminde, seyrüsefer hizmetleri veren hava trafik kontrolörlerinin yanı sıra uçuş ekiplerinin de sahip oldukları rol yüksek derecede artacaktır. Kokpit içine entegre edilen yeni nesil karar destek sistemleri bu noktada önemli bir yere sahip olacaktır. Hava trafik kontrolörlerinin bireysel rotalara müdahaleleri azaltarak daha çok trafik akışına yönelmesi, kokpit içerisinde yerden bağımsız bir şekilde güvenli ayırmayı sağlayan harici bir sistem gerektirecektir. Bu çalışmada taktiksel planlama seviyesinde kaçış manevraları oluşturabilen otonom aviyonik sistemi için teorik bir çerçeve oluşturulmuştur. Algoritma, güvenli rota için hareket planlaması yaparken düşük maliyetli yörüngeyi hesaplamaktadır. Kaçış algoritmaları ve optimizasyon probleminden önce uçuş rota hesaplama altyapısı oluşturulmuştur. Uçuş dinamikleri 3-serbestlik dereceli veya diğer ismiyle nokta kütleli hareket modeli üzerine kurulmuştur. Uçağa etki eden kuvvetlerin modellenmesinde BADA 4 uçak veritabanı kullanılmıştır. Taktiksel seviyede, çarpışma içermeyen hareket planlaması, örnekleme tabanlı bir arama algoritması olan RRT (Rapidly-Exploring Random Trees) ile gerçekleştirilmiştir. Her bir uçuş segmentinin kendi içerisindeki optimizasyon için hibrit yaklaşıma gidilmiştir. Hareket, uçuş modlarına ayrılmıştır ve optimizasyon problemi sadeleştirilmiştir. Farklı yönlerden farklı hızlarla gelen birden fazla uçağın bulunduğu benzetim çalışmaları yapılmıştır. Algoritma, hem yatay hem dikey düzlemde ayırma yapabilmiş, çakışmaları çözebilmiş ve düşük maliyetli rotayı hesaplayabilmiştir.*

GİRİŞ

Mevcut hava trafik seviyesinin önümüzdeki 20 yıl boyunca iki katına çıkacağı öngörülmektedir [NextGen, 2004]. Avrupa'da SESAR (Single European Sky ATM Research) [SESAR, 2013], Birleşik Devletler'de NextGen [SESAR, 2013] programları yönetiminde olmak üzere artan talebin günümüz güvenlik seviyesini koruyacak şekilde karşılanması hedeflenmektedir. Geleceğin hava trafik yönetim sistemi, mevcut hava sahası tabanlı kontrol sisteminden yörünge bazlı yönetime (Trajectory Based Operations) doğru kaymaktadır. TBO konseptinde uçulacak yörünge (Reference Business Trajectory) havayolları ve seyrüsefer hizmetleri sağlayan kuruluşlar (Air Navigation Service

*Araştırma görevlisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: uzunm@itu.edu.tr

†Yrd. Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: emre.koyuncu@itu.edu.tr

‡Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: inalhan@itu.edu.tr

Providers) arasında yapılan müzakereler ile önceden belirlenmesi yer almaktadır. RBT, havayollarının kendi tercihlerini ve ANSP'lerin hava sahalarındaki talep-kapasite dengelerini düşündüğü bir anlaşmanın sonucu ortaya çıkan yörüngedir.

Hava trafik yönetimi teknolojilerindeki mevcut sistemlerin dönüşümü göz önüne alındığında, gelecek uçuş operasyonlarının ve kokpit içi sistemlerin yeni aviyonik sistemlere ve operasyonel prosedürlere ihtiyaç duyacağını söylemek mümkündür. Özellikle adaptif algoritmalar ve gelişmiş karar destek sistemleri bu ihtiyaçların temelini oluşturmaktadır. Bu konseptlerin hayata geçirilmesi Hava Trafik Yönetimi kapsamında görevlerin ve sorumlulukların değişmesinde büyük rol oynayacaktır. En iyi karar yeri, en iyi karar zamanı ve en iyi karar veren bu bağlamda temel faktörlerdir [SESAR, 2013]. Örneğin; kontrolcüler hava trafiğini yönetmede yüksek derecede rol sahibi olacak ve bireysel rotalara müdahale sayısını azaltacaklardır. Pilotlar uçuş esnasında daha aktif olacak; çevreyi gözlemleme ve yönetme, seçenekleri analiz etme veya gerektiği durumda ayırma manevrası uygulama gibi önemli görevlerde daha çok görev alacaktır. Uçuş ekibinin rolündeki bu değişimler mevcut görevlerin yeniden tanımlanmasına gidilmesinin yanı sıra insan faktörü performansını da etkileyecektir. Geleceğin kokpit içi sistemlerinde uçuş ekibinin bu yeni görevleri başarıyla gerçekleştirmesini sağlayan yeni nesil cihazlar ve algoritmalar gerekecektir.

Bu çalışmanın temel amacı taktiksel 4D yörünge planlaması ve otomasyon araçları ile donatılmış uçak için "conflict resolution", ya da potansiyel çakışma önleyici ve bunu otonom olarak yapan sistemler için teorik çerçeve tasarlanmasıdır. Çakışma, trafikteki herhangi iki uçağın birbirlerine ait güvenli bölge sınırını, diğer adıyla minimum ayırmayı ihlal etmesidir. Çalışmada, yoğun trafik ortamında veya yeni rota hesaplanması gibi durumlarda yerden bağımsız, uçak üzerinde ve otonom olarak hem gerçekleştirilebilir, hem de maliyeti düşük rotaların üretilmesi istenmektedir. Önerilen 4D yörünge planlama metodu hem olasılıksal hem de deterministik algoritmaların yeni özelliklerini içermekle beraber iki yöntemin de başarılı taraflarını birleştirmektedir. Uçağın kinodinamik modellemesinde standart yörünge uygulamalarında kullanılan 3-serbestlik dereceli veya diğer adıyla nokta kütle hareket modeli kullanılmıştır. Bu modelde uçağın hali hazırda kendi içerisinde kararlı ve kontrol edilebilir olduğu kabul edilip, takip ettiği yörünge ile ilgilenilmektedir. Uçağa etkiyen kuvvetlerin veya uçak performansının modellenmesi EUROCONTROL'un bir ürünü olan Base of Aircraft Data (BADA) aracılığıyla yapılmıştır [Nuic, 2005]. Çalışmada son sürüm olan BADA 4 kullanılmıştır. Bu versiyon, öncekilerden farklı olarak uçağa etkiyen kuvvetleri uçağın durumları ve atmosfer koşullarına bağlı olarak parametrik ifade etmektedir. Teknik altyapısını Boeing'in sağladığı bu veritabanı, gelişmiş modellemeleri sayesinde nominal değerlerin üzerine çıkarak parametre öngörmesi ve optimizasyon gibi işlemleri yapılabilir kılmaktadır. Oluşturulan bu performans modeli yüksek-seviye hibrid uçuş kalıpları otomatları ve alçak-seviye manevra otomatlarını kapsamaktadır. Bu modellemedeki amaç, uçak hareketini tırmanma, seyir ve alçalma şeklinde üç farklı kalıp altında toplamaktır. Her bir uçuş kalıbı kendine özel manevra sekansı içermektedir.

BADA 4 matematiksel modelleri aracılığıyla her bir uçuş kalıbı için tanımlı manevra sekansını düşük maliyet ile gerçekleştiren parametreler öngörülmüştür. Esasında bu problem, bir uçağın başlangıç ve bitiş olarak verilen iki nokta arasında en düşük maliyetli rotayı takip etmesi problemidir. Uçak denklemlerinin ve kısıtlamaların lineer olarak ifade edilememesi, bu problemin tek bir seferde global olarak çözülmesini zorlaştırmaktadır. Ek olarak bu modülün uçak üzerinde çalışacağı düşünülecek olursa bu hesaplamaların çok kısa zaman aralıklarında gerçekleşmesi beklenmektedir. Bu noktada literatürde kullanılan yaklaşımlardan birisi, uçağın hareketini hibrit model olarak elde etmek ve bu hareketi manevra sekansları şeklinde ifade etmektir [Frazzoli, 2005]. Çok-modlu yaklaşım sayesinde kompleks olan yörünge planlama problemini global olarak çözmek yerine lokal ve düşük maliyetli yörüngeler tayin edilmektedir. Bu noktadaki dezavantaj ise yaklaşımın verdiği çözümün optimum değerden uzaklaşmasıdır.

Daha üst seviyede ise hesaplanan düşük maliyetli lokal rota parçaları oluşturan ve uzayı tarayan RRT* algoritması kullanılmıştır [Karaman, 2010a]. RRT*,örnekleme tabanlı bir hareket planlama

algoritması olup hava sahasını keşfetmeye çalışarak lokal yörünge segmentleri üzerinden ayırma yapmaktadır. İlk adım olarak uzayda bir konum örnekleyip, ardından uçuş kalıpları ve gelişmiş performans modelini kullanarak uçağı bu noktaya düşük maliyet ile getirmeye çalışmaktadır. Örneklenen konuma, mesafe olarak ağaçta hali hazırda bulunan en yakın konumdan bağlanmaya çalışılır. Bu, arama uzayının hızlı ve ilerleyerek keşfedilmesinin temelidir. Lokal maliyetlerin yanında başlangıç konumundan itibaren harcanan maliyet de hesaba katıldığı için ağaç sürekli olarak toplam maliyeti düşük olan uçuş segmenti sekanslarını üreterek büyür. Önceden belirlenmiş örnekleme sayısına ulaşıldığında algoritma durur. Kullanılan algoritma aynı zamanda belirli koşullar altında asimptotik optimallığı sağlamaktadır. Asimptotik optimallık, örnekleme sayısı sonsuza yaklaştıkça problemin optimal çözüme yakınsama özelliğidir. RRT* aynı zamanda olasılıksal bütünlüğü sağlamaktadır: Örnekleme sayısı sonsuza yaklaştıkça çözüm bulma olasılığı 1'e yakınsamaktadır [LaValle, 1999].

Literatürdeki Çalışmalar

Çakışma tespit etme ve ayırma ile ilgili yapılan çalışmalara yönelik geniş kapsamlı literatür araştırması [Kuchar, 2000]'de yer almaktadır. [Christo, 2006] çalışmasında yer alan NextCASII algoritması, potansiyel çakışmaya sebep olabilecek uçağın güvenli bölgesini ihlal etmeyecek şekilde uyarı eşiklerini, model tabanlı hesaplamaktadır. [How, 2002], Mixed Integer Linear Programming (MILP) kullanmış, 3-serbestlik dereceli uçak modelini lineer kısıtlar ile birleştirerek çakışma problemini açık çevrim olarak çözmeye çalışmıştır. Benzer bir çalışmada, yine MILP kullanılmış ancak sadece hız vektörü değişimi manevrasına bakılmıştır [Christo, 2006]. Çevrimiçi Markov süreçlerinin (MDP) kullanıldığı çalışmalarda, çevrimdışı süreçlerde kullanılan bütün durum olasılıklarından ziyade uçağın bulunduğu durum olasılık dağılımı kullanılmıştır [Winder, 2004; Wolf, 2011]. MDP tabanlı başka bir çalışma, hem çevrimdışı hem çevrimiçi özellikleri birarada kullanarak hibrit bir yaklaşım getirmiştir [Chryss, 2011]. Çevrimiçi süreçte durum olasılık dağılımı hesaplanmış ve gerekli aksiyonun ya da manevranın seçimi yapılmış; çevrimdışı süreçte dinamikler sürülmüştür.

Çok-modlu hibrit yaklaşımı için de önceden yapılan çalışmalar mevcuttur. [Tomlin, 1998]'de yer alan çalışma, hava trafik yönetimi için hibrit model oluşturmuştur. [Frazzoli, 2005] manevra otomati yaklaşımını önermiş, uçağın takip edeceği hareket planını rota segmentleri halinde tanımlamıştır. Manevra kütüphaneleri, kısmi olarak bilinen ortamlarda rota planlaması uygulamalarında uygulanabilir rotalar arasında interpolasyon yapılmak üzere benzer çalışmalarda kullanılmıştır [Dever, 2006].

Çakışma önleme, hareket planlama gibi gerçek zamanlı uygulamalarda temel amaç uygun bir rotayı mümkün olan en kısa sürede bulmak, geriye kalan zamanda ise çözümün niteliğini artırmak olmuştur. Örnekleme tabanlı algoritmalar rota planlama literatüründe gün geçtikçe daha çok yer almaktadır. [LaValle, 2000, 2004] çalışmalarında hesaplama süresi arttıkça örnekleme tabanlı algoritmanın bulduğu çözümün niteliğinin de arttığı ispatlanmıştır. Bu tip algoritmalar her ne kadar bütünlük özelliğini sağlamasalar da olasılıksal olarak bütünlük özelliğini taşımaktadırlar. Bütünlük, araç dinamiği tarafından uygulanabilir bir rota var ise bunun kesinlikle bulunması anlamı taşımaktadır. Olasılıksal bütünlük ise, var olan uygulanabilir rotanın bulunma olasılığının örnekleme sayısı sonsuza yaklaştıkça bir değerine yaklaşmasıdır. Kinodinamik ve örnekleme tabanlı algoritmalarda son yıllarda en çok öne çıkanlardan biri, Rapidly-Exploring Random Tree (RRT) algoritmasıdır [LaValle, 1999]. Ardından çeşitli varyasyonları da çıkan RRT farklı dinamik sistemlere başarıyla entegre edilebilmiştir [Karaman, 2010b, 2011; Şucan, 2000]. RRT* algoritması ilk olarak [Karaman, 2010a] çalışmasında önerilmiş olup, RRT'den farklı olarak belirli şartlar altında hesaplanan rotanın optimal olduğunu ispatlamıştır.

YÖNTEM

Yeni Nesil Görsel Karar Destek Sistemleri

Bu bildiri kapsamında yapılan bir önceki çalışma, yeni nesil sentetik vizyon ve artırılmış gerçeklik tabanlı görselleştirme teknolojileri kullanılarak görsel kokpit içi karar destek araçları ve arayüzleri tasarımıdır [Uzun, 2014]. Tasarlanan bu araçların NextGen ve SESAR 2020+ [NextGen, 2013] programlarında tanımlanmış gelecek uçuş operasyonlarının gereksinimlerini karşılaması amaçlanmaktadır. Bu aviyonik sistemler ile pilotların niyet paylaşımı/pazarlığı ile işbirlikçi taktiksel planlama, çözümleri alternatifleri ile birlikte tam olarak anlama/analiz etme/yorumlama ve yeni çözüm önerme gibi uçuş operasyonlarında desteklenmesi vizyonlanmıştır. Ek olarak, gerekli cevabın farkında olma, uygulama veya çarpışma önleyici sisteme otomasyon yetkisi verme gibi görevlerde de karar destek sağlanması hedeflenmiştir. Görsel karar destek sistemleri uçuş ekibinin yeni otonom sistemler ile etkileşimini ve tüm taktiksel veriyi görselleştirerek içinde bulunulan durumu veya gelişmekte olan uçuş operasyonunu anlaşılır olmasını mümkün kılmaktadır. Bu kapsamda iki farklı görsel yapı sunulmaktadır. Kokpitin Primary Flight Display bölgesinde yer alan sentetik vizyon ekranı çifti pilotların 4D ortamda durum farkındalığı ile düşük ve yüksek seviyede taktiksel görevleri yönetmesini sağlamaktadır.

Synthetic Vision Display: SVD kısmı pilota yapay görsellik sağlamakla beraber gerekli güdüm, uçuş ve kısıtlı seviyede operasyonel bilgileri içermektedir. Tunnel-in-the-sky konsepti ile pilot, odaklanılan veya karar verilen rotayı tüneller aracılığıyla manuel olarak takip edebilir. Bununla beraber standart sentetik vizyon (sanal gerçeklik) ekranı fonksiyonlarını da kullanabilir. İrtifa ve sürat bilgileri, radar frekans değerleri, harita ve yükselti bilgisi, hava koşulları gibi temel uçuş operasyonu verisi bu ekranda gösterilmektedir. 4D Operasyonel Ekranı (4DOD) operasyon durumu ile ilgili farkındalığı artırmak ve uçuş niyeti üzerindeki modifikasyonları göstermek üzere yüksek seviyede operasyonel bilgileri sağlamaktadır. Pilot, hem kendi yörüngesini kontrol edebilmekte hem de trafikteki uçaklara ait rotaları izleyebilmektedir. Aynı zamanda ileriye dönük hızlandırılmış simulasyon fonksiyonu da bulunmaktadır. Kokpitin veri bağlantısı üzerinden yer ile rota ve uçuş planı paylaşımı sürecinin yönetilmesi bu ekran aracılığıyla olmaktadır. Haptik arayüzler ile uçuş ekibi gösterilen bilgileri ve görselleri 2D+zaman ve 3D+zaman boyutunda yönetebilmektedir.



Şekil 1: Sentetik vizyon ve 4DOD ekran çifti (a), Head-up Display (b)

Head-up Display: Sentetik vizyon ve 4DOD ekran çiftine paralel olarak pilotun görüş hizası üzerine inşa edilmiş Head-up Display (HUD) bulunmaktadır. HUD aracılığıyla pilot benzer şekilde temel uçuş durum bilgilerini aşağıya bakma gereği duymadan izleyebilmekte, tunnel-in-the-sky konsepti sayesinde hedef yörüngeyi tüneller arasından uçmaya çalışarak takip edebilmektedir. Bu görsel karar destek sistemleri ve algoritmalarının donanım olarak entegrasyonu, Boeing 737-800 uçuş simulatörü üzerinde gerçekleşmiştir. Şekil 1, tasarlanan HUD, SVD ve 4DOD ekranlarını göstermektedir.

Sentetik vizyon ve 4DOD ekran çifti Primary Flight Display (PFD) monitörleri üzerinde çizdirilmiştir. Head-up Display (HUD), kaptan pilot ile ön cam arasına yerleştirilmiştir. Özel bir film kullanılarak görüntü arkadan mini-projeeksiyon cihazı aracılığıyla yansıtılmıştır. Her bir görsel karar destek sistemi simulatörün ağına bağlanmış olup veri akışını kontrol eden ve yöneten algoritmalar düzenlenmiştir. Uçuş simulatörü, Hava Trafik Kontrolü test ortamı ile birleştirilerek geliştirilen yeni nesil aviyonik konseptlerinin uçuş operasyonları üzerindeki etkileri resmedilmiştir. Hava Trafik Kontrolü test ortamı trafik ve hava durumu tasarlayıcı, Hava Trafik Kontrol ekranları ve kontrolörün davranışının benzetim çalışmalarını yapan modellerden oluşmaktadır. Test ortamı aynı zamanda ALLFT+ tabanlı geçmiş uçuşlara ait gerçek veri kullanarak önceden belirlenmiş veya düzenlenebilen senaryoların oynatılmasını sağlamaktadır. Trafik ve hava durumu tasarlayıcı modül Demand Data Repository veritabanı üzerinden beslenen havaalanı ve hava sahası kapasite bilgilerini ve Aeronautical Information Publication'dan gelen operasyonel bilgileri içermektedir. Benzer şekilde, modifiye edilmiş senaryolar veya geçmiş hava durumu bilgileri METAR verisi üzerinden aktarılmaktadır. Test ortamı günümüz hava trafik kontrol ekranları, ses ile iletişim, otonom veya karar destekli kontrol operasyonlarını ifade eden modeller aracılığı ile hem günümüz operasyonlara hem de geleceğe yönelik çalışmalara ait senaryoları koşabilmektedir.

4D Rota Oluşturma: Problem Tanımı

Rota oluşturma problemi iki parça halinde incelenebilir: *Fizibilite*, uçağın manevra, performans ve kontrol limitleri dahilinde, çevresel ve operasyonel kısıtlar altında yapabileceği hareketleri kapsamaktadır. *Optimalite*, uçuşun zaman ve yakıt cinsinden maliyetini ele almaktadır. Uçağın zamanla-değişmeyen dinamiği, genel form olarak aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)), \quad x(0) = x_0 \quad (1)$$

Burada $x(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$, $u(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ ve $n, m \in \mathbb{N}$ olup $x_0 \in X$ başlangıç koşulunu temsil etmektedir. Benzer şekilde, $\chi_j(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ ve $\vartheta_j(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ hesaplanan rota kümesini ve kontrol girişi setini belirtmektedir. Güvenli olmayan, trafik ile çakışmaya sebep olacak bölgeler X_{obs} ile, ulaşılması hedeflenen bölge X_{arr} ile gösterilmektedir. Bu durumda çakışma olmayan bölge, zamana bağlı olarak ve uçuş dinamiğini de dahil ederek şu şekilde yazılabilir: $X_{free}(t) : X \setminus X_{obs} \cup X_{sep}(t)$. Burada $X_{sep}(t)$ merkezi $x_j(\tau)$ 'de yer alan ve bütün $t \in [0, \tau]$ için $\chi(\tau) = \bigcup^* x_j(\tau)$ olan bölgeleri göstermektedir. $x_j(\tau)$, tüm uçakların $x_j(0)$ başlangıç koşulundan $\tau > 0$ zamanında ulaşabileceği bütün durum uzayını temsil etmektedir.

Fizibilite: Uygulanabilir rota oluşturma problemi başlangıç koşulu $x_{init} \in X_{free}$ 'dan varış bölgesi $X_{arr} \subset X$ 'a oluşturulan uygulanabilir rotanın bulunması olarak tanımlanabilir. Bu rota, en az bir tane var olması durumunda $x(0) = x_{init}$ ve $x(\tau) \in X_{arr}$ üzere $x : [0, \tau] \rightarrow X_{free}$ şeklinde tanımlanabilir.

Optimalite: $J : X_{free} \rightarrow \mathbb{R}_{>0}$ bütün çakışma içermeyen rotaları tanımlasın. Yörünge optimizasyonu problemi, bu rota kümesi arasından en düşük maliyetlisini bulmak olarak tanımlanabilir. Matematiksel dilde ise verilen $x_{init} \in X_{free}$ başlangıç koşulu ve $X_{arr} \subset X$ varış bölgesi için $J(x_1 | x_2) \geq J(x_1)$ ve $J(x^*) = \min_{x \in \Sigma_{cl}(X_{free})} J(x)$ olacak şekilde $x^* : [0, \tau] \rightarrow cl(X_{free})$ rotasını bulmak şeklinde ifade edilebilir.

Uçuş rota optimizasyonu için maliyet fonksiyonu $J(x^*)$ ise yakıt maliyeti J_f ve zaman maliyeti J_t toplamı cinsinden ifade edilebilir:

$$J = c_f \Delta m + c_t \tau \quad (2)$$

Burada c_f kg başına düşen yakıt maliyeti, c_t birim saat başına düşen zaman maliyeti, Δm harcanan yakıtı, τ ise harcanan zamanı temsil etmektedir. *Cost Index (CI)* olarak isimlendirilen parametre ise

uçuş bilgisayarlarında kullanılan önemli bir parametre olup yakıt ve zaman arasındaki oranı temsil etmektedir ve $CI = \frac{c_f [\$/hr]}{c_f [cents/lb]}$ şeklinde tanımlanmıştır [Boeing, 2009]. Ekonomik modda uçuşun tırmanma, seyir ve alçalmadaki sürat profili bu değere göre belirlenir. Bu durumda maliyet fonksiyonu $J = c_f(\Delta m + CI\tau)$ olarak yeniden yazılabilir.

Rota Hesaplama Modeli

4D rota hesaplama, verilen herhangi bir zaman genişliği için uçuşun ileriki hareketlerinin öngörülmesidir. Uçağın başlangıç koşulları, takip edilmesi istenen yörünge, atmosfer bilgisi uçak performans modeli, tipik bir rota hesaplama altyapısının girişleridir. Uçağın kinodinamik modellemesinde standart yörünge uygulamalarında kullanılan 3-serbestlik dereceli veya diğer adıyla nokta kütle hareket modeli kullanılmıştır. Bu modelde uçağın hali hazırda kendi içerisinde kararlı ve kontrol edilebilir olduğu kabul edilip, takip ettiği yörünge ile ilgilenilmektedir. Rota hesaplama algoritması, uçak performans modeli olarak EUROCONTROL'un bir ürünü olan Base of Aircraft Data (BADA) kullanılmaktadır [Nuic, 2005]. Çalışmada son sürüm olan BADA 4 kullanılmıştır. Bu versiyon, öncekilerden farklı olarak uçağa etkiyen kuvvetleri uçağın durumları ve atmosfer koşullarına bağlı olarak parametrik ifade etmektedir. Teknik altyapısını Boeing'in sağladığı bu veritabanı, gelişmiş modellemeleri sayesinde nominal değerlerin üzerine çıkarak parametre öngörmesi ve optimizasyon gibi işlemleri yapılabilir kılmaktadır. BADA 4 altyapısı ile daha detaylı bilgi [Nuic, 2005]'te bulunmaktadır.

Hava trafik uygulamalarında sıklıkla kullanılan 3-serbestlik dereceli model için hareket denklemleri aşağıdaki gibi tanımlanmıştır. Benzetim çalışmalarında Runge-Kutta ayrıklaştırılması kullanılarak diferansiyel denklem seti çözülmüştür.

$$\dot{v} = \frac{T - D - W \sin \gamma}{m} - \dot{w}_1 \quad (3)$$

$$\dot{\chi}_h = \frac{\frac{L \sin \mu}{m} + (\dot{w}_3 \sin \mu - \dot{w}_2 \cos \mu)}{v \cos \gamma} \quad (4)$$

$$\dot{m} = -F \quad (5)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{v \cos \gamma \sin \chi + w_2}{(N_c + h) \cos \varphi} \quad (6)$$

$$\dot{\varphi} = \frac{v \cos \gamma \cos \chi + w_1}{(M_c + h)} \quad (7)$$

$$\dot{h} = v \sin \gamma, \quad (8)$$

$$L = \frac{W \cos \gamma - m(\dot{w}_3 \cos \mu + \dot{w}_2 \sin \mu)}{\cos \mu}. \quad (9)$$

Burada $[v, \chi, m, \lambda, \varphi, h] \in X \subseteq \mathbb{R}^n$ sırasıyla gerçek hava hızı $[m/s]$, uçak baş açısı $[rad]$, kütle $[kg]$, enlem $[rad]$, boylam $[rad]$ ve irtifa $[m]$ değerlerini temsil etmektedir. Kontrol girişleri ise $[\gamma, \delta_T, \mu] \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ olup tırmanma açısı $[rad]$, gaz kolu seviyesi ve yatma açısı $[rad]$ şeklinde tanımlanmıştır.

Düşük Maliyetli Rota Oluşturma

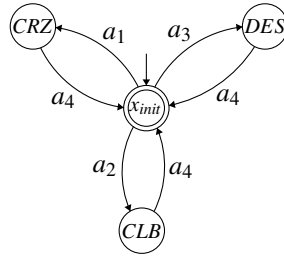
Uçak için herhangi iki konfigürasyon arasındaki optimal rotayı bulma problemi $J(x^*) = \min_{u \in U} J(x)$ lineer olmayan dinamikler ve kısıtlar sebebiyle çözümü karışık bir problemdir. Bu bölümde, çoklu-mod ayırma yaklaşımı ile problem sadeleştirilmiştir. Yaklaşımın dezavantajı ise problemi konveks optimizasyona dönüştürüp çözümünü basitleştirmesine karşılık olarak optimal sonuçtan uzaklaştırmasıdır. Buradaki rota hesaplama algoritması, giriş olarak başlangıç durumu x_{init} , hedef

Çizelge 1: Manevra kütüphanesi

<i>ACC</i>	Sabit-irtifa ivmelenme
<i>DEC</i>	Sabit-irtifa yavaşlama
<i>CAS</i>	Kalibre hava hızı V_{CAS} koru
<i>Mach</i>	Mach sayısı koru
<i>LVL</i>	Sabit-irtifa ve sabit-sürat

durumu $x_{wpt} = [\lambda_{wpt} \phi_{wpt} h_{wpt}]$ ve referans Cost Index CI parametrelerini alıp var olması durumunda uygulanabilir rota segmentini ve gerekli kontrol girişlerini üretmektedir. Buradaki algoritma, sadece iki konum arasındaki planlamayı yapıp bir uçuş segmentini oluşturmaktadır. Oluşturulan rotanın engel bölgeleri X_{obs} içinde yer alıp almadığı ise global planlayıcı tarafından kontrol edilmektedir.

Modal ayırma yaklaşımının arkasındaki temel fikir, uçuşu mod sekansları şeklinde tanımlamaktır. Bu çalışmada iki seviyeli otomat kullanılmıştır. Birinci seviyede uçuşun tırmanma *CMB*, seyir *CRZ* ya da alçalma *DES* uçuş kalıplarından hangisinde olduğuna bakılmaktadır (Şekil 2). Algoritma ikinci seviyeye dallanarak bu uçuş kalıplarının içerisindeki modlara bakmakta, uçuş dinamiğini ona göre şekillendirmektedir. Bu manevralar Çizelge 1’de tanımlanmıştır. *ACC* manevrası sabit irtifada hızlanmaya, *DEC* sabit irtifada yavaşlamaya, *CAS* düzeltiliş hava süratini sabit tutmaya, *Mach* Mach sayısını sabit tutmaya ve *LVL* sabit irtifada sabit hızla uçuşa karşılık gelmektedir. Düzeltiliş hava sürati V_{CAS} gerçek hava süratinin irtifaya göre indirgenmiş halidir. Bu iki sürat arasındaki ilişki [ECTL, 2009]’da bulunabilir.



$$\begin{aligned}
 a_1 : h_{init} &= h_{wpt}, h_{init} \in x_{init} \\
 a_2 : h_{init} &< h_{wpt} \\
 a_3 : h_{init} &> h_{wpt} \\
 a_4 : x_p &= x_{wpt}
 \end{aligned}$$

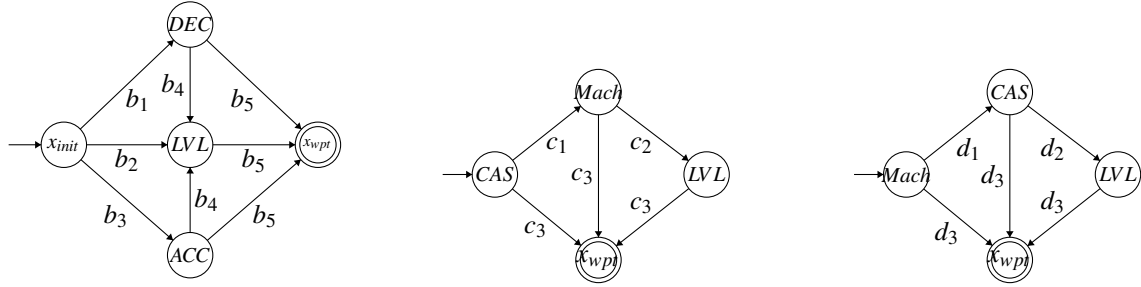
Şekil 2: Birinci seviyedeki uçuş kalıbı otomatı: Seyir *CRZ*, Tırmanma *CMB* ve Alçalma *DES* modları

Her bir uçuş kalıbı, kendine özgü manevra sekansına ve optimizasyon stratejisine sahiptir. Seyir *CRZ* uçuş kalıbında hedef, bu faz için oluşturulacak yörüngenin maliyet fonksiyonunu en düşük yapan seyir Mach hızını bulmaktır. Bu noktada, uçuş yönetimi bilgisayarlarında da bulunan bir yöntem olan *Economic Cruise Cost Function* kullanılmıştır [Airbus, 1998]. Hesaplama yapılırken rüzgar hızı w da dahil edilmiş olup M_{mo} uçağın ulaşabileceği en yüksek Mach sayısını belirtmektedir:

$$dJ = c_f F dt + c_t dt = \frac{c_f F + c_t}{(V + w)} dr \quad (10)$$

$$ECCF = \frac{dJ}{c_f dr} = \frac{c_f F + c_t}{c_f (V + w)} = \frac{CI + F}{V_{TAS} + w} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 M_{cruise} &= \{M_i, i \in \mathbb{N}, 0 < M_i \leq M_{mo}\} \\
 ECCF(M^*) &= \min_{M \in M_{cruise}} ECCF(M)
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 b_1 : M^* < M_{init}, M_{init} \in x_{init} & \quad c_1 : M(t + \tau_M) = M^*, \tau_M \in [0, \tau] & d_1 : CAS(t + \tau_{CAS}) = CAS^*, \tau_{CAS} \in [0, \tau] \\
 b_2 : M^* = M_{init} & \quad c_2 : h(t + \tau_h) = h_{wpt}, \tau_h \in [0, \tau] & d_2 : h(t + \tau_h) = h_{wpt}, \tau_h \in [0, \tau] \\
 b_3 : M^* > M_{init} & \quad c_3 : x_p = x_{wpt} & d_3 : x_p = x_{wpt} \\
 b_4 : M(t + \tau_M) = M^*, \tau_M \in [0, \tau] & & \\
 b_5 : x_p = x_{wpt} & &
 \end{aligned}$$

Şekil 3: Soldan sağa CRZ (Seyir), CMB (Tırmanma) ve DES (Alçalma) için manevra otomatları

Uçak, hedef Mach sayısından farklı bir süratte seyir etme durumunda ACC ve DEC manevralarıyla bu sürata ulaşmak için itki kuvvetini ayarlamaktadır.

Tırmanma CMB uçuş kalıbında manevra düzeni Şekil 3'te gösterilmiş olup şu şekildedir: Birinci aşamada CAS manevrası ile uçak düzeltilmiş hava süratini koruyarak tırmanmaktadır. Bu manevra ile birlikte irtifa arttıkça gerçek uçuş hızı v artmaktadır. Beraberinde, hava seyredildiği için ses hızı düşmekte ve Mach sayısı da artmaktadır. Uçak sürati belirli bir M^* Mach değerine ulaştığında, Mach manevrası ile tırmanma açısını bu sürati koruyacak şekilde ayarlamaktadır. h_{wpt} hedef irtifaya ulaşıldığında LVL manevrası ile hareket sabit sürat ve sabit irtifada x_{wpt} hedef konumuna kadar devam etmektedir. Optimizasyon problemi, bu uçuş segmenti için maliyeti en düşük yapan M^* değerini bulma şeklindedir:

$$\begin{aligned}
 M_{climb} &= \{M_i, i \in \mathbb{N}, M_{init} < M_i \leq M_{mo}\} \\
 J(M^*) &= \min_{M \in M_{climb}} J(M)
 \end{aligned}$$

Alçalma DES benzer bir yaklaşıma sahip olup Şekil 3'te gösterilmiştir. Birinci kademede Mach manevrası ile Mach sayısı sabit tutularak irtifa düşürülmektedir. Uçak belirli bir CAS^* düzeltiliş hava süratine ulaştığında CAS manevrası ile alçalmaya devam etmektedir. Uçuş segmenti LVL manevrası ile tamamlanmaktadır. Değeri bulunmak istenen parametre, bu uçuş segmenti için maliyeti en düşük yapan CAS^* düzeltilmiş hava süratidir.

$$\begin{aligned}
 CAS_{descent} &= \{CAS_i, i \in \mathbb{N}, CAS_{stall} < CAS_i \leq CAS_{mo}\} \\
 J(CAS^*) &= \min_{CAS \in CAS_{descent}} J(CAS)
 \end{aligned}$$

Burada CAS_{stall} tutunma kaybı yaşanmadan uçulabilecek en düşük düzeltilmiş hava süratini; CAS_{mo} azami düzeltilmiş hava süratini belirtmektedir.

Taktiksel Seviyede Çakışma Ayırma

Çakışma tespiti ve ayırma prosedürü, uçak dinamiği kaynaklı ulaşabilirlik problemini içermektedir. Bu prosedüre yer ve havada olmak üzere iki farklı perspektiften bakılması gereklidir. Gelecek hava trafik sisteminde insansız hava araçları da dahil olmak üzere farklı çeşit uçakların bulunacağı öngörülmektedir. Dolayısıyla bu araçların rotalarını hesaplamak ve tahmin etmek üzere farklı uçak performans modelleri veya ilgili model kütüphaneleri de beraberinde gelecektir. Hava sahasındaki tüm uçakların, performans modellerini kullanarak ileri bir zamandaki konumunu hesaplayabilecek yüksek işlem güçlü sistemlerin yer tarafında bulunması gerekecektir. Yer bazlı sistemlerin kompleks hesaplamaları yapması daha uygulanabilir olacaktır. Havadaki bir uçağın kendi içerisinde uygulayabileceği yöntem ise, çevredeki uçakların ADS-B üzerinden yayın yaptığı konum verisini kullanmak olacaktır.

Bu çalışmada, verilen bir performans modeli için uygulanabilir rotanın hesaplanmasında RRT* algoritması kullanılmıştır. RRT*, örnekleme tabanlı bir hareket planlama algoritması olup asimptotik optimal özelliğini taşımaktadır. Asimptotik optimal, örnekleme sayısı sonsuza yaklaştıkça çözümün optimal sonuca yakınsamasını ifade etmektedir. RRT* temel yapısı Algoritma 1'de belirtilmiştir:

Algoritma 1: RRT* temel yapısı

```

1  $V \leftarrow x_{init}, E \leftarrow \emptyset, i \leftarrow 0,$ 
2 while  $i < N$  do
3    $G \leftarrow (V, E)$ 
4    $x_{rand} \leftarrow Sample(i)$ 
5    $(V, E) \leftarrow Extend(G, x_{rand})$ 
6    $i \leftarrow i + 1$ 

```

Birinci satır, başlangıç koşullarını temsil etmektedir. Üçüncü satır, o ana kadar hesaplanmış olan düğüm noktalarını ve çizgileri giriş olarak ağacı oluşturmaktadır. *Sample* fonksiyonu ile üç boyutlu uzayda uçak için enlem, boylam ve irtifanın bulunduğu konum bilgisi x_{rand} örneklenmektedir. Beşinci satırda *Extend* fonksiyonu ile bu örneklenen konuma ulaşmaya çalışılmakta, hesaplanan yeni uçuş segmenti grafa eklenmektedir. *Extend* fonksiyonunu açıklayan yapı, Algoritma 2'de verilmiştir.

Nearest fonksiyonu, ağaç içerisinde halihazırda bulunan ve örneklenen x_{rand} konumuna en yakın olan düğüm noktasını hesaplamaktadır. Üçüncü satırda yer alan *Generate* fonksiyonu, bir önceki bölümde açıklanan uçuş kalıpları otomatlarını kullanarak uçağı graftaki en yakın $z_{nearest}$ noktasından örneklenen x_{rand} konumuna ulaştıracak kontrol girişlerini herhangi bir çakışma olup olmadığına bakmadan hesaplar. *ConflictFree*, hesaplanan bu rotanın çakışma bölgesinde yer alıp almadığını kontrol eder. *Near* fonksiyonu, örneklenen x_{rand} konumuna belirli uzaklıkta olan bütün z_{near} düğüm noktalarını bulur. Algoritma, *Generate* fonksiyonu ile z_{near} noktalarından x_{rand} konumuna giden rotaları hesaplayarak çakışma olmaması halinde bu rotaların maliyetine bakar ve z_{min} en düşük maliyetli çıkış noktasını seçer. Son olarak, z_{near} kümesi içerisinde, ağacın başından başlayarak z_{min} dışında kalan bütün noktalardan geçerek x_{rand} konumuna ulaşan rotalara ve maliyetlerine bakılır. Algoritma, tüm süreç içerisindeki uygulanabilir ve en düşük maliyetli rotayı seçer.

Benzetim Çalışmaları

Bu bölümde önerilen yöntemin örnek senaryolarda uygulandığı benzetim çalışmaları yer almaktadır. Senaryolarda, birden fazla uçuşun bulunduğu trafikte çakışma ayırma problemi ele alınmıştır. Trafikteki uçakların sabit sürat ve sabit yönde gittikleri varsayılarak ileriki konumları hesaplanmıştır. Engel bölgeleri bu konumlar etrafına yatayda 5 mil ve dikeyde 2000 feet şeklinde silindirler çizilerek belirlenmiştir. Bu değerler, hava trafik otoriteleri tarafından belirlenen minimum ayırma

Algoritma 2: *Extend()* fonksiyonu

```

1   $V' \leftarrow V, E' \leftarrow E$ 
2   $z_{nearest} \leftarrow \text{Nearest}(G, z)$ 
3   $(x_{new}, u_{new}, \tau_{new}) \leftarrow \text{Generate}(z_{nearest}, z)$ 
4   $z_{new} \leftarrow x_{new}(\tau_{new})$ 
5  if Conflict Free( $x_{new}$ ) then
6       $V' \leftarrow V' \cup \{z_{new}\}$ 
7       $z_{min} \leftarrow z_{nearest}$ 
8       $Z_{near} \leftarrow \text{Near}(G, z_{new}, |V|)$ 
9      forall the  $z_{near} \in Z_{near}$  do
10          $(x_{near}, u_{near}, \tau_{near}) \leftarrow \text{Generate}(z_{near}, z_{new})$ 
11         if Conflict Free( $x_{near}$ ) and  $x_{near}(\tau_{near}) = z_{new}$  then
12              $c' \leftarrow J(z_{near}) + J(x_{near})$ 
13             if  $c' < J(z_{new})$  then
14                  $z_{min} \leftarrow z_{near}$ 
15      $E' \leftarrow E' \cup \{(z_{min}, z_{new})\}$ 
16     forall the  $z_{near} \in Z_{near} \setminus \{z_{min}\}$  do
17          $(x_{near}, u_{near}, \tau_{near}) \leftarrow \text{Generate}(z_{new}, z_{near})$ 
18         if Conflict Free( $x_{near}$ ) and  $J(z_{near}) > J(z_{new}) + J(x_{near})$  and  $x_{near}(\tau_{near}) = z_{near}$  then
19              $z_{parent} \leftarrow \text{Parent}(z_{near})$ 
20              $E' \leftarrow E' \setminus \{(z_{parent}, z_{near})\}$ 
21              $E' \leftarrow E' \cup \{(z_{new}, z_{near})\}$ 
22 return  $G' = (V', E')$ 

```

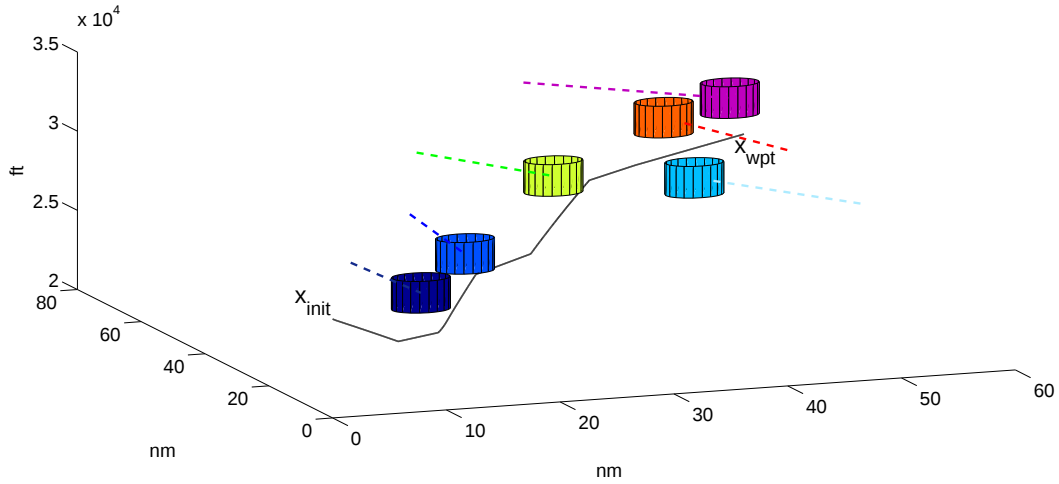
değerleridir. Rüzgar hızının 7 m/s ortalamalı bir normal dağılım şeklinde olduğu varsayımı yapılmıştır. Her bir senaryo için örnekleme sayısı 400 olarak seçilmiştir.

Birinci senaryonun 400 örnekleme ile bulunan sonucu Şekil 4 üzerinde gösterilmiştir. Başlangıç rotası farklı yönlerden gelen birden fazla uçağın yörüngesi sonucu çakışma içermektedir. Algoritma çözüm olarak önce alçalma, ardından tırmanma uçuş kalıplarını bulmuştur. İrtifa seviyesi ve sürat grafikleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Her bir uçuş kalıbı kendine özgü manevra sekansı içermektedir. Bu manevra dizileri uçuşun sürat profilini tanımlamaktadır.

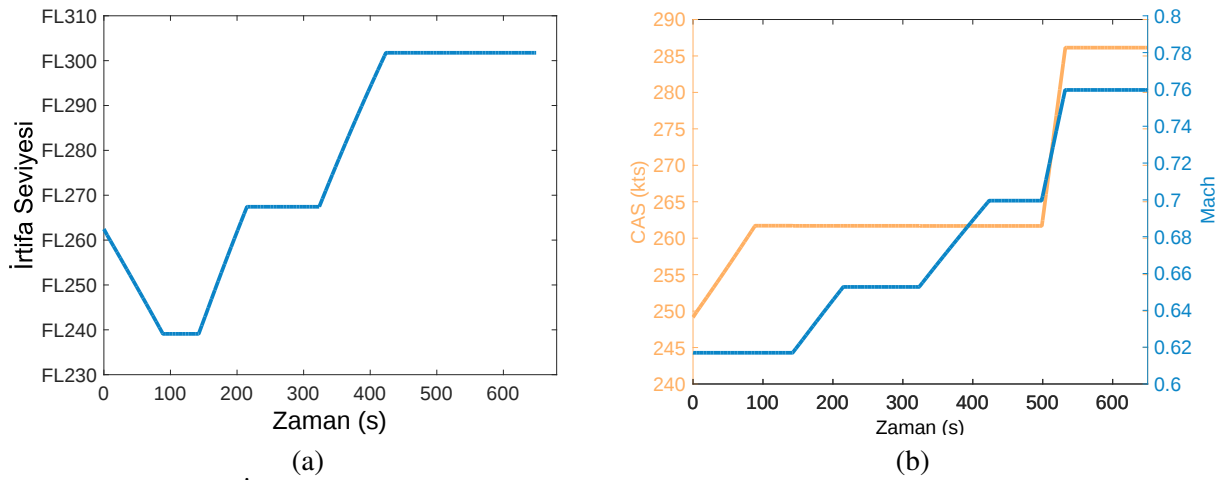
İkinci senaryonun 400 örnekleme ile bulunan sonucu Şekil 6 üzerinde gösterilmiştir. Başlangıç rotası farklı yönlerden gelen birden fazla uçağın yörüngesi sonucu çakışma içermektedir. Algoritma çözüm olarak iki adet ardışık tırmanma kalıbı bulmuştu. Üçüncü senaryo için bulunan çözüm Şekil 8'de gösterilmiştir. Çözüm olarak tek tırmanma kalıbı bulunmuştur. İkinci ve üçüncü senaryoların irtifa ve sürat profilleri Şekil 7 ve 9'da resmedilmiştir.

SONUÇ

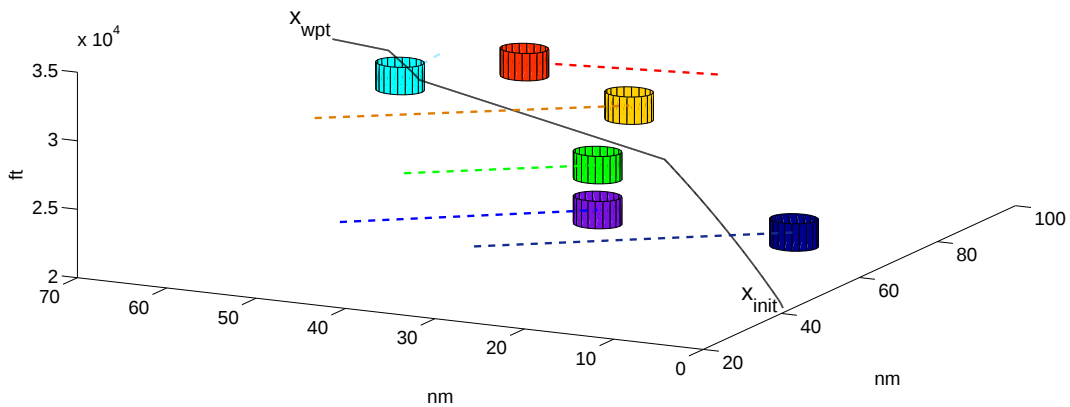
Yapılan çalışma kapsamında hem Avrupa'nın hem Amerika'nın hava trafik yönetimi konusunda yaptığı kapsamlı araştırmalar incelenmiş ve buradaki trendler takip edilmiştir. Hava trafik yönetiminde kapasiteyi artırmak üzere yer kontrolcülerinin görevlerini daha çok genel akışı yönetmesi vizyonlanmıştır; pilotların ise daha çok aktif rol aldığı bir dünya çizilmiştir. Pilotlara karar vermelerinde destek olacak görsel sistemler tasarlanmış, yer ile uçağın aynı anda işbirlikçi bir biçimde uçuş operasyonunu yönettiği konseptler eklenmiştir. Bunların yanında çarpışmaları gözleyen ve gerektiği durumda otonom ayırma yapabilen sistemler için algoritma tasarlanmıştır.



Şekil 4: Senaryo 1: 400 örnekleme sonucu elde edilen ve kaçış manevralarını içeren yörünge

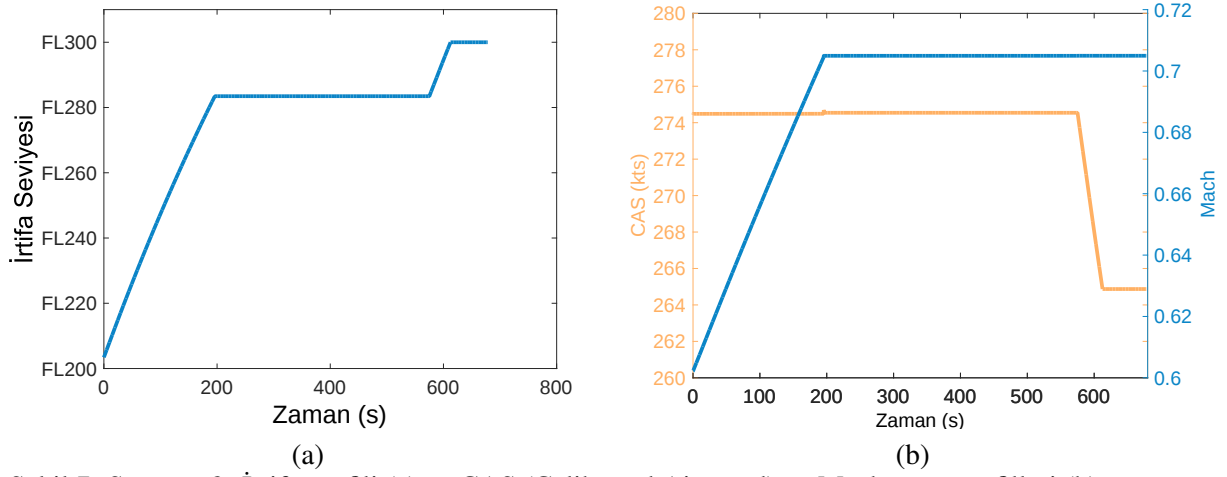


Şekil 5: Senaryo 1: İrtifa profili (a) ve CAS (Calibrated Airspeed) ve Mach sürat profilleri (b)

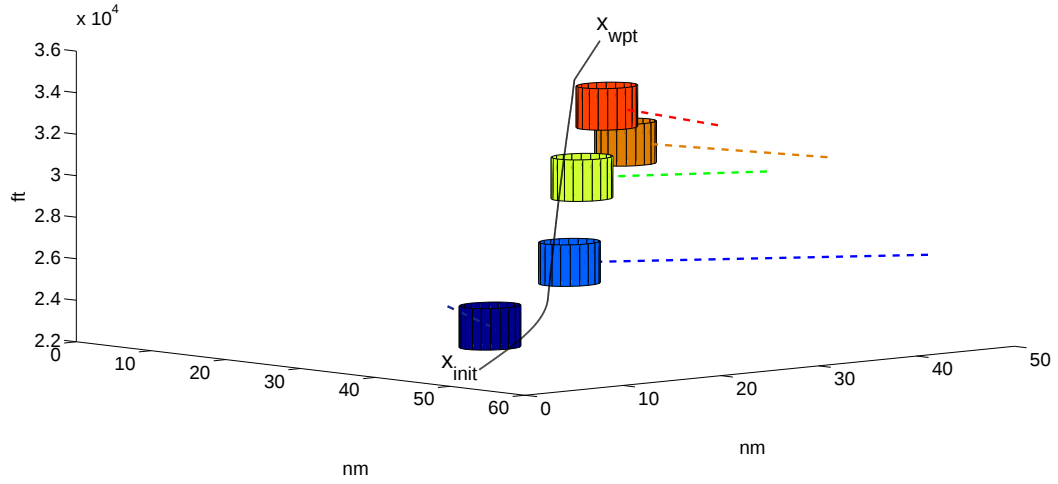


Şekil 6: Senaryo 2: 400 örnekleme sonucu elde edilen ve kaçış manevralarını içeren yörünge

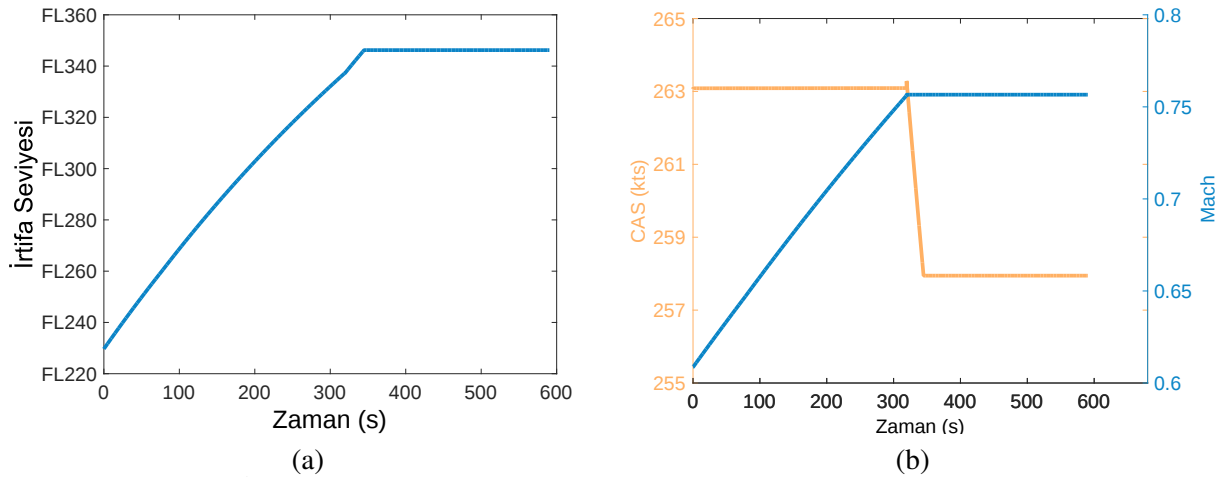
Geleceğin hava trafik koşulları vizyonlanarak göz önünde bulundurulmuş, önerilen yöntemin hem bugünün hem de geleceğin hava trafik yönetim sistemine katkı sağlaması amaçlanmıştır.



Şekil 7: Senaryo 2: İrtifa profili (a) ve CAS (Calibrated Airspeed) ve Mach sürat profilleri (b)



Şekil 8: Senaryo 3: 400 örnekleme sonucu elde edilen ve kaçış manevralarını içeren yörünge



Şekil 9: Senaryo 3: İrtifa profili (a) ve CAS (Calibrated Airspeed) ve Mach sürat profilleri (b)

Kaynaklar

- Airbus Customer Services, 1998 *Getting to Grips with the Cost Index*, Flight Operations Support and Line Assistance, Mayıs
- Altus, S., 2009 *Effective Flight Plans Can Help Airlines Economize*, Boeing Aero
- Christodoulou, M. A., Kodaxakis G., 2006 *Automatic Commercial Aircraft-Collision Avoidance In Free Flight: The Three Dimension Problem*, IEEE Transportation Systems, IEEE Transactions, 7(2):242-249, 2006.
- Chrysanthopoulos, J. P., 2011 *Accounting For State Uncertainty in Collision Avoidance*, Journal of Guidance
- Dever, C., Mettler, B., Feron, E., Popovic, J. and McConley, M., 2006 *Nonlinear Trajectory Generation for Autonomous Vehicles via Parametrized Maneuver Classes*, Journal of Guidance Control and Dynamics, 29:289-302
- EUROCONTROL Experimental Centre, 2013 *User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Family 3.11*, EEC Technical Scientific Report, Nisan
- Frazzoli, E., Dahleh, A. ve Feron, E., 2005. *Maneuver-Based Motion Planning for Nonlinear with Symmetries*, IEEE Transactions on Robotics, 21(6):1077-1091, Kasım
- How, J. P. and Richards, A., 2002 *Aircraft Trajectory Planning with Collision Avoidance Using Mixed Integer Linear Programming*, American Control Conference, Proceedings of the 2002, vol.3
- Karaman, S. ve Frazzoli, E., 2010. *Incremental Sampling Based Algorithms for Optimal Motion Planning*, International Journal of Robotics Research, 2010
- Karaman, S. and Frazzoli, E., 2010 *Optimal Kinodynamic Motion Planning Using Incremental Sampling-Based Methods*, 49th IEEE Conference on Decision and Control
- Karaman, S., Walter, M. R., Perez, A., Frazzoli, E. and Teller, S., 2011 *Anytime Motion Planning using the RRT**, IEEE International Conferences on Robotics and Automation
- Kuchar, 2000. *A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods*, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Nisan
- LaValle, S. ve Kuffner, J., 1999. *Randomized Kinodynamic Planning*, Robotics and Automation, 1999, Proceedings, IEEE, 1:473-479, Nisan
- LaValle, S. M. and Kuffner, J. J., 2000 *An Efficient Approach to Single-Query Path Planning*, International Conference on Automation (ICRA), vol. 2
- LaValle, S. M., 2004 *On the Relationship Between Classical Grid Search and Probabilistic Roadmaps*, International Journal of Robotics Research, Ağustos
- NextGen, 2004. *Next Generation Air Transportation System Integrated Plan*, Technical Report, Joint Planning and Development Office, Aralık
- NextGen JPDO, 2012. *Concept of Operations*, Technical Report, Joint Planning and Development Office, Ver 3.2, Aralık
- Nuic, A., Poinot, C. Igaru, M., Gallo, E., Navarra, F. A. ve Querejeta, C. 2005. *Advanced Aircraft Performance Modelling for ATM: Enhancements to the Bada Model*, Digital Avionics Systems Conference, 24, s.2-4, IEEE 2005

- Rubinstein, R. Y ve Kroese, D. P., 2004. *The Cross-Entropy Method: A Unified Approach to Combinatorial Optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning*, Springer Science and Business Media
- SESAR JU, 2013. *The Concept of Operations at a glance*, Technical Report, SESAR JU Deliverable 3, Aralık
- Şucan, I. and Kavraki, L. E., 2000 *A Sampling-Based Tree Planner for Systems With Complex Dynamics*, IEEE Transactions on Robotics, 28(1):116-131
- Tomlin, C., Pappas, J. G. and Sastry, S., 1998 *Conflict Resolution for Air Traffic Management: A Study In Multi-Agent Hybrid Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, 43
- Uzun, M., Koyuncu, E. ve İnalhan. G., 2014. *Integrated Flight Deck Testbed with Next Generation Visual Decision Support Tools*, International Conference on Research in Air Transportation, 25-29 Mayıs
- Winder, L. F., 2004 *Hazard Avoidance Alerting with Markov Decision Process*,
- Wolf, T. and Kochenderfer, M., 2011 *Aircraft Collision Avoidance Using Monte Carlo Real-Time Belief Space Search*, Journal of Intelligent and Robotics Systems, 64:277-298