

## HAVA TRAFİK AKIŞ AĞI MODELLEMESİ VE HAVALİMANLARININ KAPASİTE DÜŞÜMLERİNDEN KAYNAKLANAN GECİKME KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ

Barış Başpınar<sup>1</sup>, Emre Koyuncu<sup>2</sup> ve Gökhan İnalhan<sup>3</sup>  
İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul

### ÖZET

*Bu çalışmada Avrupadaki havalimanları üzerinden havalimanı tabanlı bir hava trafik ağı modeli oluşturulmuş, bu model kullanılarak Avrupadaki havalimanlarında meydana gelen yerel problemlerin tüm trafik ağı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Model oluşturulurken algoritmik bir yaklaşımla birlikte kuyruk teorisi kullanılmıştır. Model gerçek uçuş verilerini girdi olarak kullanmaktadır, bu sayede herhangi bir günün uçuş plan verileri kullanılarak Avrupa üzerindeki havalimanlarında meydana gelen kapasite düşümlerinin bütün trafik üzerindeki etkisi incelenebilmektedir. İnşa edilen model ve uçuş verileri yardımıyla Avrupadaki Havalimanlarının kırıma noktaları belirlenmiş, yerel kırımların tüm ağı üzerindeki etkisi irdelenmiş, yerel problemin ağı üzerindeki etkisine göre Avrupadaki Havalimanları kategorize edilmiştir. Sonuçlar gerçek uçuş verileri kullanılarak yapılan simülasyonlar ile denetlenmiş ve sunulmuştur.*

### GİRİŞ

Hava taşımacılığı endüstrisi gün geçtikçe gelişmekte ve insan hayatı üzerindeki etkisi gittikçe artmaktadır. Trafik büyümesi beklenildiği şekilde devam ettiği takdirde şuan için yıllık 26 milyon olan ticari uçuş sayısının 2030 yılında 48.7 milyona çıkması beklenmektedir [Airbus, 2015]. Hava taşımacılığında beklenen bu artışa rağmen hava sahası ve havalimanı kapasiteleri sınırlıdır. Bu sebeple bu sınırlı kapasitelerin daha verimli kullanılması gündeme gelmektedir. Flight Path 2050'ye [ICAO, 2011] göre kapasite talep dengesinin sağlanması ve yaklaşma trafiğindeki gecikmelerin en aza indirilmesi sistem açısından en kritik durumlardır. Bu sebeple, paradigma değişimi olarak hava trafik kontrol ağırlıklı konseptten hava trafik akış yönetimi merkezli konseptte geçilmesi gündeme gelmektedir.

Bu çalışmada, Avrupa hava sahasının akış ağının modellenmesi veri analizi yaklaşımları ve kuyruk teorisi ile yapılmıştır. Bu model sayesinde yerel gecikmelerin ağı üzerindeki etkisi

<sup>1</sup>Doktora Öğrencisi, Uçak Müh. Böl., E-posta: baspinarb@itu.edu.tr

<sup>2</sup>Yrd. Doç. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: emre.koyuncu@itu.edu.tr

<sup>3</sup>Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: inalhan@itu.edu.tr

incelenabilmektedir. Uçuş verileri ve kuyruk ağ modeli yardımıyla Avrupadaki yoğun havalimanlarının karakteristiklerinin incelenmesi bu çalışma kapsamındadır. Bir havalimanında yerel problemlerden dolayı oluşan kapasite düşümlerinin ilgili havalimanında sebep olduğu durum, bu durumun diğer havalimanlarına etkisi ve ilgili havalimanının hangi seviyedeki kapasite düşümlerine kadar problemleri giderebileceği ile ilgili analizler çalışma kapsamında incelenmiştir. Analizlerin doğruluğu gerçek uçuş verileri yardımıyla yapılan simülasyonlarla irdelenmiştir.

### 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 2 farklı simülasyon modeli [Frolov ve Sinnott, 1989; Wieland, 1997] geliştirmiştir. Bu modeller Amerika Birleşik Devletlerindeki havalimanları 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. Ama modellerde ilgili bir uçağın takip etmesi gereken ardışık uçuş bilgileri kullanılmamıştır, bu durum tahminlerin hatalı olmasına sebep olabilmektedir.

Bunlarla beraber, ajan tabanlı simülasyon araçları da tasarlanmıştır [Bilimoria, Sridhar, Chatterji, Sheth ve Grabbe, 2001]. Bu yaklaşımdaki modellerde ise hesaplama zamanı çok yüksektir. Bu yaklaşımdan farklı olarak kuyruk ağ modellerinin tasarlanması ile ilgili çalışmalar da mevcuttur. Ulusal kuyruk modelleri olarak LMINET [Long, Lee, Johnson, Gaier, ve Kostiuik, 1999] ve LMINET2 [Long ve Hasan, 2009] isimli modeller oluşturulmuştur. Bu modellerde havalimanları  $M(t)/E_k(t)/1$  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 kullanılan yaklaşımlar aynıdır. Ama, havalimanlarında oluşan yerel gecikmeleri hesaplayan kuyruk modellerinin hesap yapma stratejileri farklıdır. Bu yaklaşımın avantajı hesap yükünün az olması ve modellemenin deterministik veya stokastik olarak yapılabilmesidir. Bu çalışmadaki kuyruk ağ modelinde kullanılan yaklaşım da bu yaklaşımlara benzer olacaktır.

## YÖNTEM

### Avrupadaki Hava Trafik

Avrupadaki trafik dağılımı ALLFT+ uçuş verisi kullanılarak incelenmiştir. İnceleme için 2 aylık uçuş verisi (Haziran 2014 ve Kasım 2014) kullanılmıştır. Avrupadaki trafik dağılımı incelenirken trafik yoğunluğunun büyük bir kısmının çok az sayıda havalimanında yoğunlaştığı (Haziran için tüm trafiğin %19'u, Kasım için %22'si 8 en yoğun havalimanındadır), havalimanlarının büyük bir kısmında ise günlük ortalama 1 uçuş ve altında uçuş gerçekleştiği görülmüştür. Bu sebeple günlük hareket sayısı çok az olan havalimanlarının hepsinin birleştirilerek modelde tek bir birleştirilmiş havalimanı olarak kullanılması yaklaşımı yapılmıştır. Bu sayede modelde çok fazla havalimanı bulunmayacak ve hesaplama zamanı düşürülecektir.

Bu yaklaşımla, Avrupada kapasitesinin çok uzağında çalışan havalimanları ve Avrupa dışında bulunan havalimanları tek bir birleştirilmiş havalimanı olarak alınmıştır. Bu sayede inşa edilecek modeldeki havalimanı sayısı 102 gerçek havalimanı ve 1 birleştirilmiş havalimanı olmak üzere 103 havalimanı olmuştur.

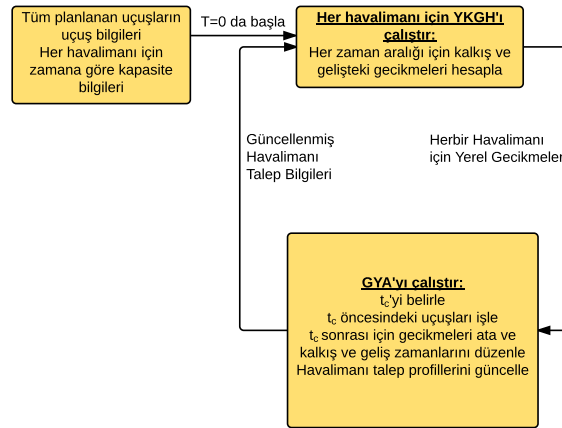
## Avrupadaki Yoğun Havalimanlarının Bağlantısallıkları

Avrupadaki en yoğun 8 havalimanının birbirleriyle olan bağlantısallıkları ALLFT+ uçuş verileri üzerinden incelenmiştir. En yoğun havalimanlarının ağdaki en önemli elemanlar olmaları ve bunların birbirleriyle olan ilişkilerinin bilinmesinin ileride yapılacak olan simülasyonlarda yararlı bilgiler sağlayacağı için bu tarz bir analize gidilmiştir. Bir havalimanının bağlantısallığı söz konusu olduğunda o havalimanındaki geliş ve gidiş trafiğinin yüzdesel olarak hangi havalimanlarından kaynaklandığından bahsedilmektedir.

İncelenen bağlantısallıklara göre en yoğun havalimanları 4 ana sınıfta kategorize edilmiştir. Sınıf 1 de yalnızca LTBA bulunmaktadır. Bu sınıfın karakteristik özelliği diğer yoğun havalimanları ile karşılaştırıldığı zaman yoğun havalimanları ile olan bağlantısallığının düşük olmasıdır, buna karşın bu sınıftaki havalimanlarının kendi bulundukları ülkelerdeki diğer birkaç havalimanıyla çok güçlü bağlantısallıkları mevcuttur. Sınıf 2 de LFPG ve EHAM vardır. Bu sınıfta diğer yoğun havalimanlarıyla olan bağlantısallık güçlü fakat kendi uluslarındaki diğer havalimanlarıyla olan bağlantısallıklar zayıftır. Sınıf 3 de EDDF, EDDM, LEMD ve LIRF bulunmaktadır. Bu sınıfta ise hem yoğun havalimanlarıyla hem de ilgili ülkelerin yerel havalimanlarıyla olan bağlantısallık güçlüdür. Son sınıfta ise EGLL vardır. Bu sınıftaki havalimanları yoğun havalimanlarıyla güçlü bağlantısallığa sahip olmalarına ek olarak Avrupa dışındaki bazı havalimanlarıyla da güçlü bağlantısallığa sahiptirler.

## Havalimanı Tabanlı Kuyruk Ağ Modeli

Havalimanı tabanlı kuyruk ağ modeli iki temel bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler yerel kuyruk gecikmesi hesaplayıcı (YKGH) ve gecikme yayma algoritmasıdır (GYA). Bu modellemede yinelemeli bir süreç yaklaşımı kullanılmıştır ve bu yaklaşım Şekil 1 de sunulmuştur.



Şekil 1: Havalimanı Tabanlı Kuyruk Ağ Modeli

Modelde YKGH yerel gecikmeleri ilk gelen ilk servise alınır (FCFS) mantığını merkeze alarak hesaplamaktadır. Herbir havalimanı için bir kuyruk modeli kullanılmıştır, bu modelde tek servis sağlayıcının hem kalkıştaki hem de gelişteki uçuşlara hizmet verdiği düşünülmüştür. Havalimanları  $M(t)/E_k(t)/1$  kuyruk yapısıyla modellenmiştir. Bu yapıda kuyruğa geliş zamanları exponansiyel dağılım, kuyruktaki servis zamanı ise Erlang dağılımı olarak modellenmektedir. Bu dağılımların parametreleri ALLFT+ verisi ve havalimanı kapasite verileri kullanılarak bulunmuştur. YKGH tarafından herbir havalimanı için yerel gecikmelerin hesaplanmasının ardından yerel gecikmelerin global etkileri GYA ile ağ üzerine yansıtılmaktadır.

YKGH yerel gecikmeleri üretmek için iki girdiye ihtiyaç duyar. İlk girdi olarak havalimanının talep profilini kullanır. Bu profiller ayrı bir yapıya sahiptir, bir gün 15 dakikalık alt periyotlara

bölünmüştür.  $\mu_a(h)$  havalimanı  $a$  için  $h$  ıncı alt periyottaki talep miktarını belirtir. Bu talep miktarı ilgili zaman aralığında geliş ve gidiş trafiğinde bulunan toplam uçuş sayısına eşittir. Diğer girdi ise  $\lambda_a(h)$  dir, servis oranı olarak isimlendirilmektedir. Her havalimanı için bu iki girdi kullanarak YKGH tarafından yerel gecikmeler ( $W_a(t)$ ) zamana bağlı olarak bulunabilmektedir.

GYA seviyesinde, algoritma  $W_a(t)$  dizilerini, bir uçakla yapılacak olan ardışıl uçuş bilgilerini, her uçuş için planlanmış ve yeniden ayarlanmış geliş ve gidiş zamanlarını girdi olarak kullanır. Notasyon olarak  $f$  mevcut uçuşu simgelerken  $f'$  aynı uçağın bir önceki uçuşunu simgelemektedir. GYA nın başlangıcında kritik zaman değeri  $t_c$  hesaplanır. Kritik zaman değeri ilk önemli gecikmenin olduğu zaman aralığını belirtmektedir. Bir gecikmenin önemli olarak kaydedilmesi için  $f$  uçuşunun aynı uçakla yapılan kendinden önceki  $f'$  uçuşu yüzünden gecikme alması ve geliş veya gidiş zamanının bu sebeple ayarlanma ihtiyacı duyması gerekmektedir. Ardından, her uçuşun geliş ve gidiş zamanları GYA tarafından aşağıdaki denklemleri kullanarak düzenlenir:

$$AD(f) = \max[SD(f), SD(f) + (AA(f') - SA(f')) + W_{d(f')}(AA(f')) - \text{bosluk}(f', f)] \quad (1)$$

$$AA(f) = \max[SA(f), AD(f) + W_{o(f)}(AD(f)) + (o(f) \text{ den } d(f) \text{ ye olan ucuş suresi})] \quad (2)$$

Bu denklemlerde,  $AD(f)$   $f$  uçuşunun yeniden düzenlenmiş gidiş zamanıdır.  $AA$  yeniden düzenlenmiş geliş zamanını,  $SD$  planlanmış gidiş zamanını ve  $SA$  planlanmış geliş zamanını belirtir.  $o(f)$   $f$  uçuşu için kalkışın yapıldığı havalimanını,  $d(f)$  de varılacak havalimanını belirtir.

Turnaround zamanı  $\text{turn}(f', f)$  olarak tanımlanırsa,  $\text{turn}(f', f) = SD(f) - SA(f')$  olacaktır.  $f$  uçuşunun yerdeki servisini tamamlamak için gerekli minimum süre de  $\text{minturn}(f', f)$  olarak tanımlansın. Bu durumda  $\text{bosluk}(f', f)$  şu şekilde verilir:

$\text{bosluk}(f', f) = \text{turn}(f', f) - \text{minturn}(f', f)$ . Yeniden ayarlanmış geliş ve gidiş zamanları her uçuş için bulunduktan sonra her havalimanı için talep profilleri güncellenir. YKGH ve GYA arasındaki bu yinelenmeli süreç simulasyon zamanının sonuna ulaşılana kadar tekrarlanır.

### Kırılma Noktası Analizi

Bir havalimanının kapasite düşümüne karşı oluşturduğu gecikme üretim yapısının algılanabilmesi için bir metrik olarak kırılma noktası tanımlanmıştır. Kırılma noktası bir havalimanı için kritik kapasite değerini ifade etmektedir. Bir havalimanının kullanılabilir kapasitesi çeşitli etkilerden dolayı o havalimanının kırılma noktasının altına düştüğü zaman havalimanında gecikme üretilmeye başlanır. Eğer havalimanının kapasitesi kırılma noktasından yüksek ise havalimanı uçaklara önemli miktarda gecikme vermez, operasyon normal seyrinde devam ettirilebilir.

Bir havalimanı için kırılma noktası bulunma işlemi sırasında YKGH kullanılır. İlgili havalimanı için gün içerisindeki talep profili (gidiş ve gelişteki uçuş sayısı) zaman aralıklarına bağlı olarak çıkarılır. Bu profil kuyruğa gelen talebi belirler. Kuyruğun servis zamanı ise havalimanının kapasitesi ile ilgilidir. Havalimanının kapasite değeri azaltılarak kuyrukta önemli derecede gecikmenin üretilmeye başlandığı kapasite değeri bulunur ve kırılma noktası olarak belirlenir. Kırılma noktasının formal tanımı için aşağıdaki denklemlere başvurulabilir.

Tüm zaman aralıklarındaki kapasite değerleri  $c$  değeri olarak atanır ve bu değere karşılık gelen  $\lambda_a(h)$  değeri bulunur ve  $W_{a,c}(t)$  şu şekilde hesaplanır:

$$W_{a,c}(t) \leftarrow YKGH(\mu_a(h), c) \quad \forall h \in H_{hepsi} \quad (3)$$

burada  $W_{a,c}(t)$  havalimanı  $a$ 'nın kapasite değeri  $c$  olarak ayarlandığı zaman havalimanı için hesaplanan yerel gecikmelerin zamana bağlı fonksiyonunu belirtir.

$F_{a,c,gidis,+15}$  ve  $F_{a,c,gelis,+15}$  kümeleri şu şekilde tanımlanır:

$$F_{a,c,gidis,+15} = \{f : \forall f \in F_{a,gidis} \text{ eğer } W_{a,c}(SD(f)) > 15\} \quad (4)$$

Çizelge 1: EHAM ve LTBA 'nın Kırılma Noktası Bölgesindeki Karakteristiklerinin Karşılaştırılması (Kasım 2014)

| Kapasite Değeri (Hareket/15dk) | EHAM                                     |                           |                         | LTBA                                     |                           |                         |
|--------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------------------|
|                                | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi | Maksimum Gecikme (dakika) | Toplam Gecikme (dakika) | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi | Maksimum Gecikme (dakika) | Toplam Gecikme (dakika) |
| 9                              | 99.83                                    | 9577                      | 1.2x10 <sup>8</sup>     | 99.56                                    | 9502                      | 1.2x10 <sup>8</sup>     |
| 10                             | 99.67                                    | 5976                      | 8.7x10 <sup>7</sup>     | 99.58                                    | 5904                      | 8.6x10 <sup>7</sup>     |
| 11                             | 99.53                                    | 2487                      | 4.1x10 <sup>7</sup>     | 99.6                                     | 2145                      | 3.6x10 <sup>7</sup>     |
| 12                             | 95.89                                    | 471                       | 6.7x10 <sup>6</sup>     | 86.56                                    | 223                       | 3x10 <sup>6</sup>       |
| 13                             | 92.61                                    | 365                       | 4.9x10 <sup>6</sup>     | 81.59                                    | 137                       | 1.6x10 <sup>6</sup>     |
| 14                             | 89.81                                    | 275                       | 3.5x10 <sup>6</sup>     | 43.83                                    | 65                        | 489193                  |
| 15                             | 85.8                                     | 197                       | 2.4x10 <sup>6</sup>     | 0.44                                     | 18                        | 82307                   |
| 16                             | 81.23                                    | 128                       | 1.4x10 <sup>6</sup>     | 0.0                                      | 9                         | 27689                   |
| 17                             | 62.69                                    | 75                        | 733328                  | 0.0                                      | 7                         | 12342                   |
| 18                             | 35.14                                    | 50                        | 374732                  | 0.0                                      | 5                         | 5814                    |
| 19                             | 19.86                                    | 36                        | 228128                  | 0.0                                      | 3                         | 2587                    |
| 20                             | 10.96                                    | 27                        | 158441                  | 0.0                                      | 3                         | 1039                    |

$$F_{a,c,gelis,+15} = \{f : \forall f \in F_{a,gelis} \text{ eğer } W_{a,c}(SA(f)) > 15\} \quad (5)$$

Bu denklemlerde,  $F_{a,gidis}$  ve  $F_{a,gelis}$  kümeleri havalimanı a'daki sırasıyla gidiş ve geliş trafiğindeki tüm uçuşları içerir.  $F_{a,c,gidis,+15}$  ve  $F_{a,c,gelis,+15}$  kümeleri havalimanı a'daki sırasıyla gidiş ve geliş trafiğinde bulunan ve 15 dakikadan fazla gecikme alan uçuşları içerir.

Havalimanı a'da kapasitenin c olduğu durumda 15 dakikadan fazla gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi ( $D15_{a,c}$ ) şu şekilde tanımlanır:

$$D15_{a,c} = \frac{s(F_{a,c,gidis,+15}) + s(F_{a,c,gelis,+15})}{s(F_{a,gidis}) + s(F_{a,gelis})} * 100 \quad (6)$$

Havalimanı a için kırılma noktası ( $KN_a$ ) şu şekilde bulunur:

$$KN_a = \max(\{c : \forall x = D15_{a,c}, c = 1, 2, \dots, 50, \text{ eğer } x \geq 20\}) \quad (7)$$

Bir havalimanında c kapasite değeri için uçuşların %20 sinden fazlası 15 dakikadan fazla (+15) gecikme alıyorsa bu verimsiz kapasite değerinin yüksek gecikmelere sebep olduğu söylenebilir. Yüksek gecikmelere sebep olan kapasite değerlerinin içerisinde en büyük olan değer havalimanının kırılma noktası ( $KN_a$ ) olarak tanımlanır.

Farklı havalimanlarının kırılma noktaları ve kırılma noktası çevresindeki kapasitelerde çalışırken gösterdikleri çalışma karakteristikleri de farklıdır. LTBA (Atatürk havalimanı) ve EHAM (Amsterdam Havalimanı) 'ın farklı kapasite değerlerinde ürettikleri gecikmeler Çizelge 1 de sunulmuştur, bu çizelge incelenerek havalimanlarının kırılma noktaları ve bu bölgede ki çalışma karakteristikleri hakkında yorum yapılabilir. LTBA ve EHAM gün içerisinde ortalama aynı sayıda talebe sahip olmalarına karşın LTBA'nın kırılma noktası 14 iken EHAM'inki 18 dir. Bununla beraber kırılma noktasına düştüğü zaman LTBA ani bir gecikme üretimi gösterirken EHAM daki üretim daha kademeli bir şekildedir. Bu durumun sebebi talep profilinin gün içerisinde dağılımı şeklindedir. LTBA'da ortalama talep farklı zaman aralıklarında aynı seviyelerde olurken EHAM'da birkaç zirve zamanı vardır, yüksek talepler günün belirli saatlerinde yoğunlaşmıştır. Bu talep dağılımı farklılığı kırılma noktasının değerini ve kırılma noktası çevresinde çalışırken üretilen gecikme karakteristiğini belirler.

Avrupadaki yoğun havalimanlarının kırılma noktaları, gerçek kapasiteleri ve bu iki değer kullanılarak elde edilen ekstra kapasite oranları Çizelge 2 de sunulmuştur. Ekstra kapasite oranı bir havalimanının kapasitesinin ne kadarının atıl durumda olduğunu belirler. Bu açıdan o oran kadar olan düşümlerde havalimanında gecikme üretilmez, gecikme üretilmesi için ilgili havalimanındaki kapasite düşümünün ekstra kapasite oranından fazla olması gerekmektedir.

Çizelge 2: Planlı Uçuşlara Göre Avrupadaki Yoğun Havalimanlarının 2014 deki Kırılma Noktaları

| Havalimanı | Kırılma Noktaları<br>(Hareket/15dk) |       | Gerçek Kapasite<br>(Gidiş+Geliş)<br>(Hareket/15dk) | Ekstra Kapasite<br>Oranı (1-(KN/GK)) |       |
|------------|-------------------------------------|-------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-------|
|            | Haziran                             | Kasım |                                                    | Haziran                              | Kasım |
| LFPG       | 20                                  | 18    | 30                                                 | 0.33                                 | 0.40  |
| EDDF       | 20                                  | 19    | 25                                                 | 0.20                                 | 0.24  |
| EGLL       | 20                                  | 19    | 22                                                 | 0.09                                 | 0.14  |
| EHAM       | 19                                  | 18    | 27                                                 | 0.30                                 | 0.33  |
| EDDM       | 16                                  | 15    | 23                                                 | 0.30                                 | 0.35  |
| LTBA       | 14                                  | 14    | 15                                                 | 0.07                                 | 0.07  |
| LEMD       | 14                                  | 14    | 25                                                 | 0.44                                 | 0.44  |
| LIRF       | 14                                  | 13    | 23                                                 | 0.39                                 | 0.43  |

Çizelge 3: Durum Çalışması 1'in Sonuçları: Yüzdesel Kapasite Düşümü

| Havalimanı                                        | Senaryo 1             |                                             | Senaryo 2             |                                             | Senaryo 3             |                                             | Senaryo 4             |                                             |
|---------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
|                                                   | Toplam<br>Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye<br>sahip uçuşların yüzdesi | Toplam<br>Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye<br>sahip uçuşların yüzdesi | Toplam<br>Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye<br>sahip uçuşların yüzdesi | Toplam<br>Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye<br>sahip uçuşların yüzdesi |
| EDDF                                              | 181                   | 0.1                                         | 1389                  | 1.2                                         | 18969                 | 52.8                                        | 18404                 | 51.6                                        |
| LFPG                                              | 186                   | 0.1                                         | 1411                  | 1.1                                         | 1681                  | 0.8                                         | 465                   | 0.8                                         |
| EGLL                                              | 1069                  | 0.2                                         | 100536                | 74.6                                        | 1519                  | 1                                           | 1411                  | 1                                           |
| EHAM                                              | 211                   | 0.2                                         | 1627                  | 1.5                                         | 3969                  | 0.9                                         | 415                   | 0.7                                         |
| LTBA                                              | 3200                  | 0.2                                         | 3572                  | 0.7                                         | 3374                  | 0.6                                         | 3261                  | 0.5                                         |
| EDDM                                              | 78                    | 0.1                                         | 1223                  | 1.4                                         | 322                   | 0.9                                         | 286                   | 0.9                                         |
| LEMD                                              | 409                   | 0.4                                         | 1461                  | 1.5                                         | 590                   | 1                                           | 563                   | 1                                           |
| LIRF                                              | 122                   | 0.2                                         | 1193                  | 1.5                                         | 260                   | 0.6                                         | 241                   | 0.6                                         |
| LEBL                                              | 145                   | 0                                           | 806                   | 0.9                                         | 346                   | 0.7                                         | 312                   | 0.7                                         |
| LOWW                                              | 231                   | 0.3                                         | 814                   | 1.1                                         | 496                   | 1.7                                         | 475                   | 1.7                                         |
| EDDT                                              | 47                    | 0                                           | 848                   | 2.2                                         | 266                   | 1.3                                         | 247                   | 1.3                                         |
| EIDW                                              | 88                    | 0                                           | 2709                  | 4.6                                         | 192                   | 0.6                                         | 165                   | 0.6                                         |
| EGPH                                              | 44                    | 0                                           | 1898                  | 5.9                                         | 121                   | 0.3                                         | 85                    | 0.3                                         |
| EGPF                                              | 211                   | 0.4                                         | 1464                  | 4.7                                         | 236                   | 0.4                                         | 211                   | 0.4                                         |
| EGPD                                              | 38                    | 0                                           | 1355                  | 5.3                                         | 111                   | 0.9                                         | 88                    | 0.9                                         |
| EDDV                                              | 31                    | 0.7                                         | 808                   | 2.2                                         | 150                   | 3.7                                         | 137                   | 3.7                                         |
| EDDP                                              | 1                     | 0                                           | 144                   | 0.9                                         | 121                   | 3.6                                         | 116                   | 3.6                                         |
| Majör Havalimanları<br>(Ağdaki<br>102 Havalimanı) | 14092                 | 0.36                                        | 152798                | 4.05                                        | 45738                 | 2.98                                        | 38509                 | 2.87                                        |

Senaryo 1: Nominal Durum

Senaryo 2: EGLL için %25 kapasite düşümü

Senaryo 3: EDDF, LFPG ve EHAM için %25 kapasite düşümü

Senaryo 4: EDDF için %25 kapasite düşümü

## UYGULAMALAR

Uygulamada bir günlük ALLFT+ verisi (09.06.2014) kullanılmıştır. İki farklı durum çalışması yapılmış ve değerlendirilmiştir. Birinci durum çalışmasında yüzdesel kapasite düşümlerinin ağ üzerindeki etkisi incelenmiş, ikinci durum çalışmasında kırılma noktası altında çalışan farklı havalimanlarının ağ üzerindeki etkisi irdelenmiştir.

Birinci durum çalışmasında 4 farklı senaryo üzerinden farklı ekstra kapasite oranlarına sahip majör havalimanlarındaki yüzdesel kapasite düşümlerinin ağ üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Bu durum çalışmasındaki ilk senaryo ağdaki tüm havalimanlarının kapasitelerinin nominal değerlerinde bulunduğu koşuldur. İkinci ve dördüncü senaryolarda sırasıyla EGLL (London Heatrow) ve EDDF (Frankfurt) havalimanlarına %25 kapasite düşümü uygulanmıştır. Üçüncü senaryoda ise EDDF, LFPG (Paris Charles de Gaulle) ve EHAM (Amsterdam Schiphol) havalimanlarının 3'üne aynı anda %25 kapasite düşümü uygulanmıştır. Bu senaryolarda kuyruk ağ modeli çalıştırılmış ve sonuçları Çizelge 3 de sunulmuştur. Sonuçlar göstermektedir ki tüm ağdaki en yüksek toplam gecikme miktarı senaryo 2 de meydana gelmektedir. Senaryo 3 de aynı anda üç farklı havalimanında birden kapasite düşümü meydana gelmesine karşın bu senaryoda ağdaki toplam gecikme senaryo 2 ile karşılaştırıldığı zaman düşük kalmaktadır. Bu durumun sebebi ilgili havalimanlarındaki ekstra kapasite oranlarının farklı olmasıdır. Çizelge 2 de verildiği şekliyle EGLL yalnızca %9 ekstra kapasite oranına sahip iken EDDF, LFPG ve EHAM sırasıyla %20, %33 ve %30 oranlarına sahiplerdir. Bu havalimanlarındaki ekstra kapasite oranları kapasite düşümlerini daha fazla karşılayabilecek seviyelerde oldukları için senaryo 3 deki gecikme üretimi senaryo 2 ye göre daha düşük olmuştur. Senaryo 3 ve senaryo 4 karşılaştırıldığı zaman bu iki senaryodaki gecikme üretimlerinin birbirine yakın oldukları görülmektedir. Bu durumun sebebi senaryo 3 de EDDF dışındaki havalimanlarının kırılma noktasının altına düşmemiş olmasıdır. Bu yüzden senaryo 3 deki gecikme üretiminin asıl kaynağı EDDF dir, senaryo 4 de ise zaten sadece EDDF ye müdahalede bulunulmuştur. Bu sebeple iki senaryodaki gecikme üretimleri birbirine yakındır.

Çizelge 4: Durum Çalışması 2'nin Sonuçları: Kırılma Noktası Çevresinde Operasyon

| Havalimanı                                  | Senaryo 5          |                                          | Senaryo 6          |                                          | Senaryo 7          |                                          | Senaryo 8          |                                          |
|---------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|--------------------|------------------------------------------|
|                                             | Toplam Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi | Toplam Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi | Toplam Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi | Toplam Gecikme(dk) | +15 dk gecikmeye sahip uçuşların yüzdesi |
| EDDF                                        | 278                | 0.3                                      | 360                | 0.6                                      | 366                | 0.5                                      | 359                | 0.6                                      |
| LFPG                                        | 281                | 0.4                                      | 479                | 0.7                                      | 420                | 0.8                                      | 405                | 0.6                                      |
| EGLL                                        | 1233               | 0.4                                      | 1436               | 1.2                                      | 1371               | 1                                        | 21828              | 44.8                                     |
| EHAM                                        | 288                | 0.5                                      | 21721              | 53.6                                     | 381                | 0.7                                      | 557                | 1.1                                      |
| LTBA                                        | 21278              | 46.4                                     | 3389               | 0.5                                      | 3251               | 0.3                                      | 3280               | 0.4                                      |
| EDDM                                        | 164                | 0.4                                      | 259                | 0.8                                      | 238                | 0.8                                      | 291                | 0.9                                      |
| LEMD                                        | 453                | 0.5                                      | 524                | 0.8                                      | 21341              | 74                                       | 617                | 1.1                                      |
| LTBJ                                        | 733                | 10.2                                     | 243                | 2.1                                      | 240                | 2.1                                      | 232                | 1.6                                      |
| LTAC                                        | 618                | 5.1                                      | 261                | 0.9                                      | 264                | 1.4                                      | 257                | 1.4                                      |
| LTAI                                        | 591                | 4.8                                      | 157                | 1.1                                      | 124                | 0.7                                      | 120                | 0                                        |
| LEBL                                        | 184                | 0.1                                      | 302                | 0.3                                      | 659                | 2                                        | 259                | 0.5                                      |
| LPPT                                        | 47                 | 0                                        | 145                | 0.9                                      | 418                | 2.7                                      | 177                | 0.9                                      |
| LEPA                                        | 21                 | 0                                        | 49                 | 0.2                                      | 366                | 2.2                                      | 29                 | 0                                        |
| EIDW                                        | 96                 | 0                                        | 204                | 0.8                                      | 206                | 0.8                                      | 420                | 1.9                                      |
| EGPH                                        | 46                 | 0                                        | 219                | 1.6                                      | 78                 | 0.3                                      | 320                | 2.8                                      |
| EGPF                                        | 211                | 0.4                                      | 404                | 2.6                                      | 210                | 0.4                                      | 389                | 2.6                                      |
| Majör Havalimanları (Ağdaki 102 Havalimanı) | 35661              | 2.17                                     | 43977              | 2.91                                     | 42189              | 2.96                                     | 41387              | 2.44                                     |

Senaryo 5: LTBA'nın kapasitesi 14 e düşürülmüş

Senaryo 6: EHAM'ın kapasitesi 18.1 e düşürülmüş

Senaryo 7: LEMD'nin kapasitesi 13.8 e düşürülmüş

Senaryo 8: EGLL'nin kapasitesi 19.55 e düşürülmüş

En yoğun 8 havalimanı ve ilgili kapasite düşürmelerinden toplam gecikmede 200 dk'dan fazla etkilenen havalimanları çizelgeye alınmıştır.

İkinci durum çalışmasında 4 farklı senaryo üzerinden havalimanlarının kendi kırılma noktaları civarında çalışmalarının ağ üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu senaryolarda sırasıyla LTBA (İstanbul Atatürk), EHAM, LEMD (Madrid Barajas) ve EGLL havalimanlarında kırılma noktası bölgesindeki gecikme üretimi elde edilmiş ve Çizelge 4 de sunulmuştur. Senaryolarda havalimanlarının kapasiteleri kendi kırılma noktalarının altında olacak şekilde seçilmiştir ve her havalimanının ürettiği toplam yerel gecikmenin diğer senaryodaki havalimanlarıyla yaklaşık olarak aynı seviyede olmasına dikkat edilerek ilgili havalimanının kapasitesi belirlenmiştir. Bu durumda havalimanları yerel olarak aynı gecikmeleri üretmelerine karşın bu yerel gecikmelerin global olarak ağ üzerindeki etki farklılıkları incelenebilecektir. Senaryo 5 de ağ üzerindeki toplam gecikme diğer senaryolarla karşılaştırıldığında daha düşüktür. Diğer üç senaryoda ağ üzerindeki toplam gecikme birbirlerine yakın seviyelerdedir. Senaryo 5 de toplam gecikmenin az olmasının sebebi LTBA'nın Sınıf 1 de bulunan bir havalimanı olmasıdır. Sınıf 1 in özelliği diğer yoğun havalimanlarıyla karşılaştırıldığı zaman, yoğun havalimanlarıyla daha zayıf bağlantısalılık göstermesiydi. Ayrıca Çizelge 4 incelenerek herbiri 4 sınıftan farklı birinin elemanı olan havalimanlarının sınıf karakteristikleri de hangi havalimanlarında gecikmeye sebep oldukları incelenerek görülebilmektedir. Bağlantı tabanlı sınıf yaklaşımı ile simulasyon sonuçlarıyla sunulan gecikmelerden anlaşılan sınıf karakteristikleri birbirini destekler niteliktedir. Farklı sınıfların karakteristikleri çizelgeden de elde edilebilmektedir. Örneğin senaryo 5 e bakıldığında LTBA daki düşümün en çok LTBJ, LTAC ve LTAI yı etkilediği görülmektedir ve bu havalimanları Türkiye'deki yerel havalimanlardır, bununla beraber kapasite düşümünün yoğun havalimanları üzerindeki etkisi azdır, bu karakteristik Sınıf 1 'in karakteristiğidir. Aynı şekilde EHAM Sınıf 2 'de bulunan bir havalimanıdır ve çizelgeye bakıldığında yoğun havalimanları üzerindeki güçlü etkisine karşın yerel havalimanlarını pek etkilemediği görülmektedir. Diğer iki sınıf için de daha önceden sunulan karakteristikler çizelgedeki sonuçlar kullanılarak elde edilebilmektedir.

## SONUÇ

Bu çalışmada Avrupa ağında bulunan havalimanlarının karakteristikleri incelendi. Gerçek uçuş verileri kullanılarak Avrupa boyunca oluşacak gecikme yayılımını simule edebilecek model sunuldu ve simulasyonlarla model denetlendi.

Verilerin incelenmesiyle modeldeki havalimanı sayısının 103 'e düşürülebileceği sunuldu. Bağlantısalılık analiziyle en yoğun havalimanları dört farklı sınıfa ayrıldı ve sınıf karakteristikleri belirlendi. Havalimanı tabanlı kuyruk ağ modeli inşa edilerek kırılma noktası metriği tanımlandı. Havalimanlarının ekstra kapasite oranları ortaya konuldu. Son olarak, simulasyonlarla yüzdesel kapasite düşümü ve farklı havalimanlarının kırılma noktası çevresindeki operasyonları irdelendi.

## Kaynaklar

- Airbus, 2015. *Global market forecast flying by numbers 2015 - 2034*. Technical Report D14029463, Airbus.
- 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 of the IEEE, 77(11), 1618–1624.
- ICAO 2011. *Flightpath 2050 europe's vision for aviation — maintaining global leadership & serving society's needs*. Technical report, High Level Group (HLG) on Aviation and Aeronautics Research.
- 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, 27, 60–75.
- Wieland, F. 1997. *Limits to growth: results from the detailed policy assessment tool [air traffic congestion]*. Digital Avionics Systems Conference, 1997. 16th DASC., AIAA/IEEE, volume 2, 9–2. IEEE.