

HAVA TRAFİK AKIŞ AĞINDA UÇUŞ GÜZERGAHINA BAĞLI BELİRSİZLİKLERİN YAYILIMININ İNCELENMESİ

Arınç Tutku Altun^{*}, Barış Başpınar[†], Mevlüt Uzun[‡], Emre Koyuncu[§] ve Gökhan İnalhan[¶]
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

ÖZET

Bu çalışmada uçuş güzergahına ve hava trafiğine bağlı belirsizlikler nicelendirilerek talep-kapasite yönetimine yardımcı olabilecek bir yöntem sunulmuştur. Uçuşların havalimanlarındaki ve hava sahalarındaki ilişkilerinden dolayı talep-kapasite yönetimi hava trafiğinin ağ yapısı ele alınarak değerlendirilmelidir. Bunu sağlayabilmek için Avrupa hava trafik ağı, kuyruk teorisi kullanılarak modellenmiştir. Kuyruk modeli, sunuculardan ve müşterilerden/istemicilerden oluşmaktadır ve müşterilerin hizmet alabilmek amacıyla bekledikleri süreleri tahmin etmek için kullanılır. Böyle bir modelin en önemli parametreleri hizmet ve varış süreleridir. İnşa edilen modelde varış süresi, herhangi bir havalimanına veya hava sahasına varan ardışık iki uçak arasındaki süreye karşılık gelmektedir. Öte yandan hizmet süresi bir müşterinin bir sunucuda geçirdiği toplam süreyle açıklanmaktadır. Oluşturulan modelde sunucular hava sahaları arasındaki geçişleri ve havalimanı pistlerindeki operasyonları modellemek için kullanılmıştır. Operasyonların olasılıksal oluşu, hem varış hem de hizmet sürelerinin belirsizlik içermelerine neden olmaktadır. Bu çalışmada bahsedilen belirsizliklerin kaynakları belirlenmiş ve gerçek uçuş verileri kullanılarak bu belirsizliklerle uyumlu olan olasılık dağılımları oluşturulmuştur. Bu belirsizliklerin hava trafik ağı üzerindeki etkileri yapılan simülasyonlar ile incelenmiştir. Bulunma sayımı, havalimanlarının veya hava sahalarının seçilmiş zaman aralıklarında ne kadar talep gördüğünü göstermektedir. Oluşturulan bu model ile havalimanlarında ve hava sahalarında etkili bir talep-kapasite yönetimi sağlamak için olasılıksal bulunma sayımları hesaplanmıştır.

GİRİŞ

2030 yılına kadar, günümüzdeki ticari uçuş sayısının 26 milyondan 48.7 milyona, yolcu-kilometre sayısının ise şu andaki sayının neredeyse üç katı olan 13.5 trilyona artması tahmin edilmektedir [Airbus, 2015]. Fakat hava sahalarının mevcut kapasitelerinin ve inşa edilen veya geliştirilen

^{*}Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: altunar@itu.edu.tr

[†]Doktora Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: baspinarb@itu.edu.tr

[‡]Doktora Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: uzunm@itu.edu.tr

[§]Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: emre.koyuncu@itu.edu.tr

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

havalimanlarının yeni kapasitelerinin belirli ve sınırlı olması, yakın gelecekte beklenen talep artışını karşılıksız bırakmaktadır. Bu nedenle hava trafik yönetimi, mevcut sistemin etkinliğini arttırmak için operasyonel bir dönüşüme ihtiyaç duymaktadır. Bu dönüşümün gerçekleşmesinde etkili bir talep-kapasite yönetimi önemli bir rol oynamaktadır.

Bu çalışmada Avrupa hava trafik ağındaki gecikmelerin ve belirsizliklerin yayılımı, havalimanı ve hava sahası tabanlı, gerçek uçuş verilerine dayalı bir kuyruk ağ modeli oluşturularak incelenmiştir. Bunun için uçuş güzergahına bağlı belirsizliklerin kaynakları ve varış sürelerine etkileri incelenmiştir. Böylelikle hem varış süreleri hem de hizmet süreleri stokastik olarak modellenmiştir ve hem havalimanlarında hem de hava sahalarında daha etkili bir talep-kapasite dengelemesi yapabilmek için olasılıksal bulunma sayımları elde edilmiştir. Bulunma sayımı, belirli zaman aralıkları için havalimanlarına ve hava sahalarına gösterilen talebe karşılık gelmektedir.

Literatürdeki Çalışmalar

Yerel gecikmelerin hava trafik ağında yayılması konusu ile ilgili bazı çalışmalar farklı araştırmacılar tarafından daha önceden de yapılmıştır. MITRE şirketi gecikmelerin ağ üzerinde yayılması ile ilgili NASPAC [Frolov ve Sinnott, 1989] ve DPAT [Wieland, 1997] adında 2 farklı simülasyon modeli geliştirmiştir. Bu modeller Amerika Birleşik Devletleri'ndeki havalimanlarını ve hava sahalarını kullanarak inşa edilmiştir. Dış bir etkiden dolayı herhangi bir havalimanında meydana gelen kapasite düşümünün sebep olduğu gecikmelerin ağ üzerindeki yayılımı bu modeller yardımıyla tahmin edilebilmektedir. Fakat modellerde ilgili bir uçağın takip etmesi gereken ardışık uçuş bilgileri kullanılmamıştır. Bu durum tahminlerin hatalı olmasına sebep olabilmektedir. Bunlara ek olarak ajan tabanlı simülasyon araçları da geliştirilmiştir [Bilimoria, Sridhar, Chatterji, Sheth ve Grabbe, 2001]. Bu yaklaşımla oluşturulan modellerde hesaplama süresi oldukça uzundur. Bu yaklaşımdan farklı olarak kuyruk ağ modellerinin tasarlanması ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Ulusal kuyruk modelleri olarak LMINET [Long, Lee, Johnson, Gaier ve Kostiuk, 1999] ve LMINET2 [Long ve Hasan, 2009] isimli modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde havalimaları $M(t)/E_k(t)/1$ kuyruk yapısıyla modellenmiştir. LMINET modeli ardışık uçuş bilgisini içermez iken LMINET2 bu bilgiyi kullanmaktadır. Kuyruk teorisini kullanan bir başka model ise AND modelidir [Pyrgiotis, 2012; Pyrgiotis, Malone ve Odoni, 2013]. AND ve LMINET modellerinde benzer yaklaşımlar kullanılmıştır. Fakat, havalimanlarında oluşan yerel gecikmeleri hesaplayan kuyruk modellerinin hesaplama yaparken izledikleri yollar farklıdır. Bu yaklaşımın avantajı hesap yükünün az olması ve modellemenin deterministik veya stokastik olarak yapılabilmesidir. Son olarak önceki çalışmamızda [Baspınar, Ure, Koyuncu ve İnalan, 2016] bu modellere benzer bir yaklaşımla havalimanı tabanlı ve gerçek uçuş verilerine dayalı kuyruk ağ modeli oluşturulmuştur ve Avrupa'daki havalimanlarının kapasite düşümlerinden kaynaklanan gecikme karakteristikleri incelenmiştir.

YÖNTEM

Belirsizliklerin Hava Trafik Ağına Etkileri

Hava trafik ağı modellemesi için kuyruk teorisi kullanılmıştır. Varış ve hizmet süresi, kuyruk ağ modelini oluşturan önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin hava trafiğindeki karşılıkları, hava trafiğinde gecikmelere sebep olabilecek belirsizlikler içermektedir. Oluşturulan modelde varış süresi, uçuşların havalimanlarına veya hava sahalarına varışları arasındaki süre farkına; hizmet süresi ise havalimanlarında pistte beklenen süreyi hava sahalarında ise giriş için gereken bekleme süresini temsil etmektedir.

Varış sürelerindeki belirsizliğin temel nedeni, uçuş güzergahından kaynaklanan belirsizliklerdir. Bu durum, önemli gecikmelere ve bu gecikmelerin hava trafik ağında yayılmasına neden olabilir. Öte yandan hizmet sürelerindeki belirsizlik, havalimanı veya hava sahalarının kapasitelerinden veya

kapasite kullanımlarından kaynaklanmaktadır. Örneğin, Londra Heathrow Havalimanı (EGLL), Frankfurt Havalimanı (EDDF) gibi Avrupa'nın en yoğun 10 havalimanı arasında yer alan bir havalimanında gerçekleşebilecek bir sorun önemli gecikmelere sebep olabilir. Bahsedilen 10 havalimanının Avrupa trafiğinin yaklaşık %20'sini kontrol ettiğini göz önünde bulundurursak, oluşan gecikme bütün Avrupa hava trafik ağına yayılabilir ve ciddi bir şekilde etkileyebilir. Benzer örnekler hava sahaları için de türetilir.

Uçuş Güzergahı Tahminindeki Belirsizliklerin Ölçümü

4D uçuş rotalarının hesaplanması için 'güzergah tahminleme altyapısı' (TGI) [Baspınar, Uzun, Guven, Buyuk, Tasdelen, Koyuncu ve İnalan, 2017] kullanılmıştır. Bu altyapının girdileri; uçağın başlangıç koşulu, takip edilecek yollar, çevre ile ilgili bilgiler ve uçağın performans modelinden oluşmaktadır. Bu sistem girdileri rastlantısal değişken özelliği göstermekte olup uçuştan uçuşa farklılaşan parametrelerdir. Bu nedenle, girdi değerlerindeki sapmalar planlanan ve gerçekleşen güzergahlar arasında farklılık oluşturur. Bu çalışmada, güzergah belirsizliklerine daha büyük derecede neden olduklarından dolayı; uçak kütleindeki, kalibre edilmiş tırmanma hava süratindeki ve tırmanma/seyr Mach sayısındaki belirsizliklere odaklanılmıştır.

Bahsedilen parametrelerin olasılıksal dağılımlarını elde etmek için 1300 adet Boeing 737-800 uçuşunun Quick Access Recorder (QAR) verisi kullanılmıştır. Gerekli olasılık dağılımları elde edilirken uçuş mesafeleri de göz önünde bulundurulmuştur. Çünkü, uçuş mesafesinin, uçağın kütlesi ve sürat planı üzerinde önemli bir etkisi vardır ve havayolu şirketleri tarafından, yakıt ve zaman maliyetleri değerlendirilerek, toplam uçuş maliyetini en uygun hale getirmek için kullanılır. Şekil 1a ve 1b'de görüldüğü üzere, kütlenin ve tırmanma seyr Mach sayısının ortalama ve varyans değerleri uçuş mesafesi ile değişkenlik göstermektedir. Fakat aynı ilişki kalibre edilmiş tırmanma sürati ile uçuş mesafesi (1c) arasında görülemez. İlgili parametreler bu dağılımlardan örneklenmiştir. Sonrasında, güzergaha bağlı belirsizlikleri ölçebilmek için Monte Carlo simülasyonu uygulanmıştır.

Farz edelim ki N tane simülasyonumuz var ve örneklem uzayımız aşağıdaki gibi ($1 \leq n \leq N$):

$$\chi := z^{[1]}, z^{[2]}, \dots, z^{[N]} \quad (1)$$

$$z^{[n]} = \{m^{[n]}, V_{CAS}^{[n]}, M_{cr}^{[n]}\} \quad (2)$$

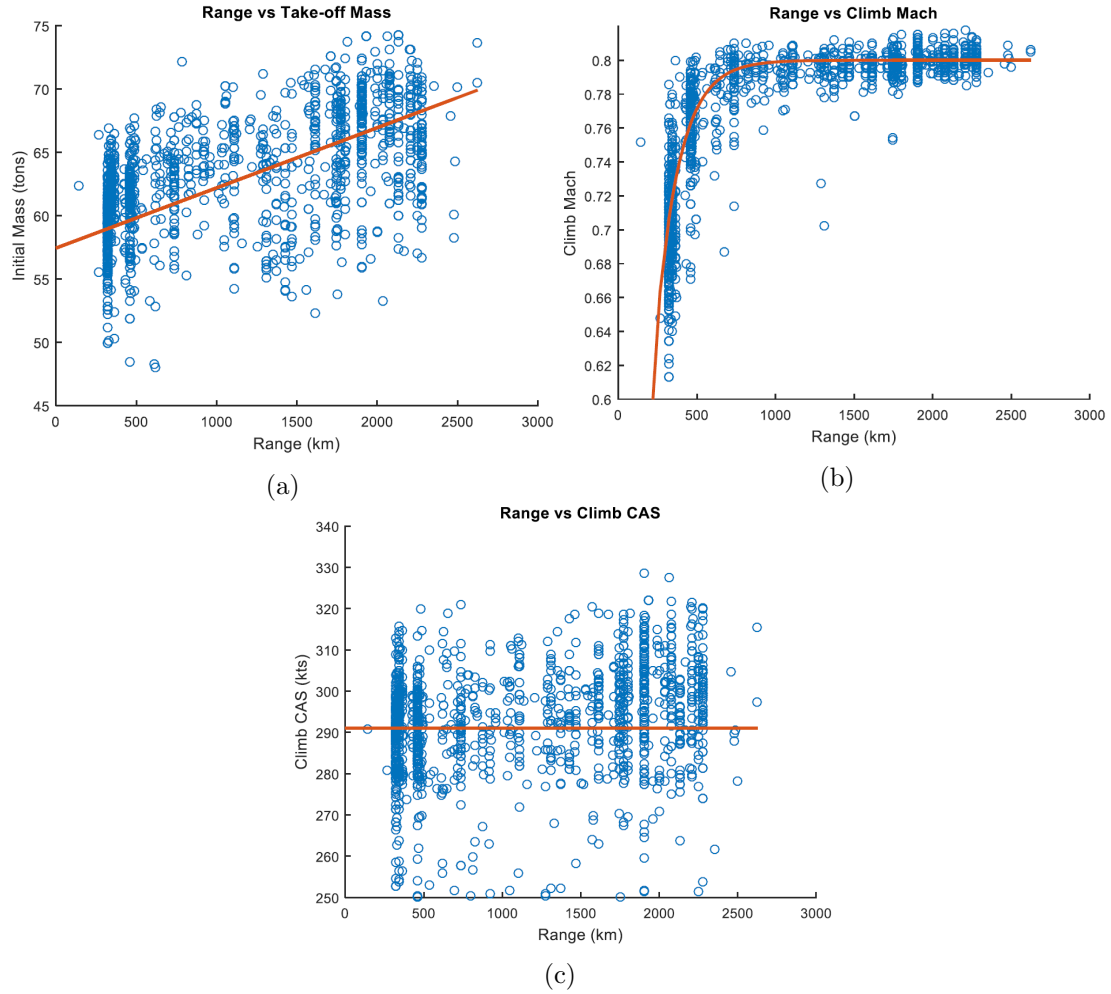
Bunlara ek olarak, zaman ile değişmeyen uçak dinamiğini, $x(t) \in X \subseteq \mathbb{R}^n$, $u(t) \in U \subseteq \mathbb{R}^m$ öyle ki $n, m \in \mathbb{N}$ olduğu, aşağıdaki gibi ele alalım ($x_0 \in X$, başlangıç koşulu):

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t)) \quad x(0) = x_0 \quad (3)$$

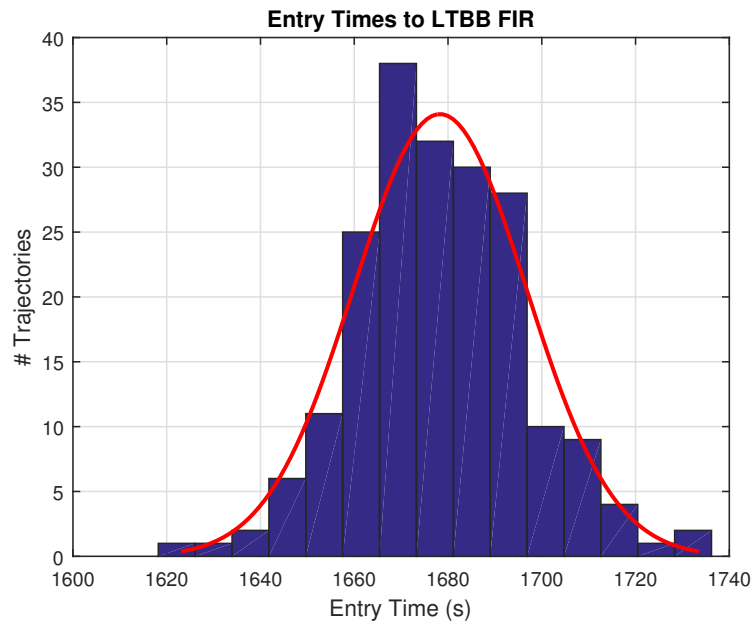
Her örneklem için durum geçiş fonksiyonu ($f(x, u)$) nümerik yöntemler ile çözülerek güzergahlar üretilmiştir. Örnek senaryo için, Antalya Havalimanı'ndan kalkış yapıp İstanbul Atatürk Havalimanı'na varan uçuşların simülasyonu yapılmıştır. Uçuş mesafesi 551 [km] olarak hesaplanmıştır ve gerekli parametreler ilgili dağılımlardan elde edilmiştir. 200 adet güzergah üretimi yapılarak gerçekleştirilen Monte Carlo simülasyonu sonucunda İstanbul uçuş bilgi bölgesine (LTBBFIR) ulaşım dağılımı Şekil 2'deki gibi bulunmuştur.

Havalimanı ve Hava Sahası Hizmet Sürelerindeki Belirsizlikler

Hizmet süresinin, hizmet hücresinin kapasitesiyle ve kapasite kullanımıyla ilişkisi oldukça yüksektir. Bu çalışmadaki model için hizmet süreleri, gerçek uçuş verileri kullanılarak, havalimanlarındaki ve hava sahalarındaki yoğun saatler göz önüne alınarak hesaplanmıştır. Yoğun saatlerdeki örneklem, karışık kapasite yaklaşımı ile yani kalkış ve varış talepleri beraber değerlendirilerek elde edilmiştir.



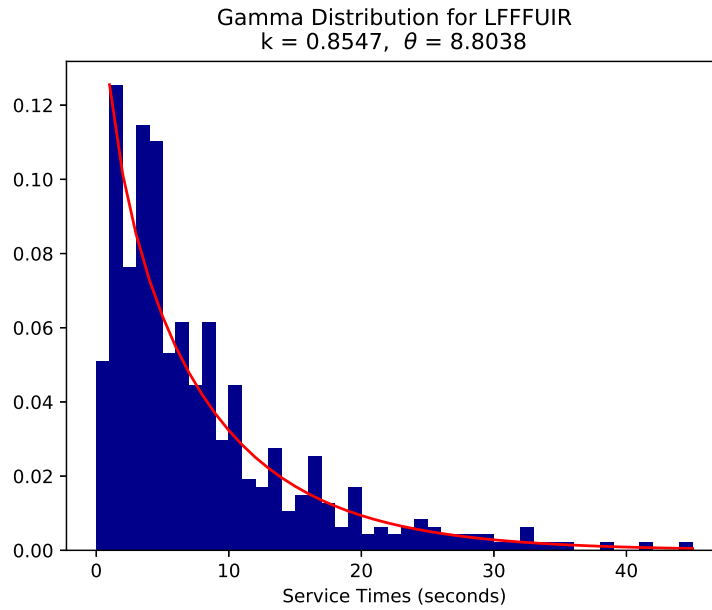
Şekil 1: Başlangıç kütleinin (a), seyir Mach sayısının (b) ve kalibre edilmiş tırmanma süratinin (c) dağılım grafikleri.



Şekil 2: LTBBFIR'a ulaşım süreleri için elde edilen dağılım.

Sonucunda bulunan histogramların gamma dağılımı ile temsil edilebileceği saptanmıştır. Sonrasında her servis hücresi için elde edilen örneklemeler 'en büyük olasılık kestirimi' (MLE) algoritmasına girdi olarak verilerek gamma dağılımı için gerekli olan parametreler hesaplanmıştır.

Gamma dağılımlarındaki şekil (k) ve ölçek (θ) parametreleri, EUROCONTROL'un Mart 2016 ALL_FT+ veri seti kullanılarak türetilmiştir. Fransa üst uçuş bilgi bölgesi (LFFFUIR) için bir örnek Şekil 3'te gösterildiği gibidir. LFFFUIR'in her bir uçak için ortalama hizmet süresi $k\theta$ ile 7.52 saniye olarak hesaplanabilir.



Şekil 3: LFFFUIR için gamma dağılımı uygulanmış hizmet süresi histogramı.

Kuyruk Ağı Modeli

Oluşturulan kuyruk ağı modelinde, bütün uçuşlar seçilmiş gün için kalkışlarına, hava sahası sıralarına ve varışlarına göre analiz edilmiştir. Gerekli uçuş bilgileri için EUROCONTROL'un ALL_FT+ verileri kullanılmıştır.

Modeli oluşturmak için öncelikle kullanılacak havalimanları ve hava sahaları analiz edilmiştir. Havalimanları için günlük maksimum talep sayıları dikkate alınmıştır ve bir saat içinde hareket (kalkış ve varış) sayısı dörtten az olan havalimanlarının hizmet süreleri sıfır olarak alınmıştır. Başka bir deyişle, bu havalimanlarının, kapasitelerini yeterli bir şekilde kullanmadıkları için, hava trafik ağında ek olarak bir gecikmeye sebep olmadıkları kabul edilmiştir. Havalimanları, $G(t)/Gamma(t)/1$ kuyruk yapısıyla modellenmiştir. Bu tip kuyruklarda, varış zamanları herhangi bir dağılımla (genelleştirilmiş dağılım), hizmet süreleri ise gamma dağılımıyla elde edilir ve tek hizmet hücresi kullanılır. Buna ek olarak kullanılan modelde ilk gelen ilk hizmet görür kuralı uygulanmıştır.

Hava sahalarında ise yine benzer bir yaklaşımla maksimum talep sayıları analiz edilmiştir. Fakat, havalimanlarından farklı olarak, gün 15 dakikalık alt periyotlara bölünmüştür ve bu aralıklardaki maksimum talepler dikkate alınmıştır. Bu yaklaşımla bütün 15 dakikalık alt periyotlarında yediden az talep gören hava sahalarının hizmet süreleri, tam kapasitelerini kullanmadıkları için, sıfır olarak kabul edilmiştir. Hava sahalarının kuyruk modeli yapıları ve bu modellerde kullanılan kurallar ise havalimanları ile tamamen aynıdır. Hava sahası modellenmesi için uçuş bilgi bölgeleri dikkate alınmıştır ve hava sahalarındaki kuyruk modelleri geçişler için kullanılmıştır.

Modelin Ana Yapısı: Hava trafik sistemini modellemek için kullanılan kuyruk ağı modeli havalimanı kalkış kuyruğu, hava sahası geçiş kuyruğu ve havalimanı varış kuyruğu olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır. Planlanan bütün uçuşlar, uçakların takip etmesi gereken ardışık uçuş bilgilerini kullanabilmek ve daha gerçekçi bir model elde edebilmek adına, uçakların kuyruk numaralarına göre ve eşzamanlı olarak simüle edilmiştir.

Modelin ilk aşaması olan havalimanı kalkış kuyruğunda öncelikle planlanan kalkış zamanı (SD), ilgili uçağın önceki uçuşunun varış zamanı (PA) ve geri dönüş süresi (TAT) kullanılarak aşağıdaki gibi aday kalkış zamanı (CD) belirlenmiştir.

$$CD = Maksimum(SD, PA + TAT) \quad (4)$$

Aday kalkış zamanı belirlendikten sonra ilgili uçak hizmet hücrelerinden (havalimanı) kalkış için gerekli hizmeti talep eder. Eğer havalimanında bir kuyruk söz konusu değilse uçak, hizmet için gerekli olan süreyi bekler ve kalkış için hazır hale gelir.

Modelin ikinci aşaması olan hava sahası kuyruğu ise uçuş esnasındaki geçişlere karşılık gelmektedir. İlgili uçak, kalkıştan sonra, uçuşunda planlanmış olan ilk hava sahasına girebilmek için hizmet talep eder. Eğer ki hava sahasında bir kuyruk söz konusu değilse, gerekli hizmet alınır ve hizmet bittikten sonra bulunduğu hava sahasından uçuşunda planlanmış olan ikinci hava sahasına doğru ilerler. İlerleme süreci, uçuş güzergahından kaynaklanan belirsizliği de içermektedir. Hava sahası aşaması, uçakların planlanan uçuş aşamalarını tamamladıkları ve varış havalimanına doğru hareket etmeye başladıkları ana kadar belirtildiği şekilde devam eder.

Son olarak, planlanan uçuşunu tamamlayan uçak, son aşamaya yani varış havalimanı kuyruğuna doğru yönelir. Eğer bir kuyruk mevcutsa, uçak bu kuyruk için sıraya girer. Sırası geldiğinde havalimanından gerekli hizmeti talep eder ve hizmet süresi tamamlandıktan sonra planlanan uçuş tamamlanmış olur.

Oluşturulan algoritmada uçuş bilgileri, uçuş güzergahına bağlı belirsizlikler ve havalimanlarındaki ve hava sahalarındaki hizmet süreleri için olasılık dağılımları girdi olarak verilmiştir. Simülasyonlar sonucunda uçakların gerçek iniş ve kalkış zamanları ve hava sahalarına gerçek giriş zamanları çıktı olarak elde edilmiştir. Elde edilen bilgiler talep-kapasite karşılaştırmalarında ve gecikme süresi hesaplamalarında kullanılmıştır.

UYGULAMALAR

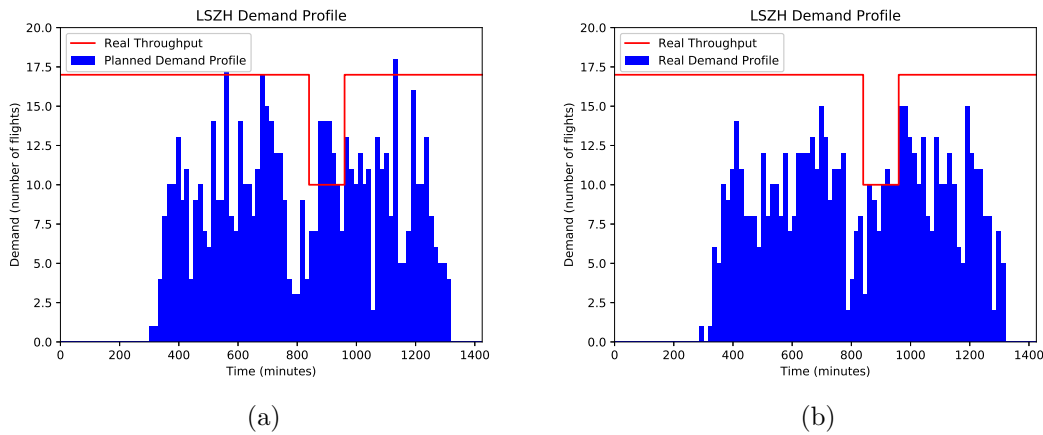
Uygulamalar bölümünde 2 Mart 2016 tarihi için bir günlük EUROCONTROL ALL.FT+ verisi kullanılmıştır. Oluşturulan model iki farklı senaryo ile değerlendirilmiştir. 'Uçuş Güzergahı Tahminindeki Belirsizliklerin Ölçümü' alt başlığındaki model kullanılarak, Antalya Havalimanı'ndan kalkıp İstanbul Atatürk Havalimanı'na inen uçuşların güzergah belirsizliği $\mathcal{N}(0, 1^2)$ olarak bulunmuştur. Gösterilen yaklaşım ile her bir hat için belirsizlik ayrı ayrı hesaplanabilir fakat simülasyonları kolaylaştırmak adına Antalya Havalimanı - İstanbul Atatürk Havalimanı hattı dışındaki bütün hatların belirsizliği $\mathcal{N}(0, 3^2)$ şeklinde kullanılmıştır. İkinci senaryoda ise belirli bir süre aralığı için uçuş güzergahı belirsizliği artışının hava trafik ağına etkisini ve yayılımını gözlemlemek hedeflenmiştir. Her bir senaryo için 100 Monte Carlo simülasyonu yapılmıştır.

İlk senaryoda, öncelikle, EUROCONTROL hava trafik ağı yöneticisi-günlük özet raporları kullanılarak o gün için havalimanlarında veya hava sahalarında herhangi bir düzenleme (olumsuz hava koşulları, hava trafik kontrolörü grevi v.b.) olup olmadığı kontrol edilmiştir. Sonrasında planlanan ve gerçekte olan talepler kullanılarak düzenlemelere bağlı kapasite düşüm oranları hesaplanmıştır. Bu karşılaştırmalara örnek olarak Şekil 4a ve 4b'deki Zürih Havalimanı'nın (LSZH)

Çizelge 1: Havalimanı ve Hava Sahası Kapasite Düşüm Oranları (02.03.2016)

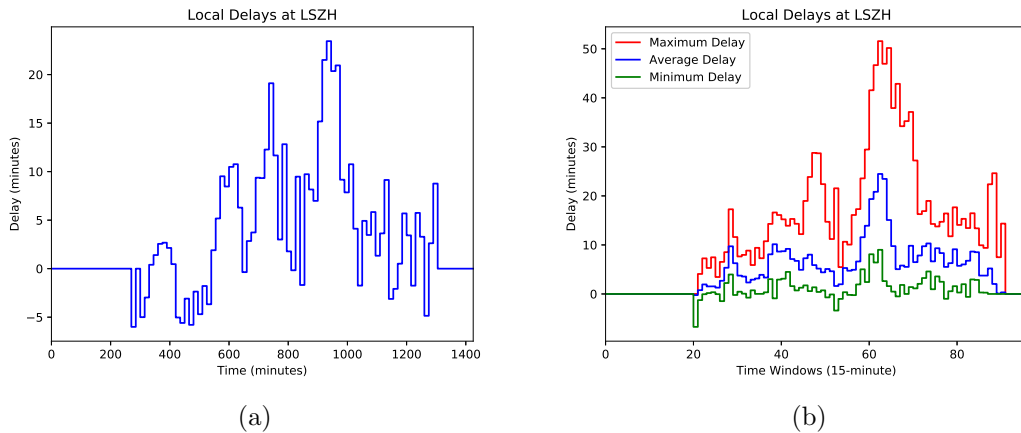
Havalimanı/Hava Sahası	15-dk. Alt Periyot	Kapasite Düşüm Oranı
EGLL	26-76	%22.5
EHAM	25-32	%37
EHAM	69-76	%33
LFPO	70-75	%40
LSZH	57-64	%41.2
LTFJ	60-90	%37

planlanan ve gerçekleşen talep grafikleri gösterilebilir. Bu hesaplamaların sonuçları Çizelge 1'de gösterildiği gibidir. Sonuçlar, kapasite düşümlerinin 15 dakikalık alt periyotlardaki yerleriyle verilmiştir.



Şekil 4: LSZH için planlanan (a) ve gerçekleşen (b) talepler.

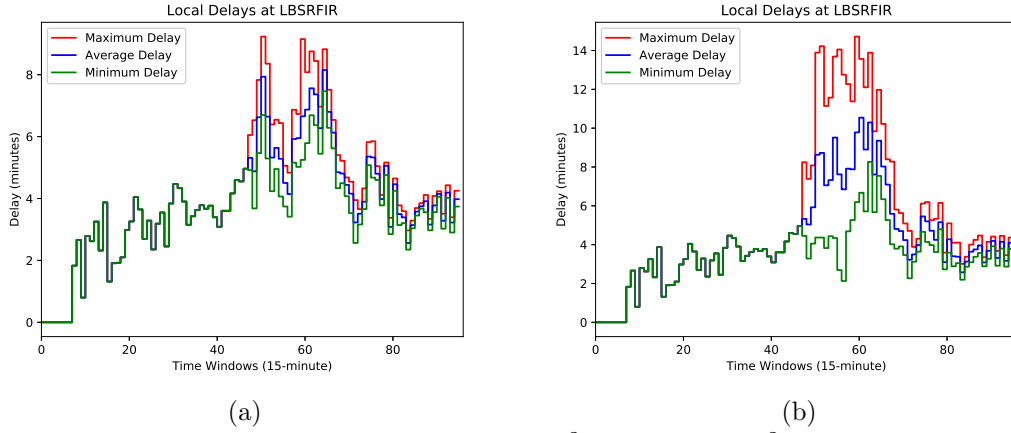
LSZH'deki gerçek gecikme ve simülasyonlar sonucu elde edilen gecikme grafikleri Şekil 5a ve Şekil 5b'de gösterilmiştir. Görüldüğü üzere ortalama gecikme profili gerçek gecikme profiliyle büyük benzerlikler göstermektedir. Simülasyona göre gerçek gecikme profili, belirsizliklerden dolayı oluşan ve gecikme sınırlarını oluşturan maksimum ve minimum gecikme profilleri arasında bir yerde bulunmalıdır.



Şekil 5: LSZH'de gerçek durumdaki (a) ve simülasyon sonuçlarına (b) göre gecikmeler.

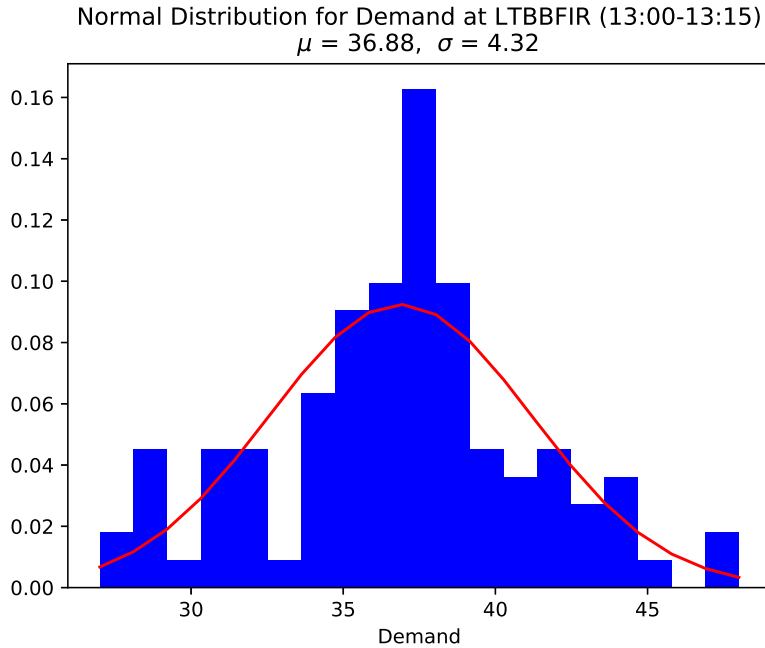
İkinci senaryoda ise uçuş güzergahına bağlı belirsizliklerin artması halinde sistem üzerinde nasıl etkisinin olacağı gösterilmek istenmiştir. Bu durumu düzgün bir şekilde gözlemleyebilmek için belirsizlikler sadece saat 12:00-14:00 aralığında verilmiştir. Bütün hava trafiğindeki güzergahlar üzerinde, $\mathcal{N}(0, 5^2)$ ve $\mathcal{N}(0, 0.5^2)$ olmak üzere iki farklı durum oluşturulmuştur. Şekil 6a ve 6b'de

görüldüğü gibi, hem belirsizlik hem de gecikme yayılımlarında ve ortalama gecikme değerlerinde artış gözlemlenmiştir.



Şekil 6: LBSRFIR’da belirsizliklerin $\mathcal{N}(0, 0.5^2)$ (a) ve $\mathcal{N}(0, 5^2)$ (b) ile modellendiği durumlardaki gecikmeler.

Bunlara ek olarak, LTBBFIR’da, saat 13:00-13:15 arasındaki talep değişkenlikleri Şekil 7’deki gibidir. Olasılıksal bulunma sayımları belirli bir alt periyottaki talep değişkenliklerine, bir dağılım uygulanarak bulunmuştur. Bu yaklaşım kullanılarak daha etkili bir talep-kapasite dengelemesi yapılabilir.



Şekil 7: LTBBFIR’ın normal dağılım uygulanmış talep histogramı (13:00-13:15).

SONUÇ

Bu çalışmada, daha etkili bir talep-kapasite dengelemesi yapılabilmesi için, hem uçuş güzergahına dayalı hem de hava trafiğine bağlı belirsizlikleri göz önünde bulunduran işlevsel bir model sunuldu. Avrupa hava trafik ağı, kuyruk teorisi kullanılarak modellendi. Bahsedilen model, havalimanı ve hava sahası tabanlı, gerçek uçuş verilerine dayalı bir kuyruk ağı modelidir. Belirsizliklerin elde edilebilmesi için EUROCONTROL’ün ALL_FT+ ve uçakların QAR verileri kullanılmıştır. Bu

belirsizliklerin elde ediliş yöntemleri ve kuyruk ağı için oluşturulan algoritma anlatıldı. Daha sonrasında belirlenen bir gün için havalimanlarındaki ve hava sahalarındaki gerçek kapasite düşümlerinin hesaplanması ve bulunan kapasite değerlerinin sunulan modelde kullanılıp, simülasyon sonuçlarının gerçek durumla karşılaştırılmasıyla, modelin gerçeğe uygunluğu test edildi. Son olarak farklı derecelerdeki güzergah belirsizlikleriyle yapılan simülasyon sonuçlarında, belirsizliğin artmasının hem gecikme süresini hem de belirsizlik ve gecikme yayılımını arttırdığı gözlemlendi.

Kaynaklar

- Airbus, 2015. *Global market forecast flying by numbers 2015-2034.*, Technical Report D14029463, Airbus.
- Baspınar, B., Ure, N.K., Koyuncu, E. ve İnalanhan, G., 2016. *Analysis of delay characteristics of european air traffic through a data-driven airportcentric queuing network model*. 14th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems,.
- Baspınar, B., Uzun, M., Guven, A., Buyuk, T., Tasdelen, I., Koyuncu, E. ve İnalanhan, G., 2017. *A 4d trajectory generation infrastructure tool for controller working position*. 36th Digital Avionics Systems Conference, St. Petersburg, FL, US.
- Bilimoria, K.D., Sridhar, B., Chatterji, G., Sheth, K. ve Grabbe, S., 2001. *Facet: Future atm concepts evaluation tool*. Air Traffic Control Quarterly, 9(1).
- Frolow, I. ve Sinnott, J.H., 1989. *National airspace system demand and capacity modeling*. Proceedings IEEE, 77(11), 1618-1624.
- Long, D. ve Hasan, S., 2009. *Improved prediction of flight delays using the lminet2 system-wide simulation model*. 9th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference (ATIO), Hilton Head, SC.
- Long, D., Lee, D., Johnson, J., Gaier, E. ve Kostiuk, P., 1999. *Modeling air traffic management technologies with a queuing network model of the national airspace system*. Technical Report, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center.
- Pyrgiotis, N., 2012. *A stochastic and dynamic model of delay propagation within an airport network for policy analysis*. Ph.D. thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Pyrgiotis, N., Malone, K.M. ve Odoni, A., 2013. *Modelling delay propagation within an airport network*. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, volume 27, 60-75.
- Wieland, F., 1997. *Limits to growth: results from the detailed policy assessment tool [air traffic congestion]*. Digital Avionics Systems Conference, 16th DASC, AIAA/IEEE, volume 2, 9-2, IEEE.