

## AYRIŞMA AMAÇLI HAVA TRAFİK KONTROL KARAR SÜREÇLERİ İÇİN HİBRİD OTOMAT MODELİ

Bariş Başpınar<sup>1</sup>, Cengiz Paşaoğlu<sup>2</sup>, Salih Sabri Aydın<sup>3</sup>, Metin Özgür<sup>4</sup>, Serkan Bayar<sup>5</sup>, Fulya Aybek<sup>6</sup>, Bahadır Zeren<sup>7</sup>, Aydan Cavcar<sup>8</sup>, İbrahim Özkol<sup>9</sup> ve Gökhan İnalhan<sup>10</sup>  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul<sup>1,9,10</sup>  
Anadolu Üniversitesi, Eskişehir<sup>3,4,5,6,8</sup>  
Devlet Hava Meydanları<sup>2</sup>  
Türk Hava Yolları<sup>7</sup>

### ÖZET

Mevcut hava trafik kontrol operasyonlarında, kontrolörler uçuş rotalarını radar ekranları üzerinden izlemekte ve bazı otomasyon destek sistemlerinin yardımı ile de mental bazı kararlar vermektedirler. Hava sahası kullanımının en temel bariyeri olan hava trafik kontrolörü iş yükü şu iki kaynaktan oluşmaktadır; a) koordinasyon, sesli komut ve iletişim, bilgi yönetiminden kaynaklanan rutin görevler, ve b) taktiksel seviyede ayrışma tespiti, durum değerlendirmesi ve ayrışma çözümünden kaynaklanan görevler. Hava Trafik artışı ile rutin görev yükleri doğru orantılı olarak artarken, taktiksel görev yükleri karşılıklı ilişkilerden dolayı trafik artışının karesi seviyesinde artış göstermektedir. Kontrolörlere ait mevcut sesli iletişim ve ayrışma yönetimi karar sorumlulukları SESAR ve NextGen programları vizyonları ile gelen yeni fonksiyonlar ve araçlar ile değişmektedir. Ayrışma tabanlı rota yönetiminden Rota Tabanlı Operasyon'a (TBO) geçiş paradigma değişimi kontrolörlerin mevcut rollerini değiştirmekle kalmayıp, ek sorumluluklar da getirmektedir. Bunun yanında yeni data-linkleri entegrasyonu ile ayrışma yönetimi uçak performansı, hava ve hava sahası koşullarının bir fonksiyonu haline gelecektir. Bu çalışmada kontrolör operasyonlarının rutin çalışma süreçleri belirlenmiş ve iki farklı mod için iki ayrı otomat haline getirilmiştir. Bunun için ayrık durumları ve durumların kendi sürekli uzayları olduğu hibrid modellerden yararlanılmış; Yaklaşma/Kalkış (APP) ve seyir (ACC) durumları için kontrolör operasyonları modellenmiştir. Oluşturulan bu modeller sayesinde iki moddaki kontrol operasyonları otonomlaştırılmıştır. Bu modellerin ALL\_FT+ Avrupa Hava Sahası Uçuş Bilgileri verileri ile validasyonu yapılmış ve başarımları değerlendirilmiştir.

### GİRİŞ

Mevcut hava trafik sisteminin temelleri 1944 'teki Chicago Kongresi ardından kurulan Uluslararası Sivil Havacılık Organizasyonu (ICAO) ile oluşturulmuştur. Sistem halen güvenli bir şekilde işlemesine rağmen hava trafiği giderek artmaktadır. Şuan da yıllık olarak 26 milyon ticari uçuş gerçekleşmektedir, eğer trafik büyümesi beklenen oranlarda gerçekleşmeye devam ederse bu

<sup>1</sup> Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh., E-posta: baspinarb@itu.edu.tr

<sup>2</sup> Uzman, E-posta: CENGIZ.PASAOGLU@dhmi.gov.tr

<sup>3</sup> Yer Kontrolörü, Hava Trafik Kontrol Böl., E-posta: saliha@anadolu.edu.tr

<sup>4</sup> Öğretim Görevlisi, Hava Trafik Kontrol Böl., E-posta: mozgur4@anadolu.edu.tr

<sup>5</sup> Yer Kontrolörü, Hava Trafik Kontrol Böl., E-posta: serkanbayar@anadolu.edu.tr

<sup>6</sup> Öğretim Görevlisi, Hava Trafik Kontrol Böl., E-posta: faybek@anadolu.edu.tr

<sup>7</sup> Uzman, E-posta: bzeren@gmail.com

<sup>8</sup> Prof. Dr., Hava Trafik Kontrol Böl., E-posta: acavcar@anadolu.edu.tr

<sup>9</sup> Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: ozkol@itu.edu.tr

<sup>10</sup> Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: inalhan@itu.edu.tr

sayının 2030 yılında 48.7 milyon olması ön görülmektedir [ATAG, 2014]. Mevcut Hava Trafik Yönetimi (ATM) operasyonlarında, hava trafik kontrolörü trafiği radar ekranından görmekte ve bazı otomasyon araçları yardımı ile bilişsel muhakeme yaparak muhtemel çarpışmaları engellemektedir. Hava sahası kapasitesinin yüksek verimle kullanılabilmesinin önündeki temel engel hava trafik kontrolörlerinin iş yüküdür. Bu iş yükü iki temel kaynağı dolaydır, bunlar; koordinasyon, sözlü iletişim ve veri yönetim yapılarından kaynaklanan sıradan iş yükleri ve muhtemel çarpışmaların tespiti, durum gözetlemesi, çözüm üretilmesinden kaynaklanan taktiksel iş yükleridir [SESAR Conops]. Trafik arttıkça sıradan iş yükleri trafikle orantılı olarak artarken, taktiksel iş yükleri trafiğin karesi ile orantılı olacak şekilde artmaktadır.

Kontrolörlere ait mevcut sesli iletişim ve ayırma yönetimi karar sorumlulukları SESAR ve NextGen programları [NextGen, Sesar Conops] vizyonları ile gelen yeni fonksiyonlar ve araçlar ile değişmektedir. Ayırma tabanlı rota yönetiminden Rota Tabanlı Operasyon'a (TBO) geçiş paradigma değişimi kontrolörlerin mevcut rollerini değiştirmekle kalmayıp, ek sorumluluklar da getirmektedir. Bunun için gelecek nesil ATM operasyonlarında karar verme süreçlerine yardımcı olması amacıyla yüksek seviyeli otomasyon araçları gerekecektir. Bunun yanında yeni data-linkleri entegrasyonu ile ayırma yönetimi uçak performansı, hava ve hava sahası koşullarının bir fonksiyonu haline gelecektir.

Bu sebeplerden dolayı bu çalışma iki farklı mod için kontrolörün rutin ayırma görevini yapabilen otomatik yapılar önermektedir. Bu yapılar iki ayrı hibrid otomat olarak modellenmiş, yaklaşma (APP) ve seyir (ACC) kontrolünde çözüm üretecek şekilde iki farklı yapı olarak tasarlanmıştır. Otomatlar uçaklar arasındaki ayırmaların yaklaşma ve seyir durumunda otomatik olarak sağlanması amacıyla geliştirilmiştir.

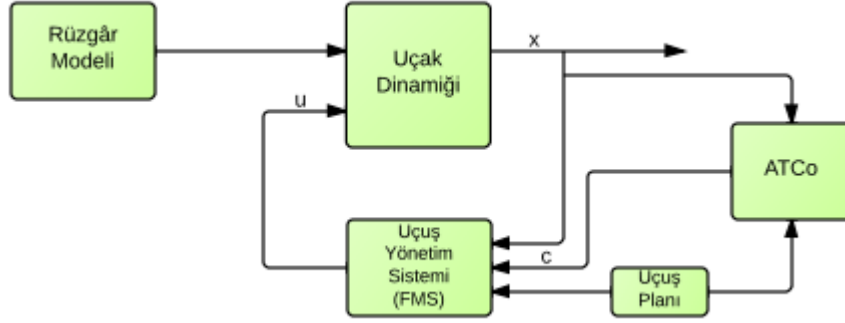
Literatürde ayırmaların sağlanması ve hava sahası kapasitelerinin artırılması ile ilgili çok farklı yaklaşımlarda çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmaların temellendirildiği yaklaşımlardan biri muhtemel çarpışmaların tespiti ve çözümünü problemini NP-zor olarak ele almak ve çözüm aramaktır [Emami, Derakhshan ve Pashazadeh, 2012] [Patchev ve Tentov, 2012]. Bu yaklaşımdaki çalışmalar genellikle serbest uçuş (free flight) konseptini merkeze almakta ve ayırma sorumluluğunu mevcut hava trafik kontrolörlerinden pilotlara kaydırmaktadır. Bu yaklaşımın mevcut sisteme entegre edilebilmesi ile ilgili altyapısal zorluklar, bu yaklaşıma yönelik çalışmalar hakkında sorular oluşturmaktadır. [Erzberger, 2004] , [Prevot, Callantine, Lee, Mercer, Battiste, Palmer ve Smith, 2005] ve benzeri çalışmalar hava-yer sistemindeki kavramsal, prosedürel ve teknolojik entegrasyonla problemleri çözmeye çalışmaktadır. [Erzberger, 2004] mevcut sistemden gelecekteki olası sisteme geçiş için geçiş sistemlerinin tasarlanmasını önermekte ve bu sistemlerin yüksek otomasyon seviyelerine sahip olmalarının gerekliliğini vurgulamaktadır. Benzer şekilde [Prevot, Callantine, Lee, Mercer, Battiste, Palmer ve Smith, 2005] 'de sistem mimarisinde yapılması gereken değişikliklerin ilk olarak taktiksel ayırmalarla ilgili kontrolör iş yüklerinin azaltılmasına odaklanılarak olacağını söylemektedir. Bu yaklaşıma paralel olarak [Bayen, Griender ve Tomlin, 2002] 'de kontrolörün karar mekanizması hibrid otomat olarak modellenmeye çalışılmıştır, ama çalışmada ayırmalar iki-boyutta yapılarak gerçek durumda hayati bir önem taşıyan irtifa değişkeni çözümler arasına katılmamıştır. Oluşturulan modelin hesap yükü manevra setinin uçak sayısı ile orantılı olacak şekilde var olan kuvveti ile orantılı olarak artmakta, bu da sektördeki uçak sayısının yaklaşık on uçak üzerine çıkması durumunda çözüm zamanını çözümün beklenmeyeceği kadar uzun sürelerle çıkarmaktadır.

Çalışmanın devam eden kısımları şu şekilde organize edilmiştir; 2.bölüm bir uçuş modellenmesi için gerekli alt birimlerin tanıtıldığı ve genel dinamik modellerin ortaya konulduğu bir bölümdür. 3.bölümde yaklaşma ve seyir kontrolörleri için gerekli olan müdahale kütüphanelerinin ortaya konularak kontrolörlerin genel karar mekanizmalarının anlatıldığı bölümdür ve 4.bölüm bu mekanizma ve kütüphanelerden hareketle oluşturulan hibrid otomatların sunulduğu bölümdür. Gerçek zamanlı olarak hibrid otomatları kullanarak çözüm aranabilmesi için gerekli olan algoritmaların anlatılması ve bu algoritmaların çözüm hızlarının tartışılması 5.bölümün içeriğini

oluşturmaktadır. 6.bölümde ise gerçek trafik verileriyle yapılan uygulamalar anlatılmış ve sonuçları sunulmuştur.

### UÇUŞUN MODELENMESİ

Hava Trafik Kontrolörünün müdahalelerinin simule edilebilmesi için uçak ve uçuş yönetim sisteminden meydana gelen bir model kullanılmıştır. Bu bölümde uçak ve uçuş yönetim sistemi modelleri sunulacaktır. Uçuş Yönetim Sistemi oluşturulurken Lygeros ve Glover'ın sunmuş oldukları modelden yararlanılmıştır, bu model hakkında daha detaylı bilgi için [Glover ve Lygeros, 2004] , [Lymeropoulos, Lecchini, Glover, Maciejowski ve Lygeros, 2007 ] kaynaklarına başvurulabilir. Kontrolörün karar vermesine yardımcı olacak ve bu kararı simule edebilecek uçuş model Şekil 1 'de sunulmuştur.



Şekil 1. Uçuş Modelinin Blok Diyagramı

Modelde her uçuşun beş farklı birimden oluştuğu kabul edilmektedir. Bu birimler:

- Uçuş Planı
- Uçak Dinamiği
- Uçuş Yönetim Sistemi (FMS)
- Rüzgâr Modeli
- Kontrolör Müdahalesi

Bu model :

- Uçak dinamiğinden dolayı bir sürekli dinamiğe
- Uçuş planı, FMS içerisine gömülmüş ayrık fonksiyonlar ve kontrolör müdahale bileşenlerinden dolayı ayrık dinamiğe
- Rüzgâr dinamiğinden dolayı rastlantısal dinamiğe

sahiptir. Bu bileşenlerden dolayı bu model bir hibrid süreç olarak adlandırılmaktadır.

#### Uçuş Planı

Uçuş planı bir dizi üç boyutlu ara noktadan (way-point) meydana gelmektedir. Her uçuş öncesinde uçak için belirlenen bu noktalar uçağın uçuş sırasında takip etmesi gereken rotayı belirlemektedir. Uygulama açısından uçuş planları ALLFT+ veri setinden elde edilmiştir, veri setinde her ara nokta için bir de zaman değişkeni bulunmaktadır fakat uygulamada uçağın sadece sektöre girmiş olduğu zaman verisi kullanılarak diğer zaman verileri kullanılmamaktadır. Bu durum yerine uçakların modellenmesi için verileri içerisinde barındıran BADA [BADA-UM, 2011] veri tabanından elde edilmiş olan hız profilleri kullanılarak trafiğin gerçek zamanlı akışı sağlanacaktır.

#### Uçak Dinamiği

Hava trafik kontrolörü açısından düşünülecek olunursa uçaklar için nokta kütle modelinin kullanılması modelleme açısından yeterli olmaktadır. Uçak dinamiği için kullanılacak olan bu model üç farklı kontrol girdisi ve altı farklı durum değişkeninden meydana gelmektedir. Uçak modelindeki

durum değişkenleri yatay konum verileri ( $x_1$  ve  $x_2$ ), irtifa ( $x_3$ ), gerçek uçuş hızı ( $x_4$ ), uçuş baş açısı (heading) ( $x_5$ ) ve uçak kütlesi ( $x_6$ ) olarak tanımlanmaktadır. Kontrol girdileri ise itki ( $u_1$ ), yatış (bank) açısı ( $u_2$ ) ve uçak yol (path) açısı ( $u_3$ ) olarak belirlenmektedir. Uçak üzerindeki rüzgâr etkileri ise rüzgârın üç boyuttaki hız bileşenleri cinsinden  $w = (w_1, w_2, w_3) \in \mathbb{R}^3$  olarak sunulmaktadır. Matematiksel işlemler sonucunda uçağın hareket denklemleri:

$$\dot{x} = \begin{pmatrix} x_4 \cos(x_5) \cos(u_3) + w_1 \\ x_4 \sin(x_5) \cos(u_3) + w_2 \\ x_4 \sin(u_3) + w_3 \\ -\frac{C_D S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4^2}{x_6} - g \sin(u_3) + \frac{u_1}{x_6} \\ \frac{C_L S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4}{x_6} \sin(u_2) \\ -\eta u_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Bu denklem takımında taşıma ve sürüklenme katsayıları  $C_L$  ve  $C_D$  sembolleri ile, kanat alanı  $S$  sembolü ile, hava yoğunluğu  $\rho(x_3)$  olarak ve yakıt sarfiyatı  $\eta$  olarak temsil edilmektedir. Bu katsayılar ve hız limitleri, kütle limitleri gibi diğer sabit parametreler BADA veri tabanından elde edilmiştir.

### Uçuş Yönetim Sistemi

Uçuş Yönetim Sistemin (FMS) temel görevi durum değişkenleri ( $x$ ), uçuş planı ve kontrolör müdahalelerini girdi olarak alarak, bu girdilere göre uçak dinamiği için gerekli olan kontrol girdilerini ( $u$ ) üretmesidir. Bu işlemi yapabilmesi için kendi içerisinde 8 adet ayırık mod'a sahiptir. Bu modlar: uçuş seviyesi modu (FL), ara-nokta indeksi modu (WP), ivmelenme modu (AM), tırmanma modu (CM), hız tutma modu (SHM), uçuş fazı (FP), indirgenmiş güç modu (RPM) ve troposfer modu (TrM) olarak sınıflandırılmaktadır. Bu modlar BADA [BADA-UM, 2011] 'daki verileri kullanarak kontrol girdilerinin üretilebileceği şekilde oluşturulmuştur. Modlar hakkında daha detaylı bilgi için [Glover ve Lygeros, 2004] , [Lymperopoulos, Lecchini, Glover, Maciejowski ve Lygeros, 2007] kaynaklarına başvurulabilir.

FMS ürettiği kontrol girdileri açısından iki farklı bileşenmiş gibi düşünülebilir. İlk bileşen  $u_1$  (itki) ve  $u_3$  (flight path angle) kontrol girdilerinin kullanılarak düşey ve ileri yönlü hareketin sağlanması, ikinci bileşen  $u_2$  (bank angle) kontrol girdisinin kullanılarak yataydaki hareketin sağlanmasıdır.

Hız ve tırmanma oranı (ROCD), itki ve yol açısı yardımıyla istenilen değerde tutulabilir. Oluşturulan modelde FMS hızı önceden prosedürle belirlenmiş olan nominal hız değerlerinde tutmaya çalışmaktadır, bu hız değerleri irtifa ve uçak tipinin bir fonksiyonu olup BADA'dan elde edilmiştir. Ayrıca kontrolör bu nominal hız ( $V_{nom}$ ) değerleri üzerinde, uçağa müdahale ettiği taktirde %2 oranında oynama yapabilir. Bu sayede gerçek durumda meydana gelen sürece benzer bir süreç gerçekleşir. Eğer uçak sabit irtifada seyir halinde ise FMS yol açısını sıfırlar, bu sayede hareket denklemi sıfır tırmanma üretir. Bu durumda itki değeri hızı istenilen değerde tutacak şekilde ayarlanabilir.

$$\dot{x}_4 = -\frac{C_D S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4^2}{x_6} - g \sin(u_3) + \frac{u_1}{x_6} \quad (2)$$

Tırmanma veya alçalma durumunda ise itki bir değerde sabitlenir. Bu sayede hız yol açısı yardımıyla kontrol edilebilir. ROCD değeri (3) denklemi ile istenilen değerde tutulur.

$$\dot{x}_3 = x_4 \sin(u_3) + w_3 \quad (3)$$

Yatay düzlemdeki hareketin kontrolü itki yardımıyla sağlanır. İlk olarak uçuş başı (4) denklemiyle kontrol edilir.

$$\dot{x}_5 = \frac{C_L S \rho(x_3)}{2} \frac{x_4}{x_6} \sin(u_2) \quad (4)$$

Ardından uçuş başı ile uçağın konumu (5) ve (6) denklemlerinde görüldüğü gibi istenildiği gibi belirlenebilir.

$$\dot{x}_1 = x_4 \cos(x_5) \cos(u_3) + w_1 \quad (5)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \sin(x_5) \cos(u_3) + w_2 \quad (6)$$

### Kontrolör Müdahaleleri

Oluşturulan modelde kontrolör dört temel parametreye müdahalede bulunabilmektedir. Direk rota verebilir, bu durumda kontrolör ara-nokta indeksine müdahalede bulunur. Hız değerine müdahalede bulunabilir, bu durumda  $V_{nom}$  değerine müdahalede bulunur. Vektör vermek istediği zamanda ise yol açısı ve yatış açısına müdahalede bulunmuş olur. Kontrolörün müdahale çeşitleri bu çalışmanın ana konusunu oluşturmaktadır, bu konuyla ilgili daha detaylı bilgi ilerleyen iki bölüm içerisinde sunulacaktır.

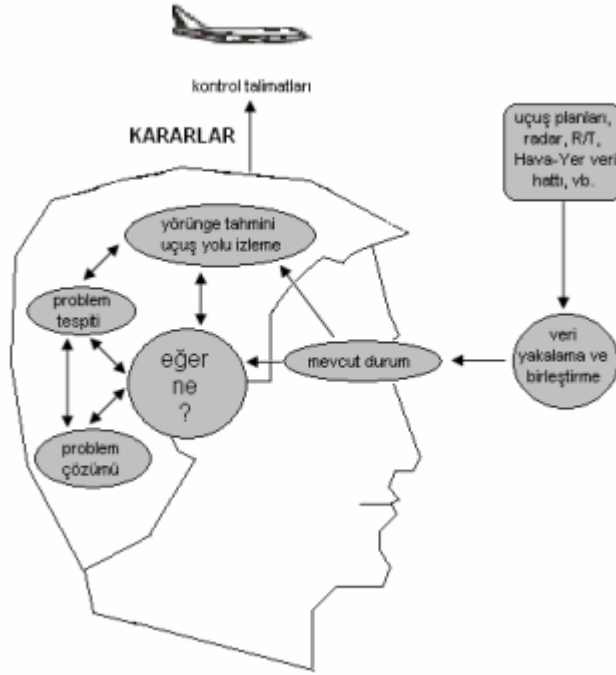
### HAVA TRAFİK KONTROLÖRÜNÜN KARAR SÜRECİ

Hava trafik kontrolörleri hava trafik akışının emniyetinden, düzeninden, hızlandırılması ve verimliliğini temin etmekten sorumludur. Bu çelişen amaçlara ulaşmak birçok karmaşık prosedür, plan, karar, iletişim ve koordinasyon faaliyetlerinin en iyi şekilde gerçekleştirilmesine bağlıdır.

Hava trafik kontrolörleri çoğunlukla aşağıdaki gibi dolaylı yollardan elde edilen bilgilerle kararlarını verirler:

- Uçuştan önce elde edilen bilgiler,
- Yere dayalı tesislerin algıladığı bilgiler,
- Uçak transponderlarından elde edilen bilgiler,
- Karşılaştırılmış veriden hesaplanan bilgiler,
- Radyo vasıtasıyla pilot tarafından iletilen bilgiler,
- Diğer kontrolörler tarafından telefonla iletilen bilgiler.

Bu bilgiler insan makine arayüzü ile kontrolörlere iletilir. Şekil 2'de orta vadeli gelecek tahminine dayalı olarak kontrolörün karar verme süreci verilmiştir. Buna göre kontrolör yukarıda da açıklanan verileri yakalar ve bunları zihninde bir anlam oluşturacak şekilde birleştirir. Mevcut durumu analiz edip kavrar. Bundan sonraki her aşamada eğer-ne sorgulamasını gerçekleştirir.



Şekil 2. Hava Trafik Kontrolörü Karar Verme Süreci [Garcia-Avello, Swierstra, 1997]

Yörünge tahmini ve uçuş yolu izleme görevi ile devam eden kontrolör karar verme süreci, problemin tespit edilmesi ve çözülmesi sonucunda verilen kararların kontrol talimatları olarak pilota iletilmesi ile sonlanır.

### Seyir Kontrolörünün Karar Mekanizması

Hava trafik kontrol hizmetlerinden biri olan seyir kontrol hizmetinde hava trafik kontrolörleri kararlarını verirken aşağıda detaylı olarak verilmiş olan kural ve kısıtlamaları dikkate almaktadır.

Saha kontrolünde çalışan kontrolörlerin sektörlerinin boyutları genelde APP ye göre daha geniştir, dolayısıyla hava araçlarına manevra yaptırma alanları da daha geniştir. Türkiye’de ACC kontrolörleri önemli/geçerli bir sebep olmadan (meteorolojik sıkıntılar, ayırma vs.) kendi sahalarında uçan uçakları rotalarından ayırmazlar. Dolayısıyla bir ACC kontrolörü çalışma anında ilk önce kendi sektörüne giren uçakların irtifalarını kontrol eder. Uçaklar arasında yeterli uçuş seviyesi (FL) farkı varsa (dikey ayırma, 1000ft) zaten uçaklar düzgün bir şekilde uçuşlarına devam edeceklerdir. Tabi burada unutulmaması gereken nokta FL ‘lerin uçakların uçuş yönlerine ya da yollara göre belirlendiğidir. Doğu yönlü uçan uçaklar tek (310-330-350 vb.) batı yönlü uçan uçaklar çift (300-320-340 vb.) seviyelerde uçacaklardır dolayısıyla karşılıklı rotalarda uçan uçaklar arasında dikey 1000ft ayırma sağlanabilmektedir, aynı rotada uçan ya da aynı yöne doğru rotaları kesişen uçaklar arasındaki ayırma 2000ft olacaktır. Yani aynı yönlü uçan ve x noktasında rotaları kesişecek uçaklar arasında kontrolör tercihen dikey ayırma sağlamak istiyorsa uçağı 2000ft alçaltacak ya da tırmandıracaktır. Burada diğer önemli bir nokta da eğer çakışma(conflict) varsa ve dikey ayırma tercih edilecekse, hava trafik kontrolörü öncelikle uçağı alçaltmayı düşünür, çünkü tırmanma uçağın kabiliyetine ve o andaki durumuna göre değişebileceği için uçağı tırmandırmayı ikinci planda tutar.

Eğer uçaklar arasında yeterli dikey ayırma yoksa yani aynı yönlü uçaklar bir noktada kesişecekse kontrolör burada ilk önce hız faktörünü düşünür, yani uçakların hızlarını kontrol eder, uçakların ilgili çakışma(conflict) noktasında yeterli yatay ayırmayla birbirlerini geçip geçemeyeceklerini düşünür. Uçaklar eğer bir noktada kesişip ayrılacaklarsa kontrolör uçakların başıyla oynayıp, onları rotalarından ayırarak yatay ayırma sağlayarak aynı seviyede birbirlerini kat etmelerini sağlar. Fakat uçaklar bir noktada buluşup aynı yolda uçuşlarına devam edeceklerse ve uzunlamasına ayırma için boş bir seviye yoksa öncelikle öndeki uçağı direk rota vererek mesafeyi arttırmak hedeflenir.

Eğer gene ayırma sağlanamayacaksa arkadan gelen ya da aynı yola bir şekilde diğerinden daha geç girecek olan uçağa gecikme manevrası yaptırılır.

### Yaklaşma Kontrolörünün Karar Mekanizması

Yaklaşma, kontrolörün inen uçakları inecekleri meydana yaklaştırıp kuleye (TWR) devrettiği ve kalkan uçakları da rotalarına oturtup ACC'ye gönderdiği birimdir.

Öncelikle kalkan uçakları ele alırsak Terminal Kontrol Sahası (TMA) denilen alana giriş/çıkış noktaları (devir noktaları) bellidir. Uçaklar kalkışlarını genelde Standart Aletli Kalkış Yollarına (SID) göre yaparlar. Yani her bir kalkan uçağın izleyeceği SID prosedürü yani kalkış yolu TWR tarafından önceden uçağa bildirilir, uçak da sistemine ilgili prosedürü girerek kalkışını yapar ve rotasını izlemeye başlar. Bir uçak kalktığında izlediği SID ile, arkasından/önünden kalkacak başka uçak ile ya da gelişteki uçaklar ile problem yaşayacaksa kontrolör öncelikle 1000ft'lik dikey ayırmayı sağlamaya çalışır.

Eğer gelişteki uçak ile problem yaşayacaksa gelişteki uçak alçalmak için hangi seviyeye müsaade edildiyse kalkacak uçak onun 1000ft altına müsaade edilir ve iki uçak birbirini geçtikten sonra tırmanış/alçalış devam ettirilir. Eğer başka kalkan uçakla sıkıntı yaşayacaksa aralarında 1000ft'lik ayırma olacak şekildeki seviyelere müsaade edilirler ve sonrasında uçaklara alçalma/tırmanma varyo tahditleri verilerek bu sabitlenir, gene de ayırma sağlanamayacaksa uçaklara ACC'de bahsetmiş olduğumuz direk rota, hız tahdidi, geciktirici vektör, orbit atma gibi talimatlar verilerek ayırma sağlanmaya çalışılır. Yani amaç kalkan uçakları hem inen uçaklardan hem de önünden/arkasından kalkan uçaklardan ayırıp biran önce ACC'ye devretmektir.

Gelişteki uçaklar için ise durum biraz daha karışıktır. Gelişteki uçakların geliş yolları olarak Standart Aletli Geliş Yolları (STAR - Standart Instrument Arrival) kullanılır. Öncelikle gelişteki uçaklar, kullanılan piste olan mesafelerine ve hızlarına göre sıralanırlar ve bu sıralama uçaklara bildirilir. Gelişteki uçaklar arasında ilk olarak dikey ayırma, sonrasında yatay ayırma en son ise uzunlamasına ayırma sağlanacak şekilde sıralanırlar. Diğer uçaklar ile dikey ayırma yoksa veya STAR'lar ve SID'ler çakışıyorsa yatayda yeterli ayırma sağlanacak ve Aletli İniş Sistemine (ILS'e) uçaklar dizilirken aralarındaki uzunlamasına mesafe korunacaktır.

Kontrolör müdahale çeşitleri, ayırmalar, STAR, SID ve ILS hakkındaki detaylı bilgi için ICAO doc 4444 [ICAO-doc4444, 2009] ve Türkiye Havacılık Enformasyon Yayını (AIP) [DHMI-AIP, 2013] dokümanlarına başvurulabilir.

Bu çalışma kapsamında gelişteki trafiğin dizilme işlemi sırasında gerekli uzunlamasına ayırmalar ICAO tarafından önerildiği uzunlamasına minima değerleri kullanılarak yapılacaktır.

**Geliş Sıralaması:** Mevcut sistem incelendiğinde akış açısından temel sıkıntının yaklaşma fazında gerçekleştiği görülmektedir, yaklaşımdaki kapasite kısıtları daha yüksek trafik akışının var olmasını engellemektedir. Mevcut sistemin işleyişine bakıldığında gelişteki uçakların dizilmesi sırasında uzunlamasına ayırma olarak IST için 5nm kullanıldığı görülmektedir. Bunun yanı sıra ICAO 'nun belirlediği geliş uzunlamasına ayırmaları; satırlar öndeki, sütunlar arkadaki uçakları göstermek üzere Tablo 1 deki gibidir. Geliş sıralamasındaki uzunlamasına ayırma değerleri olarak bu değerler kullanılarak geliş trafik kapasitesi ulaşılabilecek maksimum değerlerle kullanılmaya çalışılacaktır.

	Süper(A380)	Ağır	Orta	Hafif
Süper(A380)	4	6	7	8
Ağır	4	4	5	6
Orta	3	3	3	5
Hafif	3	3	3	3

Tablo 1. ICAO'ya göre Geliş Trafiği için Wake Türbülans Değerleri (nm olarak)

Gerçek veriler üzerinden hareket edilmek istendiğinden, 18.03.2013 ve 24.03.2013 tarihleri arasındaki 1 haftalık ALLFT+ veri seti incelenirse Atatürk Havalimanı için geliş trafiğinde günlük olarak var olan uçak sayısı ve uçak kategorileri Tablo2'de belirtildiği gibi bulunur.

	Ağır(H)	Orta(M)	Hafif(L)	Toplam
18.03.2013	27	491	0	518
19.03.2013	35	456	1	492
20.03.2013	33	465	2	501
21.03.2013	32	485	1	518
22.03.2013	37	470	2	509
23.03.2013	32	484	0	516
24.03.2013	31	481	2	514

Tablo 2. Atatürk Havalimanı için Belirtilen Tarihlerde Geliş Trafikleri ve Uçak Kategorileri

Tablo2'den hareket edilerek geliş trafiğinde kategorilere göre uçakların bulunma oranları:

$$H = 0.064, M = 0.934, L = 0.002 \quad (7)$$

Böylece Atatürk Havalimanı için gelişteki uçak karakteristikleri:

Uçak Tipi	Gelişteki Yüzdesi (%)	Yaklaşma Hızı (knot)
Ağır (1)	6.4	140
Orta (2)	93.4	120
Hafif (3)	0.2	100

Tablo 3. Uçak Karakteristikleri

Yaklaşmadaki uzunlamasına ayırma değerleri olarak Tablo1'deki değerler kullanılacak olunursa, uçak tiplerine göre yaklaşma hızlarının da hesaba katılmasıyla ayrımlar yüzünden uçaklar arasındaki zaman ayrımları:

$$t_{ij} = \begin{pmatrix} 113 & 181 & 226 \\ 87 & 100 & 154 \\ 87 & 100 & 118 \end{pmatrix} \quad (8)$$

olarak bulunur.

Gelişteki uçak yüzdelerinden hareketle, uçakların birbiri ardından gelme olasılıkları, gelişteki bulunma yüzdelerinin çarpılması ile:

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 0.0041 & 0.0598 & 0.0001 \\ 0.0598 & 0.8724 & 0.0019 \\ 0.0001 & 0.0019 & 0 \end{pmatrix} \quad (9)$$

olarak bulunur.

İki matrisin karşılıklı elemanlarının çarpılması ile ortalama ayırma zamanı elde edilir:

$$E(t) = \sum_i \sum_j p_{ij} \cdot t_{ij} = 104.2436 \text{sn} \quad (10)$$



Tablo2'deki ayırma değerleri kullanılarak elde edilen ortalama ayırma zamanı ile bir saatlik maksimum geliş kapasitesi hesaplanırsa:

$$\text{Saturasyon Kapasitesi} = \frac{3600}{104.2436} = 34.5 \text{ uçak / saat} \quad (11)$$

Görüldüğü gibi Atatürk Havalimanı için deklere edilen saturasyon kapasitesi 29 iken, ICAO tarafından tavsiye edilen wake türbülans minimaları ile yapılan ayırmalar sonucu bu kapasite 34.5'e çıkartılabilmektedir.

22.03.2013 tarihine ait veride Atatürk Havalimanı için saat 13:00-14:00 arasındaki geliş trafiği incelendiğinde gerçekte yapılan sıralamanın:

$$M:M:M:M:M:M:M:M:M:H:M:M:M:H:M:H:M:M:M:M:H:M:M:M \quad (12)$$

şeklinde olduğu görülür. Sıralamaya bakıldığında ağır uçakların orta uçakların arasında indirildiği görülür.

$$M:H:M:H:M \quad (13)$$

şeklinde yapılan sıralamada gerçekte 13dk'lık zaman ayırmasıyla dizilim yapılmıştır. Eğer Tablo1'deki değerlerle ayırmalar sağlanırsa; 2 adet M:H 2 adet H:M sıralaması ile toplamda  $87*2+181*2=536$  sn zaman ayırmasıyla 5 uçak dizilmiş olur. Basit bir şekilde bu sıralamanın:

$$M:M:H:H:M \quad (14)$$

şeklinde yapılmasıyla 1 M:M, 1 M:H, 1 H:H, 1 H:M dizilimi ile  $100 + 87 + 113 + 181 = 481$  sn zaman ayırmasıyla 5 uçak dizilebilir. Böyle bir düzenlemeyle gelişteki uçak kapasitesi arttırılabilmektedir.

Sıralama algoritmasını bir optimizasyon problemine çevirerek, çözümü genelleştirmek için sıralamaları 15dk'lık dilimler içerisinde ayrı ayrı yapmak problemin doğasına daha uygun düşecektir. Eğer bu şekilde bir ayrıklaştırmaya gidilirse birbirinden uzaktaki uçakların birbirinin geliş sıralamasında problemin en başından itibaren etkisinin olmadığı düşünülecek ve problem basite indirgenmiş olacaktır. Bir sıralama dizisi tek başına düşünülecek olunursa, dizinin başlangıç elemanı olan uçağın hafif veya orta, bitiş elemanı olan uçağının da ağır veya orta olmasının maksimum kapasite için gerekli olduğu Tablo1'e bakılarak anlaşılmaktadır. Dizinin başlangıç ve bitiş elemanını belirlenmesindeki diğer unsur da geliş trafiğindeki uçakların hangi kategoride yoğunlaştığıdır, Atatürk Havalimanı için orta kategorideki uçak yoğunluğu diğerlerine göre daha fazladır, ayrıca orta kategorinin dizi başında olması Tablo1'e göre de mantıklıdır. Bu durumda geliş trafiği dizilimi; 15dk'lık zaman dilimlerinde her dilimdeki ilk uçağın orta kategoride olması şartıyla, o zaman dilimine ait gelecek uçakların kategorilerinin bilindiği, her dilim için ayrı ayrı optimum dizilimin arandığı bir optimizasyon problemine dönüşecektir.

$$\begin{aligned} \min : J &= \sum_{k=0}^N t_{ij}(x_k - x_{k+1}) \\ \text{st} : x_1 &= [M] \\ x_{N+1} &= [M] \\ & a \text{ tane } L, b \text{ tane } M, c \text{ tane } H \end{aligned} \quad (15)$$

Denklem (15)'te amaç fonksiyonu k.sıradaki uçak ile bir sonraki uçağın aralarındaki zaman ayırmalarının, k'1 den 15dk'lık set'teki uçak sayısı olan N'e gidinceye kadar toplamının hangi sıralama için minimum değeri aldığını bulmaya yönelik problemi ifade etmektedir. Kısıtlar ise sıralamadaki ilk uçağın M olması, sıralamada hangi kategoriden kaç uçak olduğunun bilinmesidir.

## HAVA TRAFİK KONTROLÖRÜNÜN MODELLENMESİ

Bu bölümde hava trafik kontrolörlerinin yukarıda bahsedilen karar mekanizmaları dikkate alınarak otomat modelleri oluşturulacaktır. Gerçek durumda kontrolörün vereceği tepki ile aynı tepkiyi veren bir otonom modelin oluşturulması bu çalışmanın esas amacını oluşturmaktadır.

Gerçek durumda sektöre girecek uçuşlar bekleme listesinde tutulur, uçuşun sektöre girmesiyle beraber uçak kontrolörün ekranına yansıtılır, kontrolör ise uçuşun rotasının sektör içindeki diğer uçuş rotalarıyla karşılaştırarak muhtemel çarpışmaları tespit eder, çakışma durumundaki uçakları tek tek ele alarak ayırmaları sağlamaya çalışır. Bu çalışmadaki algoritmada bu yapıya göre oluşturulacaktır. Sektördeki uçakların isimleri(veya kodları) bir dizi içerisinde saklanacak, sektöre yeni giren her uçak bu diziyeye eklenecektir. Dizideki uçaklar sırasıyla diğer uçaklarla karşılaştırılacak ve ayırmanın sağlanmadığı uçaklar ikiyeşerli olarak ele alınacaktır. Otomat ele alınan uçakla ayırmanın olmadığı bir uçak arasındaki ayırmanın nasıl sağlanacağını ele almaktadır.

Bu bölümde oluşturulacak olan modeller deterministik otomat olarak oluşturulacaktır. Bir otomat iyi tanımlanmış kuralları olan bir dil olarak kabul edilebilir, otomatlar hakkında detaylı bilgiye [Cassandras ve Lafortune, 2008] , [Hopcroft, Motwani ve Ullman, 2001] kaynaklarından ulaşılabilir.

Bir otomat doğrudan grafiksel sunum veya durum geçiş diyagramı şeklinde gösterilebilir. Bu çalışmada gösterim şekli olarak doğrudan grafiksel sunum şekli kullanılacaktır. Bir otomat olaylar ve durumlardan meydana gelir, olaylar ve durumlar doğrudan grafiksel sunum şeklinde daire ve yaylarla gösterilirler. Otomat içerisinde bir durumdan bir başka duruma geçilebilmesi geçiş fonksiyonları ile sağlanmaktadır. Deterministik otomatlarda bir durumdan başka bir duruma sadece bir geçiş fonksiyonu olabilmektedir.

Biçimsel dil olarak bir otomat (G) beş farklı değişken grubundan meydana gelmektedir.

$$G = (X, E, f, x_0, X_m) \quad (16)$$

$X$  : durumlar bulunduğu grup

$E$  : olayların bulunduğu grup

$f$  :  $X \times E \rightarrow X$  şekilde tanımlanan geçiş fonksiyonu

$x_0$  : başlangıç durumu

$X_m$  : final durumu

### ACC Otomat Modeli

Seyir kontrolörü bir deterministik otomat olarak tanımlanabilir:

$$ACC\_Otomat = (X, E, f, x_0, X_m) \quad (17)$$

ACC Otomatı önceden tanımlanmış olan sekiz adet ayırık duruma sahiptir. Bu durumlar seyir kontrolörünün müdahale tiplerini tanımlamaktadır:

- q0 : Başlangıç durumu
- q1 : Öndeki uçağa direk rota verilmesi
- q2 : Öndeki uçağın irtifasının değiştirilmesi
- q3 : Hızı azaltılarak arkadaki uçağın geciktirilmesi
- q4 : Rotadan çıkarılıp geri alınarak arkadaki uçağın geciktirilmesi
- q5 : Arkadaki uçağın irtifasının değiştirilmesi
- q6 : Her iki uçağa direk rota verilmesi
- q7 : Her iki uçağın uçuş başlarının değiştirilmesi

$$X = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7\} \quad (18)$$

$$x_0 = q_0 \quad (19)$$

ACC Otomatı herhangi bir durumda sonlanabilmektedir, bu da tüm durumların final durumu olabilmesi anlamına gelmektedir.

$$X_m = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7\} \quad (20)$$

ACC Otomatı trafiğin durumuyla ilgili olan sekiz farklı olay fonksiyonuna sahiptir. Bu fonksiyonlar lojik olarak sıfır veya bir değerlerini alabilmektedir.

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8\} \quad (21)$$

Olayların daha basit bir şekilde tanımlanabilmesi için, altı farklı yardımcı fonksiyon tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar da olay fonksiyonları gibi lojik değerler alabilmektedir; tanımlanan bu yardımcı fonksiyonlar olay fonksiyonlarına girdi olarak kullanılacaktır. Trafiğin mevcut durumuna ve gidilmesi gereken rotaya göre uçakların nereye gidecekleri tahmin edilir, bu fonksiyonların değerleri bu tahminlere göre belirlenir. Bu yardımcı fonksiyonlar:

- $a_0$  = irtifalar aynı mı? (aynı ise 1, değilse 0)
- $a_1$  = iki uçağın rotalarında kesişme var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_2$  = iki uçağın arasında yatay ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_3$  = iki uçağın arasında uzunlamasına ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_4$  = iki uçak kesişim noktasından sonra aynı rotayı takip edecekler mi? (aynıysa 1, değilse 0)
- $a_5$  = müdahale edilen uçağın çevredeki diğer uçaklarla arasında yatay ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)

olarak belirlenmiştir. Yardımcı fonksiyonlardan olay fonksiyonlarına geçiş ilişkisi (22) denklem takımı ile verilir.

$$\begin{aligned} \cap &\rightarrow \text{ve}, \cup \rightarrow \text{veya}, a \rightarrow a = 1, \bar{a} \rightarrow a \text{ 'nin değili} (a = 0) \\ e_1 &= \bar{a}_0 \cup (a_0 \cap \bar{a}_1) \cup (a_0 \cap a_1 \cap a_2 \cap \bar{a}_4) \cup (a_0 \cap a_1 \cap a_2 \cap a_4 \cap a_3) \\ e_2 &= \left[ (a_0 \cap a_1 \cap a_2 \cap a_4 \cap \bar{a}_3) \cup (a_0 \cap a_1 \cap \bar{a}_2 \cap a_4) \right] \\ e_3 &= (a_0 \cap a_1 \cap a_2 \cap a_4 \cap a_3 \cap a_5) \\ e_4 &= (a_0 \cap a_1 \cap a_4 \cap \bar{a}_5) \\ e_5 &= (a_0 \cap a_1 \cap \bar{a}_4 \cap \bar{a}_2) \\ e_6 &= (a_0 \cap a_1 \cap \bar{a}_4 \cap a_2 \cap a_5) \\ e_7 &= (\bar{a}_0 \cap a_5) \\ e_8 &= (a_0 \cap a_1 \cap \bar{a}_4 \cap \bar{a}_5) \end{aligned} \quad (22)$$



APP Otomatı yedi adet final duruma sahiptir.

$$X_m = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6\} \quad (27)$$

APP Otomatı sekiz farklı olay fonksiyonuna sahiptir.

$$E = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6, e_7, e_8, e_9\} \quad (28)$$

Olay fonksiyonlarını tanımlayabilmek için sekiz adet yardımcı fonksiyon tanımlanmıştır. Bu fonksiyonlar da ACC Otomat'ında olduğu gibi lojik değerler alabilmektedir. Bu yardımcı fonksiyonlar:

- $a_0$  = Kalkan iki uçaktan herhangi birinin rotası inen uçaklardan birisiyle kesişiyor mu? (kesiştir 1, kesişmiyor 0)
- $a_1$  = Kalkan iki uçağın rotalarında kesişim var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_2$  = İki uçağın arasındaki irtifa farkı 1000ft'ten fazla mı? (evet 1, hayır 0)
- $a_3$  = Uçaklar arasında yatay ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_4$  = Geliştirteki ardıl uçaklar arasında gerekli ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_5$  = Geliştirteki iki uçaktan öndekinin hızı arkadakine eşit mi veya ondan fazla mı?(fazla/eşit 1, az 0)
- $a_6$  = Geliştirteki uçağın kalkıştaki diğer tüm uçaklarla arasında ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)
- $a_7$  = Kalkıştaki uçağın geliştirteki diğer tüm uçaklarla arasında ayırma var mı? (varsa 1, yoksa 0)

olarak belirlenmiştir. Yardımcı fonksiyonlardan olay fonksiyonlarına geçiş ilişkisi (29) denklem takımı ile verilir.

$$\cap \rightarrow \text{and}, \cup \rightarrow \text{or}, a \rightarrow a \text{ is } 1, \bar{a} \rightarrow \text{not } a (a \text{ is } 0)$$

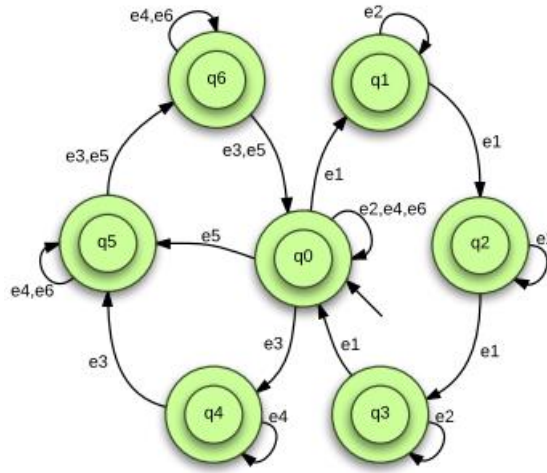
$$\begin{aligned} e_1 &= a_0 \cap \bar{a}_2 \cap \bar{a}_3 \\ e_2 &= ((a_0 \cap a_2) \cup (a_0 \cap \bar{a}_2 \cap a_3)) \cap a_6 \\ e_3 &= a_1 \cap \bar{a}_2 \cap \bar{a}_3 \\ e_4 &= ((a_1 \cap a_2 \cap a_5) \cup (a_1 \cap \bar{a}_2 \cap a_3 \cap a_5)) \cap a_6 \\ e_5 &= \bar{a}_4 \\ e_6 &= a_4 \cap a_5 \cap a_7 \\ e_7 &= (a_0 \cap \bar{a}_2) \cup (a_0 \cap a_2 \cap \bar{a}_3) \cup \bar{a}_6 \\ e_8 &= (a_1 \cap \bar{a}_2) \cup (a_1 \cap a_2 \cap \bar{a}_3) \cup \bar{a}_6 \\ e_9 &= \bar{a}_4 \cup \bar{a}_7 \end{aligned} \quad (29)$$

Geçiş fonksiyonları (30) 'te tanımlandığı gibidir.

$$f : X \times E \rightarrow X$$

$$\begin{aligned} f(q_0, e_2) &= q_0 & f(q_2, e_2) &= q_2 & f(q_5, e_8) &= q_6 \\ f(q_0, e_4) &= q_0 & f(q_2, e_7) &= q_3 & f(q_5, e_9) &= q_6 \\ f(q_0, e_6) &= q_0 & f(q_3, e_2) &= q_3 & f(q_6, e_4) &= q_6 \\ f(q_0, e_1) &= q_1 & f(q_3, e_7) &= q_0 & f(q_6, e_6) &= q_6 \\ f(q_0, e_3) &= q_4 & f(q_4, e_4) &= q_4 & f(q_6, e_8) &= q_6 \\ f(q_0, e_5) &= q_5 & f(q_4, e_8) &= q_5 & f(q_6, e_9) &= q_0 \\ f(q_1, e_2) &= q_1 & f(q_5, e_4) &= q_5 & & \\ f(q_1, e_7) &= q_2 & f(q_5, e_6) &= q_5 & & \end{aligned} \quad (30)$$

APP Otomat'ın doğrudan grafiksel sunum şekli Şekil 4' te gösterilmiştir.



Şekil 4. Yaklaşma (APP) Kontrolör Model Hibrid Otomatı

### UYGULAMA ALGORİTMALARI

Bir önceki bölümde tasarlanan otomat modelleri aralarında ayırma bulunmayan iki uçak için ayırmayı sağlayacak kontrolör lojiğini ortaya koymaktaydılar. Bu bölümde bu modellerin sektördeki tüm uçaklar için ayırmayı sağlayacak şekilde kullanılabilmesini sağlayacak algoritmalar sunulacaktır.

#### ACC Kontrolör Algoritması

ACC Otomat'ını uygulamaya dökmek için "ACC Kontrolör Algoritması" yapısı geliştirilmiştir. Bu yapıda tüm uçuşlar tek tek ele alınır ve rotalarında ayırma olmayan uçuş belirlenir, ayırmanın mevcut olmadığı uçaklar ikiye bölünür olarak "ACC Otomat" modeline gönderilir. Bu şekilde, uçuşlara uygulanacak olan kontrol yöntemleri ve bu yöntemler sonucu uçuşun oluşacak olan yeni rotası belirlenir.

**Algoritma 1 : ACC Kontrolör Algoritması**

**girdi** : Yol kontrolündeki uçakların uçuş planları ve mevcut zamandaki durum değişkenleri

**çıkıtı** : Kontrolör müdahaleleri ve bu müdahaleler sonucu oluşan yeni rotalar

- 1 **Eğer** yeni bir uçak sektöre girdiyse **o zaman**
- 2 sektördeki tüm uçakların ayırmaları **kontrol edilir**
- 3 **eğer** herhangi bir ayırma ihlali tahmin edilirse **o zaman**
- 4 sektördeki ayırma ihlali olacağı tahmin edilen tüm uçaklar **için**
- 5 sektöre ilk girmiş olan ayırmasız uçak uçak1 olarak **tanımlanır**
- 6 uçak1 ile ayırma ihlali yaşayacak olan tüm uçaklar **için**
- 7 uçak1'e en yakın olan ayırmasız uçak uçak2 olarak **tanımlanır**
- 8 uçak1 ve uçak2 ACC Otomat modeline gönderilerek kontrolör müdahalesi **üretilir**
- 9 uçak1 ve uçak2 için üretilen yeni rotalar **kaydedilir**

**Algoritma 2 : APP Kontrolör Algoritması**

**girdi** : Yaklaşma kontrolündeki uçakların uçuş planları ve mevcut zamandaki durum değişkenleri

**çıkıtı** : Kontrolör müdahaleleri ve bu müdahaleler sonucu oluşan yeni rotalar

- 1 **Eğer** yeni bir uçak sektöre girdiyse **o zaman**
- 2 geliş trafiği sıralanır
- 3 sektördeki tüm uçakların ayırmaları **kontrol edilir**
- 4 **tekrar edilir**
- 5 **eğer** gelişteki uçaklar arasında herhangi bir ayırma ihlali tahmin edilirse **o zaman**
- 6 aralarında ayırma ihlali olacağı tahmin edilen gelişteki tüm uçaklar **için**
- 7 gelişteki ayırmasız ilk uçak uçak1 olarak **tanımlanır**
- 8 uçak1 ile ayırma ihlali yaşayacak olan gelişteki tüm uçaklar **için**
- 9 uçak1'e en yakın olan gelişteki ayırmasız uçak uçak2 olarak **tanımlanır**
- 10 uçak1 ve uçak2 APP Otomat modeline gönderilerek kontrolör müdahalesi **üretilir**
- 11 uçak1 ve uçak2 için üretilen yeni rotalar **kaydedilir**
- 12 **eğer** gelişteki ve kalkıştaki uçaklar arasında herhangi bir ayırma ihlali tahmin edilirse **o zaman**
- 13 aralarında ayırma ihlali olacağı tahmin edilen gelişteki ve kalkıştaki tüm uçaklar **için**
- 14 gelişteki ayırmasız ilk uçak uçak1 olarak **tanımlanır**
- 15 uçak1 ile ayırma ihlali yaşayacak olan kalkıştaki tüm uçaklar **için**
- 16 uçak1'e en yakın olan kalkıştaki ayırmasız uçak uçak2 olarak **tanımlanır**
- 17 uçak1 ve uçak2 APP Otomat modeline gönderilerek kontrolör müdahalesi **üretilir**
- 18 uçak1 ve uçak2 için üretilen yeni rotalar **kaydedilir**
- 19 **eğer** kalkıştaki uçaklar arasında herhangi bir ayırma ihlali tahmin edilirse **o zaman**
- 20 aralarında ayırma ihlali olacağı tahmin edilen kalkıştaki tüm uçaklar **için**
- 21 kalkıştaki ayırmasız ilk uçak uçak1 olarak **tanımlanır**
- 22 uçak1 ile ayırma ihlali yaşayacak olan kalkıştaki tüm uçaklar **için**
- 23 uçak1'e en yakın olan kalkıştaki ayırmasız uçak uçak2 olarak **tanımlanır**
- 24 uçak1 ve uçak2 APP Otomat modeline gönderilerek kontrolör müdahalesi **üretilir**
- 25 uçak1 ve uçak2 için üretilen yeni rotalar **kaydedilir**
- 26 herhangi bir ayırmasız uçak kalmayana **kadar**

### APP Kontrolör Algoritması

APP Otomat'ını uygulamaya dökmek için "APP Kontrolör Algoritması" yapısı geliştirilmiştir. Algoritma ACC algoritmasına benzer bir şekilde çalışır, aradaki fark bir döngü yerine üç farklı döngünün olması ve inişteki uçuşların ilk olarak piste yaklaşma zamanlarına göre sıralanmalarıdır. İlk olarak geliş trafiği sıralanır, ayırma durumları ayırma fonksiyonlarıyla kontrol edilerek döngülere geçilir. İlk döngüde gelişteki sıralanmış uçuşların ayırmaları kontrol edilir ve ayırma kriterini sağlamayan uçaklar için ayırmalar sağlanarak yeni sete kaydedilir. İkinci döngüde kendi aralarında ayırmaları sağlanmış olan gelişteki uçaklar kalkıştaki uçaklarla karşılaştırılır ve gerekli ayırmalar sağlanır. Son döngüde ise kalkıştaki uçaklar kendi aralarında karşılaştırılarak ayırmaları sağlanmaya çalışılır. En son olarak oluşturulan yeni setteki tüm uçuşlar kontrol edilir, eğer herhangi bir uçuş için ayırma kaybı yaşanacaksa Algoritma yeni set üzerinden tekrar koşturulur.

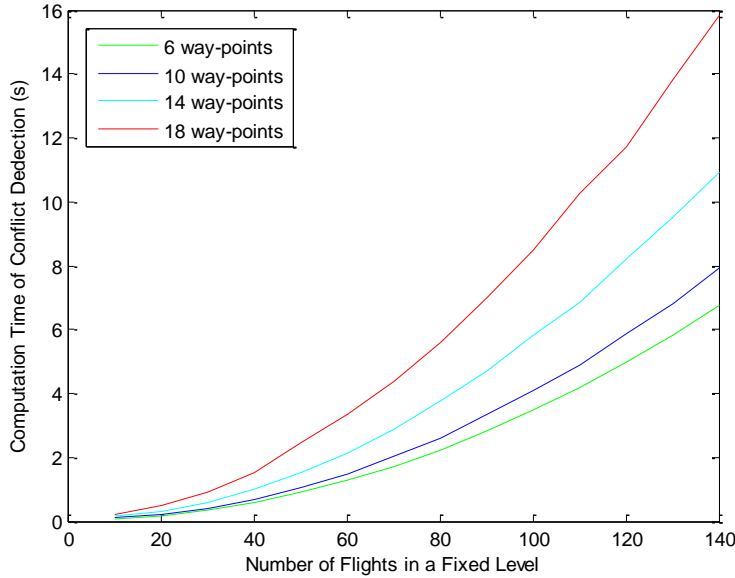
### Algoritmaların Hesaplama Yükleri

Sunulan algoritmalar iki temel kısımdan oluşmaktadır. Bu kısımlar muhtemel çarpışmaların tespiti ve ayırmanın sağlanması kısımlarıdır, her iki kısmın hesap yükleri farklıdır. Algoritmaların ilk kısımları sektörde muhtemel ayırma kaybı olan uçak sayısından etkilenmezken, ikinci kısımları etkilenmektedir.

Seyir ve yaklaşma kontrolör algoritmalarının ilk kısımlarında, her uçağın takip edecekleri rota sektördeki diğer uçakların takip edecekleri rotalarla karşılaştırılır ve muhtemel çarpışmalar tespit edilir. Algoritmadaki çarpışma tespit kısımları sektördeki uçak sayısından ve her uçağın sahip olduğu ara-nokta sayısından etkilenmektedir. Seyir kontrolör algoritması için ilk kısmın hesaplanma zamanı (31) denklemi ile orantılıdır. Bu orantı gerçek veriler üzerinden seyir kontrolü için Şekil 5'de, yaklaşma kontrolü için Şekil 6'da gösterilmiştir.

$$\propto \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^{n_i} (wp_j \times wp_k) \quad (31)$$

Denklem (31) 'de m kaç adet uçuş seviyesi olduğunu,  $n_i$  i.seviyesindeki uçak sayısını,  $wp_j$  j.uçuştaki ara-nokta sayısını,  $wp_k$  k.uçuştaki ara-nokta sayısını belirtir.



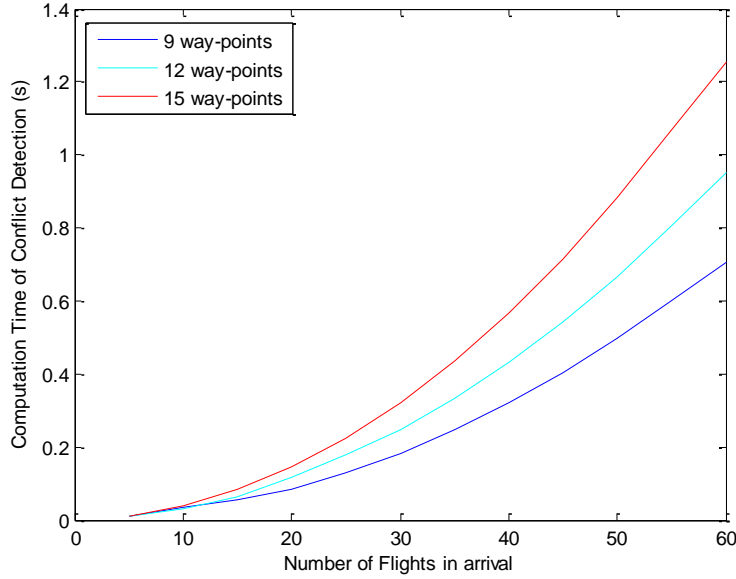
Şekil 5. Seyir için Çarpışma Algılama Zamanı

Yaklaşma kontrolör algoritması için ilk kısmın hesaplanma zamanı kalkıştaki uçuşlar arasındaki, gelişteki uçuşlar arasındaki ve kalkış ile geliş uçuşları arasındaki olmak üzere üç adet çarpışma tespit zamanının toplamına eşittir. Bu üç çarpışma tespit zamanının her birisi (32) ile orantılıdır.



$$\propto \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^m (wp_i \times wp_j) \quad (32)$$

Denklem (32) 'de  $wp_j$  j. uçuştaki ara-nokta sayısını,  $wp_i$  i. uçuştaki ara-nokta sayısını belirtir. Eğer kalkış ve geliş arasındaki muhtemel çarpışmalar tespit ediliyorsa, (32) denklemi için gelişteki uçuş sayısı  $n$  kalkıştaki uçuş sayısı  $m$  olur. Eğer kalkıştaki uçuşlar arasındaki muhtemel çarpışmalar tespit ediliyorsa, (32) denklemi için  $n$  eşittir  $m$  olmak üzere kalkıştaki uçuş sayısını ifade eder. Eğer gelişteki uçuşlar arasındaki muhtemel çarpışmalar tespit ediliyorsa, (32) denklemi için  $n$  eşittir  $m$  olmak üzere gelişteki uçuş sayısını ifade eder. Bu yüzden geliş ve kalkış trafiğindeki uçuş sayısının aynı olması durumunda hesap yükleri de aynı olur. Geliş ve kalkış trafiğindeki uçak sayılarının aynı olduğu örnek trafik için hesap yükünün (32) ile orantılı olduğu Şekil 6 'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Yaklaşma için Çarpışma Algılama Zamanı

Seyir kontrolör algoritmasında ikinci kısmın hesaplanma zamanı (33) ile orantılıdır.

$$\propto \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^l a_k (wp_j \times wp_k) \quad (33)$$

Denklem (33) 'de  $m$  kaç adet uçuş seviyesi olduğunu,  $n_i$  i.seviyesindeki uçak sayısını,  $l$  ayırma kaybı yaşayacak uçak sayısını,  $wp_j$  j. uçuştaki ara-nokta sayısını,  $wp_k$  k. uçuştaki ara-nokta sayısını belirtir. Ayrıca bu kısımda hesap zamanı çözüm bulununcaya kadar denenen kontrolör müdahale sayısı ( $a_k$ ) ile de orantılıdır.

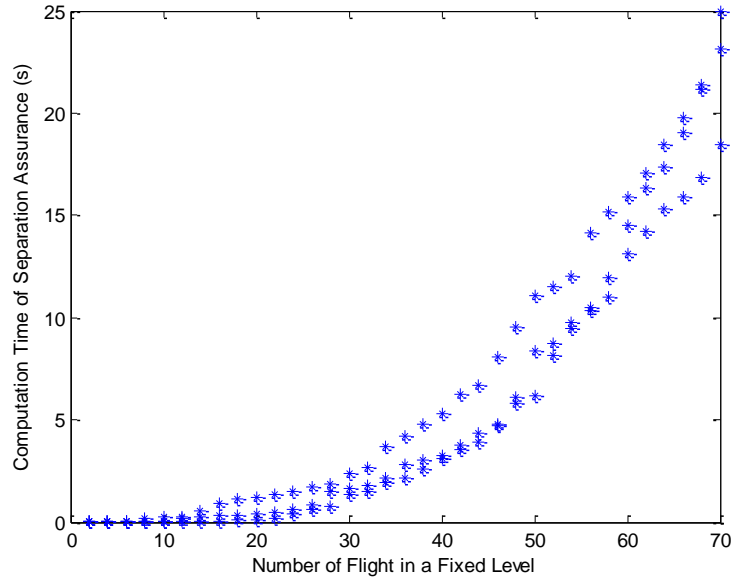
Yaklaşma kontrolör algoritmasında ikinci kısmın hesaplanma zamanı (34) ile orantılıdır.

$$\propto \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m a_j (wp_i \times wp_j) \quad (34)$$

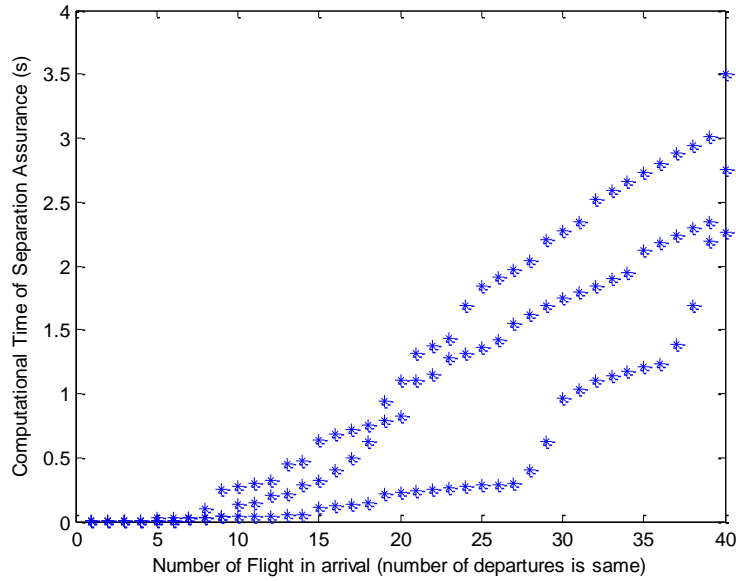
Denklem (34) 'de  $wp_j$  j. uçuştaki ara-nokta sayısını,  $wp_i$  i. uçuştaki ara-nokta sayısını belirtir. Eğer algoritma bir kalkış uçağı ile kalkıştaki diğer uçaklar arasında koşturuluyorsa, (34) denklemi için  $n$  kalkıştaki uçak sayısını  $m$  ise kalkıştaki muhtemel ayırma kaybı yaşayacak uçak sayısını ifade eder. Eğer algoritma bir geliş uçağı ile gelişteki diğer uçaklar arasında koşturuluyorsa, (34) denklemi için  $n$  gelişteki uçak sayısını  $m$  ise gelişteki muhtemel ayırma kaybı yaşayacak uçak sayısını ifade eder.

Gerçek trafikte ayırma kayıplı uçak sayısı artan trafik ile artış göstermektedir. Bu sebepten dolayı algoritmaların ayırmaların sağlandığı ikinci kısımları artan trafikle beraber üstel olarak artmaktadır. Gerçek trafikten elde edilmiş olan uçuşların on adet ara-noktaya sahip olduğu üç farklı uçuş seti

üzerinden algoritmaların ikinci kısımlarının hesap zamanları elde edilmiş ve seyir için Şekil 7 'de, yaklaşma için Şekil 8 'de sunulmuştur.



Şekil 7. Seyir için Ayırma Sağlama Zamanı



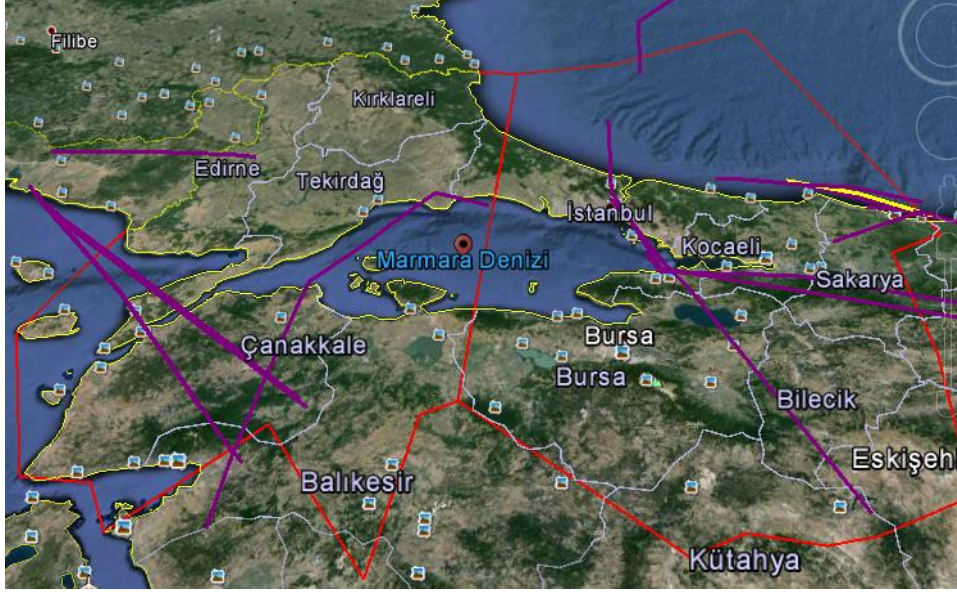
Şekil 8. Yaklaşma için Ayırma Sağlama Zamanı

## UYGULAMALAR

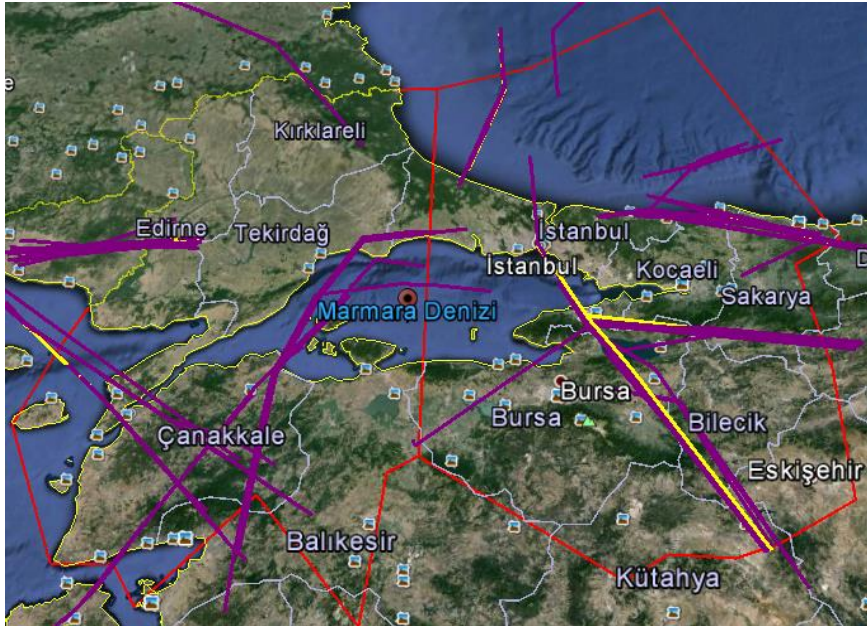
Uygulamanın gerçek trafik verileriyle yapılması amacıyla ALLFT+ veri set'inden yararlanılmıştır. Uygulama için 01.03.2011 tarihindeki veri seti kullanılarak, bu tarihteki uçuşlara ait plan verileri elde edilmiş ve geliştirilmiş olan algoritmalarla koşturulmuştur.

Yol kontrolü için iki farklı uygulama yapmak amacıyla iki farklı trafik seti hazırlanmıştır. İlk set bahsedilen günün 11:00-11:15 saatleri arasında, ikinci set 11:00-13:00 saatleri arasındaki IST ACC'den geçen tüm uçuşları içerecek şekilde hazırlanmıştır. Uygulama için ACC'nin düşey sınırı gerçekteki değeri olan 23500 ft olarak belirlenmiştir, uygulamada kontrolör sektörde 23500 ft ve üzerindeki tüm uçuşlardan sorumludur. İlk veri setine bakıldığında, 15 dakikalık zaman dilimi içerisinde sektörden 18 uçağın geçtiği görülmektedir. 18 uçaktan 2 tanesinin ayırma kaybı yaşaması tahmin edilmekte ve ACC Kontrolör Algoritması tarafından uçaklardan birine vektör

verilerek ayırma sağlanmaktadır. İkinci veri setinde 120 dakikalık zaman dilimi içerisinde sektörden 102 uçağın geçtiği ve 13 tanesinin ayırma kaybı yaşayacağını tespit edildiği görülmektedir. ACC Kontrolör Algoritması tarafından uçakların 7 tanesine müdahale edilerek ayırmalar sağlanmaktadır. Bu müdahalelerden iki tanesi irtifa değişikliği, bir tanesi direk rota, bir tanesi uçak hızının azaltılması ve üç tanesi de vektör müdahalesi olduğu görülmektedir. Şekil 9 ve Şekil 10 'da iki sette bulunan uçakların planlanan rotaları mor renkli olarak çizdirilmiştir, müdahale edilen uçakların müdahale sonrası rotaları ise bu şekillerde sarı renkli olarak gösterilmiştir.



Şekil 9. Yol Kontrolü için Birinci Setteki Uçakların Rotaları

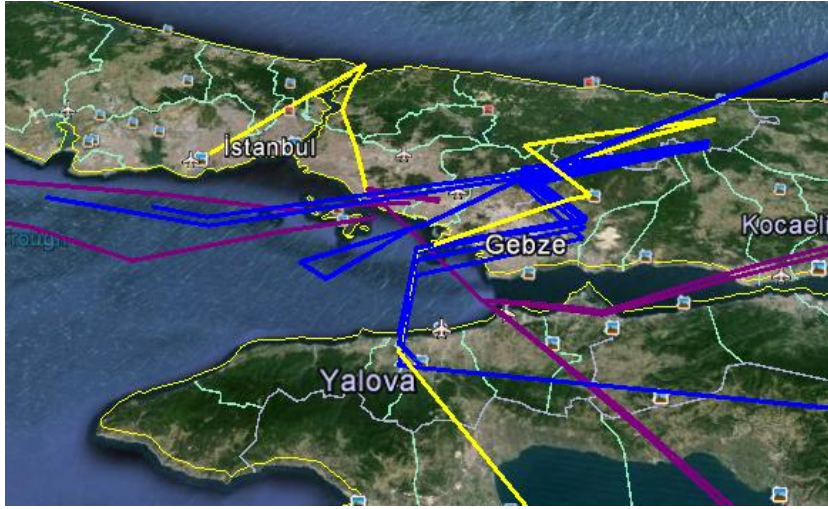


Şekil 10. Yol Kontrolü için İkinci Setteki Uçakların Rotaları

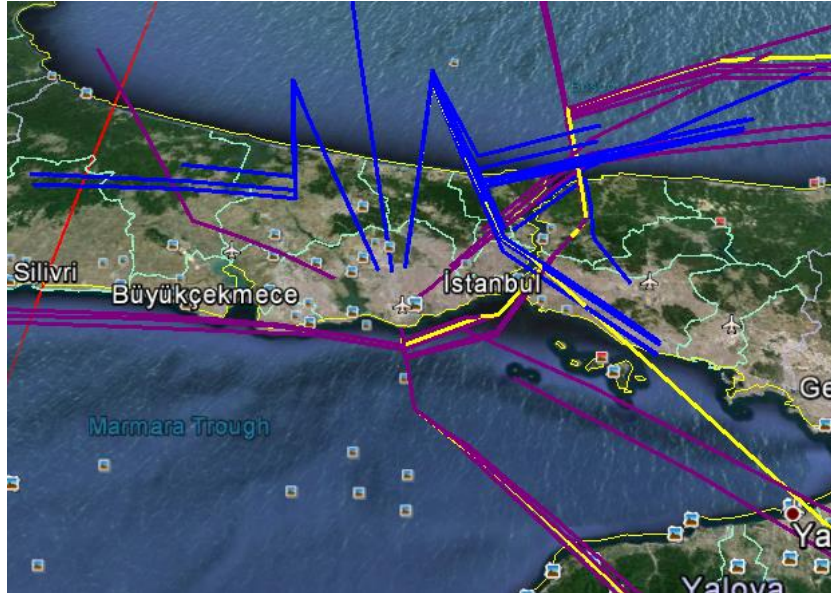
Yaklaşma kontrolü için iki farklı uygulama yapmak amacıyla iki farklı trafik seti hazırlanmıştır. İlk set bahsedilen günün 18.00-20.00 saatleri arasında Sabiha Gökçen Havalimanını içeren APP sektöründen geçen tüm uçuşları, ikinci set ise 18.00-20.00 saatleri arasında Atatürk Havalimanını içeren APP sektöründen geçen tüm uçuşları içerecek şekilde hazırlanmıştır. Uygulama için APP'nin düşey sınırı gerçekteki değeri olan 1500 ft - 23500 ft arasındaki irtifalar olarak belirlenmiştir. İlk veri setine bakıldığında Sabiha Gökçen Havalimanı için 2 saat içerisinde geliş



13 uçuşun kalkışta ise 19 uçuşun olduğu görülmektedir. Gelişteki uçaklardan ikisinin ve kalkıştaki uçaklardan da ikisinin muhtemel ayırma kaybı yaşayacakları tespit edilmiştir. APP Kontrolör Algoritması tarafından gelişteki uçaklardan birisinin hızı azaltılarak ve kalkıştaki uçaklardan birisine vektör verilerek ayırmaların sağlandığı görülmektedir. İkinci veri setine bakıldığında Atatürk Havalimanı için 2 saat içerisinde gelişte 24 uçuşun kalkışta ise 31 uçuşun olduğu görülmektedir. Gelişteki uçaklardan ikisinin ve kalkıştaki uçaklardan altısının ayırma kaybı yaşaması öngörülmüş ve APP Kontrol Algoritması tarafından gelişteki uçakların birinin hızı azaltılarak geliş trafiği düzenlenmiştir. Geliş trafiğini sıralanmasının ardından kalkıştaki uçakların birinin hızı azaltılmış ve ikisine vektör verilmiştir, böylece tüm ayırmalar sağlanarak yaklaşma trafiği düzenlenmiştir. Şekil 11 ve Şekil 12 'de bahsedilen setlerde bulunan kalkıştaki uçakların planlanan rotaları mor renkli olarak, gelişteki uçakların planlanan rotaları ise mavi renkli olarak çizdirilmiştir. Algoritma tarafından müdahalede bulunulan uçakların müdahale sonrasındaki rotaları ise sarı renkli olarak çizdirilmiştir.



Şekil 11. Sabiha Gökçen Havalimanı için Yaklaşmadaki Uçakların Rotaları



Şekil 12. Atatürk Havalimanı için Yaklaşmadaki Uçakların Rotaları

## SONUÇ

Bu çalışmada seyir ve yaklaşma operasyonlarındaki hava trafik kontrolörleri karar süreçlerinin modellenmesi amacıyla iki farklı model hibrid otomat geliştirilmiştir. Bu model otomatlar geliştirilen algoritmalara gömülerek ayırma işlemlerinin otomatik bir şekilde yapılabilmesi sağlanmıştır. Gerçek trafik verileri kullanılarak tasarlanan algoritmaların saniyeler mertebesinde muhtemel çarpışmaları tespit ederek ayırmaları sağladığı gösterilmiştir. Yapılan bu çalışmada geliştirilen sistemin kullanılmasıyla kontrolörlerin iş yükleri azaltılabilecek ve mevcut sistem kapasitesi artırılacaktır.

## TEŞEKKÜR

Söz konusu proje 111M167 No ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

## Kaynaklar

- Andrews, J.W., 2001. *Capacity Benefits of the Advanced Airspace Concept (AAC): A Preliminary Investigation*, MIT Lincoln Laboratories Report No. 42PM-AATT-0014, 17 Ağustos.
- Air Transport Action Group, 2014. *Revolutionising Air Traffic Management*.
- Bayen A.M., Grieder P. ve Tomlin C.J., 2002. *A Control Theoretic Predictive Model for Sector-based Air Traffic Flow*, AIAA 2002-5011, San Francisco, California
- Cassandras C.G. ve Lafortune S., 2008. *Introduction to Discrete Event Systems*, Second Edition, Springer.
- DHMI, 2013. *AIP*.
- Emami H., Derakhshan F. ve Pashazadeh S., 2012. *A New Prioritization Method for Conflict Detection and Resolution in Air Traffic Management*, Journal of Emerging Trends in Computing and Information Sciences, VOL. 3, NO. 7, Temmuz.
- Erzberger H., 2004. *Transforming the NAS: The Next Generation Air Traffic Control System*, NASA/TP-2004-212828.
- Eurocontrol Experimental Centre, 2011. *User Manual for the Base of Aircraft Data (BADA) Revision 3.9*. [http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard\\_page/proj\\_BADA\\_documents\\_39.html](http://www.eurocontrol.int/eec/public/standard_page/proj_BADA_documents_39.html)
- Garcia-Avello, C. and Swierstra, S., 1997. *Human Role in ATM: Support for Decision Making*, ATM: Support for Decision Making Optimization-Automation, 10-11, AGARD Report 825, Budapeşte.
- Glover, W. ve Lygeros, J., 2004. *A Stochastic Hybrid Model for Air Traffic Control Simulation*, HSCC.
- Hopcroft J.H., Motwani R. ve Ullman J.D., 2001. *Introduction to Automata Theory Languages and Computation*, Second Edition, Pearson Education.
- ICAO, 2009. *Procedures for Air Navigation Services Air Traffic Management Doc.4444*, Montreal.
- Joint Planning and Development Office, 2004. *Next Generation Air Transportation System Integrated Plan*, <http://www.jpdo.gov>
- Lymperopoulos I., Lecchini A., Glover W., Maciejowski J. ve Lygeros J., 2007. *A Stochastic Hybrid Model for ATM processes*, Technical Report, Cambridge, vol. AUT07-15, no. CUED/F-INFENG/TR.572.
- NextGen, 2007. *Concept of operations for the next generation air transport system*, [http://www.jpdo.gov/library/NextGen\\_v2.0.pdf](http://www.jpdo.gov/library/NextGen_v2.0.pdf)
- Patchev D. ve Tentov A., 2012. *New Concept of Automated Air Traffic Control System*, ATACCS'2012, Londra, Birleşik Krallık.
- Prevot T., Callantine T., Lee P., Mercer J., Battiste V., Palmer E. ve Smith N., 2005. *Co-Operative Air Traffic Management: Concept and Transition*, AIAA 2005-6045, San Francisco, California.
- SESAR Master Plan, 2012. <http://www.eurocontrol.int/sesar>