



İstanbul Havalimanı Yolcu Kapasitesinin Tahminine Yönelik Simülasyon Çalışması

Simulation Study for Estimating Istanbul Airport Passenger Capacity

Vecihi Yiğit¹ , Serdar Çelik² 

¹Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, TÜRKİYE

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, TÜRKİYE

Başvuru / Received: 12/11/2020

Kabul / Accepted: 02/12/2020

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/01/2021

Son Versiyon / Final Version: 18/01/2021

Öz

Bu makalede İstanbul Havalimanının büyük ölçekli bir simülasyon modeli geliştirilmiştir. Çalışmanın amacı, uçak geliş ve kalkış operasyonlarının analizi ile pist kullanımının verimliliğinin değerlendirilmesidir. Havalimanlarının darboğazlarını genellikle pistler oluşturmaktadır ve kapasitesinin değerlendirilmesi havalimanı yönetimi için büyük önem taşımaktadır. Çalışma veri toplama, verilerin analizi, simülasyon modelinin kurulması, modelin doğrulanması, modelin tasarımı ve sonuçların analizi kısımlarından oluşmaktadır. Uçakların havalimanına gelişlerine ve kalkışlarına ilişkin veriler, 1 ayı içeren ve 25 binden fazla kayıt analiz edilerek, pist kapasite tahmin modeli oluşturmak için karmaşık bir ayırık olay simülasyon yazılımı olan ARENATM programında girdi olarak kullanılmıştır. Simülasyon modeli, kapasite üzerinde en önemli etkiye sahip olan uçakların gelişi, kalkışı ve taksi aşaması aynı zamanda yolcu sayısı bilgileri ile oluşturulmuştur. Yapılan analizler sonucunda İstanbul Havalimanının 2050 yılında hedeflenen yolcu kapasitesine ulaşip ulaşamayacağı tahmin edilmiştir. Model, pist kapasitesinin değerlendirilmesinde oldukça verimli görünmektedir.

Anahtar Kelimeler

“İstanbul Havalimanı, Kapasite Planlama, Simülasyon”

Abstract

In this article, a large-scale simulation model of Istanbul Airport has been developed. The aim of the study is to analyze the aircraft arrival and departure operations and to evaluate the efficiency of runway use. Runways often form the bottlenecks of airports and the assessment of their capacity is of great importance for airport management. The study consists of data collection, analysis of data, establishment of the simulation model, verification of the model, design of the model and analysis of the results. Data on arrivals and departures of aircraft at the airport were used as input in ARENATM, a sophisticated discrete event simulation software, to create a runway capacity estimation model by analyzing more than 25 thousand records, including 1 month. The simulation model was created with the arrival, departure and taxi stages of aircraft, which have the most significant impact on capacity, as well as the number of passengers. As a result of the analyzes made, it was estimated whether Istanbul Airport will reach the targeted passenger capacity in 2050. The model appears to be very efficient in evaluating runway capacity.

Key Words

“Istanbul Airport, Capacity Planning, Simulation”

1. Giriş

1970'lerin başından bu yana, havalimanlarında trafiğin zirveye ulaşması, dünyanın her yerindeki havalimanı operatörleri için artan bir endişe sorunu haline gelmiştir. Bu zorluk, çok sayıda trafik akışının sınırlı bir bölgede birleştiği pistlerde en belirgin şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu pistlerin rollerinin doğru bir şekilde atanmaması pist yönetim sorununu oluşturacaktır. Örneğin, bu durum bir nedensel zincir başlatabilir. Böylece, pistlerde oluşacak darboğaz etkisi, uçak kalkış ve inişlerinde gecikmelere, kullanılmayan pist kapasitesine ve kontrolör iş yükünün artmasına neden olabilecektir. Ayrıca, finansal ve çevresel maliyetlerin artmasına da neden olacaktır. Bir havalimanının kapasitesi, genel olarak belirli bir hacmi idare etme kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Pist kapasitesi ise belirli koşullar altında tek bir veya birden fazla pist kombinasyonu tarafından barındırılması makul olarak beklenebilecek uçak operasyonlarının saatlik oranı olarak tanımlanmaktadır.

Havalimanı içerisinde meydana gelebilecek bir darboğaz doğrudan havalimanı kapasitesini sınırlayıcı bir etki oluşturabilmektedir. Uçağın piste inmesinden sonra yolcuların havalimanı dışına çıkmasına kadar gerekli olan tesislerin oluşturulması gerekmektedir. Bu şekilde sürekli ve tıkanmayan bir havalimanı dinamiği oluşturulabilmektedir. Uçakların kalkış ya da iniş sırasında oluşturdukları kuyruklar, uçuşların saatinde başlamamasına neden olmaktadır. Bu gecikme saatleri, maliyetlerin artmasına ve yolcular için zaman kaybına neden olmaktadır. Gecikmelerin nedenleri arasında, havalimanından hizmet almak isteyenler için yeteri kadar pist ve taksi yolu olmamasından kaynaklanmaktadır (Wells ve Young, 2014).


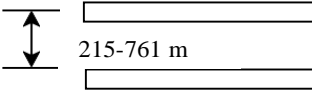
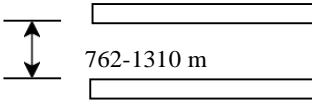
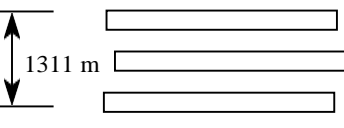
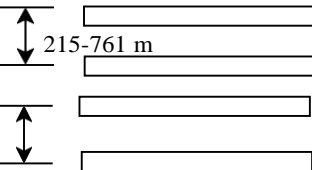
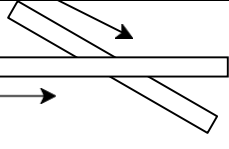
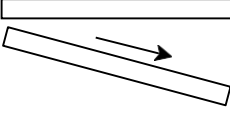
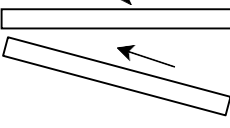
Havalimanı kapasitesi, pratik ve teorik kapasite şeklinde iki farklı şekilde tanımlanmaktadır (Airport Engineering, 1992). Pratik kapasite, uçak gecikmelerini dikkate alırken, teorik kapasite gecikmeleri dikkate almamaktadır. Havalimanlarının beklentileri, politikaları farklılık gösterdiğinden dolayı kabul edilebilir gecikme süresi bir havalimanından başka bir havalimanına göre değişmektedir (Horoñjeff ve diğeri, 2010). Gecikme sürelerini en aza indirmek ve havalimanı kapasitesini arttırmak için hava ulaşım sistemindeki engellerin nedenleri iyi bir şekilde analiz edilmelidir. Hansen, havalimanında meydana gelen gecikmelerin nedenleri hakkında çalışmalar yapmıştır (Hansen, 2002). Havalimanının kapasitesini azaltan ve uçakların kalkışında ve inişinde gecikmelere yol açan nedenler arasında yer ulaşım kapasitesi, yolcu terminal kapasitesi, hava sahası kapasitesi ve havalimanı hava kısmı kapasitesi yer almaktadır. Havalimanı hava kısmı kapasitesi; taksi yolu, pist, apron, kapı gibi kısımlardan oluşmaktadır. Havalimanı hava kısmı kapasitesi, güvenli gerçekleşen uçak kalkış ve iniş sayısıdır (Wells ve Young, 2014).

Genel olarak taksi yollarının kapasitesi pistlerin, apronların ve kapıların kapasitesinden daha fazladır fakat bir taksi yolu, bir pistin üzerinden geçiş sağlıyorsa taksi yolunun kapasitesi düşmektedir. Taksi yolları ve aprondaki faaliyetlerin pistlerin kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olmaktadır. Taksi yolları, pistler, apronlar ve kapılar içerisinde en sınırlayıcı kısmın kapasitesi tüm havalimanı hava kısmı kapasitesini belirlemektedir (Horoñjeff ve diğeri, 2010). En az esnekliğe sahip olan pistler ve taksi yolları, havalimanı tasarımı planlanırken ilk olarak düşünülmesi gereken elemanlardır. Havalimanı planlama ve tasarım aşamasında pist ve taksi yolları üzerinde durulması gereken noktalar, boyutunun ölçüleri, pist uzunluğu ve havalimanı kapasitesi konularıdır. Taksi yolu kapasitesinin pist ve apron kapasitesinden çok daha önemli olduğu yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Uçak sayısı, taksi yolunun pistin baş kısmına olan uzaklığı ve biçimi gibi faktörler taksi yolu kapasitesini belirlemektedir. Bir hava sahasının kapasitesini etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. En önemli faktörlerin bir listesi şunları içerir:

- Pist sisteminin konfigürasyonu, sayısı, aralığı ve yönü
- Taksi yolları ve pist çıkışlarının konfigürasyonu, sayısı ve konumu
- Apron alanındaki kapıların düzeni, boyutu ve sayısı
- Gelen ve giden uçak için pist kullanım süresi
- Tesisleri kullanan uçakların boyutu
- Hava durumu, görüş mesafesi, rüzgâr durumu
- Gürültü azaltma prosedürleri
- Kalkış sayısına göre iniş sayısı
- Art arda iniş sırasında oluşan rüzgâr girdapları
- Hava trafik kontrol tesislerinin niteliği ve kapsamı

Pist kapasitesini etkileyen en önemli faktör, birbirini izleyen uçaklar arasındaki mesafedir. Bu mesafe, büyük ölçüde hava koşulları, uçak boyutu ve uygun hava trafik kurallarına bağlıdır (Horoñjeff ve diğeri, 2010). Pist tasarımına uygun taksi yollarının eklenmesi, pistin ulaşabileceği maksimum kapasitesine erişmesini sağlayarak havalimanının verimliliğini arttırmaktadır. Havalimanı sisteminin kapasitesine en çok etki eden ve hâkim olan havalimanı elemanı pist kapasitesidir. Farklı pist tasarımları için saat bazında kapasite ve yıllık bazında hizmet hacimlerine ait değerler Şekil 1'de verilmiştir.

Farklı pist konfigürasyonları için; paralel pist, tek pist, V tipi pist, açık V tipi pist, kapalı V tipi pist örnekleri verilmiştir. Pist kapasiteleri hakkında (De Neufville ve diğeri, 2002) çalışması bulunmaktadır. Konu hakkında daha detaylı bilgi (Federal Aviation Administration, 2005) kitabında yer almaktadır.

No:	Pist kullanım konfigürasyonu	Saatlik kapasite işletim VFR	Saatlik kapasite işletim IFR	Yıllık hizmet hacmi işletim / kapasite
1		98 74 63 55 51	59 57 56 53 50	230,000 195,000 205,000 210,000 240,000
2		197 145 121 105 94	59 57 56 59 60	355,000 275,000 260,000 285,000 340,000
3		197 149 126 111 103	119 114 111 105 99	370,000 320,000 305,000 315,000 370,000
4		295 219 184 161 146	62 63 65 70 75	385,000 310,000 290,000 315,000 385,000
5		394 290 242 210 189	119 114 111 117 120	715,000 550,000 515,000 565,000 675,000
6		98 77 77 76 72	59 57 56 59 60	230,000 200,000 215,000 225,000 265,000
7		150 108 85 77 73	59 57 56 59 60	270,000 225,000 220,000 225,000 265,000
8		132 99 82 77 73	59 57 56 59 60	260,000 220,000 215,000 225,000 265,000

Şekil 1. Saatlik ve yıllık nihai kapasitelerin tahminleri (Horonjeff ve diğerleri, 2010)

2. Materyal ve Yöntem

Havalimanı kapasitesi fiziksel genişleme yoluyla artırılabilir; ancak böyle bir çalışma, yüksek yatırım maliyetleri ve genişleme için yeterli fiziksel arazi gerektirir. Bu nedenle, mevcut havalimanlarının maksimum kapasitede işletilmesi kritik ve iyileştirme önlemlerini belirlemek için doğru bir analiz gerekmektedir (Cetek ve Cetek, 2014).

Monte Carlo ve ayrık olay simülasyonu gibi simülasyon teknikleri, havalimanı operasyonlarının tasarımı ve geliştirilmesi için daha gerçekçi sonuçlar sağlamaktadır. Pitfield ve Jerrard, yaptıkları çalışmada üç alternatif pist kullanım senaryosu için Fiumucino Uluslararası Havaalanındaki kısıtlanmamış pist kapasitesini tahmin etmek için Monte Carlo simülasyonu kullanmışlardır (Pitfield & Jerrard, 1999).

Kesikli olay simülasyon teknikleri, havalimanlarının kapasite analizi için detaylı bilgi veren modelleri sağlamaktadır. SIMMOD, TAAM, CAST ve Airport Machine gibi bu tekniğe dayalı olarak çok sayıda araç geliştirilmiştir. Bu araçlarla ilgili ayrıntılı inceleme (Odoni vd., 1997; Zografos ve Madas, 2006) tarafından sağlanmıştır. Chao vd., (2008) SIMMOD kullanarak Gaoqi Uluslararası Havaalanı için bir hava tarafı kapasite geliştirme çalışması gerçekleştirmiştir. Başka bir çalışmada Bazargan vd., (2002) farklı seviyelerdeki yer ve hava sahası kısıtlamaları altında farklı pist konfigürasyonları için pist sistemi kapasite kullanımını araştırmak için TAAM'ı kullanmışlardır. Analizde, Philadelphia Uluslararası Havaalanı'nda maksimum verim kapasitesi açısından önerilen iki genişletme alternatifi karşılaştırılmıştır. Yukarıda belirtilen ayrık olay simülasyon araçları ayrıntılı ve güvenilir analizler sağlayabilseler de uçuş programları ve havaalanı yerleşimi ile ilgili aşırı girdi verisi gerektirmektedir. Bu nedenle, sonuçların güvenilirliği ile simülasyon tekniğini seçerken gereken maliyet ve çaba arasında bir denge bulunmaktadır. Barrer vd., (2005) verilen herhangi bir pist konfigürasyonu ve ayırma kuralları için pist kapasitesini tahmin etmek için simülasyon yoluyla havaalanı kapasite analizi adlı pratik bir simülasyon aracı geliştirmiştir. Araç, ayrıntılı uçuş programlarını kullanmak yerine belirli operasyon ve uçak tipi karışımları için ortalama kapasiteleri tahmin edebilmektedir. Bu nedenle, sonuçlar analitik yöntemlerden daha doğrudur ve karmaşık pist konfigürasyonları için açıklanan ayrık olay modellerinden daha hızlı üretilebilmektedir.

Ayrık olay simülasyon aracı olan ARENA, üretim, lojistik, dağıtım, depolama ve hizmet sistemleri dahil olmak üzere birçok endüstriyel sürecin hızlı ve doğru analizini sağlamaktadır. Yazılım, kullanıcıların modeli oluşturmasına ve simülasyon parametrelerini kolayca tanımlamasına olanak tanıyan çok sayıda işlem modülü sağlamaktadır (Law ve Kelton, 2001).

ARENA kullanılarak kara tarafı havalimanı operasyonları ile ilgili olarak hava kargo operasyonlarının değerlendirilmesi Nsakanda ve diğerleri, (2004), terminal binalarında yolcu akışlarının analizi Guizzi ve diğerleri, (2009) ve yolcu check-in prosedürlerinin modellenmesi Appelt ve diğerleri, (2007) gibi çeşitli çalışmalar yapmışlardır. ARENA ile hava tarafı simülasyon çalışmaları, varış trafiği modellemesi Kim ve diğerleri, (2005), kapı ve taksi yolu kapasiteleri ve bunların çevresel etkilerinin analizi Hasan ve diğerleri, (2010) ile sınırlıdır.

İstanbul Havalimanı için kapasite analizi yaparken gelen ve giden uçakların işlem süreleri 1 ay boyunca izlenmiştir ve 25 binden fazla veri kayıt altına alınmıştır. Verilerin içeriği gelen uçaklar arası süre, giden uçaklar arası süre, taksi yolu süreleri ve apronlarda bekleme sürelerini içermektedir. Elde edilen veriler kullanılarak Arena programında modelleme çalışması yapılmıştır.

Simülasyon modelleri genellikle uçak, yolcu veya araçlarla ilgili çok ayrıntılı tahminlere ihtiyaç duyulduğunda kullanılır. Bu modeller, yolcuların, uçakların veya araçların nasıl yönlendirileceğini belirleyen kesin kurallar koyar ve ardından sonuçları bir araya getirir, böylece karar vericiler, tahmini talebi karşılamak için havalimanının herhangi bir bileşeninin ihtiyaçlarını değerlendirebilir.

Uçak başına ortalama beklenen gecikme, sistemin performansını ölçmek için önemli bir çıktıdır. Verilen sistem için iki tür gecikme vardır: yerdeki ve havadan gelen gecikmeler. Ortalama yer gecikmesi, her uçak için kalkış kuyruğu noktasında ortalama bekleme süresini sağlamaktadır. Ortalama havada kalma gecikmesi ise, giriş kapısında son yaklaşıma başlamadan önce her uçak için ortalama bekleme süresini vermektedir. Kuyruk uzunluğu, kalkış için kalkış kuyruğu noktasında veya iniş için giriş kapısında bekleyen uçakların sayısını temsil etmektedir. Kuyruk uzunluğu, verilen simülasyon süresi için kuyrukta bekleyen uçakların zaman-ortalama ve maksimum sayısı olarak ifade edilebilir. Bunlar, verilen operasyon senaryosu için sistemdeki olası tıkanıklıkların konumunu ve büyüklüğünü belirlemek için kullanışlıdır. Son sistem çıktısı olan pist kullanımı, kalkış veya iniş operasyonları için pistin meşgul olduğu sürenin oranı olarak tanımlanabilir. Pistin aşırı derecede tıkalı olup olmadığını veya kapasitesinin altında kullanılıp kullanılmadığını belirlemede oldukça faydalıdır. Modeli tanımlarken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Pist ve son yaklaşma yolu için aynı anda uçak doluluğuna izin verilmez.
- Gelen uçak, son yaklaşma yolunda sabit bir hıza sahiptir.
- Pist öncelikle yolcu uçaklarına hizmet eder.
- Güvenli ayırma VFR standartlarına Horonjeff ve diğerleri, (2010) göre belirlenir.
- İniş veya kalkış talebinin sürekli olduğu varsayılır.
- Rüzgârın yönündeki ve büyüklüğündeki değişiklikler dikkate alınmaz.

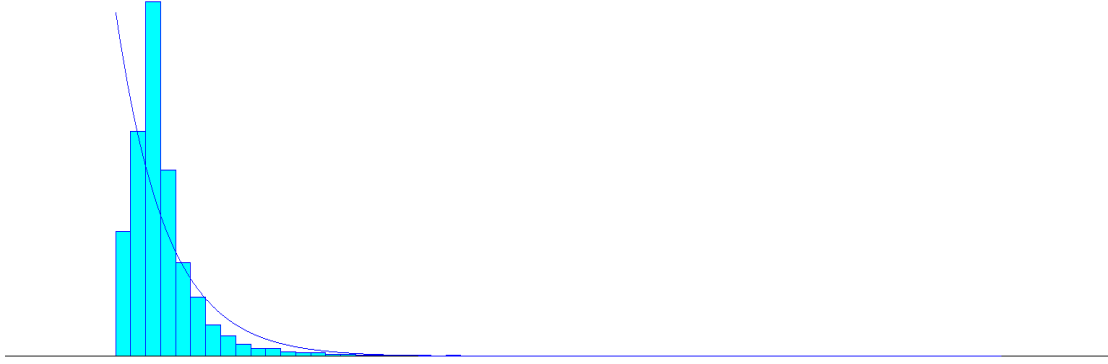
3. Bulgular

İstanbul Havalimanı için yapılan simülasyon modelini çalıştırmak için uçakların varışlar arası süreleri, taksi yolu süreleri ve apron süreleri gerekmektedir. Varışlar arası süre, pist sistemine arka arkaya giren herhangi iki uçak arasındaki sürelerdir. Kalkan uçaklar ve inen uçaklar için ayrı ayrı veriler toplanmıştır. Üstel dağılım, varışlar arası zamanları modellemek için kullanılmıştır. Gelen uçaklar için 1 aylık süre içerisinde 12016 veri toplanmış ve bunların analizi yapılmıştır. Toplanan tüm verilerin hangi tür dağılıma uygunluk gösterip göstermediği Ki-kare uygunluk testi yapılmış ve Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. Havalimanı işlem süreleri dağılım listesi

İşlem Adı	Dağılım ve Parametre	Zaman Birimi
Gelen Uçaklar Arası Süreler	-0,5 + EXPO (3,35)	Dakika
Giden Uçaklar Arası Süreler	-0,5 + EXPO (3,12)	Dakika
Yolcu ve Yük Boşaltma İşlem Süreleri	UNIF (20,30)	Dakika
Yolcu ve Yük Yükleme İşlem Süreleri	UNIF (20,30)	Dakika
Gelen Uçakların Pistte Kalma Süreleri	TRIA (0,42 0,624 1,38)	Dakika
Kalkan Uçakların Pistte Kalma Süreleri	TRIA (0,68 1,24 1,58)	Dakika
Taksi Yolu Süreleri	EXPO (10)	Dakika

Tablo 1’de gösterilen gelen uçaklara ve giden uçaklara ait süre dağılımları Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir. Şekil 2 ve şekil 3 dikkatle incelenirse, zaman içerisinde gelen uçakların dağılımının üstel dağılıma uyduğu rahatlıkla görülebilir. X zaman eksenini boyutunda uçakların ortalama yoğunlukları veri girdi analizi ile belirlenmiştir.

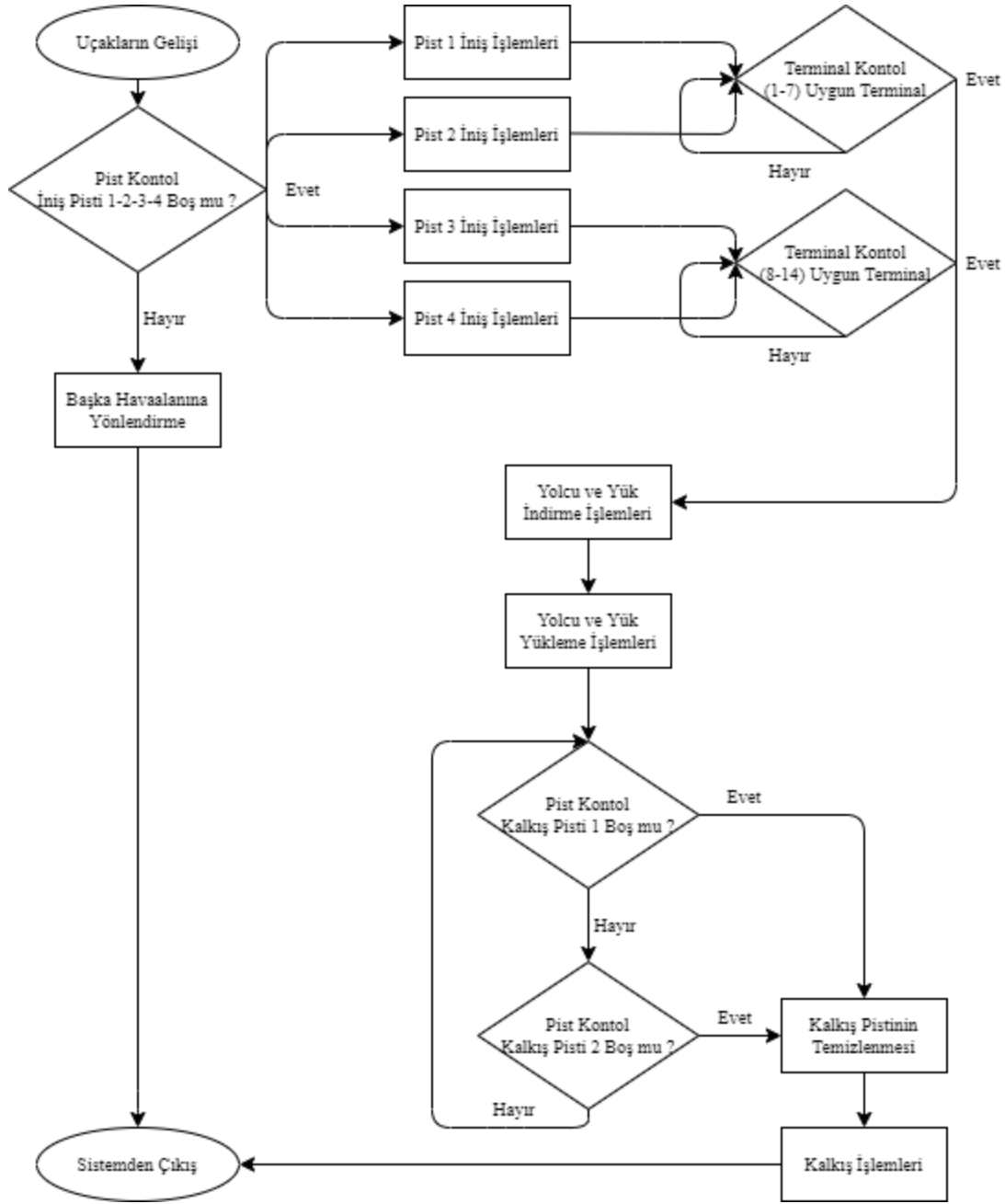


Şekil 2. Gelen uçaklar arası sürelerin dağılımı



Şekil 3. Giden uçaklar arası sürelerin dağılımı

İstanbul Havalimanı için bitmesi planlanan pistlerle birlikte planlanan kapasitesine ulaşmasına yönelik önerilen model ile ilgili yapılan çalışmanın süreç akış şeması Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. İstanbul havalimanı süreç akış şeması

Modelde toplam 6 pist bulunmaktadır. Bunlardan 4'ü iniş pisti olarak 2'si kalkış pisti olarak ele alınmıştır. İstanbul Havalimanı tamamlandığında 2 ayrı terminale kavuşacaktır. İlk 2 iniş pistine ve 1 kalkış pistine sahip olan terminal hali hazırda kullanıma açık olan terminaldir. İkinci terminalin açılışı henüz gerçekleşmemiş olup modelde gerçekleşmesi durumundaki senaryo incelenmiştir. Uçaklar havadayken kule ile iletişime geçerek boş pist varsa inişe geçmektedirler aksi halde başka havaalanına yönlendirilmektedir. İniş pisti karar modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.

Doluluk yoksa, uçak son yalaşma ve iniş aşamalarından geçebilir. Kalkış işlemlerinde de benzer şekilde, pistte veya taksi yolunda herhangi bir uçak varsa kalkışa izin verilmez. İnen uçak sayısı, kalkan uçak sayısı, gelen ve giden yolcu sayısı, uçağın havada ortalama bekleme zamanı, pistlerin boş ve dolu kalma yüzdeleri, terminallerin boş ve dolu kalma yüzdeleri tek tek hesaplanır ve modelde ayrı ayrı gösterilir. Kalkış işlemi tamamlanan her uçak Dispose modülü kullanarak simülasyondan çıkar.

Tablo 2. Simülasyon sonuçları

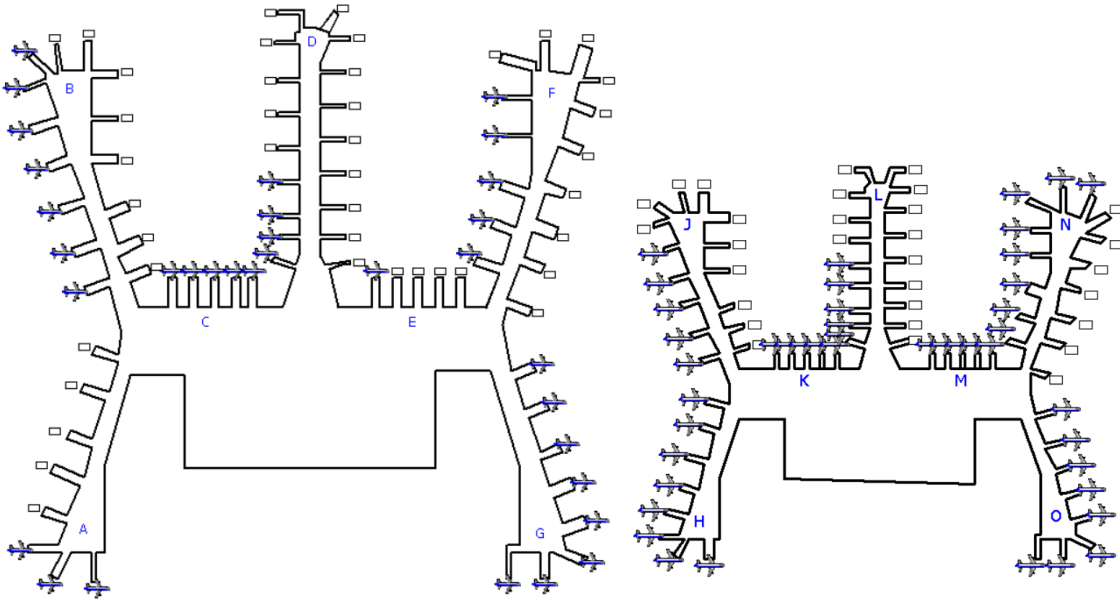
Simülasyon Uzunluğu (gün)	İnen Uçak Sayısı	Gelen – Giden Yolcu Sayısı	Uçağın Havada Ortalama Bekleme Zamanı (saat)
365	357,316	129,968,000	0,015

Model 365 gün 30 tekrar ısınma periyodu 1 hafta olarak çalıştırılmıştır. Sonuç olarak 357,316 adet uçak 1 yıl içerisinde havalimanına iniş yapmıştır. Havalimanının yolcu kapasitesi 129,968,000 olarak bulunmuştur. Modelin çalışmasına ait sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Gelen uçakların ortalama havada bekleme zamanı 0,015 saat olarak bulunmuştur. Uçakların bekleme zamanları dikkate alındığında pist sayısının gelen ve kalkan uçaklar için yeterli sayıda olduğu açıkça görülmektedir.

Tablo 3. Pist kullanımı doluluk yüzdeleri

İniş Pistleri	Doluluk (%)	Kalkış Pistleri	Doluluk (%)
Pist 1	25,660	Pist 1	53,165
Pist 2	35,523	Pist 2	30,460
Pist 3	45,125		
Pist 4	40,125		

Pistlerin kullanımına ait sonuçlar Tablo 3’te gösterilmiştir. 1 yıllık simülasyon sonucunda iniş ve kalkış pistlerinin doluluk oranlarının yeterli düzeyde olduğu ve daha da arttırılabilir olduğu görülmektedir. Havalimanının 4 adet iniş pisti, 2 adet kalkış pisti bulunmaktadır. 2 adet terminal bulunması planlanan İstanbul Havalimanında ilk iki iniş pistleri pist 1 ve pist 2 birinci terminal binasına bağlı bulunmaktadır. Pist 3 ve pist 4 yapılması planlanan ikinci terminal binasına bağlı olarak tasarlanmıştır. Terminallerin modelde oluşturulması Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. İstanbul havalimanı terminallerinin modelde gösterimi

Havalimanında toplam 14 terminal bulunmaktadır ve bu terminallerde bulunan apronların alabildiği toplam uçak kapasitesi 148 adettir. Gelen ve kalkan uçakların hizmet işlemlerinin terminallerde yapıldığı varsayılmıştır. Terminallere ait doluluk yüzdeleri Tablo 4’te verilmiştir. İstanbul Havalimanı için gelecekte yapılması planlanan pistler için oluşturulan senaryo sonucuna göre terminallerdeki doluluk oranları bulunmuştur. Tablo 3’te pistlere ait doluluk oranlarındaki artış yada azalış terminallerdeki doluluk oranlarını etkilemektedir ve aralarında doğru bir orantı olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Terminal doluluk yüzdeleri

Terminal No	Uçak Kapasitesi	Doluluk (%)
Terminal A	8	78,153
Terminal B	15	65,125
Terminal C	5	80,322
Terminal D	18	65,785
Terminal E	5	55,632
Terminal F	15	87,165
Terminal G	8	78,365
Terminal H	8	66,542
Terminal J	15	43,587
Terminal K	5	50,984
Terminal L	18	78,365
Terminal M	5	87,414
Terminal N	15	91,125
Terminal O	8	90,336

4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma, çeşitli senaryolar altında İstanbul Havalimanının kapasitesini analiz etmek için pratik bir ayrık olay simülasyon modeli geliştirmeyi amaçlamıştır. İstanbul Havalimanı uçuş operasyonları için genel bir çerçeve sunmaktadır. Yıllık olarak gelen uçak sayısı, ortalama havada ve yerde gecikmeler, kuyruk uzunluğu ve pist kullanımı analiz için performans ölçütleri olarak seçilmiştir. Simülasyon modeli, pratik ve doğru bir analiz elde etmek için ARENATM programında geliştirilmiştir. Pist verimi, ortalama kara ve havada gecikmeler, kalkış ve gidiş noktası kuyruk uzunlukları, pist kullanımı, terminallerin doluluk yüzdeleri, verilen girdiler için sistem çıktısı olarak değerlendirilmiştir. Modelde kullanılan işlem süreleri, bu çalışma için seçilen İstanbul Havalimanı yerleşim planı ve trafik verilerine göre hesaplanmıştır. Ancak modelin standart özelliklerinden dolayı, boyut ve düzeni ne olursa olsun herhangi bir havalimanı sistemine küçük değişiklikler ile modellenerek uygulanabilir. Ayrıca, hava sahası ve hava tarafı gibi çerçevenin farklı bileşenleri, toplu veya ayrı ayrı analizler yapmak için kullanılabilir. 2019 yılı itibarıyla iç hatlar ve dış hatlar olmak üzere 52 milyon yolcu kapasitesine ulaşmış olan İstanbul Havalimanı model sonuçlarına göre tamamlanması halinde 130 milyon yolcu kapasitesine sahip olacağı tahmin edilmektedir. Bu tahmin 2050 yılına doğru tam kapasite çalışır hale geldiğinde 300 varış noktasına hizmet edecek ve 120 milyon kapasiteye ulaşması düşünülen havalimanının yolcu kapasitesi ile uyumaktadır. Çalışma, gelecekte yapılacak olan çalışmalarda İstanbul Havalimanı için yapılması planlanan pistlerden kaç tanesinin gelen uçaklar ve giden uçaklar için ayrılması gerektiğine yönelik birçok senaryolar oluşturularak havalimanının maksimum potansiyel kapasitenin belirlenmesine katkıda bulunabilir.

Referanslar

- Airport engineering. (1992). Choice Reviews Online, 30(02), 30-0944-30-0944. <https://doi.org/10.5860/CHOICE.30-0944>
- Appelt, S., Batta, R., Lin, L., & Drury, C. (2007). Simulation of passenger check-in at a medium-sized us airport. Proceedings Winter Simulation Conference. <https://doi.org/10.1109/WSC.2007.4419729>
- Barrer, J. N., Kuzminski, P., & Swedish, W. J. (2005). Analyzing the runway capacity of complex airports. Collection of Technical Papers - AIAA 5th ATIO and the AIAA 16th Lighter-than-Air Systems Technology Conference and Balloon Systems Conference. <https://doi.org/10.2514/6.2005-7354>
- Bazargan, M., Fleming, K., & Subramanian, P. (2002). A simulation study to investigate runway capacity using TAAM. Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2, 1235–1243. <https://doi.org/10.1109/WSC.2002.1166383>
- Cetek, F. A., & Cetek, C. (2014). Simulation modelling of runway capacity for flight training airports. Aeronautical Journal. <https://doi.org/10.1017/S0001924000009039>
- Chao, W., Xinyue, Z., & Xiaohao, X. (2008). Simulation Study on Airfield System Capacity Analysis Using SIMMOD. 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design, 87–90. <https://doi.org/10.1109/ISCID.2008.70>
- De Neufville, R., De Barros, A. G., & Belin, S. C. (2002). Optimal configuration of airport passenger buildings for travelers. Journal

of Transportation Engineering. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2002\)128:3\(211\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2002)128:3(211))

Federal Aviation Administration. (2005). Airport Capacity and Delay. In U.S. Department of Transportation.

Guizzi, G., Murino, T., & Romano, E. (2009). A Discrete Event Simulation to model Passenger Flow in the Airport Terminal. *Mathematical Methods and Applied Computing*.

Hansen, M. (2002). Micro-level analysis of airport delay externalities using deterministic queuing models: A case study. *Journal of Air Transport Management*. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(01\)00045-X](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(01)00045-X)

Hasan, S., Long, D., Hart, G., Graham, M., Thompson, T., & Murphy, C. (2010). Integrated analysis of airport capacity and environmental constraints. 10th AIAA Aviation Technology, Integration and Operations Conference 2010, ATIO 2010. <https://doi.org/10.2514/6.2010-9341>

Horonjeff, R., McKelvey, F., Sproule, W., & Young, S. (2010). Planning and Design of Airports. In *TRB Straight to Recording for All*.

Kim, C. J., Akinbodunse, D. A., & Nwakamma, C. (2005). Modeling arrival flight traffic using arena®. 18th International Conference on Computer Applications in Industry and Engineering 2005, CAINE 2005.

Law, A. M., & Kelton, W. D. (2001). Letters to the Editor. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 80(10), 785. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11805447>

Nsakanda, A. L., Turcotte, M., & Diaby, M. (2004). Air Cargo Operations Evaluation and Analysis through Simulation. *Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference, 2004.*, 2, 711–719. <https://doi.org/10.1109/WSC.2004.1371531>

Odoni, A. R., Bowman, J., Delahaye, D., Deyst, J. J., Feron, E., Hansman, R. J., Khan, K., Kuchar, J. K., Pujet, N., & Simpson, R. W. (1997). Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts. *Europe*.

Pitfield, D. E., & Jerrard, E. A. (1999). Monte Carlo comes to Rome: A note on the estimation of unconstrained runway capacity at Rome Fiumucino International Airport. *Journal of Air Transport Management*. [https://doi.org/10.1016/S0969-6997\(99\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0969-6997(99)00012-5)

Vinet, L., & Zhedanov, A. (2011). A “missing” family of classical orthogonal polynomials. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, 44(8), 085201. <https://doi.org/10.1088/1751-8113/44/8/085201>

Zografos, K. G., & Madas, M. A. (2006). Development and demonstration of an integrated decision support system for airport performance analysis. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2006.04.001>